



Behörde für Umwelt,  
Klima, Energie und  
Agrarwirtschaft



**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**

**Fakultät Life Sciences**

Erweiterung der Kosten-Nutzen-Analyse von Regenwasserbehandlungsanlagen um die  
Indikatoren Ökobilanz und Mikroklima

Bachelorarbeit

im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

**Louis Schwien**



Hamburg

am 21. Dezember 2020

**Erstgutachter:** Prof. Dr. Jörn Einfeldt (HAW Hamburg)

**Zweitgutachter:** M. Sc. Christoph Heß (BUKEA)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit der Behörde für  
Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die auf unterschiedliche Art und Weise zur erfolgreichen Erstellung dieser Arbeit beigetragen haben. Zuerst gebührt mein Dank Herrn Christoph Heß. Herr Heß hat mich während meiner Bachelorarbeit betreut und mir mit seiner konstruktiven Kritik und wertvollen Anregungen im gesamten Betreuungszeitraum weitergeholfen. Des Weiteren bedanke ich mich bei meinem Betreuer Prof. Dr. Jörn Einfeldt, der mir entscheidende Kritik und Hinweise zur Fertigstellung dieser Arbeit gegeben hat. Ich bedanke mich auch bei dem Team der brands & values GmbH, die in Zusammenarbeit mit uns die Ökobilanzen unter Zeitdruck erstellt haben. Letztlich richte ich auch ein Dankeschön an meine Freunde und meine Familie, welche mich jederzeit unterstützt haben.

# Inhaltsverzeichnis

I.	Abbildungsverzeichnis.....	V
II.	Tabellenverzeichnis.....	VI
1	Einleitung .....	1
2	Zielsetzung .....	3
3	Theoretische Grundlagen.....	4
3.1	Betrachtete Regenwasserbehandlungsanlagen.....	4
3.1.1	Retentionsbodenfilter .....	4
3.1.2	Sedimentationsrohre ohne und mit Filtration .....	4
3.1.3	AFS 63.....	5
3.2	Ökobilanz.....	5
3.2.1	Was ist eine Ökobilanz? .....	5
3.2.2	Funktionelle Einheit .....	5
3.2.3	Betrachtete Parameter .....	6
3.3	Mikroklima .....	7
3.3.1	Was bedeutet Mikroklima?.....	7
3.3.2	Hitzezunahme in Deutschland .....	8
3.3.3	Wärmeinseleffekt.....	9
3.3.4	Hitzebelastung.....	13
3.3.5	Mögliche Gegenmaßnahmen.....	15
3.3.6	Verdunstung.....	15
3.3.7	Das Schwammstadtprinzip.....	16
3.3.8	Urban Wetlands .....	18
3.3.9	Der Tagesverlauf der Kühlwirkungen.....	21
3.3.10	Situation in Hamburg .....	22
3.3.11	Flurwinde .....	24
4	Material und Methoden.....	26
4.1	Material.....	26
4.2	Methoden.....	26
5	Durchführung.....	27
5.1	Ökobilanz.....	27
5.1.1	Datenerhebung .....	28
5.1.2	Erstellung der Ökobilanzen .....	38
5.2	Mikroklima .....	39
6	Ergebnisse .....	40
6.1	Ergebnisse zur Ökobilanz .....	40
6.1.1	Auswertung der Ergebnisse .....	42
6.2	Ergebnisse zum Mikroklima .....	47

7	Zusammenfassende Bewertung und Ausblick .....	49
7.1	Ökobilanz.....	49
7.1.1	Kritische Beurteilung der Ergebnisse .....	49
7.1.2	Empfehlungen zur Integration in die Kosten-Nutzen-Analyse.....	50
7.2	Mikroklima .....	52
	Literaturverzeichnis.....	54
	Anhang .....	57

# I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Retentionsbodenfilter Quelle: (MUNLV NRW, 2015) .....	4
Abbildung 2: Schaubild eines Sedimentationsrohrs .....	5
Abbildung 3: Markante Hitzewellen seit 1951 Quelle: (Henninger & Weber, 2019) .....	8
Abbildung 4: Regionale Unterschiede der heißen Tage in Deutschland Quelle: (Henninger & Weber, 2019).....	9
Abbildung 5: Mittlere nächtliche Lufttemperatur ausgewählter Strahlungswetterlagen der Stadt Essen. Quelle: (Henninger & Weber, 2019)...	10
Abbildung 6: Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und dem Versiegelungsgrad in München. Quelle: (MVIBW, 2012) .....	11
Abbildung 7: Wärmeinsel der urbanen Oberfläche am Beispiel von Beijing / China (Henninger & Weber, 2019).....	12
Abbildung 8: „Darstellung der vertikalen thermischen Struktur der Stadtgrenzschicht.“ Quelle: (Henninger & Weber, 2019) .....	13
Abbildung 9: Verdunstungskomponenten. Quelle: (DWA-M 504-1, 2018).....	16
Abbildung 10: Schaubild Schwammstadtprinzip. Quelle: (SenStadtUm, 2016).....	17
Abbildung 11: Kühlleistung der Urban-Wetland-Elemente. Quelle: (SenStadtUm, 2016) .....	18
Abbildung 12: Park Jardins des Grands-Moulins. Quelle: (in-foliopaysagistes, 2019).....	20
Abbildung 13: Verdunstungsdiagramm. Quelle: (Domroese, 2007).....	20
Abbildung 14: Abbildung 14: Tagesverlauf der Kühlwirkungen. Quelle: (SenStadtUm, 2016)...	21
Abbildung 15: Simulation einer Strahlungswetternacht in Hamburg zum Zeitpunkt 4 Uhr. Quelle: (GEO-Net, 2012) .....	22
Abbildung 16: Simulation für die Lufttemperatur des Stadtparks.....	23
Abbildung 17: Flurwinde in Hamburg für eine Strahlungswetternacht um 4 Uhr morgens Quelle: (GEO-Net, 2012) .....	24
Abbildung 18: Flurwinde im Hamburger Stadtpark für eine Strahlungswetternacht um 4 Uhr morgens. Quelle: (GEO-Net, 2012) .....	25
Abbildung 19: Anteil des RBF S.2 ohne Pumpwerk vom Referenzszenario .....	43
Abbildung 20: Sedimentationsrohr ohne Filtration im Verhältnis zum Referenzszenario .....	44
Abbildung 21: Sedimentationsrohr mit Filtration im Verhältnis zum Referenzszenario .....	44

## II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlere Evaporationsleistung (DWA-M504-1* und Harlaß, 2009).....	19
Tabelle 2: Material- und Gewichtsangaben zum Retentionsbodenfilter.....	28
Tabelle 3: Annahmen der Dichte .....	30
Tabelle 4:Transport der Materialien des RBF für Szenario 1 .....	30
Tabelle 5: Transport der Materialien des RBF für Szenario 2 .....	30
Tabelle 6: Bauphase des RBF.....	31
Tabelle 7: Nutzungsphase des RBF für Szenario 1 .....	31
Tabelle 8: Nutzungsphase des RBF für Szenario 2 .....	32
Tabelle 9: Entsorgungsphase des RBF.....	32
Tabelle 10: Materialangaben des SoF in Szenario 1 (Lebensdauer 50 Jahre).....	33
Tabelle 11: Materialangaben des SoF in Szenario 2 (Lebensdauer 25 Jahre).....	33
Tabelle 12:Transportphase des SoF in Szenario 1.....	33
Tabelle 13: Transportphase des SoF in Szenario 2.....	34
Tabelle 14: Bauphase des SoF in Szenario 1 .....	34
Tabelle 15: Bauphase des SoF in Szenario 2 .....	34
Tabelle 16: Nutzungsphase des SoF in Szenario in 1.....	34
Tabelle 17: Nutzungsphase des SoF in Szenario 2 .....	35
Tabelle 18: Entsorgungsphase des SoF in Szenario 1.....	35
Tabelle 19: Entsorgungsphase des SoF in Szenario 2.....	35
Tabelle 20: Materialangaben des SmF in Szenario 1 .....	36
Tabelle 21: Materialangaben des SmF in Szenario 2 .....	36
Tabelle 22: Transportwege des SmF in Szenario 1.....	36
Tabelle 23: Transportwege des SmF in Szenario 2.....	36
Tabelle 24: Bauphase des SmF in Szenario 1 .....	37
Tabelle 25: Bauphase des SmF in Szenario 2 .....	37
Tabelle 26: Nutzungsphase des SmF in Szenario 1 .....	37
Tabelle 27: Nutzungsphase des SmF in Szenario 2 .....	37
Tabelle 28: Entsorgungsphase des SmF in Szenario 1.....	38
Tabelle 29: Entsorgungsphase des SmF in Szenario 2.....	38
Tabelle 30: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den RBF in Szenario 1. Quelle: (brands & values, 2020) .....	40
Tabelle 31: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den RBF in Szenario 2. Quelle: (brands & values, 2020) .....	40
Tabelle 32: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den SoF in Szenario 1. Quelle: (brands & values, 2020) .....	41
Tabelle 33: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den SoF in Szenario 2. Quelle: (brands & values, 2020) .....	41
Tabelle 34: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den SmF in Szenario 1. Quelle: (brands & values, 2020) .....	42
Tabelle 35: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den SoF in Szenario 2. Quelle: (brands & values, 2020) .....	42
Tabelle 36: Umweltschadenskosten der ermittelten Indikatoren .....	45
Tabelle 37: Beispiel für die Zusammensetzung der Umweltschadenskosten pro FE für das Referenzszenario.....	45
Tabelle 38: Gesamte Umweltschadenskosten je Szenario pro funktionelle Einheit .....	45
Tabelle 39: Gesamte Umweltschadenskosten der RWBA .....	46
Tabelle 40: Wasserverbrauch der RWBA über 50 Jahre im Vergleich zu dem täglichen Pro-Kopf-Wasserverbrauchs in Deutschlands .....	47
Tabelle 41: Treibhauspotential der RWBA im Vergleich zu den täglichen Pro Kopf CO2 Ausstoßes in Deutschlands .....	47

Tabelle 42: Ranking der "worst case" Umweltschadenskosten der RWBA .....	50
Tabelle 43: Empfohlene Annahme der Umweltschadenskosten für die RWBA .....	51
Tabelle 44: Skala zur Bewertung der Umweltschadenskosten .....	51

# 1 Einleitung

Regen- bzw. Niederschlagswasser stellt die wichtigste Quelle zur Speisung von Oberflächengewässern und Grundwasser dar. Zudem gilt diese Quelle als unersetzlich für die Trinkwasserversorgung und die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit der Ökosysteme. Durch menschliche Aktivitäten ist der natürliche Wasserkreislauf jedoch vielerorts erheblich verändert. So können die Chemie und die Ökologie in Gewässern als Folge einer Einspeisung von Niederschlagswasser negativ verändert werden. Ein Grund dafür ist der häufig hohe Schmutz- und Schadstoffgehalt im Niederschlagswasser, insbesondere aus urbanen Siedlungsgebieten. Zusätzlich kann das Niederschlagswasser zu einer hydraulischen Belastung in den betroffenen Gewässern führen.

Für den Erhalt gesunder Ökosysteme und die Sicherung der Trinkwasserversorgung wurde im Jahr 2000 die Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) der Europäischen Union erlassen. Diese ist das zentrale politische Werkzeug für den Gewässerschutz in der EU und gibt Qualitätsziele für die Gewässer in der Union vor (Heß, 2020). Das Kernziel für Oberflächengewässer (für künstlich und erheblich veränderte Wasserkörper) ist, das „gute ökologische Potential“ sowie den „guten chemischen Zustand“ bis Ende 2027 europaweit zu erreichen (LfU Bayern, 2018).

Für die Freie und Hansestadt Hamburg stellt die unbehandelte Einleitung von Niederschlagswasser eines der Haupthindernisse für die Erreichung dieser Ziele dar (Heß, 2020). Daher ist es vor allem notwendig, dass das Regenwasser gereinigt wird, das von stark verschmutzten und belasteten Straßen stammt. Hierzu können verschiedene Regenwasserbehandlungsanlagen (RWBA) mit unterschiedlichen Reinigungstechnologien verwendet werden, die sich durch mehrere Indikatoren wie z.B. Kosten, Landbedarf oder Reinigungsleistung unterscheiden.

Um diese Anlagen vergleichbar zu machen, wurde von dem Autor dieser Arbeit während eines Praxissemesters bei der Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA) eine Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) für RWBA entwickelt. Die KNA soll bei der Bewertung von RWBA unterstützen.

Die KNA wird in Form eines Punktesystems dargestellt und hat das Ziel, unterschiedliche Anlagentypen zur Behandlung des Niederschlagswassers aus einem Einzugsgebiet miteinander zu vergleichen und zu bewerten. Außerdem sollen gleiche Anlagentypen in unterschiedlichen Einzugsgebieten verglichen werden. Dafür werden verschiedene Indikatoren der Kosten- und Nutzenseite bewertet und gewichtet. Darunter fallen auf der Nutzenseite die Emission, Immission, und soziokulturelle Indikatoren. Auf der Kostenseite werden u.a. der Landbedarf, der finanzielle Aufwand und die Rodung von Bäumen bewertet.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll diese Kosten-Nutzen-Analyse erweitert werden. Es wird untersucht ob und wie die bisher nicht betrachteten Indikatoren Ökobilanz und Mikroklima in der Gesamtbetrachtung berücksichtigt werden könnten.

In Zusammenarbeit mit dem Beratungsbüro brands & values wurden Ökobilanzen für drei häufig verwendete RWBA erstellt. Diese betrachten die Parameter CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, Eutrophierungspotential, Versauerungspotential und Wasserverbrauch. Betrachtet wurden Retentionsbodenfilter und Sedimentationsrohre mit und ohne Filtration. Hervorzuheben ist, dass Anhand dieser Ökobilanzen die Umweltauswirkungen der RWBA betrachtet werden und nicht der Nutzen dieser auf die Umwelt.

Anhand der Ökobilanzen und deren Auswertung soll erörtert werden, ob sich ein deutlicher Unterschied in den betrachteten Parametern der Ökobilanzen feststellen lässt und wie ausschlaggebend dieser Unterschied aus gesamtökologischer Sicht ist. Weiterhin wird untersucht, inwiefern die einzelnen Parameter miteinander verglichen werden können. Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann abschließend bestimmt werden, ob es sinnvoll ist, die Ökobilanz in die KNA der RWBA aufzunehmen und wie die Gewichtung und Bewertung in die Aufwandsseite zu integrieren ist.

In der Stadtplanung stellt das lokale Klima, auch Mikroklima genannt, eine große Herausforderung dar. In urbanen Gebieten kommt es durch das hohe Bauvolumen und den großen Versiegelungsgrad zu starken Lufttemperaturunterschieden zwischen Stadt und Umland. Zudem können sich die Lufttemperaturen in der Stadt lokal auch auf wenige hundert Meter stark unterscheiden. Dieses Phänomen ist auf den sogenannten Wärmeinseleffekt zurückzuführen. Vegetationsflächen können durch ihre Verdunstungsleistung einen kühlenden Effekt auf das bodennahe Klima ausüben (Henninger & Weber, 2019). Dieses kühlende Potential ist wichtig, da zum Beispiel ca. 5 % aller Todesfälle in Berlin von 2001 bis 2010 statistisch mit erhöhten Lufttemperaturen (Hitzestress) zusammenhängen (Scherer, et al., 2013).

In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob ein Retentionsbodenfilter den Wärmeinseleffekt und den Hitzestress in Städten mindern kann. Außerdem soll beurteilt werden, ob dieser mögliche positive Effekt so groß ist, dass das Mikroklima als Indikator in die Bewertung von RWBA aufgenommen werden sollte.

## 2 Zielsetzung

In diesem Kapitel wird die Zielsetzung dieser Bachelorarbeit durch die Kernfragen vorgestellt und in die Schwerpunkte Ökobilanz und Mikroklima unterteilt.

### **Ökobilanz**

1. Lässt sich für die betrachteten Regenwasserbehandlungsanlagen ein deutlicher Unterschied bei den ausgewählten Parametern der Ökobilanz feststellen und wie ausschlaggebend ist dieser Unterschied aus ökologischer Sicht?
2. Lassen sich die einzelnen Parameter miteinander vergleichen?
3. Ist es sinnvoll den Indikator Ökobilanz zur Bewertung von RWBA in die Kosten-Nutzen-Analyse aufzunehmen und wenn ja, wie sollte die Gewichtung und Bewertung aussehen?

### **Mikroklima**

4. Lässt sich durch einen Retentionsbodenfilter der Wärmeinseleffekt in Städten, sowie die Hitzebelastung, die durch erhöhte Lufttemperatur entsteht, in relevantem Ausmaß mindern?
5. Ist dieser potenzielle positive Effekt so groß, dass dieser in die Bewertung von RWBA in der Kosten-Nutzen-Analyse aufgenommen werden sollte?

## 3 Theoretische Grundlagen

### 3.1 Betrachtete Regenwasserbehandlungsanlagen

In diesem Abschnitt werden die Regenwasserbehandlungsanlagen, Retentionsbodenfilter (RBF), Sedimentationsrohr ohne Filtration (SoF) und Sedimentationsrohr mit Filtration (SmF), betrachtet und ihre grundlegenden Funktionen sowie der Stoffparameter AFS63 vorgestellt.

#### 3.1.1 Retentionsbodenfilter



Abbildung 1: Retentionsbodenfilter Quelle: (MUNLV NRW, 2015)

Ein Retentionsbodenfilter (Abbildung 1) ist eine vertikal durchströmte Filteranlage, die zum Boden hin versiegelt ist. Im Retentionsraum, über dem Filter, wird der Zufluss, das Regenwasser, gespeichert und durchfließt anschließend langsam vertikal die Filterschicht und wird über das Drainagesystem dem Ablaufwerk zugeführt, wo der Abfluss geregelt wird. Die vegetationsbewachsene Filterschicht ist meistens

mit Schilf bewachsen, das als dominante Pflanze Fremdbewuchs unterdrückt und zudem zum Kolmationsschutz beiträgt (MUNLV NRW, 2015).

Die Filterfläche eines RBF fällt nach Regenereignissen immer wieder trocken. Dies ist nach Erfahrungen der BUKEA auch notwendig, um Kolmation zu verhindern, da es sonst zur Verringerung der Reinigungsleistung kommt. Allerdings besteht bei RBF grundsätzlich auch die Möglichkeit, einen Dauerstau einzustellen und so ein Trockenfallen in den Sommermonaten zu verhindern bzw. zu reduzieren (ifs, 2017).

#### 3.1.2 Sedimentationsrohre ohne und mit Filtration

Sedimentationsrohre sind dezentrale technische Anlagen, welche zur Reinigung von Straßenabflüssen entwickelt wurden. Diese können direkt im Einzugsgebiet unterhalb der Straßenflächen verbaut werden und weisen damit einen sehr viel geringen Flächenbedarf auf. Neben der Fähigkeit durch Sedimentation Teile der vorhandenen Feststoffe im Niederschlagswasser zu reinigen (siehe Abbildung 2), kann durch eine nachgeschaltete Filtration die Reinigungsleistung gesteigert werden („Sedimentationsrohr mit Filtration“) (Schmitt, et al., 2006).

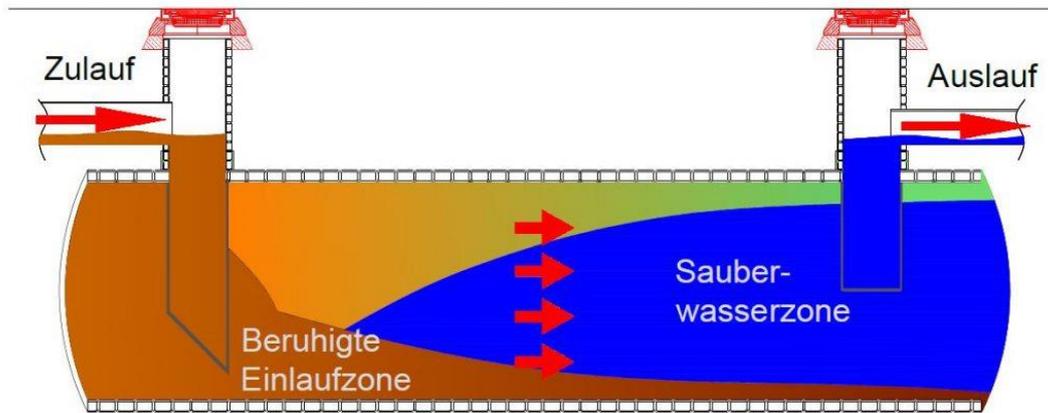


Abbildung 2: Schaubild eines Sedimentationsrohrs Feststoffe lagern sich an der Sohle ab (Sedimentation). Quelle: (Sabug, 2020)

### 3.1.3 AFS 63

Zur Bewertung der Verschmutzung von Niederschlagswasser und der daraus resultierenden Gewässerbelastung sowie zur Bewertung der Reinigungsleistung von RWBA hat sich der Stoffparameter AFS63 durchgesetzt. Dieser beschreibt den Anteil von Partikeln mit einem Durchmesser von 0,45  $\mu\text{m}$  bis 63  $\mu\text{m}$  im Niederschlagswasser. Dieser Feststoffanteil beinhaltet einen Großteil der an Feststoffen sorbierten Schadstoffe, wie Schwermetalle und organische Schadstoffe (DWA-A 102-1, 2020).

## 3.2 Ökobilanz

In diesem Abschnitt wird das grundlegende Prinzip einer Ökobilanz erklärt, sowie die vier betrachteten Parameter vorgestellt, die für die Auswertung der Ökobilanzen benutzt wurden. Die Methode zur Erstellung von Ökobilanzen ist detailliert in DIN EN ISO 14040 beschrieben.

### 3.2.1 Was ist eine Ökobilanz?

Eine Ökobilanz analysiert die Umweltaspekte und -wirkungen eines Produktsystems (Klöpffer & Grahl, 2007). Ein Produktsystem wiederum beschreibt alle Prozesse sowie die zugehörigen stofflichen und energetischen Flüsse von einem Produkt auf seinem kompletten Lebensweg, also von der Rohstoffgewinnung über Produktion und Nutzung bis hin zur Beseitigung (UBA, 2012). Eine Ökobilanz ist über die Normen ISO EN 14040 und 14044 definiert (Klöpffer & Grahl, 2007).

### 3.2.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit ist nach DIN EN ISO 14040 definiert als der „quantifizierte Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“ (DIN EN ISO 14040 S.10). Wichtig dabei ist, dass die Festlegung Systeme mit vergleichbarem Nutzen und nicht die Produkte selbst vergleicht. So ist ein Beispiel für eine funktionelle Einheit das Bereitstellen von 1.000 Liter Flüssigkeit. Diese Funktion kann zum Beispiel durch 10.000 0,1-Liter Beutel, 1.000 1-Liter PET Mehrwegflaschen oder 500 2-Liter Einwegverbundkartons erfüllt werden. Hierbei wird nur der

Nutzen des Bereitstellens von 1.000 Liter Flüssigkeit verglichen und nicht der Nutzen wie Gewicht, Benutzerfreundlichkeit, Ästhetik oder ähnliches. Die funktionelle Einheit kann bis zu einem gewissen Grad willkürlich sein (Klöpffer & Grahl, 2007).

### 3.2.3 Betrachtete Parameter

Um die Umweltauswirkungen von RWBA zu analysieren werden in Ökobilanzen quantitative Bewertungen zu Hilfe genommen, welche über Parameter definiert sind und in der Wirkungsabschätzung berechnet werden. In dieser Arbeit wurden folgende Parameter zur Bewertung der Umweltauswirkungen gewählt: Das Treibhauspotential, welches politisch ein sehr diskutiertes Thema ist. Außerdem das Eutrophierungspotential, das Versauerungspotential und der Wasserverbrauch, diese stellen aus wasserwirtschaftlicher Sicht wichtige Parameter dar.

#### 3.2.3.1 Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP)

Das Treibhauspotential gibt den relativen Beitrag eines Stoffes auf den so genannten Treibhauseffekt an. Dieser beschreibt die Erwärmung der bodennahen Luftschichten der Atmosphäre. So wird der Beitrag des Stoffes als GWP Wert, in dieser Arbeit GWP100, angegeben. Dieser mittelt den Beitrag eines Stoffes auf den Treibhauseffekt über den Zeitraum von 100 Jahren. Der GWP-Wert beschreibt den Beitrag eines Stoffes im relativen Vergleich zu Kohlendioxid und wird in CO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben (BMVBS<sup>1</sup>, 2013).

#### 3.2.3.2 Eutrophierungspotential

Eutrophierung (Überdüngung) beschreibt die Änderung von einem oligotrophen (nährstoffarmen) in einen eutrophen (nährstoffreichen) Zustand von Böden und Gewässern. Die Hauptursache für Eutrophierung sind Phosphor- und Stickstoffverbindungen. In Gewässern beispielsweise kann diese Zunahme der vorhandenen sowie verfügbaren Nährstoffe zu starker Algenbildung führen. Die Folge ist Sauerstoffmangel und damit einhergehendes Fischsterben. In Ökobilanzen werden diese Stoffe über das PO<sub>4</sub>-Äquivalent zusammengefasst und unter dem Punkt Eutrophierungspotential betrachtet (BMVBS<sup>2</sup>, 2011).

#### 3.2.3.3 Versauerungspotential

Unter der Versauerung versteht man die Zunahme von H<sup>+</sup> - Ionen in Luft, Wasser und Boden. Versauerung kann zu Schäden an Böden, Gewässern, Lebewesen, sowie an Gebäuden führen. Bei Böden kann es zur Auswaschung von Nährstoffen und bei Pflanzen zu Wurzelschäden kommen, beides trägt zum Waldsterben bei. Bei Gewässern mit geringer chemischer Pufferkapazität führt die Versauerung zu Fischsterben. Allgemein werden versauernd wirkende Emissionen in Ökobilanzen unter dem Punkt Versauerungspotential zusammengefasst und über das SO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben. Beispiele für diese Emissionen sind oxidierte Schwefelverbindungen (SO<sub>x</sub>), oxidierte Stickstoffverbindungen (NO<sub>y</sub>) oder reduzierte Stickstoffverbindungen (NH<sub>x</sub>) (BMVBS<sup>3</sup>, 2013).

Diese durch anthropogene Emissionen (Verkehr, Kraftwerke etc.) verursachten Schwefel- und Stickstoffverbindungen reagieren in der Luft zu Schwefel- bzw. Salpetersäure (H<sup>+</sup>-Donatoren). So können sie bis zu mehrere 1000 km durch die Luft transportiert werden, bevor sie als „saurer Regen“ zur Erde fallen (Klöpffer & Grahl, 2007).

#### 3.2.3.4 Wasserverbrauch

Der Wasserverbrauch wird in der Ökobilanz durch den „blue water footprint“ ermittelt, auch „Blaues Wasser“ genannt. Dies ist ein Indikator, der den Verbrauch von Süßwasser aus Oberflächen- und Grundwasser zur Herstellung von Waren und Dienstleistungen beschreibt. Er umfasst das in Produkten enthaltene Wasser, das verdunstete Wasser, sowie das Wasser, welches nicht im gleichen Einzugsgebiet sowie zu einem anderen Zeitpunkt zugeführt wird (Čuček, 2015).

### 3.3 Mikroklima

In diesem Abschnitt der theoretischen Grundlagen wird die Bedeutung von Mikroklima erklärt, welche wachsenden Probleme es durch urbane Hitze in deutschen Städten gibt und welche Maßnahmen dafür entwickelt wurden.

#### 3.3.1 Was bedeutet Mikroklima?

Der DWD (2020) definiert Klima als „die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem mehr oder weniger großen Gebiet charakterisieren“. Es wird beschrieben durch die Klimaelemente Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Luftdruck, Wind, Bewölkung und Strahlung (MVIBW, 2012).

Unter Mikroklima wird das spezielle Klima eines Areals verstanden, das sich in bodennahen Luftschichten bildet und stark von den vorhandenen Oberflächen (Untergrund, Bewuchs, Bebauung) beeinflusst wird. Pflanzenbewuchs oder verschiedene Geländeformen können dabei auf kleinem Raum bereits große Unterschiede in der Temperatur und der Windgeschwindigkeit verursachen. Zum Beispiel kann es an Sommertagen über einer Asphaltdecke mehrere Grad wärmer sein als auf einer benachbarten feuchten Wiese. Außerdem kann es bei klaren Nächten zu signifikanten Temperaturunterschieden bereits auf kleinem Raum kommen, da der Energieverlust von Oberflächen durch ihre unterschiedliche nächtliche Ausstrahlung beeinflusst wird (DWD, 2020).

In der freien Landschaft ist das Klima hauptsächlich von natürlichen Gegebenheiten abhängig. In Stadtlandschaften wird das Klima dagegen durch unnatürliche Gegebenheiten wie Bauwerke beeinflusst. Damit sind zum Teil erhebliche Probleme verbunden, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

### 3.3.2 Hitzezunahme in Deutschland

Durch den Klimawandel nimmt die Zahl der Wetterextreme wie urbane Hitze (Hitzetage/Tropennächte) mit der Zeit zu (SenStadtUm, 2016).

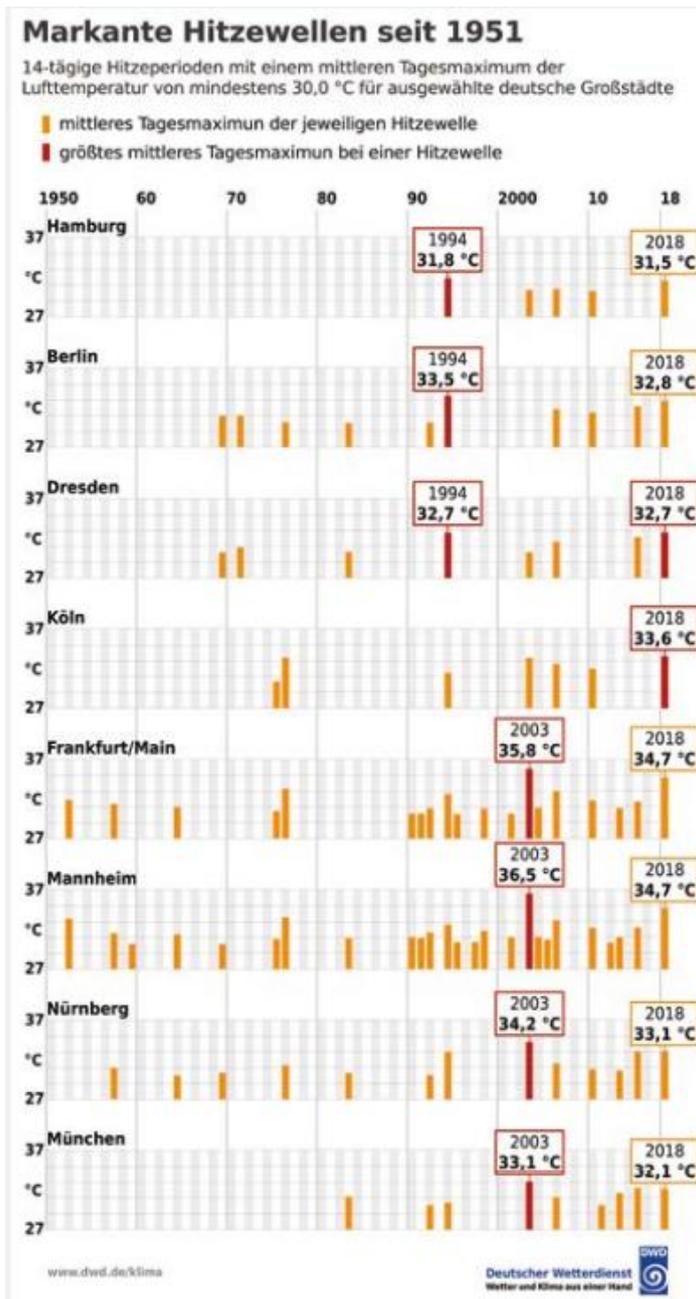


Abbildung 3: Markante Hitzewellen seit 1951 Quelle: (Henninger & Weber, 2019)

Die Anzahl der Hitzetage, also Tage an denen die Tageshöchsttemperatur mehr als 30 °C beträgt, ist im Flächenmittel von Deutschland seit 1951 von etwa drei Tagen im Jahr auf heute zehn Tage pro Jahr angestiegen. Vor 1994 gab es seit Beginn der Wetteraufzeichnungen nie mehr als 10 Hitzetage pro Jahr. Auch die Anzahl der markanten Hitzewellen ist deutlich gestiegen (Abbildung 3). Es ist zu erkennen, dass sowohl im Süden als auch im Norden sowohl die Intensität als auch die Häufigkeit der Hitzeperioden zunimmt. Vor allem treten Hitzewellen seit den 1990er Jahren vermehrt auf. Wie am Beispiel von Hamburg zu erkennen ist, kommen solche Hitzewellen erst seit 1994 vor. Vor allem die Hitzetage und Tropennächte (Nächte über 20°C) werden in den Städten zusätzlich durch den sogenannten Wärmeinseleffekt, der im folgenden Abschnitt erklärt wird, verstärkt (UBA<sup>1</sup>, 2019).

Zudem sind auch die großen räumlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen Deutschlands gut zu erkennen. So gab es im Zeitraum von 1959-1968 in den meisten Regionen nur zwischen null und vier heiße Tage pro Jahr (Abbildung 4). Lediglich südlich von Berlin und entlang des Rheingrabens traten 4 bis 8, vereinzelt auch bis zu 10 heiße Tage auf. Zwischen 2009 - 2018 traten hingegen einzig hoch im Norden Deutschlands nur noch null bis vier heiße Tage auf. Die Deutschlandkarte ist mittlerweile weißlich und gelb geprägt (Abbildung 4, 2009-2018), dies entspricht mehr als 4 bis weniger als 14 Hitzetagen im Jahr. Zudem sind einige roten Flecken

vertreten, die insbesondere im Rhein-Main-Gebiet sowie im Osten Deutschlands vorkommen. Diese Flecken stehen für mehr als 14 bis weniger als 20 bzw. 22 heiße Tage. Zu beachten ist, dass der Rekordsommer von 2019 bei diesen Daten noch nicht berücksichtigt wurde (UBA<sup>1</sup>, 2019) .

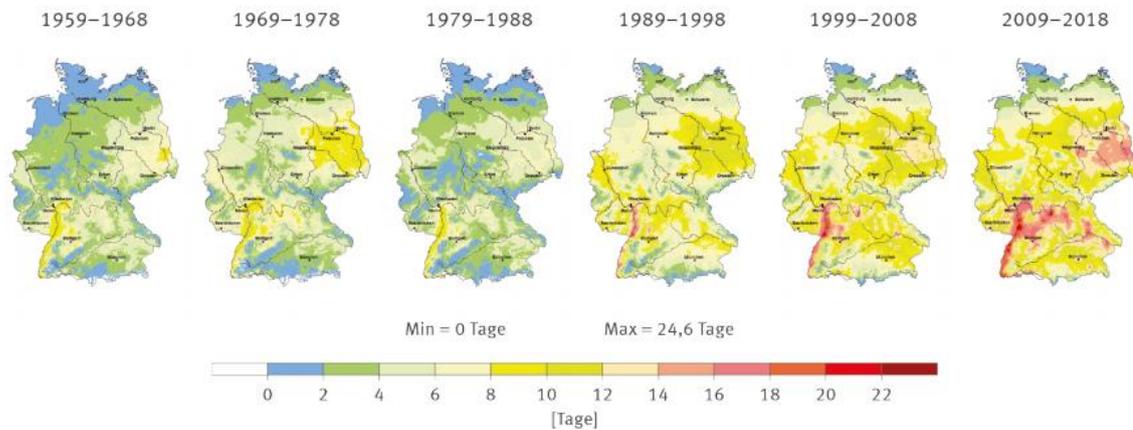


Abbildung 4: Regionale Unterschiede der heißen Tage in Deutschland Quelle: (Henninger & Weber, 2019)

### 3.3.3 Wärmeinseleffekt

Beim Wärmeinseleffekt werden vier Typen von Wärmeinseln anhand ihrer Entstehungsmechanismen unterschieden:

1. Wärmeinsel der Stadthindernisschicht engl. *canopy layer urban heat island* ( $\text{UHI}_{\text{UCL}}$ ).
2. Wärmeinsel der urbanen Oberfläche engl. *surface urban heat island* ( $\text{UHI}_{\text{SFC}}$ ).
3. Wärmeinsel der Stadtgrenzschicht *boundary layer urban heat island* ( $\text{UHI}_{\text{UBL}}$ ).
4. Wärmeinsel des Untergrundes engl. *subsurface urban heat island* ( $\text{UHI}_{\text{SUB}}$ ).

Unter der **Wärmeinsel der Stadthindernisschicht** ( $\text{UHI}_{\text{UCL}}$ ) versteht man eine positive Lufttemperaturdifferenz der bodennahen Luftschicht zwischen dem Umland und der Stadt. Dieser kann als der „klassische Wärmeinseleffekt“ bezeichnet werden, wobei die maximalen Ausprägungen der Temperaturunterschiede nachts im Sommer zu messen sind.

So wurden zum Beispiel maximale Lufttemperaturunterschiede in Montreal von 12,0 °C oder in München von 8,2 °C gemessen (Henninger & Weber, 2019).

Der  $\text{UHI}_{\text{UCL}}$  führt dazu, dass Tropennächte in stark bebauten Gebieten mehr als 3-mal so oft vorkommen wie auf Freiflächen (UBA<sup>2</sup>, 2020).

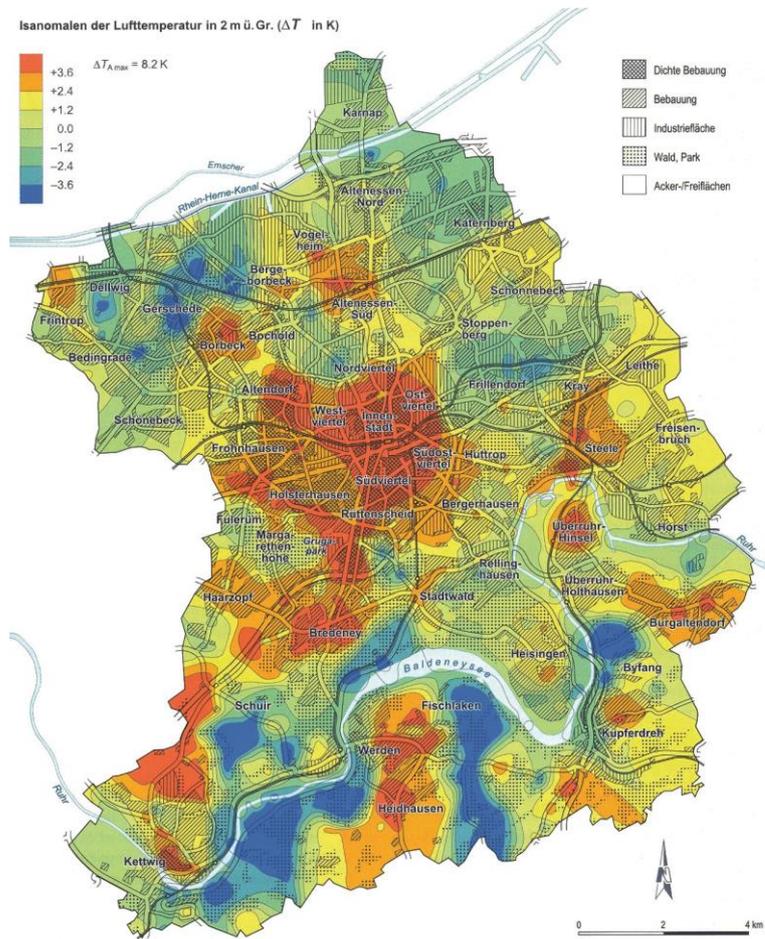


Abbildung 5: Mittlere nächtliche Lufttemperatur ausgewählter Strahlungswetterlagen der Stadt Essen. Quelle: (Henninger & Weber, 2019). Die unterschiedlichen farblichen Flächen zeigen die Lufttemperaturdifferenz im Vergleich zu einer Referenzklimastation im Umland.

Die  $UHI_{UCL}$  korreliert stark mit dem Versiegelungsgrad bzw. der Bebauungsdichte der Stadt. Die Überwärmung nimmt in der Regel vom Stadtrand zum Stadtkern zu, da dort die Bebauungsdichte üblicherweise am höchsten ist. Dort wird auch meist das Temperaturmaximum gemessen. Zudem lassen sich häufig mehrere Überwärmungskerne innerhalb einer Stadt identifizieren (Abbildung 5). Für dieses Phänomen wird der Begriff „Wärmechipels“ verwendet. Kleinräumig kann es auch im bebauten Bereich zu Temperaturunterschieden kommen, zum Beispiel durch Freiflächen oder Parkanlagen (Henninger & Weber, 2019).

Strahlungswetterlagen sind Hochdruckgebiete, welche kaum bis gar nicht bewölkt sind und nur mäßig bis kaum Wind ausweisen. Daher ist die Energiebilanz hauptsächlich durch die lokale Oberfläche-Atmosphäre-Wechselwirkung geprägt und nicht durch Luftmassen, welche durch hohe Windgeschwindigkeiten herantransportiert werden, oder ähnliche übergeordnete Prozesse (ebd.).

Die wesentlichen Aspekte für die Lufttemperaturunterschiede sind nach Henninger und Weber (2019, S.101):

- die erhöhte kurzwellige Strahlungsabsorption der städtischen Baumaterialien, die mit geringer Albedo (Albedo ist ein Maß für das Rückstrahlungsvermögen von Oberflächen) und hohen Oberflächentemperaturen einhergeht
- die erhöhte Aufteilung der Energie zugunsten sensibler (fühlbarer) Wärme aufgrund des hohen Versiegelungsgrads und des geringen Anteils vegetationsbestandener Flächen und Freiflächen

- die verzögerte Wärmeabgabe an die nächtliche Grenzschicht als Folge der hohen Wärmekapazitätsdichte der urbanen Materialien
- die verringerte effektive Ausstrahlung langwelliger Strahlen

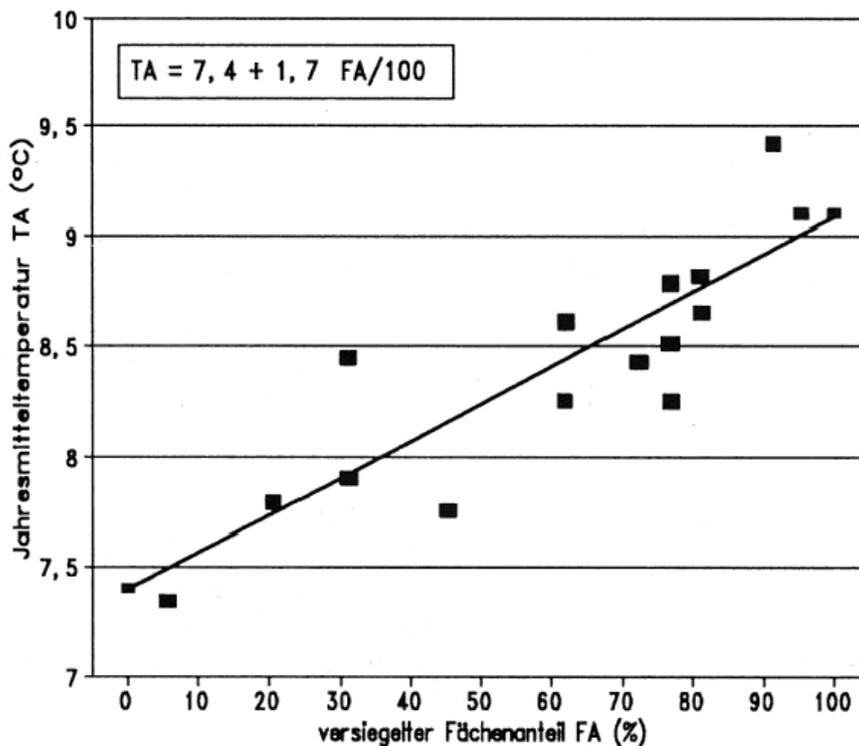


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und dem Versiegelungsgrad in München. Quelle: (MVIBW, 2012)

Messungen in München bestätigen diese Aspekte und sind zu dem Ergebnis gekommen, dass der Mittelwert der Lufttemperaturen in den Stadtvierteln von München vom Versiegelungsgrad abhängt (Abbildung 6).

Pro 10% Versiegelungsgrad steigt der langfristige Mittelwert der Lufttemperatur um ca. 0,2 °C gegenüber unbebauter Umgebung. Bei Strahlungswetterlagen kann dieser Wert sogar um 0,3-0,4 °C steigen, das mittlere Tagesmaximum und das mittlere Tagesminimum der Lufttemperatur kann bei diesen Bedingungen sogar um ca. 0,3 °C bzw. um 0,5-0,6 °C pro 10% Versiegelungsgrad von der unbebauten Umgebung abweichen (MVIBW, 2012).

Die **Wärmeinsel der urbanen Oberflächen** ist definiert „durch eine positive Differenz der Oberflächentemperaturen ( $\Delta T$ ) im Vergleich zwischen Stadt und Umland“ (Henninger & Weber, 2019, S.98). Der ( $UHI_{SFC}$ ) wird durch die Messung der Oberflächenstrahlungstemperatur erfasst, dabei werden Satellitendaten oder Daten aus Luftbildern verwendet (Henninger & Weber, 2019).

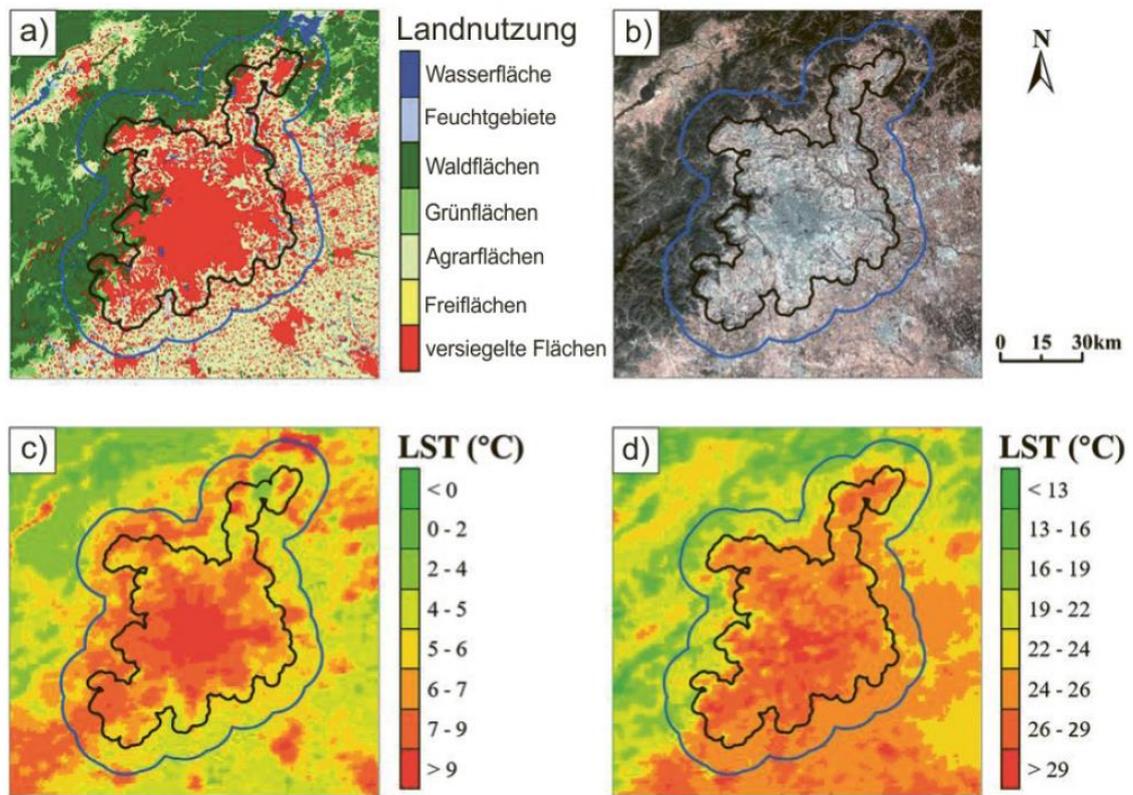


Abbildung 7: Wärmeinsel der urbanen Oberfläche am Beispiel von Beijing / China (Henninger & Weber, 2019). Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze, die blaue Linie zeigt das Vorstadt Gebiet. (a) Klassifizierte Landnutzung (b) Satellitenaufnahme Beijing aus 2015 (c) Jahresmitteltemperaturen der Oberflächen bei Nacht (d) Jahresmitteltemperaturen der Oberflächen bei Tag

Da viele urbane Oberflächenarten (z.B. Beton, Asphalt, versiegelte Flächen, Dächer) geringe Albedo und Wärmeleitfähigkeit besitzen, absorbieren diese kurzweilige Einstrahlung sehr wirksam. Aus diesem Grund kann es in Sommermonaten während den Tagesstunden zwischen Stadt und Umland zu mehr als 10°C Oberflächentemperaturunterschieden kommen (Abbildung 7).

Die Wärmeinsel der urbanen Oberflächen überschneidet sich deutlich mit der Verteilung versiegelter Flächen (Abbildung 7 a, c und d). Deshalb wird der Begrünungsgrad bzw. der Versiegelungsgrad einer Stadt als Steuerungsmechanismus der Oberflächentemperatur angesehen (Henninger & Weber, 2019).

Unter der **Wärmeinsel der Stadtgrenzschicht** ( $UHI_{UBL}$ ) versteht man das „Überwärmungsphänomen mit einer vertikalen Erstreckung in die atmosphärische Grenzschicht über der Stadt sowie auf der windabgewandten Seite der Stadt“ (ebd., S. 110).

Die  $UHI_{UBL}$  entsteht durch den Transport von Wärme von den wärmeren Stadtoberflächen sowie die Wärmeabgabe der bodennahen Luftschichten an die bodennahe Atmosphäre. Dieser kann während der Tagesstunden über 1000 m gewaltig sein, schwächt sich nachts jedoch auf wenige hundert Meter ab (Abbildung 8). Die größten Lufttemperaturunterschiede ausgelöst durch den  $UHI_{UBL}$  treten in den Nachtstunden auf und betragen 1-3 °C (Henninger & Weber, 2019).

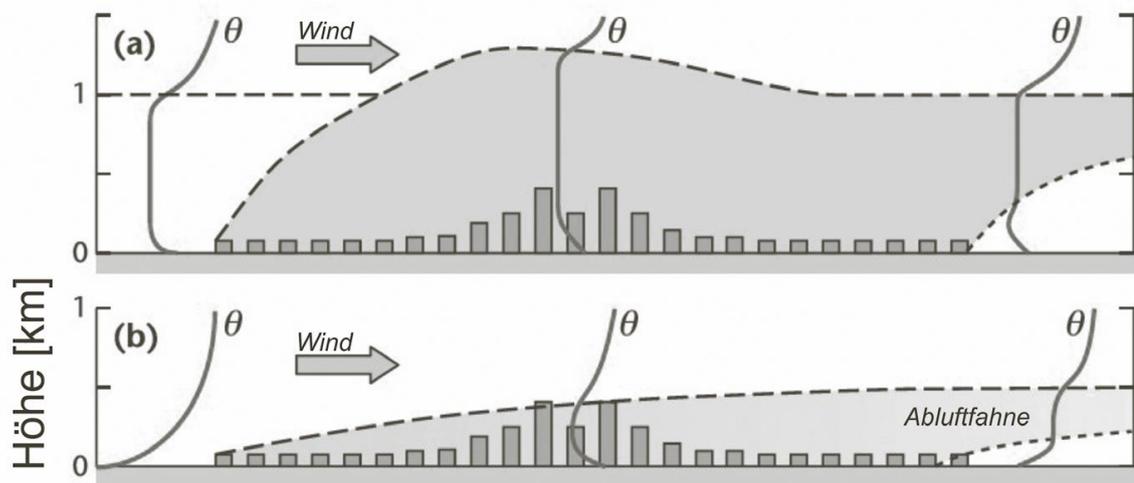


Abbildung 8: „Darstellung der vertikalen thermischen Struktur der Stadtgrenzschicht.“ Gezeigt wird der  $UHI_{UBI}$  für Strahlungswetterlagen bei (a) Tagstunden und bei (b) Nachtstunden. Die Balken symbolisieren eine Stadt. Quelle: (Henninger & Weber, 2019)

Die **Wärmeinsel des urbanen Untergrundes** ( $UHI_{SUB}$ ) beschreibt das Überwärmungsphänomen von Böden unterhalb des Stadtgebietes. Die absorbierte Strahlungsenergie wird nicht nur in die Atmosphäre, sondern auch in den Untergrund abgegeben. Die  $UHI_{SUB}$  ist vor allem in Sommermonaten ausgeprägt und kann zwischen 1 bis 8 °C erreichen. Sie ist besonders im Oberboden ausgeprägt, kann aber auch im Grundwasser nachgewiesen werden. Normalerweise werden die höchsten Intensitäten in den hochversiegelten Innenstädten gefunden (Henninger & Weber, 2019).

In dieser Arbeit wird nur die Wärmeinsel der Stadthindernisschicht betrachtet, da diese den entscheidenden Einfluss auf die Hitzebelastung hat, die im folgenden Abschnitt erklärt wird.

### 3.3.4 Hitzebelastung

Der Wärmeinseleffekt und die damit zusammenhängenden höheren Lufttemperaturen in Städten stellen aufgrund der zusätzlichen Hitzebelastung ein Problem dar. Hohe und langanhaltende Hitze kann dem menschlichen Organismus gefährlich werden. Im August 2003 sind während einer Hitzewelle in Westeuropa mehr als 40.000 Menschen an den Folgen der Wärmebelastung gestorben. Deutschland war mit circa 7.000 Todesopfern davon betroffen (UBA<sup>3</sup>, 2009). In Berlin hängen ungefähr 5% aller Todesfälle mit den erhöhten sommerlichen Temperaturen zusammen. Dies zeigt die Gefahren, die von Hitzebelastung ausgehen (Scherer, et al., 2013).

Diese Hitzebelastung wird vor allem in Städten zunehmen. Nach einer Modellanalyse für die Landesfläche Belgiens könnte sie bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts in Städten doppelt so hoch sein wie für die Menschen im Umland (Henninger & Weber, 2019).

Die Hitzebelastung ist deshalb ein Problem, da die Körpertemperatur konstant gehalten werden muss. Deshalb ist der Wärmehaushalt der Menschen eine der am feinsten geregelten

Körperfunktionen. Schon bei leicht erhöhten Körpertemperaturen wie 38 °C statt 37 °C, ist die Leistungsfähigkeit des Gehirnes verringert und Stoffwechselforgänge können schneller ablaufen, was zu einer zusätzlichen Wärmeproduktion führt. Bei noch höheren Körpertemperaturen können Eiweiße ihre Funktionsfähigkeit verlieren. Um den Wärmehaushalt des Körpers zu regulieren, wird zuerst die Durchblutung der Haut gesteigert. Bei steigenden Umgebungstemperaturen steigt die Durchblutung der Blutgefäße der Haut von 10% auf bis zu 80% an. Dies liegt daran, dass aus diesen Blutgefäßen der Haut eine einfachere Abgabe der Wärme an die Umgebung möglich ist. Neben der Umverteilung des Blutes ist die zusätzliche Pumpleistung des Herzens ein weiteres Werkzeug zur Kühlung des Körpers. So werden statt den üblichen 5 Litern pro Minute bis zu 15 Liter Blut pro Minute durch den Körper gepumpt. Dies kann bei längeren Hitzewellen problematisch werden, vor allem wenn neben den Hitzetagen noch Tropennächte auftreten. Dies sind Nächte, in denen die Umgebungstemperatur nicht unter 20 °C fällt. Als Folge muss das Herz permanent auf hohem Niveau arbeiten und kann sich nachts nicht erholen (Schumann, 2019).

So sind besonders ältere Menschen sowie Menschen mit eingeschränkter Anpassungsfähigkeit durch Hitze gefährdet. Es spielen neben Vorerkrankungen, wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Diabetes oder Erkrankungen des zentralen Nervensystems, auch Medikamente oder Drogen eine Rolle, die den Wasserhaushalt oder den Kreislauf beeinflussen.

Für gesunde erwachsene Menschen, die genügend Flüssigkeit und Nahrung aufnehmen und einen normalen Lebensstil haben, stellen Hitzewellen normalerweise keine Gefahren dar (UBA<sup>3</sup>, 2009).

Besonders die Aufnahme von Flüssigkeit ist wichtig. Denn je höher die Umgebungstemperatur ist, desto geringer ist der Temperaturunterschied zur Körpertemperatur und der Körper kann somit weniger Wärme an die Umgebung abgeben. Um sich trotzdem zu kühlen, schwitzt ein Mensch. Dieses effektivste Kühlungssystem des Menschen funktioniert durch die Verdunstungskühlung. Dabei wird durch das Verdunsten des Schweißes Wärme an die Umgebung abgegeben. (Die Verdunstungskühlung spielt auch in den folgenden Kapiteln eine wichtige Rolle.)

Ein durchschnittlicher Mensch ist in der Lage bis zu 2 Liter und ein trainierter und hitzeangepasster Mensch bis zu 4 Liter pro Stunde auszuschwitzen (Schumann, 2019). Diese Fähigkeit ist bei älteren sowie Menschen mit beschränkter Anpassungsfähigkeit vermindert oder verlangsamt. Diese Menschen haben ein geringeres Durstgefühl, daher trinken sie weniger und ihre Fähigkeit zu schwitzen sinkt, was dazu führt, dass ihre Wärmeabgabe begrenzt ist. Diese Menschen sind besonders im Frühsommer, bei erstmaliger Hitze oder bei längeren Hitzeperioden betroffen. Die dadurch verursachten Hitzeschäden können im schlimmsten Fall zum Tode führen (UBA<sup>3</sup>, 2009).

### 3.3.5 Mögliche Gegenmaßnahmen

Um die urbane Hitze zu bekämpfen wurden von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt der Stadt Berlin Schlüsselstrategien entwickelt. Diese Anpassungen sind ausschlaggebend, um die Lebensqualität in Berlin und vergleichbaren Städten zu sichern und zu verbessern.

Ein wesentliches Element der Schlüsselstrategien ist, „durch Verdunstung kühlen“. Diese Fähigkeiten besitzen Urban Wetlands (städtische Feuchtgebiete), Bäume, Vegetation und Böden, die ausreichend mit Wasser versorgt sind. Diese Maßnahmen sind nicht auf die öffentlichen und privaten Freiflächen beschränkt, Dächer und Fassaden können ebenso dazu beitragen, die Verdunstungskühlung zu erhöhen. Außerdem können Verdunstungsbeete oder entsiegelte Seitenstreifen im Straßenraum einen positiven Effekt haben. Zudem ist „das Durchlüften der Stadt“ eine weitere Schlüsselstrategie, hierfür soll in der zukünftigen Stadtplanung besonders berücksichtigt werden, dass Wege für den Luftaustausch offen bleiben. Weitere Schlüsselstrategien gegen urbane Hitze sind das „Verschatten“ und die „Rückstrahlung erhöhen“. Dabei soll darauf geachtet werden, dass die Architektur und Bäume Schatten spenden sowie helle und glatte Oberflächen von Bauwerken und Flächen ein Aufheizen durch ihre Rückstrahlung vermindern (SenStadtUm, 2016).

### 3.3.6 Verdunstung

Als Verdunstung bezeichnet man den Übergang von Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand unterhalb des Siedepunktes (DWD, 2020).

Die Verdunstung setzt sich aus drei Komponenten zusammen, die Evaporation (E), die Transpiration (T) und die Interzeptionsverdunstung (I) (Abbildung 9). Die Gesamtverdunstung wird auch als Evapotranspiration bezeichnet.

Die Evaporation beträgt in Mitteleuropa 5% - 25% der Gesamtverdunstung von Landoberflächen und beschreibt die nach physikalischen Gesetzen ablaufende Verdunstung über Wasserflächen und unbewachsenen Erdoberflächen (Boden-, Schnee- und Eisverdunstung). Die Bodenverdunstung ist abhängig von der Verfügbarkeit von Wasser im Boden (DWA-M 504-1, 2018).

Die zweite Komponente, die Transpiration, hat den größten Anteil an der Gesamtverdunstung und kann auf vollständig pflanzenbedeckten Flächen sogar bis auf 90% steigen. Unter der Transpiration versteht man die physiologisch regulierte Abgabe von Wasserdampf von der Pflanze an die Atmosphäre. Diese wird durch die oberirdischen Organe der Pflanze gesteuert, vor allem durch die Spaltöffnungen der Blätter. Das verwendete Wasser der Transpiration stammt aus dem durchwurzelteten Bodenraum. Die Transpiration ist ein essenziell notwendiger Prozess für Pflanzen. Der dadurch entstehende Sog an den Blättern ermöglicht der Pflanze Transportprozesse sowie Nährstoffe aus dem Boden aufzunehmen (Harlaß, 2009).



und die Vegetation Kühle entstehen kann“ (SenStadtUm,2016, S.26). Dabei spielt der Vorgang, dass durch Verdunstung von Vegetationen oder Böden Kühlung entsteht, die entscheidende Rolle, um die urbane Hitze zu bekämpfen. Denn im Gegensatz zu Beton oder anderen Baustoffen wird die Energie, die durch Sonnenstrahlung der Oberfläche zugeführt wird, nicht nur in fühlbare (sensible) Wärme, sondern auch durch Verdunstung in latente Wärme umgewandelt (ebd.).

Latente Wärme bzw. latente Wärmeenergie ist die Wärmeenergie, die ein Stoff für einen Phasenübergang benötigt. So wird beim Verdunstungsvorgang der Verdunstungsfläche Wärme entzogen, welche als potenzielle Energie im Wasserdampf gespeichert wird. Dadurch nimmt die messbare Temperatur an der Oberfläche ab (DWD, 2020).

Diesen Effekt nennt man „Kühlung durch Verdunstung“. Wichtig für diesen Vorgang ist, dass die Vegetationen oder Böden ausreichend mit Wasser versorgt sind. Auf trocknen Rasenflächen z.B. findet kaum bis keine Verdunstung statt und diese heizen sich fast so schnell auf wie asphaltierte Straßenflächen. Um also die hitzeangepasste Stadt zu entwickeln, ist es wichtig, Flächen zu bauen oder zu aktivieren, auf denen mehr verdunstet, wodurch ein Kühlungseffekt entsteht (SenStadtUm, 2016).

Damit diese Fläche so groß wie möglich ist, gilt es, Grünflächen zu schaffen welche über die Funktionen Speicherung und Verdunstung verfügen. Zusätzlich wird in dem Schwammstadtprinzip die Gebäudehülle für die Zwecke ebenso integriert (Abbildung 10).

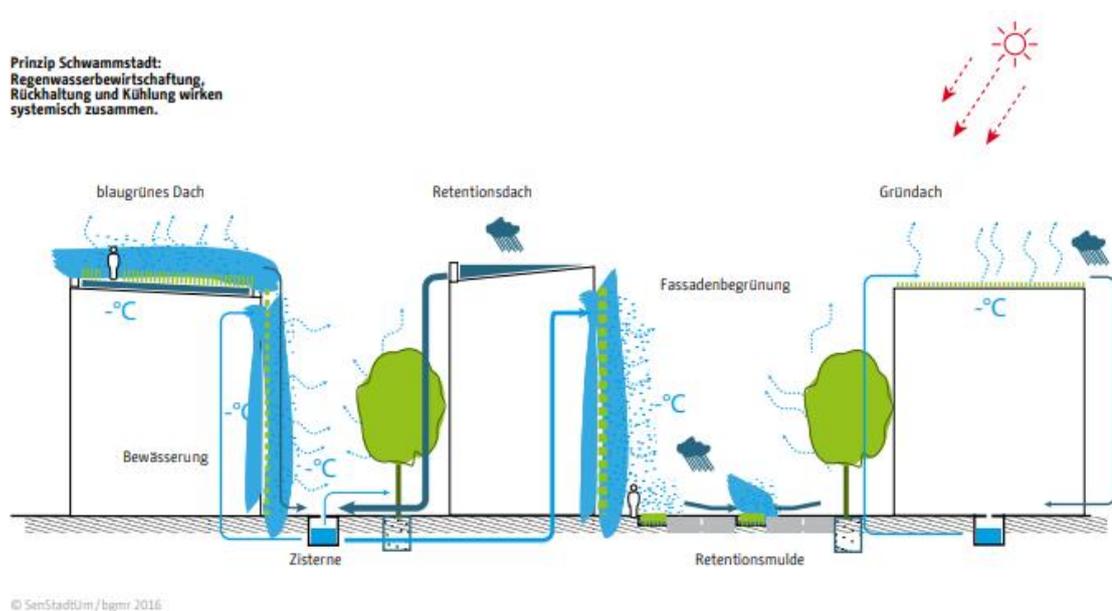


Abbildung 10: Schaubild Schwammstadtprinzip. Blaugrüne Dächer kombinieren Begrünung und Wasserspeicherung, überschüssiges Wasser wird zur Bewässerung der Fassadenbegrünung verwendet, sowie zur Befüllung von Zisternen, woraus wiederum später, in Hitzeperioden, die Vegetationen bewässert wird. Retentionsdächer dienen zur Wasserspeicherung und in Retentionsmulden kann Wasser versickern Quelle: (SenStadtUm, 2016)

Um diese Art der Regenwasserbewirtschaftung umzusetzen, muss ein Paradigmenwechsel stattfinden, weg vom Beseitigen und Ableiten des Regenwassers, hin zur Speicherung dessen. So kann in Hitzeperioden das Wasser zur Bewässerung von Vegetationen genutzt werden. Dadurch

kann die Evapotranspiration (Gesamtverdunstung) in Hitzeperioden verstärkt und damit der Wärmeinseleffekt verringert werden. Die verschiedenen Anpassungsmaßnahmen des Schwammstadtprinzips setzen sich aus der Dachgestaltung, Fassadengestaltung, Erhöhung der Rückstrahlung, Urban Wetlands und der Überflutungsvorsorge zusammen (SenStadtUm, 2016).

### 3.3.8 Urban Wetlands

Wassergesättigte Vegetationsflächen können besonders viel Wasser verdunsten, daher ist auf diesen Flächen auch die Kühlleistung besonders hoch. Da es in der stark versiegelten Stadt kaum solche Flächen gibt und die derzeit vorhandenen Grünflächen in Hitzeperioden schnell austrocknen, ist es besonders wichtig städtische Feuchtgebiete, die „Urban Wetlands“, zu schaffen. Wie Abbildung 11 zeigt, haben pflanzenbestandene Wasserflächen die höchste Kühlleistung (SenStadtUm, 2016).

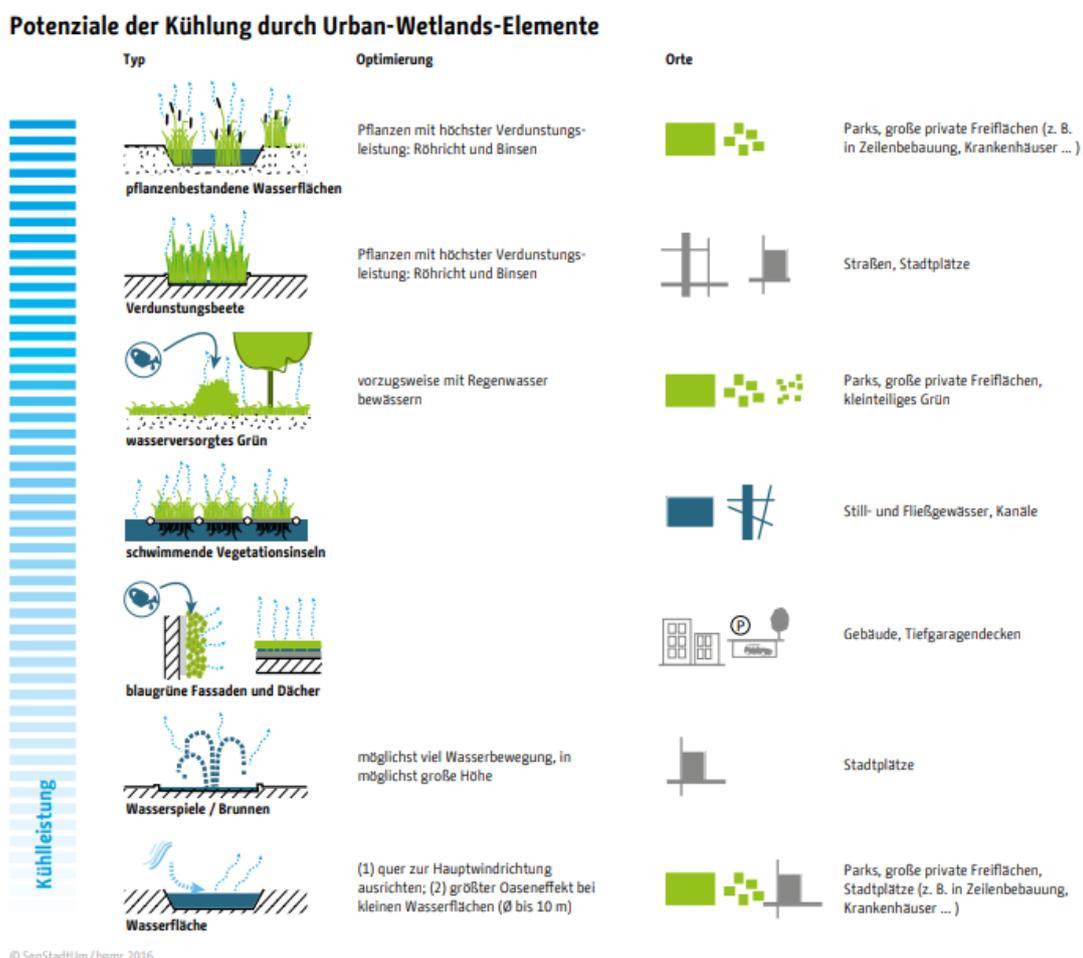


Abbildung 11: Kühlleistung der Urban-Wetland-Elemente. Quelle: (SenStadtUm, 2016)

Diese Flächen kombinieren Vegetation und permanente Wasserverfügbarkeit. Dazu kommt, dass die Oberfläche der Pflanzen durch die Blätter groß ist und damit über eine hohe Verdunstungsfläche verfügt. So lässt sich die Kühlleistung im Gegensatz zu reinen Wasserflächen fast verdoppeln. Außerdem haben pflanzenbestandene Wasserflächen einen weiteren positiven Effekt, sie werfen Schatten, dadurch wird der Wasserkörper tagsüber nicht so stark aufgewärmt. Bei offenen Wasserkörpern hingegen besteht das Problem, dass diese tagsüber durch ihre

Verdunstungsleistung zwar kühlen, nachts aber, aufgrund der hohen Wärmekapazität des Wasserkörpers, einen wärmenden Effekt auf die umliegende Umgebung besitzen (SenStadtUm, 2016).

Zudem spielt neben der Wasserverfügbarkeit auch die Art der Vegetation eine wichtige Rolle. Gewollt sind Pflanzen, die ihre Spaltöffnungen an den Blättern nicht schließen und somit permanent an heißen Sommertagen als auch nachts eine Verdunstung ermöglichen. Zu diesen Arten, die an feuchten Standorten gedeihen, zählen unter anderem Sumpfpflanzen wie Röhricht (z.B. Schilf) (ebd.).

Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft die mittlere Evaporationsleistung von verschiedenen Pflanzenarten sowie dichter Bebauung und Wasserflächen für Deutschland. So ist die Verdunstungsleistung abhängig von der Pflanzenart, der Wachstumsphase und dem Bedeckungsgrad (Harlaß, 2009).

*Tabelle 1: Mittlere Evaporationsleistung von verschiedenen Pflanzenarten sowie dichter Bebauung und Wasserflächen für Deutschland nach (DWA-M504-1\* und Harlaß, 2009)*

Oberfläche	Mittlere Evaporationsleistung [mm/a]
Dichte Bebauung *	~150
Heideflächen	~200
Ackerflächen	300-400
Grasflächen	400-500
Laubwälder	500-600
Nadelwälder	500-700
Wasserflächen *	~700
Sumpfpflanzen (z.B. Schilf)	~1100
Hochstauden in Flussauen	800-1500
Schwimmpflanze	1000-1500

Deutlich zu erkennen ist, dass Pflanzen, die permanent mit Wasser versorgt sind, die höchste Verdunstungsleistung besitzen (Tabelle 1, Sumpfpflanzen, Hochstauden in Flussauen und Schwimmpflanzen).

Ein gutes Beispiel, wie ein städtischer Park heute gestaltet werden sollte, ist der Park Jardins des Grands-Moulins in Paris. Teile des Parks sind Feuchtgebiete, die durch einen Steg begehbar sind und zur Naherholung genutzt werden können. (Abbildung 12, links). Außerdem verfügt der Park über eine längliche Wasserfläche (Abbildung 12, rechts), die mittlerweile komplett mit Schilf bewachsen ist. Diese Fläche speichert Wasser und sichert die Bewässerung des Feuchtgebietes (in-foliopaysagistes, 2019).



Abbildung 12: Park Jardins des Grands-Moulins. Quelle: (in-foliopaysagistes, 2019) (Links) Parkfläche mit Urban Wetland und (rechts) Schilfbewachsene Wasserfläche

Wie wichtig die Wasserversorgung bzw. der Anschluss an das Grundwasser (kapillarer Aufstieg vom hoch anstehenden Grundwasser bis zur Wurzelzone aufgrund von fehlendem Bodenwasser) für die Verdunstungsleistung ist, wurde von Domroese (2007) für die Freie und Hansestadt Hamburg ermittelt. Dafür wurde für den Zeitraum von 1993-2012 das Verdunstungspotential von Parkflächen simuliert. Es wurden 574 Sommertage simuliert, an denen die maximale Lufttemperatur über 25 °C liegt und eine Kühlleistung erwünscht wäre.

Die linke Seite der Abbildung 13 beschreibt eine Parkfläche mit Grundwasseranschluss, die rechte Seite ohne.

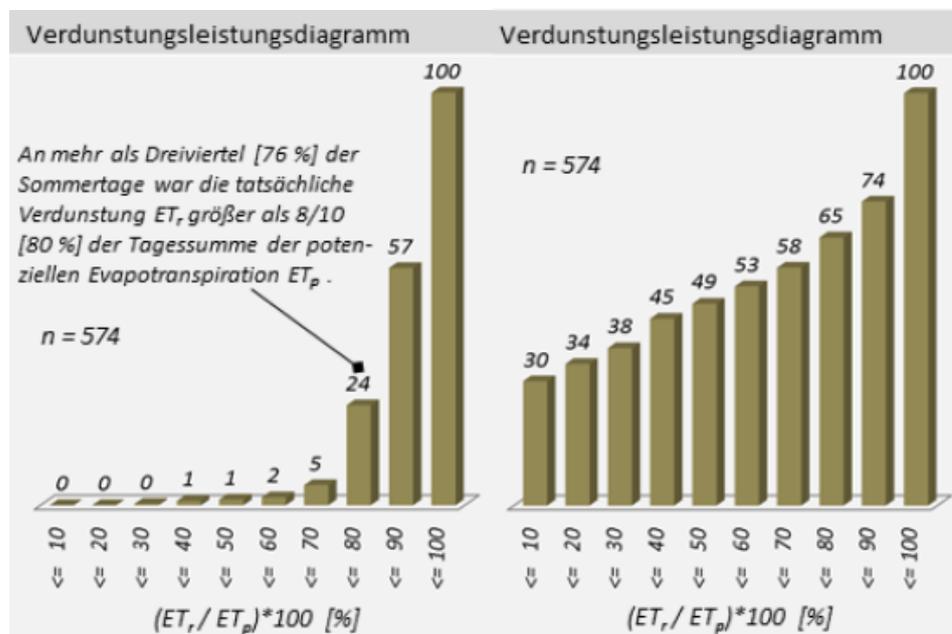


Abbildung 13: Verdunstungsdiagramm Standort 1 links (Mit GW Anschluss), Standort 2 (ohne GW Anschluss) rechts Quelle: (Domroese, 2007)

Die Abbildung 13 beschreibt allgemein, dass die Verdunstungsleistung umso höher ist, desto weniger die Balken von der Gesamtfläche einnehmen.  $ET_r$  beschreibt die tatsächliche

Evapotranspiration, die auf der Fläche stattgefunden hat und  $ET_p$  die potenzielle Evapotranspiration, die möglich gewesen wäre. So besagt zum Beispiel der in der Abbildung beschriebene Balken, dass an 24% der Sommertage die tatsächliche Evapotranspiration, weniger als 80% der potenziellen Evapotranspiration betrug, bzw. andersherum, an 76% der Tage betrug sie mehr. So lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Standorten feststellen. Die Fläche ohne GW-Anschluss besitzt an 30% der Sommertage weniger als 1/10 der potenziellen Verdunstungsleistung und tendiert eher gegen Null. Diese Simulation zeigt, wie wichtig der Zugang zu bzw. das Vorhandensein von Wasser für die Verdunstungsleistung und die damit einhergehende Kühlleistung ist (Domroese, 2007).

### 3.3.9 Der Tagesverlauf der Kühlwirkungen

#### Kühlwirkung von Anpassungsmaßnahmen im Tageslauf

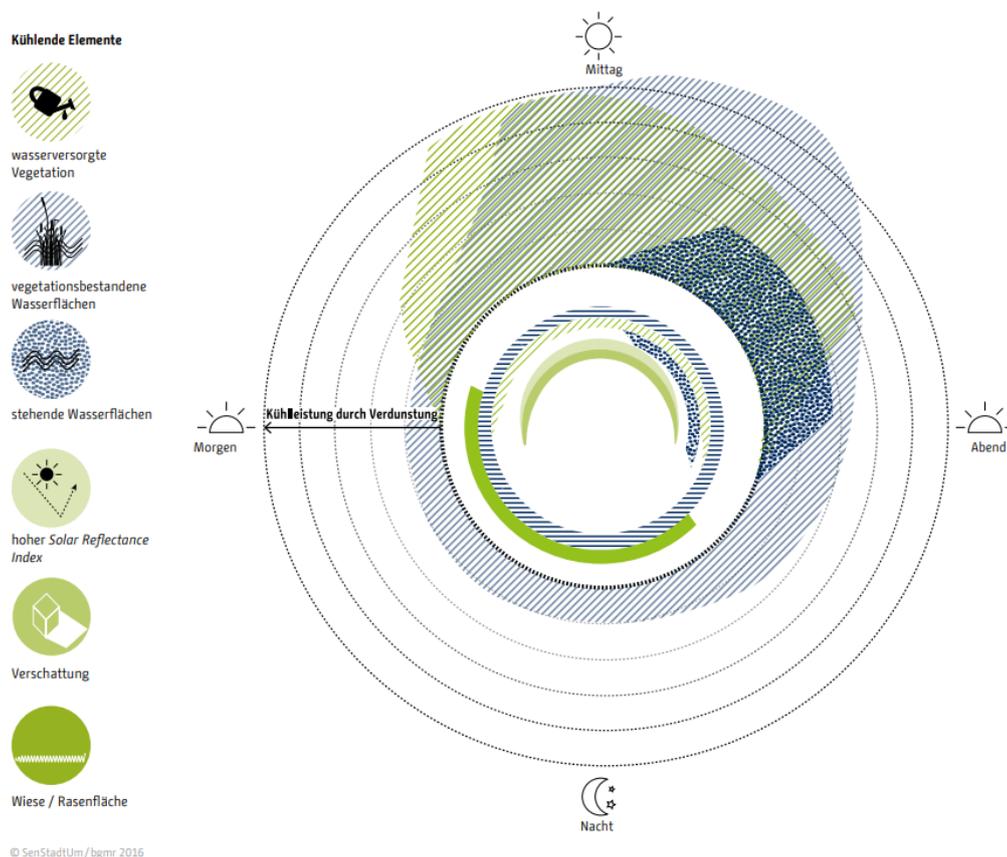


Abbildung 14: Tagesverlauf der Kühlwirkungen. Quelle: (SenStadtUm, 2016) Der innere Teil der Abbildung zeigt zu welchem Zeitpunkt des Tages die Elemente eine Kühlleistung aufweisen und der äußere Teil der Abbildung zeigt die quantitative Kühlleistung durch Verdunstung im Tagesverlauf der Elemente

Die Kühlwirkung der einzelnen Elemente steht in Abhängigkeit des Tageslaufs und wird in der Abbildung 14 veranschaulicht. Vegetationen verdunsten und kühlen somit vor allem tagsüber, am besten bei Sonne. Die Abbildung veranschaulicht deutlich, dass vegetationsbestandene Wasserflächen sowohl die höchste als auch die längste Kühlwirkung aufweisen. Neben vegetationsbestandenen Wasserflächen weisen besonders Wiesen und Rasenflächen eine nächtliche Kühlwirkung auf. Diese ist bedingt durch die nächtliche Ausstrahlung (SenStadtUm, 2016).

### 3.3.10 Situation in Hamburg

Auch in Hamburg lassen sich deutliche Temperaturunterschiede vor allem an Strahlungswettertagen feststellen. Die Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse einer Modellrechnung für eine Strahlungswetternacht im Sommer in Hamburg. Dargestellt wird die Lufttemperatur 2 m über Grund zum Zeitpunkt 4 Uhr.

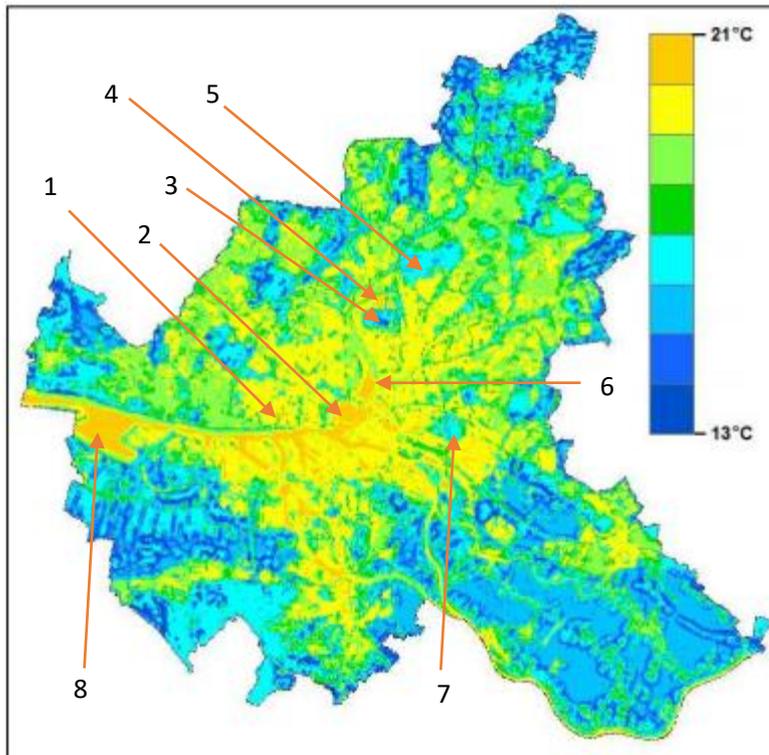


Abbildung 15: Simulation einer Strahlungswetternacht in Hamburg zum Zeitpunkt 4 Uhr. Quelle: (GEO-Net, 2012) (1) Altonaer Altstadt, (2) Innenstadt (3) Stadtspark (4) City Nord (5) Ohlsdorfer Friedhof (6) Außenalster (7) Öjendorfer Park (8) Elbe

Dabei wurde für die durchschnittliche Lufttemperatur ein Wert von 17,3°C, für den Minimalwert 11,5 °C und den Maximalwert 21°C ermittelt. Damit weist das Temperaturfeld eine Spannweite von etwa 9,5 °C auf. Hier lassen sich Unterschiede im urbanen Gebiet feststellen, diese sind abhängig von der Bauungsart, dem Versiegelungsgrad, sowie den verschiedenen Boden- und Oberflächeneigenschaften.

So lassen sich hohe Temperaturen von mehr als 20 °C im innerstädtischen Bereich

auffinden, dieses liegt an dem hohen Bauvolumen sowie an einem Versiegelungsgrad von bis zu 95%. Ähnliche Temperaturen lassen sich u.a. zudem in der Altonaer Altstadt sowie der City-Nord antreffen, dort sind diese aber weniger flächenhaft ausgeprägt.

Die Siedlungsflächen Hamburgs weisen bei der Blockrandbebauung Temperaturen von 19 °C – 20 °C auf, die großräumigen Flächen der Einzel- und Reihenhausbauung besitzen ein geringeres Temperaturniveau. Dörflich geprägte Stadtgebiete weisen eine Lufttemperatur zwischen 17 °C und 18 °C auf. Die am Stadtrand gelegenen landwirtschaftlich geprägten Gebiete Hamburgs weisen weniger als 14 °C auf, wobei die niedrigsten Werte meist in Senkenbereichen vorkommen, da sich dort die Kaltluft sammelt, da diese durch ihre höhere Dichte schwerer ist. Außerdem sind deutlich die Gewässer, die Elbe sowie die Binnen- und Außenalster, auf der Abbildung zu erkennen. Durch ihre hohe Wärmekapazität sind Gewässer im Sommer nachts häufig wärmer als die umliegende Luft, somit verringern diese die nächtliche Abkühlung der Umgebung. Große Grünflächen heben sich durch ihre nächtliche Ausstrahlung und damit niedrigere

Lufttemperatur deutlich vom Umfeld ab. Beispiele dafür sind jeweils nördlich vom Stadtzentrum der Stadtpark, sowie der Ohlsdorfer Friedhof oder auch östlich der Öjendorfer Park (GEO-Net, 2012).

Die Abbildung 16 zeigt die Lufttemperatur 2 m über Grund für den Stadtpark und die umliegenden Flächen, u.a. der City-Nord, um die Uhrzeiten 22 Uhr und 4 Uhr. Mit ca. 140 ha ist dieser eine der größten städtischen Grünflächen. Der Stadtpark besitzt mehrere Wiesenflächen, mit der größten Wiesenfläche, der sogenannten „großen Festwiese“ im Zentrum. Außerdem sind weite Teile des Parkes von Gehölz und Bäumen bestanden. Östlich der „großen Festwiese“ liegt der Stadtparksee, welcher durch die erhöhte oberflächennahe Lufttemperatur nachts auffällt. Die umliegende Bebauung ist hauptsächlich durch Blockrandbebauung geprägt. Mit zwei Ausnahmen: Nördlich die City-Nord, die durch große Bürogebäude bestimmt ist, und nordöstlich einer Kleingartenanlage (ebd.).

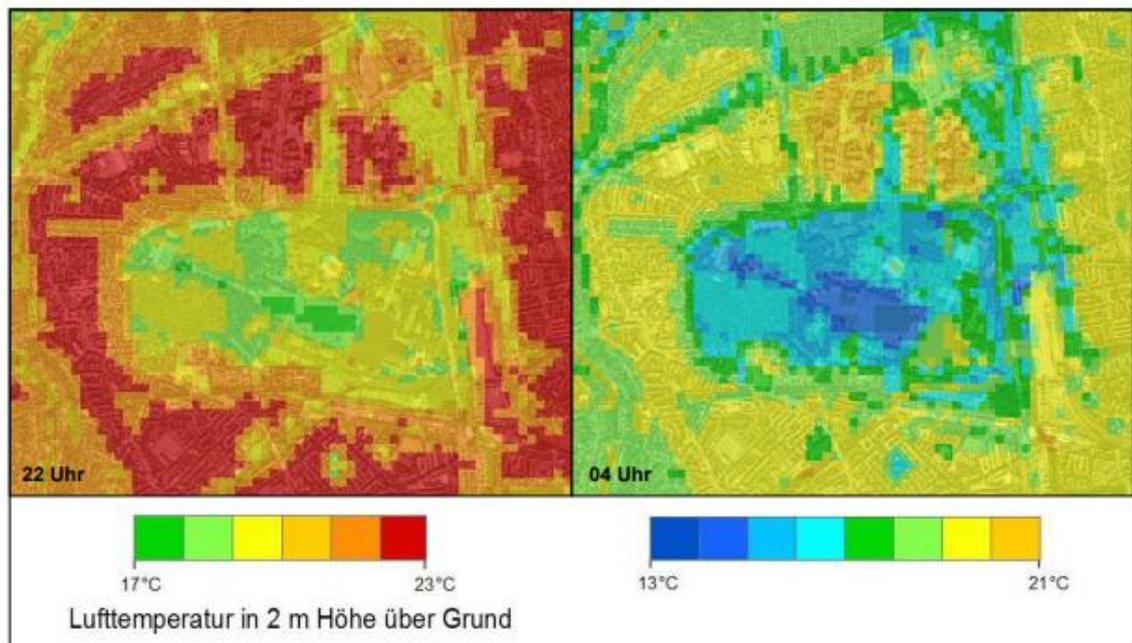


Abbildung 16: Simulation für die Lufttemperatur des Stadtparks in Hamburg für eine Nacht im Sommer bei Strahlungswetterlage um 22 und um 4 Uhr. Quelle: (GEO-Net, 2012)

Jeweils um 22 Uhr (17 °C) als auch um 4 Uhr (13,5 °C) sind die niedrigsten Temperaturen über den Wiesenfläche vorzufinden (dort findet eine ungehinderte Ausstrahlung statt). Die restlichen Teile des Parks besitzen höhere Lufttemperaturen, dort ist die Ausstrahlung aufgrund der Kronendächer und des Gehölzbestands verringert. Die umliegenden Siedlungsflächen, welche durch eine Blockrandbebauung geprägt sind, weisen dagegen nochmal höhere Temperaturen jeweils um 22 Uhr als auch um 4 Uhr auf. Gleichzeitig zeigen die Randgebiete niedrigere Temperaturen, die auf den kühlenden Effekt des Stadtparkes zurückzuführen sind. Um 4 Uhr nachts, stellen sich die größten Lufttemperaturunterschiede ein. Zu diesem Zeitpunkt treten in der City-Nord wegen des großen Bauvolumens die höchsten Lufttemperaturen von mehr als 20 °C auf. Insgesamt lässt

sich im Temperaturfeld rund um den Stadtpark für eine Nacht bei Strahlungswetter eine Spannweite von bis zu 6,5 °C auf ungefähr 900 m Distanz darstellen (GEO-Net, 2012).

Wie die Ergebnisse der Modellierung Hamburgs sowie das Beispiel des Stadtparkes zeigen, kommen bei Strahlungswetterlagen im Sommer in Hamburg deutliche regionale Unterschiede, sogar auf wenigen hundert Metern, der Lufttemperatur vor. Der Wärmeinseleffekt ist deutlich erkennbar.

### 3.3.11 Flurwinde

Flurwinde sind lokale thermisch bedingte Windsysteme zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen. Sie treten durch die vor allem nachts stark ausgeprägten Temperaturunterschiede auf. Für die Ausprägung ist es notwendig, dass eine Beschleunigung der Luft gewährleistet ist. Hindernisse wie Bebauung können diese bereits abbremsen und andere stärkere Winde können den Flurwind überlagern. Die Geschwindigkeit beträgt meist weniger als 2 m/s. Große Siedlungsräume stellen aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit ein Strömungshindernis dar, deshalb ist der Luftaustausch eingeschränkt. Vor allem an austauscharmen bzw. windarmen Wetterlagen stellt dies ein Problem dar und die Stadt wird kaum mit kühler Luft versorgt (GEO-Net, 2012).

Abbildung 17 zeigt eine Simulation für die Flurwinde 2 m über Grund in Hamburg für den Zeitpunkt 4 Uhr morgens an einer austauscharmen Nacht. Deutlich zu erkennen ist, dass im Stadtzentrum aber auch in weiten Teilen des bebauten Gebietes kaum bis keine Flurwinde herrschen. Die Einzel- und Reihenhausbebauung weisen dabei die höchste Durchströmung der Wohngebiete auf. Die stärksten Flurwinde treten in den landwirtschaftlichen genutzten Freiflächen und im Umfeld der Harburger Berge auf (ebd.)

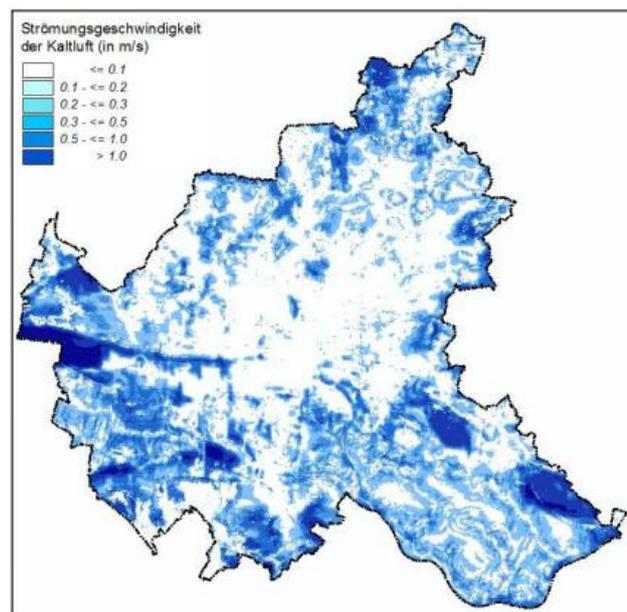


Abbildung 17: Flurwinde in Hamburg für eine Strahlungswetternacht um 4 Uhr morgens Quelle: (GEO-Net, 2012)

Nach Scherer (2007) benötigen Flurwinde mindestens eine Grünfläche von 1 ha um sich ausbilden zu können. Zudem erreichen Flurwinde von Grünflächen, wenn diese ausreichend mit Wasser versorgt sind, bestenfalls 300 m entfernte Häuser. Im Regelfall beträgt die Distanz aber nur 100 m. Daher empfiehlt Scherer aus stadtklimatischer Sicht, statt großen Parks mehrere kleine „Miniparks“. Diese Miniparks sollten min. 1 ha groß und mit Wasser versorgt sein. Dadurch würden mehr Bewohner in der Nähe von kühlenden Parks wohnen.

Abbildung 18 zeigt das Strömungsfeld der Flurwinde für den Hamburg Stadtpark sowie seines näheren Umfeldes. Hier wird die von Scherer genannte geringe Reichweite der Flurwinde, selbst von einem großen Park wie dem Stadtpark, deutlich. Die Kaltluft, die über dem Stadtpark gebildet wurde, strömt vor allem in östliche Richtungen ab. Dort gelangt diese bis zu 350 m in die angrenzende Bebauung (GEO-Net, 2012).

Wie auch Abbildung 16 zeigt, profitieren nur die direkten umliegenden Gebäude von dem Kühlungseffekt des Stadtparkes, durch fehlende Luftbewegung wird kaum Kaltluft an die Gebäude transportiert und die entstehenden Flurwinde werden durch die Hindernisse der Bebauung schnell abgebremst. Lediglich östlich sowie südöstlich können Bewohner auch bei weiterer Entfernung vom Stadtpark als Kaltluftproduzenten profitieren.

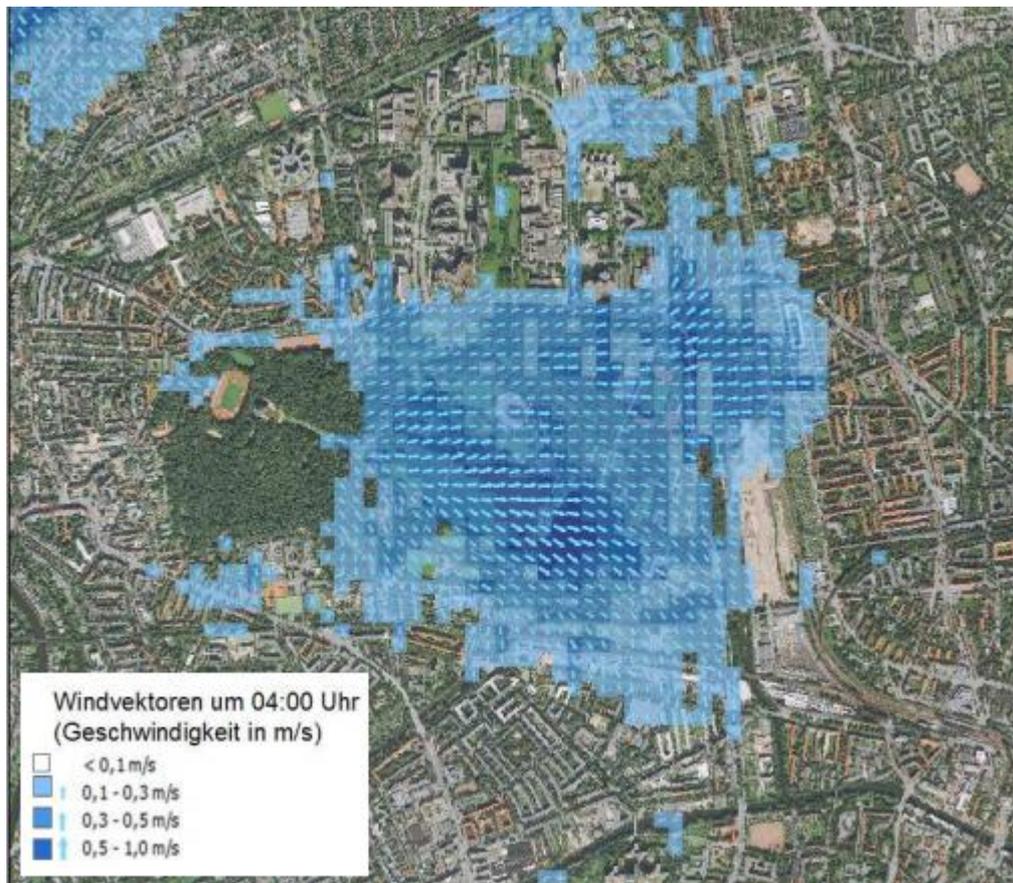


Abbildung 18: Flurwinde im Hamburger Stadtpark für eine Strahlungswetternacht um 4 Uhr morgens. Quelle: (GEO-Net, 2012)

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Material

Als Material standen alle vorhandenen digitalen sowie analogen Dokumente zum Projekt: „S-09-0127 Manshardtstraße RWBA“ von der Hamburger Stadtentwässerung zur Verfügung. Außerdem wurde Angaben zum Material der Sedimentationsrohre vom Hersteller bereitgestellt. Das restliche verwendete Material ist dem Quellenverzeichnis zu entnehmen.

### 4.2 Methoden

Die Frage, ob der Indikator Ökobilanz in die KNA für RWBA mit aufgenommen werden sollte, wurde mit Hilfe von quantitativen Datenanalysen beantwortet.

Dafür wurden zuerst Datenerhebungen durchgeführt, um die Materialarten, ihr jeweiliges Gewicht, die Transportwege, den Bauumfang, sowie die Material- und Energieverbräuche für die Unterhaltung und Entsorgung der RWBA ermitteln zu können. Zudem wurden Annahmen getroffen, um komplette Ökobilanzen erstellen zu können. Anschließend wurde von der BUKEA die Firma brands & values GmbH beauftragt, anhand dieser Daten eine DIN EN ISO 14040 konforme Ökobilanz aufzustellen. Dieser Weg wurde gewählt, da viele Datensätze für die Erstellung von Ökobilanzen nicht öffentlich zugänglich sind. Brands & values hat mit weiteren Annahmen und Recherchen dazu beigetragen, die Ökobilanzen zu komplementieren. Anschließend wurden diese Daten analysiert und ausgewertet, sodass aus diesen Ergebnissen die Kernfragen beantwortet werden konnten.

Um für die vorliegende Bachelorarbeit Erkenntnisse über den aktuellen Wissenstand hinsichtlich der Auswirkungen eines RBF auf das Mikroklima der Stadt zu erlangen, wurde die Methode der Literaturrecherche gewählt. Dabei wurde relevante Literatur zusammengetragen und hinsichtlich des Themas kritisch analysiert. Der Fokus der Literatur lag dabei auf den Auswirkungen des Klimawandels auf das Stadtklima, auf Maßnahmen der Stadtentwicklung gegen die urbane Hitze und auf die Kühlleistungen unterschiedlicher Oberflächen. Während des Untersuchungsprozess ist deutlich geworden, dass Regenwasserbehandlungsanlagen in der bisherigen zu dem Thema vorhandenen Literatur kaum bis gar nicht betrachtet wurden. Die Kernfragen konnten anhand von Schlussfolgerungen, die sich aus der Literaturrecherche ergeben haben, beantwortet werden.

# 5 Durchführung

## 5.1 Ökobilanz

Für die Bewertung des Indikators Ökobilanz wurde der 2019 fertiggestellte RBF „Manshardtstraße“ ausgewertet. Zusätzlich wurden mehrere Hersteller von Sedimentationsrohren nach den von ihnen verwendeten Materialien befragt. Letztendlich wurden die Angaben eines Herstellers ausgewählt, der Sedimentationsrohre sowohl mit als auch ohne Filtration herstellt. Der Hersteller wird aufgrund des Datenschutzes in dieser Arbeit nicht namentlich genannt.

Über die Lebensdauer der betrachteten RWBA gibt es bisher keine genauen Daten. Die BUKEA geht aktuell für die Durchführung von Kostenrechnungen von einer pauschalen Lebensdauer von 50 Jahren aus. Daher wird in der Ökobilanz die gleiche Lebensdauer angenommen. Bei Sedimentationsrohren ist diese Lebensdauer allerdings kritisch zu betrachten. Da durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011) für die Entwässerung von Dachabläufen aus Kunststoff, die Sedimentationsrohren am nächsten kommen, eine Lebensdauer von 20 Jahren angegeben wird.

Für die Wartungsintervalle sowie die angefallene Schlammmenge pro Wartung kommt es in der Praxis oft zu unterschiedlichen Intervallen bzw. Mengen, diese sind abhängig vom Einzugsgebiet, den äußeren Randbedingungen sowie der Witterung. Zudem deuten neueste Erkenntnisse der BUKEA an, dass sich erhöhte Wartungsintervalle positiv auf die Reinigungsleistung eines RBF auswirken. Aus diesen Gründen wurden Szenarien entwickelt, um zu untersuchen, welchen Einfluss unterschiedliche Annahmen auf die Ökobilanz haben. So wurden jeweils zwei Szenarien pro Ökobilanz aufgestellt. Diese unterscheiden sich in den Wartungsintervallen (und der angefallenen Schlammmenge) für alle RWBA, der Lebensdauer bei den Sedimentationsrohren und unterschiedlichen Annahmen der Transportstrecken beim RBF.

### **Retentionsbodenfilter**

1. Szenario: Es wird bei den unbekanntem Transporten von kurzen Anfahrtswegen und einer einmaligen Wartung der Filteranlage pro Jahr ausgegangen.
2. Szenario: Es wird bei den unbekanntem Transporten von langen Anfahrtswegen und einer zweimaligen Wartung der Filteranlage pro Jahr ausgegangen.

### **Sedimentationsrohre**

1. Szenario: Die Sedimentationsrohre haben eine Lebensdauer von 50 Jahren und die Wartung erfolgt einmal jährlich.

2. Szenario: Die Sedimentationsrohre haben eine Lebensdauer von 25 Jahren und werden nach dieser Zeit durch ein neues Sedimentationsrohr ersetzt. Die Wartung erfolgt zweimal jährlich.

Der Auswertung der unterschiedlichen Szenarien lag folgende Datenerhebung zu Grunde.

### 5.1.1 Datenerhebung

Die bei der Auswertung der unterschiedlichen Szenarien erhobenen Daten zu den RWBA sind in den Tabellen 2-39 dargestellt.

#### 5.1.1.1 Retentionsbodenfilter

Der ausgewertete Retentionsbodenfilter „Manshardtstraße“ hatte die Besonderheit, dass vor dessen Bau der Jenfelder Bach um einige hundert Meter versetzt werden musste. Beides wurde zusammen als eine Baumaßnahme vom Auftraggeber, der Hamburger Stadtentwässerung, ausgeschrieben. Die Zusammenlegung beider Baumaßnahmen führte zu einer komplizierteren Auswertung als erwartet, da die Differenzierbarkeit der Maßnahmen häufig nicht eindeutig gegeben war.

#### Verwendete Baumaterialien im RBF

Aus den zur Verfügung gestellten Daten wurden folgende Materialangaben ermittelt, die in Tabelle 2 dargestellt sind. Die verwendeten Positionen zur Ermittlung des Materials aus dem Leistungsverzeichnis Projekt: „S-09-0127 Manshardtstraße RWBA“ von der Hamburger Stadtentwässerung sind dem Anhang 5 zu entnehmen.

*Tabelle 2: Material- und Gewichtsangaben zum Retentionsbodenfilter. (Unterpunkte der Materialien sind kursiv gekennzeichnet)*

<b>Position</b>	<b>Material</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>
P. 1.1	Beton	356,8	t
<i>P. 1.1.1</i>	<i>Betonrohre</i>	<i>20,683</i>	<i>t</i>
<i>P. 1.1.2</i>	<i>Fertigteile-"Schächte"</i>	<i>170,208</i>	<i>t</i>
<i>P. 1.1.3</i>	<i>Betonpflasterstein</i>	<i>4,49</i>	<i>t</i>
<i>P. 1.1.4</i>	<i>Unterbaubeton</i>	<i>128,52</i>	<i>t</i>
<i>P. 1.1.5</i>	<i>Betonwerkstein</i>	<i>4,104</i>	<i>t</i>
<i>P. 1.1.6</i>	<i>Beton Festigkeitsklasse C25/30</i>	<i>28,8</i>	<i>t</i>
P. 1.2	Stahlbeton	23,4	t
P. 1.3	Kies/Sand	4179,626	t
P. 1.4	PE HD (Polyethylen high density)	20,08	t
<i>P. 1.4.1</i>	<i>Kunststoffdichtungsbahn</i>	<i>6,41</i>	<i>t</i>
<i>P. 1.4.2</i>	<i>PE HD Rohre</i>	<i>13,67</i>	<i>t</i>
P. 1.5	PVC (Polyvinylchlorid)	1,813	t

<b>Position</b>	<b>Material</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>
P. 1.5.1	PVC Rohre	1,813	t
P. 1.6	Edelstahl 1.4301	3706,25	kg
P. 1.6.1	Rohre	853,83	kg
P. 1.6.2	Rechen	2056,97	kg
P. 1.6.3	Drosselblendkasten	5,451	kg
P. 1.6.4	Dammbalkenverschluss	790	kg
P. 1.7	Edelstahl 1.4571	384,88	kg
P. 1.8	Edelstahl 1.4401	2	kg
P. 1.8.1	Klappe	2	kg
P. 1.9	Stahl verzinkt	5275	kg
P. 1.9.1	Rechen	30,57	kg
P. 1.9.2	Geländer/Zaun	5244,46	kg
P. 1.10	Stahl, HEA 160	825	kg
P. 1.10.1	Gitterrostträger	825	kg
P. 1.11	Feinweißkalk	43	t
P. 1.12	Wasserbaustein (Diabas)	248	kg
P. 1.13	Schottersplittgemisch + Natursteinschotter	390	t
P. 1.14	Mutterboden (gesiebt)	750	t
P. 1.15	Bruchstein (Basalt)	10,71	t
P. 1.16	Perlit	8600	kg
P. 1.17	Kompost	1200	kg
P. 1.18	Mulch	30,2	t
P. 1.19	Saatgut Rasen	147,75	kg
P. 1.20	WILO Abwassertauchmotorpumpe	2	Stk.

Für einige Materialien mussten Annahmen für die Dichte getroffen werden, da Informationen zu den Materialien häufig nur in Form des Volumens angegeben waren. Zum Beispiel wurde das Volumen der Rohre aus den Angaben (Länge, Durchmesser und Wanddicke) berechnet. Das benötigte Gewicht wurde mithilfe der Annahme einer Dichte berechnet. Einige Materialien besitzen Angaben über die Dichte, die in minimal und maximal angegeben wird, die tatsächliche Dichte ist von der Herstellung abhängig. Hierbei wurde jeweils eine Dichte angenommen, welche der Tabelle 3 zu entnehmen ist.

Tabelle 3: Annahmen der Dichte

Material	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ] (ausgewählt)	Quelle
Beton	2000-2600 (2400)	(DIN EN 12390-1, 2012)
PE HD	940- 970 (970)	(DIN EN ISO 1183-1, 2019)
PVC	1380	(DIN EN ISO 1183-1, 2019)
Edelstahl 1.4301	7900	(DIN EN 10088-3, 2014)
Edelstahl1.4571	8000	(DIN EN 10088-3, 2014)
Edelstahl 1.4401	8000	(DIN EN 10088-3, 2014)

## Transport

Die Fahrwege, die Transportart sowie die Auslastung der Transportfahrzeuge konnte für einige Materialien aus den Lieferscheinen ermittelt werden (Tabelle 4 und 5). Die Fahrwege der Materialien aus P.2.1 sowie Böden P.2.2, welche von der Baustelle abtransportiert worden sind, sind bekannt. Lediglich die Leerfahrten sind unbekannt, hierfür wurde die Annahme von 10,7 km getroffen, dies entspricht der Entfernung vom Stadtzentrum Hamburgs zur Baustelle. Für die restlichen Materialien sind keine Lieferscheine vorhanden. Daher wurden für die Fahrwege, die Transportart sowie die Auslastung der Transportfahrzeuge Annahmen getroffen (P.2.3, Tabelle 4 und 5)(siehe Anhang 1). Für die Transportart wurde ein LKW mit 12 t zulässiger Gesamtmasse gewählt, eine Auslastung von 55% angenommen und ein gesamter Fahrtweg von 100 km (Szenario 1) bzw. von 400 km (Szenario 2).

Tabelle 4:Transport der Materialien des RBF für Szenario 1

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P.2.1	Materialen (P.:1.3,1.13,1.14,1.18) mit Sattelfahrzeug (40t)	3344	km	31%
P.2.2	Bodenabfuhr mit Sattelfahrzeug (40t)	1584	km	31%
P.2.3	Restliche Materialien (LKW 12t, durchschnittlich 100km)	12400	km	55%

Tabelle 5: Transport der Materialien des RBF für Szenario 2

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P.2.1	Materialen (P.:1.3,1.13,1.14,1.18) mit Sattelfahrzeug (40t)	3344	km	31%
P.2.2	Bodenabfuhr mit Sattelfahrzeug (40t)	1584	km	31%
P.2.3	Restliche Materialien (LKW 12t, durchschnittlich 400km)	49600	km	55%

## Bauphase

Für den Bau des Retentionsbodenfilters wurden zwei Positionen Bauarbeiten und Grundwasserabsenkung ermittelt, diese ergeben sich teilweise aus Annahmen (Anhang 1).

Tabelle 6: Bauphase des RBF

Position	Material	Menge	Einheit
P. 3.1	Bauarbeiten (Treibstoffverbrauch, Diesel)	2850	l
P. 3.2	Grundwasserabsenkung (Stromverbrauch)	16600	kWh

## Nutzungsphase

Für die Nutzungsphase wurden zwei Szenarien aufgestellt, die sich in den Wartungsintervallen unterscheiden. In Szenario 1 (Tabelle 7) wird eine einmal jährliche und in Szenario 2 (Tabelle 8) eine zweimal jährliche Wartung angenommen. Der angegebene Stromverbrauch des Pumpwerks beruht auf Annahmen und ist aus Anhang 1 zu entnehmen. Nach 25 Jahren wird ein Austausch der Filterschicht angenommen (P.4.3).

Tabelle 7: Nutzungsphase des RBF für Szenario 1

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
<b>P. 4.1</b>	Wartung, jährlich			
P.4.1.1	Anfahrt Saugfahrzeug (40t)	23	km	
P.4.1.2	Verbrauch der Pumpe des Saugfahrzeuges (Treibstoffverbrauch, Diesel)	70	l	
P.4.1.3	Entsorgung belasteter Schlamm	18	t	36%
<b>P. 4.2</b>	Pumpwerk (Stromverbrauch pro Jahr)	6700	kWh/a	
<b>P.4.3</b>	Austausch der Filterschicht			
P.4.3.1	Transporte (LKW 40t)	7210,1	km	71%
P.4.3.2	Bauarbeiten (Treibstoffverbrauch, Diesel)	1138	l	
P.4.3.3	Entsorgung von belastetem Boden	3120	t	
P.4.3.4	Neuherstellung der Filterschicht, Material: Sand/Kies	3120	t	

Tabelle 8: Nutzungsphase des RBF für Szenario 2

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
<b>P.4.1</b>	Wartung, 2x jährlich			
P.4.1.1	Anfahrt Saugfahrzeug (40t)	46	km	
P.4.1.2	Verbrauch der Pumpe des Saugfahrzeuges	140	l	
P.4.1.3	Entsorgung belasteter Schlamm	36	t	36%
<b>P.4.2</b>	Pumpwerk (Stromverbrauch pro Jahr)	6700	kWh/a	
<b>P.4.3</b>	Austausch der Filterschicht			
P.4.3.1	Transporte (LKW 40t)	7210,1	km	71%
P.4.3.2	Bauarbeiten (Treibstoffverbrauch, Diesel)	1138	l	
P.4.3.3	Entsorgung von belastetem Boden	3120	t	
P.4.3.4	Neuherstellung der Filterschicht, Material: Sand/Kies	3120	t	

### Entsorgungsphase

Bei der Entsorgung wird davon ausgegangen, dass nur die in Tabelle 9 angegebenen Materialien entsorgt werden. Für die restlichen Materialien aus Tabelle 2 wird angenommen, dass diese vor Ort im Boden verbleiben.

Tabelle 9: Entsorgungsphase des RBF

Position	Material	Menge	Einheit
<b>P. 5.1</b>	belastete Böden (Kies/Sand)	3120	t
<b>P. 5.2</b>	Beton	356,8	t
<b>P. 5.3</b>	Stahlbeton	23,4	t
<b>P. 5.4</b>	PE HD (Polyethylen high density)	20,08	t
<b>P. 5.5</b>	PVC (Polyvinylchlorid)	1,813	t
<b>P. 5.6</b>	Edelstahl 1.4301	3564,49	kg
<b>P. 5.7</b>	Edelstahl 1.4571	384,88	kg
<b>P. 5.8</b>	Edelstahl 1.4401	2	kg
<b>P. 5.9</b>	Stahl verzinkt	5,275	t
<b>P. 5.10</b>	Stahl, HEA 160	825	kg
<b>P. 5.11</b>	Feinweißkalk	43	t
<b>P. 5.12</b>	Bruchstein (Basalt)	10,71	t
<b>P. 5.13</b>	WILO Abwassertauchmotorpumpe	2	Stk.

### 5.1.1.2 Sedimentationsrohr ohne Filtration

#### Verwendete Baumaterialien im Sedimentationsrohr ohne Filtration

Die Angaben des Materials für ein Sedimentationsrohr ohne Filtration (SoF) mit einer 12 m Sedimentationsstrecke wurde vom Hersteller bereitgestellt (Tabelle 10 und 11). Hierbei wurde die größtmögliche Schachthöhe angenommen, diese spiegelt sich sowohl in dem Gewicht als auch in der notwendigen Baugrube wider.

Tabelle 10: Materialangaben des SoF in Szenario 1 (Lebensdauer 50 Jahre)

Position	Material	Menge	Einheit
P. 1.1	PE/PE-HD (Polyethylen)	857	kg
P. 1.2	PP (Polypropylen)	282	kg
P. 1.3	NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	6,4	kg
P. 1.4	EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	0,6	kg

Tabelle 11: Materialangaben des SoF in Szenario 2 (Lebensdauer 25 Jahre)

Position	Material	Menge	Einheit
P. 1.1	PE/PE-HD (Polyethylen)	1714	kg
P. 1.2	PP (Polypropylen)	564	kg
P. 1.3	NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	12,8	kg
P. 1.4	EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	1,2	kg

#### Transport

Der Transport setzt sich aus der Entfernung vom Werk des Herstellers zum Einbauort des Sedimentationsrohrs zusammen. Hierbei wurde der gleiche Ort wie beim RBF angenommen. Zudem wurde ein LKW mit 40 t Nutzlast angenommen, da das Transportfahrzeug eine gewisse Länge aufweisen muss, aus diesem Grund ist die Auslastung so gering. Die Rückfahrt wurde in diesem Fall nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass der LKW andere Waren auf dieser Strecke transportiert.

Tabelle 12: Transportphase des SoF in Szenario 1

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P.2.1	Fertige Bauelemente (Lkw 40 t)	556,4	km	4,24%

Tabelle 13: Transportphase des SoF in Szenario 2

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P.2.1	Fertige Bauelemente (Lkw 40 t)	1112,8	km	4,24%

### Bauphase

Für die Bauphase konnten folgende Daten erhoben werden (Tabelle 14 und 15).

Tabelle 14: Bauphase des SoF in Szenario 1

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P. 3.1	Bauarbeiten (Treibstoffverbrauch, Diesel)	101,5	l	
P 3.2	Bodenabfuhr	21,6	t	80%

Tabelle 15: Bauphase des SoF in Szenario 2

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P. 3.1	Bauarbeiten (Treibstoffverbrauch, Diesel)	203	l	
P 3.2	Bodenabfuhr	21,6	t	80%

### Nutzungsphase

Nach Erkenntnissen der BUKEA können mehrere Sedimentationsrohre durch ein Saugfahrzeug an einem Tag gereinigt werden, daher wurde eine durchschnittliche Fahrtstrecke pro Sedimentationsrohr von 5 km angenommen. Der Hersteller empfiehlt die Reinigung des Sedimentationsrohrs bei einem Füllgrad von 80%. Daher wurde die bei der Reinigung anfallende Schlammmenge mit 80% des Volumens des Schlammraums des Sedimentationsrohrs angesetzt. Die zwei untersuchten Szenarien unterscheiden sich in der Anzahl der jährlichen Wartungen sowie der angefallenen Schlammmenge.

Tabelle 16: Nutzungsphase des SoF in Szenario in 1

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P. 4.1	Wartung jährlich			
P.4.1.1	Fahrtwege Saugfahrzeug (LKW 40t)	5	km	50%
P.4.1.2	Entsorgung belasteter Schlamm	761,84	kg	

Tabelle 17: Nutzungshase des SoF in Szenario 2

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
<b>P. 4.1</b>	Wartung 2x jährlich			
<i>P.4.1.1</i>	<i>Fahrtwege Saugfahrzeug (LKW 40t)</i>	<i>10</i>	<i>km</i>	<i>50%</i>
<i>P.4.1.2</i>	<i>Entsorgung belasteter Schlamm</i>	<i>1523,68</i>	<i>kg</i>	

## Entsorgungsphase

Tabelle 18: Entsorgungsphase des SoF in Szenario 1

Position	Material	Menge	Einheit
<b>P. 5.1</b>	PE/PE-HD (Polyethylen)	857	kg
<b>P. 5.2</b>	PP (Polypropylen)	282	kg
<b>P. 5.3</b>	NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	6,4	kg
<b>P. 5.4</b>	EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	0,6	kg

Tabelle 19: Entsorgungsphase des SoF in Szenario 2

Position	Material	Menge	Einheit
<b>P. 5.1</b>	PE/PE-HD (Polyethylen)	1714	kg
<b>P. 5.2</b>	PP (Polypropylen)	564	kg
<b>P. 5.3</b>	NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	12,8	kg
<b>P. 5.4</b>	EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	1,2	kg

### 5.1.1.3 Sedimentationsrohre mit Filtration

Der Abschnitt zur Datenerhebung des Sedimentationsrohrs mit Filtration (SmF) ähnelt der Datenerhebung der Sedimentationsrohre ohne Filtration, daher wird nur auf die Unterschiede eingegangen.

#### Verwendete Baumaterialien im Sedimentationsrohr mit Filtration

Tabelle 20: Materialangaben des SmF in Szenario 1

Position	Material	Menge	Einheit
P. 1.1	PE/PE-HD (Polyethylen)	857	kg
P. 1.2	PP (Polypropylen)	282	kg
P. 1.3	NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	6,4	kg
P. 1.4	EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	0,6	kg
P. 1.5	PA (Polyamid)	0,4	kg
P. 1.6	Filtersubstrat auf Basis von Eisen (III)-oxidhydrat, FeO(OH)	74	kg

Tabelle 21: Materialangaben des SmF in Szenario 2

Position	Material	Menge	Einheit
P. 1.1	PE/PE-HD (Polyethylen)	1714	kg
P. 1.2	PP (Polypropylen)	564	kg
P. 1.3	NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	12,8	kg
P. 1.4	EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	1,2	kg
P. 1.5	PA (Polyamid)	0,8	kg
P. 1.6	Filtersubstrat auf Basis von Eisen (III)-oxidhydrat, FeO(OH)	148	kg

#### Transport

Tabelle 22: Transportwege des SmF in Szenario 1

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P.2.1	Fertige Bauelemente (Lkw 40t)	556,4	km	4,25%

Tabelle 23: Transportwege des SmF in Szenario 2

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P.2.1	Fertige Bauelemente (Lkw 40t)	1112,8	km	4,25%

## Bauphase

Tabelle 24: Bauphase des SmF in Szenario 1

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P. 3.1	Bauarbeiten (Treibstoffverbrauch, Diesel)	101,5	l	
P 3.2	Bodenabfuhr	21,6	t	80%

Tabelle 25: Bauphase des SmF in Szenario 2

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P. 3.1	Bauarbeiten (Treibstoffverbrauch, Diesel)	203	l	
P 3.2	Bodenabfuhr	21,6	t	80%

## Nutzungsphase

Neben der jährlichen bzw. zweimal jährlichen Wartung muss nach Herstellerangaben bei Sedimentationsrohren mit Filtration alle 4 Jahre das Filtersubstrat ausgetauscht werden. In Szenario 2 wird dieser Austausch für alle 2 Jahre angenommen, da dies aufgrund äußerer Randbedingungen notwendig ist.

Tabelle 26: Nutzungsphase des SmF in Szenario 1

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P. 4.1	Wartung jährlich			
P.4.1.1	Fahrtwege (LKW 40t)	5	km	50%
P.4.1.2	Entsorgung belasteter Schlamm	761,84	kg	
P.4.2	Austausch des Filtersubstartes alle 4 Jahre	74	kg	

Tabelle 27: Nutzungsphase des SmF in Szenario 2

Position	Material	Menge	Einheit	Auslastung
P. 4.1	Wartung 2x jährlich			
P.4.1.1	Fahrtwege (LKW 40t)	10	km	50%
P.4.1.2	Entsorgung belasteter Schlamm	1523,68	kg	
P.4.2	Austausch des Filtersubstartes alle 2 Jahre	74	kg	

## Entsorgungsphase

Tabelle 28: Entsorgungsphase des SmF in Szenario 1

Position	Material	Menge	Einheit
P. 5.1	PE/PE-HD (Polyethylen)	857	kg
P. 5.2	PP (Polypropylen)	282	kg
P. 5.3	NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	6,4	kg
P. 5.4	EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	0,6	kg
P. 5.5	PA (Polyamid)	0,4	kg
P. 5.6	Filtersubstrat auf Basis von Eisen(III)-oxid-hydrat, FeO(OH)	74	kg

Tabelle 29: Entsorgungsphase des SmF in Szenario 2

Position	Material	Menge	Einheit
P. 5.1	PE/PE-HD (Polyethylen)	1714	kg
P. 5.2	PP (Polypropylen)	564	kg
P. 5.3	NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	12,8	kg
P. 5.4	EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	1,2	kg
P. 5.5	PA (Polyamid)	0,8	kg
P. 5.6	Filtersubstrat auf Basis von Eisen(III)-oxid-hydrat, FeO(OH)	148	kg

### 5.1.2 Erstellung der Ökobilanzen

Nach Beendigung der Datenerhebung erfolgte von der BUKEA eine Ausschreibung zur Erstellung der Ökobilanzen. Die Firma brands & values GmbH hat den Zuschlag erhalten. Anschließend wurden die Daten aus Abschnitt 5.1.1 der Firma brands & values vorgestellt, nochmal leicht angepasst und übermittelt. Zudem wurde der Rückhalt einer bestimmten Fracht an  $1\text{kg}_{\text{AFS63}}$  (vgl. Kap.3.1.3) als funktionelle Einheit (vgl. Kap. 3.2.2) festgelegt. Die Firma hat unter der Verwendung verschiedener Datensätze (Anhang 2) die Ökobilanz zu den Regenwasserbehandlungsanlagen erstellt. Zusätzlich hat die Firma drei Entsorgungsszenarien entwickelt, da über die Entsorgung der RWBA wenig bekannt ist. Die Entsorgungsszenarien sind ein Müllverbrennungsanlage-/Deponie-Szenario (MVA), ein Recycling-Szenario mit 100% Gutschriften für recycelte Kunststoffe (Rec100) und ein Recycling-Szenario mit 50% Gutschriften für recycelte Kunststoffe (Rec50). Wobei gem. §6 Kreislaufwirtschaftsgesetz (Abfallhierarchie) die Recycling-Szenarien zu bevorzugen sind. Die Entsorgungsszenarien werden im Anhang 3 näher erläutert. Die Ergebnisse der Ökobilanzen wurden in einem Bericht von brands & values zusammengefasst und im Rahmen dieser Arbeit ausgewertet (siehe Kapitel 6).

## 5.2 Mikroklima

Für die Bewertung des Indikators Mikroklima erfolgte eine kritische Auseinandersetzung mit der zusammengetragenen Literatur.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Ergebnisse zur Ökobilanz

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung wurden von der Firma brands & values ermittelt. Die Wirkungsabschätzung fasst die gesamten Umwelteinwirkungen der betrachteten RWBA für die einzelnen Wirkungskategorien (Indikatoren) zusammen.

Die Tabellen 30 bis 35 zeigen die Wirkungsabschätzungen der unterschiedlichen RWBA für die jeweiligen Szenarien sowie die unterschiedlichen Entsorgungsszenarien für die Indikatoren Treibhauspotential (GWP), Eutrophierungspotential (EP), Versauerungspotential (AP) und Wasserverbrauch.

Die Wirkungsabschätzung wird pro funktionelle Einheit angegeben, dafür wurde eine gleichbleibende Reinigungsleistung über die Lebensdauer von 50 Jahren angenommen. Diese gesamte Reinigungsleistung wird ins Verhältnis zu den Umweltauswirkungen der Szenarien, ebenfalls über den gesamten Zeitraum, gesetzt. Zum Beispiel bedeutet der GWP Wert von 1,23 aus Tabelle 30, dass über 50 Jahre Betrieb der Anlage pro funktionelle Einheit (1 kg<sub>AF563</sub>) 1,23 kg CO<sub>2</sub>-Äq. emittiert wird.

#### Retentionsbodenfilter

Tabelle 30: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den RBF in Szenario 1. Quelle: (brands & values, 2020)

Indikator	Einheit	Gesamt		
		MVA	Rec100	Rec50
<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	1,23E+00	1,44E+00	1,47E+00
<b>EP</b>	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äq.	5,07E-04	8,01E-04	8,06E-04
<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> -Äq	3,09E-03	4,17E-03	4,21E-03
<b>Wasserverbrauch</b>	kg	4,12E+00	6,83E+00	6,86E+00

Tabelle 31: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den RBF in Szenario 2. Quelle: (brands & values, 2020)

Indikator	Einheit	Gesamt		
		MVA	Rec100	Rec50
<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	1,32E+00	1,57E+00	1,60E+00
<b>EP</b>	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äq.	5,62E-04	8,93E-04	8,98E-04
<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> -Äq	3,40E-03	4,63E-03	4,67E-03
<b>Wasserverbrauch</b>	kg	4,25E+00	7,34E+00	7,47E+00

Die Tabellen 30 und 31 zeigen, dass die entwickelten Szenarien 1 und 2 einen Einfluss auf die Wirkungsabschätzungen besitzen, dieser war durch den längeren Transport der Materialien sowie der häufigeren Wartung zu erwarten. Im Verhältnis zu den entwickelten Entsorgungsszenarien besitzen diese aber einen geringeren Einfluss auf die Wirkungsabschätzungen. Bei allen vier Indikatoren fallen die Wirkungsabschätzungen der Recycling-Entsorgungsszenarien schlechter aus. Diese Unterschiede bei den Entsorgungsszenarien lassen sich hauptsächlich auf die modellierte Bodenwaschanlage zurückführen (siehe Anhang 3). Dort wird angenommen, dass 10% vom verwendeten Waschwasser, welches zur Aufbereitung der belasteten Böden genutzt wird, in einer Sondermüllverbrennungsanlage verbrannt wird. Diese Annahme ist die Hauptursache der Unterschiede bei den Recycling-Entsorgungsszenarien.

### Sedimentationsrohr ohne Filtration

Bei den Sedimentationsrohren haben die gewählten Szenarien einen deutlich höheren Einfluss auf die Ergebnisse als beim Retentionsbodenfilter. In Szenario 2 wird sowohl die doppelte Materialmenge benötigt als auch doppelt so häufig gewartet. Aus diesem Grund sind alle Werte in diesem Szenario ungefähr doppelt so groß, wobei die Hauptursache dafür in der doppelten Materialmenge liegt. Beim Treibhauspotential schneiden beide Recycling-Entsorgungsszenarien besser ab als das MVA/Deponie- Szenario, was auf die Gutschrift für recycelte Kunststoffe zurückzuführen ist. Bei den anderen drei Indikatoren schneiden beide Recycling-Entsorgungsszenarien schlechter ab, dies ist wieder auf die Bodenwaschanlage zurückzuführen (Anhang 3).

Tabelle 32: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den SoF in Szenario 1. Quelle: (brands & values, 2020)

Indikator	Einheit	Gesamt		
		MVA	Rec100	Rec50
<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	6,73E-01	5,12E-01	6,01E-01
<b>EP</b>	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äq.	1,70E-04	2,77E-04	2,91E-04
<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> -Äq	9,99E-04	1,40E-03	1,51E-03
<b>Wasserverbrauch</b>	kg	1,95E+00	1,95+00	2,35E+00

Tabelle 33: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den SoF in Szenario 2. Quelle: (brands & values, 2020)

Indikator	Einheit	Gesamt		
		MVA	Rec100	Rec50
<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	1,34E+00	1,02E+00	1,20E+00
<b>EP</b>	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äq.	3,36E-04	5,50E-04	5,80E-04
<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> -Äq	1,99E-03	2,78E-03	3,01E-03
<b>Wasserverbrauch</b>	kg	3,89E+00	3,90E+00	4,69E+00

## Sedimentationsrohr mit Filtration

Das Sedimentationsrohr mit Filtration weist im Verhältnis sehr ähnliche Wirkungsabschätzungen wie das Sedimentationsrohr ohne Filtration auf. Da aufgrund der Filtration aber eine geringere Fläche pro Anlage anschließbar ist, ist der Aufwand pro Anlage deutlich höher. Bezogen auf 1 kg AFS63 schneiden die Sedimentationsrohre mit Filtration in der Ökobilanz signifikant schlechter ab als ohne Filtration.

Tabelle 34: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den SmF in Szenario 1. Quelle: (brands & values, 2020)

Indikator	Einheit	Gesamt		
		MVA	Rec100	Rec50
<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	1,28E+00	1,00E+00	1,16E+00
<b>EP</b>	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äq.	3,68E-04	5,56E-04	5,82E-04
<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> -Äq	2,85E-03	3,54E-03	3,75E-03
<b>Wasserverbrauch</b>	kg	3,60E+00	3,65E+00	4,33E+01

Tabelle 35: Wirkungsabschätzung der Indikatoren für den SoF in Szenario 2. Quelle: (brands & values, 2020)

Indikator	Einheit	Gesamt		
		MVA	Rec100	Rec50
<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	2,54E+00	2,00E+00	2,30E+00
<b>EP</b>	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äq.	7,30E-04	1,11E-03	1,16E-03
<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> -Äq	5,67E-03	7,07E-03	7,47E-03
<b>Wasserverbrauch</b>	kg	7,20E+00	7,30E+00	8,66E+00

### 6.1.1 Auswertung der Ergebnisse

Eine vergleichende Auswertung der Wirkungsabschätzungen wurde von der Firma brands & values nicht durchgeführt, da für diese nach den ISO-Normen eine externe kritische Prüfung notwendig ist.

„Die kritische Prüfung ist ein Prozess zur Klärung, ob eine Ökobilanz die Anforderungen an die Methodik, Daten, Auswertung und Berichterstattung erfüllt und ob sie mit den Grundsätzen übereinstimmt. [...] Eine kritische Prüfung kann zum besseren Verständnis beitragen und die Glaubwürdigkeit von Ökobilanzen erhöhen, z. B. durch Einbeziehung interessierter Kreise. Die Anwendung von Ergebnissen der Ökobilanz für vergleichende Aussagen wirft besondere Fragen auf und erfordert eine kritische Prüfung, weil diese Anwendung wahrscheinlich interessierte Kreise betrifft, die nicht an der Erstellung der Ökobilanz beteiligt sind. Der Umstand, dass eine

kritische Prüfung durchgeführt wurde, sollte jedoch keinesfalls bedeuten, dass einer vergleichenden Aussage zugestimmt wird, die auf einer Ökobilanz-Studie beruht.“ [ISO 14040, S.33]

Diese kritische Prüfung wurde nicht durchgeführt, daher ist die folgende Auswertung nicht ISO-konform und wird nur für interne Zwecke der BUKEA benutzt.

Für die Auswertung wurde das Szenario 2 des RBF als Referenzwert gewählt und ins Verhältnis zu den restlichen RWBA und ihren Szenarien gesetzt. Zusätzlich wurde der Stromverbrauch des Pumpwerks während der Nutzung des RBF für das Szenario 2 rausgerechnet, da nicht jeder RBF aufgrund seiner geografischen Lage ein Pumpwerk benötigt und der Stromverbrauch des Pumpwerks einen signifikanten Einfluss auf die Wirkungsabschätzungen besitzt. Die vollständige Auswertung ist aus dem Anhang 4 zu entnehmen. Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils beispielhafte Auszüge dieser Auswertung. Wobei 100% jeweils dem entsprechenden Wert aus dem Referenzszenario entspricht. Abbildung 19 zeigt den Anteil der unterschiedlichen betrachteten Parameter der Wirkungsabschätzung vom RBF S.2 ohne Pumpwerk im Verhältnis zum Referenzszenario. Zum Beispiel beträgt der Anteil des Treibhauspotentials zwischen ca. 70% und ca. 76% und ist somit um ca. 1/4 geringer als das Treibhauspotential des Referenzszenarios.

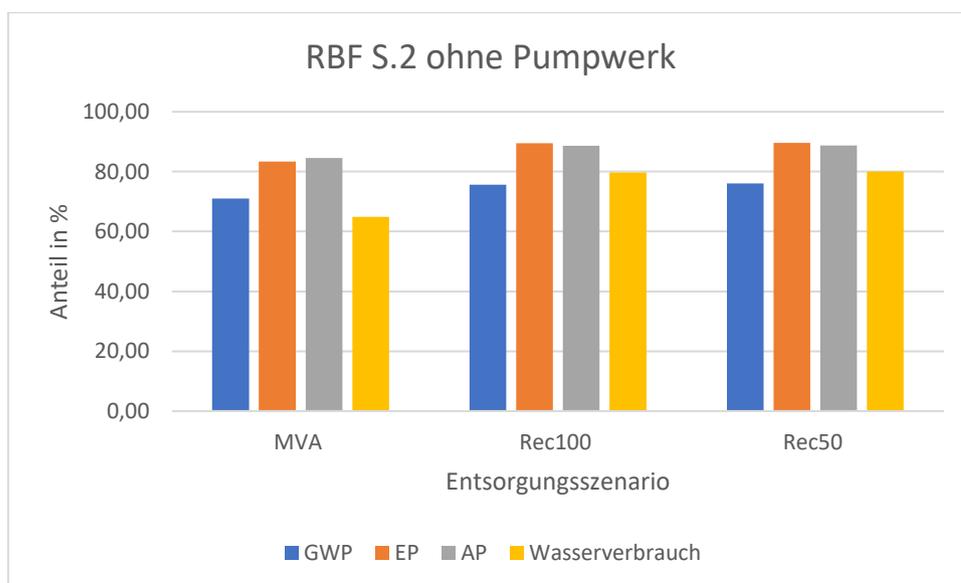


Abbildung 19: Anteil des RBF S.2 ohne Pumpwerk vom Referenzszenario

Abbildung 20 zeigt den Anteil des Sedimentationsrohres ohne Filtration S.2 im Vergleich zum Referenzszenario.

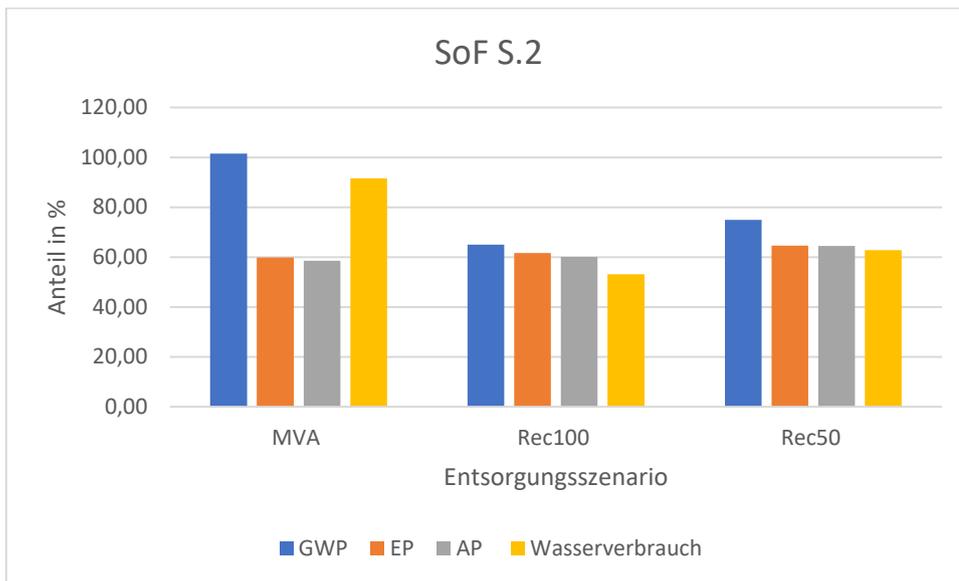


Abbildung 20: Sedimentationsrohr ohne Filtration im Verhältnis zum Referenzszenario

Abbildung 21 zeigt den Anteil des Sedimentationsrohres mit Filtration für des Szenario 2 im Verhältnis zum Referenzszenario.

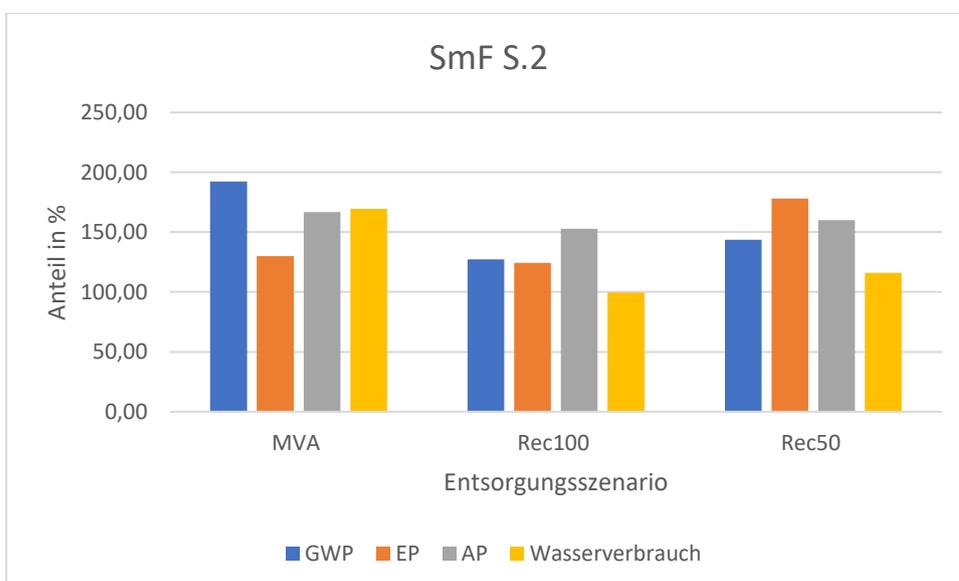


Abbildung 21: Sedimentationsrohr mit Filtration im Verhältnis zum Referenzszenario

Um die Vergleichbarkeit zwischen den Anlagentypen und den verschiedenen Indikatoren herzustellen, wurde für die weitere Auswertung mit Umweltschadenskosten gerechnet.

Das Umweltbundesamt (UBA) hat Werte für Umweltschadenskosten ermittelt (siehe Tabelle 36) und in der Publikation „Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten“ veröffentlicht. Diese Werte wurden in dieser Arbeit verwendet (Ausnahme EP). Für das Treibhauspotential wurden zwei Werte ermittelt, das UBA empfiehlt jedoch die Verwendung des höheren Werts, da „dieser eine Gleichgewichtung der Nutzen heutiger und zukünftiger Generationen widerspiegelt“. (UBA<sup>4</sup>,2019, S.9)

Tabelle 36: Umweltschadenskosten der ermittelten Indikatoren

Emissionen	Wert [€/t]	Quelle
CO <sub>2</sub> -Äq. /GWP	180€ <sub>2016</sub>	(UBA4, 2019)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äq./ EP	1700€ <sub>2002</sub>	(BMVBS, 2010)
SO <sub>2</sub> -Äq / AP	15040€ <sub>2016</sub>	(UBA4, 2019)
CO <sub>2</sub> -Äq. / GWP (empfohlen)	640€ <sub>2016</sub>	(UBA4, 2019)

Tabelle 37 zeigt für den RBF S.2 mit Pumpwerk die Zusammensetzung der Umweltkosten pro kg<sub>AF563</sub>. Es wurde mit dem empfohlenen Wert von 640 €<sub>2016</sub> / t CO<sub>2</sub> äq gerechnet.

Tabelle 37: Beispiel für die Zusammensetzung der Umweltschadenskosten pro FE für das Referenzszenario

Indikator	MVA [€/FE]	Rec100 [€/FE]	Rec50 [€/FE]
<b>GWP</b>	0,84 (94,2%)	1,00 (93,4%)	1,02 (93,5%)
<b>EP</b>	0,00096 (0,1)	0,00152 (0,1%)	0,00153 (0,1%)
<b>AP</b>	0,05 (5,7%)	0,07 (6,5%)	0,07 (6,4%)
<b>Summe</b>	0,90 (100%)	1,07 (100%)	1,09 (100%)

Tabelle 37 zeigt deutlich, dass der größte Einfluss auf die Umweltschadenskosten vom GWP kommt, also vom Treibhauspotential. Für die restlichen RWBA sieht diese Zusammensetzung der Umweltkosten sehr ähnlich aus.

In Tabelle 38 sind die gesamten Umweltschadenskosten pro funktionelle Einheit der Anlagen mit ihren Szenarien dargestellt.

Tabelle 38: Gesamte Umweltschadenskosten je Szenario pro funktionelle Einheit

Anlage/Szenario	MVA [€/FE]	Rec100 [€/FE]	Rec50 [€/FE]
<b>RBF S.1</b>	0,83	0,98	1,00
<b>RBF S.2 mit Pumpe</b>	0,90	1,07	1,09
<b>RBF S.2 ohne Pumpe</b>	0,64	0,82	0,84
<b>SoF S.1</b>	0,44	0,34	0,40
<b>SoF S.2</b>	0,88	0,69	0,81
<b>SmF S.1</b>	0,86	0,69	0,79
<b>SmF S.2</b>	1,71	1,38	1,58

Um diese berechneten Umweltschadenskosten in Perspektive zusetzen, wurden alle Werte mit dem Faktor 494.600 multipliziert. Dieser Wert entspricht der geschätzten Reinigungsleistung für AFS63 des RBF „Manshardtstraße“ über 50 Jahre ( $9892 \text{ kg}_{\text{afs63}}/\text{a} * 50 \text{ a}$ ). Durch diese Festlegung ist eine Vergleichbarkeit gegeben, da angenommen wird, dass jede Anlage auf dem gleichen Niveau reinigt wie der RBF. Im Falle von Sedimentationsrohren ohne Filtration werden mehr als 55 und für Sedimentationsrohre mit Filtration mehr als 100 Anlagen benötigt.

Tabelle 39 zeigt die Werte für die kumulierten, errechneten Umweltschadenskosten bei einer Lebensdauer von 50 Jahren und einer Reinigungsleistung von  $494.600 \text{ kg}_{\text{afs63}}$  der RWBA. Der Tabelle ist außerdem zu entnehmen, dass der Stromverbrauch der Pumpe des RBFs zusätzliche Umweltschadenskosten in Höhe von 125.228 € verursacht.

*Tabelle 39: Gesamte Umweltschadenskosten der RWBA hochgerechnet auf die Reinigungsleistung des RBF*

Anlage/Szenario	MVA [€]	Rec100 [€]	Rec50 [€]
<b>RBF S.1</b>	412.761	487.517	497.315
<b>RBF S.2 mit Pumpe</b>	443.602	532.167	541.965
<b>RBF S.2 ohne Pumpe</b>	318.375	406.939	416.737
<b>SoF S.1</b>	220.608	172.718	201.720
<b>SoF S.2</b>	439.255	344.017	402.731
<b>SmF S.1</b>	426.686	343.345	395.576
<b>SmF S.2</b>	846.813	686.614	784.964

## Wasserverbrauch

Der Wasserverbrauch in Deutschland beträgt statistisch 3.900 Liter pro Tag pro Kopf. Dieser Betrag setzt sich sowohl aus „grünem“ (natürlich vorkommendes Boden- und Regenwasser) und „blauem“ Wasser (vgl. Kap.3.2.3.4) zusammen als auch aus importiertem und exportiertem virtuellem Wasser. Virtuelles Wasser ist Wasser, das benötigt wird, um Produkte herzustellen. Der Import von virtuellem Wasser überwiegt den Export. Dieses im Ausland verwendete Wasser wird hier dem deutschen Wasserverbrauch hinzugerechnet (UBA<sup>5</sup>, 2020).

Tabelle 40 gibt den Wasserverbrauch der Anlagen im Vergleich zu dem Pro-Kopf-Wasserverbrauch Deutschlands an. So verbraucht der RBF mit S.1 bei dem MVA Entsorgungsszenario während seiner Lebensdauer von 50 Jahren so viel Wasser wie 523 Menschen in Deutschland statistisch an einem Tag verbrauchen.

Tabelle 40: Wasserverbrauch der RWBA über 50 Jahre im Vergleich zu dem täglichen Pro-Kopf-Wasserverbrauchs in Deutschlands

Anlage und Szenario	MVA	Rec100	Rec50
RBF S.1	539	931	947
RBF S.2 mit Pumpe	334	677	935
RBF S.2 ohne Pumpe	523	866	1124
SoF S.1	247	247	298
SoF S.2	493	495	595
SmF S.1	457	463	549
SmF S.2	913	926	1098

Im Vergleich dazu, werden durch jeden Deutschen fast 29 kg CO<sub>2</sub>- Äquivalente am Tag emittiert (UBA<sup>6</sup>, 2020). Daraus ergibt sich folgende Tabelle 41 für den Verbrauch der RWBA im Vergleich zum Pro-Kopf-Verbrauch.

Tabelle 41: Treibhauspotential der RWBA im Vergleich zu den täglichen Pro Kopf CO<sub>2</sub> Ausstoßes in Deutschlands

Anlage und Szenario	MVA	Rec100	Rec50
RBF S.1	21.353	24.999	25.520
RBF S.2 mit Pumpe	22.916	27.256	27.777
RBF S.2 ohne Pumpe	14.704	18.350	18.871
SoF S.1	11.684	24.999	25.520
SoF S.2	23.263	17.708	20.833
SmF S.1	22.221	17.360	20.138
SmF S.2	44.096	34.721	39.929

Durch die Gegenüberstellung der Pro-Kopf Vergleiche Deutschlands wird deutlich, dass der Wasserverbrauch der Anlagen im Gegensatz zu dem Treibhauspotential eine untergeordnete Rolle spielt. Aus diesem Grund wird der Wasserverbrauch in Kapitel 7 nicht weiter betrachtet.

## 6.2 Ergebnisse zum Mikroklima

Bezüglich der Auswirkungen auf das Mikroklima kann ein RBF (vgl. Kap. 3.3.1) den Urban Wetlands (vgl. Kap. 3.3.8) zugeordnet werden, wobei der RBF entweder einer pflanzenbedeckten Wasserfläche oder einem Verdunstungsbeet zuzuordnen ist, abhängig von dem Wasserstand des Filters. Außerdem verfügt Schilf mit ca. 1100 mm/a (Tab. 1) über eine sehr hohe

Verdunstungsleistung. Die Verdunstungsleistung ist vor allem in den Mittags- und Nachmittagsstunden am stärksten (vgl. Kap. 3.3.9). Wenn genügend Wasser im Filter vorhanden ist, findet auch eine nächtliche Verdunstung und damit ein Kühlungseffekt statt. Daraus lässt sich schließen, dass RBF hinsichtlich der Verdunstungsleistung eine sehr gute Flächennutzung darstellen. Die Hitzebelastung wird vor allem in Städten zunehmen. Außerdem kommt es in Städten, insbesondere bei Strahlungswetterlagen, zu Temperaturunterschieden im Vergleich zum Umland. Daher wird die Auswirkung eines RBF sowohl auf die Hitzebelastung als auch auf den Wärmeinselseffekt für Tage mit Strahlungswetterlage betrachtet.

Laut Scherer benötigen Parks und Grünflächen, welche mit Wasser versorgt sind, mindesten die Größe eines Hektars, damit Flurwinde aufkommen können. Damit ist ein RBF, der einen beispielhaften Flächenbedarf von 2200 m<sup>2</sup> und davon eine Filterfläche von 1600 m<sup>2</sup> aufweist, nicht in der Lage Flurwinde zu erzeugen. Somit besitzt ein RBF bei Strahlungswetterlagen nicht die Fähigkeit, die umliegenden Wärmeinseln, die bei diesen Wetterlagen besonders stark auftreten, zu mindern. Durch fehlenden Luftaustausch wird lediglich die lokale Lufttemperatur bzw. die Wärmeinsel verringert.

Daraus ergibt sich folgende Schlussfolgerung für die Hitzebelastung: Die Hitzebelastung korreliert stark mit dem Wärmeinseleffekt mit dem Unterschied, dass Menschen in der Lage sind, sich zu kühlenden Gebieten hin zu bewegen. So gesehen sind RBF in der Lage die Hitzebelastung von Menschen zu lindern, da sich in ihrer unmittelbaren Umgebung niedrigere Lufttemperaturen einstellen. Dieser Nutzen ist jedoch als gering einzustufen. Ein RBF stellt erstens kein direktes Naherholungsgebiet dar und lädt somit nicht zur Freizeitnutzung ein. Zweitens ist die Hitzebelastung besonders gefährlich, wenn die Lufttemperatur nachts nicht unter 20 °C fällt, da sich der menschliche Körper in diesen sogenannten Tropennächten auch nachts nicht erholen kann. Da ein RBF keinen Einfluss auf umliegende Wohngebiete hat, kann dort die Hitzebelastung nicht gemindert werden. Jedoch zeigen die Ergebnisse, dass ein RBF mit Verbindung einer Parkanlage einen positiven Effekt auf das Mikroklima haben könnte. Die Fortführung dieser Schlussfolgerung wird in Kapitel 7.2 aufgezeigt.

# 7 Zusammenfassende Bewertung und Ausblick

## 7.1 Ökobilanz

Für die zusammenfassende Bewertung und für den Ausblick zum Thema Ökobilanz wird zuerst eine kritische Beurteilung über die erstellten Ökobilanzen aufgestellt und anschließend eine Empfehlung zur Integration in die KNA ausgesprochen.

### 7.1.1 Kritische Beurteilung der Ergebnisse

In den erstellten Ökobilanzen wurden bereits von der Firma brands & values kritische Punkte der Ökobilanzen aufgezählt. Einer lautet, dass der Einfluss der Energiewende auf den Stromverbrauch des Pumpwerkes nicht berücksichtigt wurde. Ein weiterer kritischer Punkt ist zudem, welche Auswirkungen verschiedene Sekundärmaterialanteile für die verwendeten Materiale/Komponenten haben. Außerdem wird die gereinigte Wasserqualität nur bedingt durch den Parameter AFS63 berücksichtigt, dieser spiegelt unzureichend die Reinigungsleistung von gelösten Stoffen wider. Sedimentationsrohre mit Filtration sowie RBF besitzen die Fähigkeit, gelöste Stoffe zu reinigen. Des Weiteren wurde der Aufwand des Abrisses der RWBA nicht in den Ökobilanzen berücksichtigt (brands & values, 2020).

Weitere kritische zu bewertende Punkte der Ökobilanzen sind, dass ein RBF nach 50 Jahren bereits abgerissen wird. Nach der Nutzungsdauer von Bauteilen, ist die Lebensdauer von Betonwänden sowie Material aus nicht rostendem Stahl min. 50 Jahre (BMVBS<sup>4</sup>, 2011). Durch die Sanierung der Materialien mit geringerer Lebensdauer, ist es theoretisch möglich, die Lebensdauer des RBF zu erhöhen. Dies führt zu einer Verbesserung der Wirkungsabschätzung des RBF. Anhand dieser theoretischen Sanierungsmöglichkeiten und einer damit verbundenen Verlängerung der Lebensdauer ist auch bei einem RBF die angenommene Lebensdauer von 50 Jahren das „worst case“ Szenario.

Ein weiterer kritischer Punkt der Ökobilanzen ist, dass die Bauphase nur geringfügig betrachtet wurde. Hierbei wurde nur der Treibstoffverbrauch der Baggerarbeiten berücksichtigt. Die Bauphase besitzt jedoch insgesamt nur einen geringen Einfluss auf die Wirkungsabschätzung, daher ist das Fehlen nicht berücksichtigter Bauarbeiten vernachlässigbar. Zudem wurde für den RBF S.2 ohne Pumpwerk nur der Stromverbrauch des Pumpwerkes über 50 Jahre und nicht das tatsächlich gebaute Pumpwerk herausgerechnet. Jedoch ist der zusätzliche Aufwand, der durch den Bau eines Pumpwerks entsteht als gering einzustufen, daher sind die ermittelten Umweltschadenskosten für den RBF S.2 ohne Pumpwerk eine gute Annäherung.

Trotz dieser kritischen Punkte kann nach dem heutigen Wissensstand von erfolgreichen Ergebnissen gesprochen werden. Durch diese Ergebnisse können die Anlagen nach ihren Umweltauswirkungen eingestuft werden. Außerdem wird deutlich, welchen Einfluss sowohl die

Lebensdauer als auch (untergeordnet) die Anzahl der Wartung bzw. die angefallene Menge an Schlamm auf die Ökobilanzen besitzen. Zudem wurde auch der nicht irrelevante Einfluss eines Pumpwerkes auf die Umweltauswirkungen erkennbar.

### 7.1.2 Empfehlungen zur Integration in die Kosten-Nutzen-Analyse

Aufgrund der Unklarheiten bei der Entsorgung wird in der Bewertung jeweils das „worst case“ Entsorgungsszenario verwendet, also das Entsorgungsszenario, das die höchsten Umweltschadenskosten aufweisen. Dieses Ranking wird in Tabelle 42 gezeigt, wobei bei den RBF das Entsorgungsszenario „Rec50“ und bei den Sedimentationsrohren das „MVA/Deponie“ Entsorgungsszenario die höchsten Kosten besitzen.

Tabelle 42: Ranking der "worst case" Umweltschadenskosten der RWBA

Position	Anlage und Szenario	Umweltschadenskosten [€]
1	SoF S.1	220.608
2	RBF S.2 ohne Pumpe	416.737
3	SmF S.1	426.686
4	SoF S.2	439.255
5	RBF S.1	497.315
6	RBF S.2	541.965
7	SmF S.2	846.813

Diese Bewertung zeigt deutlich, dass aus der Sicht der Umweltschadenskosten das SoF mit S.1 mit Abstand am besten abschneidet, mit einem nicht geringen Betrag von fast 200.000 €. Dies ist hauptsächlich auf die Annahme einer Lebensdauer des SoF von 50 Jahren zurückzuführen. Gefolgt wird das SoF vom RBF S.2 ohne Pumpwerk, SmF S.1 und vom SoF S.2 welche alle zwischen 416.000 - 440.000 € liegen. Danach kommt der RBF S.1 mit 497.315 € und der RBF S.2 mit Pumpe mit 541.965 €. Mit Abstand am schlechtesten schneidet der SmF S.2 mit 846.813 € ab.

Die Bewertung der Ergebnisse der Ökobilanzen zeigt, dass die Belastung der Umwelt durch die RWBA nicht irrelevant sind. Diese wurde durch die Umweltschadenskosten monetarisiert, wobei das Treibhauspotential den größten Anteil an den Umweltschadenskosten besitzt.

Auf Grundlage dieser Bewertung lässt sich eine Aufnahme des Indikators Ökobilanz in die Kosten-Nutzen-Analyse empfehlen. Eine Einschränkung dabei ist, dass bisher nur diese drei RWBA-Typen nach diesem Indikator bewertet werden können, da für andere RWBA keine Ökobilanzen vorliegen. Der Vergleich dieser Typen hat aber nach Erfahrung der BUKEA eine hohe Praxisrelevanz.

Es ist empfehlenswert von den „worst case“ Szenarien auszugehen (jeweils Szenario 2), solange keine Verifizierung der jeweiligen Szenarien (besonders für die Lebensdauer der Anlagen) als

auch der Entsorgungsszenarien vorliegen. Die entsprechenden Umweltschadenskosten sind in Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 43: Empfohlene Annahme der Umweltschadenskosten für die RWBA

Position	Anlage und Szenario	Umweltschadenskosten [€]
1	RBF S.2 ohne Pumpwerk	416.737
2	SoF S.2	439.255
3	RBF S.2	541.965
4	SmF S.2	846.813

Außerdem wird empfohlen den Indikator Ökobilanz durch Sonderpunkte auf der Aufwandsseite in die KNA einzubauen. Auf der Aufwandsseite sind hohe Punktzahlen als schlechte Bewertung anzusehen. Aus diesem Grund wird empfohlen, für die bestmöglichen RWBA aus Umweltschadenssicht (siehe Tabelle 43), keine Sonderpunkte zu verteilen. Anschließend werden von der 400.000 €- Marke für die Umweltschadenskosten in Abschnitten von 120.000 € jeweils 0,1 Sonderpunkte verteilt. Die daraus entstehende Skala ist in Tabelle 44 dargestellt. Durch diese Skala werden für den RBF S.2 ohne Pumpwerk sowie dem SoF S.2 keine Sonderpunkte verteilt. Der RBF S.2 (mit Pumpwerk) erhält 0,1 und das SmF S.2 0,3 Sonderpunkte auf der Aufwandsseite. Durch diese Empfehlung werden die RWBA, die aus Umweltschadenssicht für die 3 betrachteten Parametern insgesamt höhere Kosten aufweisen, schlechter in der KNA bewertet.

Es ist zu berücksichtigen, dass diese Skala unter Umständen angepasst werden muss, wenn die zugrunde liegenden Szenarien, hauptsächlich die letztendliche Lebensdauer der RWBA, verifiziert wurden.

Tabelle 44: Skala zur Bewertung der Umweltschadenskosten

Sonderpunkte	Umweltschadenskosten [€]
0	400.000-520.000
0,1	520.000-640.000
0,2	640.000-760.000
0,3	760.000-880.000

Diese Empfehlung lässt sich durch Erfahrung im Umgang mit der KNA und mit dem Wissen, welchen Einfluss Sonderpunkte auf das endgültige Ergebnis haben können, begründen. Durch diese Bewertung ist direkt erkennbar, welche RWBA für den Indikator Ökobilanz besser abschneidet als andere.

## 7.2 Mikroklima

Hinsichtlich der wachsenden Hitzebelastung in deutschen Städten durch den Klimawandel und dem Ziel, die Wasserrahmenrichtlinie zu erfüllen, sollte über eine Kombination zur Bewältigung beider Probleme nachgedacht werden. RBF sind aufgrund ihrer guten Wirkungsgrade und hohen Reinigungsleistungen besonders in der Regenwasserbehandlung gefragt, gleichzeitig besitzen diese ein großes Potential für die wassersensible Stadtentwicklung. Deshalb sollte über die Aufnahme von RBF in das Schwammstadtprinzip diskutiert werden. Neben der Fähigkeit einer hohen Verdunstungsleistung könnten RBF, die wie auch andere RWBA zwar grundsätzlich auf geringe Regenereignisse dimensioniert sind, in der Lage sein, bei einer ausreichend großen Anzahl in einem Einzugsgebiet, eine hydraulische Entlastung für das Gewässer bei Starkregenereignissen zu haben.

Zusätzlich könnte das gereinigte Regenwasser zur Bewässerung der umliegenden Vegetation genutzt werden. So wäre eine Kombination aus Park bzw. Grünfläche mit einem RBF vorstellbar (vgl. Kap.3.3.8). Außerdem könnte so auch die benötigte Fläche von min. einem Hektar, die Voraussetzung, dass Flurwinde entstehen, erreicht werden. Als Voraussetzung für Flurwinde und Verdunstung ist Wasser notwendig. Damit dies auch während Hitze- und Trockenperioden gewährleistet ist, könnte die Dauerstau-Funktion des RBF gezielt dafür genutzt werden. So wäre die Verdunstungsleistung der Filterfläche gewährleistet, zusätzlich könnten, durch das gespeicherte Wasser, die umliegenden Grünflächen bewässert werden.

Durch diese Kombination wäre die Kühlungsfunktion eines Parks als Naherholungsgebiet und eine Minderung der umliegenden Wärmeinseln während Hitzeperioden gewährleistet. Beides führt zur Minderung der Hitzebelastung.

Dabei sind jedoch folgende Punkte zu beachten:

- Es muss darauf geachtet werden, dass es aufgrund des Dauerstaus zu Kolmation des Filterbodens und damit zu einer Verringerung der Reinigungsleistung kommen kann.
- Darüber hinaus sind die Auswirkungen auf die Ökologie des Gewässers aufgrund von fehlendem Wasser, vor allem während Hitze/Trockenperioden, welches durch den RBF zurückgehalten wird und anschließend ggf. zur Bewässerung genutzt wird, als kritisch zu betrachten und sollte in späteren Arbeiten untersucht werden.
- Zudem ist eine technische und betriebliche Schwierigkeit für die Umsetzung dieser Idee vorhanden, da die Dauerstaufunktion rechtzeitig angewendet werden muss. Eine mögliche Lösung dafür wäre eine Koppelung mit Wettervorhersagen, um auf Hitzeperioden im Vorfeld reagieren zu können. Außerdem könnte dadurch die Auflösung des Dauerstaus rechtzeitig erfolgen, da es sonst bei nachfolgenden Regenereignissen vermehrt zu Überläufen kommen kann, da das Retentionsvolumen durch den Dauerstau geringer ist.

Die entwickelte Kosten-Nutzen-Analyse für Regenwasserbehandlungsanlagen ist aus festen, immer zu bewerteten Indikatoren aufgebaut. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, Indikatoren, welche nicht bei jeder Anlage vorkommen, in Form von Sonderpunkten zusätzlich zu berücksichtigen.

Der Indikator Mikroklima sollte derzeit nicht als fester Bestandteil in die KNA aufgenommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit konnten nicht ausreichend belegbare Argumente für eine Aufnahme identifiziert werden. Ein RBF ist, für sich allein genommen, mit seiner verhältnismäßig geringen Größe nicht in der Lage das umliegende Mikroklima so zu beeinflussen, dass umliegende Wärmeinseln verringert werden.

Wenn jedoch ein RBF mit einer Parkanlage und/oder der beschriebenen gezielten Speicherung und Nutzung von Wasser kombiniert wird, könnte durchaus ein Potential zur Minderung des Mikroklimas vorhanden sein. Dieser Effekt sollte durch weitergehende Forschungen untersucht werden.

# Literaturverzeichnis

- BMVBS. (2010). *Externe Kosten im Hochbau*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Abgerufen am 2. 12 2020 von [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvbs/bmvbs-online/2010/DL\\_ON172010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvbs/bmvbs-online/2010/DL_ON172010.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- BMVBS<sup>1</sup>. (2013). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Treibhauspotential (GWP)*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Abgerufen am 29. 11 2020 von [https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v\\_2013/BNB\\_UN2013\\_111.pdf](https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_111.pdf)
- BMVBS<sup>2</sup>. (2011). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Überdüngungspotential (EP)*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung. Abgerufen am 29. 11 2020 von [https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v\\_2011\\_1/BNB\\_BN2011-1\\_115.pdf](https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v_2011_1/BNB_BN2011-1_115.pdf)
- BMVBS<sup>3</sup>. (2013). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Versauerungspotential (AP)*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung. Abgerufen am 29. 11 2020 von [https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v\\_2011\\_1/BNB\\_BN2011-1\\_115.pdf](https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v_2011_1/BNB_BN2011-1_115.pdf)
- BMVBS<sup>4</sup>. (2011). *Nutzungsdauer von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Abgerufen am 30. 11 2020 von [https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer\\_Bauteile/BNB\\_Nutzungsdauern\\_von\\_Bauteilen\\_\\_2011-11-03.pdf](https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen__2011-11-03.pdf)
- BNB. (29. 11 2020). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Treibhauspotential (GWP)*. Abgerufen am 29. 11 2020 von [https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v\\_2013/BNB\\_UN2013\\_111.pdf](https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_111.pdf)
- brands & values. (2020). *Erstellung von Ökobilanzen für unterschiedliche Regenwasserbehandlungsanlagen*. Bremen: brands & values GmbH.
- Čuček, L. (2015). *Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability*. Abgerufen am 29. 11 2020 von <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/blue-water-footprint>
- DIN EN 10088-3. (2014). *Nichtrostende Stähle - Teil 3*. Deutschen Instituts für Normung .
- DIN EN 12390-1. (2012). *Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen*. Deutschen Instituts für Normung .
- DIN EN ISO 1183-1. (2019). *Kunststoffe - Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen*. Deutschen Instituts für Normung.
- DIN EN ISO 14040. (2006). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Domroese, J. (2007). *Quantifizierung der Verdunstungsleistung (Kühlleistung) von Böden in Hamburg*. Hamburg.

- DWA-A 102-1. (2020). *Arbeitsblatt DWA-A 102-1/BWK-A 3-1*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- DWA-M 504-1. (2018). *Merkblatt DWA-M 504-1*. Hennef: Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- DWD. (29. 11 2020). *Deutscher Wetterdienst, Wetterlexikon*. Von [https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html) abgerufen
- Europäisches Parlament/Rates. (2000). *RICHTLINIE 2000/60/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES*. Brüssel: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften. Abgerufen am 28. 08. 2020 von [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0003.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0003.02/DOC_1&format=PDF)
- GEO-Net. (2012). *Stadtklimatische Bestandsaufnahme und Bewertung für das Landschaftsprogramm Hamburg Klimaanalyse und Klimawandelszenario 2050*. Hannover: GEO-NET Umweltconsulting GmbH.
- Harlaß, R. (2009). *Verdunstung in bebauten Gebieten*. Dresden.
- Henninger, S., & Weber, S. (2019). *Stadtklima*. Paderborn: Verlag Ferdinand Schöningh.
- Heß, C. (2020). *Konzept Entwurf „Finanzierung, Herstellung und Unterhaltung von öffentlichen Behandlungsanlagen für belastetes Niederschlagswasser in Hamburg“*. Hamburg: BUKEA (internes Firmendokument).
- HSE. (2017). *Leistungsverzeichnis Projekt: S-09-0127 Manshardtstraße RWBA*. Hamburg: Hamburger Stadtentwässerung.
- HSE, BUE. (2015). *RISA STRUKTURPLAN REGENWASSER 2030*. Hamburg: Hamburger Stadtentwässerung AöR (HSE) und Behörde für Umwelt und Energie (BUE).
- ifs. (2017). *Schlussbericht - Regenwasserbehandlungsanlage Plettenberg in der Hansestadt Hamburg-Lohbrügge*. Hannover: Ingeniergesellschaft für Stadthydrologie mbH.
- in-foliopaysagistes. (2019). *création des Jardins des Grands Moulins-abbé Pierre*. Paris: in-foliopaysagistes. Abgerufen am 29. 11 2020 von <https://www.in-foliopaysagistes.fr/%C3%A9tudes-et-projets/parcs-et-jardins/paris-grands-moulins/>
- Klöpffer, W., & Grahl, B. (2007). *Ökobilanz (LCA)*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag.
- LfU Bayern. (2018). *Bayerisches Landesamt für Umwelt*. Abgerufen am 07. 08. 2020 von [https://www.lfu.bayern.de/wasser/wrrl/grundlagen\\_und\\_ziele/index.htm](https://www.lfu.bayern.de/wasser/wrrl/grundlagen_und_ziele/index.htm)
- MUNLV NRW. (2015). *Retentionsbodenfilter-Handbuch für Planung, Bau und Betrieb*. Düsseldorf: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- MVIBW. (2012). *Städtebauliche Klimafibel*. Stuttgart: Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg.
- Sabug. (2020). *Sedimentationsanlagen*. Abgerufen am 4. 12 2020 von <https://www.sabug.de/produkte/tank-und-behaeltersysteme/sedimentationsanlagen/>
- Scherer, D. (2007). *TUB: Besseres Stadtklima durch viele Parks*. Berlin: Technische Universität Berlin. Abgerufen am 29. 11 2020 von <https://idw-online.de/de/news223022>
- Scherer, D., Fehrenbach, U., Lakes, T., Lauf, S., Meier, F., & Schuster, C. (2013). *Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany*.

- Berlin: Journal of the Geographical Society of Berlin. Abgerufen am 29. 11 2020 von [https://www.die-erde.org/index.php/die-erde/article/view/49/pdf\\_3](https://www.die-erde.org/index.php/die-erde/article/view/49/pdf_3)
- Schmitt, T., Welker, A., Dierschke, M., Uhl, M., Maus, C., & Remmler, F. (2006). *Entwicklung von Prüfverfahren für Anlagensfdvfv*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Abgerufen am 4. 12 2020 von <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-26840.pdf>
- Schumann, F. (2019). Das geheime Leben des Körpers in der Hitzewelle. *Der Tagesspiegel*. Abgerufen am 29. 11 2020 von <https://www.tagesspiegel.de/wissen/anpassung-an-extremtemperaturen-das-geheime-leben-des-koerpers-in-der-hitzewelle/24481428.html>
- SenStadtUm. (2016). *Klimaanpassung in der Wachsenden Stadt*. Berlin: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt.
- UBA. (2012). *Glossar zum Ressourcenschutz*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA<sup>1</sup>. (2019). *Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA<sup>2</sup>. (2020). *Gesundheitsrisiken durch Hitze*. Umweltbundesamt. Abgerufen am 29. 11 2020 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#indikatoren-der-lufttemperatur-heisse-tage-und-tropennachte>
- UBA<sup>3</sup>. (2009). *Klimawandel und Gesundheit*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA<sup>4</sup>. (2019). *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze Stand 02/2019*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA<sup>5</sup>. (2020). *Wassernutzung privater Haushalte*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Abgerufen am 28. 11 2020 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wassernutzung-privater-haushalte#grunes-und-blaues-wasser>
- UBA<sup>6</sup>. (2020). *Treibhausgas-Emissionen in der Europäischen Union*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Abgerufen am 26. 11 2020 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#gase>
- Wellpoint. (2020). *Grundwasseraggregate*. Neubrandenburg: wellpoint GmbH. Abgerufen am 24. 11 2020 von <https://www.wellpoint.de/grundwasseraggregate/>
- Zeppelin Cat. (2018). *Technische Daten, 320 Hydraulikbagger*. München: Zeppelin Baumaschinen GmbH. Abgerufen am 26. 11 2020 von [https://www.zeppelin-cat.de/fileadmin/user\\_upload/320-Technische-Daten.pdf](https://www.zeppelin-cat.de/fileadmin/user_upload/320-Technische-Daten.pdf)

# Anhang

## Anhang 1 Rechnungen zu den Annahmen der Datenerhebungen

### RBF P. 2.3 Annahme der Fahrtstrecke der restlichen Materialien

Beschreibung	Menge	Einheit	Quelle
Annahme LKW 12 Tonnen	7	t Beladung	
Annahme Auslastung 55%	0,55		
Annahme Zuladung	3,85	t pro Fahrt	
restlichen Materialien Gewicht	476,2	t	(HSE, 2017)
Anzahl der Fahrten	124	Fahrten	
Annahme 1: 100km Strecke	12400	km	
Annahme 2: 400km Strecke	49600	km	

### RBF P. 3.1

Beschreibung	Menge	Einheit	Quelle
Aushub	9758	m <sup>3</sup>	(HSE, 2017)
Annahme Bagger: CAT 320, Löffel- volumen 1,19m <sup>3</sup> , Annahme durch- schnittlich 1m <sup>3</sup> Aushub pro Löffel	1	m <sup>3</sup>	(Zeppelin Cat, 2018)
Anzahl Baggerbewegungen	9758		
Annahme Dauer pro Baggerbewe- gung	60	s	
Baggereinsatz in h	162,6	h	
Treibstoffverbrauch (Bagger)	17,5	l	(Zeppelin Cat, 2018)
Treibstoffverbrauch in Diesel	2846	l	

RBF P. 3.2 Stromverbrauch der Grundwasserabsenkung

Beschreibung	Menge	Einheit	Quelle
Pumpen nicht bekannt. Annahme: Elektro-Vakuumpumpe Typ HC 485 – 22			(Wellpoint, 2020)
Wasserleistung max.	300	m <sup>3</sup> /h	(Wellpoint, 2020)
Anschlusswert max.	17,6	kW	(Wellpoint, 2020)
Stromverbrauch pro m <sup>3</sup>	0,058	kWh/m <sup>3</sup>	
Größe der Baugrube	3146	m <sup>3</sup>	
Benötigte Leistung	184,56	kWh	
Zeitraum der GW Senkung= 90 Tage An- nahme: läuft einmal am Tag voll	90	d	
Stromverbrauch gesamt	16610,8	kWh	

RBF P. 4.2 beschreibt die Annahme für die jährlichen Stromverbrauch der Pumpe des RBF

Beschreibung	Menge	Einheit	Quelle
angeschlossene Fläche	33,6	ha	(HSE, 2017)
durchschnittliche Regen- menge in Hamburg	773	mm/a	(HSE, BUE, 2015)
Regenmenge in ha	7730	m <sup>3</sup> /ha	
Regenmenge im Einzugsge- biet des RBF	259728	m <sup>3</sup> /a	
Annahme: davon läuft 93% über die Anlage	241547	m <sup>3</sup> /a	Heß,2020
Volumenstrom der Pumpe	330,4	m <sup>3</sup> /h	(HSE, 2017)
Laufzeit der Pumpe im Jahre	731,07	h	
Leistungsaufnahme der Pumpe	9,1	kW	(HSE, 2017)
Stromverbrauch der Pumpe im Jahr	6652,7 7	kWh/a	

## Sedimentationsrohr ohne Filtration

### P. 3.1

Beschreibung	Menge	Einheit	Quelle
Boden welcher bewegt wird	348	m3	(HSE, 2017)
Annahme Bagger: CAT 320, Löffelvolumen 1,19m3, Annahme 1m3	1	m3	
Anzahl Baggerbewegungen	348		
Annahme Dauer pro Baggerbewegung	60	s	
Baggereinsatz in h	5,8	h	
Annahme Baggerverbrauch	17,5	l	
Baggerverbrauch in Diesel	101,5	l	

## Anhang 2 Datenblätter der verwendeten Datensätze

### Datenblätter der verwendeten Datensätze von brands & values (2020)

RBF

#### Material

Material	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
Beton				
Betonrohr	EU-28	Betonrohr, unbewehrt (EN15804 A1-A3)	ts	2019
Fertigteile-"Schächt"	EU-28	Betonfertigteile	ts	2019
Betonpflasterstein	EU-28	Beton-Mauersteine (EN15804 A1-A3)	ts	2019
Unterbaubeton	EU-28	Transportbeton C12/15 (EN15804 A1-A3)	ts	2019
Betonwerkstein	EU-28	Beton-Mauersteine (EN15804 A1-A3)	ts	2019
Beton Festigkeitsklasse C25/30 Expositionsklasse XC2, XA1	EU-28	Transportbeton C25/30 (EN15804 A1-A3)	ts	2019
Stahlbetonbalken Festigkeitsklasse C35/45, Expositionsklasse XC4, XD3, XF4, XA1, XU1, WA.				
Annahme: Anteil Beton	EU-28	Transportbeton C35/45 (EN15804 A1-A3)	ts	2019
Annahme: Anteil Stahl	GLO	Betonstahl	worldsteel	2019
Kies/Sand	EU-28	Kies 2/32	ts	2019
PE HD (Polyethylen high density)				
Kunststoffdichtungsbahn	DE	Polyethylen-Folie (PE-HD) ohne Zusatzstoffe	ts	2019
PE HD Rohre	DE	Hochdichtes Polyethylengranulat (HDPE/PE-HD)	ts	2019
	GLO	Kunststoff Extrusionsprofil (unspezifisch)	ts	2019
PVC (Polyvinylchlorid) Rohre	DE	Polyvinylchlorid Granulat (Suspension, S-PVC)	ts	2019
	GLO	Kunststoff Extrusionsprofil (unspezifisch)	ts	2019
Edelstahl 1.4301 (für alle Edelstahlpositionen)	EU-28	Edelstahl Quatreblech (304)	Eurofer	2014
	GLO	Stahl Blech Stanzen und Biegen (5% Verl.)	ts	2019
Stahl , verzinkt	EU	Stahl, feuerverzinkt	worldsteel	2019
	GLO	Stahl Blech Stanzen und Biegen (5% Verl.)	ts	2019
Stahl, HEA 160 (Gitterrostträger)	EU-28	Stahlprofile (EN15804 A1-A3)	ts	2019
Feinweißkalk	DE	Kalk (CaO Feinkalk) (EN15804 A1-A3)	ts	2019
Wasserbaustein (Diabas)	RER	basalt quarry operation	ecoinvent 3.6	2019
Schottersplittgemisch + Natursteinschotter	EU-28	Schotter Körnung 16-32 mm (ungetrocknet) (EN15804 A1-A3)	ts	2019
Mutterboden (gesiebt)	nicht modelliert			
Bruchstein (Basalt)	RER	basalt quarry operation	ecoinvent 3.6	2019
Perlit	EU-28	Perlite (Körnung 0/1) (EN15804 A1-A3)	ts	2019
Kompost	CH	Kompost, ab Werk	ecoinvent	2019
Mulch	RoW	straw production	ecoinvent 3.6	2019
Saatgut Rasen	RoW	grass seed production, organic, for sowing	ecoinvent 3.6	2019
WILO Abwassertauchmotorpumpe (Typ: FA 20.54E HC 20.1-6/22GEx Volumenstrom 330,4 m3/h Leistungsaufnahme 9,1 kW)	GLO	water pump production, 22kW	ecoinvent 3.6	2019
<b>Weitere Datensätze:</b>				
Wärme	DE	Thermische Energie aus Erdgas	ts	2016
Strom	DE	Strom Mix	ts	2016
Schmierstoffe	DE	Schmierstoffe ab Raffinerie	ts	2016
Druckluft	EU-28	Druckluft	ts	2016
Abfallverbrennung	DE	Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall in Müllverbrennung	ts	2019

#### Transport

Beschaffungs- und Entsorgungstransporte	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
LKW 40 t	GLO	LKW-Anhänger, Euro 5, 34 - 40t Gesamtgewicht / 27t Nutzlast	ts	2019
LKW 12 t	GLO	LKW, Euro 5, 12 - 14t Gesamtgewicht / 9,3t Nutzlast	ts	2019
Diesel für LKW	DE	Diesel Mix ab Tankstelle	ts	2016

#### Bauphase

Bauarbeiten	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
Diesel (Bagger)	DE	Diesel Mix ab Tankstelle	ts	2016
	GLO	Dieseltreibener Pkw, Euro 4, Hubraum 1,4-2l	ts	2019
Strom	DE	Strom Mix	ts	2016
Bodenwaschanlage (Reinigung belasteter Böden)	DE	Strom Mix	ts	2016
	DE	Leitungswasser aus Grundwasser	ts	2019
Gutschriften für Boden (90%)	EU-28	Sand 0/2	ts	2019
Deponierung von Boden (10%)	EU-28	Construction waste dumping (EN15804 C4)	ts	2019

## Nutzungsphase

Nutzung	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
Strom	DE	Strom Mix	ts	2016
Diesel (Saugfahrzeug/Bagger)	DE	Diesel Mix ab Tankstelle	ts	2016
	GLO	Dieseldiebener Pkw, Euro 4, Hubraum 1,4-2l	ts	2019
Bodenwaschanlage (Reinigung belasteter Böden)	DE	Strom Mix	ts	2016
	DE	Leitungswasser aus Grundwasser	ts	2019
Gutschriften für Boden (90%)	EU-28	Sand 0/2	ts	2019
Deponierung von Boden (10%)	EU-28	Construction waste dumping (EN15804 C4)	ts	2019
		Sondermüll (durchschnittlich) (kein C, Worst Case)		
Sondermüll (10% des Wassereinsatzes)	EU-28	Szenario inkl. Deponie)	ts	2016
Neuherstellung der Filterschicht (Sand/Kies)	EU-28	Kies 2/32	ts	2019

## Entsorgungsphase

Entsorgung	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
Bauschuttzubereitung (Beton, Basalt, Kalk)	EU-28	Bauschutt Zubereitung (C3)	ts	2019
Polyethylen in Müllverbrennungsanlage	DE	Polyethylen (PE) in Müllverbrennung	ts	2019
Polyvinylchlorid in Müllverbrennungsanlage	DE	Polyvinylchlorid (PVC) in Müllverbrennung	ts	2019
		Plastik Granulat sekundär (niedrige Metallverunreinigung)		
Recycling von Plastik	EU-28		ts	2019
Entsorgung der Pumpe	EU-28	Umwälzpumpe 250 - 1000 W (EN15804 C3-C4)	ts	2019
Deponierung	EU-28	Construction waste dumping (EN15804 C4)	ts	2019
Gutschrift Beton				
	50% EU-28	Kies 2/32	ts	2019
	50% EU-28	Sand 0/2	ts	2019
Gutschrift Stahl	GLO	Schrottwert	worldsteel	2019
Gutschrift Edelstahl	EU-28	Edelstahlprodukt (304) - Schrottwert	Eurofer	2014
Gutschrift Kalk	DE	Kalk (CaO Feinkalk) (EN15804 A1-A3)	ts	2019
Gutschrift Basalt	RER	basalt quarry operation	ecoinvent 3.6	2019
Gutschrift Polyethylen	DE	Hochdichtes Polyethylengranulat (HDPE/PE-HD)	ts	2019
Gutschrift Polyvinylchlorid	DE	Polyvinylchlorid Granulat (Suspension, S-PVC)	ts	2019
Bodenwaschanlage (Reinigung belasteter Böden)	DE	Strom Mix	ts	2016
	DE	Leitungswasser aus Grundwasser	ts	2019
Gutschriften für Boden (90%)	EU-28	Sand 0/2	ts	2019
Deponierung von Boden (10%)	EU-28	Construction waste dumping (EN15804 C4)	ts	2019
		Sondermüll (durchschnittlich) (kein C, Worst Case)		
Sondermüll (10% des Wassereinsatzes)	EU-28	Szenario inkl. Deponie)	ts	2016
Wärme	DE	Thermische Energie aus Erdgas	ts	2016
Strom	DE	Strom Mix	ts	2016

## Sedimentationsrohr ohne Filtration

### Material

Material	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
PE/PE-HD (Polyethylen)	DE	Hochdichtes Polyethylengranulat (HDPE/PE-HD)	ts	2019
PP (Polypropylen)	GLO	Kunststoff Extrusionsprofil (unspezifisch)	ts	2019
	DE	Polypropylen Granulat (PP) Mix	ts	2019
NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	GLO	Kunststoff Extrusionsprofil (unspezifisch)	ts	2019
	DE	Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR, 33% Acrylnitril)	ts	2019
EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	DE	Ethylen-Propylen-Dien-Elastomer (EPDM)	ts	2015
<b>Weitere Datensätze:</b>				
Wärme	DE	Thermische Energie aus Erdgas	ts	2016
Strom	DE	Strom Mix	ts	2016
Schmierstoffe	DE	Schmierstoffe ab Raffinerie	ts	2016
Druckluft	EU-28	Druckluft	ts	2016
Abfallverbrennung	DE	Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall in Müllverbrennung	ts	2019

### Transport

Beschaffungs- und Entsorgungstransporte	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
LKW 40 t	GLO	LKW-Anhänger, Euro 5, 34 - 40t Gesamtgewicht / 27t Nutzlast	ts	2019
Diesel für LKW	DE	Diesel Mix ab Tankstelle	ts	2016

### Bauphase

Bauarbeiten	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
Diesel (Bagger)	DE	Diesel Mix ab Tankstelle	ts	2016
	GLO	Dieselbetriebener Pkw, Euro 4, Hubraum 1,4-2l	ts	2019

### Nutzungsphase

Nutzungsphase	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
Diesel (Saugfahrzeug)	DE	Diesel Mix ab Tankstelle	ts	2016
	GLO	Dieselbetriebener Pkw, Euro 4, Hubraum 1,4-2l	ts	2019
Bodenwaschanlage (Reinigung belasteter Schlämme)	DE	Strom Mix	ts	2016
	DE	Leitungswasser aus Grundwasser	ts	2019
Gutschriften für Boden (90%)	EU-28	Sand 0/2	ts	2019
Deponierung von Boden (10%)	EU-28	Construction waste dumping (EN15804 C4)	ts	2019
		Sondermüll (durchschnittlich) (kein C, Worst Case Szenario inkl. Deponie)	ts	2016

### Entsorgungsphase

Entsorgung	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
Polyethylen in Müllverbrennungsanlage	DE	Polyethylen (PE) in Müllverbrennung	ts	2019
Polypropylen in Müllverbrennungsanlage	DE	Polypropylen (PP) in Müllverbrennung	ts	2019
Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk in Müllverbrennungsanlage	DE	EPDM Dichtungen in Müllverbrennung	ts	2019
		Plastik Granulat sekundär (niedrige Metallverunreinigung)	ts	2019
Recycling der Kunststoffe	EU-28	Hochdichtes Polyethylengranulat	ts	2019
Gutschrift Polyethylen	DE	(HDPE/PE-HD)	ts	2019
Gutschrift Polypropylen	DE	Polypropylen Granulat (PP) Mix	ts	2019
Gutschrift NBR	DE	Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR, 33% Acrylnitril)	ts	2019
Wärme	DE	Thermische Energie aus Erdgas	ts	2016
Strom	DE	Strom Mix	ts	2016

## Sedimentationsrohr mit Filtration

## Material

Material	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
PE/PE-HD (Polyethylen)	DE	Hochdichtes Polyethylengranulat (HDPE/PE-HD)	ts	2019
	GLO	Kunststoff Extrusionsprofil (unspezifisch)	ts	2019
PP (Polypropylen)	DE	Polypropylen Granulat (PP) Mix	ts	2019
	GLO	Kunststoff Extrusionsprofil (unspezifisch)	ts	2019
NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	DE	Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR, 33% Acrylnitril)	ts	2019
	DE	Ethylen-Propylen-Dien-Elastomer (EPDM)	ts	2015
EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	DE	Polyamid 6 Granulat (PA 6)	ts	2015
PA (Polyamid)	DE	Kunststoff Extrusionsprofil (unspezifisch)	ts	2019
Filtersubstrat auf Basis von Eisen(III)-oxidhydrat, FeO(OH)	GLO	Kunststoff Extrusionsprofil (unspezifisch)	ts	2019
	EU-28	Eisen(II)-Sulphat	ts	2019
<b>Weitere Datensätze:</b>				
Wärme	DE	Thermische Energie aus Erdgas	ts	2016
Strom	DE	Strom Mix	ts	2016
Schmierstoffe	DE	Schmierstoffe ab Raffinerie	ts	2016
Druckluft	EU-28	Druckluft	ts	2016
Abfallverbrennung	DE	Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall in Müllverbrennung	ts	2019

## Transport

Beschaffungs- und Entsorgungstransporte	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
LKW 40 t	GLO	LKW-Anhänger, Euro 5, 34 - 40t Gesamtgewicht / 27t Nutzlast	ts	2019
Diesel für LKW	DE	Diesel Mix ab Tankstelle	ts	2016

## Bauphase

Bauarbeiten	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
Diesel (Bagger)	DE	Diesel Mix ab Tankstelle	ts	2016
	GLO	Dieselbetriebener Pkw, Euro 4, Hubraum 1,4-2l	ts	2019

## Nutzungsphase

Nutzungsphase	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
Filtersubstrat auf Basis von Eisen(III)-oxidhydrat, FeO(OH)	EU-28	Eisen(II)-Sulphat	ts	2019
Diesel (Saugfahrzeug)	DE	Diesel Mix ab Tankstelle	ts	2016
	GLO	Dieselbetriebener Pkw, Euro 4, Hubraum 1,4-2l	ts	2019
Bodenwaschanlage (Reinigung belasteter Schlämme, sowie Entsorgung des Filtersubstrats aus Nutzenphase)	DE	Strom Mix	ts	2016
	DE	Leitungswasser aus Grundwasser	ts	2019
Gutschriften für Boden (90%)	EU-28	Sand 0/2	ts	2019
Deponierung von Boden (10%)	EU-28	Construction waste dumping (EN15804 C4)	ts	2019
	EU-28	Sondermüll (durchschnittlich) (kein C, Worst Case Szenario inkl. Deponie)	ts	2016

## Entsorgungsphase

Entsorgung	Ort	Datensatz	Datenbank	Jahr
Polyethylen in Müllverbrennungsanlage	DE	Polyethylen (PE) in Müllverbrennung	ts	2019
Polypropylen in Müllverbrennung	DE	Polypropylen (PP) in Müllverbrennung	ts	2019
Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk in Müllverbrennungsanlage	DE	EPDM Dichtungen in Müllverbrennung	ts	2019
Polyamid in Müllverbrennung	DE	Polyamid (PA) 6.6 in Müllverbrennung	ts	2019
Recycling der Kunststoffe	EU-28	Plastik Granulat sekundär (niedrige Metallverunreinigung)	ts	2019
Gutschrift Polyethylen	DE	Hochdichtes Polyethylengranulat (HDPE/PE-HD)	ts	2019
Gutschrift Polypropylen	DE	Polypropylen Granulat (PP) Mix	ts	2019
Gutschrift NBR	DE	Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR, 33% Acrylnitril)	ts	2019
Gutschrift Polyamid	DE	Polyamid 6 Granulat (PA 6)	ts	2015
Bodenwaschanlage (Entsorgung Filtersubstrat)	DE	Strom Mix	ts	2016
	DE	Leitungswasser aus Grundwasser	ts	2019
Gutschriften für Boden (90%)	EU-28	Sand 0/2	ts	2019
Deponierung von Boden (10%)	EU-28	Construction waste dumping (EN15804 C4)	ts	2019
Sondermüll (10% des Wassereinsatzes)	EU-28	Sondermüll (durchschnittlich) (kein C, Worst Case Szenario inkl. Deponie)	ts	2016
Wärme	DE	Thermische Energie aus Erdgas	ts	2016
Strom	DE	Strom Mix	ts	2016

### Anhang 3 Darstellung der Entsorgungsszenarien

Folgender Abschnitt wurde vollständig von brands & values (2020) übernommen.

„In diesem Abschnitt werden die Annahmen, welche für die Transporte und Verwertung von Abfällen entlang des Lebenszyklus des Retentionsbodenfilters anfallen, dargelegt.

Für die Transporte zu den Entsorgern wurde eine Distanz von 100 km und eine Auslastung von 50% angenommen.

Es wird angenommen, dass die Metalle recycelt werden. Da für die anderen Materialien keine genauen Daten zu den Entsorgungswegen vorliegen, wurden drei Entsorgungsszenarien betrachtet:

- Müllverbrennungsanlage-/Deponie-Szenario (MVA/Deponie-Entsorgungsszenario)
  - In diesem Szenario werden die Kunststoffe verbrannt. Böden, Schlämme, Beton, Kalk und Basalt werden deponiert.
- Recycling-Szenario mit 100% Gutschriften für recycelte Kunststoffe (Rec100-Entsorgungsszenario)
  - In diesem Szenario werden die Kunststoffe recycelt und es wird eine Gutschrift in Höhe von 100% des gewonnenen Materials gegeben. Böden, und Schlämme werden in einer Bodenwaschanlage aufbereitet. Beton, Kalk und Basalt werden recycelt.
- Recycling-Szenario mit 50% Gutschriften für recycelte Kunststoffe (Rec50- Entsorgungsszenario)

- In diesem Szenario werden die Kunststoffe recycelt und es wird eine Gutschrift in Höhe von 50% des gewonnenen Materials gegeben. Böden und Schlämme werden in einer Bodenwaschanlage aufbereitet. Beton, Kalk und Basalt werden recycelt.

Bei der Entsorgung von belasteten Böden und Schlämmen waren die konkreten Entsorgungswege nicht bekannt. Deshalb wurden in dem MVA/Deponie-Entsorgungsszenario Beseitigungsprozesse modelliert. Es ist jedoch zu beachten, dass die Grenzwerte der Schadstoffgehalte im Boden für eine Deponierung eingehalten werden müssen. Dies konnte im Rahmen dieses Projekts nicht abschließend geklärt werden. Für die Beseitigung auf einer Deponie wird somit angenommen, dass die Grenzwerte für eine Deponierung eingehalten werden können. Im Gegensatz zu diesen Worst-Case-Szenarien ist bei den laut Abfallhierarchie zu bevorzugenden Recyclingszenarien eine Bodenwaschanlage für die Aufbereitung der Böden/Schlämme modelliert worden. Dies geschah anhand von Literaturdaten. Nicht ermittelt werden konnte, wie das verwendete Waschwasser entsorgt oder behandelt wird. Daher wurde angenommen, dass 10% vom eingesetzten Waschwasser aufgrund des anzunehmenden konzentrierten Schadstoffgehaltes als Schlamm in einer Sondermüllverbrennungsanlage verbrannt wird.

Für das Recycling der Kunststoffe wurden zwei Szenarien betrachtet, da die Höhe der Gutschriften von den Eigenschaften der gewonnenen Sekundärmaterialien abhängig ist.“ (brand & values, 2020, S.19 f.)

Tabellarische Darstellung der Entsorgungsszenarien

### Retentionsbodenfilter

Position	MVA/Deponie	Rec100	Rec50
<b>Bau</b>			
belastete Böden Z1 bis Z2	Deponie	Bodenwaschanlage (90% Gutschrift, 10% Deponie)	
<b>Nutzung</b>			
Entsorgung belasteter Schlamm	Deponie	Bodenwaschanlage (90% Gutschrift, 10% Deponie)	
Entsorgung von belastetem Boden	Deponie	Bodenwaschanlage (90% Gutschrift, 10% Deponie)	
<b>Entsorgung der Materialien nach 50 Jahren</b>			
belastete Böden (Kies/Sand)	Deponie	Bodenwaschanlage (90% Gutschrift, 10% Deponie)	
Beton	Deponie	Recycling	

Position	MVA/Deponie	Rec100	Rec50
Stahlbeton			
Anteil Stahl	Recycling		
Anteil Beton	Deponie	Recycling	
PE HD (Polyethylen high density)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften
PVC (Polyvinylchlorid)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften
Edelstahl 1.4301	Recycling (Gutschrift Primäranteil)		
Edelstahl 1.4571	Recycling (Gutschrift Primäranteil)		
Edelstahl 1.4401	Recycling (Gutschrift Primäranteil)		
Stahl verzinkt	Recycling (Gutschrift Primäranteil)		
Stahl, HEA 160	Recycling (Gutschrift Primäranteil)		
Feinweißkalk	Deponie	Recycling	
Bruchstein (Basalt)	Deponie	Recycling	
WILO Abwassertauchmotorpumpe	Entsorgung Haustechnik		

### Sedimentationsrohr ohne Filtration

	MVA/Deponie	Rec100	Rec50
<b>Nutzung</b>			
Entsorgung belasteter Schlamm	Deponie	Bodenwaschanlage (90% Gutschrift, 10% Deponie)	
<b>Entsorgung</b>			
PE/PE-HD (Polyethylen)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften
PP (Polypropylen)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften
NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften
EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften
PA (Polyamid)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften

### Sedimentationsrohr mit Filtration

	MVA/Deponie	Rec100	Rec50
<b>Nutzung</b>			
Entsorgung belasteter Schlamm	Deponie	Bodenwaschanlage (90% Gutschrift, 10% Deponie)	
Entsorgung des Filtersubstrats	Deponie	Bodenwaschanlage (90% Gutschrift, 10% Deponie)	
<b>Entsorgung</b>			
PE/PE-HD (Polyethylen)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften
PP (Polypropylen)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften
NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften
EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften
PA (Polyamid)	MVA	Recycling 100% Gutschriften	Recycling 50% Gutschriften

Filtersubstrat auf Basis von Eisen(III)-oxidhydrat, FeO(OH)	Deponie	Bodenwaschanlage (90% Gutschrift, 10% Deponie)
---	---------	--

#### Anhang 4 Vollständige Auswertung der RWBA im Vergleich zum Referenzszenario

Anteil des Stromverbrauchs des Pumpwerks des RBF in Szenario 2 an den Wirkungsabschätzungen

Indikator	MVA	Rec100	Rec50
GWP in %	29,02	24,39	23,94
EP in %	16,67	10,49	10,43
AP in %	15,47	11,36	11,26
Wasserverbrauch in %	35,06	6,03	6,01

Vergleich der unterschiedlichen Anlagen mit ihren Szenarien mit dem Referenzszenario

Indikator	mit Pumpwerk			ohne Pumpwerk		
	RBF S.1			RBF S.1		
	MVA	Rec100	Rec50	MVA	Rec100	Rec50
GWP in %	93,18	91,72	91,88	131,27	121,31	120,79
EP in %	90,21	89,70	89,76	108,26	100,21	100,21
AP in %	90,88	90,06	90,15	107,52	101,61	101,59
Wasserverbrauch in %	96,94	93,05	91,83	149,28	116,75	114,72
	SoF S.1			SoF S.1		
	MVA	Rec100	Rec50	MVA	Rec100	Rec50
	GWP in %	50,98	32,61	37,56	71,82	43,13
EP in %	30,25	31,02	32,41	36,30	34,66	36,18
AP in %	29,38	30,24	32,33	34,76	34,11	36,44
Wasserverbrauch in %	45,88	89,92	93,57	70,65	112,82	116,89
	SoF S.2			SoF S.2		
	MVA	Rec100	Rec50	MVA	Rec100	Rec50
	GWP in %	101,52	64,97	75,00	143,01	85,93
EP in %	59,79	61,59	64,59	71,75	68,81	72,11
AP in %	58,53	60,04	64,45	69,24	67,74	72,64
Wasserverbrauch in %	91,53	53,13	62,78	140,94	66,67	78,43
	SmF S.1			SmF S.1		
	MVA	Rec100	Rec50	MVA	Rec100	Rec50
	GWP in %	96,97	63,69	72,50	136,61	84,25
EP in %	65,48	62,26	64,81	78,58	69,56	72,36
AP in %	83,82	76,46	80,30	99,16	86,26	90,49
Wasserverbrauch in %	84,71	49,73	57,97	130,43	62,39	72,41
	SmF S.2			SmF S.2		
	MVA	Rec100	Rec50	MVA	Rec100	Rec50
	GWP in %	192,42	127,39	143,75	271,08	168,49
EP in %	129,89	124,30	178,17	155,88	138,87	198,93
AP in %	166,76	152,70	159,96	197,29	172,27	180,26
Wasserverbrauch in %	169,41	99,46	115,93	260,87	124,79	144,82

## Anhang 5 Verwendete Positionen der Datenerhebung zum RBF

Im folgenden Anhang sind die 110 verwendeten Positionen, die aus dem Leistungsverzeichnis Projekt: S-09-0127 „Manshardtstraße RWBA“ von den Hamburger Stadtentwässerung, zur Ermittlung des Materials des RBF genutzt wurden, aufgelistet (HSE, 2017).

1)	1.1.2.1.40	38)	1.1.2.3.110	75)	1.1.2.10.30
2)	1.1.2.1.60	39)	1.1.2.3.120	76)	1.1.2.10.40
3)	1.1.2.1.70	40)	1.1.2.3.130	77)	1.1.2.11.10
4)	1.1.2.1.80	41)	1.1.2.3.140	78)	1.1.2.11.20
5)	1.1.2.1.90	42)	1.1.2.3.150	79)	1.1.2.11.30
6)	1.1.2.1.120	43)	1.1.2.3.160	80)	1.1.2.11.50
7)	1.1.2.1.130	44)	1.1.2.3.170	81)	1.1.2.11.60
8)	1.1.2.1.140	45)	1.1.2.3.180	82)	1.1.2.11.70
9)	1.1.2.1.150	46)	1.1.2.3.190	83)	1.1.2.11.110
10)	1.1.2.1.160	47)	1.1.2.3.200	84)	1.1.2.11.120
11)	1.1.2.2.30	48)	1.1.2.3.210	85)	1.1.2.11.150
12)	1.1.2.2.40	49)	1.1.2.3.220	86)	1.1.2.11.150
13)	1.1.2.2.50	50)	1.1.2.3.230	87)	1.1.2.12.10
14)	1.1.2.2.60	51)	1.1.2.3.240	88)	1.1.2.12.20
15)	1.1.2.2.70	52)	1.1.2.3.250	89)	1.1.2.12.30
16)	1.1.2.2.80	53)	1.1.2.3.260	90)	1.1.2.12.40
17)	1.1.2.2.130	54)	1.1.2.3.270	91)	1.1.2.12.60
18)	1.1.2.2.140	55)	1.1.2.3.280	92)	1.1.2.13.20
19)	1.1.2.2.150	56)	1.1.2.3.300	93)	1.1.2.13.30
20)	1.1.2.2.180	57)	1.1.2.3.310	94)	1.1.2.13.40
21)	1.1.2.2.190	58)	1.1.2.3.320	95)	1.1.2.13.50
22)	1.1.2.2.200	59)	1.1.2.3.330	96)	1.1.2.14.10
23)	1.1.2.2.210	60)	1.1.2.3.350	97)	1.1.2.14.20
24)	1.1.2.2.220	61)	1.1.2.3.370	98)	1.1.2.14.30
25)	1.1.2.2.230	62)	1.1.2.3.380	99)	1.1.1.6.50
26)	1.1.2.2.240	63)	1.1.2.4.30	100)	1.1.1.6.60
27)	1.1.2.2.250	64)	1.1.2.4.40	101)	1.1.1.6.70
28)	1.1.2.2.260	65)	1.1.2.4.50	102)	1.1.1.6.80
29)	1.1.2.2.270	66)	1.1.2.4.90	103)	1.2.1.2.30
30)	1.1.2.2.280	67)	1.1.2.5.30	104)	1.2.1.2.40
31)	1.1.2.2.290	68)	1.1.2.5.80	105)	1.2.1.2.50
32)	1.1.2.3.10	69)	1.1.2.5.90	106)	1.2.1.2.230
33)	1.1.2.3.20	70)	1.1.2.7.10	107)	1.2.1.2.240
34)	1.1.2.3.30	71)	1.1.2.8.10	108)	1.2.1.2.250
35)	1.1.2.3.40	72)	1.1.2.8.20	109)	1.2.1.2.260
36)	1.1.2.3.90	73)	1.1.2.9.20	110)	1.2.1.2.270
37)	1.1.2.3.100	74)	1.1.2.10.10		