

Prof. Dr. Jürgen Baumüller, M.Sc. Yasaman Ahmadi

# Beitrag von Regenwasserbewirtschaftungs- maßnahmen und freiraumplanerischen Gestaltungselementen zur Verbesserung des Stadtklimas

im Rahmen des Forschungsprojekts  
„Stadt als hydrologisches System im Wandel. Schritte zu einem anpassungsfähigen  
Management des urbanen Wasserhaushalts“ (SAMUWA)

Januar 2016

SAMUWA Publikation



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**NaWaM**  
Nachhaltiges Wassermanagement



**INIS**



# Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	3
1 Klimawandel.....	4
2 Stadtklima.....	6
3 Feuchte in der Stadt .....	10
4 Verdunstung in der Stadt .....	12
5 Stadtklimatische Effekte von RWB-Maßnahmen im Hinblick auf Albedo, Verdunstung und Temperatur .....	15
5.1 Flächenversickerung .....	16
5.2 Muldenversickerung.....	17
5.3 Mulden-Rigolen-Element/Mulden-Rigolen-System .....	18
5.4 Versickerungsteich.....	19
5.5 Offener Graben.....	20
5.6 Gründächer.....	21
5.7 Grüne Parkierung.....	24
5.8 Teildurchlässige Pflasterflächen (Poren- und Sickersteine), Wassergebundene Decke.....	26
5.9 Entsiegelung .....	27
5.10 Regenwassernutzung für Bewässerung .....	29
6 Bewertung von RWB-Maßnahmen und freiraumplanerischen Gestaltungselemente auf das Stadt-klima.....	31
6.1 Grüne Gleistrassen .....	33
6.2 Baumalleen.....	35
6.3 Offene Wasserflächen.....	37
Zusammenfassung .....	39
Literatur .....	44
Abbildungsverzeichnis .....	47
Tabellenverzeichnis.....	49



# Einleitung

Durch die Technisierung der Siedlungsentwässerung auf der Grundlage des Ableitungsprinzips von Niederschlagswasser ist es zu einem Verlust des Verständnisses bzw. einer Entkopplung von Siedlungsentwässerung, Gewässern und Stadtgestalt gekommen. Der aktuelle Paradigmenwechsel in der Siedlungsentwässerung wendet sich vom Ableitungsprinzip zur naturnahen Regenwasserbewirtschaftung (RWB) mittels Versickerungsanlagen. Diese Art der RWB berücksichtigt jedoch nicht den lokalen, natürlichen Wasserhaushalt wie es das neue DWA-A 102 (2015) fordert. Entgegen der weitläufigen Praxis einer oft zu einseitig auf Versickerung ausgerichteten RWB muss für die Beachtung der Zielgröße Wasserhaushalt die Verdunstung deutlich stärker in den Fokus rücken (z. B. Henrichs et al., 2015).

Vor allem im dicht bebautem urbanen Raum trägt der hohe Grad der Versiegelung maßgeblich zum „Wärmeineleffekt (Urban Heat Island (UHI)) bei. Durch den Klimawandel werden die Temperaturen weiter ansteigen. Betroffen sind hier in hohem Maße die Städte und ihre Bewohner. In Europa leben mehr als 80 Prozent der Menschen in Städten. Die Hitzesommer 2003 und 2015 haben aufgezeigt, dass bei länger anhaltenden Hitzewellen eine natürliche Bewässerung von Grünflächen nicht mehr ausreichend ist (Abb. 1). Das Ziel der RWB Maßnahmen muss es in Zukunft sein, die klimatische Funktion der Maßnahmen ebenso zu betrachten, wie die Multifunktionalität der Anlagen.



Abb. 1: Begrünte Gleistrasse in Stuttgart August 2015, Foto: Baumüller

In diesem Zusammenhang soll die Expertise aufzeigen, welche Rolle die Grünflächen und insbesondere die Verdunstung im Hinblick auf eine Verbesserung des Stadtklimas haben können. Weiterhin sollen konkrete Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung und ihre möglichen Auswirkungen bewertet werden und potentielle freiraumplanerische Gestaltungselemente identifiziert werden.

# 1 Klimawandel

Der Klimawandel schreitet voran. Von 1900-2015 hat die Temperatur global um fast ein Grad zugenommen (Abb.2), dabei ist die Temperaturzunahme nicht überall gleich. Die Temperaturzunahme ist insbesondere auf der Nordhalbkugel hoch und dort ausgeprägt in den höheren Breiten (Abb.3).

Das Jahr 2014 war global und auch in Deutschland das wärmste Jahr seit Messungen vorliegen. Neun der zehn wärmsten Jahre waren in diesem Jahrhundert. Nach Aussage der US-Wetteramtes NOAA war der Juli 2015 der wärmste Juli seit Beginn der globalen Wetteraufzeichnungen mit einer Durchschnittstemperatur von 16,6 Grad Celsius. Verbunden mit steigenden Mitteltemperaturen ist aber auch ein Anstieg der Temperaturmaxima und der Anzahl von Hitzewellen. Belegt ist eine Zunahme von Todesfällen und ein Rückgang der Leistungsfähigkeit bei hohen thermischen Belastungen (Zacharias, Koppe, 2015). Seit einigen Jahren ist man auch deshalb dabei, Klimaanpassungsstrategien in Städten zu entwickeln (Baumüller, 2011), dabei stehen Anpassungsmaßnahmen gegenüber Hitze und Hochwasser im Vordergrund.

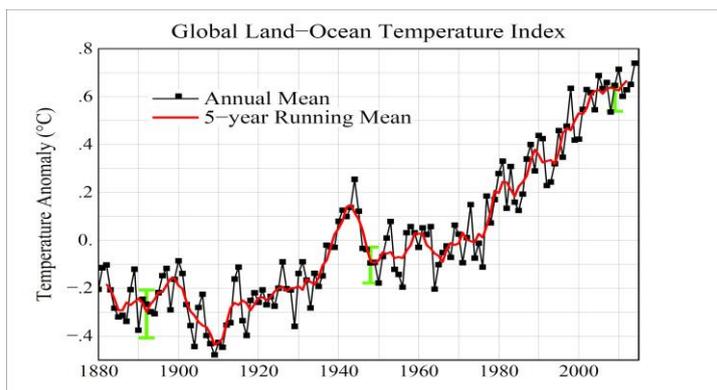


Abb. 2: Globale Temperaturveränderung seit 1881 (GISS, 2015)

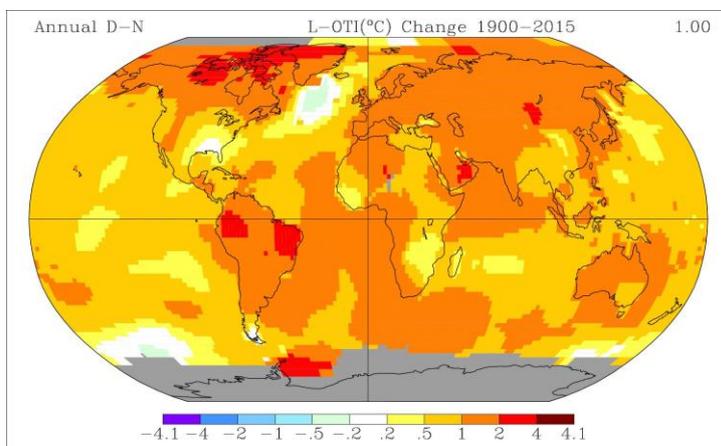


Abb. 3: Globale Verteilung der Temperaturveränderung seit 1900 (GISS, 2015)

Mit dem Klimawandel ist auch eine Veränderung des Wasserhaushalts in Deutschland verbunden. Klimamodelle zeigen, dass bei etwa gleichbleibendem Jahresniederschlag, die Regenmengen gegen Ende des Jahrhunderts im Sommer um ca. 20% zurückgehen werden und die Winterniederschläge dafür um bis zu 30% zunehmen. Bei hohen sommerlichen Temperaturen wird also die Wasserbilanz (Niederschlag-Verdunstung) deutlich negativer (Abb. 4).

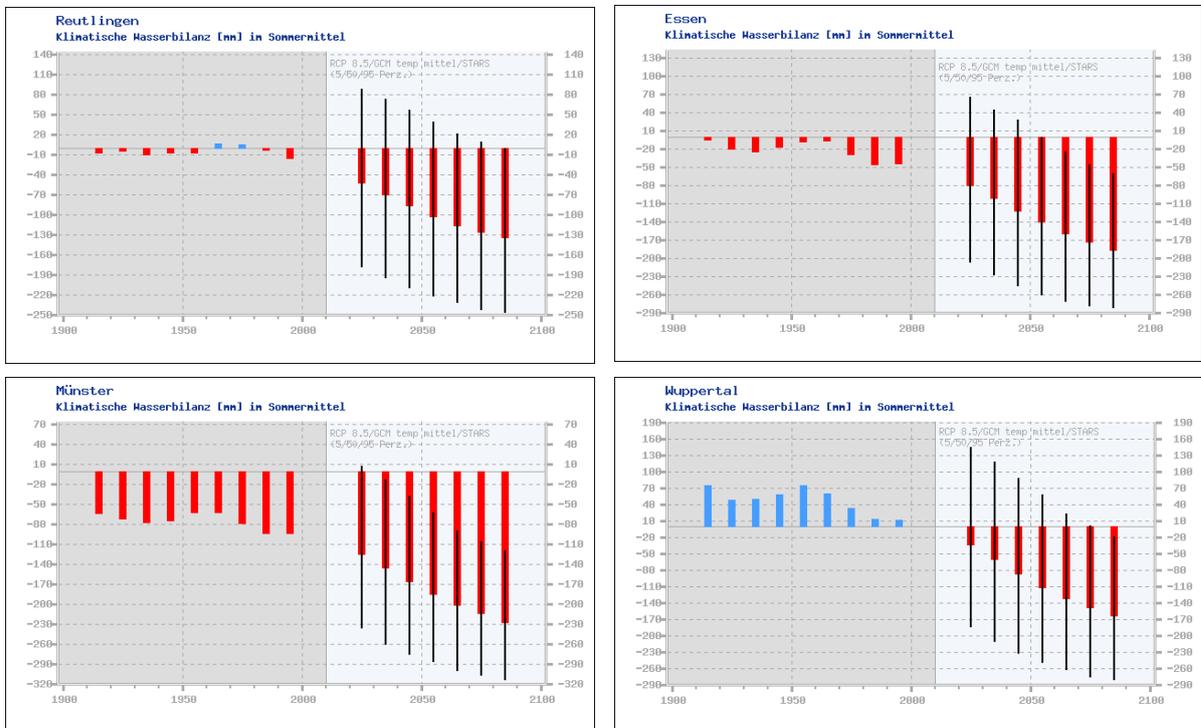


Abb. 4: Entwicklung der sommerlichen Wasserbilanz für Reutlingen, Essen, Münster und Wuppertal bis 2100 (Quelle: <http://www.klimafolgenonline.com/> )

Nach Berechnungen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung wird sich diese Entwicklung einer negativen Wasserbilanz im Sommer in der Zukunft noch verstärken (Abb. 4). Negative Wasserbilanz bedeutet, dass die Differenz aus der Tagessumme des Niederschlags und der Evaporation negativ wird, also theoretisch mehr verdunstet als Niederschlag fällt.

## 2 Stadtklima

Das Klima einer Stadt unterscheidet sich zum Teil erheblich von dem des Umlands. Diese Erkenntnis ist nicht neu (Kratzer, 1937). So findet man z.B. bei Seneca (66 nach Christus) die Äußerung:

"Sobald ich der schweren Luft Roms entronnen war und dem Gestank der rauchenden Kamine, dem aus ihnen quellenden Ruß und den pestilenzartigen Dämpfen, fühlte ich eine Veränderung meines Wohlbefindens."

Während das Klima in der freien Landschaft weitgehend von natürlichen Gegebenheiten abhängig ist, bildet sich in Stadtlandschaften ein durch Bauwerke beeinflusstes Klima aus. Zusammengefasst kann man sagen, dass die Städte wärmer, windschwächer, relativ trockener und stärker mit Luftschadstoffen belastet sind.

Typisch für Städte ist der Wärmeinseleffekt, gekennzeichnet durch die gegenüber der Umgebung höhere Lufttemperatur. Dieser Effekt ist gut dokumentiert und stellt eine Erscheinung dar, die sich nicht allein auf Großstädte beschränkt. Die größten Temperaturunterschiede ergeben sich jedoch nicht am Tage sondern jeweils in der Nacht. Sie können in Megastädten mehr als 10 Grad betragen.

In Sommernächten ist die Überwärmung infolge der Wärmebelastung für den Menschen besonders negativ zu beurteilen, vor allem im Zusammenhang mit länger anhaltenden Hitzewellen, wie im Sommer 2003, als in Europa mehr als 50 000 Menschen infolge der Hitze starben.

Der Grund für die höhere Lufttemperatur und der höheren gefühlten Temperatur in der Stadt, ist die veränderte Wärmebilanz zum Umland, wobei man unterscheiden muss zwischen der Tagsituation und der Nachtsituation. Wesentliche Faktoren sind die veränderten Reflexions- (Albedo)(Tab. 1/2), Emissions- und Speichereigenschaften der Oberflächen sowie die unterschiedliche Verdunstung (Abb. 5).

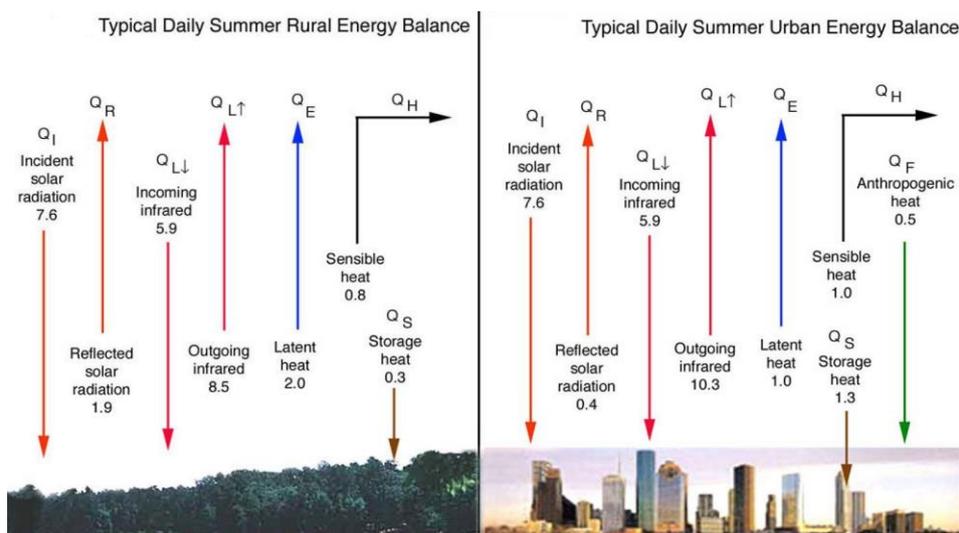


Abb. 5: Typisches Beispiel der Energie Bilanz von Land und Stadt am Tage in Houston Texas, Angaben in kWh/m<sup>2</sup>Tag; Quelle: <http://www.ruf.rice.edu/~sass/UHI.html>

<b>Oberfläche</b>	<b>Albedo visuell</b>	<b>Emissionsvermögen</b>
<b><i>Straßen</i></b>		
Asphalt	0,05 – 0,20	0,95
Straßen Mittelwert	0,18	
<b><i>Wände</i></b>		
Beton	0,1 - 0,35	0,71 – 0,90
Beton, weiß	0,71	-
Ziegel	0,20 - 0,40	0,90 – 0,92
Naturstein	0,20 - 0,35	0,85 – 0,95
Holz	-	0,90
Kalkmörtel	0,27	0,91
Wände Mittelwert	0,30	-
<b><i>Dächer</i></b>		
Teer und Split	0,08 - 0,18	0,92
Dachziegel	0,10 - 0,35	0,90
Schiefer	0,10	0,90
Wellblech	0,10 - 0,16	0,13 – 0,28
<b><i>Fenster</i></b>		
Glas: Sonnenhöhe > 60°	0,08	0,87 – 0,94
Glas: Sonnenhöhe 10°-60°	0,09 - 0,52	0,87 – 0,92
<b><i>Anstriche</i></b>		
Weiß	0,50 - 0,90	0,85 – 0,95
Rot, braun, grün	0,20 - 0,35	0,85 – 0,95
schwarz	0,02 - 0,15	0,90 – 0,98
Stadtgebiet	0,10 - 0,30	0,85 – 0,95

Tab. 1: Albedo und Emissionsvermögen von typischen Materialien (nach Helbig 1987)

Oberfläche	Albedo visuell	Emissionsvermögen
<b>Natürliche Oberflächen</b>		
Trockener heller Sandboden	0,25 – 0,45	0,91
Getreidefeld	0,10 – 0,25	-
Wiese	0,15 – 0,25	-
Dunkler Ackerboden	0,07 – 0,10	0,90 – 0,98
Laubwald	0,15 – 0,20	0,90
Nadelwald	0,10 – 0,15	0,90
Wasserflächen	0,03 - 0,10	0,97
Neuschneedecke	0,75 – 0,90	0,99
Altschneedecke	0,40 – 0,70	-

Tab. 2: Albedo und Emissionsvermögen von natürlichen Oberflächen (nach Helbig 1987)

Nach Umfragen von yougov.com 2015 bzw. 2014 liegt die „Wohlfühltemperatur“ in Deutschland bei ca. 23 °C in Großbritannien bei 21 °C (Abb.6). Die vom Menschen gefühlte bzw. empfundene Temperatur ist jedoch nicht nur von der Lufttemperatur abhängig. Wesentliche Faktoren sind auch die Strahlungsbedingungen (kurz- und langwellig) der Umgebung, die Windgeschwindigkeit und die Luftfeuchtigkeit.

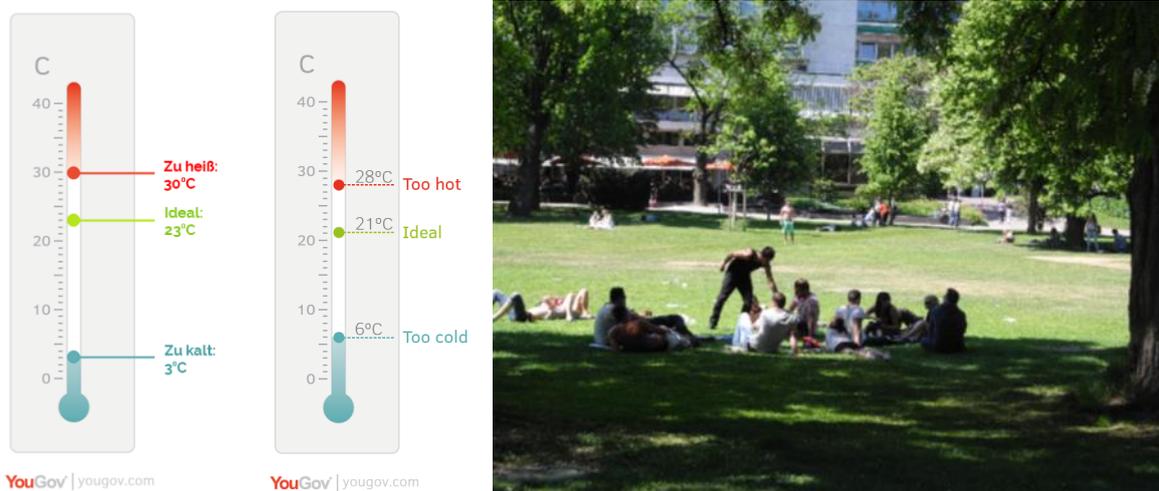


Abb. 6 : Wohlfühltemperatur in Deutschland und Großbritannien, Onlineumfrage yougov.com2015/14

Die gesamte thermische Belastung wird durch thermische Belastungsindizes angegeben. Die Tabelle 3 zeigt einige übliche Bewertungsindizes wie PMV (Predicted Mean Vote), PET (Physiologisch Empfundene Temperatur), Gefühlte Temperatur (GT) und zugeordnete physiologische Belastungsstufen. Im Sommer kann z.B. PET oder die GT in der Sonne um mehr als 15 Grad höher liegen, als die gemessene Lufttemperatur. Entscheidend ist hier die Strahlungstemperatur der Umgebung.

Die Abbildung 7 zeigt den Vergleich der Tagesgänge von PET und der Lufttemperatur an einer urbanen und suburbanen Messstation in Essen (Goldbach et al., 2011). Während die Lufttemperaturverläufe am Tage sehr ähnlich sind, zeigen sich deutliche Unterschiede in den PET Werten, im Wesentlichen hervorgerufen durch die unterschiedlichen Strahlungstemperaturen des Untergrunds. Der höhere Anteil von Grünflächen an der suburbanen Station führt durch die Evatranspiration zu niedrigeren Oberflächentemperaturen.

PMV	PET in °C	Gefühlte Temperatur in °C	thermisches Empfinden	physiologische Belastungsstufe
-3.5	4	-39	Sehr kalt	Extremer Kältestress
-2.5	8	-39 bis -26	Kalt	Starker Kältestress
-1.5	13	-26 bis -13	Kühl	Mäßiger Kältestress
-0.5	18	-13 bis 0	Leicht kühl	Schwacher Kältestress
0.5	23	0 bis 20	Behaglich	Keine Wärmebelastung
1.5	29	20 bis 26	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
2.5	35	26 bis 32	Warm	Mäßige Wärmebelastung
3.5	41	32 bis 38	Heiß	Starke Wärmebelastung
			Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

Tab. 3: Bewertungsindizes zu den Stufen des thermischen Empfindens und physiologischen Belastungsstufen

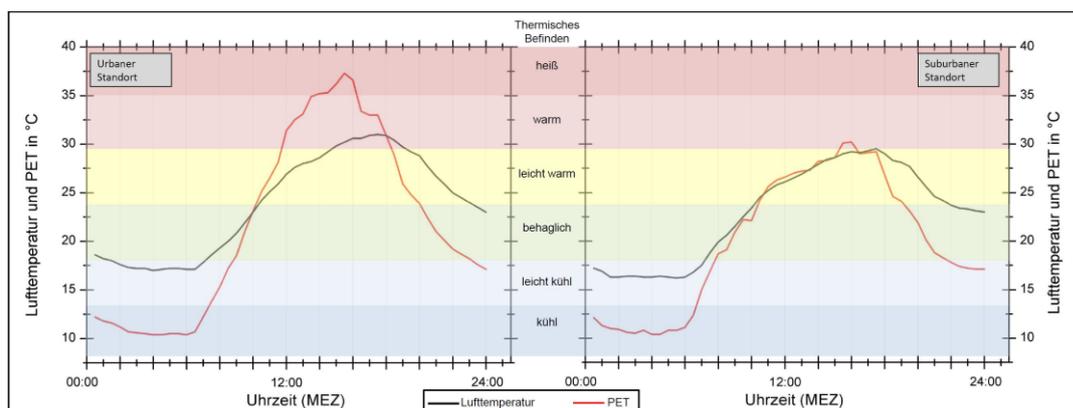


Abb. 7: Tagesgang der Lufttemperatur und PET im Vergleich einer urbanen und suburbanen Messstation am 20.08.2010 (Goldbach et al., 2011)

### 3 Feuchte in der Stadt

Der Wasserdampfgehalt in der Stadtatmosphäre ist von vielen Faktoren abhängig. Man unterscheidet zwischen der absoluten Luftfeuchtigkeit (Wasserdampfgehalt der Luft) und der relativen Luftfeuchtigkeit (Sättigungsgrad der Luft mit Wasserdampf). Der Wasserdampfgehalt der Stadtluft wird bestimmt durch die großräumige Luftmasse, die Verdunstungsprozesse von Boden, Vegetation und Wasserflächen (Evaporation + Transpiration = Evapotranspiration) aber auch durch den, bei Verbrennungsprozessen freigesetzten Wasserdampf. So werden z.B. bei der idealen Verbrennung von 1 kg Kraftstoff (Diesel oder Benzin) 14 kg Luft verbraucht und es entstehen neben 3,15 kg CO<sub>2</sub> auch ca. 1,25 kg Wasser in Form von Wasserdampf.

Insbesondere durch die Versiegelung und Grundwasserabsenkung wird das Verdunstungspotential in den Städten reduziert. Das Vegetationsdefizit insbesondere in den dicht bebauten Stadtzentren bedingt nicht unbedingt eine Reduktion des Wasserdampfgehalts der Stadtluft, da durch mannigfaltige Verbrennungsprozesse ein Ausgleich stattfinden kann. Dies zeigt der Vergleich der Tagesgänge von Wasserdampfgehalt und relativer Feuchte an einem heißen Sommertag in Berlin an verschiedenen Standorten (Abb. 8) (Digitaler Umweltatlas Berlin).

Im Verlauf eines heißen Tages zeigen sich dort die Standortunterschiede im Dampfdruck (Maß für die absolute Feuchte). Der Tagesgang eines Standortes ist nur in den Außenbereichen der Stadt und nur bei der relativen Luftfeuchte stärker ausgeprägt. Im Tagesverlauf kommt es zur Ausbildung einer normalen Doppelwelle im Dampfdruck, die durch ein Minimum in den frühen Morgenstunden (Taubildung und Reduzierung der Transpiration) und durch eine Unterbrechung des Maximums in den Mittags und Nachmittagsstunden aufgrund der Konvektion und damit eines verstärkten Luftaustausches gekennzeichnet ist.

Im Gegensatz zum Wasserdampfdruck ist die relative Luftfeuchtigkeit stark durch die Lufttemperatur geprägt, da warme Luft mehr Wasserdampf bis zur Sättigung braucht als kalte Luft. Bei einer Temperatur von 0 °C kann die Luft nur ca. 4 g Wasser aufnehmen, bei 30 °C sind es immerhin schon 28 g. Somit erklärt sich die geringere relative Luftfeuchtigkeit im wärmeren Innenstadtgebiet insbesondere in der Nacht.

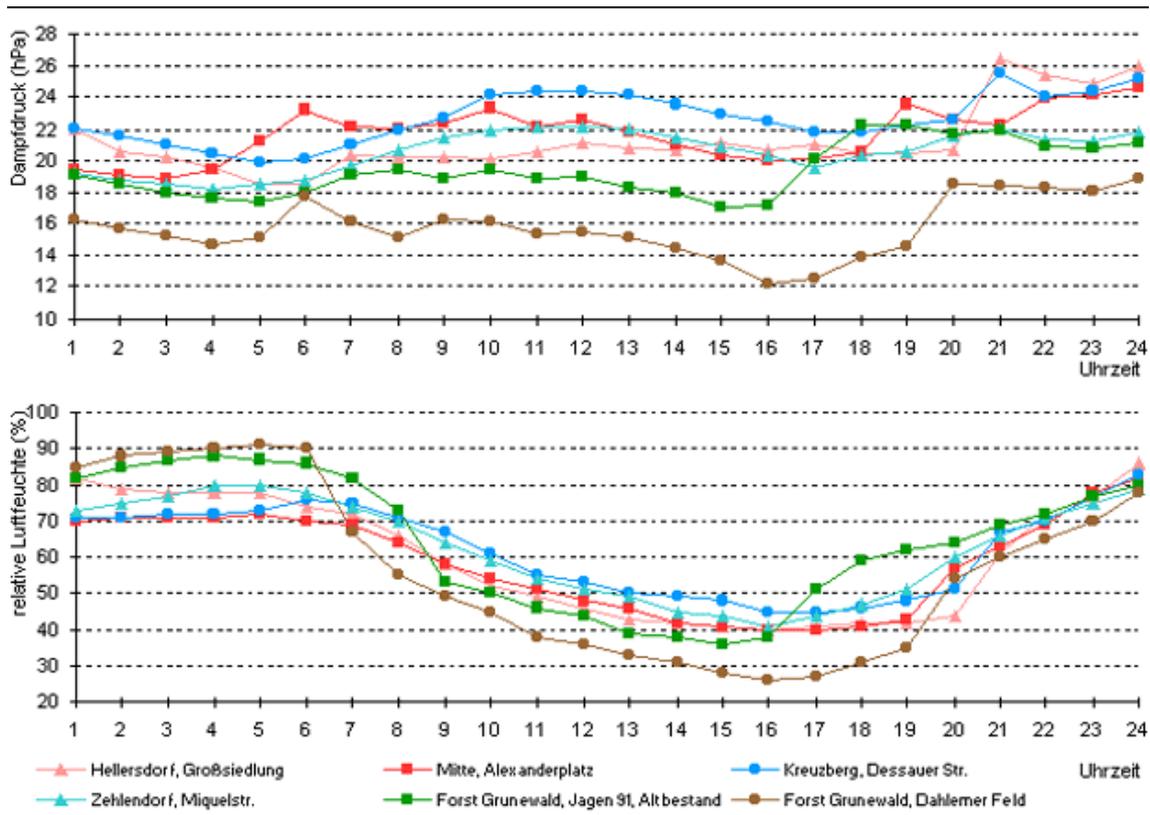


Abb. 8: Tagesgänge des Dampfdruckes und der relativen Luftfeuchte an einem heißen austauscharmen Strahlungstag (8. Juli 1991) an verschiedenen Standorten in Berlin (oben: Wasserdampfgehalt der Luft; unten: relative Luftfeuchtigkeit, Quelle: Digitaler Umweltatlas Berlin (<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/index.shtml>))

## 4 Verdunstung in der Stadt

Die Evapotranspiration ist in einem hohen Maße von der Wasserverfügbarkeit abhängig. Die Abbildung 9 zeigt die potentielle und die tatsächliche Verdunstung von Gras über einem sandigen Lehmboden in Deutschland während einer Trockenperiode am 5. Juni

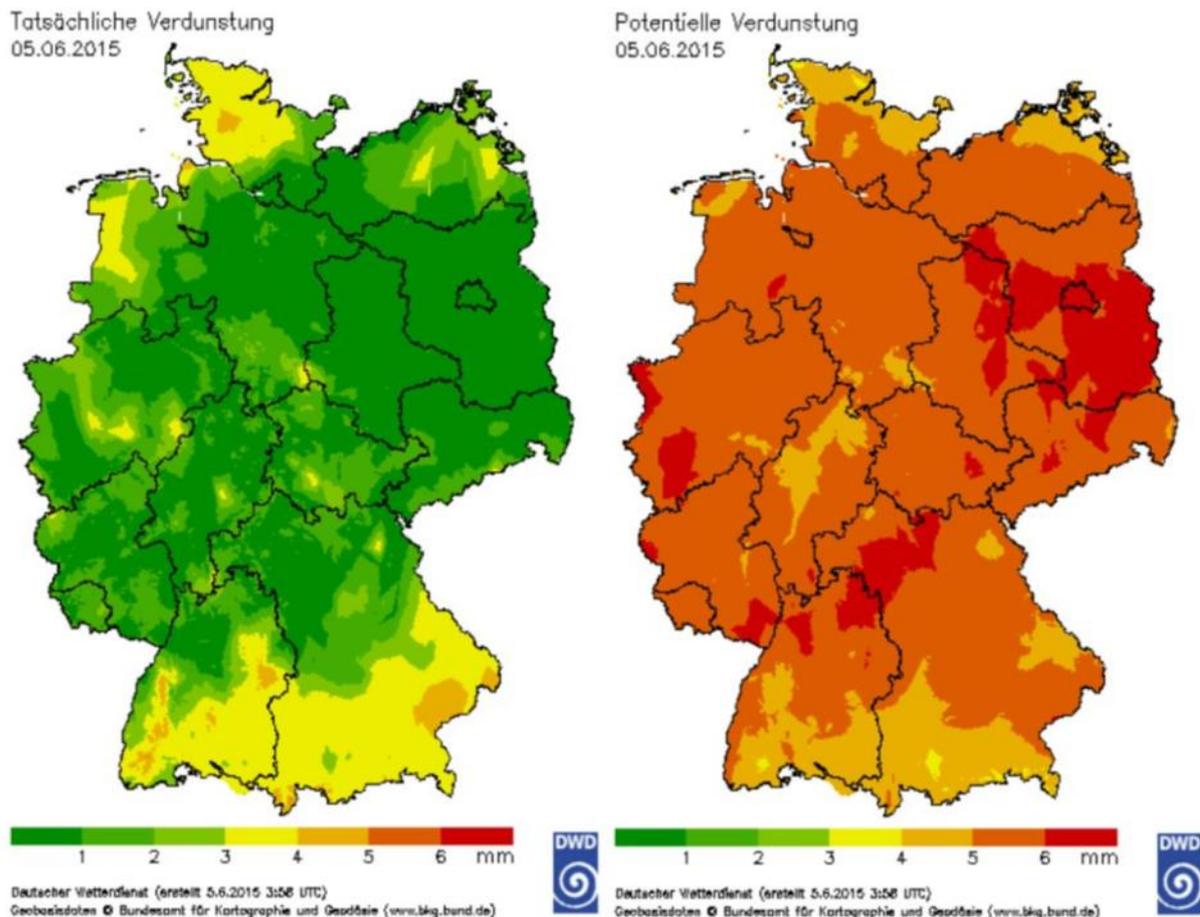


Abb. 9: Deutschlandkarte mit der berechneten tatsächlichen und potentiellen Verdunstung von Gras über sandigem Lehm DWD (2015)

2015. Bei der Verdunstung unterscheidet man zwischen der potentiellen und tatsächlichen Verdunstung. Bei einem Bewuchs durch Gras gibt die potentielle Verdunstung die Wassermenge an, die von einer ausreichend feuchten Grasfläche in die Luft abgegeben wird, also die maximale Wassermenge die dem Boden durch das Gras entzogen werden kann.

Ist der Boden zu trocken, schränken die Gräser ihre Verdunstung ein, was die tatsächliche Verdunstung reduziert. Die Verdunstung ist natürlich auch stark von der Bodenbeschaffenheit abhängig. Während ein Sandboden in der Schicht bis 60 cm ca. 60 mm Wasser speichern kann, speichert ein Lehmboden nach Aussagen des DWD ca. 150 mm. Bei Trockenheit geht also die tatsächliche Verdunstung über Sand schneller als über Lehm zurück. Die Verdunstung ist abhängig von der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Sonnenstrahlung, der Windstärke, dem Bodentyp, der Vegetation und dem Wassergehalt des Bodens. Durch die Abhängigkeit von diesen vielen Parametern, ist die Bestimmung der Verdunstung sehr schwierig und aufwändig. Meistens wird die

Verdunstung deshalb nicht gemessen, sondern unter Zuhilfenahme mathematischer Modelle abgeschätzt. Die resultierende Verdunstung pro Zeiteinheit bezeichnet man als Verdunstungsrate. Gängige Verfahren zur Berechnung der Verdunstung sind die nach Turc, PriestlyTaylor, Penman, Haude und Sponagel (VDI 3786).

Relativ einfach ist die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nach Haude, zum Klimatermin 14 Uhr, da die Daten zur Berechnung bei den Routinemessungen des DWD anfallen.

ETPpot = fH (E-e)

ETPpot = potenzielle Evatranspiration

fH = Haude-Faktor (mm/(d hPa)e = vorherrschender Dampfdruck (hPa)

E = Sättigungsdampfdruck (hPa)

e = vorherrschender Dampfdruck (hPa)

Der Haude-Faktor liegt im Juli für Gras bei 0,26, für Mais bei 0,25, für Weizen bei 0,34 (Kuttler, 2009).

Für die Verdunstung von Wasser muss eine relativ große Energiemenge aufgebracht werden. Bei 20 °C ist dies 2453 kJ pro 1 Liter Wasser. Bei Verdunstungsprozessen am Boden wird diese Energie dem Boden oder der berührenden Luft entzogen (Verdunstungskühlung). Die im Wasserdampf enthaltene Energie wird als latente Energie bezeichnet, die bei Kondensationsprozessen wie Taubildung oder Wolkenbildung wieder frei wird. Dieser Prozess ist bei Grünflächen ausgeprägter als der des sensiblen Wärmestroms. Als fühlbare oder sensible Wärme bezeichnet man Wärme, die sich bei Zufuhr oder Abfuhr unmittelbar in einer Temperaturänderung äußert. Der Begriff wird als Abgrenzung zur latenten Wärme benutzt. Das Verhältnis zwischen fühlbarer und latenter Wärme wird Bowen-Verhältnis genannt.

Die Höhe der Verdunstung wird beeinflusst durch das Sättigungsdefizit der Luft und durch die Windbewegung.

Berechnet man auf der Basis der Tabelle 4 die Energieumsätze der Verdunstung bei einer Nettostrahlungsbilanz von 440 kWh/m<sup>2</sup>a für Berlin, ergibt sich für Asphalt die latente Wärme zu 85 kWh/m<sup>2</sup>a, für Rasengittersteinen jedoch schon zu 191 kWh/m<sup>2</sup>a also ca. 43% der Jahressumme der Strahlungsbilanz (Hupfer, Kuttler 2006).

Material	Niederschlag		Abfluss		Versickerung		Verdunstung	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Kunststeinplatten mit Mosaikpflaster	631	100	104	16	319	51	208	33
Betonverbundsteine	631	100	103	16	379	60	149	24
Rasengittersteine	631	100	32	5	318	50	282	45
Straße (Asphalt)	631	100	455	72	51	8	126	20

Tab. 4: Wasserhaushaltskomponenten versiegelter Flächen in Berlin (Messperiode: April 1985 bis März 1986; nach Wessolek 2001)

Wie man leicht erkennen kann spielt offensichtlich der Versiegelungsgrad bei den Energieumsätzen durch die Verdunstung eine große Rolle. Insbesondere in dicht bebauten Innenstädten ist der Versiegelungsgrad sehr hoch. Die Verdunstung ist in einem hohen

Maße von der Wasserverfügbarkeit abhängig. Ein Blick in die Zukunft zeigt, dass in weiten Bereichen von Deutschland im Sommer mit einer ausgeprägten negativen Wasserbilanz (Niederschlag - potentielle Verdunstung) gerechnet werden muss. Teilweise ist diese Bilanz im Sommer mit 300 mm negativ (Abb. 10). Wasser zur Verdunstung dürfte dann nur noch in geringem Umfang vorhanden sein. Einen gewissen Eindruck der Trockenheit konnte man im Sommer 2015 in weiten Teilen Deutschland erleben (Abb. 11).

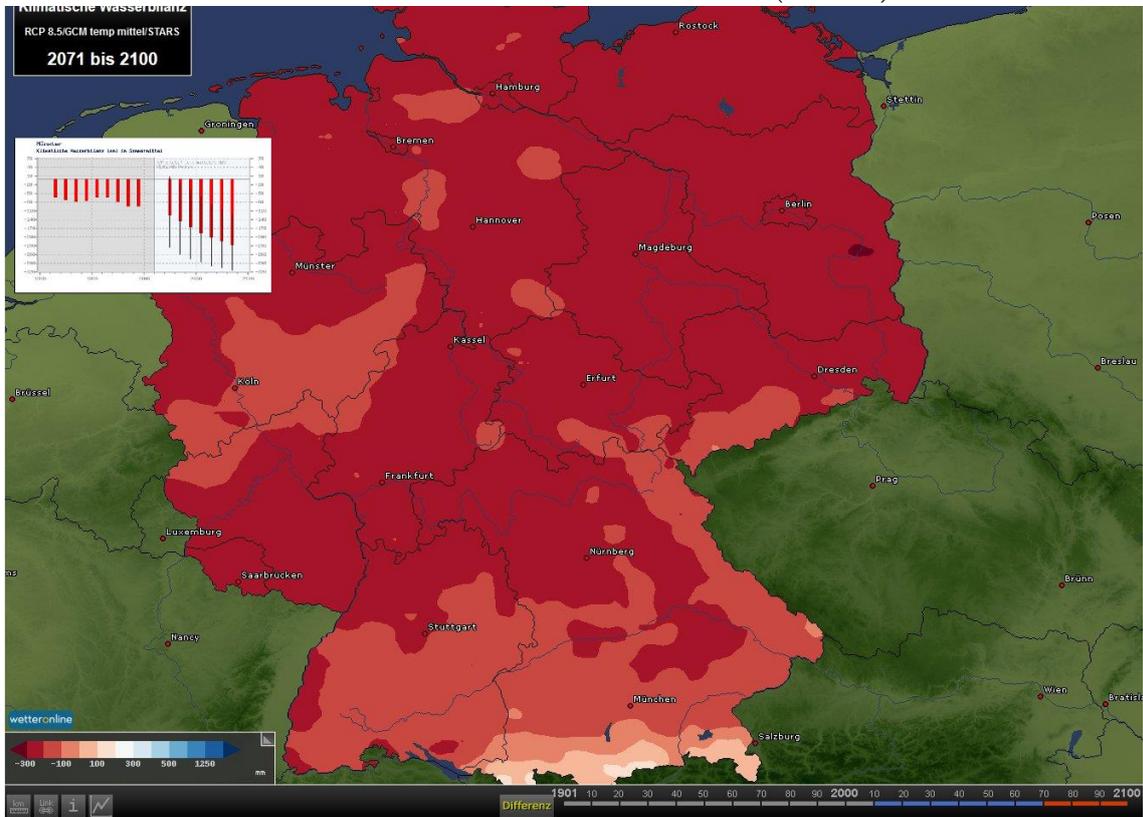


Abb. 10: Klimatische Wasserbilanz im Sommer in Deutschland (20702100) ,RCP 8.5 Szenario ,  
Quelle: <http://www.klimafolgenonline.com/>



Abb. 11: Vertrocknete Grünanlage in Stuttgart (August 2015), Foto: Baumüller

## 5 Stadtklimatische Effekte von RWB-Maßnahmen im Hinblick auf Albedo, Verdunstung und Temperatur

Wenn in Deutschland jemand Wasser auf die Straße schüttet, ist es meist Schmutzwasser zur Beseitigung. In Japan aber kennt man einen Brauch genannt Uchimizu (打ち水) aus der Edo-Zeit mit einer ganz anderen Bedeutung. Uchimizu (den Boden mit Wasser besprengen) wurde in Japan im Allgemeinen dazu verwendet, den Staub auf den Straßen zu binden und in der Sommerhitze durch die Verdampfungswärme für kühle Luft zu sorgen – oder zumindest für ein kühles und angenehmes Gefühl. Bis 1970 war es Tradition die Straße vor seinem traditionellen Haus zu benetzen. Zum einen zur Reinigung, zum anderen zur Abkühlung. Heute ist dies mehr ein symbolischer Akt einmal im Jahr.



Abb. 12: Uchimizu Event in Tokyo-Ginza; <http://photozou.jp/photo/show/216071/44715799>

Eine Überlegung wert wäre es indessen, gesammeltes Regenwasser zur Straßenbenetzung in den dichten Innenstädten zu verwenden. Die überwiegend als negativ eingestuften Empfindungen bioklimatischer Auswirkungen speziell bei Hitzewellen wie im Sommer 2003 und 2015 lassen sich zumindest teilweise verbessern. Diese Erkenntnis ist nicht neu, so äußert sich Kuttler (1991):

„ Aus diesem Grund erscheint es für Abwägungsprozesse im Planungsbereich notwendig, die in Städten bereits vorhandenen bzw. quasi natürlichen Flächen, wie Park- und Grünanlagen, Luftleitbahnen sowie Still- und Fließgewässer daraufhin zu untersuchen, in welchem Maße diese zu einer Verbesserung des Bioklimas und der Lufthygiene beitragen und wie derartige Erkenntnisse in die Planung künftiger Bauvorhaben einbezogen werden können“.

Die bioklimatische vorteilhafte Wirkung von Grünflächen und Wasserflächen ist hinreichend bekannt, dabei ist natürlich ihre räumliche Ausdehnung von einer großen Bedeutung, insbesondere wenn eine Fernwirkung erzielt werden soll. Nachfolgend sollen einige Formen der RWB Maßnahmen im Hinblick auf stadtklimatische Parameter näher besprochen werden.

## 5.1 Flächenversickerung

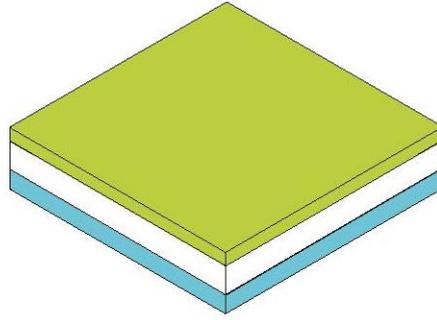


Abb. 13: Parkfläche als Flächenversickerung, Foto: Baumüller

Die Flächenversickerung wird eingesetzt, wenn kleinere Flächen oder auch Wege über den Rand in die seitlichen Grünflächen entwässert werden. Das Regenwasser wird versickert, in der Regel ohne einen Aufstau. Die Sickerfläche kann sowohl aus Grünflächen aber auch aus teildurchlässigen Flächen wie z.B. Sickerpflaster bestehen. Bei der Flächenversickerung muss die Versickerungsfläche groß genug gegenüber der befestigten Fläche sein. Die Flächenversickerung kommt der natürlichen Versickerung am nächsten. Bei abnehmender Durchlässigkeit steigt der Flächenbedarf stark an, auch darf die für die Versickerung vorgesehene Fläche kein zu großes Gefälle aufweisen. Der Verdunstungsanteil ist hier sehr gut und liegt bei ca. 30%. Mit über 60% Versickerung kommt es zu einer sehr guten Grundwasseranreicherung und damit einer Entlastung des Kanalnetzes. Durch die meist größeren Flächen ist eine gute Kaltluftproduktion in der Nacht gegeben. Flächen mit zusätzlichem Baumbestand weisen einen sehr guten bioklimatischen Effekt auf, wenn man sich auf der Fläche aufhalten kann.

Bewertung der Flächenversickerung

Verdunstung	Versickerung	Grundwasseranreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
sehr gut	gut - sehr gut	gut - sehr gut	sehr gut	gut - sehr gut

## 5.2 Muldenversickerung

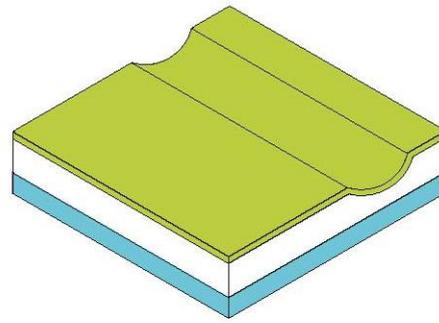


Abb. 14: Muldenversickerungsbereich in Ostfildern Scharnhäuser Park, Foto Baumüller

Bei der Muldenversickerung wird das Regenwasser meist oberirdisch mit offenen Zuleitungskanälen oder Gräben auf eine flache, begrünte Versickerungsmulden geleitet. Dort wird das Wasser kurzfristig bis zur Versickerung zwischengespeichert. Das ursprüngliche Ziel ist die rasche Versickerung und nicht die Wasserspeicherung mit Verdunstung. Die Bemessung der Mulden sollte nur einen kurzfristigen Wasserstau zulassen. Ein Dauerstau ist zu vermeiden, um der Verschlickung und Verdichtung der Oberflächen zu verhindern. Es hat sich bewährt, die Stauhöhe auf 30 cm zu begrenzen. Die Kühlleistung ist gut sofern der Boden feucht ist. Deshalb ist darüber nachzudenken, Bodenarten zu verwenden, die eine gute Wasserspeicherfähigkeit haben. Mit zusätzlicher Baumpflanzung kann die bioklimatische Situation verbessert werden. Die Fläche kann z.B. auch als Kinderspielplatz genutzt werden.

Bewertung der Muldenversickerung

Verdunstung	Versickerung	Grundwasseranreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
sehr gut	gut - sehr gut	gut - sehr gut	sehr gut	gut

### 5.3 Mulden-Rigolen- Element/Mulden-Rigolen- System

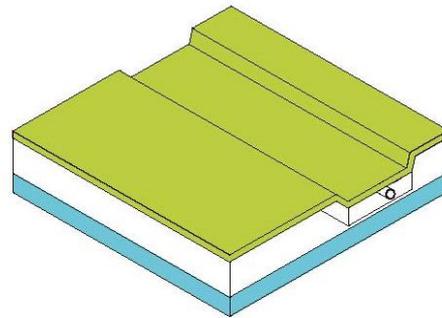


Abb. 15: Mulden-Rigolensystem, Ostfildern Scharnhäuser Park, Foto: Baumüller

Eine Rigole ist ein meist unterirdischer Pufferspeicher, um eingeleitetes Regenwasser aufzunehmen und unterirdisch zu versickern. Dazu ist eine Rigole meist mit Kies oder erosionsarmen Materialien aufgefüllt. Rigolen haben eine gute Regen-Rückhaltewirkung und durch die unterirdische Lage oft einen geringen Flächenbedarf. Durch die unterirdische Versickerung steht zur Verdunstung wenig Wasser zur Verfügung, es sei denn, man kombiniert die Muldenversickerung mit einer Rigole wie z.B. bei der Landschaftstreppe des Wohngebiets Scharnhäuser Park (Abb. 15). Durch die zusätzliche Verdunstungskühlung wird die bioklimatische Situation verbessert, sofern man diese Flächen, wie hier beim Beispiel auch als Aufenthaltsraum nutzt.

Bewertung Mulden-Rigolen System

Verdunstung	Versickerung	Grundwasser- anreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
gut	sehr gut	gut bis sehr gut	gut in Kombination mit Mulden- versickerung	gut in Kombination mit Mulden- versickerung

## 5.4 Versickerungsteich

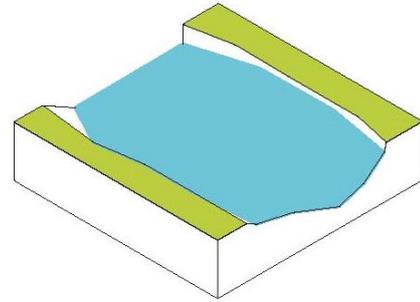


Abb. 16: Versickerungsteich, Quelle: Klaus Pellmann Landesstelle.org

Teichanlagen können bei entsprechender Gestaltung des Untergrunds auch zur Versickerung benutzt werden. Die Wasserfläche kann Wasser verdunsten und so zumindest am Tage eine gewisse Abkühlung am Rande des Teichs bewirken (s.a. Kap. 6.11).

Da der Teich den anfallenden Niederschlag z.B. eines Hausdaches aufnehmen können muss, ist die Bemessung so zu wählen, dass der Wasserspiegel ansteigen kann. Sinnvoll ist dann die Versickerung über den Randbereich, der nur teilweise abgedichtet ist. Da Wasserflächen geringer Tiefe sich im Sommer auch stärker erwärmen können ist die Kühlleistung nicht stark ausgeprägt, insbesondere in der Nacht bleiben die Wasserflächen lange warm infolge der speziellen Abkühlung. Der bioklimatische Effekt solcher Teiche beschränkt sich auf die nähere Umgebung.

Bewertung Versickerungsteich

Verdunstung	Versickerung	Grundwasseranreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
sehr gut	gut-sehr gut	gut - sehr gut	gut am Tage	gering

## 5.5 Offener Graben

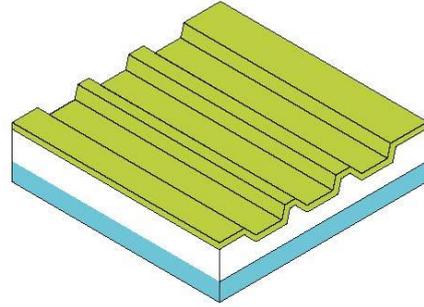


Abb. 17: Offener Graben, Ostfildern Scharnhäuser Park, Foto: Baumüller

Offene Gräben zur Versickerung werden eingesetzt, wenn kleinere Flächen oder auch Wege über den Rand in die seitlichen Grünflächen entwässert werden. Das Regenwasser wird in den Graben eingeleitet und dort versickert oder bei Starkregen einem Bach, Teich etc. zugeführt. Die Neigung ist in der Regel gering. Die Grabenversickerung kommt der natürlichen Versickerung nahe. Bei abnehmender Durchlässigkeit nimmt die Versickerungsleistung ab.

Der klimatische Effekt ist wie bei der Flächenversickerung zu sehen, wenn sich an den Graben eine Grünfläche anschließt. Ein von versiegelten Flächen beidseitig umgebender Graben hat nur eine minimale klimatische Funktion.

Bewertung Offener Gräben

Verdunstung	Versickerung	Grundwasseranreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
sehr gut	Gut - sehr gut	gut - sehr gut	sehr gut	gut

## 5.6 Gründächer

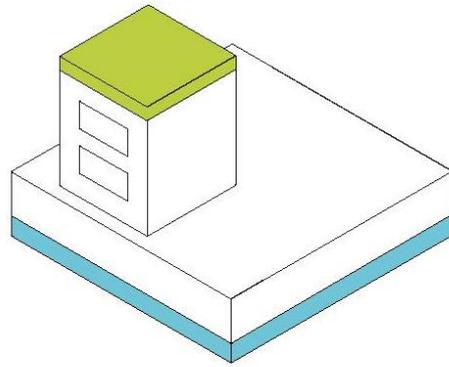


Abb. 18: Begrüntes Dach des Amtes für Umweltschutz Stuttgart, Foto: Baumüller

Man unterscheidet prinzipiell zwischen extensiven und intensiven Gründächern, wobei die extensiven Gründächer in der Regel nicht bewässert werden und weiter verbreitet sind. Als Substratauflage genügen schon wenige Zentimeter. Untersuchungen von Höschele und Schmidt zeigten 1974, dass bei einem begrüntem Flachdach (mit Beregnung) von der eingestrahnten Energie nur ein geringer Anteil zur Erwärmung der Luft beiträgt, der überwiegende Anteil jedoch durch Verdunstung in latente Wärme überführt wird (Abb. 19). Das Resultat der Verdunstung ist eine deutlich herabgesetzte Oberflächentemperatur von begrüntem Dächern (Abb. 20). Im Sommer sind Dachbegrünungen für darunter liegende Räume insgesamt eine wirksame Maßnahme zum Schutz vor sommerlicher Hitze. Im Winter kommt es durch die Vegetation und das Dachsubstrat zu einer Verminderung des Wärmedurchganges und somit zu einer erhöhten Wärmedämmung.

Die klimatische Wirkung von begrüntem Dächern ist vor allem für das Gebäude selbst von Vorteil. Die etwas geringere Lufttemperatur über dem Gründach ist in Bodennähe tagsüber praktisch nicht wahrnehmbar. In der Nacht kann die kühlere Luft in den Straßenraum absinken.

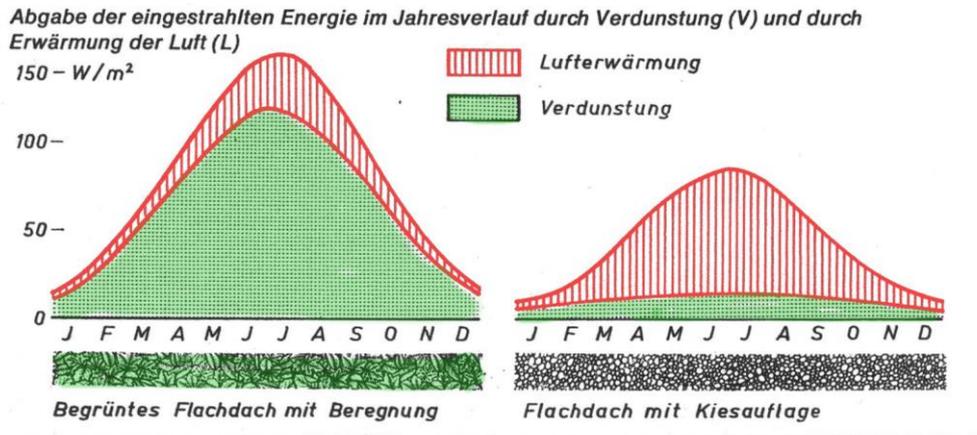


Abb. 19: Abgabe der eingestrahelten Energie im Jahresverlauf durch Verdunstung (V) und durch Erwärmung der Luft (L), Hörschele u. Schmidt (1974), verändert

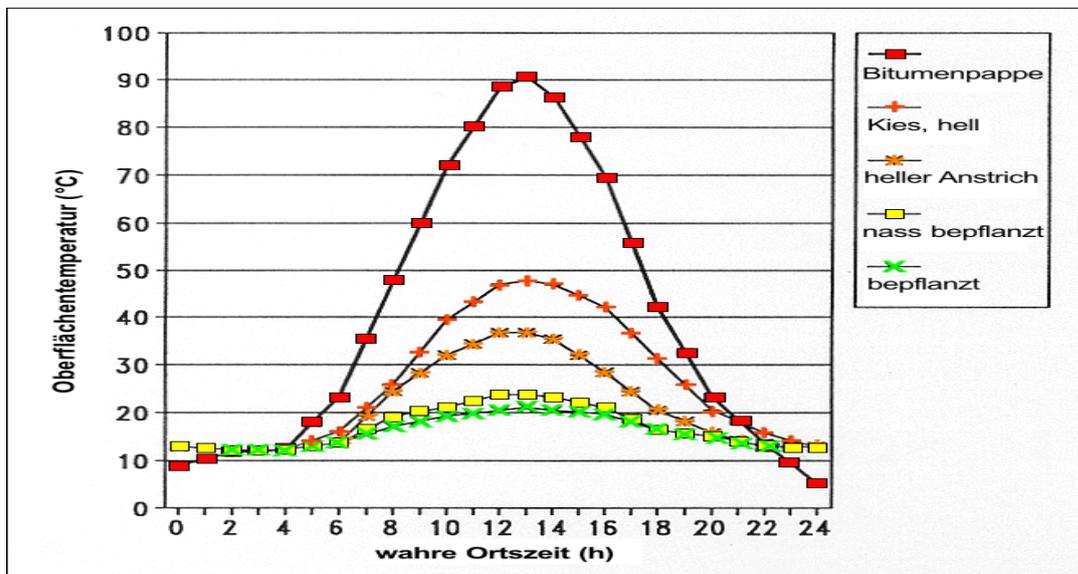


Abb. 20: Temperaturverläufe von Flachdächern unterschiedlicher Oberfläche an einem strahlungsreichen Sommertag, nach Gertis et.al. 1977, verändert

Nach Roth-Kleyer (2010) genügen geringe Substratschichten zur Regenrückhaltung (Abb. 21).

Begrünungsart	Aufbaudicke in cm	Wasserrückhaltung im Jahresmittel in %	Jahresabflussbeiwert
Extensivbegrünung	2-4	40	0.60
	> 4-6	45	0.55
	> 6-10	50	0.50
	> 10-15	55	0.45
	> 15-20	60	0.40
Intensivbegrünung	15-20	60	0.40
	> 25-50	70	0.30
	>50	> 90	> 0.10

Abb. 21: Wasserrückhaltung begrünter Dächer, Quelle: Roth-Kleyer St., 2010

Die Vorteile von Gründächern sind gegeben durch:

- Verlängerung der Dach-Lebensdauer, da ein mechanischer Schutz gegeben ist und UV-Strahlung abgehalten wird.
- Verbesserung des Gebäudeklimas. Durch die Verdunstung kann die Temperatur der direkt darunterliegenden Räume im Sommer reduziert werden. Dadurch kann gegebenenfalls auf eine Kühlung verzichtet werden
- Ein begrüntes Dach verdunstet mehr als die Hälfte des jährlichen Niederschlags. Die Kanalisation und die Kläranlagen werden entlastet
- Die Aufheizung von Flächen in der Stadt wird reduziert
- Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten
- Ästhetischer Anblick bei Draufsicht

Bewertung Gründach

Verdunstung	Versickerung	Grundwasseranreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
sehr gut sofern feucht	nein	nein	gut sofern feucht	gering

## 5.7 Grüne Parkierung

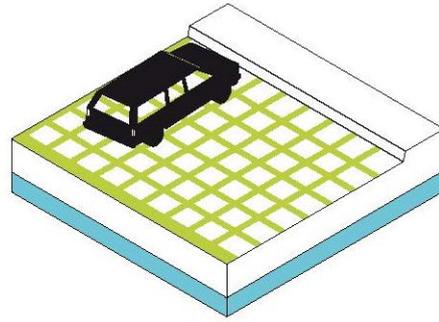


Abb. 22: Parkplatz mit Pflasterrasen, Foto: Baumüller



Abb. 23: Begrünte Parkplätze in Kobe, Japan, Foto: Baumüller

Parkplätze, die nicht auf Dauer zugewiesen sind, lassen sich mit unterschiedlichen teilbegrünten Befestigungen, erstellen.

Die klimatische Funktion ist abhängig vom Anteil der der grünen Fläche und vom verwendeten Befestigungsmaterial. Die Oberflächentemperaturen lassen sich hier deutlich reduzieren.

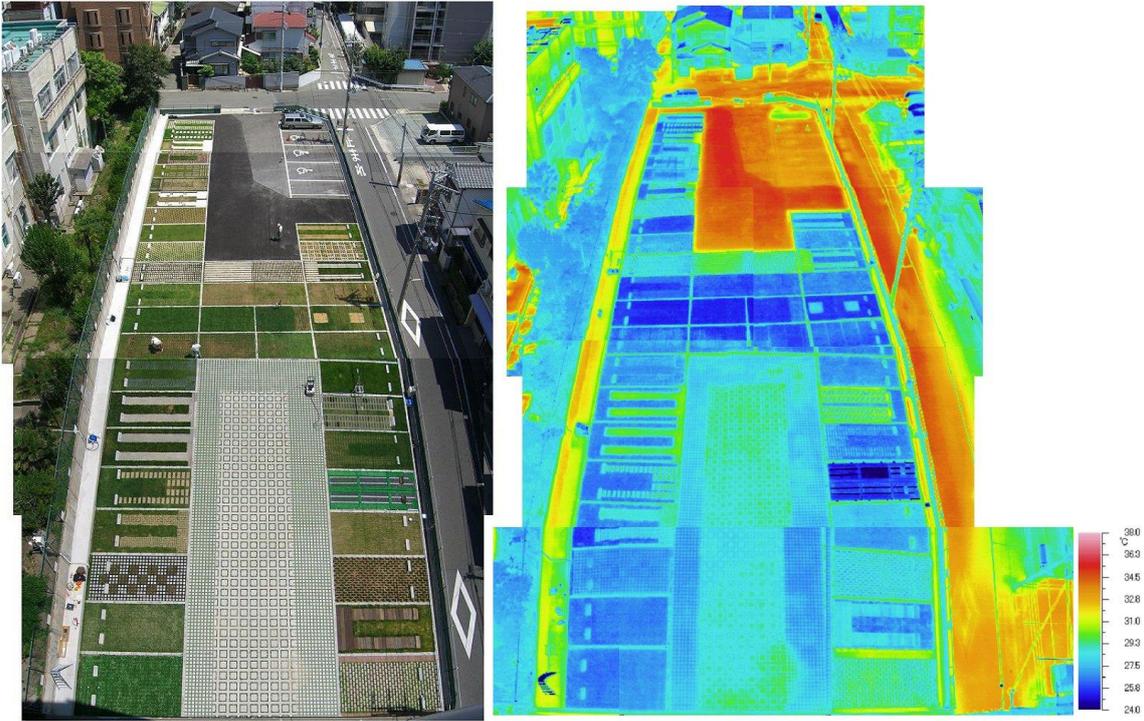


Abb. 24: „Grünparkierung“ in Kobe (links), Thermalbild dieser Fläche am Tage (rechts); (Quelle: Moriyama Laboratory Department of Architecture and Civil Engineering, Kobe University, 2006)

### Bewertung Grüne Parkierung

Verdunstung	Versickerung	Grundwasser- anreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
gut je nach Art	gut-sehr gut	gut - sehr gut	mäßig	gering

## 5.8 Teildurchlässige Pflasterflächen (Poren- und Sickersteine), Wassergebundene Decke

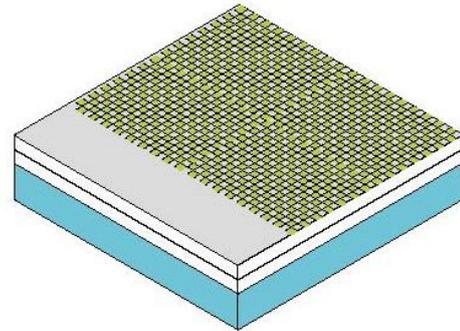


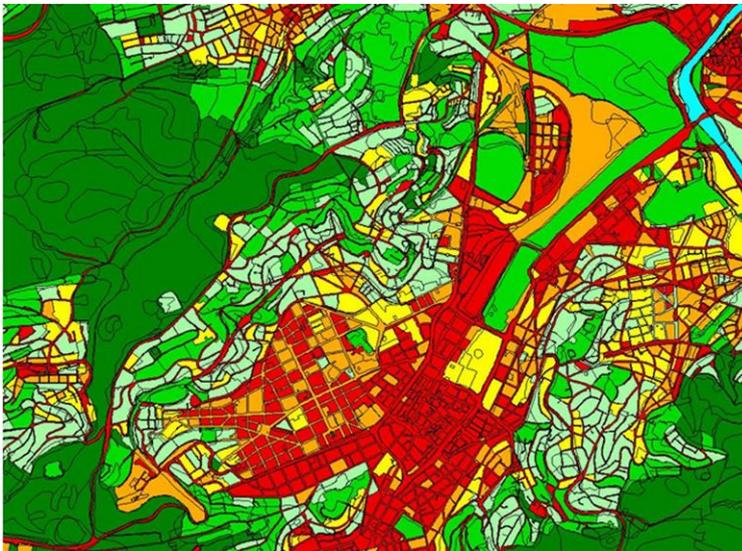
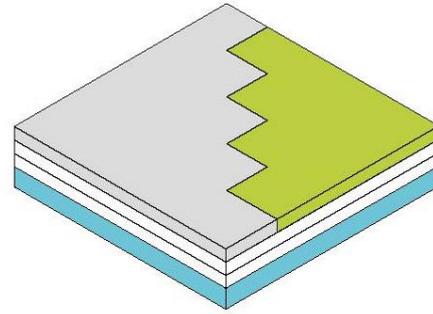
Abb. 25: Platz mit wassergebundener Decke und hoher Albedo Foto: Baumüller

Wassergebundene Decken für Straßen, Wege und Plätze bestehen aus gebrochenen Naturstein (Schotter), und werden nicht von einem bituminösen Bindemittel zusammengehalten wird. Die oberste Schicht ist wenige Zentimeter dick und liegt auf einer ca. 6 Zentimeter dicken Schicht zur Druck- und Schubübertragung. Darunter liegen die Frostschuttschicht und der tragfähige Unterbau. Die Oberschicht wird feucht gewalzt. Wassergebundene Oberflächen haben je nach Ausstattung eine gute Versickerung und einen geringen Abflussbeiwert. Bei Verwendung von hellem Steinmaterial ist die Aufheizung in Folge der hohen Albedo gering. Außer bei Forst- und landwirtschaftlichen Nutzungswegen lassen sich wassergebundene Decken auch für Parkplatzflächen und für Parkanlagen verwenden.

Bewertung Wassergebundene Decke

Verdunstung	Versickerung	Grundwasseranreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
mäßig	gut	gut	mäßig	gut

## 5.9 Entsiegelung



### Versiegelung

	Versiegelungsstufe VI (>90%)
	Versiegelungsstufe V (76 - 90 %)
	Versiegelungsstufe IV (56 - 75 %)
	Versiegelungsstufe III (36 - 55 %)
	Versiegelungsstufe II (16 - 35 %)
	Versiegelungsstufe I (<16 %)
	Gewässer

Abb. 26: Anteil der Flächenversiegelung in der Stuttgarter Innenstadt (Quelle: AfU, Stuttgart)



Abb. 27: Schlosshof in Stuttgart mit starker Versiegelung: Foto: Baumüller

In den Städten, speziell in den Innenstädten, ist der befestigte und versiegelte Flächenanteil sehr groß (Abb. 26). In einzelnen Bereichen beträgt der Versiegelungsgrad 100%. Damit kann das Regenwasser nur geringfügig versickern und fließt oberflächlich rasch ab. Die Abflussbeiwerte (Tab. 5) sind hier sehr hoch, was dazu führt, dass die Kanalisation bei Starkregen teilweise überlastet ist. Eine Möglichkeit der Verbesserung ist gegeben, indem man versucht die Flächen so weit wie möglich zu entsiegeln. Hier bieten sich die Dächer aber auch die Freiflächen und Parkierungsflächen an.

Flächenart	Abflussbeiwert
<b>Wasserundurchlässige Flächen</b>	
Dachflächen/ Betonflächen/ Rampen 1	1,0
Befestigte Flächen mit Fugendichtung/ Schwarzdecken (Asphalt)/Pflaster mit Fugenguss	1,0
Kiesdächer	0,5
begrünte Dachflächen für Intensivbegrünung/ Extensivbegrünung ab 10 cm Aufbaudicke	0,3
begrünte Dachflächen für Extensivbegrünung unter 10 cm Aufbaudicke	0,5
<b>Teildurchlässige und schwach ableitende Flächen</b>	
Betonsteinpflaster, in Sand oder Schlacke verlegt, Flächen mit Platten	0,7
Flächen mit Pflaster, Fugenanteil > 15 %, z. B. 10 cm x 10 cm und kleiner	0,6
wassergebundene Flächen	0,5
Kinderspielplätze mit Teilbefestigungen	0,3
Sportflächen mit Dränung (Kunststoffflächen, Kunstrasen)	0,6
Sportflächen mit Dränung (Tennenflächen)	0,4
Sportflächen mit Dränung (Rasenflächen)	0,3
<b>Wasserdurchlässige Flächen ohne oder mit unbedeutender Wasserableitung</b>	
Parkanlagen und Vegetationsflächen, Schotter und Schlackeboden, Rollkies, auch mit befestigten Teilflächen/Gartenwege mit wassergebundener Decke	0,0
Einfahrten mit Rasengittersteinen	0,0

Tab. 5: Abflussbeiwerte unterschiedlicher Flächen nach DIN 1986-100 (2008)

#### Bewertung Entsiegelung

Verdunstung	Versickerung	Grundwasseranreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
Gut je nach Material	gut-sehr gut	gut - sehr gut	abhängig von Material	abhängig von Material

## 5.10 Regenwassernutzung für Bewässerung

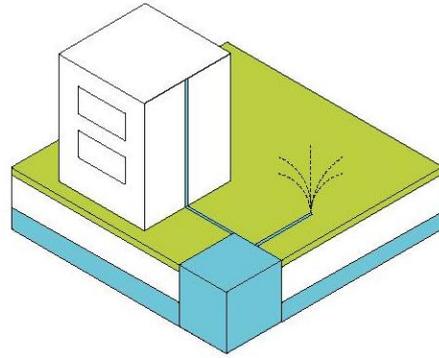


Abb. 28: Zisterne mit Wasserstandanzeige, Foto: Hans Spaniol (<http://www.webhans.de>)

Zukünftig werden durch den Klimawandel voraussichtlich die Sommerniederschläge zurückgehen bei einer gewissen Zunahme von Starkregenfällen. Deshalb macht es Sinn im Sommer den von befestigten Flächen abfließenden Niederschlag in Zisternen zu sammeln und für die Bewässerung in Trockenzeiten zu benutzen. Die Notwendigkeit dieser Maßnahme zeigte sich beispielsweise auch im Sommer 2015 (Abb. 29)



Abb. 29: „Grüne Fuge“ in Stuttgart, Höhenpark Killesberg, Foto: Baumüller

#### Bewertung Regenwassernutzung für Bewässerung

Verdunstung	Versickerung	Grundwasser- anreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
Indirekt, bei Bewässerung sehr gut	gering	gering	Indirekt, bei Bewässerung sehr gut	Indirekt, bei Bewässerung sehr gut

## 6 Bewertung von RWB-Maßnahmen und freiraumplanerischen Gestaltungselemente auf das Stadt-klima

Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen und freiraumplanerischen Gestaltungselemente bieten die Möglichkeit das Stadtklima insbesondere kleinräumig zu verbessern und sind im Sinne von Klimaanpassungsstrategien an den Klimawandel von Städten eine wichtige Maßnahme, da nicht nur die thermische Situation verbessert wird, sondern auch der Umgang mit Starkregenfälle im Sommer. Die thermische Verbesserung bezüglich der Lufttemperatur für die Gesamtstadt z.B. bei Hitzewellen ist relativ gering und beträgt nur wenige Grad.

Die Bedeutung der verdunstungsfähigen Grün und Freiraumflächen liegt in der Verbesserung der gefühlten Temperatur. Gegenüber befestigten Flächen kann hier erreicht werden, dass die gefühlte Temperatur um bis zu über 15 Grad verbessert wird. Die Verbesserung kommt durch die Veränderung der Oberflächentemperaturen zustande. Hierzu ist es notwendig die Oberflächen möglichst lange feucht zu halten, damit Verdunstungskälte erzeugt werden kann. Dies steht z.T. im Widerspruch zum Hochwasserschutz, wo es darum geht das Oberflächenwasser schnell abzuführen oder zu versickern.

Durch die zu erwartende negative Wasserbilanz in den Sommermonaten in der Zukunft ist es notwendig, die obersten Bodenschichten mit einer hohen Wasserspeicherfähigkeit auszustatten und evtl. auch Regenwasser in Zisternen zu speichern, um in Trockenzeiten die Grünbereiche bewässern zu können.

Die klimatische Wohlfühlfunktion der RWB beschränkt sich in der Regel auf das Gebiet der RWB selbst. Eine Fernwirkung in benachbarte, bebaute Gebiet ist nur gegeben, wenn die Grünfläche sehr groß ist, wie z.B. bei großen Parkanlagen (Kuttler. 2010). Aber selbst hier beschränkt sich die Reichweite auf wenige 100m und ist stark von der Randbebauung abhängig.

Die beste thermische Verbesserung für den Menschen erreicht man, indem man die Grünflächen mit Bäumen versieht. Durch die Schattenwirkung der Bäume in Verbindung mit kühleren Oberflächentemperaturen wird die gefühlte Temperatur im Sommer optimal reduziert.

Deutlich erhöht sind die Verdunstungsraten unbefestigter Flächen, wobei der Unterschied zwischen bepflanzter und vegetationsloser Fläche im Monatsmittel nicht besonders groß ist (Abb. 30). Nach den Auswertungen des DWD hat im Sommer ein See mit geringer Tiefe (2m) die höchsten Verdunstungsraten, die zumindest tagsüber die Umgebung positiv beeinflussen können.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Unterschiede von verschiedenen Grünbereichen ohne Beschattung auf die thermische Situation keine großen Unterschiede aufweisen. Entscheidend ist hier die Wasserverfügbarkeit zur Verdunstung.

Grünflächen haben im Gegensatz zu Wasserflächen den Vorteil einer stärkeren Abkühlung in der Nacht, da hier die Wärmenachführung vom Untergrund nicht besonders gut ist.

Bei Wasserflächen kommt es bei der Abkühlung durch Verdunstung bzw. Strahlungsverlust zu einer Konvektion und damit zu einem vertikalen Wärmeaustausch, wodurch ein größeres Volumen abgekühlt werden muss. Im Gegensatz zu flachen Wasserflächen, die durch die eindringende Strahlung auch vom Boden erwärmt werden, findet bei tieferen Gewässern die Erwärmung durch die Strahlungsabsorption statt.

Entscheidend für die Ausgestaltung der RBW Maßnahmen ist es darauf zu achten welche klimatische Funktion diese Maßnahme haben soll. Als Aufenthaltsbereich für den Menschen wird die Ausstattung anders aussehen müssen, als bei einer reinen wasserwirtschaftlichen Maßnahme.



Mittlere Monats- und Jahreswerte der Verdunstungshöhe ausgewählter Flächennutzungen und der korrigierten Niederschlagshöhe, Beispielort 1980/2009

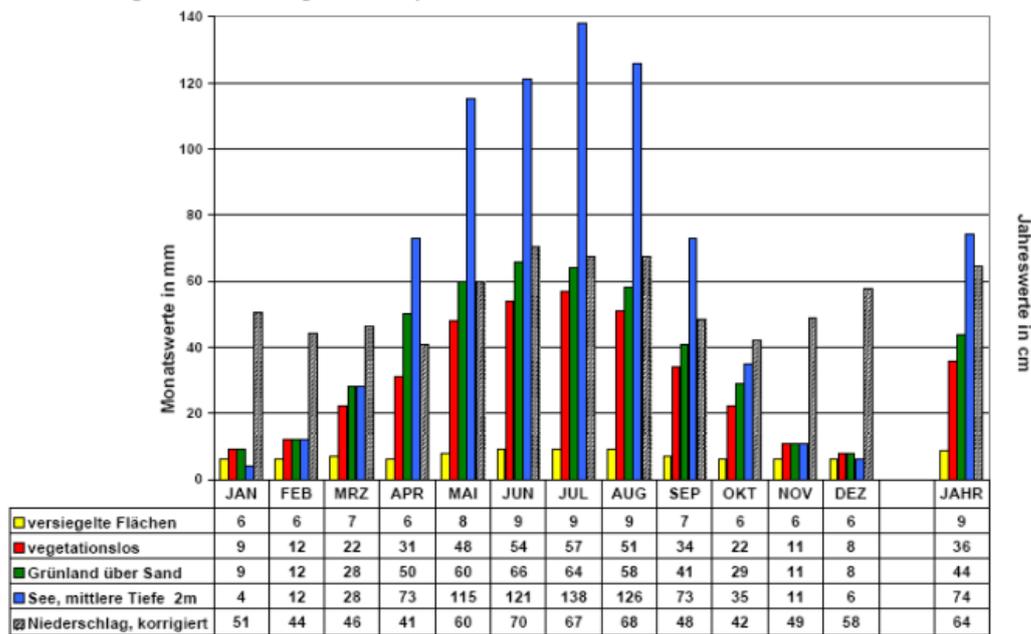
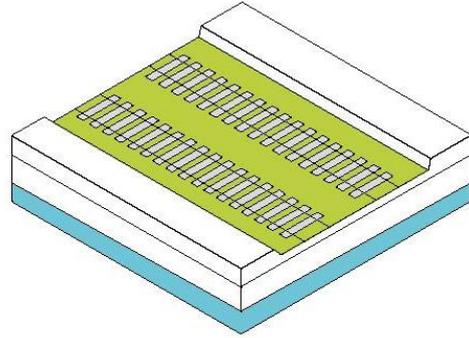


Abb. 30: Mittlere Monats- und Jahreswerte der Verdunstungshöhe ausgewählter Flächennutzungen und der korrigierten Niederschlagshöhe, DWD

Neben den reinen RWB-Maßnahmen gibt es weitere freiraumplanerische Maßnahmen, die sowohl positive Auswirkungen auf das Stadtklima als auch auf Regenwassermanagement haben. Dazu gehören zum Beispiel Grüne Gleistrassen, Allee-Bäume und offene Wasserflächen.

## 6.1 Grüne Gleistrassen



Begrünte Gleistrassen sind durchaus vergleichbar mit Dachbegrünungen. Die Substratschicht ist relativ gering abhängig von dem Vegetationssystem (in der Regel Gras oder Sedum). Zwei Unterschiede sind jedoch vorhanden: Erstens haben begrünte



Abb. 31/32: Begrünte Gleistrassen in Stuttgart, Fotos: Baumüller

Gleistrassen z.T. einen Bodenanschluss, der ein Versickern ermöglicht und sie befinden sich zweitens auf Straßenniveau, was für die thermischen Verhältnisse bezogen auf den Menschen von Vorteil ist.

Abhängig von der eingesetzten Vegetation (Rasen oder Sedum) unterscheidet sich die Vegetationstragschicht. „Sedumgleise“ haben eine Vegetationstragschicht von 6 - 8 cm. Bei „Rasengleisen“ beträgt diese – standortabhängig – mehr als 15 cm. Grüne Gleise weisen eine durchschnittliche Wasserrückhaltung der jährlichen Gesamtniederschlagsmenge in Höhe von 50 % bei Sedumgleisen und 70 % bei Rasengleisen auf. Grüne Gleise sind in der Lage, an heißen Sommertagen die Lufttemperatur etwas zu mindern. Der Effekt hängt vom Vegetationssystem ab und ist bei Rasengleisen größer als bei Sedumgleisen. Da man sich auf den Gleisen nicht aufhält, ist der bioklimatische Effekt gering.

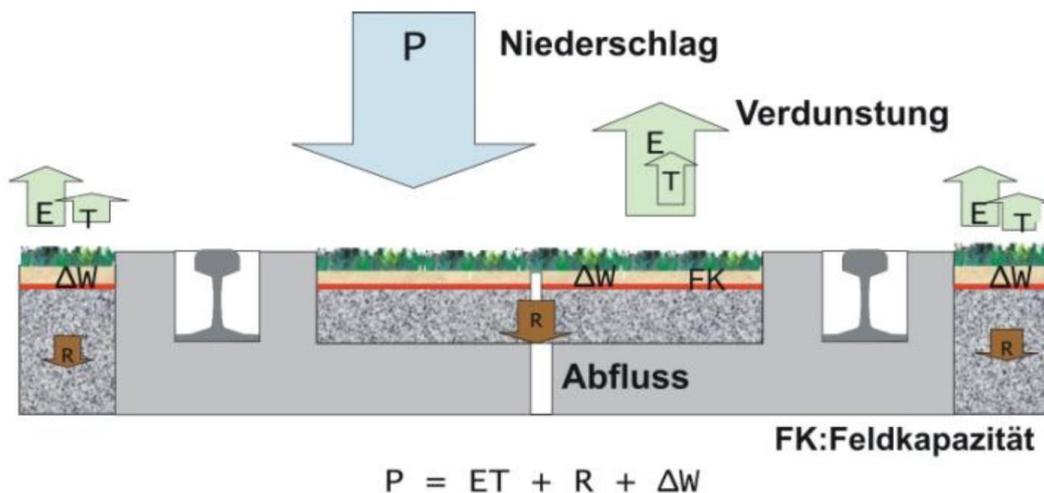


Abb. 33: Elemente des Wasserhaushalts im begrünten Straßenbahngleis P= Niederschlag; ET=Verdunstung; R=Abfluss; ΔW=Veränderung des Wasservorrates im Vegetationssystem in mm bzw. l/m<sup>2</sup> FK =Feldkapazität (die maximale Menge des Haftwassers im Begrünungssystem, angegeben als Feuchte in Vol. % oder als W in mm). Quelle: <http://www.gruengleisnetzwerk.de/>

#### Bewertung grüne Gleistrassen

Verdunstung	Versickerung	Grundwasseranreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt	
sehr gut sofern feucht		gut-sehr gut	gut - sehr gut	Gut sofern feucht	gering

## 6.2 Baumalleen

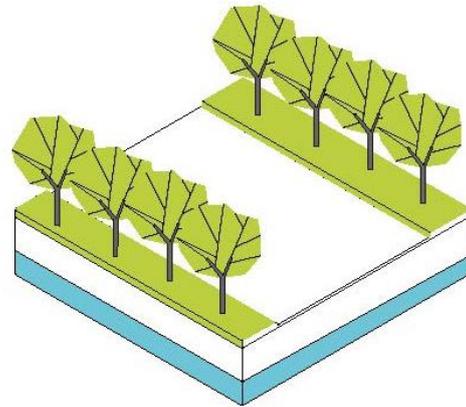


Abb. 34: Baumallee in Sendai Japan Jozenji- Straße, Foto: Baumüller

Baumalleen sind ein geeignetes Instrument zur Verbesserung der thermischen Bedingungen im Straßenraum. Durch die Schattenwirkung in Verbindung mit der Verdunstungskühlung kann die gefühlte Temperatur an einem heißen Sommertag um über 15 Grad gegenüber einer Straße ohne Bäume reduziert werden (Abb. 35,36).

Bei hinreichend großen Pflanzbeeten oder Gehwegen mit wasserführenden Decken ist auch eine Versickerung von Regenwasser möglich. Durch das Blätterwerk wird Niederschlag zurückgehalten (Interzeption). Die Interzeption liegt bei Laubbäumen bei ca. 15-25% und nimmt bei Starkregen ab. Ein Baum besitzt auch bedingt durch seine Größe erheblich mehr Blattmasse als niedrigere Vegetation und damit eine größere verdunstungswirksame Oberfläche. Durch die Wurzeln wird auch ein größeres Bodenvolumen erschlossen. Da die langwellige Ausstrahlung vom Boden durch das Blattwerk reduziert wird, ist jedoch die Abkühlung in der Nacht unter den Bäumen nicht so ausgeprägt wie bei Grasflächen. Tagsüber ist die Bodentemperatur unter Bäumen aber auch nicht so hoch. Bäume haben also eine ausgleichende klimatische Wirkung. In Straßenräumen mit viel Autoverkehr sind die Schadstoffkonzentrationen höher als in Straßen ohne Bäume, da durch die Bäume die Windgeschwindigkeit reduziert ist. Bei immer besseren Abgaswerten der Autos in der Zukunft dürfte sich dieses Problem mittelfristig reduzieren.

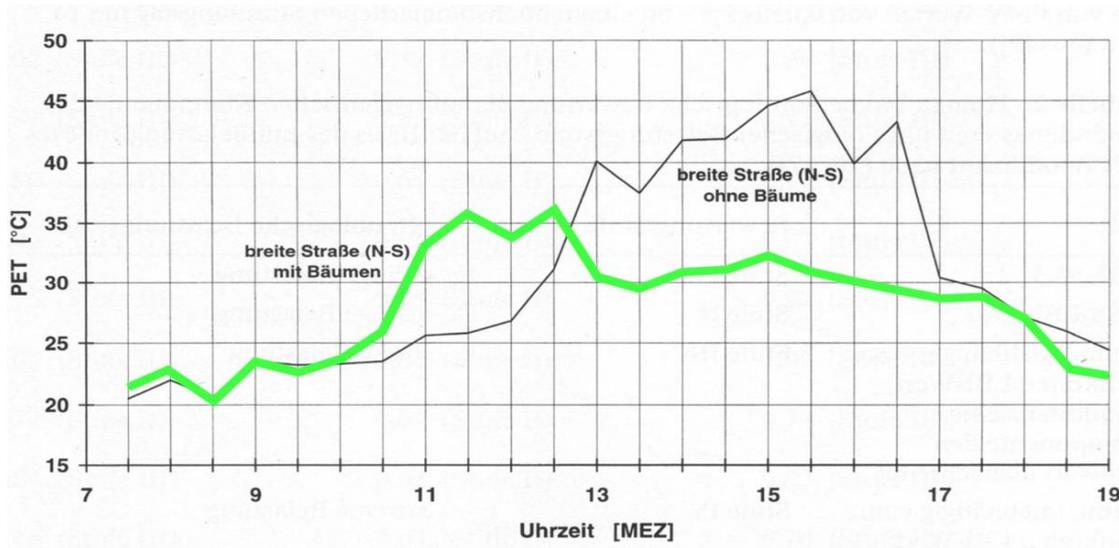


Abb. 35: Physiologisch Empfundene Temperatur (PET), heißer Sommertag, Ostseite von zwei vergleichbaren Straßenschluchten in München, 13.Aug. 1985, (Mayer,1996)

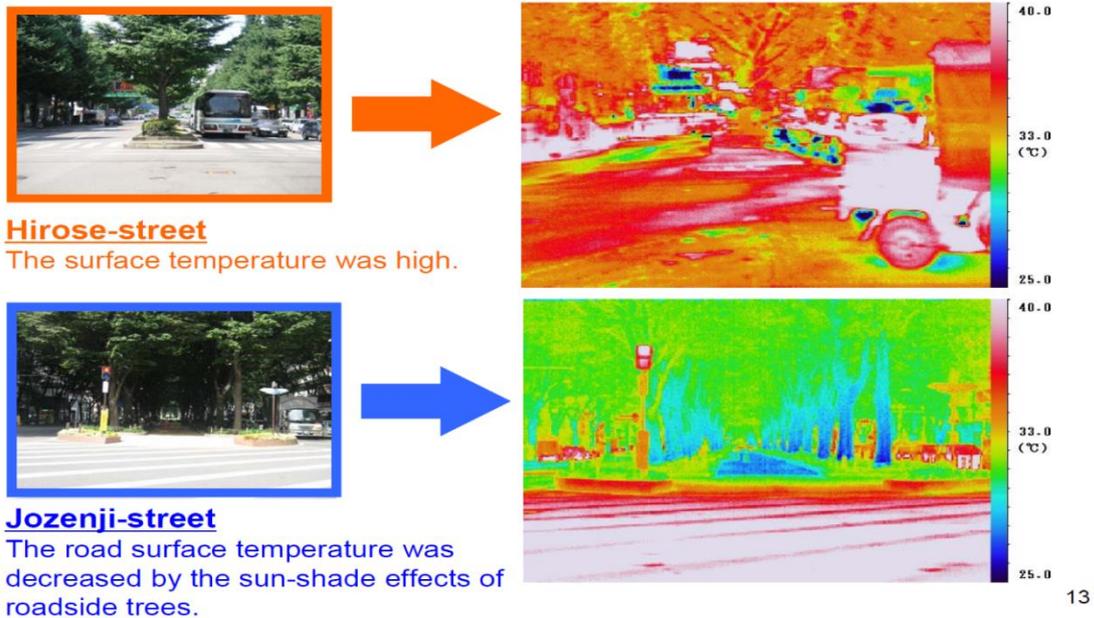


Abb. 36: Infrarotthermalbild zweier Straßen in Sendai Japan, (Kikuchi ,2006)

### Bewertung Allee Bäume

Verdunstung	Versickerung	Grundwasseranreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
sehr gut	gering	gering	sehr gut	sehr gut

### 6.3 Offene Wasserflächen

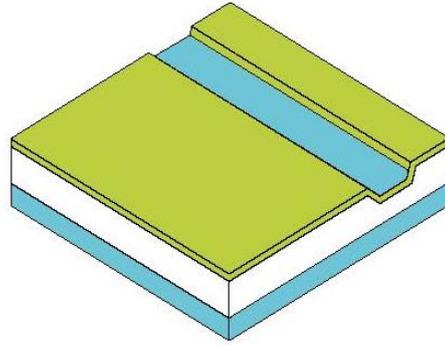


Abb. 37: See in der oberen Schlossgartenanlage in Stuttgart, Foto: Baumüller

Die Gewässerverdunstung kann sowohl als potentielle als auch als tatsächliche Verdunstung interpretiert werden. Die Höhe der Verdunstung einer Gewässerfläche wird bestimmt durch die meteorologischen Bedingungen, das thermische Verhalten des Wasserkörpers, von der Wassertiefe und der Windexposition des Gewässers.

Im Gegensatz zu natürlichen Baustoffen der Städte, unterscheiden sich Wasserflächen in einigen Punkten. Die Sonnenstrahlung kann tief in das Gewässer eindringen und wird dort absorbiert. Beim Eintreten der höchsten Wassertemperatur an der Wasseroberfläche nachmittags erreicht die Wasserdampfsättigung an der Oberfläche ein Maximum, während die relative Feuchte der Luft ein Minimum erreicht. Durch den verdunstungsbedingten Wärmeverlust wird die oberste Wasserschicht etwas kühler, als die darunter liegende Wasserschicht (Kuttler, 1991). Einen Einfluss auf die Höhe der Verdunstung hat auch seine Ausformung und Lage zur vorherrschenden Hauptwindrichtung.

Mittlere Monats- und Jahressummen der Gewässerverdunstung und der korrigierten Niederschlagshöhe, Beispielort 1980/2009

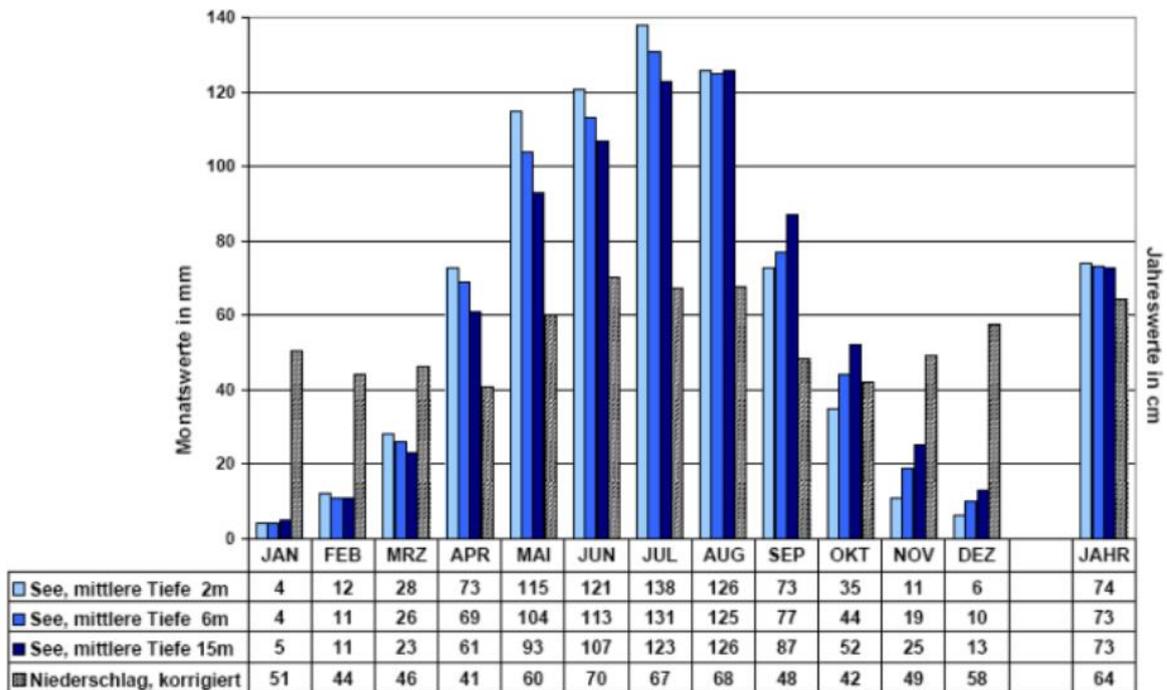


Abb. 38: Mittlere Monats- und Jahreswerte der Gewässerverdunstung und der korrigierten Niederschlagshöhe, DWD

Eine Entwicklung einer Gewässer-/Stadtwindzirkulation (schwache Form einer Land-/Seewindzirkulation) kann sich nur bei größeren Gewässern entwickeln. Dazu darf sich die Wasserfläche tagsüber nicht stark aufheizen, was nur bei tieferen Gewässern der Fall ist. Durch den Temperaturunterschied zwischen Wasserfläche und Stadt kann sich dann ein Gewässerwind entwickeln. Da die Abkühlung des Wasserkörpers in der Nacht gering ist, wird sich kaum ein Stadtwind entwickeln.

In den Sommermonaten ist die Verdunstung der Gewässer mit geringer Tiefe am größten, da sie höhere Temperaturen als Tiefe Gewässer erreichen (Abb. 32).

Die Eindringtiefe des Gewässerwindes in die Bebauung ist stark von der Bebauungsstruktur abhängig. Untersuchungen von Murakawa (1988) in Hiroshima Japan zeigten eine Wirkung von bis zu 200 m mit 3 bis 0,5 Grad Temperaturniedrigung.

#### Bewertung der Flächenversickerung

Verdunstung	Versickerung	Grundwasseranreicherung	Kühlleistung	Bioklimatischer Effekt
sehr gut	abhängig vom Untergrund	abhängig vom Untergrund	gut	gut am Ufer größenabhängig

# Zusammenfassung

Begrünte Wasserbewirtschaftungsanlagen sind geeignet, zumindest lokal das Bioklima günstig zu beeinflussen. Dabei geht es weniger um die Lufttemperatur am Tage, die nur wenig beeinflussbar ist, sondern um die Reduktion der Oberflächentemperatur und damit um die Strahlungstemperatur. Die Abkühlung der begrünten Oberflächen entsteht im Wesentlichen durch die Verdunstungskälte und nicht durch hohe Albedowerte. Um die Verdunstung zu gewährleisten ist es erforderlich, dass genügend Wasser im Boden zur Verfügung steht. In Anbetracht der sich verändernden Niederschlagsverhältnisse speziell im Sommer ist dies in Zukunft nicht mehr immer gegeben.

Bei den aufgezeigten Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen ergeben sich, sofern sie begrünt sind, keine nennenswerten, klimatischen Unterschiede.

Im Gegensatz zum Wald und zu Wasserflächen kühlen offene Grünflächen speziell in der Nacht stark ab und erzeugen so Kaltluft. Ein Einfluss auf die weitere Umgebung ist jedoch nicht gegeben, da die Reichweite selbst großer Parkanlagen sich nur bis zu wenigen hundert Metern auswirkt. Anders ist es, wenn der Kaltluftfluss durch das Relief unterstützt wird.

Die abkühlende Wirkung von Grünflächen auf die Lufttemperatur am Tage hat noch weniger Auswirkung auf die Umgebung, da durch die vorhandenen Konvektion der Luft ein starker Austausch auch mit höheren Luftschichten erfolgt. Man spricht deshalb auch von einem Binnenklima der Grünflächen.

Der bioklimatisch günstige Effekt der Grünanlagen kommt nur dann zum Tragen, wenn die Grünflächen oder die unmittelbare Umgebung der begrünten Bereiche durch die Menschen genutzt werden kann. Das heißt, dass Regenwasserbewirtschaftungsanlagen nicht losgelöst von anderen Nutzungen sein sollten. Dadurch ist es aber auch notwendig die Ausstattung von Wasserbewirtschaftungsanlagen den jeweiligen anderen Funktionen anzupassen.

Für die Aufenthaltsqualität der Menschen im Freien an heißen Tagen spielt der Schatten eine große Rolle. Selbst bei kleinen Grünflächen sollte deshalb bei der Begrünung an Bäume gedacht werden.

Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen bieten die Möglichkeit nicht nur für das Management des Regenwassers zu sorgen, sondern auch die lokale klimatische Situation des Freiraums zu verbessern und bei entsprechender Ausstattung auch das Stadtbild zu verschönern.

Für eine erhöhte Verdunstung und Abkühlung der Oberflächen ist erforderlich (BMUB, 2015):

- Freihaltung von Flächen mit Grundwasseranschluss.
- Verringerung des Anteils an versiegelten Flächen.
- Verbesserung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens.
- Standortgerechte Bepflanzung mit hoher Verdunstungsleistung.
- gezielte Erhöhung der Wasserversorgung der Grünflächen in Hitzeperioden.

## Grüne städtische Infrastruktur mit Faktoren, die das Kühlungspotential beeinflussen

				
<p><b>Straßenbäume</b></p> <p>Baumgröße Baumart Bodenbedeckungsanteil Bepflanzungsdichte Vegetationszustand Blattflächenindex Wasser im Wurzelbereich Standort Geometrie der Umgebungsbebauung Meteorologische Bedingungen Tageszeit</p>	<p><b>Fassadengrün</b></p> <p>Fassade oder Wand Selbstklimmer oder mit Hilfseinrichtung Vegetationsart Vegetationszustand Blattflächenindex Anteil der Fassadenbedeckung Wasserverfügbarkeit Wandmaterial Wandorientierung Geometrie der Umgebungsbebauung Meteorologische Bedingungen Tageszeit</p>	<p><b>Wassergebundene Decke, Sickersteine</b></p> <p>Bodenbedeckungsanteil Bodenbeschaffenheit Mit Zusatzbäumen Neigung Entwässerungsart Albedo Geometrie der Umgebungsbebauung Meteorologische Bedingungen Tageszeit</p>	<p><b>Offene Gräben</b></p> <p>Bodenbedeckungsanteil Bodenbeschaffenheit Neigung Entwässerungsart Geometrie der Umgebungsbebauung Meteorologische Bedingungen Tageszeit</p>	<p><b>Offene Gewässer</b></p> <p>Stehend oder fließend Größe der Wasserfläche Wassertiefe Wassertemperatur Geometrie der Umgebungsbebauung Meteorologische Bedingungen Tageszeit</p> <p>© Baumüller, 2015</p>

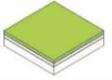
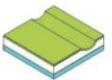
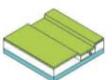
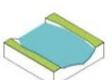
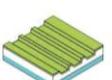
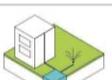
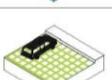
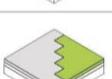
Tab. 6a: Faktoren die das Kühlungspotenzial grüner Infrastruktur beeinflussen.

## Grüne städtische Infrastruktur mit Faktoren, die das Kühlungspotential beeinflussen

				
<b>Flächenversickerung (Parks)</b>	<b>Mulden-Rigolensystem</b>	<b>Gründächer</b>	<b>Grüne Gleistrassen</b>	<b>Grüne Parkierung</b>
Park Design	Design	Substratdicke	Substratdicke	Parkierungsdesign
Baumanteil	Bepflanzungsdichte	Substratbeschaffenheit	Substratbeschaffenheit	Grünflächenanteil
Bepflanzungsdichte	Bodenbeschaffenheit	Vegetationsarten	Vegetationsarten	Wasserspeicherfähigkeit
Arten	Entwässerungsart	Wasserspeicherfähigkeit	Wasserspeicherfähigkeit	Vegetationszustand
Blattflächenindex	Wasserflächen	Vegetationszustand	Vegetationszustand	Blattflächenindex
Bodenbeschaffenheit	Dichte der Umgebungsbebauung	Blattflächenindex	Blattflächenindex	Unterbau
Bewässerungsart	Geometrie der Umgebungsbebauung	Dachneigung	Gleisunterbau	Belegungsdichte
Wasserflächen	Meteorologische Bedingungen	<u>Haushöhe</u>	Geometrie der Umgebungsbebauung	Geometrie der Umgebungsbebauung
Dichte der Umgebungsbebauung	Tageszeit	Dachisolation	Meteorologische Bedingungen	Meteorologische Bedingungen
Geometrie der Umgebungsbebauung		Geometrie der Bebauung	Tageszeit	Tageszeit
Meteorologische Bedingungen		Meteorologische Bedingungen		
Tageszeit		Tageszeit		
				© Baumüller, 2015

Tab. 6b: Faktoren die das Kühlungspotenzial grüner Infrastruktur beeinflussen.

Bewertung vom Verdunstungspotential der RWB-Maßnahmen im Zusammenhang mit den verschiedenen Böden und Pflanzenarten:

VERDUNSTUNGSPOTENTIAL	Böden			Pflanzen								Wasser
	Lehm	Ton	Sand	Graß	Heide	Acker	Laubbaum	Nadelbaum	Schwimmpflanze	Hochstauden in Flussaue	Sumpfpflanzen in Flussaue	Bewässerungspotential
 Flächenversickerung	◐	◑	◒	◑	◒	◒	●	●	○	○	○	○
 Muldenversickerung	◐	◑	◒	◑	◒	◒	●	●	○	○	○	○
 Mulden-Rigolen-Element / -System	●	◑	◒	◑	◒	◒	●	●	○	○	○	○
 Flächenversickerung	○	○	○	○	○	○	○	○	●	◐	◑	●
 Versickerungsgraben	◐	◑	◒	◑	◒	◒	●	●	○	○	○	○
 Gründach	◑	◑	◒	◑	○	○	◐	◐	○	○	○	○
 Regenwassernutzung	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●
 Wasserdurchlässige Verkehrsflächen	○	○	◒	◑	○	○	◐	◐	○	○	○	○
 Entsiegelung	◐	◑	◒	◑	○	○	○	○	○	○	○	○

○	sehr gering
◐	gering
◑	mittel
◒	hoch
●	extrem hoch

Tab. 7: Verdunstungspotential verschiedener Böden und Pflanzenarten, Ahmadi

# Literatur

Baumüller J. (2011), Auf dem Weg zu einer Klimawandel-Anpassungsstrategie, UVP Report 2+3/11, S.154 – 159,

BMUB (2015), Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn, S. 36-46

BMUB (2015), Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft, Grünbuch Stadtgrün, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit,

BMVBS (2013), Gebäude, Begrünung und Energie: Potenziale und Wechselwirkung, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Coutts A. (2015), Green infrastructure for cities: It's all about trees!, IAUC Newsletters Issue No. 57 S.7-12

CRC for Water Sensitive Cities (2014), Impacts of water sensitive urban design solutions on human thermal comfort

CRC for Water Sensitive Cities (2013), Determine the microclimate influence of harvesting solution and Water Sensitive Urban Design at the micro-scale

Damm E. (2013), Erfassung und Optimierungsmöglichkeiten des Kühlungspotenzials von B öden dargestellt an ausgewählten Wohn- und Parkflächen der Stadt Bottrop, RWTH Aachen

DIN 1986-100 (2008), Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke

DVWK-Merkblatt 238/1996, Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen

DWA-A 102 (2015): Niederschlagsbedingte Siedlungsabflüsse- Grundsätze und Anforderungen zum Umgang mit Regenwasser (Entwurf). DWA-Arbeitsblatt 100. Hennef: GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V.

Geiger R. (1961), Das Klima der bodennahen Luftschicht, Die Wissenschaft Band 78, Vierte Auflage, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, S. 272 ff.

Gerstengarbe F.-W., Welzer W. (Hrsg.) (2013), Zwei Grad mehr in Deutschland –Wie der Klimawandel unseren Alltag verändern wird, Fischer Taschenbuch, S. Fischer Verlag Frankfurt a.M.

GISS (2015), NASA Goddard Institute for Space Studies, (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>)

Goldbach A., Kuttler W., Düttemeyer D., Barlag A.-B.(2012), Vergleichende Energiebilanzmessungen über urbanen und suburbanen Flächen mittels Eddy-Kovarianz-Methode, Dynaklim Projekt

Grüngleisnetzwerk (2015), Wirkung und Funktion Grüner Gleise

Hoffmann Th. (2001), Entwässerungskonzept Scharnhäuser Park Ostfildern, Vortrag Landesgartenschau 2001

Helbig A. (1987), Beiträge zur Meteorologie der Stadtatmosphäre, Abhandl. Meteorol. Dienst der DDR Nr. 137

Henrichs, M., Langner, J. und Uhl, M. (2015): Nachweis des Niederschlagswasserhaushaltes in Neubaugebieten. In: IWARU Institut für Wasser.Ressourcen.Umwelt [Hrsg.]: Wasser in der Stadt, Lebensräume - Risiken - Entwicklungen. Münster: Fachhochschule Münster, ISBN 978-3-938137-58-1, S. 145 - 151.

Höschele K., Schmidt H., Klimatische Wirkung einer Dachbegrünung, Garten und Landschaft 4/1974

Hupfer P., Kuttler W. (Hrsg.) (2006), Witterung und Klima – Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie, 12. Auflage, S. 465 ff.

Kikuchi A. et al. (2007): Effects of Roadside Trees on Turbulent Diffusion and Pedestrian Thermal Comfort within Street Canyons, CAST Forum –Analysis and Design of Urban Climate, Sendai,Japan

Kratzer A. (1937), Das Stadtklima, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig

Kuttler W. (1991) in Urbane Gewässer (Hrsg. Schumacher H., Thiesmeier B.), Zum klimatischen Potential urbaner Gewässer, Westarp Wissenschaften

Kuttler W., (2009); Klimatologie, Verlag Schöningh UTB

Kuttler W., (2010); Urbanes Klima, Teil 2, Gefahrenstoffe-Reinhaltung der Luft 70, S. 378-382

Kuttler W. (2011), Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen, Environmental Sciences Europe 23/1/21

Lozán J.L., Graßl H., Hupfer P., Menzel L., Schönwiese Ch.D. (Hrsg.) (2004); Warnsignal Klima – Genug Wasser für alle?, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg

Mayer, H., 1996: Human-biometeorologische Probleme des Stadtklimas. Geowissenschaften 14, 233-239.

Meyers kleines Lexikon – Meteorologie (1987), S.434

MUNLV (2010), Handbuch Stadtklima –Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

- Murakawa S., Sekine T., Narita K., Nishina D. (1988), Study on the effect of river on thermal environment in urban area, Nihon Kenchiku Gakkai 396 S. 25-34
- Ng E., Chen L., Wang Y., Yuan ch. (2012), A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hongkong
- Norton B. et al (2013), Planning for a cooler future: Green infrastructure to reduce urban heat, Victorian centre for climate change adaptation research
- Oke T.R. (1987), Boundary Layer Climates, 2<sup>nd</sup> Edition, Routledge
- Poser N. et al. (2013), Gebäude, Begrünung und Energie: Potenziale und Wechselwirkungen, BMVBS
- Roth-Kleyer, St., 2010: Niederschlagsmanagement mit Dachbegrünungen. Corthum-Fachseminar für den Landschaftsbau, 03. März 2010, Marxzell.
- Sass R.L., It's not cool to be hot in Houston, <http://www.ruf.rice.edu/~sass/UHI.html>
- Schubert S., Grossman-Clarke S. (2013), The influence of green areas and roof albedos on air temperatures during extreme heat events in Berlin, Germany, Meteorologische Zeitschrift Vol 22, No 2, S. 131-143
- Senatsverwaltung Berlin Hrsg. (2010), Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung, Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung, Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung
- UBA-Bericht 4355 (2012), Die Folgen des Klimawandels in Deutschland: Was können wir tun und was kostet es?
- Vietinghoff, Hartwig (2000), Die Verdunstung freier Wasserflächen – Grundlagen, Einflussfaktoren und Methoden der Ermittlung, Allensbach : UFO, Atelier für Gestaltung und Verlag, 2000
- VDI 3786 Bl.13 (2006), Umweltmeteorologie Meteorologische Messungen, Anhang A: Bestimmung der Verdunstung
- Wessolek G. (2001), Bodenüberformung und -versiegelung, Handbuch der Bodenkunde, 11, Wiley-VCH
- Xue F., Li X., Zhang Z. (2014), Numerical study on the environment around the fountain, 7th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, Hannover
- Zacharias S, Koppe Ch., (2015), Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland, Umwelt & Gesundheit 06/2015, UBA

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Begrünte Gleisstrasse in Stuttgart, August 2015, Baumüller, S.3

Abb. 2: Globale Temperaturveränderung seit 1881, GISS, 2015, S.4

Abb. 3: Globale Verteilung der Temperaturveränderung seit 1900, GISS, 2015, S.4

Abb. 4: Entwicklung der sommerlichen Wasserbilanz für Reutlingen, Essen, Münster und Wuppertal bis 2100, <http://www.klimafolgenonline.com/>, S. 5

Abb. 5: Typisches Beispiel der Energie Bilanz von Land und Stadt am Tage in Houston Texas, Angaben in kWh/m<sup>2</sup>Tag, <http://www.ruf.rice.edu/~sass/UHI.html>, S.6

Abb. 6 : Wohlfühltemperatur in Deutschland und Großbritannien, Onlineumfrage yougov.com2015/14, S.8

Abb. 7: Tagesgang der Lufttemperatur und PET im Vergleich einer urbanen und suburbanen Messstation am 20.08.2010, Goldbach et al., 2011, S.9

Abb. 8: Tagesgänge des Dampfdruckes und der relativen Luftfeuchte an einem heißen austauscharmen Strahlungstag (8. Juli 1991) an verschiedenen Standorten in Berlin (oben: Wasserdampfgehalt der Luft; unten: relative Luftfeuchtigkeit, Digitaler Umweltatlas Berlin: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/index.shtml>, S.11

Abb. 9: Deutschlandkarte mit der berechneten tatsächlichen und potentiellen Verdunstung von Gras über sandigem Lehm DWD, 2015, S.12

Abb. 10: Klimatische Wasserbilanz im Sommer in Deutschland (2070-2100) ,RCP 8.5 Szenario, <http://www.klimafolgenonline.com/>, S.14

Abb. 11: Vertrocknete Grünanlage in Stuttgart, August 2015, Baumüller, S.14

Abb. 12: Uchimizu Event in Tokyo-Ginza;  
<http://photozou.jp/photo/show/216071/44715799>, S.15

Abb. 13: Parkfläche als Flächenversickerung, Baumüller, S.16

Abb. 14: Muldenversickerungsbereich in Ostfildern Scharnhäuser Park, Baumüller, S.18

Abb. 15: Mulden-Rigolensystem, Ostfildern Scharnhäuser Park, Baumüller, S.19

Abb. 16: Versickerungsteich, Quelle: Klaus Pellmann Landesstelle.org, S.20

Abb. 17: Offener Graben, Ostfildern Scharnhäuser Park, Baumüller, S.21

Abb. 18: Begrüntes Dach des Amtes für Umweltschutz Stuttgart, Baumüller , S.22

Abb. 19: Abgabe der eingestrahelten Energie im Jahresverlauf durch Verdunstung (V) und durch Erwärmung der Luft (L), Höschele u. Schmidt (1974), verändert, S.23

Abb. 20: Temperaturverläufe von Flachdächern unterschiedlicher Oberfläche an einem strahlungsreichen Sommertag, nach Gertis et.al.1977, S.23

- Abb. 21: Wasserrückhaltung begrünter Dächer, Roth-Kleyer St, 2010., S.24
- Abb. 22: Parkplatz mit Pflasterrasen, Baumüller, S.25
- Abb. 23: Begrünte Parkplätze in Kobe, Japan, Baumüller, S.25
- Abb.24: „Grünparkierung“ in Kobe und Thermalbild dieser Fläche am Tage, Moriyama Laboratory Department of Architecture and Civil Engineering, Kobe University, 2006), S.26
- Abb. 25: Platz mit wassergebundener Decke und hoher Albedo, Baumüller, S.27
- Abb. 26: Anteil der Flächenversiegelung in der Stuttgarter Innenstadt, AfU, Stuttgart), S.28
- Abb. 27: Schlosshof in Stuttgart mit starker Versiegelung, Baumüller, S.28
- Abb. 28: Zisterne mit Wasserstandanzeige, Foto: Hans Spaniol, <http://www.webhans.de>, S.30
- Abb. 29: „Grüne Fuge“ in Stuttgart, Höhenpark Killesberg, Baumüller, S.31
- Abb. 30: Mittlere Monats- und Jahreswerte der Verdunstungshöhe ausgewählter Flächennutzungen und der korrigierten Niederschlagshöhe, DWD, S.33
- Abb. 31/32: Begrünte Gleistrassen in Stuttgart, Baumüller, S.34
- Abb. 33: Elemente des Wasserhaushalts im begrünten Straßenbahngleis  $P$ = Niederschlag;  $ET$ =Verdunstung;  $R$ =Abfluss;  $\Delta W$ =Veränderung des Wasservorrates im Vegetationssystem in mm bzw.  $l/m^2$   $FK$  =Feldkapazität (die maximale Menge des Haftwassers im Begrünungssystem, angegeben als Feuchte in Vol. % oder als  $W$  in mm), <http://www.gruengleisnetzwerk.de/>, S.35
- Abb. 34: Baumallee in Sendai Japan Jozenji Straße, Baumüller, S.36
- Abb. 35: Physiologisch Empfundene Temperatur (PET), heißer Sommertag, Ostseite von zwei vergleichbaren Straßenschluchten in München, 13.Aug. 1985, Mayer,1996, S.37
- Abb. 36: Infrarotthermalbild zweier Straßen in Sendai Japan, Kikuchi ,2006, S.37
- Abb. 37: See in der oberen Schlossgartenanlage in Stuttgart, Baumüller, S.38
- Abb. 38: Mittlere Monats und Jahreswerte der Gewässerverdunstung und der korrigierten Niederschlagshöhe, DWD, S.39

/// samuwa

Ansprechpartner:  
Prof. Antje Stockmann  
[as@ilpoe.uni-stuttgart.de](mailto:as@ilpoe.uni-stuttgart.de)  
Institut für Landschaftplanung und Ökologie  
Fakultät für Architektur und Stadtplanung  
Universität Stuttgart

[www.samuwa.de](http://www.samuwa.de)

# Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Albedo und Emissionsvermögen von typischen Materialien, nach Helbig 1987, S.7

Tab. 2: Albedo und Emissionsvermögen von natürlichen Oberflächen, nach Helbig 1987,S.8

Tab. 3: Bewertungsindizes zu den Stufen des thermischen Empfindens und physiologischen Belastungsstufen , S.9

Tab. 4: Wasserhaushaltskomponenten versiegelter Flächen in Berlin (Messperiode: April 1985 bis März 1986, nach Wessolek 2001, S.13

Tab. 5: Abflussbeiwerte unterschiedlicher Flächen nach DIN 1986-100 (2008), S.29

Tab. 6a: Faktoren die das Kühlungspotenzial grüner Infrastruktur beeinflussen, Baumüller, S.41

Tab. 6b: Faktoren die das Kühlungspotenzial grüner Infrastruktur beeinflussen, Baumüller, S.42

Tab. 7: Verdunstungspotential verschiedener Böden und Pflanzenarten, Ahmadi, S.43