

Diplomarbeit

# Laboruntersuchungen zum sommerlichen Temperaturverhalten von bitumengebundenen Deckschichten als Maßnahme zur Reduzierung von städtischen Hitzeinseln

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads  
Diplom-Ingenieurin  
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

---

Diploma Thesis

## Laboratory studies on the summer temperature behaviour of bituminous-bound surface layers as a measure to mitigate urban heat islands

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieurin  
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

**Sophie Stüwe, BSc.**

Matr. Nr.: 01525128

Betreuung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Bernhard Hofko**  
Institut für Verkehrswissenschaften  
Forschungsbereich Straßenwesen  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/E230-03, 1040 Wien, Österreich

Wien, im September 2023

---

---

## Kurzfassung

Durch das ständige Wachstum von Städten bei gleichzeitig erhöhten globalen Temperaturen werden urbane Hitzeinseln ein immer größeres Problem. Versiegelte Flächen führen dazu, dass Wärme absorbiert wird und Niederschlagswasser schnell abrinnt. Nicht immer sind Begrünungen und Beschattungen oder der Verzicht auf Versiegelung im dicht verbauten Gebiet möglich. Einen Großteil der versiegelten Flächen im städtischen Ballungsgebiet machen Straßenbeläge aus. Aus diesem Grund ist es von Interesse, herkömmliche Asphalte durch sogenannte „Cool Pavements“ zu ersetzen, um weiterhin das Mobilitätsbedürfnis der Anwohner:innen in Städten zu befriedigen. „Cool Pavements“ sind Straßenbeläge, deren Wärmeübertragung unter solarer Einstrahlung reduziert wirkt.

Nach einer ausgiebigen Literaturrecherche wurden ausgewählte Ansätze für „Cool Pavements“ aufgegriffen und anschließend Prüfplatten hergestellt. Im Zuge dessen wurden Variationen aus offenporigen Asphalten, halbstarren Deckschichten mit/ohne Zugabe von Zeolithen und Asphaltbeläge mit transparentem Bindemittel, sowie ein herkömmlich eingebauter Gussasphalt hergestellt. Die Straßenbeläge wurden zur Verbesserung des Wärmerückstrahlvermögens, der Wasserrückhaltekapazität und des Abkühlverhaltens modifiziert. Die Forschung in dieser Diplomarbeit beschränkt sich auf Deckschichten, welche Einsatz im Geh- und Radwegebau finden sollen.

Durch einen konzipierten Prüfstand konnten das Temperaturverhalten und das Rückstrahlvermögen der oben angeführten Deckschichten bei annähernd gleichbleibenden Laborbedingungen getestet werden. Durch mehrstündige Bestrahlungszyklen wurden Tages- und Nachtphasen sommerlicher Hitzeperioden simuliert und somit lokale Maximal- und Minimaltemperaturen und Abkühlraten ermittelt.

Die alternativen Mischgutkonzeptionen schnitten im Vergleich zu dem Gussasphalt durch unterschiedliche Temperatureigenschaften gut ab. Die getesteten offenporigen Asphalte hatten hohe Maximaltemperaturen, dafür aber ein rasches Abkühlverhalten. Durch den Austausch von Bitumen mit transparentem Bindemittel konnten Prüfkörper mit ausgeprägtem Rückstrahlvermögen und niedrigen Temperaturen bei geringem Aufwand erzeugt werden. Bei den in der Herstellung aufwendigeren halbstarren Deckschichten konnte ein erhöhtes Wasserspeichervermögen und Rückstrahlvermögen, sowie niedrige Temperaturen gemessen werden.

Die Ergebnisse der Versuchsdurchführungen dieser Arbeit bestätigen die These, dass derzeit in Österreich häufig eingebaute Gussasphalte kein vorteilhaftes Temperaturverhalten für sommerliche Hitzeperioden haben. Welche „Cool Pavements“ die geeignetsten Eigenschaften haben, um urbane Hitzeinseln zu entlasten, sollte je nach klimatischer Region, finanziellen Mitteln und Anwendungsgebiet entschieden werden.

---

---

## Abstract

Due to the steady growth of urban areas and the simultaneous rise in global temperatures, urban heat islands are becoming increasingly problematic. Sealed surfaces cause heat to be absorbed and rainwater to run off quickly. In urban agglomerations, pavement makes up a large part of the sealed surfaces. Revegetation, shading or the dispense of sealed surfaces are not always an option in densely built-up areas. For this reason, it is of great interest to replace conventional asphalt with road surfaces which show a decrease in the heating development under solar radiation, so called “Cool Pavements”.

After an extensive literature research, different approaches for reducing the summer overheating of urban spaces by road surfaces were selected and slabs were produced in the laboratory. Variants of pervious asphalt, semi-rigid surface courses and asphalt pavements with transparent binder as well as conventionally paved mastic asphalt were produced. The pavements were modified to improve heat reflectivity, water retention and cooling behaviour of the materials. The research in this diploma thesis is limited to surface courses used in the construction of walk- and bikeways.

A test stand was designed and constructed to record the temperature and reflectivity behaviours of the above-mentioned test specimens under roughly constant laboratory conditions. Day and night phases of summer heat periods were simulated by irradiation cycles of several hours. Thus local maximum and minimum temperatures and cooling rates were determined.

The implemented “Cool Pavement” designs exhibit different advantages compared to the reference specimens in their cooling properties. The tested porous asphalts have high maximum temperatures but rapid cooling behaviour. By replacing bitumen with transparent binder, it was possible to produce test specimens with pronounced reflectivity and low temperatures. With the semi-flexible surface courses, which are more complex to produce, it was possible to measure an increased water retention and reflectivity, as well as low temperatures.

The results of the tests carried out in this work confirm the thesis that mastic asphalt pavements currently installed in Austria can be improved regarding their temperature behaviour during hot summer periods. The type of “Cool Pavement” used should be selected depending on the climatic region, financial resources and application area.

---

## Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
AC	Asphalt Concrete, Asphaltbeton
cm	Zentimeter
h	Stunde
HSD	Halbstarre Deckschicht
$I_{inc}$	einfallende Sonneneinstrahlung
$I_{ref}$	reflektierende Sonneneinstrahlung
K	Kelvin
kg	Kilogramm
m	Meter
MA	Mastic Asphalt, Gussasphalt
ml	Milliliter
mm	Millimeter
NIR	nahes Infrarot
nm	Nanometer
PA	Permeable Asphalt, Drainasphalt, poröser Asphalt, offenporiger Asphalt
PCM	Phase Change Materials
UHI-Effekt	Urbaner Hitze Insel Effekt
URHC	Ultra Rapid Hardening Cement
UV	Ultraviolett
VIS	sichtbares Licht
W	Watt
WRS	Water-Retentive Slurry, wasserrückhaltende Schlämme
$\alpha$	Albedo, Albedo-Wert

---

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung .....	1
1 Motivation.....	2
2 Klimafitte Asphalte - „Cool Pavements“ .....	5
2.1 Modifikation der thermischen Eigenschaften .....	5
2.1.1 Wärmeleitfähigkeit .....	6
2.1.2 Wärmekapazität .....	6
2.1.3 Oberflächenwärmereflexion .....	7
2.1.4 Wärmeemissionsgrad .....	10
2.2 Verbesserung der Verdunstung .....	10
2.2.1 Durchlässige offenporige Beläge.....	11
2.2.2 Wasserrückhaltende Beläge .....	13
2.3 Verbesserung der Konvektion .....	14
2.4 Reduzierung der Wärmeenergie .....	15
2.5 Literaturlauswertung zu „Cool Pavements“ .....	15
3 Methodik.....	17
3.1 Mischgutkonzeptionen .....	17
3.1.1 Offenporiger Asphalt (PA 4 und PA 8).....	17
3.1.2 Halbstarre Deckschichten (HSD 8 und HSD 8 Zeolith) .....	19
3.1.3 Asphaltbeton mit synthetischem, transparentem Bindemittel (AC 11 transparent / AC 8 gelb).....	22
3.1.4 Vergleichsasphalt (MA 8).....	24
3.2 Messmethodik und Prüfstand.....	24
3.3 Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Temperatursensoren .....	29
3.4 Umrechnungsfaktor der gemessenen Albedo-Werte.....	32
3.5 Wasserspeicherkapazität .....	33
3.6 Vergleichsparameter.....	34
4 Forschungsergebnisse .....	37
4.1 Albedo und Wasserspeicherkapazität .....	37
4.2 Temperaturentnahmen.....	38
4.2.1 Maximaltemperaturen an den Unterseiten der Platten .....	39
4.2.2 Maximaltemperaturen an den Oberflächen der Platten.....	42
4.2.3 Minimaltemperaturen an den Unterseiten der Platten .....	46
4.2.4 Abkühlraten und Abkühlzeiten an der Unterseite der Platten.....	48
5 Zusammenfassung .....	51

---

---

6	Verzeichnisse .....	55
6.1	Literaturverzeichnis .....	55
6.2	Abbildungsverzeichnis.....	58
6.3	Tabellenverzeichnis.....	60
7	Anhang.....	61

---

## Einleitung

Diese Diplomarbeit gliedert sich in folgende Kapitel: Kapitel 1 zeigt das in den letzten Jahren immer bedeutsamere Problem von Hitzewellen in Städten und damit einhergehenden urbane Hitzeinseln auf. Außerdem wird die Motivation zur Entwicklung von Lösungen zur Entlastung dieser vermittelt. In Kapitel 2 wird auf bereits entwickelte „Cool Pavement“-Technologien in internationaler Literatur verwiesen und die Konzepte auf aktuellem Stand zusammengefasst und gegliedert. Die Methodik, der im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Laborprüfungen und hergestellten Mischgüter wird in Kapitel 3 erläutert. In diesem Kapitel wird der konzipierte Prüfstand erklärt, auf Grenzen der Messung aufmerksam gemacht, sowie Vergleichsparameter für die in Kapitel 4 angeführten Forschungsergebnisse eingeführt. Im letzten Kapitel werden die Forschungsergebnisse zusammengefasst und interpretiert. Im Zuge dessen werden die folgenden Forschungsfragen beantwortet:

- 1.) Wie verhält sich der in Österreich herkömmlich verwendete Gussasphalt bei sommerlicher Erhitzung?
- 2.) Inwieweit beeinflussen Rückstrahlvermögen und Wasserspeicherkapazität das Temperaturverhalten der Beläge?
- 3.) Können im Labor im Zuge dieser Arbeit entwickelte „Cool Pavement“-Technologien, die Anwendung im Einsatzgebiet des Geh- und Radwegebaus in Wien finden?

# 1 Motivation

Hitzetage und heiße Nächte (Tropennächte), in denen die Temperaturen nicht unter 25°C fallen, werden immer mehr zu einem Umweltproblem [1], [2]. Die Dauer von Hitzewellen, die aufgrund der globalen Erderwärmung auftreten, ist in den letzten Jahren enorm gestiegen [2]. „Hitzewellen, die 1970-2000 noch durchschnittlich fünf Tage andauerten, werden gegen Ende des 21. Jahrhunderts etwa 15-28 Tage umfassen.“, zitiert aus der von der Stadt Wien entwickelten Smart City Wien Rahmenstrategie 2019-2050 [2]. Wobei eine Hitzewelle hier als mindestens dreitägige Periode verstanden wird, bei der die Nachttemperatur 18°C und die Tageshöchsttemperatur 30°C überschreitet [2]. Wie in Abbildung 1-1 ersichtlich sind die linearen Regressionslinien der Frost-, Eis-, Sommer- und Hitzetage hinsichtlich der Entwicklung hin zu weniger Frost- und Eis- und zu mehr Sommer- und Hitzetagen gleichermaßen beunruhigend. Im Jahr 2015 gab es in Wien 42 Hitzetage, was einen Rekordwert darstellt und im Kontext dieser Arbeit besonders erwähnenswert ist [3], [4]. Die globalen Extremwerte (Minima- und Maxima Werte) der klimatologischen Kenntage können in Abbildung 1-1 als Datenlegende ausgelesen werden. Auffallend ist, dass alle globalen Extremwerte der letzten 68 Jahre nach 2014 gemessen wurden.

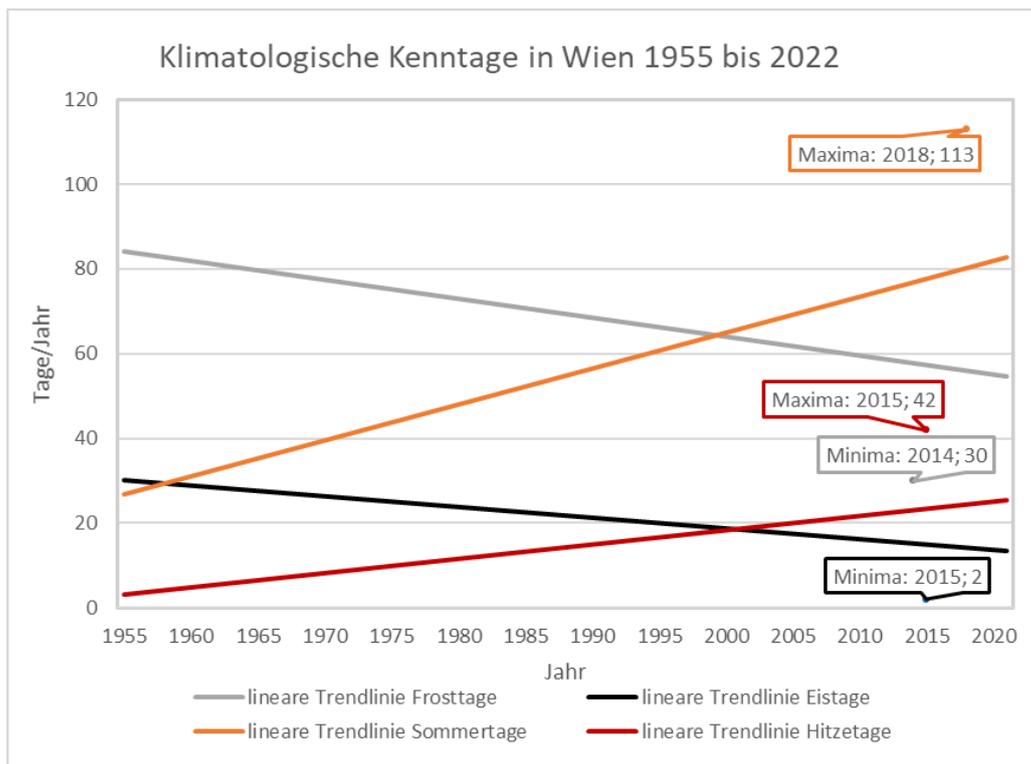


Abbildung 1-1 Klimatologische Kenntage in Wien von 1955 bis 2022 [4]; Auswertung: Stüwe

Durch die Urbanisierung konzentriert sich die Bevölkerung in Städten. Zuzufolge Prognosen wird erwartet, dass ab 2050 66 Prozent der Weltbevölkerung in städtischen Ballungsgebieten leben werden, in Industrieländern sogar bis zu 82 Prozent [5]. Das enorme Wachstum von Städten und das einhergehende Verdrängen von Grünflächen und Wasserkörpern durch Bauwerke

## Motivation

und Verkehrswege führt zum „Urbanen Hitze Insel Effekt“, abgekürzt in dieser Arbeit mit „UHI-Effekt“, durch den andere klimatische Randbedingungen als in der ländlichen Umgebung herrschen [2], [5]. Die Energiebilanz setzt sich vor allem durch kurzwellige Sonneneinstrahlung und langwellige Wärmeabstrahlung zusammen und wird im urbanen Umfeld anthropogen stark beeinflusst [6]. Der Lufttemperaturunterschied in einer unbewölkten und windstillen Sommernacht zwischen ruraler und urbaner Umgebung, kann in naher Distanz zueinander bis zu 12°C betragen [2], [7]. Innerhalb von Städten, können demnach – abhängig nach Begebenheiten (u.a. Begrünung, Wasserkörper und Versiegelungsgrad) – unterschiedliche Temperaturen auftreten (siehe Abbildung 1-2) [3].

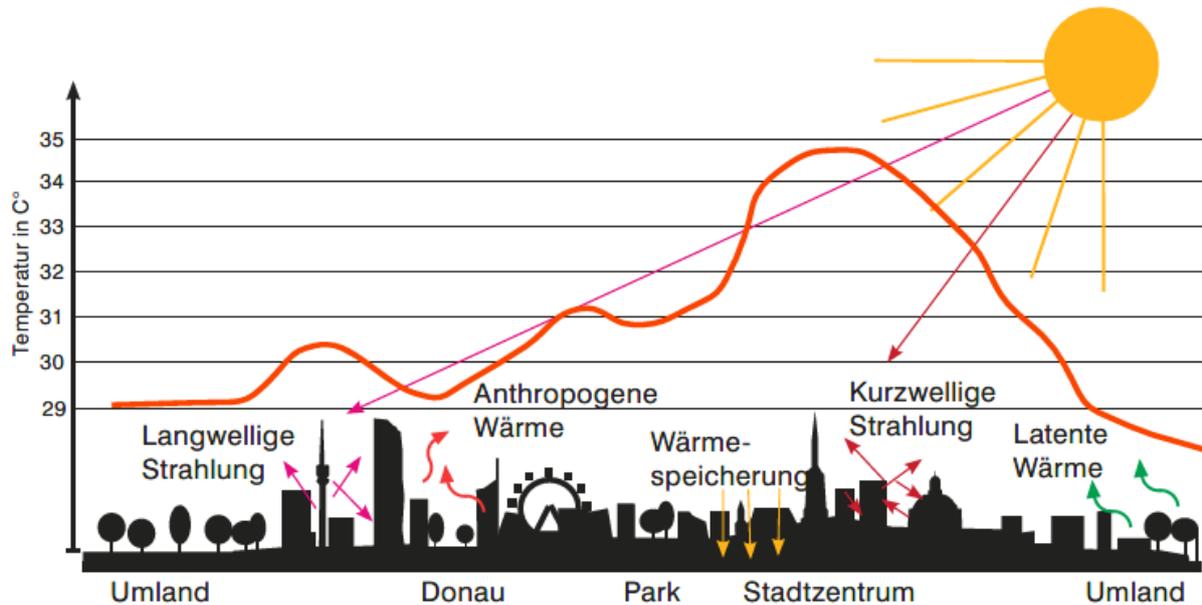


Abbildung 1-2 Schematische Darstellung des UHI-Effektes [3]

Hauptursache des UHI-Effektes ist das Ausbleiben von feuchtigkeitsspeichernden Böden und ausreichender Vegetation. Infolgedessen steigt die wärmeabsorbierende Versiegelung von städtischen Flächen an [2]. Die Oberflächentemperaturen von versiegelten Oberflächen können 15 bis 20°C höher sein als die von einer Grasoberfläche bei gleichen Umgebungsrandbedingungen [8]. Durch den hohen Versiegelungsgrad von wasserundurchlässigen Materialien rinnt das Niederschlagswasser rasch ab und steht somit nicht mehr für kühlende Verdunstung zur Verfügung. Die Abwärme von industriellen Prozessen, Klimaanlage und Kraftfahrzeugen und die Verringerung der Windgeschwindigkeit durch Erhöhung der Oberflächenrauigkeit durch dichte Bebauung sind weitere Aspekte, die den UHI-Effekt verstärken [3].

Nachts ist der Wärmeunterschied zwischen dem städtischen Gebiet und dessen Umland vor allem durch zwei Faktoren erklärbar: durch die Wärmespeicherfähigkeit der über den Tag absorbierten Sonneneinstrahlung der Oberflächen und die Wärmeleitfähigkeit der Materialien [9]. Durch die Wärmespeicherung treten die Tagesmaximaltemperaturen später auf als im ländlichen Umland [6].

## Motivation

---

Die negativen Folgen des UHI-Effektes können in Stadtteilen mit hoher Einwohnerdichte und niedriger Umweltqualität beobachtet werden [10]. In kalten Regionen, welche in höheren Breitengraden und/oder Höhenlagen liegen, werden die wärmenden Effekte der urbanen, dichten Bebauung in kalten Jahreszeiten als vorteilhaft wahrgenommen [7]. Die Auswirkungen des UHI-Effektes werden in Städten wie Wien, welche sich im Sommer enorm erhitzen, als großes Problem angesehen [3], [7].

Eines der Leitziele der Stadt Wien, zufolge der „Smart City Wien Rahmenstrategie 2019-2050“, ist die Eindämmung städtischer Hitzeinseln [2]. Der UHI-Effekt verursacht neben der Überhitzung des innerstädtischen Lebensraumes weitere Probleme, wie häufiger auftretende Extremwetterereignisse, Luftverschmutzung und einem damit einhergehendem steigenden Energieverbrauch durch die notwendige Kühlung von Innenräumen [5], [7], [10]. Der ökologische Fußabdruck von Städten wächst mitunter wegen des UHI-Effektes enorm, beispielsweise zeigen Studien, dass sich der benötigte Energieverbrauch zur Kühlung von Gebäuden in den kommenden Jahren verdoppeln könnte [10].

Auch negative gesundheitliche Folgen dürfen nicht übersehen werden. Diese sind bei Kindern, chronisch Kranken und älteren Personen besonders ausgeprägt [2]. Durch hohe Hitze werden nicht nur die Sterberate und Zahl der Erkrankten, sondern auch die Schlafqualität, Leistungsfähigkeit und das generelle Wohlbefinden beeinflusst [3].

## 2 Klimafitte Asphalte - „Cool Pavements“

Im „Urban Heat Islands – Strategieplan Wien“ werden unterschiedliche Möglichkeiten ausgearbeitet, die städtischen Hitzeinseln abzukühlen [2], [3].

Straßenbeläge bedecken einen hohen Anteil, zwischen 30-45%, der urbanen Flächen und absorbieren Hitze im Laufe des Tages. Sie haben somit einen wesentlichen, wenn nicht den größten, Einfluss auf den UHI-Effekt [1], [5], [10]. Oberflächen der herkömmlichen Straßenbeläge können an heißen Sommertagen Temperaturen von mehr als 60°C erreichen [11], [12]. Es gibt einige laufende und bereits veröffentlichte Studien zu kühlenden Straßenbelägen, sogenannten „Cool Pavements“ [5].

Asphaltbeläge, die durch neue Technologien oder neue Materialien niedrigere Oberflächentemperaturen als herkömmlicher Asphalt vorweisen und infolgedessen die Wärmeübertragung reduzieren können, werden in der internationalen Literatur als „Cool Pavements“ definiert [5], [7]. In dieser Arbeit wird die deutsche Bezeichnung „klimafitter Asphalt“ als Synonym verwendet.

Die Wärmebilanz von Asphalten wird bestimmt durch die Menge an absorbierter Sonnenstrahlung, der emittierten Infrarotstrahlung, der übertragenen Hitze durch Konvektion an die atmosphärische Luft, die in der Masse des Materials gespeicherte Wärme und die an den Untergrund abgegebene Wärme. Wenn latente Wärmephänomene vorhanden sind, beeinflussen Verdunstung und Kondensation den Wärmehaushalt der Fahrbahnoberfläche. Abkühlung durch Regen und die durch den Straßenverkehr vom Menschen verursachte Wärme beeinflussen ebenfalls den Wärmehaushalt der Materialien [10]. All diese Einflüsse können bei der Entwicklung von „Cool Pavements“ untersucht und angewandt werden.

Ansätze zur Entwicklung von „Cool Pavements“ können in 4 Gruppen unterteilt werden [7]:

1. Modifikation der thermischen Eigenschaften von Belagsmaterialien
2. Verbesserung der Verdunstung
3. Verbesserung der Konvektion
4. Reduzierung der Wärmeenergie

Bei den in der Literatur gefunden Studien zur Eindämmung des UHI-Effektes mittels „Cool Pavements“ überwiegen Versuchsaufbauten, welche in die ersten beiden Gruppen eingeordnet werden können [10]. In den folgenden Unterkapiteln wird auf die Ansätze näher eingegangen.

### 2.1 Modifikation der thermischen Eigenschaften

Das thermische Verhalten von Belägen hängt von den thermischen Eigenschaften der Belagsmaterialien ab. Eine Verbesserung der thermischen Eigenschaften kann durch

Modifikation der Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit, die Erhöhung der Oberflächenwärmereflexion (Albedo), sowie durch Veränderung der Dichte und der Wärmeausstrahlung erreicht werden. Die Einheit der Wärmeleitfähigkeit wird in Watt pro Meter und Kelvin angegeben (W/mK) [5], [7].

### 2.1.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Materials Wärme zu leiten oder zu übertragen. Straßenbeläge mit niedriger Wärmeleitfähigkeit erwärmen sich zwar an der Oberfläche schneller, jedoch leiten diese die Wärme nicht so schnell an die unteren Schichten weiter [7].

Studien zeigen, dass die Verwendung von wärmeleitfähigem Gestein effektiv die entstandene Wärme aus den oberen Schichten nach unten ableiten kann und somit die Tagesoberflächentemperaturen reduziert werden. Da die Wärme stets von dem Medium mit höherer Temperatur zu dem mit niedrigerer Temperatur fließt, ist die Richtung des Wärmegradienten der angesammelten Wärme nachts entgegengesetzt. Sie wird vom Untergrund zu den Belägen und schließlich in die Umgebungsluft abgegeben und hat somit ebenso eine negative Auswirkung auf den UHI-Effekt [5], [10]. Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit weisen deutlich geringere Durchschnittsmaximaltemperaturen, aber auch höhere Durchschnittsminimaltemperaturen auf [10].

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ist die Teilauswechslung von Kalkstein mit dem viel wärmeleitfähigeren Quarzit, wie in Studie [5] verdeutlicht wird. Um der geringen Haftung zwischen Quarzit und Asphalt entgegenzuwirken, wurden dem bituminösen Bindemittel affinitätsverbessernde Zusätze hinzugefügt. Hierbei wurde lediglich der Zeitpunkt der Wärmeemission nach hinten verschoben [5].

In einer weiteren Studie wurden 2 Massenprozent Graphitpulver, welches eine hohe Wärmeleitfähigkeit von 110 W/mK besitzt und ein Massenanteil von 3 Promille Kohlefasern, mit einer Wärmeleitfähigkeit von 20 W/mK, dem Asphalt zugemischt. Hier konnte die Wärmeleitfähigkeit des Asphaltens um etwa 170% gesteigert werden [13].

### 2.1.2 Wärmekapazität

Die Wärmekapazität ist die Menge an Energie, die erforderlich ist, um die Temperatur einer Gewichtseinheit eines Stoffes um ein Grad Celsius zu erhöhen, ohne dass es zu einer Phasenänderung kommt und wird in Joule pro Kelvin (J/K) angegeben. Sie bestimmt, wie viel Energie bei einer bestimmten Temperatur im Asphalt absorbiert und gespeichert wird [7].

In den letzten Jahren wurden einige wissenschaftliche Artikel zum Einsatz von Latent-Wärmespeichern, oder auch Phasenwechselmaterialien, im englischen „phase change materials (PCM)“, zur Steigerung der thermischen Energiespeicherung veröffentlicht. Diese Materialien haben gute Wärmespeichereigenschaften durch ihre, während der Veränderung

ihrer Phase, hohen thermischen Energieabsorbierungs- oder -abgabe-Fähigkeiten bei gleichzeitig konstanter Temperatur. In Studie [11] konnte, in einer Tiefe von 4 cm, eine Verringerung der Temperatur von 5°C im Vergleich zu dem PCM-freien Asphalt festgestellt werden [11].

### 2.1.3 Oberflächenwärmereflexion

Das Rückstrahlvermögen spielt eine große Rolle in der Minimierung der Oberflächentemperaturen der Beläge. Durch eine Verhinderung der Absorption von Solarenergie wird Hitze abgewehrt, bevor sie in den Asphalt eindringen kann [7], [14]. Es wird davon ausgegangen, dass dunkle Oberflächen von Dächern und Straßenbelägen eine große Auswirkung auf den UHI-Effekt haben [15]. Aus diesem Grund konzentrieren sich viele bestehende Studien zu „Cool Pavements“ auf die Verbesserung der Sonnenreflexion [7].

Das Maß des Rückstrahlvermögens von Materialien ist definiert durch das Verhältnis von reflektierter ( $I_{ref}$ ) zu einfallender ( $I_{inc}$ ) Sonneneinstrahlung siehe Formel (1) und ist betitelt als Albedo ( $\alpha$ ), oder Albedo-Wert. Ein Wert von 1 entspricht totaler Reflexion, in diesem Fall wird die gesamte einfallende Strahlung reflektiert und das Material erwärmt sich nicht [16], [17]. Der Reflexionswert kann durch die Farbe und Rauheit des Materials gesteuert werden. Beispielsweise konnte festgestellt werden, dass bei gleicher Wärmeeinwirkung und Farbe, Fliesen mit glatter Oberfläche kühler waren als jene mit rauer Oberfläche [10].

$$\alpha = \frac{I_{ref}}{I_{inc}} \quad (1)$$

Die Strahlung kann nach der Dimension der Wellenlänge unterteilt werden in Ultraviolettstrahlung (UV) (100-380nm Wellenlänge), sichtbares Licht (VIS) (380-740nm) und Nahem Infrarot (NIR) (740 -2100nm Wellenlänge), wobei vor allem in den Reichweiten von VIS und NIR die Verstärkung der Reflexion eine große Auswirkung auf die Gesamtreflexion der Asphaltoberfläche hat [14], [15]. Die Albedo im VIS-Bereich kann durch hell gefärbte oder weiße Beläge positiv beeinflusst werden. Um die Spektral-Reflexion im Nahem Infrarot zu erhöhen können farbige Materialien verwendet werden [10].

Außerdem kann in spiegelnde und diffuse Reflexion unterteilt werden. Bei der spiegelnden Reflexion wird einfallendes Licht nur in eine bestimmte Richtung reflektiert, vergleichbar mit einem Spiegel. Bei der diffusen Reflexion jedoch streut das reflektierte Licht isotrop, also richtungsunabhängig. In der Realität kommt es zu einer Kombination dieser Verhaltensweisen, wobei typischerweise bei Asphalt bei annähernd rechten Winkeln der Einstrahlung diffuse Reflexion und bei flacheren Einfallswinkeln die spiegelnde Reflexion überwiegt [14].

Neue Asphaltbeläge haben einen kleinen Albedo-Wert in der Größenordnung von 0,05, der durch Verschmutzung, Abtragung des bituminösen Bindemittels durch Straßenverkehr Abnutzungen und Alterung mit der Zeit auf bis zu 0,15 ansteigen kann. Im Vergleich dazu können beispielsweise Pflastersteine Albedo-Werte von bis zu 0,77 erreichen. Auch im

Vergleich zu Betonoberflächen absorbieren Asphaltbeläge in der Regel mehr Strahlung, weisen tagsüber höhere Temperaturen und höhere Differenzen der täglichen Extremtemperaturen auf [14], [17].

Es ist zu beachten, dass der kühlende Effekt der im Sommer genossen wird, ebenso im Winter besteht. Ein erhöhter Gebäudeheizbedarf darf nicht ausgeschlossen werden. Die Vorteile im Sommer überwiegen jedoch die Nachteile im Winter. Außerdem wird bereits mit thermochromen Beschichtungen experimentiert, welche ihre Farbe abhängig von der Temperatur verändern. Sie werden bei Kälte dunkler und bei Wärme heller [14].

Weiters wurde festgestellt, dass das Risiko besteht, das hohe Albedo-Werte eine negative Auswirkung auf das thermische Wohlbefinden von Fußgänger:innen haben können (siehe Abbildung 2-1). Für einen optimalen Gehsteigbelag dürfen gesundheitliche Aspekte in keinem Fall vernachlässigt werden. Die thermische Belastung bei Hitze der FußgängerInnen setzt sich zusammen aus der internen metabolischen Wärmeproduktion und der Abkühlung durch Schweißverdunstung. Letzteres wird vor allem durch die Luftfeuchtigkeit begrenzt und kann durch die Windgeschwindigkeit beeinflusst werden. Obwohl die Sonneneinstrahlung zur Mittagszeit am höchsten ist, erreicht die thermische Belastung ein Maximum am Nachmittag. In den Nachmittagsstunden überwiegt meist diffuse Reflexion und die Sonne trifft auf vertikale Oberfläche stehender Körper. Vertikale Oberflächen, wie beispielsweise Fußgänger:innen und Hausaußenmauern absorbieren somit weiterhin Wärme, und die absorbierte Hitze der vorherigen Stunden kann weiterhin nicht abklingen [7], [18].

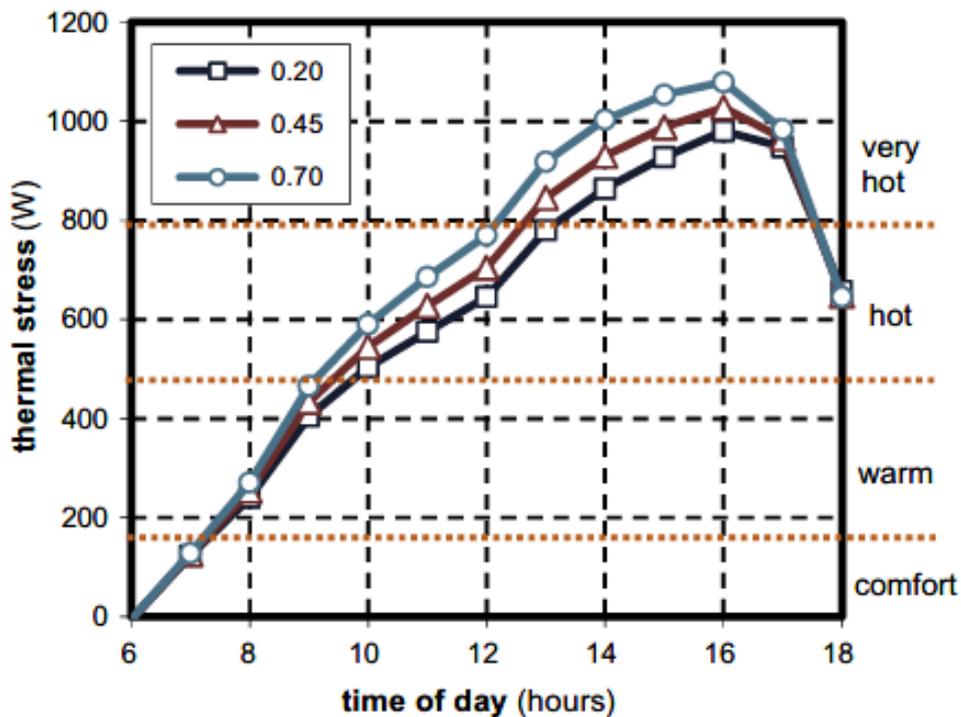


Abbildung 2-1 Effekt der Albedo auf die thermische Belastung von Fußgänger:innen im offenen Gelände [18]

Es sollte auch beachtet werden, dass hohe Albedo-Werte eine Gefahr im Straßenverkehr darstellen können, da durch reflektierende Beläge unter Umständen eine ausreichende Fahrsicherheit nicht gegeben ist. Um dieses Phänomen zu umgehen, wurde in einer japanischen Studie ein Asphalt mit einer speziellen dünnen Beschichtung überzogen. Zusätzlich dazu wurden in den Asphalt feine keramische Hohlpartikel gemischt, um eine verringerte Wärmeleitung zu erzielen. Die nachträglich aufgebraachte Beschichtung weist ein hohes Reflektionsvermögen im nahem Infrarotbereich auf, bei gleichzeitig geringer Reflexion im VIS Bereich. Die Studie konnte bei Temperaturmessungen ein halbes Jahr nach dem Einbau eine Oberflächentemperaturreduzierung von etwa 10°C gegenüber herkömmlichen Asphalten erreichen [15].

Zur Steigerung des Albedo-Wertes von Asphalt stehen mehrere Möglichkeiten und Kombinationen dieser zur Verfügung (siehe Abbildung 2-2): Die Verwendung von Betonbelägen, die Verwendung von Betonzuschlägen, die Applikation von „Whitetopping“, oder „Ultra Thin Whitetopping“ Techniken (eine dünne zusätzliche Oberflächenschicht aus Beton), die Verwendung von heller Gesteinskörnung, Chip- und oder Sand-Versiegelungen (Behandlung der Oberfläche mit feiner Gesteinskörnung und hoher Albedo), die Applikation von Farbpigmenten, die Verwendung von farblosen oder reflektierenden Bindemitteln, die Einfärbung der Oberflächen, die Anwendung von Sandstrahlung und das Abschleifen von Bindemitteloberflächen [7], [10], [14].



Abbildung 2-2 Möglichkeiten zur Steigerung des Albedo-Wertes

### 2.1.4 Wärmeemissionsgrad

Der thermische Emissionsgrad eines Materials bestimmt, wie viel Wärme von einer Oberfläche pro Flächeneinheit bei einer gewissen Temperatur abgegeben wird [7], [19]. Dieser Wert kann Zahlen zwischen 0 und 1 annehmen, wobei die abgestrahlte elektromagnetische Energie in Relation zu einem schwarzen Körper gesetzt wird, welcher einen thermischen Emissionsgrad von 1 hat [19]. Ein hoher Emissionsgrad bedeutet dementsprechend, dass das Material langwellige Strahlung gut emittiert und die absorbierte Wärme schnell wieder abgeben kann [10]. Die in dieser Arbeit betrachtete Literatur legt nahe, dass Albedo und Emissionsgrad den größten Einfluss auf das thermische Verhalten der Oberflächen von Straßenbelägen haben, wobei die Albedo vor allem Einfluss auf die Maximaltemperaturen und der Emissionsgrad vor allem Einfluss auf die Minimaltemperaturen, beziehungsweise Nachttemperaturen, hat [7], [10].

Studien haben gezeigt, dass bei einer Steigerung des Emissionsgrades verschiedener Straßenbeläge von 0,7 auf 1,0 die Maximal- und Minimaloberflächentemperaturen 5,0°C beziehungsweise 8,5°C sinken. Außerdem wurde erforscht, dass der Emissionsgrad einen großen positiven Einfluss auf hochabsorbierende, sonnenbestrahlte Materialien haben kann. Zugleich zeigt eine Erhöhung des Emissionsgrades bei Materialien mit hoher Albedo weniger Vorteile [10].

Es wurde festgestellt, dass bei Erhöhung der Luftporen in der Asphaltmatrix, also speziell bei sogenannten offenporigen Belägen, ein verringerter Emissionsgrad festgestellt werden kann [19]. Außerdem kann die emittierte Wärme von anderen Oberflächen blockiert und absorbiert werden, wie beispielsweise von auf der Straße stehenden Autos. Dieser Effekt würde einer Reduzierung der Hitzeinseln im städtischen Umfeld im Wege stehen [7].

## 2.2 Verbesserung der Verdunstung

Verdunstung von Wasser erfordert Wärmeenergie, um einen Phasenwechsel von flüssig zu gasförmig zu erreichen. Durch diesen Prozess wird Wärmeenergie absorbiert und die Umgebung abgekühlt [7]. Der Grad der Verdunstung ist eine Funktion des Feuchtegehalts des Materials und der Atmosphäre und hängt stark von der Temperatur des Materials ab [10]. Die Verdunstungsfähigkeit eines Bodens kann somit durch einen hohen Hohlraumgehalt, in welchem Wasser gespeichert werden kann, das wiederum bei Hitze verdunstet, verstärkt werden. Um diesen Effekt zu erzielen muss Wasser bereits im Asphalt vorhanden sein. Desto mehr Wasser im Material zur Verfügung steht, desto länger kann ein Kühlungseffekt beobachtet werden [10], [14]. Zwei Arten von Belägen können diesen Effekt nutzen: durchlässige, offenporige Beläge und wasserrückhaltende Beläge [7].

### 2.2.1 Durchlässige offenporige Beläge

Porosität ist ein Maß für den Anteil an Hohlräumen, also dem Hohlraumgehalt, eines bestimmten Materials. Poröse Beläge, auch offenporige Beläge, oder unter Einschränkung auf Asphalt – Offenporige Asphalte („Permeable Asphalt“, PA) genannt -, werden in der Regel durch eine Erhöhung des Anteils der großen Zuschlagsstoffe, bei Minimierung der feinen Zuschlagskörnung optimiert. Der Hohlraumgehalt von PA liegt zwischen 15-25%. Die mechanische Festigkeit dieser durchlässigen, offenporigen Asphalte ist geringer als jene von entsprechenden undurchlässigen Belägen. Eine Erhöhung des Bindemittels, bei nur geringfügig verringertem Hohlraumgehalt, kann dies ein wenig kompensieren. Außerdem können als Angleichung der Eigenschaften dickere Schichten des PA eingebaut werden [14]. Generell ist die Lebensdauer von offenporigen Asphaltbelägen geringer als bei herkömmlichen Asphaltbelägen [20].

Poröse Beläge bieten aufgrund der Hohlräume einen Vorteil im Regenwassermanagement. Das Ziel ist es, dass Wasser langsam durch die Tragschichten in ein Steinbett und anschließend in den Boden unter dem Asphalt versickert und bei Starkregenereignissen die Rückhaltebecken und das Kanalisationssystem entlastet werden [7], [20]. Die Tiefe und Größe des Steinbetts, welches als Unterbau für den Asphaltbelag verwendet wird, muss ausreichend dimensioniert sein. Damit soll vermieden werden, dass der Wasserspiegel in den Asphalt steigt [20].

Ein weiterer Vorteil von offenporigem Asphalt und dessen ursprünglicher Erforschungsgrund liegt in der Lärmreduzierung bei hohen Geschwindigkeiten des motorisierten Verkehrs [7], [21]. In einer Studie konnten bei neuen Asphaltstraßen offenporige Asphalte mit kleiner Gesteinskörnung die größten Lärmverminderungen aufweisen. Hierbei wurde ein PA 5, also ein poröser Asphalt mit einem Größtkorn von 5mm, untersucht. Am Ende der Lebensdauer, in diesem Fall nach etwa 20 Jahren, konnte jedoch trotz des halbjährigen Hochdruck-Reinigungsprozesses der Asphalte der gewöhnliche PA 8 eine bessere Verminderung der Lärmbelastung unter Beweis stellen, da die Asphalte weniger verschmutzten [21].

Insbesondere in Bereichen mit geringer Verkehrsgeschwindigkeit können die Beläge stark verschmutzen. Poröse Beläge in Bereichen mit hoher Geschwindigkeit, wie beispielsweise auf Autobahnen, gelten bis zu einem gewissen Grad als selbstreinigend. Es wird vermutet, dass die Verstopfung der Poren die Kapillarität fördert. Im Winter kann das verhinderte Abrinnen von Wasser bei Frost- und Tauwetter jedoch problematisch sein [14]. Deswegen sollten diese Asphalte öfter gereinigt werden. Es gibt unterschiedliche Reinigungsstrategien, die zur Anwendung kommen können. Es kann unterschieden werden zwischen der „function maintenance“ Reinigung, welche sich durch wöchentliche Reinigungsfrequenzen auszeichnet und der „function recovery“ Reinigung, wobei nur halbjährig oder seltener gereinigt wird. Ersteres verwendet niedrigeren Druck und kann mit Wasserdruck oder Luftdruck oder einer Kombination aus den beiden durchgeführt werden, ist aber aufgrund der häufigeren

Anwendung kostspieliger [21]. Eine Möglichkeit einer „function recovery“ Reinigung ist beispielsweise die jährliche Reinigung mit Wasser unter hohem Druck, wie sie auch in [21] zur Anwendung gekommen ist. Mechanische Reinigungsverfahren von offenporigen Asphalten durch Hochdruck- sind dennoch nicht ideal, da die Struktur der Körnung nicht garantiert werden kann [21].

Bitumenprüfungen der in [21] im städtischen Straßennetz untersuchten offenporigen Asphalte zeigen bei entnommenen Asphaltproben eine Verhärtung des Bindemittels. In den dünnen und ebenen Abschnitten führt dies zu einer Verschlechterung der Beläge, die sich durch Haftungsprobleme und Risse im Bindemittel, mit zunehmendem Alter der Beläge, zeigen. Dies, zusammen mit einer gewissen Zerkleinerung der Gesteinskörnung durch Abnutzung und Reinigung, führte bei den untersuchten PA 5-Belägen nach 5 Jahren dazu, dass als Instandsetzungsmaßnahme eine Versiegelung der Beläge erforderlich wurde, um die Straße weiterhin nutzen zu können. Bei den offenporigen Belägen mit maximal 8 mm Gesteinskörnung (PA 8) war eine Versiegelung nicht notwendig [21].

Im trockenen Zustand wirkt die in den Hohlräumen enthaltene Luft wie ein Isolator, der die Amplitude der Oberflächentemperatur erhöht und das Temperatursignal in den Tragschichten dämpft [14]. Die Wärmeleitfähigkeit und der Wärmestrom werden durch die Erhöhung der Poren dementsprechend verringert [19]. Offenporige Beläge hatten auch in einer chinesischen Studie höhere absorbierte Strahlungsintensitäten als damit verglichene dichtere Asphaltbeläge [17]. Im Winter wirken sich diese Effekte positiv aus und führen dazu, dass weniger Gefriertemperaturen unter der Deckschicht bei offenporigen Zementbetonbelägen beobachtet wurden [14]. An Sommertagen kann der Effekt bei Trockenheit jedoch zu wärmeren Oberflächentemperaturen als bei Standardbelägen führen, was sich negativ auf das Stadtklima auswirken kann [7], [10], [14]. Dennoch wurde festgestellt, dass – trotz der höheren Oberflächentemperaturen – eine Verringerung der oberflächennahen Lufttemperatur gemessen werden konnte [17]. Außerdem ist zu erwähnen, dass diese Beläge bei nächtlichen Temperaturen rascher abkühlen [7], [17].

In einer französischen Studie, in der offenporige Betonbeläge untersucht wurden, wird darauf hingewiesen, dass die Verwendung von leichter Gesteinskörnung vermieden werden soll, um die Maximaltemperaturen von offenporigem Beton zu minimieren. Es wurde erforscht, dass bei offenporigen Betonbelägen eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit die Tagestemperaturen nur minimal senkt (1,6°C geringere Maximaloberflächentemperatur bei einer Verdopplung der Wärmeleitfähigkeit von 0,437 auf 0,835W/mK), jedoch nicht die Nachttemperaturen. Laut der Studie ist bei einem offenporigen Beton eine Veränderung der Albedo zielführender um dem UHI entgegen zu wirken [8].

Außerdem stellen Frost-Tau-Wechsel eine Herausforderung im Winter dar [14]. Eine gute Entwässerung wirkt den Vorteilen von stehendem Wasser im Sommer entgegen. Offenporige Asphalte, welche nicht durch Wasserrückhaltung oder Bewässerung durch zusätzliche

Befeuchtung manipuliert werden, sollten daher eher in warmem, humidem Klima eingesetzt werden, bei dem genügend Regenwasser zur Verfügung steht [10].

### 2.2.2 Wasserrückhaltende Beläge

Diese Beläge verfügen über hygroskopische Füllstoffe, oder haben eine Unterschicht die aus wasserrückhaltenden Materialien besteht, welche Feuchtigkeit aufnehmen können die beim Erwärmen durch Kapillarwirkung verdampft [7], [8]. Verdunsten kann nur Wasser, dass nahe genug an der Oberfläche gespeichert ist. Zurückzuführen ist das auf den thermischen und aeroben Widerstand des porösen Materials. Durch eine höhere Kapillarität an der Oberfläche kann das Wasser nach oben gezogen werden [14]. Einige dieser Systeme beinhalten unterirdische Wasserleitungen oder Oberflächenwasserberieselung, um die Verdunstungskapazität des Belags zu verstärken [7].

In einer Studie wurde durch Zugabe von 5% pulverisierter Pflanzenkohle, statt Zement, zu einem Porenbeton eine Erhöhung des Wasserabsorptionsvermögens von  $100 \pm 2\text{kg/m}^3$  auf  $117 \pm 8\text{kg/m}^3$  erzielt. Eine Verringerung der Oberflächentemperatur von  $3\text{-}6^\circ\text{C}$  zu dem standardisierten Porenbeton konnte erzielt werden [22].

#### **Halbstarre Deckschichten**

Eine Möglichkeit zur Erzielung des zeitlich verzögerten Abrinnens von Oberflächenwasser ist die Verfüguung des Asphalttes mit einem Material auf Zementbasis, mit höherer Kapillarität und somit mehr oberflächennaher Flüssigkeitsspeicherkapazität und gleichzeitig hohem Albedo-Wert [14].

Eine Möglichkeit, möglichst effektiv Wasser zu speichern, sind wasserrückhaltende Schlämme („Water-Retentive Slurry“, WRS“), welche in hohlraumreichem Asphalt nachträglich eingebracht werden und die Poren schließen. Wasser kann schnell absorbiert werden und im Material eine lange Zeit oberflächennahe zurückgehalten werden, damit es zur Verdunstung bei Hitze zur Verfügung steht. In der Studie von W. Jiang [23] wird die Zusammensetzung und Verarbeitung einer optimierten Mischung des WRS beschrieben, welche gemahlene, granuliert Hochofenschlacke, Flugasche und Kalziumhydroxyd enthält. In dieser Studie konnte im Vergleich zu demselben offenporigen Asphalt ohne Schlämme eine Oberflächentemperatursenkung von  $10^\circ\text{C}$  erzielt werden. In einer weiteren Studie wurde ein anderes zementbasiertes Vergussmaterial hergestellt, bei dem Portlandzement und ultraschnellhärtender Zement (– „Ultra-Rapid Hardening Cement“, URHC) mit keramischem Abfallpulver und Zeolithen, beziehungsweise Flugasche vermischt wurden. Diese Mischungen haben Oberflächentemperaturabsenkungen von bis zu  $15^\circ\text{C}$  im Vergleich zu den zementfreien, offenporigen Asphaltten erzielt [1]. Zeolithen sind hydratisierte Alumosilikat-Mineralien. Zeolithpulver kann aufgrund seiner guten Wasserrückhaltefähigkeit den Problemen des Ausblutens und der Desintegration, welche häufig bei Zementschlämmen auftreten, entgegenwirken [24].

Der erste Versagensmodus bei halbstarren Straßenbelägen sind Trockenschwindrisse, deswegen muss bei der Erzeugung der Zementschlämme auf ein ausgewogenes Wasserverhältnis beim Mischen geachtet werden. Um die Fluidität der Schlämme zu kontrollieren kann ein wasserreduzierender Zusatzstoff hinzugefügt werden. Nur Zementschlämme, welche eine ausreichend geringe Viskosität aufweisen, können alle Poren des PA durch die alleinige Wirkung der Schwerkraft ausfüllen [24]. Bei höherem Wassergehalt während des Mischvorgangs der Zementschlämme entstehen mehr Poren nach dem Erhärtungsprozess. Je größer die Wassermenge beim Mischvorgang, desto mehr Wasser befindet sich nach der Hydratation im Asphalt-Zementgemisch. Überschüssiges Wasser verbraucht Platz und erzeugt zelluläre Löcher, welche nach der Erhärtung und Verdunstung des Wassers, Mikro-Luftporen im Strukturgerüst des Mischgutes darstellen. Dieser Effekt erklärt auch die sinkenden Festigkeitseigenschaften des Mischgutes bei steigendem Wassergehalt [23].

Ein Ziel bei der Entwicklung eines „Cool Pavements“ mit Zementschlämme ist es die Wasserabsorption zu optimieren. Zwar wird um den Effekt der Straßenabkühlung ein hohes Absorptionsvermögen mittels beispielsweise Zeolithen angestrebt, es darf jedoch nicht zu hoch sein, da sonst die Trockenschwindrate steigt. Große Schwindwerte beeinträchtigen die Bindewirkung zwischen Asphalt und Zementschlämme unmittelbar und vermindern die Leistung der halbstarren Struktur [24].

In einer Studie der Chingqing Jiaotong Universität in China konnten Anteile des Zements durch Zugabe von Glasbrocken und Glaspulver ersetzt werden. Somit konnte eine höhere Sonnenreflexion, bei gleichzeitiger Verminderung des Trockenschwindens erzielt werden [24].

### 2.3 Verbesserung der Konvektion

Der Straßenbelag überträgt die Wärme durch Konvektion an die oberflächennahe Luft, wenn sich die Luft über die wärmere Fahrbahnoberfläche bewegt. Die Konvektionsrate hängt von der Rauheit des Asphalts, der Gesamtoberfläche des exponierten Asphalts und der Geschwindigkeit und Temperatur der Luft ab [7].

Der freie Konvektionskoeffizient wird in der Einheit Watt pro Quadratmeter und Kelvin angegeben und beträgt über einer flachen Platte in etwa  $6\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ . Je nach Art der Luftströmung (laminar, turbulent) und Windgeschwindigkeit lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient nach verschiedenen Ansätzen annähernd berechnen [10].

Offenporige Asphalte haben durch ihren hohen Porengehalt eine größere effektive Oberfläche. Diese innerhalb und über den Belägen verursachten Luftturbulenzen und Zirkulationen erhöhen den konvektiven Wärmeaustausch zwischen Belag und Luft und tragen somit zur Senkung der Temperaturen im Sommer bei. Die Oberflächenrauheit kann zwar die Konvektion und damit den Kühleffekt verstärken, hat aber auch das Potenzial, den Netto-Sonnenreflexionsgrad der Oberfläche zu verringern [7]. Dies wurde in einer chinesischen

Studie [17] nachgewiesen, bei der eine höhere Senkung der Gesamttemperatur des offenporigen, im Gegensatz zu dichterem Asphalt, unter dem Einfluss von Wind festgestellt werden konnte [17].

Simulationen zur Wärmeübertragung durch Konvektion in kalifornischen Städten haben gezeigt, dass die Wärmeübertragung zwischen dem Belag und der Umgebungsluft zwischen 0 und  $125\text{W/m}^2$  variiert [10].

### 2.4 Reduzierung der Wärmeenergie

Um die Wärmeenergie, die in der Einheit Joule angegeben wird, an der Oberfläche zu reduzieren können die Oberflächen durch schattenspendende Bäume oder Überdachungen vor Sonneneinstrahlung geschützt werden. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz aktiver mechanischer Kühlung in Verbindung mit Nutzung und Umwandlung der im Straßenbelag gespeicherten Wärmeenergie. Einsatzgebiete mechanischer Kühlung sind im Straßenbelag eingebettete thermoelektrische Geräte oder Rohre durch die Wasser zirkuliert.

Der Vorteil der aktiven mechanischen Kühlung besteht darin, dass sie zur Abkühlung in der warmen Jahreszeit sowie der Enteisung und Schneeschmelze im Winter zur Anwendung kommen können. Bei ausgeklügelten Systemen kann Energie gewonnen werden, die im Gebiet genutzt werden kann, wobei hier mit technologischen, praktischen und kostenbezogenen Problemen zu rechnen ist [7].

### 2.5 Literaturlauswertung zu „Cool Pavements“

Während des Verfassens dieser Arbeit, wurde eine systematische bibliometrische Analyse von 342 internationalen Publikationen unter dem Titel „Cool Pavement Technologies for Urban Heat Island Mitigation“ veröffentlicht. Untersucht wurden Asphalt-, Beton- und Pflasterbeläge, sowie Beläge aus mehreren Belagstyparten. Die Unterteilung in Gruppen- und Subgruppen der klimafitten Beläge, welche hier einbezogen wurden, können in Abbildung 2-3 eingesehen werden. 46% der ausgewerteten Studien behandeln reflektierende Beläge, 15% Verdunstungsbeläge, 17% sonstige Technologien und der Rest setzt sich aus einer Kombination der oben angeführten Technologien zusammen. Außerdem ergab die Analyse, dass die Veröffentlichung von Studien zu „Cool Pavements“ seit 1993 exponentiell zugenommen hat. Gut erkennbar ist der zunehmende Trend in der Fülle an Veröffentlichungen der letzten Jahre (siehe Periode 5 - Abbildung 2-3) [25].

Die statistische Studie gibt einen Einblick in das Ausmaß unterschiedlicher Konzepte und Ansätze sowie eine Vielzahl an Materialtechnologien, welche überblicksartig, aber nicht vollständig in Kapitel 2 thematisiert wurden.

# Klimafitte Asphalte - „Cool Pavements“

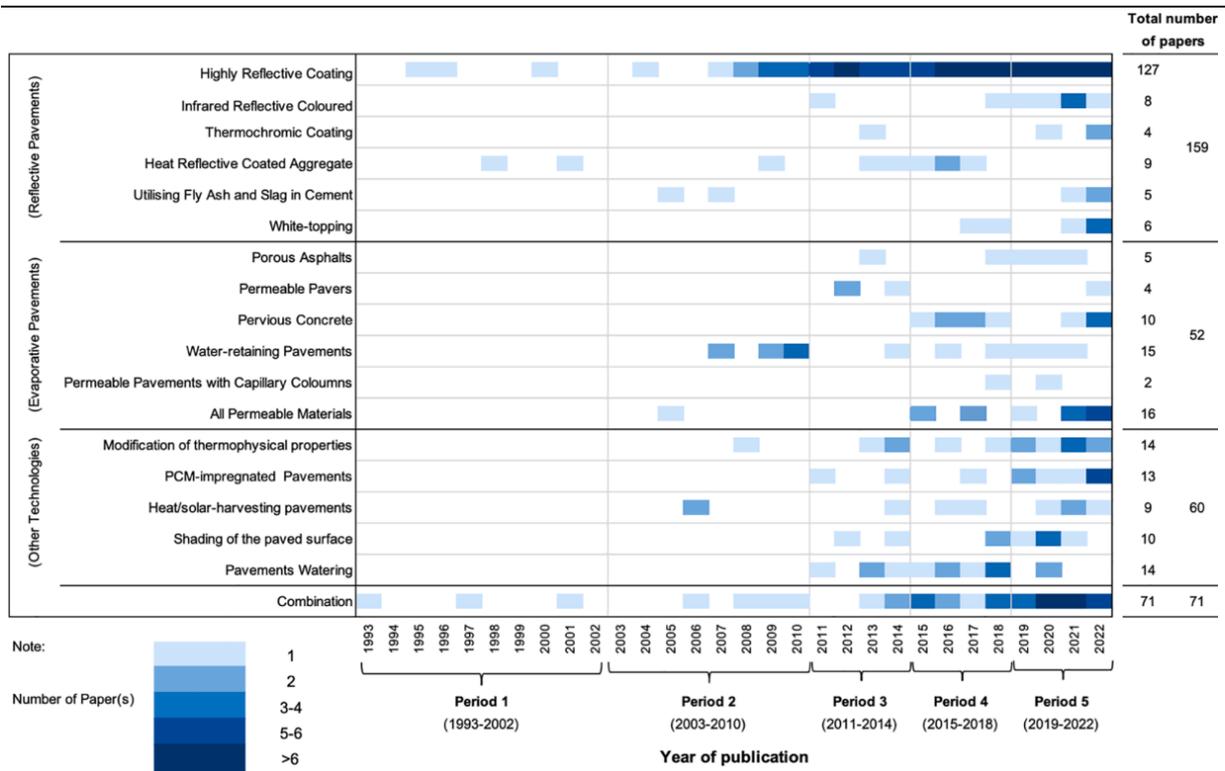


Abbildung 2-3 Historische Entwicklung von Studien zu verschiedenen Technologien für „Cool Pavements“ [25]

## 3 Methodik

In dieser Arbeit werden verschiedenen Asphaltmischgüter für Deckschichten auf ihr Potenzial dem UHI-Effekt entgegenzuwirken geprüft und verglichen. Hierzu wurde eine Literaturrecherche durchgeführt (siehe Kapitel 2) um die Möglichkeiten und bisherigen Ansätze zur Konzeptionierung von „Cool Pavements“ zu analysieren. Im Zuge der durchgeführten Studie wurden selektierte Mischgutkonzepte aufgegriffen, abgeändert und im straßenbautechnischen Labor der TU Wien auf ihr Materialverhalten und – für diese Arbeit entscheidend – auf das Temperaturverhalten geprüft. Die Erwärmung der Straßenbeläge, welche – wie in Kapitel 1 eschrieben – einen starken Einfluss auf die Bildung von städtischen Hitzeinseln hat, wurde in einem eigens konzipierten Prüfstand simuliert. Anschließend werden die aus den Versuchen gezogenen Messwerte miteinander verglichen und die Verbesserung durch den Einsatz solcher Mischgüter im Geh- und Radwegbereich als Deckschicht diskutiert.

### 3.1 Mischgutkonzeptionen

Die Gesteine, welche im Zuge dieser Diplomarbeit verwendet wurden, sind einerseits das aus dem Hartsteinwerk Loja kommende Ganggestein (Kersantit und Granitporphyr) [26]. Um bei gleichzeitiger Modifikation des Bindemittels eine höhere Sonnenreflexion zu erreichen wurden andererseits die helleren Gesteine (dolomitischer Kalkstein aus dem Steinbruch Hollitzer und Dolomitstein aus dem Steinbruch Gaaden) eingesetzt [27], [28].

Nach der Prüfung der Spurrinnenresistenz von offenporigen Asphalten mit einem Straßenbaubitumen 70/100 wurde für den weiteren Verlauf des Prüfprogramms beschlossen, ein härteres Bindemittel 20/30 zu verwenden, um die Verformungsstabilität insbesondere bei hohen Temperaturen zu verbessern. Für die verschiedenen Mischgutkonzeptionen wurden dementsprechend ein Bitumen der Penetrationsklasse 20/30, sowie ein synthetisch transparentes Bindemittel verwendet.

Im Folgenden werden die untersuchten Mischgutkonzepte aufgelistet und die Motivation zur Prüfung dieser beschrieben.

#### 3.1.1 Offenporiger Asphalt (PA 4 und PA 8)

Aus der Vielzahl an veröffentlichten Zugängen zur Entwicklung von klimafitten Straßenbelägen stachen offenporige Beläge heraus. Anders als bei einem Großteil der anderen Ansätze (siehe Kapitel 2.2.1) verlässt sich diese Technologie nicht auf die Reflektion der Sonneneinstrahlung, hingegen soll die Abkühlung der urbanen Hitzeinseln durch Verdunstung von gespeichertem Regenwasser bewirkt werden. Außerdem haben diese Beläge eine geringere Masse und dadurch auch eine verringerte Wärmespeicherkapazität und kühlen nachts beziehungsweise im unbestrahlten Zeitraum schneller ab als herkömmlicher Asphalt. In der Literatur (siehe Kapitel 2.2.1) wird darauf hingewiesen, dass die Verwendung solcher Beläge aufgrund der

Isolationswirkung der mit Luft gefüllten Poren bei Trockenheit insbesondere in humidem Klima verortet werden sollte. Außerdem ist es zielführend, sich für solche Beläge ein Wasserrückhaltungssystem zu überlegen um die Versickerung zu verlangsamen, wobei auf das Verhalten der hohlraumreichen Kornstruktur bei Frost-Tau-Wechsel in Städten wie Wien geachtet werden muss.

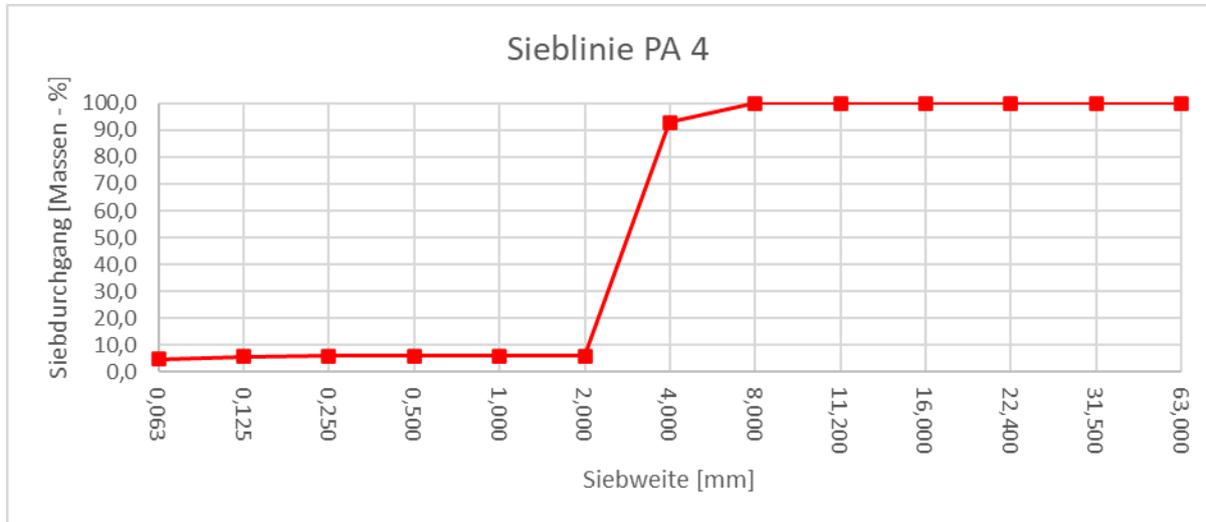


Abbildung 3-1 Bestimmung der Korngrößenverteilung - Sieblinie PA 4

Material	Massen-%
Bitumen 20/30	6,2
Zusatz: Cellulose Fasern	0,3
Füller: Kalksteinmehl	4,7
Loja 2/4 gesiebt	88,8



Abbildung 3-2 Massenanteile Platte und Dokumentation: PA 4 20/30, nicht sandgestrahlt

Da der Verwendungszweck der entwickelten offenporigen Asphaltten von den im europäischen Straßenbau etablierten porösen Asphaltten abweicht, wurde eine Sieblinie und ein Bindemittelgehalt auf Grundlage der in [21] untersuchten Asphaltte herangezogen, wobei die Körnung an herkömmliche Siebgrößen angepasst wurde (siehe Massenanteile in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-4, sowie Sieblinie in Abbildung 3-1 und Abbildung 3-3). Die Körnung wurde trocken gesiebt. Als Armierungs- und Stabilisierungszusatz wurden Viatop Premium Pellets, ein Granulat aus modifizierten Cellulose Fasern, zu dem Asphaltmischgut hinzugefügt [29].

## Methodik

Da die in dieser Studie untersuchten Beläge im Gehwegbereich eingesetzt werden sollen, ist ein Asphalt mit einem Größtkorn von 4mm von Interesse. Dadurch kann der Durchmesser der Hohlräume reduziert werden, bei gleichzeitiger Maximierung des Hohlraumgehalts. Die Begehung des offenporigen Asphaltes ist ohne Gefahr mit Schuhwerk mit spitzen Absätzen möglich. Des Weiteren wurde ein PA 8 untersucht, welcher einen noch etwas höheren Hohlraumgehalt aufweisen konnte (~25%), als der PA 4 (~23%), aber durch die größere Körnung auch größere Hohlraumschnittflächen hat.

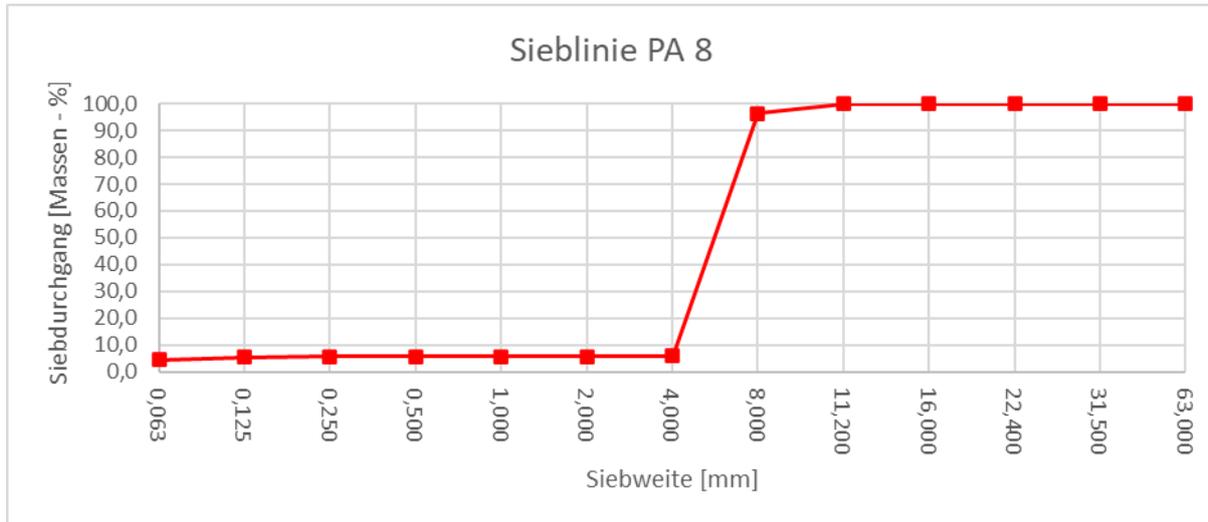


Abbildung 3-3 Bestimmung der Korngrößenverteilung - Sieblinie PA 8

Material	Massen-%
Bitumen 20/30	5,8
Zusatz: Cellulose Fasern	0,3
Füller: Kalksteinmehl	4,2
Loja 4/8 gesiebt	90,1

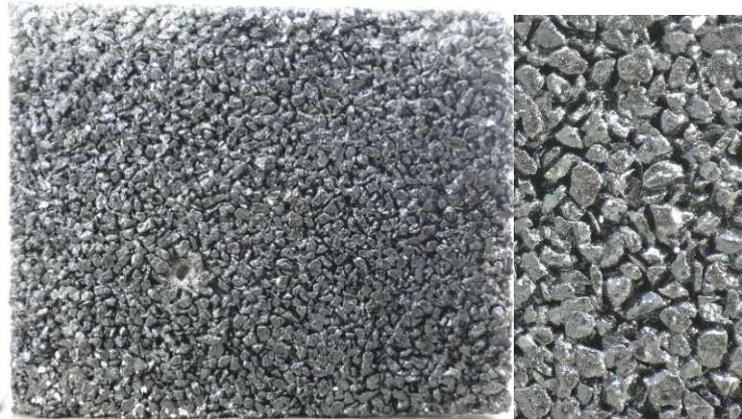


Abbildung 3-4 Massenanteile Platte und Dokumentation: PA 8 20/30, nicht sandgestrahlt

### 3.1.2 Halbstarre Deckschichten (HSD 8 und HSD 8 Zeolith)

Eine Möglichkeit, die Wasserrückhaltungskapazität des offenporigen Asphaltes zu verbessern, ist laut Literatur (siehe Kapitel 2.2.2) eine aufgetragene Zementschlämme. Diese soll Wasser oberflächennahe binden. Als zusätzlicher positiver Nebeneffekt gilt, wie in Kapitel 2.1.3 bereits besprochen, die Aufhellung der Oberfläche und somit die Steigerung der Albedo der Beläge durch die aufgetragene Schlämme. Durch Zugabe von Zeolithen in die Wasser-Zement-

Mischung soll überprüft werden, ob das aufgebrauchte Wasser noch effizienter an die getrocknete Schlämme gebunden werden kann.

In dieser Arbeit wurden die trockenen Anteile eines Hochleistungsfließmörtel für halbstarre Decken der Firma Baunit als Primärprodukt der Zementschlämme verwendet [30]. Mörtel sind Gemische aus Zement, feiner Gesteinskörnung und Wasser. Durch Zugabe von Wasser zu der trockenen Zement-Gesteins-Mischung kann das Fertigprodukt verflüssigt werden und in das offenporige Asphaltgerüst eingebracht werden.

Der Hohlraumgehalt der Primärstruktur des Verbundwerkstoffes muss ausreichend groß sein für derartige halbstarre Beläge. Die Schlämme mit und ohne Zeolithen wurde in den konzipierten PA 8 eingebracht, da dieser ein Hohlraumgehalt von 25% aufweist. In Abbildung 3-5 sieht man rechts unten die Rückseite des konzipierten HSD 8-Probekörpers. Man kann erkennen, dass bei einer eingebrachten Menge von 1kg Mörtel in eine 26x32x4cm PA-Platte der Zement bis in die unteren Schichten abfließen konnte.

Es wurden zwei Belagsoberflächen konzipiert. Bei dem ersten Mischgut wurde in einen fertig hergestellten PA 8 mit Größtkorn des offenporigen Asphalt von 8mm (Abkürzung: HSD 8) durch Eingießen und Abziehen der Mörtel-Wasser-Mischung eine halbstarre Deckschicht hergestellt. Die Mörtel-Wasser Mischung wurde durch den in [30] vorgeschlagenen Wasserbedarf von 21,3-21,8% angepasst. Durch Optimierung der Fließwirkung wurden die Bestandteile auf ein Mörtel:Wasser-Verhältnis von 78,4:21,6 eingewogen.

Die zweite Belagsoberfläche wurde durch Zugabe von Zeolithen im Verhältnis der trockenen Bestandteile von 85:15 (Mörtel:Zeolith) optimiert. Die Rezeptur für das Verhältnis an eingebrachten Zeolithen wurde aus Literatur [1] entnommen. In dieser Literatur wurde von einer reinen Zementschlämme als Sekundärprodukt für die halbstarre Deckschicht Gebrauch gemacht. In unserem Versuch wurde eine fertige Fließmörtelmischung verwendet, bei der feine Gesteinskörnung und andere Zusätze nicht ausgeschlossen werden können. Außerdem wird in Literatur [1] zusätzlich keramisches Abfallpulver verwendet. Aus den oben angeführten Gründen wurde das (Mörtel+Zeolith):Wasser Verhältnis so angepasst, dass eine vergleichbare Fließwirkung wie bei HSD 8 erzeugt werden konnte. Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaften von Zeolithen musste dem Gemisch um 50ml mehr Wasser hinzugefügt werden. Die Gesamtmasse der Zementschlämme der halbstarren Deckschichten mit Zeolithen (HSD 8 Zeolith) betragen dementsprechend 1,05kg.

In Literatur [1] und [24] wurden ebenso halbstarre Deckschichten konzipiert, wobei darauf aufmerksam gemacht wird, dass die chemische Zusammensetzung der Zeolithen und die Verwendung natürlicher oder synthetischer Zeolithen einen Einfluss auf die Wasserspeicherkapazität haben. In unseren Mischgütern wurden natürliche Zeolithen aus der Slowakei verwendet. Die chemische Zusammensetzung stimmt mit den in [1] verwendeten Zeolithen überein.

Material	Massen-%
<b>Asphalt</b>	
Bitumen 20/30	5,8
Zusatz: Cellulose Fasern	0,3
Füller: Kalksteinmehl	4,2
Loja 4/8 gesiebt	90,1
<b>Zementschlämme</b>	
Mörtel	78,4
Wasser	21,6
<b>Zementschlämme mit Zeolithen</b>	
Mörtel	66,6
Wasser	21,6
Zeolithen	11,7



Abbildung 3-5 Massenanteile Platte und Dokumentation: HSD 8, sandgestrahlt

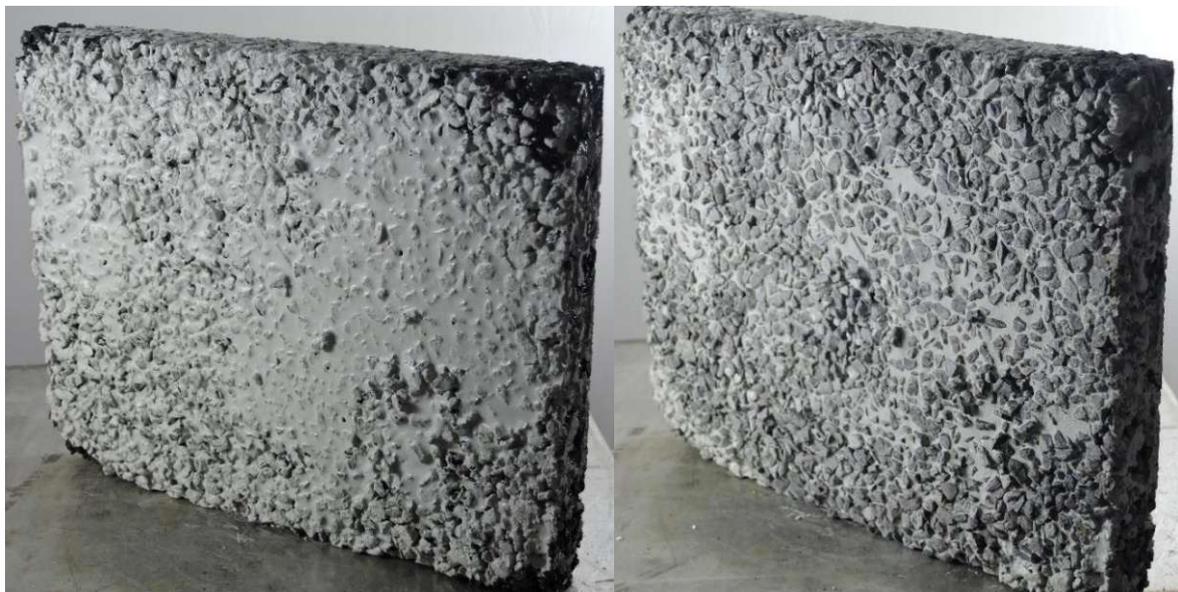


Abbildung 3-6 PA 8 PK1 mit Zement-Zeolith-Schlämme (links: nicht sandgestrahlt, rechts: sandgestrahlt)

Die zement-geschlammten Prüfkörper wurden sandgestrahlt, bevor sie auf ihr Temperaturverhalten geprüft wurden. In Abbildung 3-6 ist der Probekörper vor und nach dem Sandstrahlprozess dargestellt.

### 3.1.3 Asphaltbeton mit synthetischem, transparentem Bindemittel (AC 11 transparent / AC 8 gelb)

Um die Albedo eines Belages zu erhöhen muss die Oberflächenfarbe erhellt werden. Damit dieser Effekt eine gewisse Dauerhaftigkeit aufweisen kann, wurde auf ein synthetisches, transparentes, honigfarbendes Bindemittel mit der Produktbezeichnung „Bituclair EN“ zurückgegriffen, welches frei von Asphaltene ist. Asphaltene sind im Bitumen, dem klassischen Bindemittel für Asphalt, für die schwarze Färbung verantwortlich [31].

Das synthetische, transparente Bindemittel wurde in Kombination mit hellem Gestein zu Asphaltbeton (AC) gemischt. AC weisen durch ihr Packungs-Konzept eine Asphaltstruktur mit hoher Mineralkonzentration bei minimalen Bindemittelgehalt auf. Es wurde einerseits ein Asphaltbeton mit Größtkorn 11,2mm (AC 11 transparent) ohne Zugabe von Pigmenten gemischt, welcher eine hellbraune Farbe hat, andererseits ein gelb eingefärbter AC 8, mit Größtkorn 8mm (AC 8 gelb). Die Sieblinie des AC 11 ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Für den AC 8 gelb gibt es keine Sieblinie, da das Mischgut nicht im Straßenbautechnischen Labor der TU Wien hergestellt, sondern als fertiges Mischgut geliefert wurde.

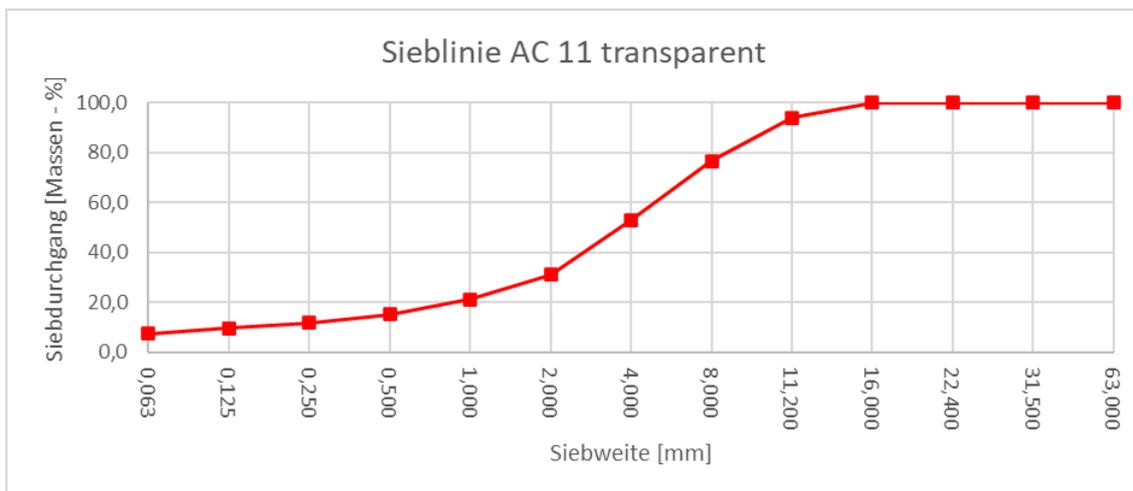


Abbildung 3-7 Bestimmung der Korngrößenverteilung - Sieblinie AC 11 transparent

## Methodik

Material	Massen-%
Synthetisch transparentes Bindemittel	6,2
Gaaden 0/2	32,3
Gaaden 2/4	16,6
Gaaden 4/8	22,3
Hollitzer 8/11	22,6



Abbildung 3-8 Massenanteile Platte und Dokumentation: AC 11 mit synthetisch transparentem Bindemittel, nicht sandgestrahlt

Für die Gelbfärbung des AC 8 wurde IOX Y 02, ein pulverförmiges Eisenoxid, verwendet. Um die reflektierenden Eigenschaften des Mischgutes zu unterstützen, wurde zusätzlich TiO<sub>2</sub> (Titanoxid), ein weißes Pigment, hinzugefügt.

In Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 sind dunkelbraune Stellen auf der sonst hellbraunen und gelben Asphaltstruktur zu erkennen. Diese sind auf Bitumenrückstände beim Mischverfahren im Labor zurückzuführen und sollten bei einem Einbau im Feld nicht mehr vorhanden sein. Der linke Probekörper in Abbildung 3-8 zeigt die Struktur auf der Oberseite und der rechte zeigt die Unterseite des AC 11.

Material	Masse-%
Synthetisch transparentes Bindemittel	5,6
Fremdfüller	4
Gaaden 0/2	40,5
Gaaden 2/4	16
Gaaden 4/8	32,4
Gelbes Pigment	1
Titanoxid Weiß	0,5



Abbildung 3-9 Massenanteile Platte und Dokumentation: AC 8 synthetisch transparentes Bindemittel mit gelbem Farbpigment, nicht sandgestrahlt

### 3.1.4 Vergleichsasphalt (MA 8)

Als Vergleichsmaterial zu den klimafitten Ansätzen fungiert ein in Österreich für den Gehsteigbereich häufig verwendeter Gussasphalt. Der MA 8 20/30 wurde im Labor vergossen und anschließend auf die Maße der anderen Asphalte geschnitten. Die Sieblinie des Gussasphaltes mit Größtkorn 8mm kann in Abbildung 3-11 ausgelesen werden.

Material	Massen-%
Bitumen 20/30	8,7
Kalksteinmehl	21,4
Gaaden 0/2	39,2
Loja 2/4	15,9
Loja 4/8	14,8



Abbildung 3-10 Massenanteile Platte und Dokumentation: MA 8 20/30, nicht sandgestraht

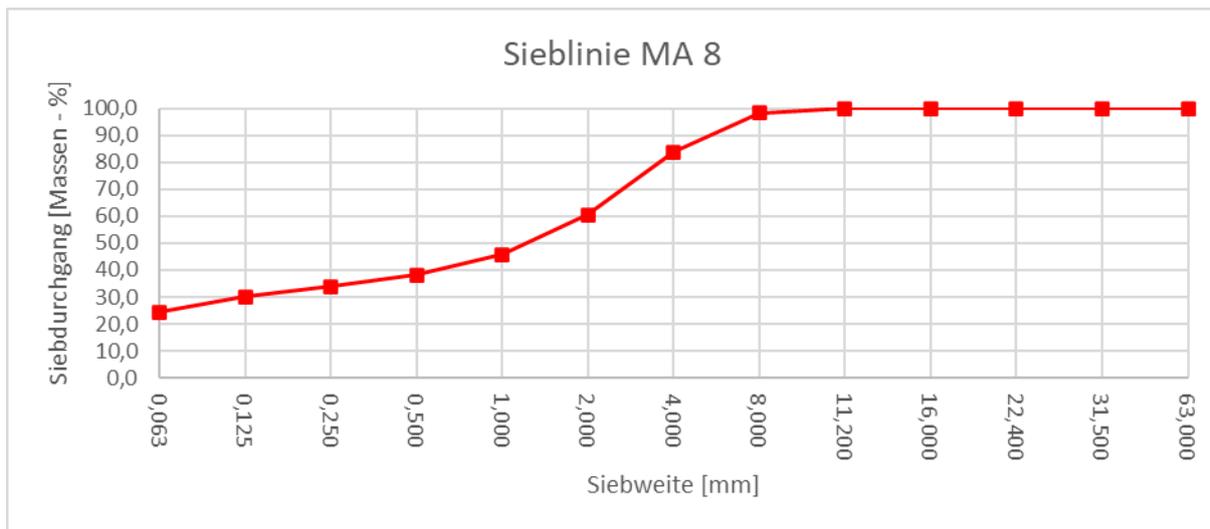


Abbildung 3-11 Bestimmung der Korngrößenverteilung - Sieblinie MA 8

### 3.2 Messmethodik und Prüfstand

Der Fokus dieser Arbeit richtet sich auf die thermischen Eigenschaften der untersuchten Straßenbeläge. Um geeignete Asphaltplatten herzustellen, wurden vorerst Marshall-Probekörper mittels Schlagverdichtung (gemäß ÖNORM EN 12697-30) hergestellt und Marshall-Festigkeits-Werte (gemäß ÖNORM EN 12697-34), Raumdichte (gemäß ÖNORM EN 12697-6) und Hohlraumgehalt (gemäß ÖNORM EN 12697-8) ermittelt [32], [33], [34], [35]. Die Optimierung der Festigkeitseigenschaften der angeführten Asphalte ist mit Beendigung dieser Arbeit noch nicht vollständig und wird dementsprechend auch nicht weiter behandelt. Der Fokus dieser Arbeit ist auf das Abkühlverhalten der Beläge gerichtet. Dennoch konnten im Zuge der Entwicklung der einzelnen Beläge einige Optimierungen erzielt werden (z.B. eine

Verbesserung der Spurbildungs- und Verringerung der Verformungsgefahr die offenporigen Probekörper, indem ein weiches 70/100 Bitumen durch ein viel härteres 20/30 Bitumen ersetzt wurde, sowie eine Maximierung der Hohlraumgehalte).

Mit diesen Mischgutkonzeptionen wurden jeweils zwei Probekörper mit den Abmessungen 26x32x4cm hergestellt (siehe Abbildungen in Kapitel 3.1). Diese wurden in zwei identischen, eigens konzipierten Prüfständen (siehe Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13) auf ihr Verhalten bei Materialtemperaturen von bis zu 65°C gemessen. Die Prüfstände bestanden jeweils aus einer Holzkiste, welche mit zugeschnittenen Styropor-Platten isoliert wurde. Die eingebauten Platten wurden auf eine 1,5cm hohe Dränageschicht aus mineralischer Körnung platziert.



Abbildung 3-12 Fotografie des Prüfstandes

Es wurden unter Bestrahlung einer Lampe mittels zwei gegeneinander ausgerichteter Pyranometer (sogenannte Doppelpyranometer, oder auch Albedo-Meter) das Rückstrahlvermögen jedes Belages gemessen (siehe Abbildung 3-12). Die Reflektion des Lichts von der Probekörperoberfläche wird vom nach unten gerichteten Pyranometer und die Einstrahlung der Lampe mit dem zweiten, nach oben gerichteten Pyranometer gemessen [36]. Die Bestrahlung wird mit einer Breitspektrum-Tageslichtlampe mit einer Leistung von 150W durchgeführt. Die von dieser Lampe abgegebenen Wellenlängen liegen im Bereich von 400-2000nm, das bedeutet es wurde im VIS- und NIR-Bereich bestrahlt [37]. Die messbaren Wellenlängen der verwendeten Pyranometer liegen zwischen 200-3000nm. Das bedeutet das Spektrum der Einstrahlung der Lichtquelle kann von den Pyranometern aufgenommen werden.

Feldversuche bei Albedo-Messungen hängen stark von den Wetterverhältnissen ab, insbesondere vom Bewölkungsgrad. Deswegen wurden die Versuche bei gleichbleibenden Verhältnissen im Labor in Dunkelheit durchgeführt [36]. Somit konnte mit vergleichbaren Werten gearbeitet werden. Außerdem ist zu beachten, dass die Messergebnisse von der

Intensität der Einstrahlung und dem Einstrahlwinkel abhängen [36], welche im Prüfstand standardisiert waren.

Es wurde jede Oberfläche für 50 Minuten bei Dunkelheit, abgesehen von der künstlichen Bestrahlung der Tageslichtlampe gemessen und anschließend die arithmetischen Mittelwerte der Albedo-Werte berechnet, um Vergleichswerte zwischen den Belägen zu generieren.

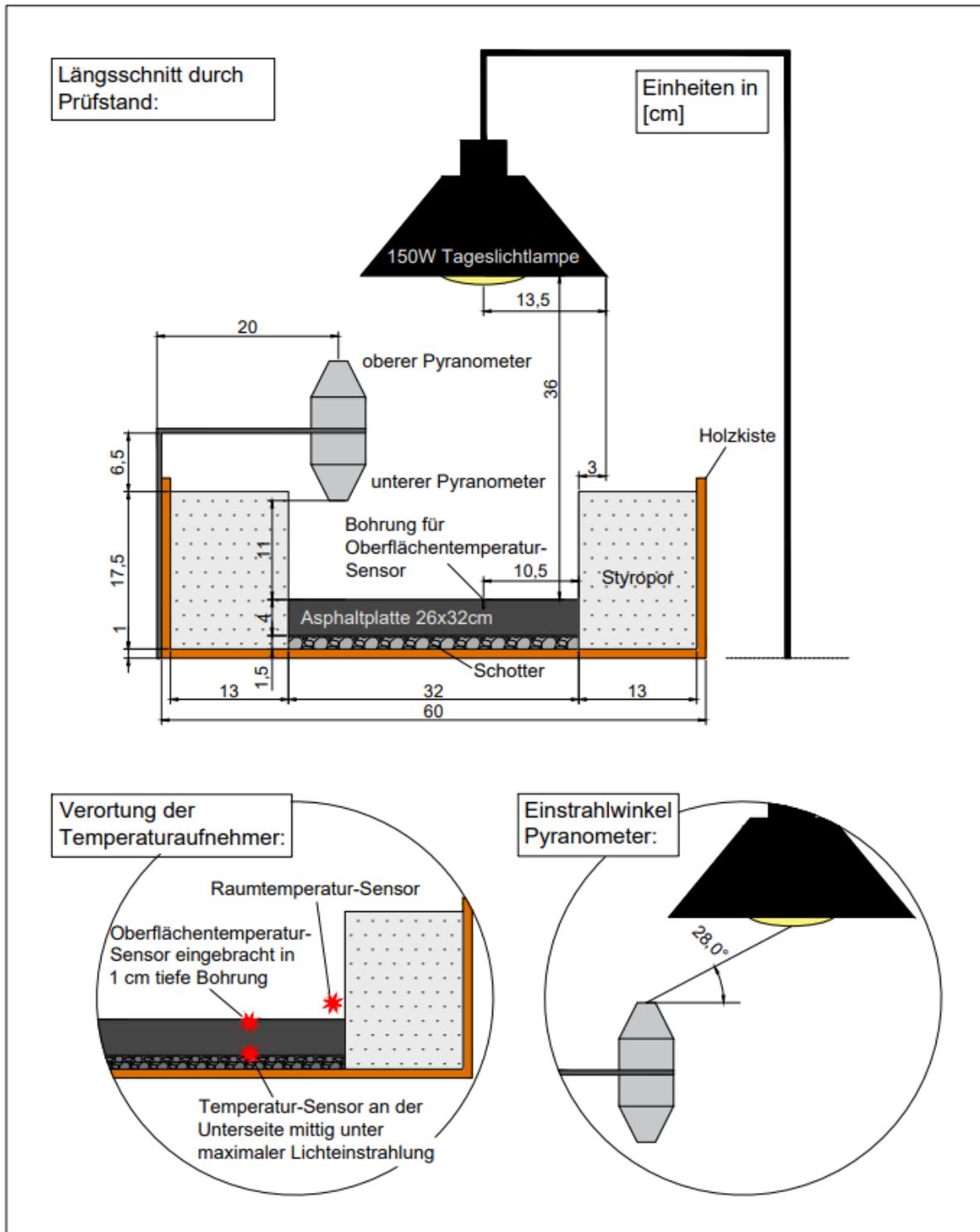


Abbildung 3-13 Schematischer Aufbau des entwickelten Prüfstandes

Neben der Albedo-Messung wurden die Temperaturen der Straßenbeläge während Bestrahlung mit derselben 150W Lampe gemessen. Eine zyklische Beleuchtung soll die Tages- und Nachtzeiten in den Sommermonaten und somit insbesondere die sommerlichen Hitzewellen in Städten simulieren. Die Dauer der Versuche lag bei 17 Stunden, oder 22 Stunden, siehe Abbildung 3-14 und Abbildung 3-15.

Der 17-stündige Versuchsablauf wird in Abbildung 3-14 verdeutlicht; ein Versuchsablauf gliedert sich in 6 Zyklen. Ein Zyklus besteht aus einer 2-stündigen Beleuchtungsphase und einer direkt anschließenden Abkühlungsphase von einer Stunde, wobei hier die Phasen auf die Tages- und Nachtzeiten in den Monaten Juni, Juli und August in Österreich angepasst wurden [38]. Dementsprechend simuliert ein Zyklus die Sonnenbestrahlung während 24 Stunden im Sommer. Das Experiment wird an eine sommerliche Hitzewelle von 6 Tagen angeglichen.

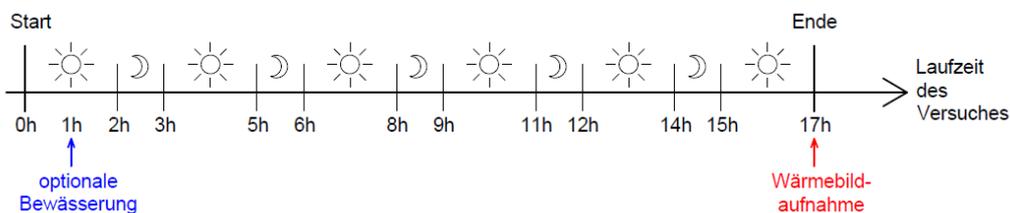


Abbildung 3-14 Versuchsablauf der 17h-Messung im Prüfstand

Die 22-stündige Messung (siehe Abbildung 3-15) soll insbesondere ermöglichen, das Langzeit-Abkühlverhalten und die Regenerationszeit der Deckschicht-Probekörper zu ermitteln. Der Versuchsablauf gliedert sich in 3 jeweils 2-stündige Beleuchtungsphasen, zwischen denen zwei zu je 3-stündige Abkühlphasen konzipiert sind. Nach der 12. Stunde des Versuches werden die Temperaturen während des Abkühlvorgangs dokumentiert.

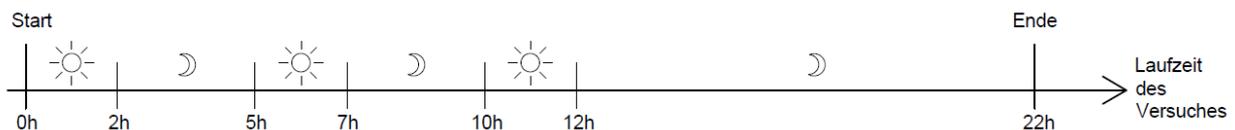


Abbildung 3-15 Versuchsablauf der 22h-Messung im Prüfstand

Die Temperatureaufnahme erfolgt über 3 Sensoren, welche in Abbildung 3-13 durch die roten Sterne markiert sind. Der erste Temperatursensor misst die Oberflächentemperatur und wurde durch ein 1cm tiefes Bohrloch im Probekörper eingebracht. Das Bohrloch wurde, anders als der zweite Sensor, in der Breite nicht mittig angeordnet, sondern befand sich im Drittpunkt. Die Tiefe des Bohrloches und die Anordnung wurden so gewählt, da nicht die direkte Bestrahlung der Lampe auf den Sensor, sondern die Temperatur des Asphalt es gemessen werden sollte. Der zweite Sensor befand sich auf der Unterseite der Asphaltplatte und lag mittig unter der Lampe auf dem Schotterbett auf. Mit dem dritten Sensor wurde die

Raumtemperatur etwa 2-3cm über der Belagsoberfläche in der rechten hinteren Ecke der Prüfeinrichtung gemessen.

Am Ende jeder Messung, 17 Stunden beziehungsweise 22 Stunden nach dem Start des ersten Zyklus, wurde eine Wärmebildkamera-Aufnahme gemacht, um die Wärmeverteilung auf der Oberfläche der Platten darzustellen und die Maximaltemperatur an der Oberfläche zu lokalisieren und dokumentieren; diese Aufnahmen werden in Kapitel 4 analysiert und verglichen.

Das Materialverhalten der Probekörperplatten wurde nicht nur im trockenen Zustand, sondern auch in der 17-Stunden-Messung unter Befeuchtung gemessen (siehe Abbildung 3-14). Hierbei handelt es sich um ein nachgestelltes Regenereignis nach genau einer Stunde im Prüfablauf. Der Zeitpunkt wurde in der Mitte einer Beleuchtungsphase und nicht direkt zu Beginn der Messung angesetzt, um den Abkühlvorgang der bereits warmen Platten besser beobachten zu können. Aufgrund der Befeuchtung kann auf Grenzen der Wasserspeicherkapazität geschlossen werden.

Es wird im Zuge der Messungen zwischen zwei Bewässerungskonzepten unterschieden, wobei ersteres bei allen für diese Arbeit konzipierten „Cool Pavements“ implementiert wurde und die Füllung der Hohlräume nur bei den offenporigen Asphalten Anwendung findet.

1. Von Regenereignissen des Jahres 2022 in Österreich während der Sommermonate (Juni, Juli und August) wurde auf eine aufzubringende Wassermenge rückgeschlossen
2. Das Volumen des gesamten Hohlraumgehalts der PA-Asphalte wird mit Wasser gefüllt.

Bei dem ersten Konzept wurden Daten aus Quelle [39] entnommen. Es wurde von den Gesamtniederschlagsmengen der einzelnen Monate und der Anzahl an Tagen im Monat auf eine Durchschnittsniederschlagsmenge pro Tag geschlossen, welche anschließend mit einem Umrechnungszeitfaktor multipliziert wurde. Dieser Umrechnungszeitfaktor wurde implementiert, da die Dauer eines Zyklus im Prüfstand nur 3 Stunden beträgt, zusammengesetzt aus einer 2-stündigen Beleuchtungsphase und einer einstündigen Abkühlungsphase, ein Tag jedoch 24 Stunden hat. Der Faktor ist somit mit dem Wert  $\frac{3}{24}$  ( $=\frac{1}{8}$ ) gewählt. Durch die Abmessung der Platten, dem Umrechnungszeitfaktor und einem Aufrechnen auf 6 Zyklen konnte ein Wasservolumen errechnet werden, das einem durchschnittlichen Regenereignis im Sommer in Österreich entspricht und welches 234 Milliliter beträgt. Die Aufbringung des Wassers erfolgte flächendeckend über den Probekörper durch eine manuell bediente Sprühflasche. Wichtig zu erwähnen ist, dass bei der Annahme der Wassermenge nicht alle Faktoren berücksichtigt werden konnten, wie beispielsweise das Starkregenereignis eines typischen Sommergewitters oder die lokalen Witterungsbedingungen in Wien. Somit stellt die aufgetragene Wassermenge nur ein Beispiel eines Regenereignisses dar und dient lediglich dem Zweck der Erforschung des Materialverhaltens der Probekörper unter Befeuchtung.

Mit dem zweiten Konzept soll die Speicherfähigkeit der offenporigen Asphalte untersucht werden, wobei das gesamte Hohlraumvolumen mit Wasser gefüllt wurden. Die Probekörper können nicht die gesamte Wassermenge speichern und die Flüssigkeit, welche nicht durch Oberflächenspannungen der Asphaltstruktur gehalten wird, fließt vorerst in das Schotterbett und sammelt sich anschließend in der Holzkiste. Hierbei wurden für die verschiedenen Hohlraumgehälter des PA 4 (765ml) und PA 8 (832ml) verschiedene Wassermengen ermittelt.

Die Berechnungen beider Annahmen finden sich im Anhang dieser Arbeit.

### 3.3 Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Temperatursensoren

In Abbildung 3-16 wird die Messungen der drei Temperatursensoren des Probekörpers 1 des offenporigen Asphalts mit Größtkorn 4mm (PA 4) während der Phasen eines 17-stündigen Zyklus abgebildet. Die Temperaturen an der Oberseite (in grün) und der Unterseite (in blau) der Platte, sowie die Raumtemperatur (in rot) können ausgelesen werden. Die Messungen erfolgten punktuell im Abstand von einer Minute. Die einzelnen Beleuchtungs- und Abkühlungsphasen, welche in Abbildung 3-14 erläutert wurden, sind klar zu erkennen.

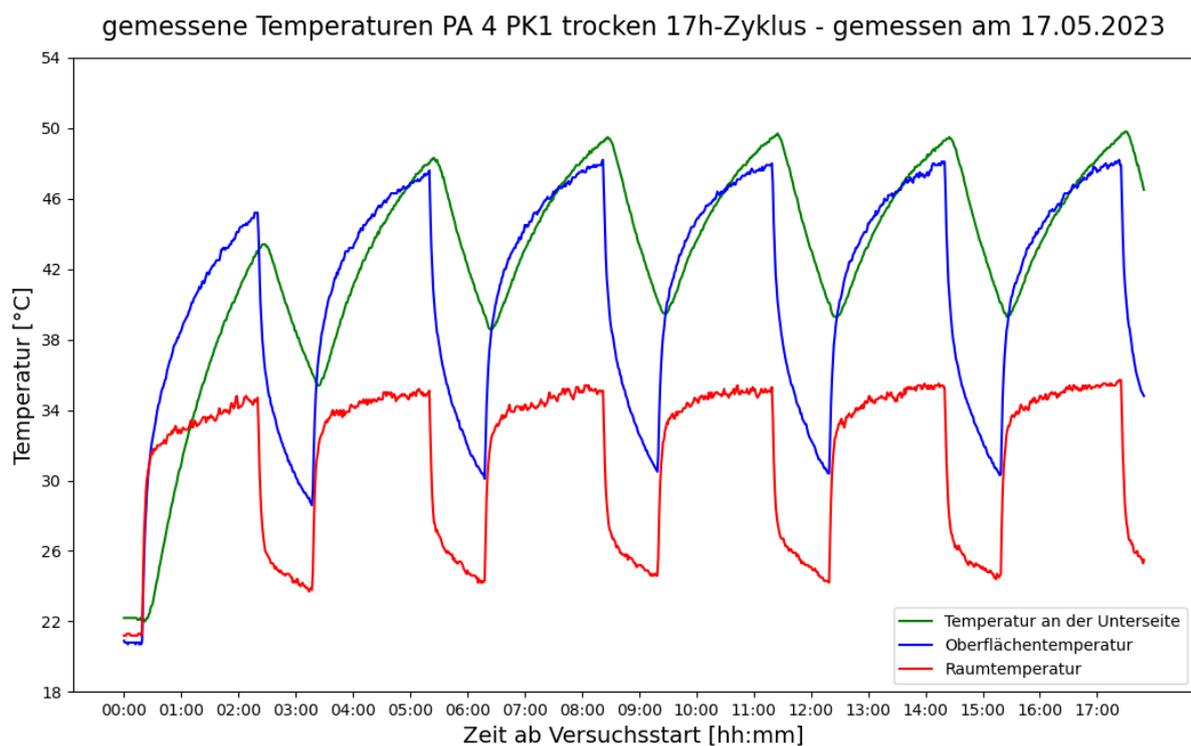


Abbildung 3-16 gemessene Temperaturen des Probekörpers 1 der Mischgutkonzeption PA 4 im nicht bewässerten 17h-Zyklus

Um die Wiederholbarkeit der Temperaturmessungen über die Sensoren zu überprüfen, wurde die Temperaturen des oben abgebildeten Probekörpers zu weiteren Zeitpunkten aufgezeichnet. Die Messungen desselben Probekörpers wurden im Abstand von jeweils 3-5

Wochen durchgeführt, bis auf Messung 3 und 4, welche zu identen Voraussetzungen ohne Ausbau aus dem Prüfstand an Folgetagen erfolgte.

In Abbildung 3-17 werden die 4 Messungen der jeweiligen Sensoren verglichen und zum Ende der Messung, nach 17 Stunden, die Differenz des Minimal- und Maximalwertes durch eine Amplitude dargestellt. Die größte Abweichung der Messungen ist bei dem Raumtemperatursensor verortbar mit einer Differenz der Extremwerte von 8,18°C in der 17. Stunde nach Messbeginn. Eine ebenso recht große Abweichung findet man bei dem Amplitudenwert der Oberflächensensoren mit 5,93°C. Die geringste Differenz, mit 2,34°C, ist bei dem Vergleich der Temperaturen an der Unterseite zu erkennen.

Diese Abweichungen sind auf mehrere Fehlerquellen zurückzuführen, wobei die vermutlich bedeutendste Ursache eine Änderung der Raumtemperatur in dem nicht klimatisierten Raum darstellt. Die Umgebungsraumtemperaturen variieren zwischen 21°C und 27°C während der für diese Arbeit durchgeführten Messungen in den Monaten Mai bis Juli. Die Ähnlichkeit der Messungen 3 und 4, bei denen der Prüfstand nicht verändert wurde und die Umgebungstemperaturen ähnlich waren deutet darauf hin, dass der Messfehler nicht im Prüfkonzept, sondern in externen Faktoren liegt.

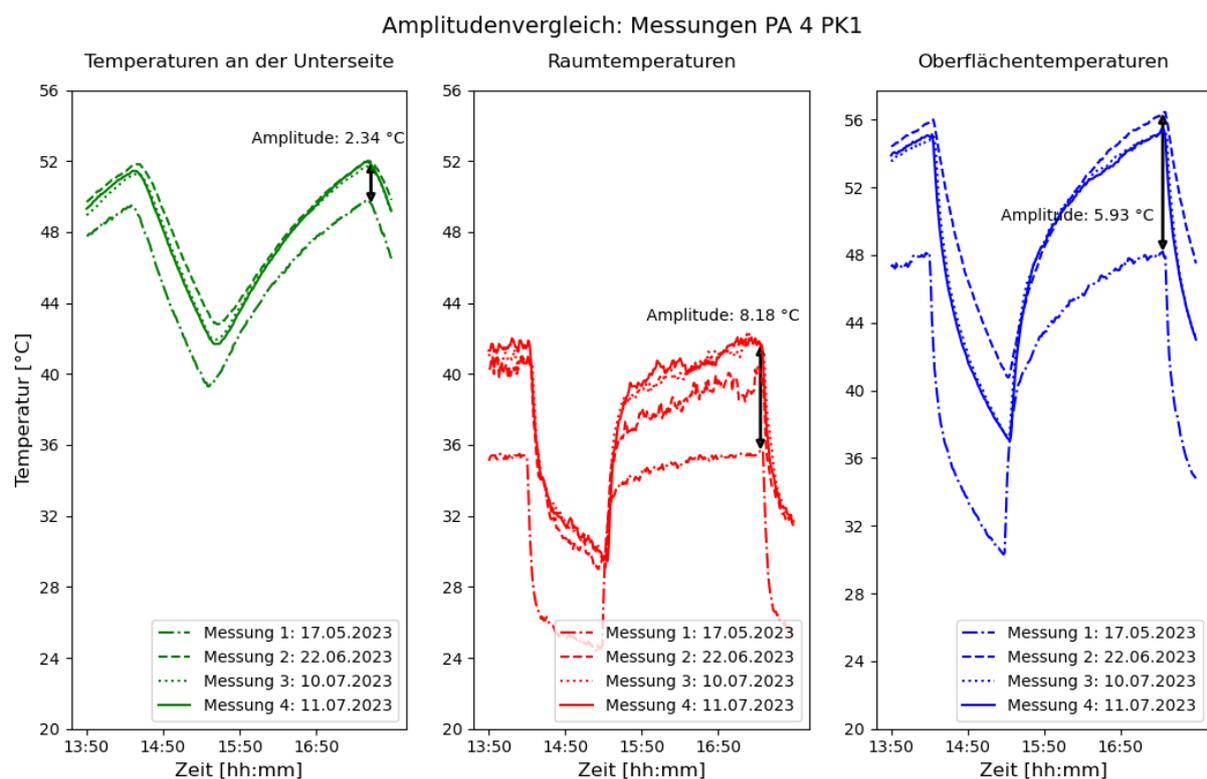


Abbildung 3-17 Abweichungen der Temperaturmessungen desselben Probekörpers: PA 4 Probekörper 1

Mögliche externe Einflussfaktoren auf die Streuung der ermittelten Messwerte umfassen:

- Änderung der Umgebungstemperatur im nicht klimatisierten Raum, welche auf den Sommeranbruch zurückzuführen sind. Messung 1, welche am 17.05.2023 stattgefunden hat zeigt deutlich geringere Werte als die anderen Messungen;
- Einmessungsfehler, welche beim Ein- und Ausbau der Probekörper im Prüfstand auftreten wie zum Beispiel eine geringe Schiefelage der Lampe, oder leichte Ungenauigkeiten bei der Platzierung der Höhe des Raumtemperatursensors auf 2-3cm über der Belagsoberfläche (Die Einmessung erfolgte nach Abmessungen in Abbildung 3-13);
- Die Bohrtiefe des Bohrloches für den Oberflächentemperatursensor wurde auf 1cm geplant, kann aber durch die Bohrung in das anisotrope Gesteinsgerüst nicht garantiert werden;
- Die Verortung von zwei Prüfständen im selben Raum, wodurch der Einfluss der zwei Wärmequellen im Abstand von einem Meter auf den jeweils anderen Prüfstand nicht ausgeschlossen werden kann;
- Veränderungen der Form des Prüfkörpers durch die ständige Erhitzung und Abkühlung auf der unebenen Dränageschicht.

Eine weitere Vergleichsmessung wurde am sehr dichten Gussasphalt (Probekörper 1) wiederholt. Zwar wurde dieser Probekörper nur drei Mal getestet, Ausreißer und Messfehler scheinen bei diesem Mischgut dennoch weniger Auswirkungen zu haben, siehe Abbildung 3-18

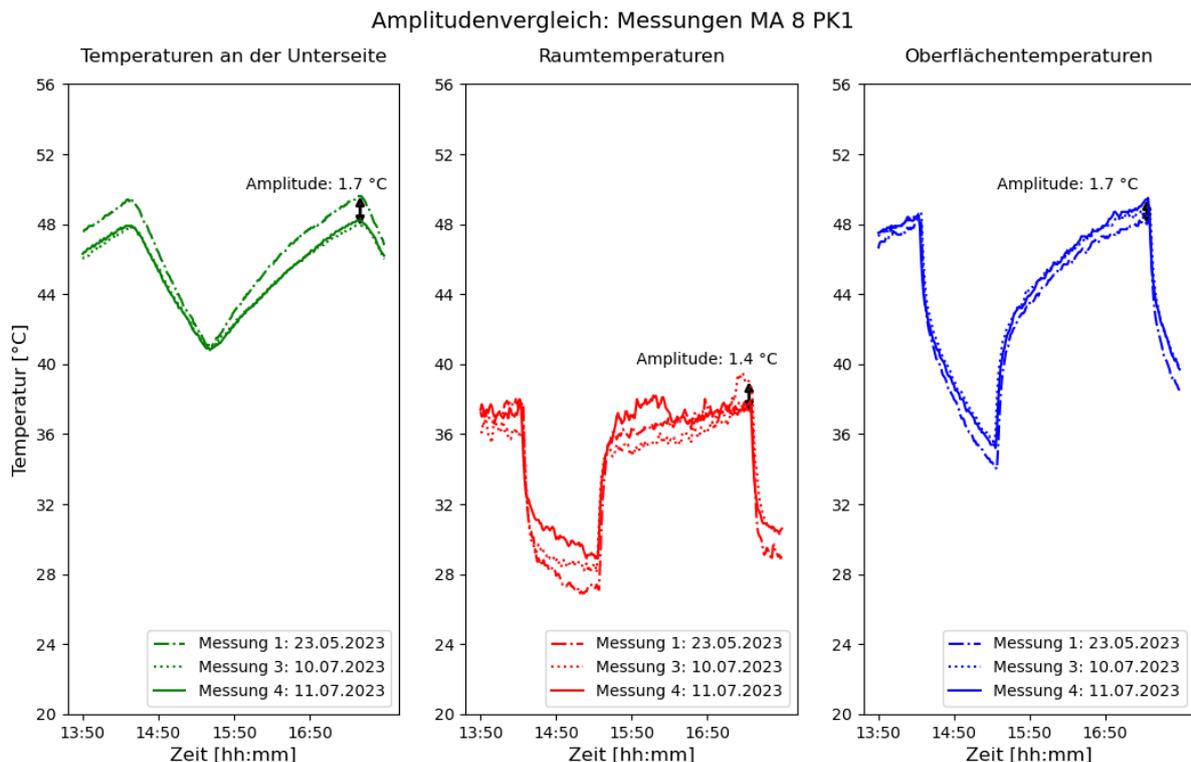


Abbildung 3-18 Abweichungen der Temperaturmessungen desselben Probekörpers: MA 8 Probekörper 1

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, werden dennoch nur die durch die Messung der Sensoren ermittelten Temperaturen an der Unterseite der unterschiedlichen Probekörper verglichen. Um Ausreißer zu minimieren, wurde aus den zwei Probekörpern jedes Mischgutes ein arithmetisches Mittel der Vergleichsparameter, welche in Kapitel 3.6 näher erläutert werden, gebildet. Unterschiede zwischen den einzelnen Mischgutkonzeptionen werden unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Abbildung 3-17 aufgezeigt.

Aufgrund der in Abbildung 3-17 dargestellten Messungenauigkeiten der Oberflächentemperaturen wurden zu ihrem Vergleich stattdessen die Aufnahmen der Thermokamera herangezogen um die oben angeführten Fehlerquellen zu reduzieren.

### 3.4 Umrechnungsfaktor der gemessenen Albedo-Werte

Da der Einstrahlwinkel eine große Auswirkung auf die gemessenen Albedo-Werte hat, aber zeitgleich der konzipierte Prüfstand platztechnisch begrenzt ist, wurden Zusammenhänge gesucht, um aussagekräftige Werte zu erhalten [36].

In [36] wurden verschiedene Einfallswinkel miteinander verglichen. Diese Studie stellt eindeutig fest, dass Albedo-Werte, welche früh morgens oder spät abends gemessen wurden, beziehungsweise im Labor flache Einfallswinkel aufweisen, höher sind. Außerdem wurde eine Oberfläche bei verschiedenen Bestrahlungseinfallswinkel gemessen und die gemessene Einstrahlung des nach oben gerichteten Pyranometers dokumentiert (siehe Abbildung 3-19) [36].

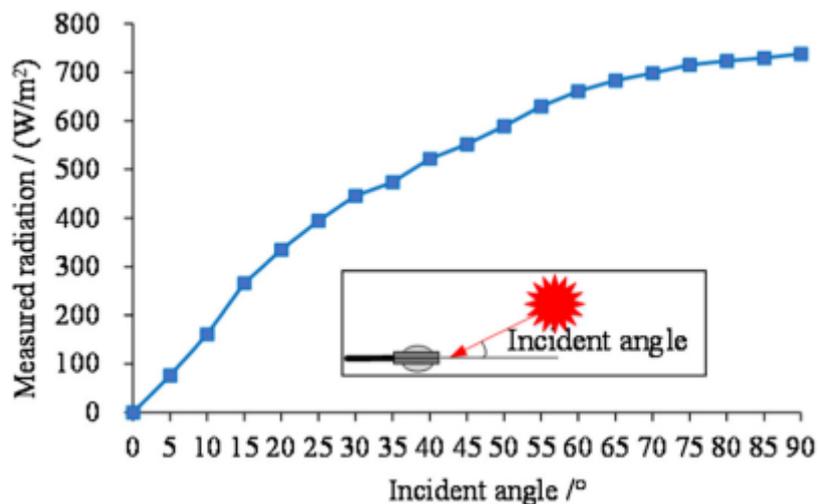


Abbildung 3-19 gemessene einfallende Strahlung auf dem nach oben gerichteten Pyranometer unter verschiedenen Einfallswinkeln [36]

Zur Adaptierung der gemessenen Werte im Prüfstand zu vergleichbaren Albedo-Werten wurde der in Abbildung 3-19 dokumentierte Zusammenhang des in [36] untersuchten Belags linear interpoliert. Eine Strahlung von 450W/m<sup>2</sup> in einem Winkel von 28° und eine Strahlung

von 750W/m<sup>2</sup> bei 90° können abgelesen werden, wobei 28° den Einfallswinkel im Prüfstand darstellt, siehe Abbildung 3-13. Das Verhältnis der beiden Werte beträgt 1,67 und wird in weiterer Folge als linearer Winkelfaktor mit dem Messwert der Einstrahlung des nach oben gerichteten Pyranometer multipliziert. Formel (1) verändert sich im Zuge dieser Arbeit dementsprechend zu Formel (2), wobei  $I_{inf,28}$  die einfallende Sonneneinstrahlung unter einem Einstrahlwinkel von 28° und  $\alpha_{90}$  den mit der Literatur vergleichbaren Albedo bei einem Einstrahlwinkel von 90° bezeichnet.

$$\alpha_{90} = \frac{I_{ref}}{I_{inc,28} * 1,67} \quad (2)$$

Es ist wichtig zu erwähnen, dass sich die Auswertung in [36] auf eine einzelne Probe bezieht, das verwendete Messgerät in [36] nicht bekannt ist und der Zusammenhang in Abbildung 3-19 nicht linear ist. Dementsprechend wären weitere Vergleichswerte notwendig, um auf eine noch validere Umrechnungsformel schließen zu können. Die lineare Interpolation dient dementsprechend nur einer Annäherung der Einstrahlung bei 90°.

### 3.5 Wasserspeicherkapazität

Nach Formel (3) für die Wasseraufnahme infolge Wasserlagerung nach ÖNORM EN 1170-6 für vorgefertigte Betonerzeugnisse [40] wurde die Wasserspeicherkapazität der halbstarren Deckschichten verglichen. Hierbei stellt  $\gamma$  die Wasseraufnahme [%],  $m_d$  die Trockenmasse und  $m_w$  die Feuchtmass des Prüfkörpers dar. Bei der Messung wurden die Probekörper mit einem feuchten Tuch abgewischt, um überflüssiges Oberflächenwasser zu entfernen, bevor sie abgewogen wurden [40].

$$\gamma = \frac{m_w - m_d}{m_d} * 100 \quad (3)$$

Die Umgebungsrandbedingungen, wie unter anderem die Temperatur, sowie die Dauer der Lagerung im Wasserbad von einer Stunde vor der Nasswiegung, wurden nach ÖNORM EN 12697-6 geregelt. Somit können die  $\gamma$ -Werte mit denen der Raumdichteanalyse der in diesem Projekt untersuchen Marshall-Festigkeits-Prüfungen von Asphaltprobekörpern ohne Schlämmen verglichen werden. Diese werden jedoch – wie bereits erwähnt – in dieser Diplomarbeit nicht weiter erläutert.

Die Messung der Wasseraufnahme ist ausschlaggebend für die Bewertung der Fähigkeit der Mischgutkonzeptionen, Regenwasser in der Deckschicht zu speichern und in weiterer Folge für die Analyse des Temperaturverhalten der Messungen auf Basis der entwickelten Bewässerungskonzepte.

### 3.6 Vergleichsparameter

Um die Temperaturen der Probekörper vergleichen zu können, werden Vergleichsparameter definiert. Hierbei wird die in Abbildung 3-20 eingeführte Terminologie verwendet.

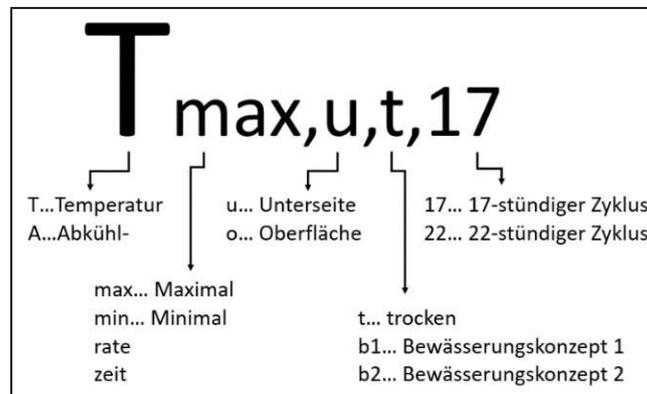


Abbildung 3-20 Terminologie der Vergleichsparameter

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 3-21, Abbildung 3-22, Abbildung 3-23 und Abbildung 3-24) ist jeweils die Temperaturentwicklung an der Unterseite desselben Probekörpers (PA 4 PK1) dargestellt. Die ersten 3 Abbildungen (Abbildung 3-21, Abbildung 3-22 und Abbildung 3-23) stellen die Parameter der 17-stündigen Versuche dar. Bei diesen Versuchen wurde eine kurzfristige Abkühlrate, welche nach der 14. Stunde einsetzt und bis zur 15. Stunde andauert, die lokale Maximaltemperatur 17 Stunden nach Versuchsstart sowie die lokale Minimaltemperatur zur 15. Stunde an der Unterseite der Platten dokumentiert. Außerdem wurde die Maximaltemperatur zur 17. Stunde an der Oberfläche der Platte durch eine Wärmebildaufnahme ausgewertet. Die Erläuterung des Vorgangs bei Bewässerungskonzept 1 und 2 wird in Kapitel 3.2 beschrieben. Abbildung 3-24 zeigt die Vergleichsparameter des 22-stündigen Zyklus. Die lokalen Maxima werden hier nach 12 h und die lokalen Minima nach 10 h dokumentiert. Bei dem 22-Stunden Zyklus wird eine mittelfristige Abkühlrate, welche 3 Stunden dauert und ab der 7. Stunde gemessen wird ausgewertet. Zusätzlich wird die Zeitdauer, welche die Probekörper benötigen, um ausgehend von Parameter  $T_{\max,u,t,22}$  auf  $28^{\circ}\text{C}$  abzukühlen, aufgezeichnet und verglichen. Der Grenzwert von  $28^{\circ}\text{C}$  wurde so gewählt, dass die Raumtemperaturen während der gesamten Prüfseason nicht überschritten werden. In den Temperaturverläufen im Anhang ist dokumentiert, dass alle Temperaturen diesen Grenzwert zu Beginn des Versuches nicht überschreiten. Im 22h-Zyklus wurden keine Wärmebildaufnahmen gemacht.

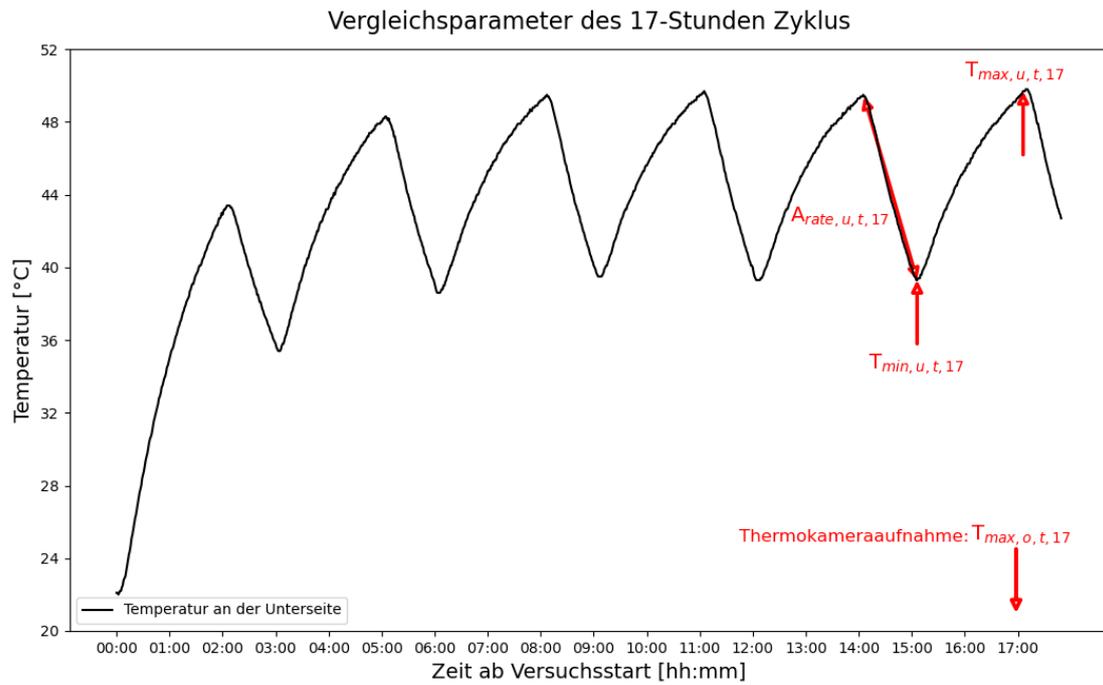


Abbildung 3-21 Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus im trockenen Zustand

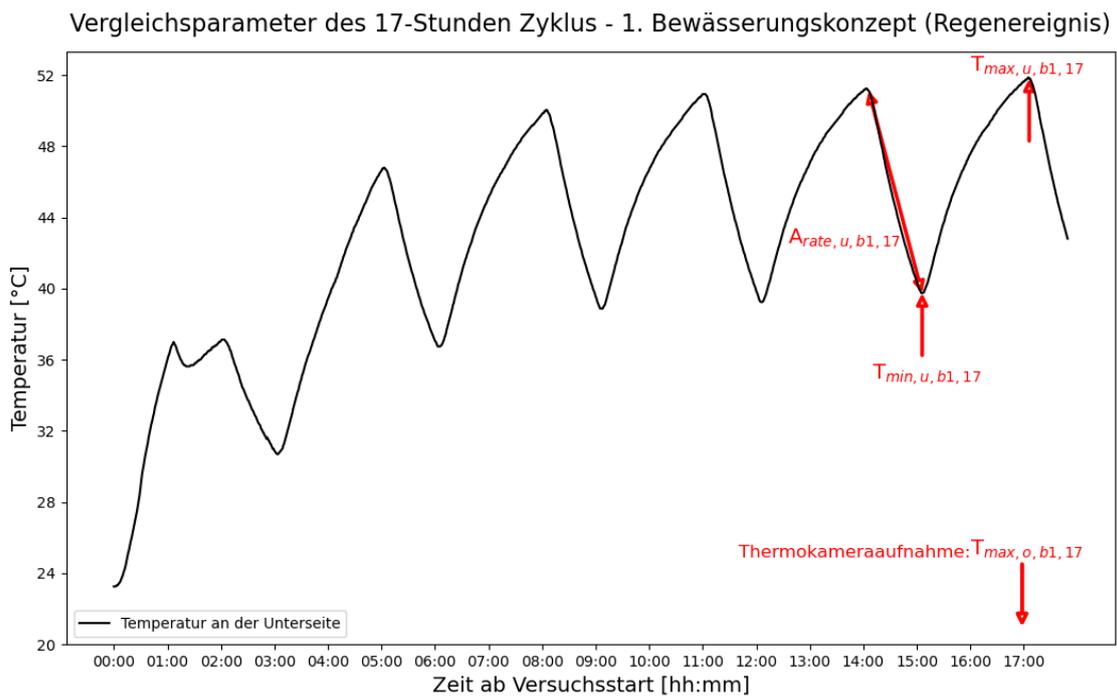


Abbildung 3-22 Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus – Bewässerungskonzept 1

Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus - 2. Bewässerungskonzept (Hohlraumfüllung)

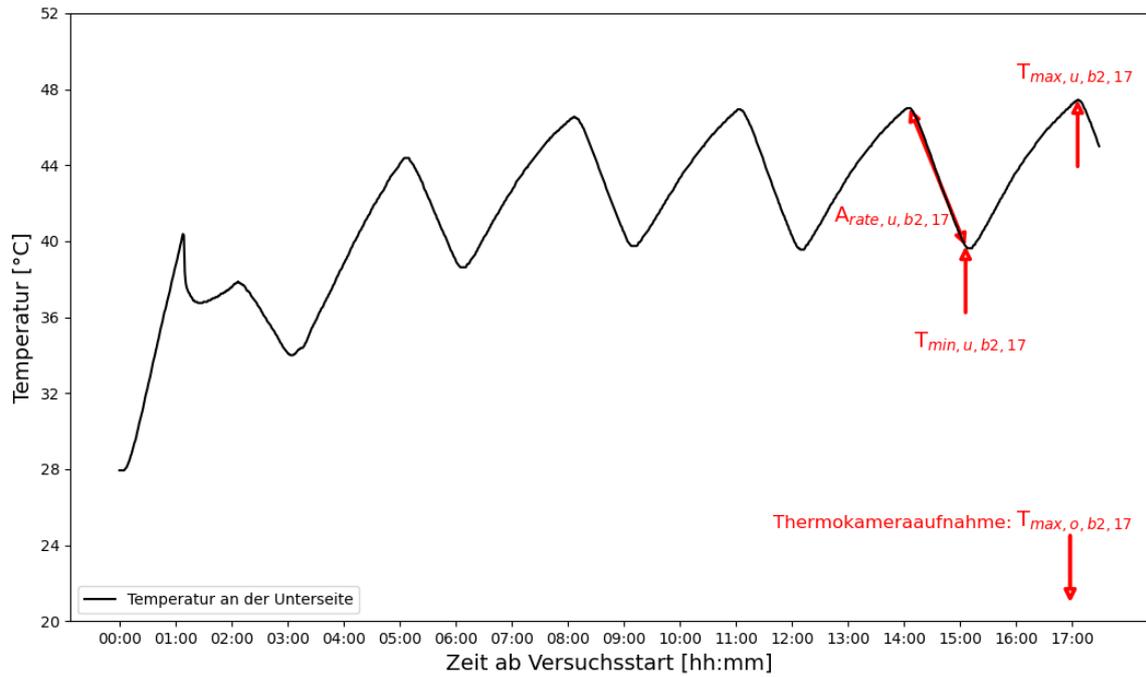


Abbildung 3-23 Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus – Bewässerungskonzept 2

Vergleichsparameter des 22-Stunden Zyklus

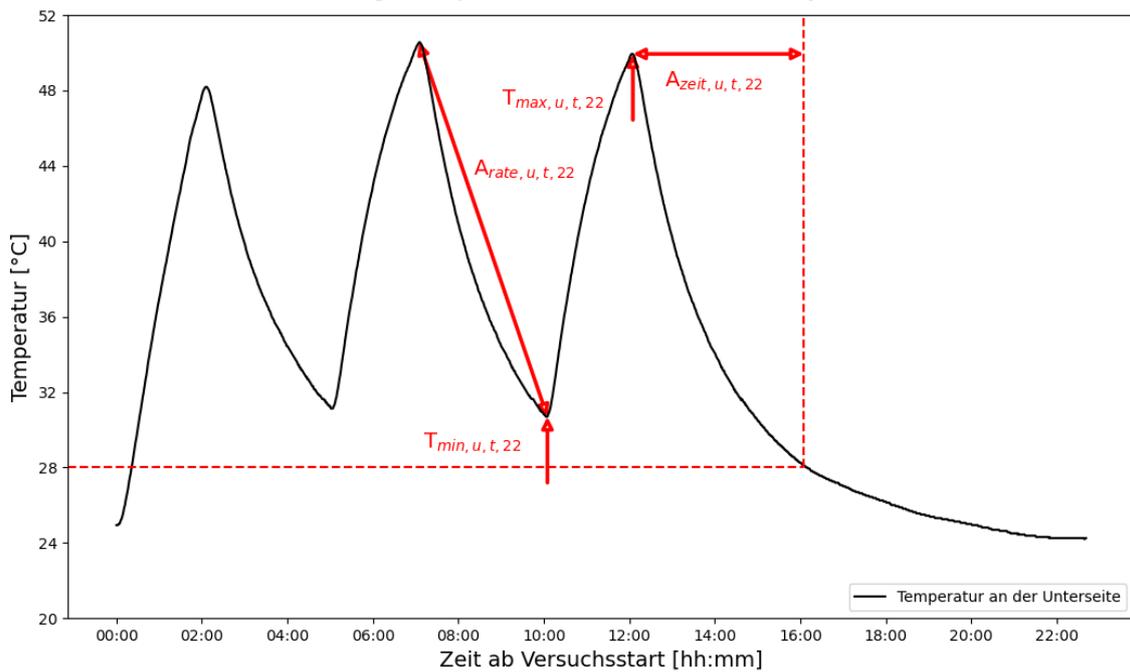


Abbildung 3-24 Vergleichsparameter des 22-Stunden Zyklus im trockenen Zustand

## 4 Forschungsergebnisse

Der Fokus der Dokumentation der Forschungsergebnisse liegt darin, die Fülle an gemessenen Werten möglichst übersichtlich darzustellen und vergleichbar zu machen. Im Anhang dieser Arbeit finden sich die gesammelten Temperaturverläufe der drei Sensoren und Wärmebildaufnahmen jedes getesteten Asphaltes in vollständiger Form.

Im Folgenden werden die nach der Methodik in Kapitel 3 erläuterten Messdaten präsentiert.

### 4.1 Albedo und Wasserspeicherkapazität

Tabelle 4-1 gemessene Albedo-Werte und Wasserspeicherkapazität der Probekörper

		$\alpha_{90}$ []	$\alpha_{90}$ [] $\emptyset$	$\nu$ [%]	$\nu$ [%] $\emptyset$
PA 4	PK1	0,149	0,138		
PA 4	PK2	0,127			
PA 8	PK1	0,174	0,165		
PA 8	PK2	0,155			
AC 11 trans	PK1	0,296	0,288		
AC 11 trans	PK2	0,279			
MA 8	PK1	0,138	0,143		
MA 8	PK2	0,148			
HSD 8	PK1	0,340	0,321	2,216	2,215
HSD 8	PK2	0,301		2,214	
AC 8 gelb	PK1	0,501	0,463		
AC 8 gelb	PK2	0,425			
HSD 8 Zeo	PK1	0,396	0,369	3,013	3,301
HSD 8 Zeo	PK2	0,342		3,589	

Durch die Messung der Albedo-Werte können Aussagen über das Rückstrahlverhalten der Probekörper getätigt werden. Dieses hängt stark von der Helligkeit und Farbe der Oberflächen ab. Durch die Kornumhüllung der nicht sand-gestrahnten Mischgüter mit Bitumen haben die offenporigen Asphalte (PA 4 und PA 8) und der Gussasphalt (MA 8) eine niedrige Albedo. In der Literatur [14] haben frisch eingebaute Asphalte, bei denen die oberflächennahe bituminöse Schicht noch nicht durch Abnutzung abgetragen ist, Albedo-Werte in der Größenordnung von 0,05. Mit diesen Werten dürfen die in dieser Studie durchgeführten Pyranometer-Messungen aufgrund der in Kapitel 3.4 erwähnten Grenzen der Messung nicht verglichen werden. Dennoch ist ein Vergleich zwischen den Mischgütern aufgrund der gleichbleibenden Laborbedingungen aussagekräftig.

Im Vergleich zu den durch das Bitumen eingefärbten, schwarzen Asphalten zeigen die restlichen Mischgüter alle etwa doppelt so hohe oder höhere Albedo-Werte (siehe Abbildung 4-1). Der Asphaltbeton mit synthetisch transparentem Bindemittel und Größtkorn 11mm weist einen etwas geringeren Wert auf als die halbstarren Deckschichten. Die meiste Rückstrahlung geht von dem durch Titandioxid und gelbes Pigment eingefärbten AC 8 aus. Diese streut bei den beiden Probekörpern jedoch stark und erreicht bei Probekörper 1 einen Maximalwert von 0,501, siehe Tabelle 4-1.

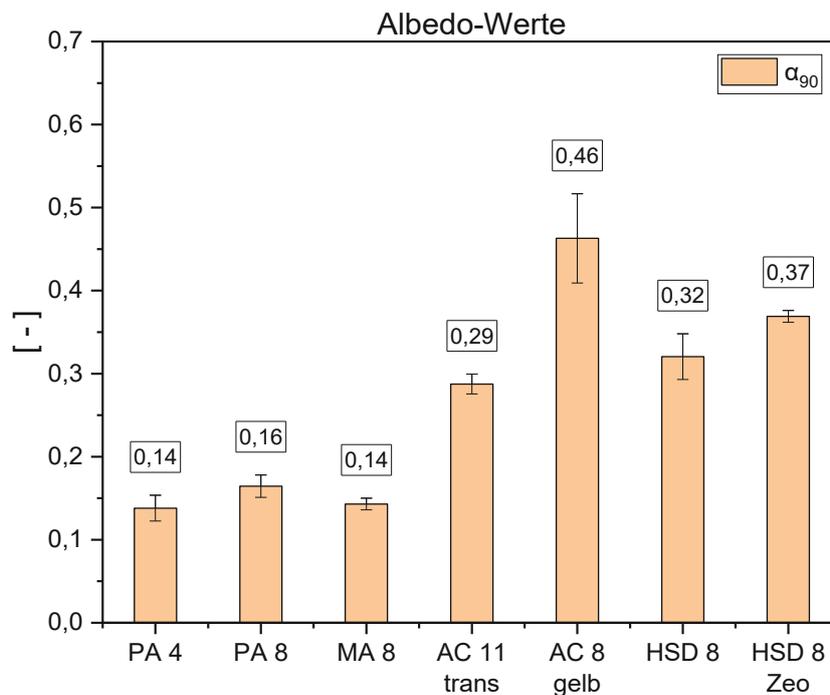


Abbildung 4-1 Albedo-Werte der Platten

Durch die Zugabe von Zeolithen wurde eine erhöhte Wasseraufnahme erwartet. In Tabelle 4-1 können die ermittelten  $\gamma$ -Werte ausgelesen werden. Laut den Ergebnissen konnten die Probekörper der halbstarren Deckschicht ohne Zeolithen (HSD 8) im Durchschnitt 2,2% Wasser aufnehmen. Im Vergleich dazu war eine Wasseraufnahme von 3,3% bei dem mit Zeolithen modifizierten Mischgut möglich. Das entspricht einer Erhöhung der Wasserspeicherkapazität um 49%.

## 4.2 Temperaturentnahmen

Tabelle 4-2 stellt den Grundstein für die in den folgenden Unterkapiteln ausgewerteten Daten. In dieser Tabelle können alle für diese Arbeit ausgewerteten Temperatur-Vergleichsparameter (erläutert in Kapitel 3.6) ausgelesen werden.

Tabelle 4-2 Vergleichsparameter der Probekörper - Temperaturdaten

Versuche trocken:		$T_{max,u,t,17}$ [°C]	$T_{min,u,t,17}$ [°C]	$A_{rate,u,t,17}$ [°C/h]	$T_{max,o,t,17}$ [°C]	$T_{max,u,t,22}$ [°C]	$T_{min,u,t,22}$ [°C]	$A_{rate,u,t,22}$ [°C/h]	$A_{zeit,u,t,22}$ [h]
PA 4	PK1	49,8	39,3	10,2	56,2	49,9	30,7	6,6	4,1
PA 4	PK2	51,1	41,2	9,2	60,6	45,4	30,2	5,2	3,9
PA 8	PK1	48,9	39,1	9,3	57,1	48,1	30,3	6,1	3,8
PA 8	PK2	49,3	39,2	9,9	55,7	45,6	29,9	5,4	3,7
AC 11 trans	PK1	46,7	38,5	8,2	52,1	41,9	29,7	4,0	3,8
AC 11 trans	PK2	45,2	38,0	7,0	49,9	40,1	29,5	3,5	3,6
MA 8	PK1	49,6	41,0	8,5	54,9	46,5	32,6	4,6	5,2
MA 8	PK2	50,3	41,4	8,9	55,8	47,8	32,2	5,1	5,1
HSD 8	PK1	47,5	39,6	7,3	53,7	42,4	31,1	3,9	4,3
HSD 8	PK2	47,3	40,0	6,7	54,1	42,7	31,0	4,0	4,2
AC 8 gelb	PK1	43,9	38,4	5,0	49,2	41,4	31,6	3,5	4,7
AC 8 gelb	PK2	45,6	38,3	6,9	50,3	43,6	31,2	4,4	4,5
HSD 8 Zeo	PK1	42,9	37,1	5,4	53,5	44,1	30,4	4,8	3,8
HSD 8 Zeo	PK2	44,4	36,0	7,0	51,2	41,9	29,4	4,2	3,6

Versuche unter Befeuchtung:		$T_{max,u,b,17}$ [°C]	$T_{min,u,b,17}$ [°C]	$A_{rate,u,b,17}$ [°C/h]	$T_{max,o,b,17}$ [°C]	$T_{max,u,b,22}$ [°C]	$T_{min,u,b,22}$ [°C]	$A_{rate,u,b,22}$ [°C/h]	$T_{max,o,b,22}$ [°C]
PA 4	PK1	51,9	39,8	11,5	58,3	47,4	39,6	7,4	55,5
PA 4	PK2	51,3	39,8	11,3	59,0	44,9	38,0	6,6	54,5
PA 8	PK1	49,8	38,4	10,8	54,9	43,9	37,1	6,3	57,2
PA 8	PK2	50,6	39,6	10,0	57,5	43,9	37,5	6,0	54,1
AC 11 trans	PK1	43,2	37,0	5,8	51,5				
AC 11 trans	PK2	44,0	37,8	6,0	53,7				
MA 8	PK1	46,6	39,2	7,0	53,9				
MA 8	PK2	46,8	38,8	7,3	52,2				
HSD 8	PK1	44,2	37,8	6,0	53,7				
HSD 8	PK2	43,9	38,2	5,4	52,8				
AC 8 gelb	PK1	44,2	38,1	5,4	50,1				
AC 8 gelb	PK2	43,2	37,8	5,2	49,5				
HSD 8 Zeo	PK1	43,8	37,1	6,2	50,8				
HSD 8 Zeo	PK2	42,4	36,2	5,6	54,2				

In den folgenden Abbildungen werden für die Versuche unter trockenen Bedingungen Mittelwerte errechnet, die mit einem X in den Balkendiagrammen gekennzeichnet sind. Diese dienen dazu, einen Vergleich zwischen den Belägen zu verdeutlichen und die Temperatur-Tendenz zu unterstreichen. In den Diagrammen der Versuche mit befeuchteten Probekörpern wird kein Mittelwert gebildet. Der Referenzwert bezieht sich auf den 17-Stunden Zyklus mit Befeuchtungskonzept 1, da hier Werte für jeden Probekörper vorliegen.

#### 4.2.1 Maximaltemperaturen an den Unterseiten der Platten

In Abbildung 4-2 sind die arithmetischen Mittelwerte der Maximaltemperaturen an der Unterseite der Platte im trockenen Zustand als Balkendiagramm dargestellt. Die Standardabweichungen der Versuche können ebenfalls abgelesen werden. Bei der Auswertung beider Zyklen in dieser Abbildung finden sich die Spitzenwerte bei den offenporigen Asphalten und dem Gussasphalt. Die restlichen vier Mischgutkonzeptionen weisen geringere Temperaturen auf. Die Reihung dieser variiert jedoch bei den Parametern  $T_{max,u,t,17}$  und  $T_{max,u,t,22}$ . Bei der 22-Stunden-Messung sticht der AC 11 transparent mit einer Durchschnittsmaximaltemperatur von 41°C heraus. Im 17-Stunden Zyklus befinden sich die niedrigsten Maximaltemperaturen bei dem gelben AC 8 und der halbstarren Deckschicht mit Zeolithen. Generell heben sich die Parameter der 4 helleren Beläge von den offenporigen Asphalten und dem Gussasphalt ab. Zwischen PA 4 und HSD 8 Zeolith liegt eine Differenz der Mittelwerte von 5,8°C.

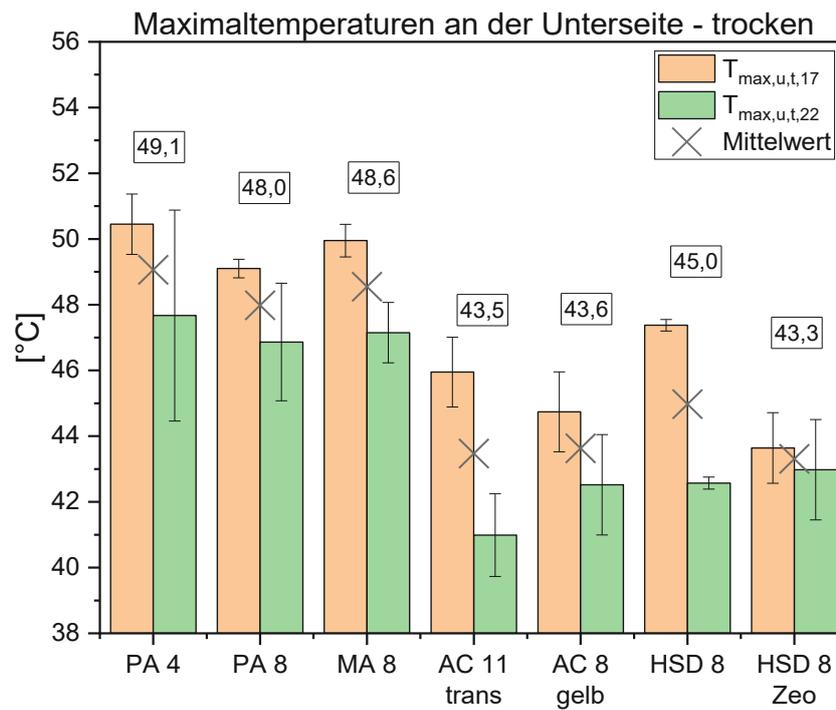


Abbildung 4-2 Maximaltemperaturen an der Unterseite der Platte im trockenem Zustand

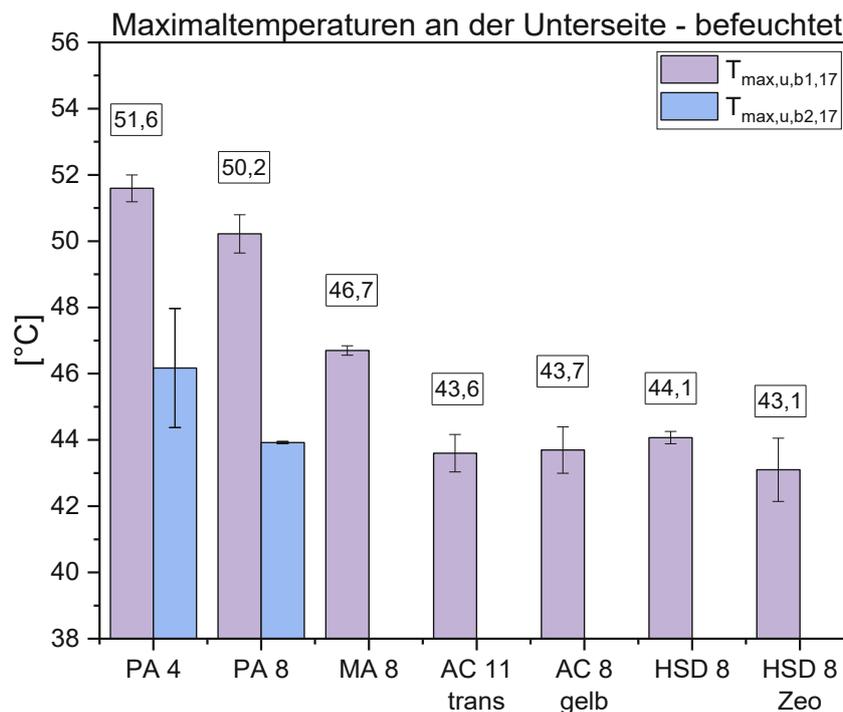


Abbildung 4-3 Maximaltemperaturen an der Unterseite der Platte im befeuchteten Zustand

Im befeuchteten Zustand können die Maximaltemperaturen an der Unterseite in Abbildung 4-3 ausgelesen werden. Die höchsten aufgenommenen Temperaturen wurden an den offenporigen Asphalten im Bewässerungszustand 1 festgestellt. Bei ausreichender Wassermenge (Bewässerungszustand 2) finden sich auch bei den porösen Belägen niedrigere Temperaturen. Dieser Effekt lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass das Abrinnen des versickerten Wassers aus dem Prüfstand schwer möglich war.



Abbildung 4-4 Vergleich Wasserrückstand im Prüfstand nach 17h-Zyklus (links: PA 8, rechts: AC 11)

Abbildung 4-4 zeigt die ausgebauten Holzboxen der Prüfstände nach einem 17-stündigen Versuch desselben Tages unter Bewässerungskonzept 1. Die linke Kiste zeigt die Restfeuchte eines getesteten PA 8 und die rechte die eines AC 11 Probekörpers. Es scheint so, als wäre es bei den offenporigen Belägen möglich, dass die Menge von 234 ml Wasser während des Versuches zu einem Großteil oberflächennahe gebunden werden und verdunsten konnte. Die Maximaltemperaturen an der Unterseite der porösen Asphalte im feuchten Zustand, in Abbildung 4-3 ähneln den Parameter  $T_{\max,u,t,17}$  im trockenen Zustand in Abbildung 4-2. Im Gegensatz dazu könnte das abgeronnene Wasser im Prüfstand durch die Wasseranreicherung des Holzes und der Dränageschicht die Abkühlung des AC 11 unterstützen. Auch bei den PA ist eine Abkühlung durch erhöhte Wassermenge (Bewässerungszustand 2) zu erkennen, siehe Parameter  $T_{\max,u,b2,17}$ . Die Abkühlung der Asphaltsschichten von unten durch Stehwasser entspricht nicht dem Straßenentwässerungsprozess der Realität.

Um diese Vermutungen zu testen wäre die Befeuchtung bei gleichzeitig ermöglichtem Abrinnen des Wassers am Boden der Holzboxe in weiteren Studien von Interesse.

In Abbildung 4-3 fällt außerdem auf, dass die 4 Asphalte mit höherer Albedo – wie auch im trockenen Zustand – geringere Maximaltemperaturen haben. Es kann ein Temperaturunterschied von 2-3°C zwischen diesen und dem Gussasphalt ausgelesen werden.

Vergleicht man die Temperaturunterschiede der trockenen und befeuchteten 17-Stunden Messung (Parameter  $T_{\max,u,t,17}$  und  $T_{\max,u,b1,17}$ ), fällt eine durchschnittliche Temperatursenkung von 47,4°C auf 44,1°C des HSD 8 und von 50,0°C auf 46,7°C des MA 8 auf. Es ist auch eine Senkung der Durchschnittstemperaturen der Asphaltbetone und halbstarren Deckschicht mit

Zeolithen festzustellen, diese fallen jedoch geringer aus. Aus den Ergebnissen lässt sich nicht ableiten, ob die hohe Wasserspeicherkapazität der halbstarren Deckschichten und der offenporigen Asphalte einen Einfluss auf die Temperatursenkung im befeuchteten Zustand haben.

### 4.2.2 Maximaltemperaturen an den Oberflächen der Platten

Die Mittelwerte der Maximaltemperaturen an der Oberfläche, generiert aus Thermokameraaufnahmen, zeigen einen etwas anderen Trend (Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6), als jene an der Unterseite (Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3). Die gemessenen Temperaturen unter direkter Einstrahlung der Lampe sind in etwa 8°C höher als jene, welche an der Unterseite gemessen wurden. Daher wurde auch die Temperaturskala der folgenden zwei Abbildungen um 8°C nach oben verschoben. Der Maßstab ist ident zu den vorherigen Balkendiagrammen unter Überschrift 4.2.1.

Die Temperaturspannweite der trockenen Versuche ist, anders als bei den Temperaturen an der Unterseite, deutlicher ausgeprägt durch eine Differenz der Mittelwerte zwischen AC 8 gelb und PA 4 von 8,6°C, statt 5,8°C zwischen PA 4 und HSD 8 Zeolith (unter Überschrift 4.2.1).

$T_{\max,o,t,17}$  und  $T_{\max,o,b,1,17}$ , die Vergleichsparameter der Asphaltmischungen im trockenen und befeuchteten Zustand (Bewässerungskonzept 1) sind sehr ähnlich, siehe Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6. Allein die Mittelwerte der Parameter des AC 11 transparent und des MA 8 weichen im trockenen und befeuchteten Zustand voneinander ab. Die Mittelwerte der Maximaltemperaturen des Gussasphaltes konnten durch die Befeuchtung um 2,3°C verringert werden. Bei den Temperaturen des Asphaltbetons mit Größtkorn 11mm geht der Trend in die andere Richtung und es konnten im Durchschnitt um 1,6°C höhere Temperaturen beobachtet werden. Es handelt sich bei diesen Abweichungen um kleine Temperaturdifferenzen, über welche aufgrund der beschränkten Datenmenge zu derzeitigem Stand keine Aussagen getroffen werden können.

Durch ihr gleichbleibendes, konstantes Verhalten im feuchten und trockenen Zustand liefern die aufgezeichneten Oberflächentemperaturen der restlichen Beläge aussagekräftige Ergebnisse. Die Probekörper des gelben Asphaltbeton haben in beiden Zuständen die niedrigsten Maximaltemperaturen an der Oberfläche. Sie weisen – wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt – ebenso das höchste Rückstrahlvermögen auf. Eine Korrelation zwischen Oberflächentemperaturen und Albedo ist zufolge der Literaturrecherche gegeben. Die höchsten Oberflächentemperaturen sind an den offenporigen Asphalt lokalisiert worden. Im Gegensatz zu den Temperaturen an der Unterseite ändert die Befeuchtungsmenge die absoluten gemessenen Oberflächentemperaturen nur bei dem porösen Asphalt mit kleinerer Körnung (PA4) deutlich, siehe Abbildung 4-6. Ob durch die kapillare Wirkung der Poren das angesammelte Wasser an die Oberfläche transportiert werden kann, sollte in weiteren Studien untersucht werden.

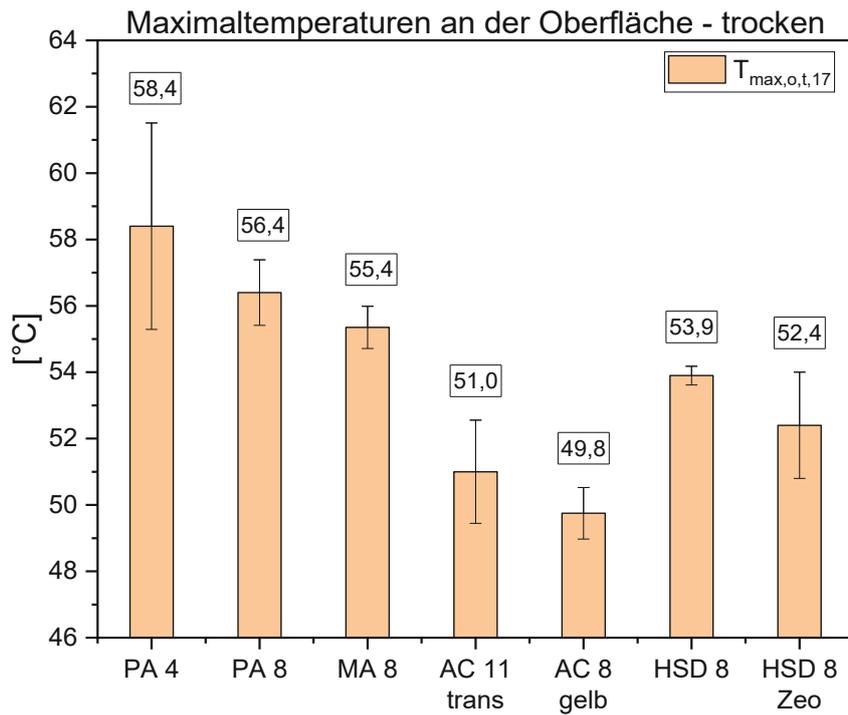


Abbildung 4-5 Maximaltemperaturen an der Oberfläche der Platten im trockenen Zustand

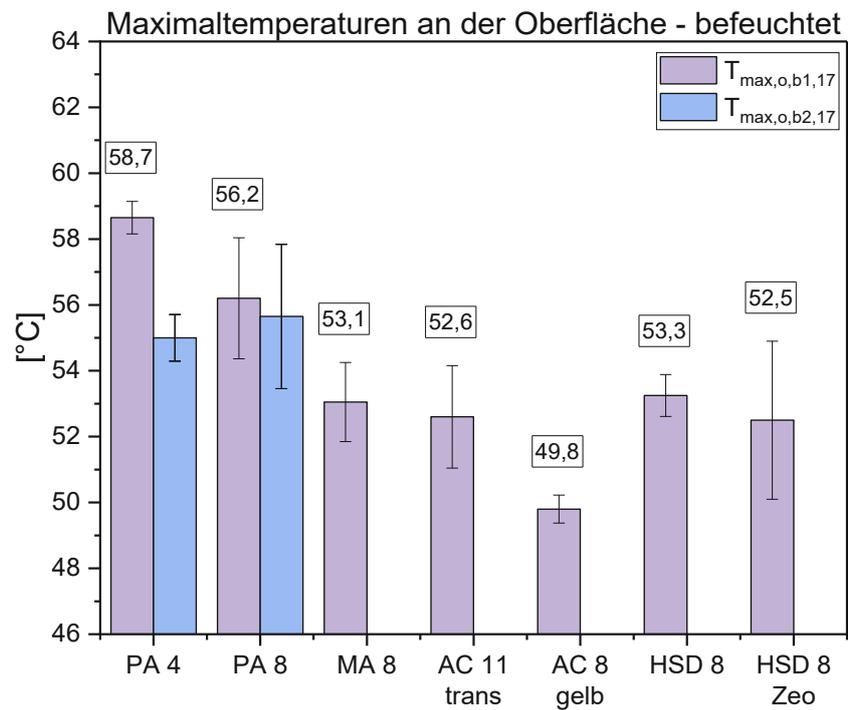


Abbildung 4-6 Maximaltemperaturen an der Oberfläche der Platten im befeuchteten Zustand

Um eine Aussage über das gesamte Oberflächentemperaturverhalten der Beläge treffen zu können, müssen die 2D-Wärmebilder 17 Stunden nach Versuchsstart in vollständiger Form analysiert werden. Für alle verglichenen Thermoaufnahmen in den folgenden Abbildungen

(Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8) gilt die Skala 20°C-60°C. Diese Skala gilt ebenso für im Anhang angefügt Thermoaufnahmen.

Abbildung 4-7 zeigt Wärmebildaufnahmen der offenporigen Asphalte PA 4 Probekörper 1 und PA 8 Probekörper 1, sowie zum Vergleich den Gussasphalt MA 8 Probekörper 1. HS1 markiert die gemessene Maximaltemperatur, welche in Tabelle 4-2 unter Parameter  $T_{\max,o,t,17}$  (Bild 1: PA 4, Bild 3: PA 8 und Bild 5: MA 8), sowie Parameter  $T_{\max,o,b1,17}$  (Bild 2: PA 4, Bild 4: PA 8 und Bild 6: MA 8) ausgelesen werden können und in Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6 ausgewertet wurden. Der Vergleich der 6 Aufnahmen der Asphalte zeigt deutliche Abweichungen der Temperaturverteilung im feuchten und trockenen Zustand. Im trockenen Zustand kommt es dort, wo die Einstrahlung am intensivsten ist, zu einer lokalisierten, mittigen Erwärmung der Probekörper. Bei Teilwasserfüllung der Dränageschicht durch Befeuchtung nach der ersten Stunde ist eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit zu beobachten. Die rechten Ecken der Probekörper, welche der Wärmequelle näher sind, erwärmen sich bei allen 3 Proben im befeuchteten Zustand stärker. Die Unterschiede der Wärmeausbreitung zwischen Gussasphalt und den offenporigen Asphalten könnte auf die unterschiedliche Dichte zurückzuführen sein. Der Gussasphalt, der kaum Poren hat, zeigt schon im trockenen Zustand eine ausgeprägte Wärmeverteilung über den gesamten Probekörper.

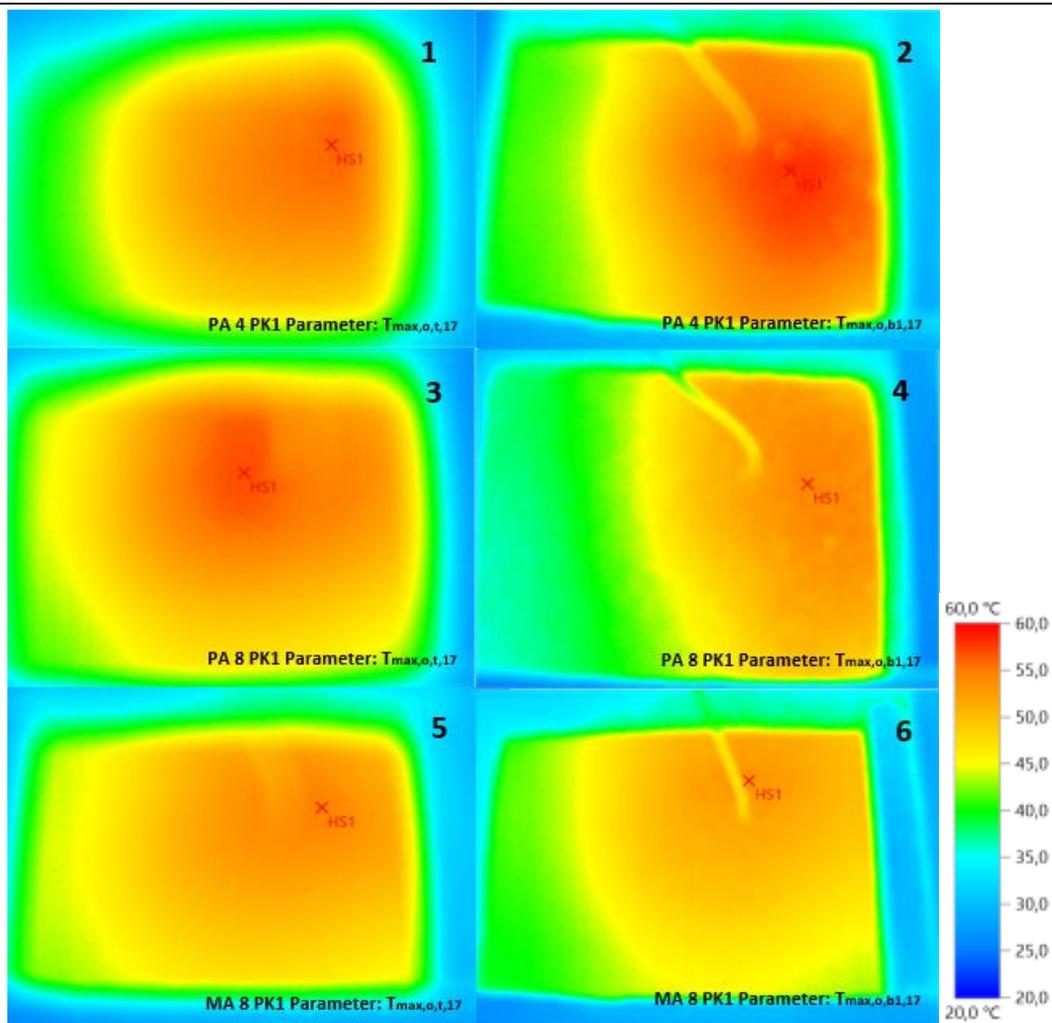


Abbildung 4-7 Wärmebildaufnahmen PA 4 PK1, PA 8 PK1 und MA 8 PK1 im trockenen (links) und bewässerten (rechts) Zustand

In Abbildung 4-8 können die Wärmebilder der Beläge MA 8, HSD 8, AC 11 mit synthetisch transparentem Bindemittel sowie AC 8 mit synthetisch transparentem Bindemittel und gelbem Farbpigment im trockenen Zustand verglichen werden. Es ist feststellbar, dass die beiden Asphaltbetone geringere Oberflächentemperaturen haben als die beiden anderen Probekörper. Sowohl der MA 8, als auch der HSD 8 haben eine glatte Oberfläche und kaum Hohlräume. Die Wärmeausbreitung ist bei diesen Probekörpern stärker ausgeprägt und es können höhere Temperaturen in größerer Distanz zu dem direkten Bestrahlungsgebiet verortet werden. Im Gegensatz dazu weisen die Bereiche, welche nicht im direkten Bestrahlungsschirm liegen in Bild 3 und 4 (Abbildung 4-8), nur geringe Temperaturen auf (35-40°C).

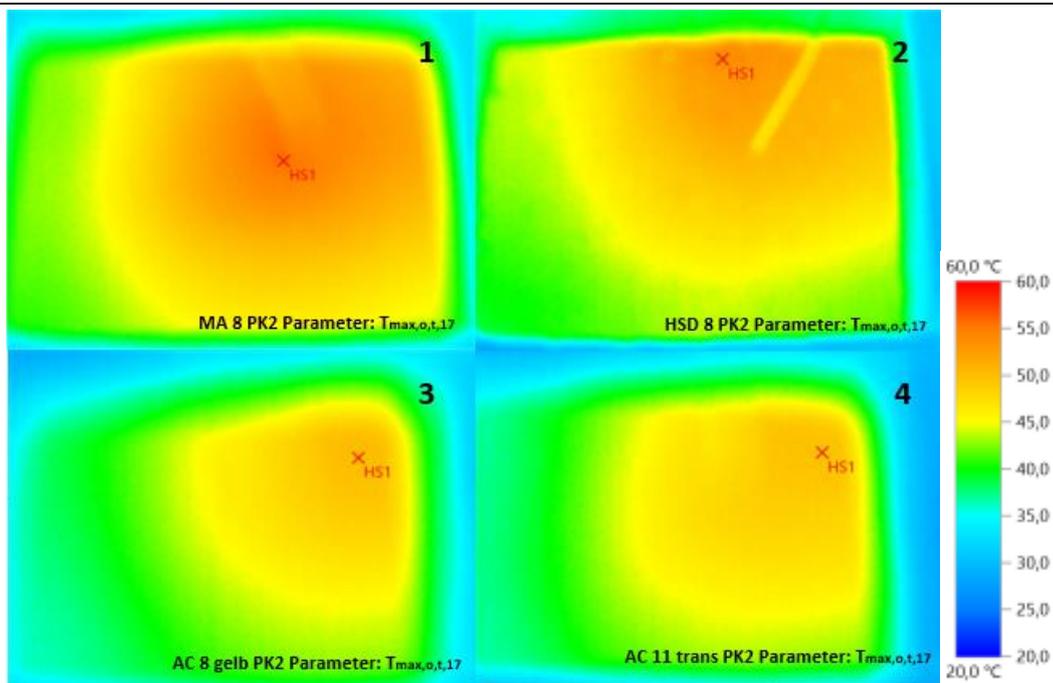


Abbildung 4-8 Wärmebildaufnahmen MA 8 PK2 (1), PA 8 Zementschlämme PK2 (2), AC 8 gelb PK2 (3) und AC11 PK2 (4) im trockenen Zustand

#### 4.2.3 Minimaltemperaturen an den Unterseiten der Platten

Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 stellen die gemessenen lokalen Minimaltemperaturen an der Unterseite der Probekörper dar. Der Unterschied zwischen den nassen und trockenen Proben ist hier nicht so markant feststellbar wie in den vorigen Abbildungen. Auch die Vergleichsparameter der Probekörper der gleichen Messungen sind nicht mehr eindeutig voneinander zu unterscheiden.

Die durchschnittlichen Höchsttemperaturen bei der trockenen Minimaltemperatur-Messung (Abbildung 4-9) wurden sowohl bei der 17h-Messung (Parameter  $T_{\min,u,t,17}$ ) als auch bei der 22h-Messung (Parameter  $T_{\min,u,t,22}$ ) bei dem Gussasphalt gemessen. Bei diesen Parametern haben die Probekörper des HSD 8 Zeolith die geringsten Temperaturen. Die Temperaturenspanne im trockenen Zustand ist sehr gering. Die Differenz der gemessenen Mittelwerte im trockenen Zustand vom MA 8 zum HSD 8 Zeolith beträgt nur 3,6°C. Aufgrund der recht unterschiedlichen Maximaltemperaturen ist dieses Ergebnis beachtlich. Es scheint so, als hätten die Belagsmaterialien, welche bei den Parametern  $T_{\max,u,t,17}$  und  $T_{\max,u,t,22}$  hohe Werte hatten und bei der Minimaltemperaturmessung an der Unterseite in Abbildung 4-9 dennoch niedrige Werte hatten, ein rasches Abkühlverhalten. Um das genauer zu untersuchen, dienen die Auswertungen des nächsten Kapitels (4.2.4).

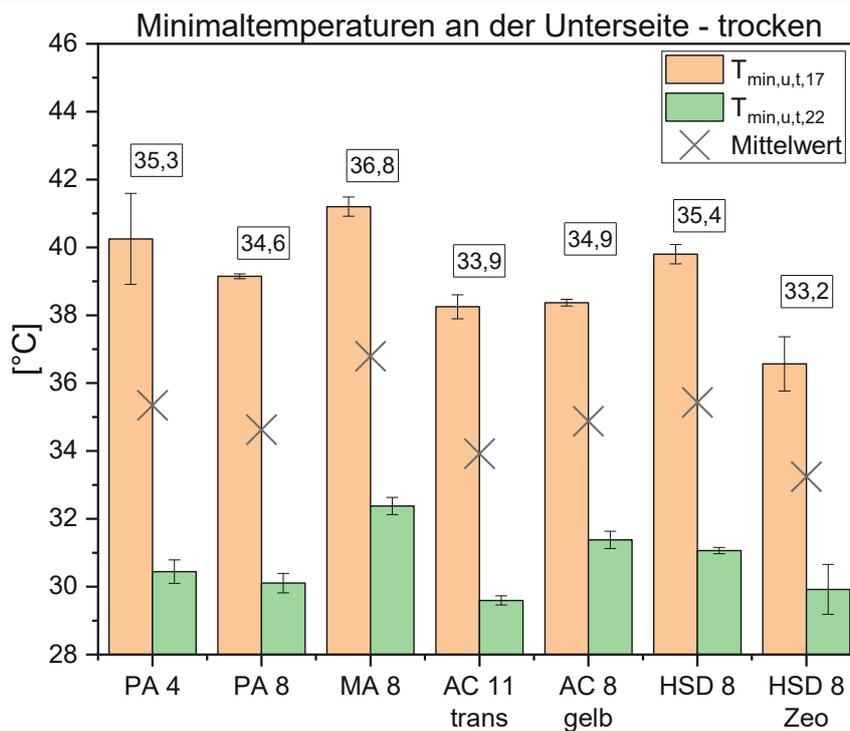


Abbildung 4-9 Minimaltemperaturen an der Unterseite der Platten im trockenen Zustand

Im befeuchteten Zustand erreichen die Temperaturen der PA ähnliche Werte wie der Vergleichsasphalt (siehe Abbildung 4-10). Die Temperaturdifferenz der Beläge ist auch im Bewässerungszustand 1 nicht sehr hoch und kann zu 3,2°C errechnet werden. Die Differenz wird gebildet aus der höchsten (bei PA 4 gemessenen) und niedrigsten (bei HSD 8 Zeolith gemessenen) mittleren Minimaltemperatur an der Unterseite der Probekörper.

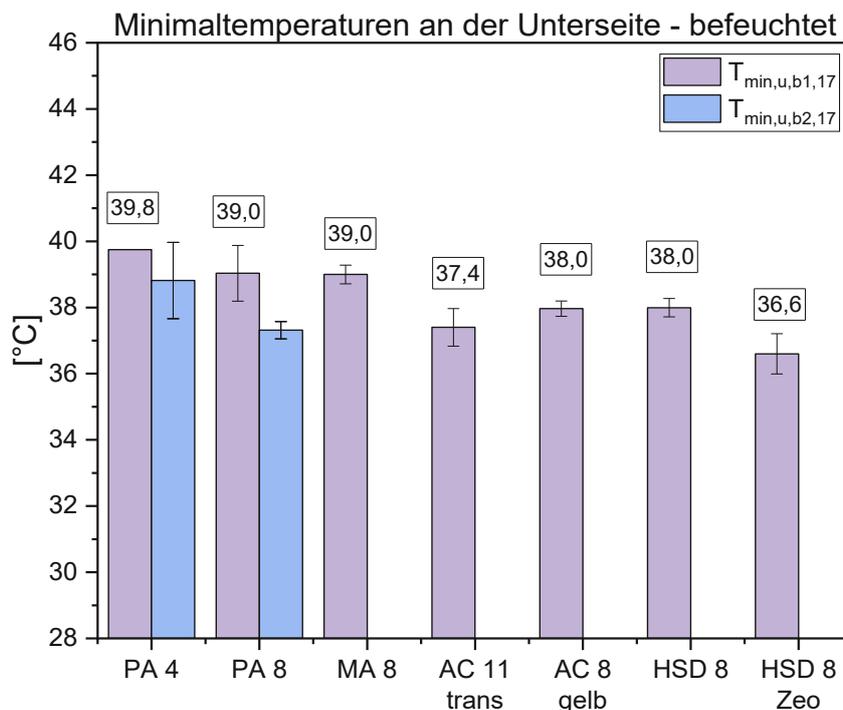


Abbildung 4-10 Minimaltemperaturen an der Unterseite der Platten im befeuchteten Zustand

#### 4.2.4 Abkühlraten und Abkühlzeiten an der Unterseite der Platten

In den folgenden 3 Abbildungen (Abbildung 4-11, Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13) wird das Abkühlverhalten der Plattenunterseiten der einzelnen Mischgüter untersucht. Einerseits werden durch die Parameter  $A_{rate,u,t,17}$ ,  $A_{rate,u,t,22}$ ,  $A_{rate,u,b,1,17}$  und  $A_{rate,u,b,2,17}$  die kurzfristigen und mittelfristigen Abkühlraten bestimmt, andererseits wird die Zeitdauer dargestellt, welche der jeweilige Probekörper benötigt, von seiner Maximaltemperatur nach 12h (siehe Vergleichsparameter  $T_{max,u,t,22}$ ) auf einen Wert von 28°C abzukühlen (Parameter  $A_{zeit,u,t,22}$ ).

Die Abkühlrate in der Einheit [°C/h] des Parameters  $A_{rate,u,t,22}$  ist eindeutig geringer als jene der anderen Parameter derselben Einheit. Die Abweichung lässt sich durch das nicht-lineare Abkühlverhalten der Mischgüter erklären (siehe Temperaturverlauf in Abbildung 3-24).

Bei Betrachtung der Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 fällt auf, dass die offenporigen Asphalte, welche in den vorherigen Auswertungen vergleichsweise hohe Temperaturen hatten, hohe Abkühlraten aufweisen. Das kann laut Literatur, siehe Kapitel 2.2.1, auf die geringe Dichte der Asphaltmischgüter zurückgeführt werden. Auch der Gussasphalt hat eine hohe mittlere Abkühlrate von 6,8°C/h im trockenen Zustand. Die geringsten Abkühlraten haben die vier restlichen Beläge, welche in den vorherigen Balkendiagrammen durch niedrige Temperaturen auffielen. Besonders niedrig waren die Werte des AC 8 gelb. Im trockenen Zustand haben die Prüfkörper Mittelwerte von 5,0°C/h und im befeuchteten Zustand 5,3°C/h.

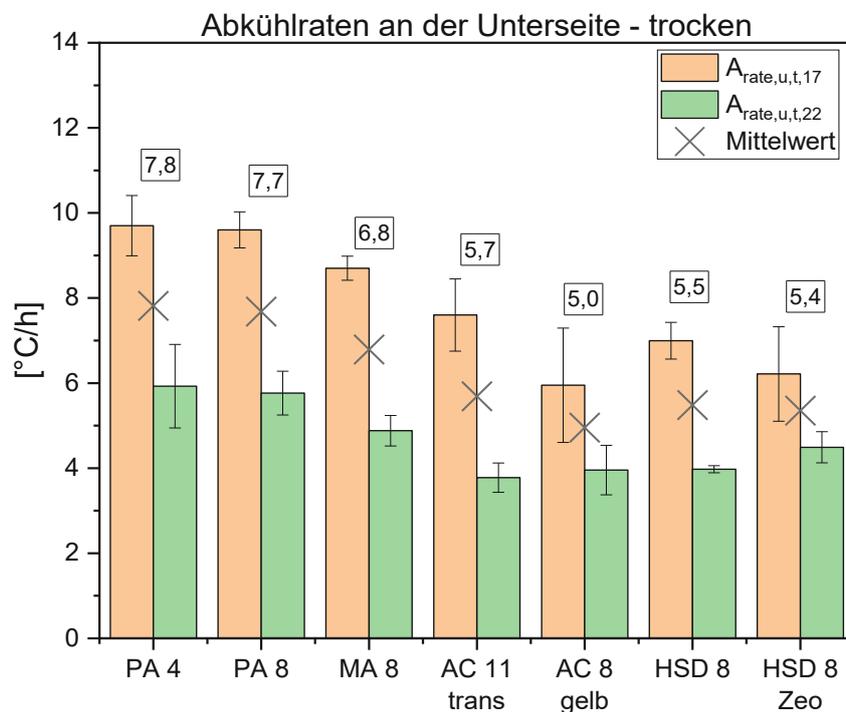


Abbildung 4-11 Abkühlraten an der Unterseite der Platten im trockenen Zustand

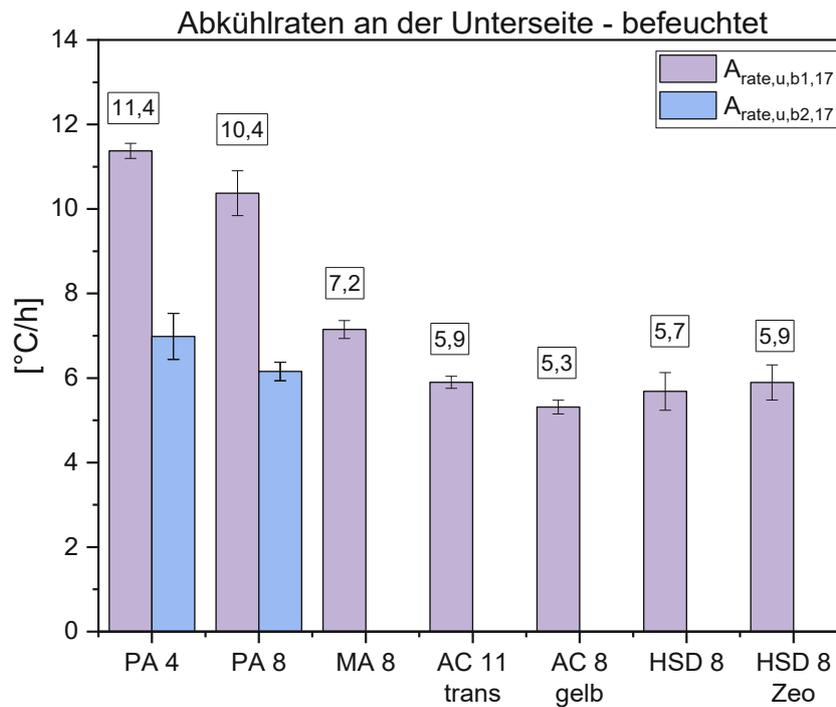


Abbildung 4-12 Abkühlraten an der Unterseite der Platten im befeuchteten Zustand

Beläge, bei denen die höchsten Temperaturen von den Sensoren an der Unterseite dokumentiert wurden (siehe Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3), haben mehr Potential, in den eingeschränkten Zeiträumen abzukühlen. Damit ist gemeint, dass beispielsweise der AC 8 gelb von einem Mittelwert der Maximaltemperaturen im trockenen Zustand von 43,6°C nicht so weit abkühlen muss, um auf dieselben Minimaltemperaturen zu kommen, wie ein Straßenbelag der hohe Maximaltemperaturen an der Unterseite hat. Aus diesem Grund ist die Untersuchung der Abkühlzeit von hohem Interesse.

Die offenporigen Asphalte haben neben hohen Abkühlraten, auch kurze Abkühlzeiten auf 28°C. Sie haben demnach ein gutes Regenerationsverhalten. Anders sieht es bei dem Vergleichsasphalt, dem MA 8, aus. Dieser braucht mit einem Mittelwert von 5,1h am längsten, um auf den Grenzwert abzukühlen, trotz durchwachsenen Abkühlraten. Der AC 8 gelb hat mit einem Mittelwert von 4,6h die zweitlängste Abkühlzeit. Generell scheint die Dichte der Probekörper auch hier wieder eine Rolle zu spielen. Es müssten wiederum mehr Versuche gemacht werden, um klare Aussagen treffen zu können.

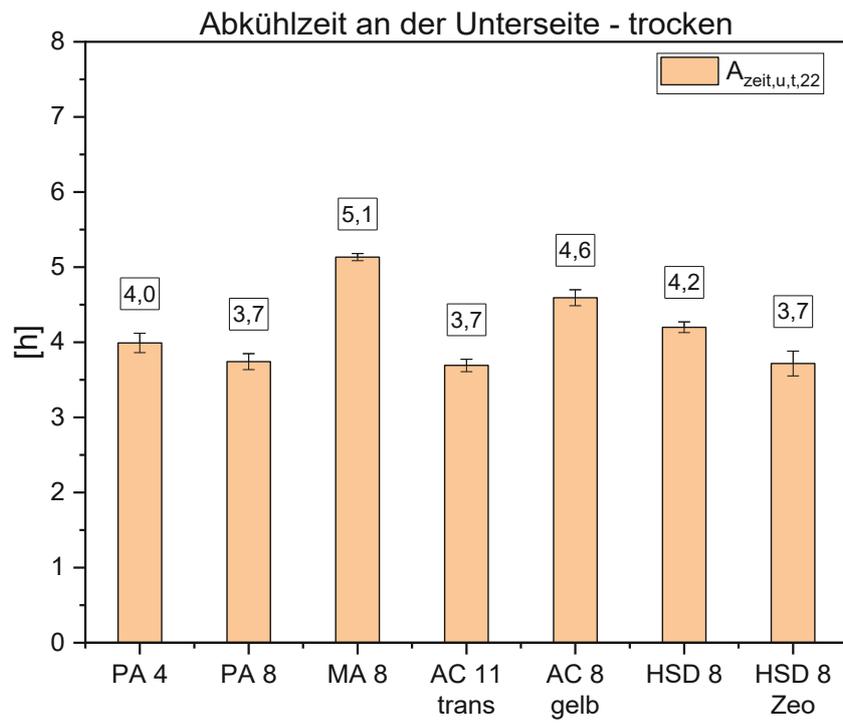


Abbildung 4-13 Abkühlzeit auf 28°C an der Unterseite der Platte im trockenem Zustand

## 5 Zusammenfassung

Um einen Vergleich zwischen den Forschungsergebnissen herzustellen wird eine Reihung der Belagsmaterialien implementiert. Die folgenden Darstellungen sind jedoch mit Vorsicht zu genießen. Es wurde keine Gewichtung der Vergleichsparameter eingeführt und nur Parameter berücksichtigt, welche an allen Platten gemessen werden konnten. Ergebnisse des Temperatur-, Abkühl- und Rückstrahlverhaltens der Mischgutkonzeptionen können sehr ähnlich sein und wirken aufgrund der linearen Reihung nicht proportional. Die folgenden Darstellungen in tabellarischer Form (Tabelle 5-1) und als Netzdiagramm (Abbildung 5-1) sollen einen Überblick über das Temperaturverhalten geben und die Fülle an Ergebnissen aus Kapitel 4 ordnen.

Tabelle 5-1 Wertung der Forschungsergebnisse

	++	+	~/+	~	~/-	-	--
<b>PA 4</b>	$A_{rate,u,t,17}$ $A_{rate,u,t,22}$ $A_{rate,u,b,1,17}$			$T_{min,u,t,22}$ $A_{zeit,u,t,22}$		$T_{min,u,t,17}$	$T_{max,u,t,17}$ $T_{max,u,t,22}$ $T_{max,u,b,1,17}$ $T_{max,o,t,17}$ $T_{max,o,b,1,17}$ $T_{min,u,b,1,17}$ $\alpha_{90}$
<b>PA 8</b>		$A_{rate,u,t,17}$ $A_{rate,u,t,22}$ $A_{rate,u,b,1,17}$ $A_{zeit,u,t,22}$	$T_{min,u,t,22}$	$T_{min,u,t,17}$	$T_{max,u,t,17}$ $T_{max,u,t,22}$ $\alpha_{90}$	$T_{max,u,b,1,17}$ $T_{max,o,t,17}$ $T_{max,o,b,1,17}$ $T_{min,u,b,1,17}$	
<b>MA 8</b>			$A_{rate,u,t,17}$ $A_{rate,u,t,22}$ $A_{rate,u,b,1,17}$	$T_{max,o,b,1,17}$	$T_{max,u,b,1,17}$ $T_{max,o,t,17}$ $T_{min,u,b,1,17}$	$T_{max,u,t,17}$ $T_{max,u,t,22}$ $\alpha_{90}$	$T_{min,u,t,17}$ $T_{min,u,t,22}$ $A_{zeit,u,t,22}$
<b>AC 11 trans</b>	$T_{max,u,t,22}$ $T_{min,u,t,22}$ $A_{zeit,u,t,22}$	$T_{max,u,b,1,17}$ $T_{max,o,t,17}$ $T_{min,u,t,17}$ $T_{min,u,b,1,17}$	$T_{max,u,t,17}$ $T_{max,o,b,1,17}$	$A_{rate,u,t,17}$ $\alpha_{90}$	$A_{rate,u,b,1,17}$		$A_{rate,u,t,22}$
<b>AC 8 gelb</b>	$T_{max,o,t,17}$ $T_{max,o,b,1,17}$ $\alpha_{90}$	$T_{max,u,t,17}$ $T_{max,u,t,22}$	$T_{max,u,b,1,17}$ $T_{min,u,t,17}$ $T_{min,u,b,1,17}$			$T_{min,u,t,22}$ $A_{rate,u,t,22}$ $A_{zeit,u,t,22}$	$A_{rate,u,t,17}$ $A_{rate,u,b,1,17}$
<b>HSD 8</b>			$T_{max,u,t,22}$ $\alpha_{90}$	$T_{max,u,t,17}$ $T_{max,u,b,1,17}$ $T_{max,o,t,17}$ $T_{min,u,b,1,17}$	$T_{max,o,b,1,17}$ $T_{min,u,t,17}$ $T_{min,u,t,22}$ $A_{rate,u,t,17}$ $A_{rate,u,t,22}$ $A_{zeit,u,t,22}$	$A_{rate,u,b,1,17}$	
<b>HSD 8 Zeo</b>	$T_{max,u,t,17}$ $T_{max,u,b,1,17}$ $T_{min,u,t,17}$ $T_{min,u,b,1,17}$	$T_{max,o,b,1,17}$ $T_{min,u,t,22}$ $\alpha_{90}$	$T_{max,o,t,17}$ $A_{zeit,u,t,22}$	$T_{max,u,t,22}$ $A_{rate,u,t,22}$ $A_{rate,u,b,1,17}$		$A_{rate,u,t,17}$	

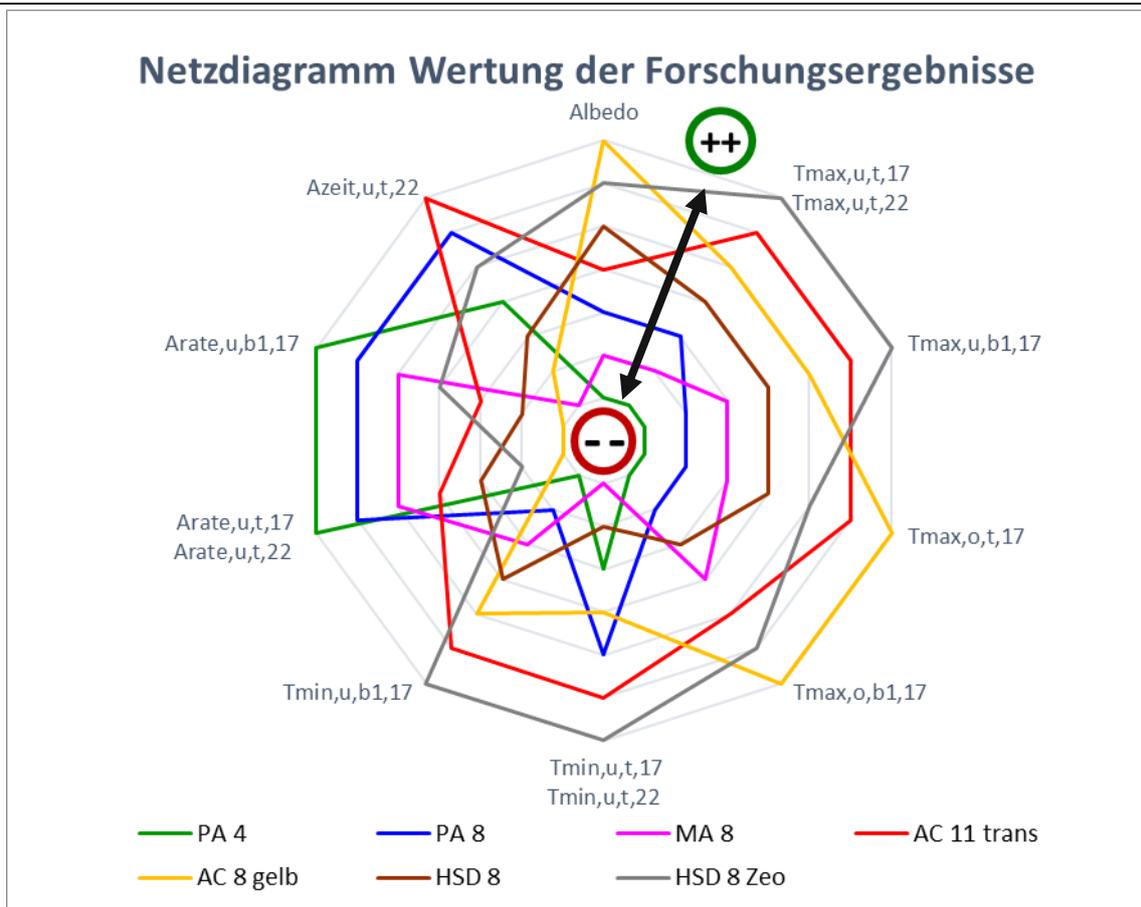


Abbildung 5-1 Netzdiagramm: Wertung der Forschungsergebnisse

In der Einleitung dieser Arbeit wurden 3 Forschungsfragen formuliert:

- 1.) Wie verhält sich der in Österreich herkömmlich verwendete Gussasphalt bei sommerlicher Erhitzung?

In Tabelle 5-1 ist auf den ersten Blick ersichtlich, dass der zu derzeitigem Standard typischerweise eingebaute Gussasphalt im Geh- und Radwegbereich in keinem der Temperatur-Vergleichsparameter positiv abschneidet. Die gemessenen Temperaturen an der Oberfläche und Unterseite der Platten sind vor allem im trockenen Zustand vergleichsweise hoch. Unter Bewässerungskonzept 1 konnte die Platte aufgrund der Konzeptionierung des Prüfstands von unten gekühlt werden und hatte tendenziell etwas geringere Temperaturen. Durch die hohe Dichte und geringe Wasserspeicherkapazität der Gussasphalte ist zu erwarten, dass Regenwasser rasch in die Kanalisation abrinnt und nicht oberflächennahe verdunsten kann.

Bei Vergleich der in Kategorie „~/+“ bewerteten Abkühlraten mit der schlecht bewerteten Abkühlzeit wird schnell klar, dass diese allein durch das hohe Abkühlpotential entstanden sind. Bei den gemessenen hohen Temperaturen wird mehr Wärmeenergie aufgenommen, die anschließend abgegeben werden kann. Die Abkühlzeit deutet auf ein schlechtes nächtliches Regenerationsverhalten der Gussasphalte hin.

## Zusammenfassung

---

Die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse bestätigen die These der internationalen Literatur, dass die derzeit standardgemäß eingebauten Gussasphalte im Geh- und Radwegbereich in Bezug auf das sommerliche Erwärmungspotential verbesserungsfähig sind. „Cool Pavements“ können eine Verminderung des UHI-Effektes bewirken.

### 2.) Inwieweit beeinflussen Rückstrahlvermögen und Wasserspeicherkapazität das Temperaturverhalten der Beläge?

Die gemessenen Albedo-Werte korrelieren stark mit den Oberflächentemperaturen der Beläge. Aber auch an der Unterseite der Beläge konnten bei Belägen mit geringerer Wärmeabsorption geringe Temperaturen festgestellt werden. Die für diese Arbeit durchgeführten Versuche verfestigen die Annahme der internationalen Literatur, dass die Albedo vor allem einen großen Einfluss auf die Maximaltemperaturen des Belags hat.

In weiterführenden Studien könnte der Zusammenhang zwischen Albedo und Maximaltemperaturen vertiefend untersucht werden, indem die bereits getesteten Oberflächen sandgestrahlt werden. Durch das Abtragen der bituminösen umhüllenden Schicht der Körnung könnten Probekörper mit anderer Oberflächenreflexion, aber gleichem Materialverhalten erneut getestet werden. In einem zweiten Schritt könnte dieser Prozess nach Einfärben der Oberflächen mit weißer Farbe wiederholt werden.

Inwieweit die Wasserspeicherkapazität einen Einfluss auf sommerliche Erhitzung der versiegelten Flächen hat, konnte mit dem konzipierten Prüfstand nicht festgestellt werden. Die bei der Messung der Oberfläche gemessenen, gleichbleibenden Temperaturen im feuchten und trockenen Zustand lassen darauf schließen, dass die abweichenden Temperaturen an der Unterseite aufgrund der Sammlung des Wassers am Boden des Prüfstands entstanden sind. Anhand der Wasserrückhaltewirkung des Prüfstandes und der unterschiedlichen Effekte der Bewässerungsmengen der offenporigen Asphalte konnte aber gezeigt werden, dass das Entwässerungssystem einen Einfluss auf das Temperaturverhalten hat.

In weiteren Studien sollte in Betracht gezogen werden, den Prüfstand so zu konzipieren, dass Wasser abrinnen kann. Auch die Zeitdauer zwischen Befeuchtung und den implementierten Vergleichsparametern sollte überdacht werden.

### 3.) Können im Labor im Zuge dieser Arbeit entwickelte „Cool Pavement“-Technologien, die Anwendung im Einsatzgebiet des Geh- und Radwegebau in Wien finden?

Die Ergebnisse des Temperaturverhaltens der entwickelten „Cool Pavement“-Technologien ist vielversprechend.

Die offenporigen Asphalte zeigen großes Wasserspeichervermögen und rasches Abkühlverhalten. Es besteht die Annahme, dass diese Beläge im nächtlichen, unbestrahlten Zeitraum eine rasche Temperaturregeneration erleben. Dadurch entsteht bei extremen

Hitzewellen ein Vorteil. Durch die temperaturabsorbierenden Eigenschaften der Beläge wurden jedoch an den Asphalten sehr hohe Temperaturen gemessen. Die aus der Literatur recherchierte Annahme, dass offenporige Asphalte trotz hoher Oberflächentemperaturen geringe oberflächennahe Raumtemperaturen haben, konnte mit dem verwendeten Prüfstand nicht verifiziert werden. Bei Einbau eines offenporigen Asphaltes muss das Abwassersystem mitkonzeptioniert werden. Auch der Einfluss von Frost-Tau-Wechseln während der kalten Jahreszeit sollte untersucht werden. Bei Wahl eines offenporigen Asphaltes auf alleiniger Basis des Temperaturverhaltens im Sommer schnitt der PA 8 gegenüber dem PA 4 durch die geringeren Temperaturen und die raschere Abkühlzeit besser ab.

Die Vorteile von Asphaltbetonen in Kombination mit synthetisch transparentem Bindemittel sind in erster Linie ihre hohe Albedo und ihre daraus resultierenden, geringen Maximaltemperaturen. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, Radwege einzufärben und damit besser erkennbar zu machen. Dadurch könnte die Verkehrssicherheit gesteigert werden. Es muss bei der Wahl der Farbe bedacht werden, dass diese einen Einfluss auf das Rückstrahlvermögen hat. Nicht jede Farbe reflektiert die gleichen Spektren gleich stark. Der Nachteil der in dieser Arbeit untersuchten AC ist das eingeschränkte Abkühlverhalten. Außerdem gibt es noch keine Erfahrungswerte, wie die Abnutzung durch den Straßenverkehr die Farbe der Asphalte beeinflusst. Es ist jedoch zu vermuten, dass das Erscheinungsbild durch das eingebrachte Asphalt-freie Bindemittel länger erhalten bleibt als bei Färben auf der Oberfläche.

Halbstarre Deckschichten zeigen durch ihre helle Zementoberfläche geringe Maximaltemperaturen. Außerdem kann durch Zugabe von Zeolithen die Wasserspeicherkapazität beachtlich erhöht werden. Der Einfluss von Zeolithen auf das Temperaturverhalten sollte jedoch noch weiter untersucht werden. Der HSD 8 mit Zeolith zeigt geringere Temperaturen und höhere Abkühlraten als der HSD 8 ohne. Inwieweit dieser Effekt aufgrund der aufgenommenen Wassermenge entstanden ist, kann mit dem verwendeten Prüfstand nicht beantwortet werden. Der große Nachteil dieses Mischgutes ist der aufwändige Herstellungsprozess. Vorteilhaft ist anzusehen, dass der Belag auch für hohe Lastklassen geeignet ist.

Die untersuchten Asphalte erscheinen grundsätzlich für Wiener Geh- und Radwege geeignet. Vor einem Einbau in Wiens Stadtgebiet müssten die Festigkeitseigenschaften gründlich untersucht und Feldstudien für den Einbau der Mischgüter durchgeführt werden. Die Wahl des günstigsten klimafitten Asphaltes sollte unter Berücksichtigung der finanziellen Mittel, dem Einbauort und der weiteren bereits erwähnten Studien gemacht werden.

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Literaturverzeichnis

- [1] H. Higashiyama, M. Sano, F. Nakanishi, O. Takahashi und S. Tsukuma, „Field measurements of road surface temperature of several asphalt pavements with temperature rise reducing function,“ *Case Studies in Construction Materials* 4, pp. 73-80, 2016.
- [2] I. Hohmeier, E. Pangerl, J. Tollmann, Dashkalow Kalojan, G. Mückstein, J. Lutter und M. Mühlberger, Smart City Wien Rahmenstrategie 2019-2050, Wien: Magistrat der Stadt Wien, 2019.
- [3] C. Brandenburg , D. Damyanovic, F. Reinwald, B. Alex, B. Gantner und C. Czachs, Urban Heat Islands - Strategieplan Wien, Wien: Magistrat der Stadt Wien, 2015.
- [4] Stadt Wien, „wien-gv,“ Geosphere Austria, [Online]. Available: <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/eis-hitze-tage-zr.html>. [Zugriff am 28.03.2023].
- [5] F. Pan, P. Jianzhong, G. Zhang, Y. Wen, J. Zhang und R. Li, „Building the cooling roads with high thermal conductivity pavements to relieve urban heat island effect,“ *Construction and Building Materials* 346, pp. 1-10, 2022.
- [6] U. Reuter und R. Kapp, „Städtebauliche Klimafibel - Hinweise für die Bauleitplanung,“ Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg, Stuttgart, 2012.
- [7] H. Li, Evaluation of Cool Pavement Strategies for Heat Island Mitigation, California: University of California, Davis, 2012.
- [8] K. Seifeddine , S. Amziane und E. Toussaint, „Thermal behavior of pervious concrete in dry conditions,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 345, 2022.
- [9] J. M. Sobstyl, T. Emig, M. J. Abdolhosseini Qomi, F.-J. Ulm und R. J.-M. Pellenq, „Role of City Texture in Urban Heat Islands at Nighttime,“ *Physical Review Letters*, Bd. volume 120, Nr. Issue 10, pp. 108701-1-6, 2018.
- [10] M. Santamouris, „Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 26, pp. 224-240, Juni 2013.

- [11] D. Yinfei, L. Pusheng, W. Jiacheng, D. Hancheng, W. Hao und L. Yingtao, „Effect of lightweight aggregate gradation on latent heat storage capacity of asphalt mixture for cooling asphalt pavement,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 250, 2020.
- [12] M. Jia, A. Sha, W. Jiang, X. Li und W. Jiao, „Developing a solid-solid phase change heat storage asphalt pavement material and its application as functional filler for cooling asphalt pavement,“ *Energy & Buildings*, Bd. 285, 2023.
- [13] N. Tang, S. Wu, M. Chen, P. Pan und C. Sun, „Effect mechanism of mixing on improving conductivity of asphalt solar collector,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer* 75, Bd. 75, pp. 650-655, 2014.
- [14] M. Hendel, „Cool pavements,“ in *Eco-Efficient Pavement Construction Materials*, Vereinigte Staaten von Amerika, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2020.
- [15] T. Kinouchi, T. Yoshinaka, N. Fukae und M. Kanda, „Development of cool Pavement with dark colored high albedo coating,“ *Fifth Conference for the Urban Environment*, 2004.
- [16] C. M. Baumgartner, Einfluss unterschiedlicher Bauweisen und Bodenarten auf den Urban Heat island-Effekt, Wien: TU Wien, 2019.
- [17] H. Wu, B. Sun, Z. Li und J. Yu, „Characterizing thermal behaviors of various pavement materials and their thermal impacts on ambient environment,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 172, pp. 1358-1367, 2018.
- [18] E. Erell, D. Pearlmutter, D. Boneh und P. B. Kutiel, „Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons,“ *Urban Climate*, 2014.
- [19] M. Shamsaei, A. Carter und M. Vaillancourt, „A review on the heat transfer in asphalt pavements and urban heat island mitigation methods,“ *Construction and Building Materials* 359, Bd. 359, 2022.
- [20] J. G. Speight, „Uses of Asphalt,“ in *Asphalt Materials Science and Technology*, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 341-359.
- [21] L. Ellebjerg und H. Bendtsen, „Two-layer porous asphalt – lifecycle - The Øster Søgade experiment,“ Danish Road Directorate, Hedehusene, Denmark, 2008.

- [22] K. Tan, Y. Qin, T. Du, L. Li, L. Zhang und J. Wang, „Biochar from waste biomass as hygroscopic filler for pervious concrete to improve evaporation cooling performance,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 287, 2021.
- [23] W. Jiang, A. Sha, J. Xiao, Z. Wang und A. Apeageyi, „Experimental study on materials composition design and mixture performance of water-retentive asphalt concrete,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 111, pp. 128-138, 2016.
- [24] B. Peng, J. Li, T. Ling, X. Li, H. Diao und X. Huang, „Semi-flexible pavement with glass for alleviating the heat island effect,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 367, 2023.
- [25] T. Rahman, M. Z. Irawan, A. N. Tajudin, M. F. Amrozi und I. Widyatmoko, „Knowledge Mapping of Cool Pavement Technologies for Urban Heat Island Mitigation: A Systematic Bibliometric Analysis,“ *Energy and Buildings*, Bd. 291, 2023.
- [26] Hartsteinwerk Loja Betriebs GmbH , [Online]. Available: <https://www.loja.at/>. [Zugriff am 16.03.2023].
- [27] Rohrdorfer Baustoffe Austria GmbH, [Online]. Available: [https://www.rohrdorfer.at/3330\\_DE](https://www.rohrdorfer.at/3330_DE). [Zugriff am 16.03.2023].
- [28] Mineral Abbau GmbH, [Online]. Available: <https://www.mineral.eu/gaden>. [Zugriff am 02.05.2023].
- [29] J. RETTENMAIER & SÖHNE GMBH + CO KG, „www.jrs.de,“ [Online]. Available: <https://www.jrs.de/jrsAssets/docs/strassenbau/produktflyer/de/viatop-premium-produktflyer.pdf?highlight=viatop+premium>. [Zugriff am 06.06.2023].
- [30] Baunit GmbH, „baunit.at,“ [Online]. Available: <https://baunit.at/baunit-bitucem>. [Zugriff am 20.07.2023].
- [31] Colas GmbH, „www.colas.at,“ 22.04.2020. [Online]. Available: <http://colas.at/wp-content/uploads/2020/05/TDB-BITUCLAIR-2020.pdf>. [Zugriff am 12.07.2023].
- [32] Austrian Standards International, Asphalt - Prüfverfahren Teil 30: Marshall-Verdichtungsgerät ÖNORM EN 12697-30, Wien: CEN, 2019.
- [33] Austrian Standards International, Asphalt - Prüfverfahren Teil 34: Marshall-Prüfung ÖNORM EN 12697-34, Wien: CEN, 2020.
- [34] Austrian Standards International, Asphalt - Prüfverfahren Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern ÖNORM EN 12697-6, Wien: CEN, 2020.

- [35] Austrian Standards international, Asphalt - Prüfverfahren Teil 8: Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern ÖNORM EN 12697-8, Wien: CEN, 2019.
- [36] J. Chen, Z. Zhou, J. Wu, S. Hou und M. Liu, „Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 202, pp. 46 - 57, 2019.
- [37] Reptilien Kosmos, „www.reptilienkosmos.de,“ Exo Terra, [Online]. Available: [https://www.reptilienkosmos.de/terrarium-shop/beleuchtung/tageslichtlampen/exo-terra-daylight-basking-spot\\_135\\_3994](https://www.reptilienkosmos.de/terrarium-shop/beleuchtung/tageslichtlampen/exo-terra-daylight-basking-spot_135_3994). [Zugriff am 13.08.2023].
- [38] ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie & Deodynamik), „zamg.ac.at,“ GeoSphere Austria , [Online]. Available: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/ephemeriden>. [Zugriff am 04 07 2023].
- [39] Statista Research Departement, „statista.com,“ Zamg, 03 2023. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/973238/umfrage/niederschlag-in-oesterreich-nach-monaten/>. [Zugriff am 26.04.2023].
- [40] Austrian Standards International, Vorgefertigte Betonerzeugnisse - Prüfverfahren für Glasfaserbeton - Teil 6: Bestimmung der Wasseraufnahme mittels Tauchverfahren und der Trockenrohddichte ÖNORM EN 1170-6, Wien : CEN, 1998.

## 6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Klimatologische Kenntage in Wien von 1955 bis 2022 [4]; Auswertung: Stüwe 2	
Abbildung 1-2 Schematische Darstellung des UHI-Effektes [3].....	3
Abbildung 2-1 Effekt der Albedo auf die thermische Belastung von Fußgänger:innen im offenen Gelände [18].....	8
Abbildung 2-2 Möglichkeiten zur Steigerung des Albedo-Wertes .....	9
Abbildung 2-3 Historische Entwicklung von Studien zu verschiedenen Technologien für „Cool Pavements“ [25].....	16
Abbildung 3-1 Bestimmung der Korngrößenverteilung - Sieblinie PA 4 .....	18
Abbildung 3-2 Massenanteile Platte und Dokumentation: PA 4 20/30, nicht sandgestrahlt..	18
Abbildung 3-3 Bestimmung der Korngrößenverteilung - Sieblinie PA 8 .....	19
Abbildung 3-4 Massenanteile Platte und Dokumentation: PA 8 20/30, nicht sandgestrahlt..	19

Abbildung 3-5 Massenanteile Platte und Dokumentation: HSD 8, sandgestrahlt.....	21
Abbildung 3-6 PA 8 PK1 mit Zement-Zeolith-Schlämme (links: nicht sandgestrahlt, rechts: sandgestrahlt) .....	21
Abbildung 3-7 Bestimmung der Korngrößenverteilung - Sieblinie AC 11 transparent.....	22
Abbildung 3-8 Massenanteile Platte und Dokumentation: AC 11 mit synthetisch transparentem Bindemittel, nicht sandgestrahlt.....	23
Abbildung 3-9 Massenanteile Platte und Dokumentation: AC 8 synthetisch transparentes Bindemittel mit gelbem Farbpigment, nicht sandgestrahlt .....	23
Abbildung 3-10 Massenanteile Platte und Dokumentation: MA 8 20/30, nicht sandgestrahlt .....	24
Abbildung 3-11 Bestimmung der Korngrößenverteilung - Sieblinie MA 8 .....	24
Abbildung 3-12 Fotografie des Prüfstandes .....	25
Abbildung 3-13 Schematischer Aufbau des entwickelten Prüfstandes.....	26
Abbildung 3-14 Versuchsablauf der 17h-Messung im Prüfstand.....	27
Abbildung 3-15 Versuchsablauf der 22h-Messung im Prüfstand.....	27
Abbildung 3-16 gemessene Temperaturen des Probekörpers 1 der Mischgutkonzeption PA 4 im nicht bewässerten 17h-Zyklus .....	29
Abbildung 3-17 Abweichungen der Temperaturmessungen desselben Probekörpers: PA 4 Probekörper 1 .....	30
Abbildung 3-18 Abweichungen der Temperaturmessungen desselben Probekörpers: MA 8 Probekörper 1 .....	31
Abbildung 3-19 gemessene einfallende Strahlung auf dem nach oben gerichteten Pyranometer unter verschiedenen Einfallswinkeln [36].....	32
Abbildung 3-20 Terminologie der Vergleichsparameter.....	34
Abbildung 3-21 Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus im trockenen Zustand.....	35
Abbildung 3-22 Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus – Bewässerungskonzept 1 .....	35
Abbildung 3-23 Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus – Bewässerungskonzept 2 .....	36
Abbildung 3-24 Vergleichsparameter des 22-Stunden Zyklus im trockenen Zustand.....	36
Abbildung 4-1 Albedo-Werte der Platten .....	38
Abbildung 4-2 Maximaltemperaturen an der Unterseite der Platte im trockenen Zustand ...	40
Abbildung 4-3 Maximaltemperaturen an der Unterseite der Platte im befeuchteten Zustand .....	40
Abbildung 4-4 Vergleich Wasserrückstand im Prüfstand nach 17h-Zyklus (links: PA 8, rechts: AC 11) .....	41
Abbildung 4-5 Maximaltemperaturen an der Oberfläche der Platten im trockenen Zustand	43
Abbildung 4-6 Maximaltemperaturen an der Oberfläche der Platten im befeuchteten Zustand .....	43
Abbildung 4-7 Wärmebildaufnahmen PA 4 PK1, PA 8 PK1 und MA 8 PK1 im trockenen (links) und bewässerten (rechts) Zustand .....	45

## Verzeichnisse

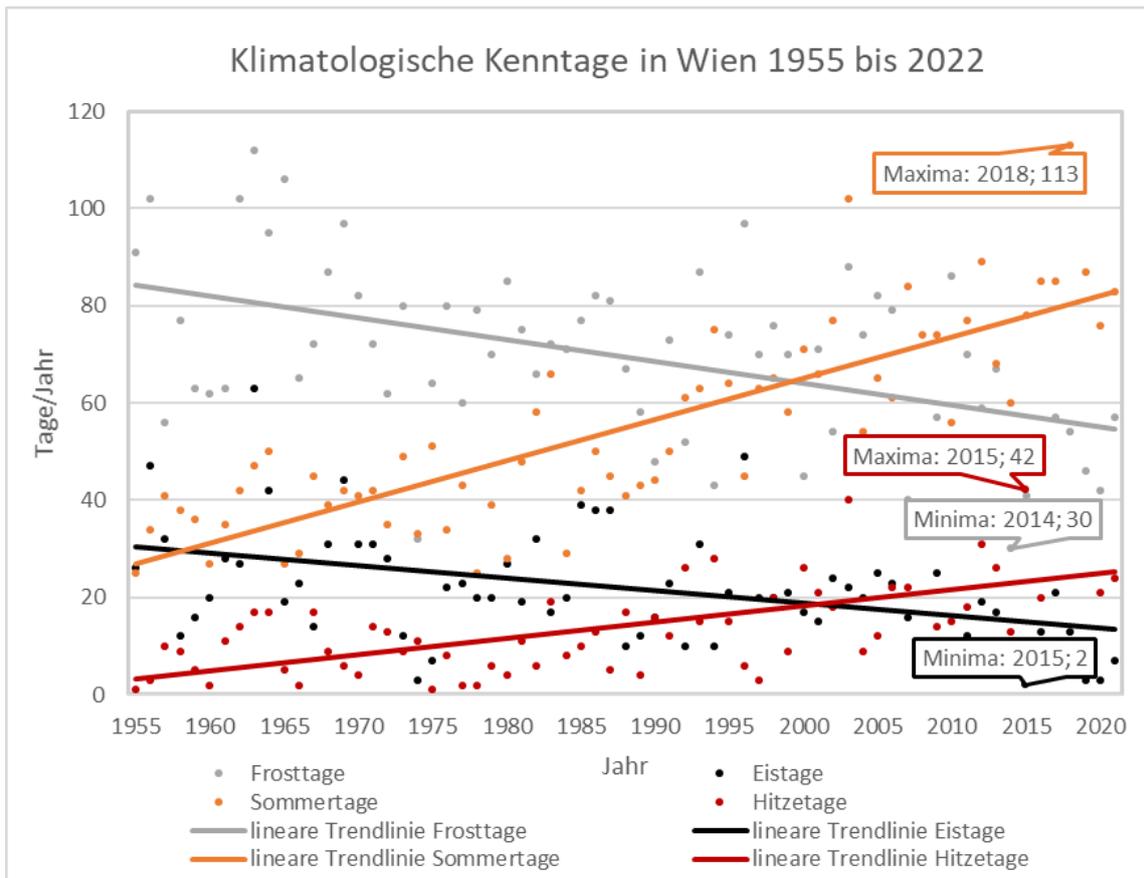
---

Abbildung 4-8 Wärmebildaufnahmen MA 8 PK2 (1), PA 8 Zementschlämme PK2 (2), AC 8 gelb PK2 (3) und AC11 PK2 (4) im trockenen Zustand .....	46
Abbildung 4-9 Minimaltemperaturen an der Unterseite der Platten im trockenen Zustand..	47
Abbildung 4-10 Minimaltemperaturen an der Unterseite der Platten im befeuchteten Zustand .....	47
Abbildung 4-11 Abkühlraten an der Unterseite der Platten im trockenen Zustand .....	48
Abbildung 4-12 Abkühlraten an der Unterseite der Platten im befeuchteten Zustand .....	49
Abbildung 4-13 Abkühlzeit auf 28°C an der Unterseite der Platte im trockenen Zustand .....	50
Abbildung 5-1 Netzdiagramm: Wertung der Forschungsergebnisse .....	52

### 6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1 gemessene Albedo-Werte und Wasserspeicherkapazität der Probekörper.....	37
Tabelle 4-2 Vergleichsparameter der Probekörper - Temperaturdaten .....	39
Tabelle 5-1 Wertung der Forschungsergebnisse .....	51

# 7 Anhang



## Berechnungsannahmen Bewässerungskonzept 1:

	Niederschlagsmenge im Jahr 2022	Tage im Monat	Niederschlagsmenge pro Tag	Niederschlag pro Tag multipliziert mit k (Umrechnungszeitfaktor)
	[mm]	[d]	[mm/d]	[mm/d]
Juni	143	30	4,77	0,60
Juli	100	31	3,23	0,40
August	102	31	3,29	0,41
∅	115	30,67	3,75	F = 0,47

Abmessung der Platte:		künstliche Bewässerung:	
B	260 [mm]	$B \cdot L \cdot F = 39000$	[mm <sup>3</sup> /Zyklus]
L	320 [mm]	0,039	[l/Zyklus]
k=3/24	0,125	6	[Zyklen]
		234	[ml]

Nach der ersten Stunde im Prüfstand werden nach Bewässerungskonzept 1: 234ml Wasser an die Oberfläche der eingebauten Probekörper aufgebracht.

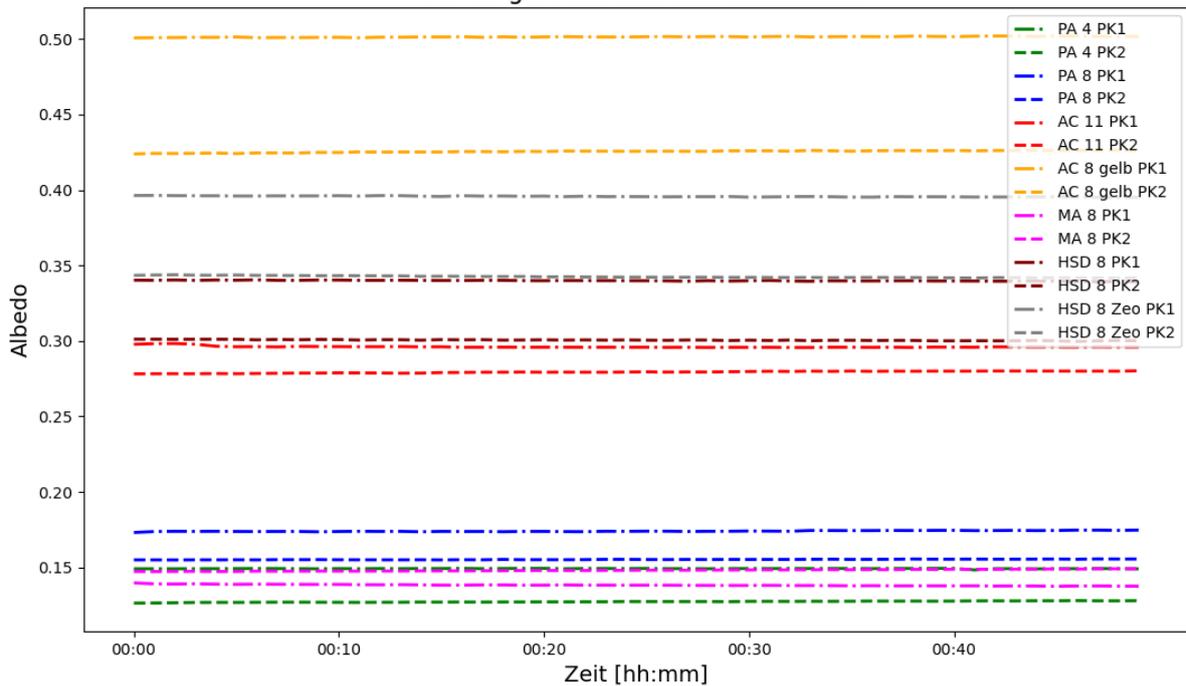
Berechnungsannahmen Bewässerungskonzept 2:

Abmessung der Platte:			Volumen gesamter Probekörper:	
B	260	[mm]	$B*L*H = 3328000$ [mm <sup>3</sup> ]	
L	320	[mm]	3,328 [l]	
H	40	[mm]		

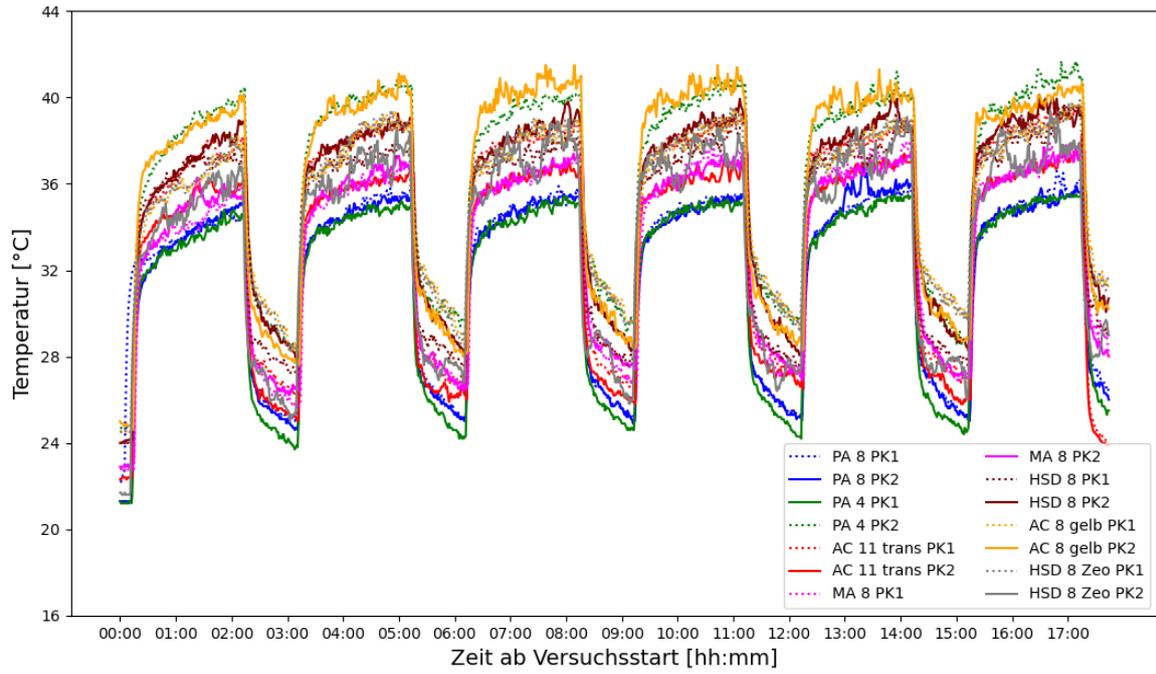
Hohlraumgehalt:			künstliche Bewässerung:	
PA 4	23	[%]	$V_{ges} * \text{Hohlraumgehalt PA 4} = 0,765$ [l]	
PA 8	25	[%]	$V_{ges} * \text{Hohlraumgehalt PA 8} = 0,832$ [l]	

Nach der ersten Stunde im Prüfstand werden nach Bewässerungskonzept 2: 765ml Wasser an die Oberfläche der eingebauten PA 4-Probekörper und 832ml Wasser an die PA 8-Probekörper aufgebracht.

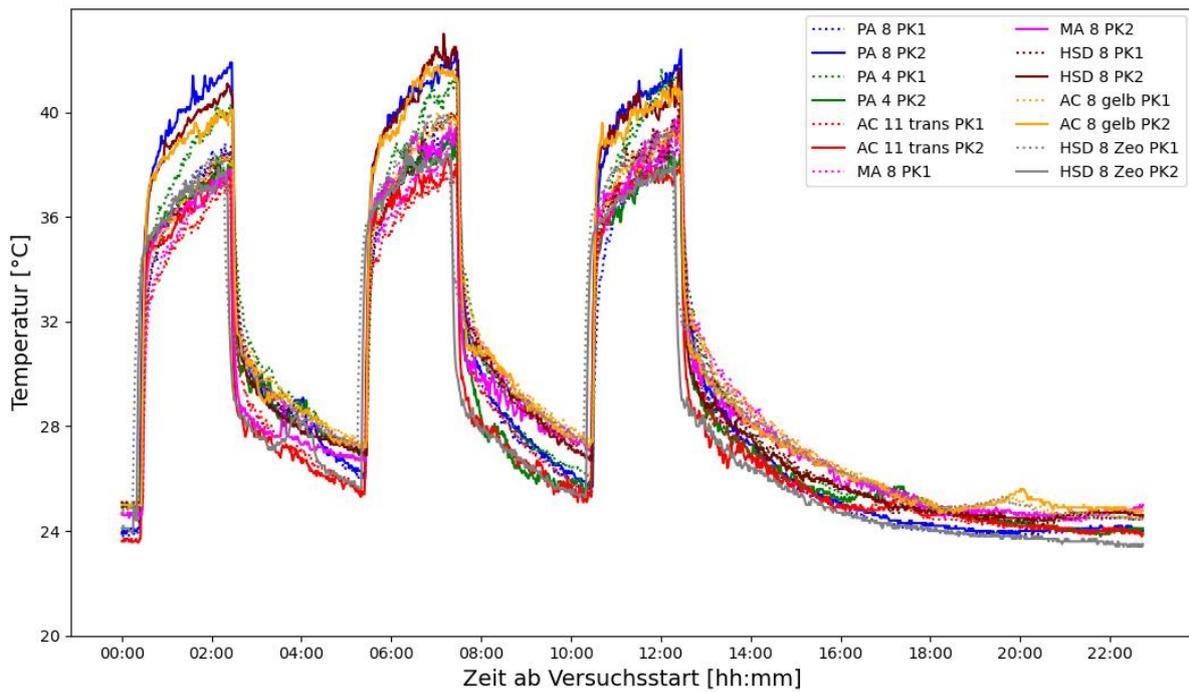
Albedo-Werte unter Berücksichtigung der umgerechneten Einstrahlwinkel



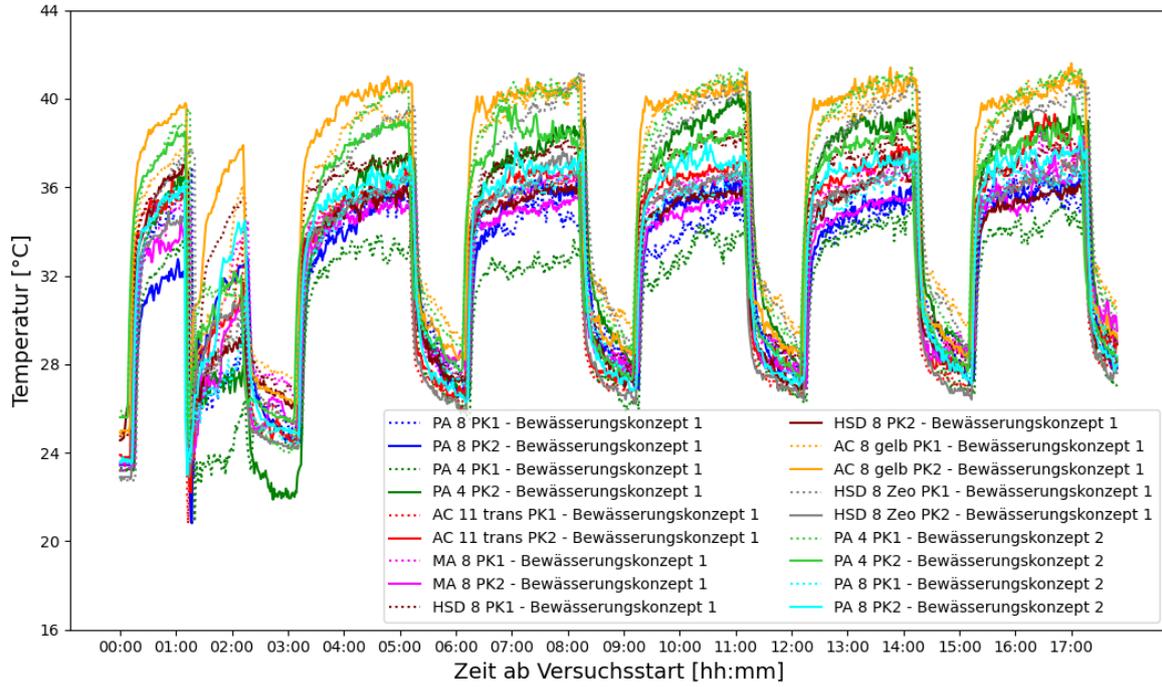
gemessene Raumtemperaturen 2-3cm über der Oberfläche im trockenen Zustand Vergleich



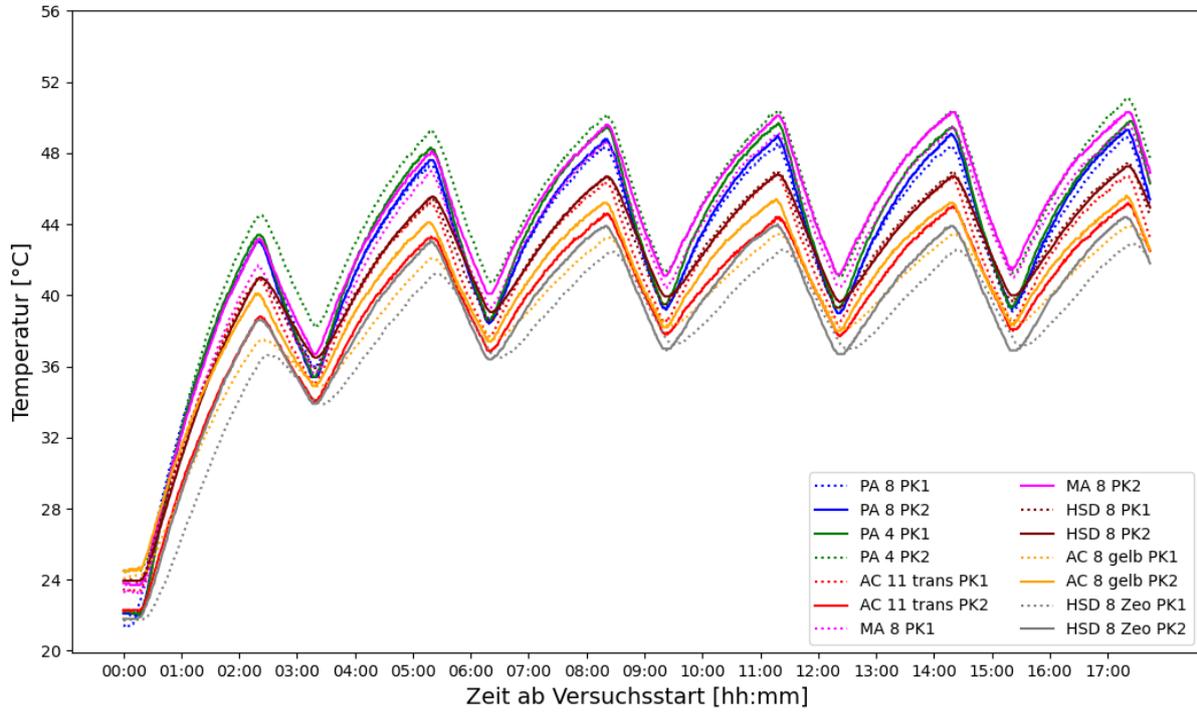
gemessene Raumtemperaturen 2-3cm über der Oberfläche im 22h-Versuch Vergleich



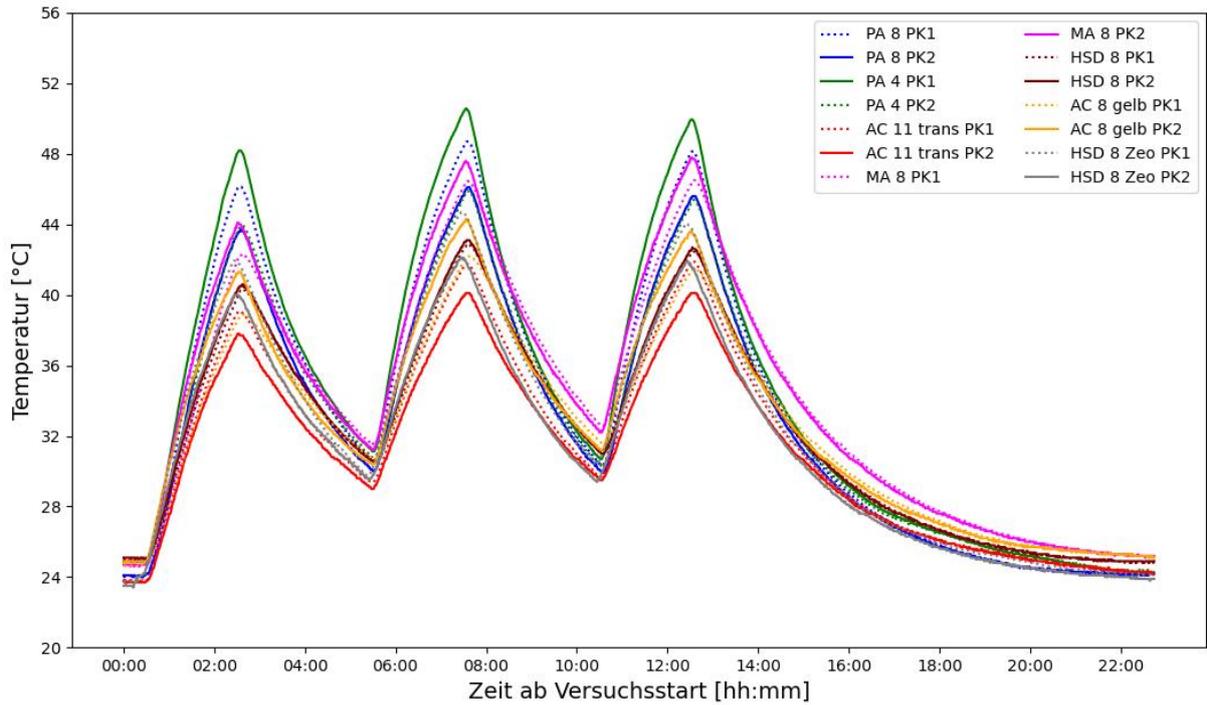
gemessene Raumtemperaturen 2-3cm über der Oberfläche  
nach Bewässerungskonzept 1 & 2 Vergleich



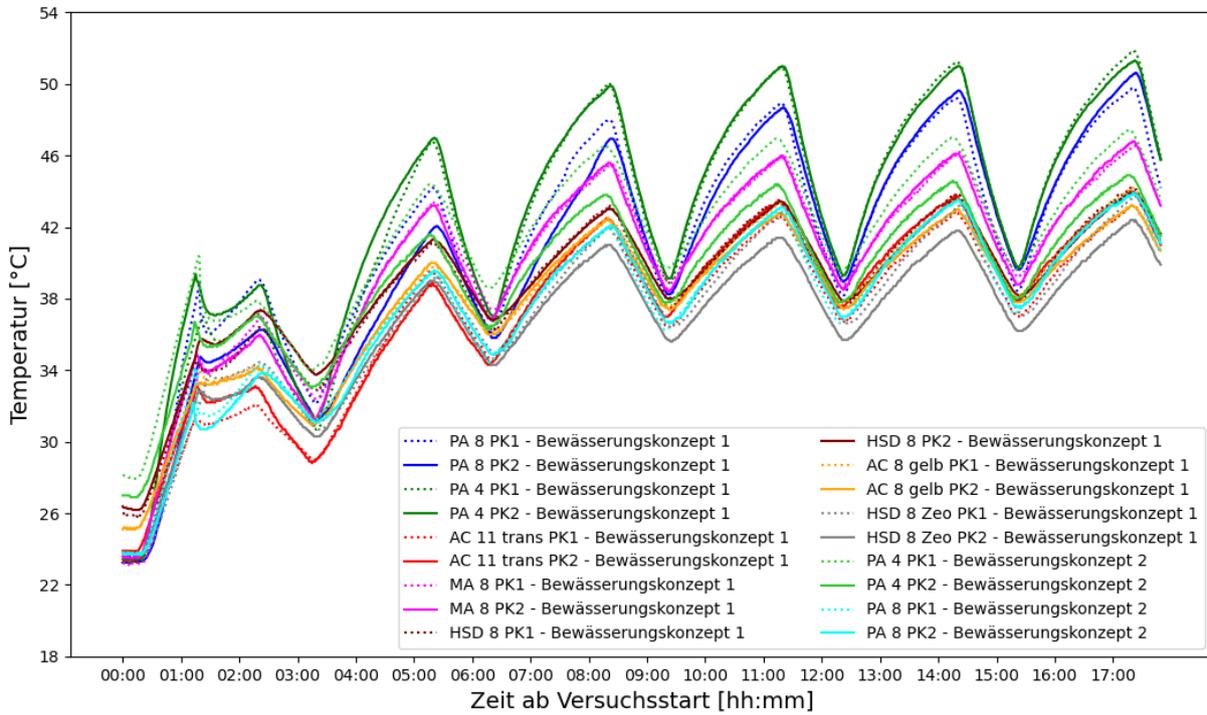
gemessene Temperaturen an der Unterseite im trockenen Zustand Vergleich



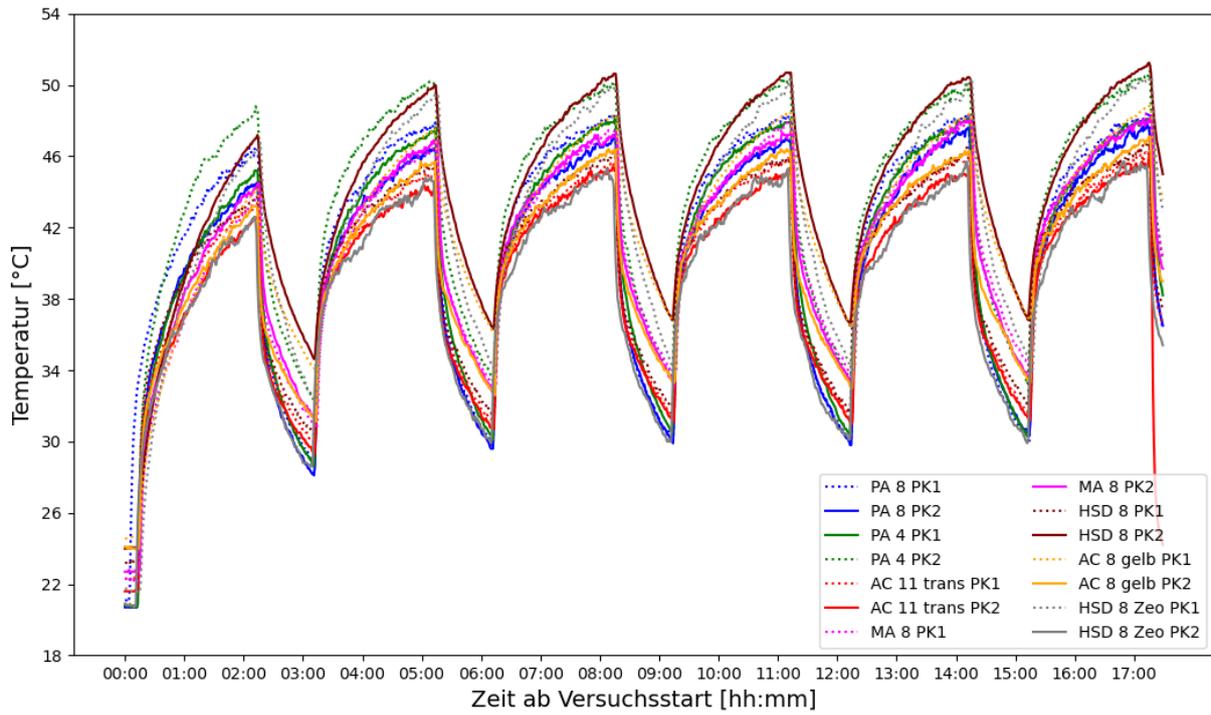
gemessene Temperaturen an der Unterseite im 22h-Versuch Vergleich



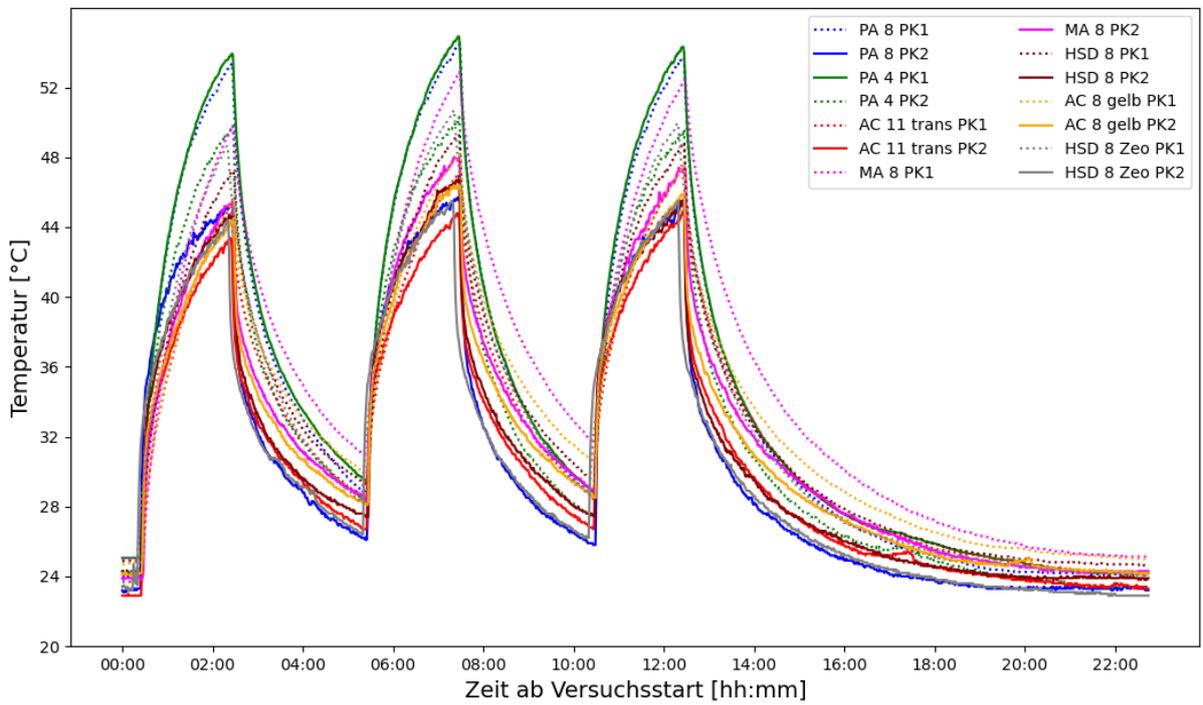
gemessene Temperatur an der Unterseite nach Bewässerungskonzept 1 & 2 Vergleich



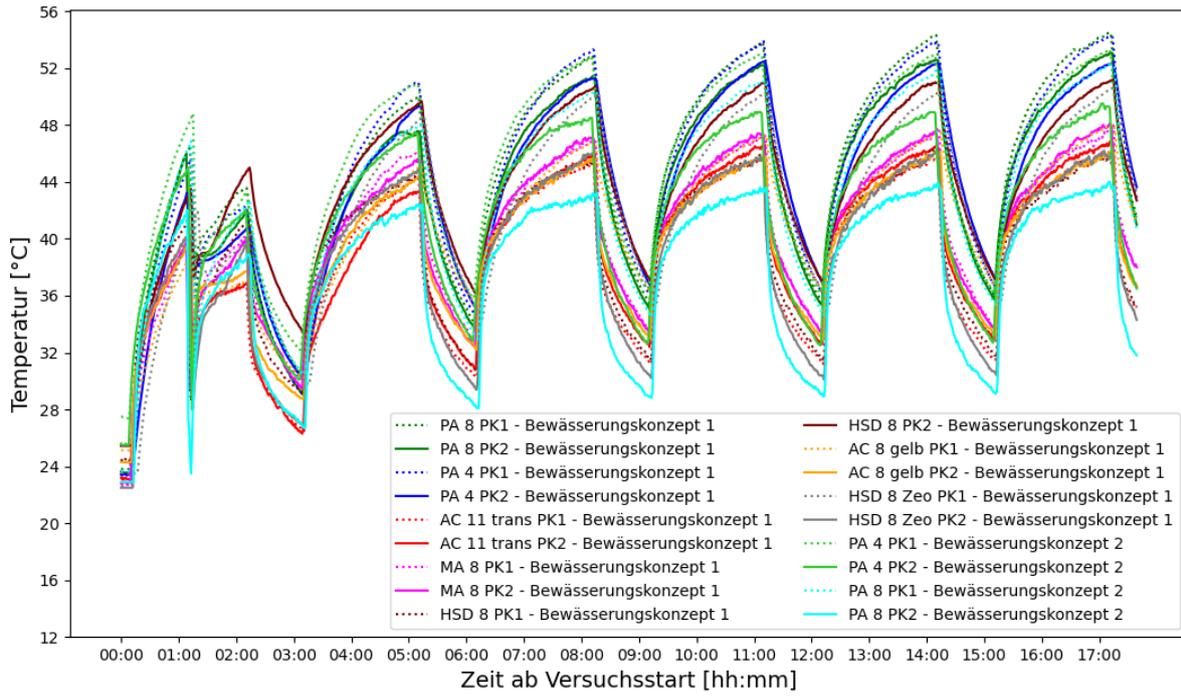
gemessene Oberflächentemperaturen im trockenen Zustand Vergleich



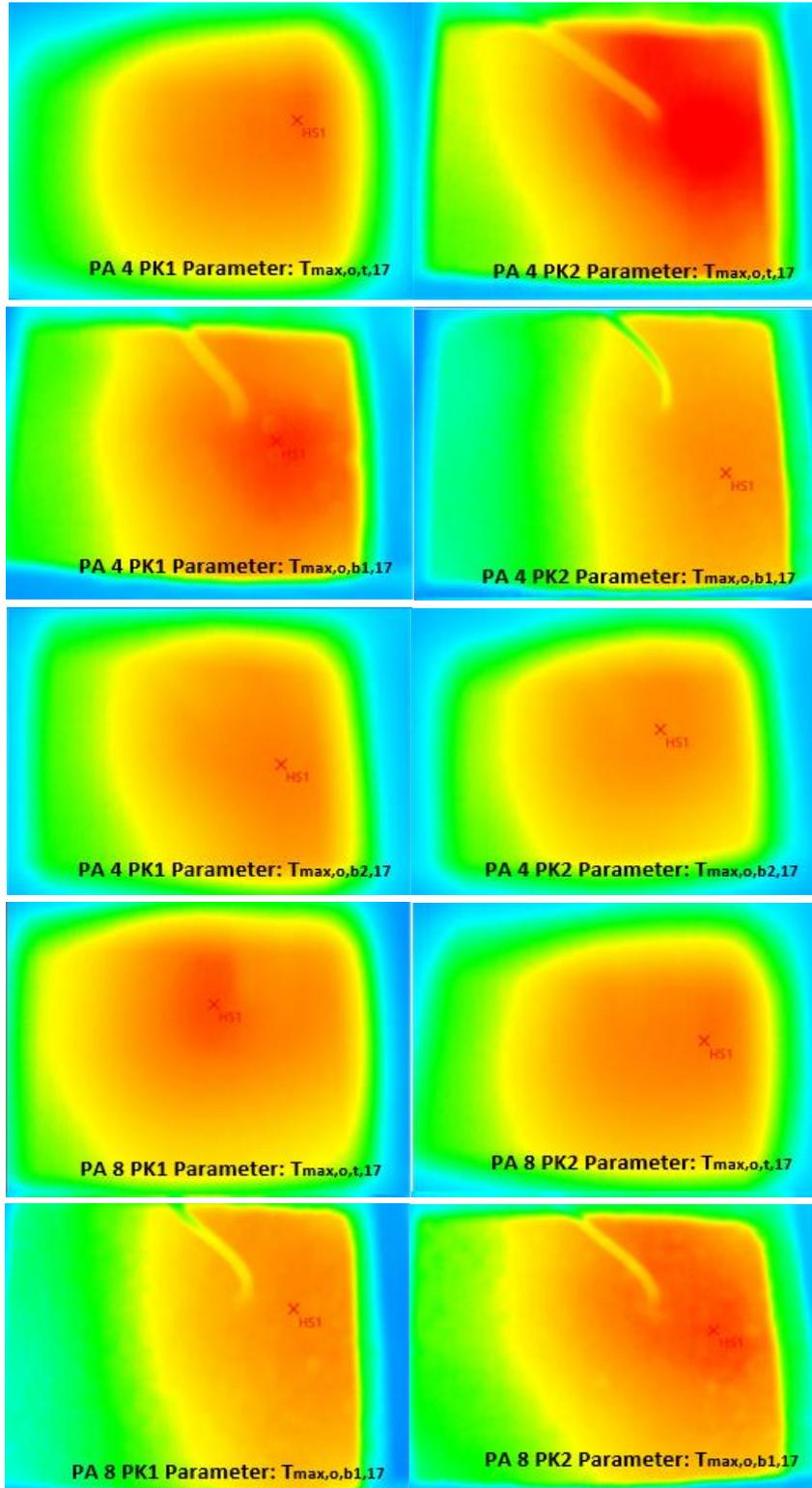
gemessene Oberflächentemperaturen im 22h-Versuch Vergleich

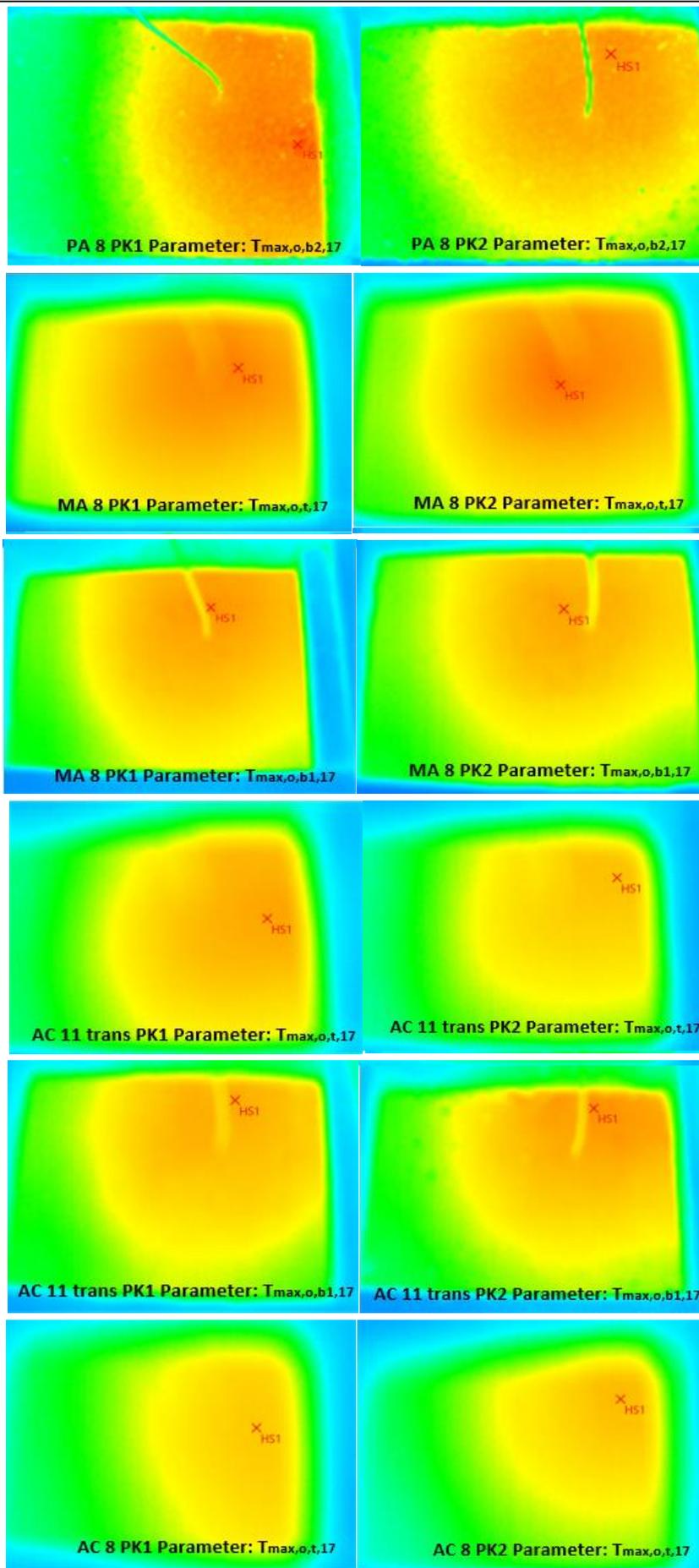


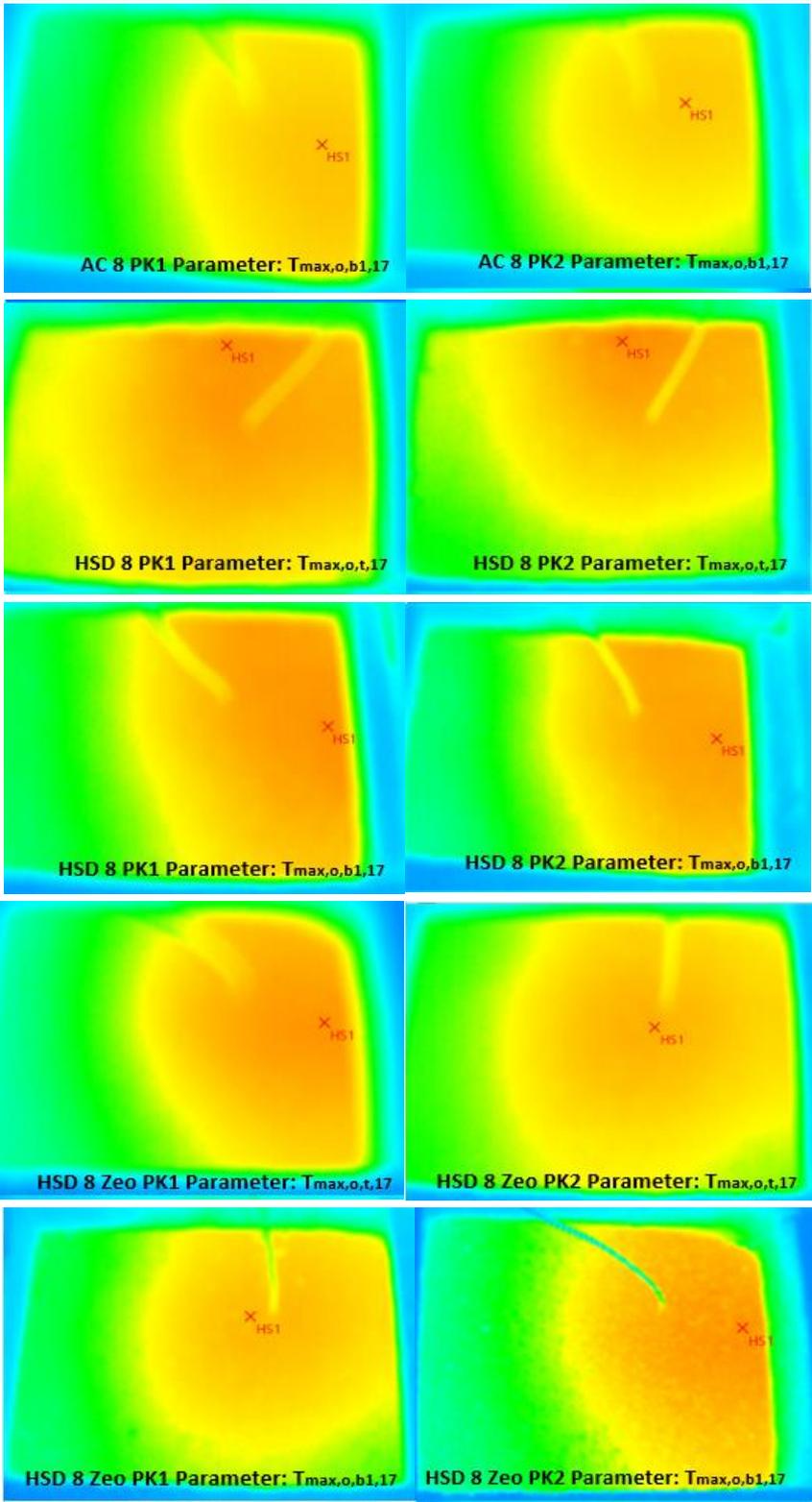
gemessene Oberflächentemperaturen nach Bewässerungskonzept 1 & 2 Vergleich



Wärmebildaufnahmen:







Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.