

PROJEKTBERICHT

Projektnummer: 22423

Klimafitte Asphaltbeläge gegen Hitzeinseln in der Stadt

von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.

Bernhard Hofko,

Proj. Ass. Dipl.-Ing.

Sophie Stüwe,

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.

Lukas Eberhardsteiner

und

Proj. Ass. Dipl.-Ing.

David Zhou

Im Auftrag der

Stadt Wien – Straßenverwaltung und Straßenbau

Lienfeldergasse 96

A-1170 Wien

Wien, November 2023

Dieser Projektbericht enthält 46 Seiten und einen Anhang mit Prüfberichten.

Im Falle einer Vervielfältigung oder Veröffentlichung des gegenständlichen Projektberichts darf dessen Inhalt nur wort- und formgetreu und ohne Auslassung oder Zusatz wiedergegeben werden. Auszugsweise Vervielfältigung oder Veröffentlichung unter Berufung auf den Projektbericht bedarf der Genehmigung des Instituts für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen der Technischen Universität Wien.

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	3
2. Motivation	4
3. Stand der Technik.....	5
4. Materialien und Methoden	6
4.1. Materialien	6
4.1.1. Ausgangsstoffe.....	6
4.1.2. Referenzasphalt – Gussasphalt (MA 8 [+ weiß]).....	6
4.1.3. Offenporige Asphalte (PA 4 [+ sand /weiß] und PA 8 [+ sand /weiß])	7
4.1.4. Asphaltbeton mit synthetischem, transparentem Bindemittel (AC 11 trans, AC 8 gelb und AC 11 rot) 8	
4.1.5. Halbstarre Deckschichten (HSD 8 [+ Zeo])	9
4.2. Methoden.....	10
4.2.1. Prüfstand & Methodik der Labormessungen.....	11
4.2.2. Grundlagen der Modellierung.....	18
5. Ergebnisse und Diskussion.....	21
5.1. Experimentelle Ergebnisse	21
5.1.1. Albedo	21
5.1.2. Temperaturverhalten	21
5.2. Modellierungsergebnisse	26
6. Schlussfolgerungen	29
7. Empfehlungen für die Probestrecken	32
7.1. Referenzvariante.....	32
7.2. Offenporiger Asphaltbelag	33
7.3. Heller Asphaltbelag.....	34
7.4. Deckschicht mit Aufhellungsgestein.....	34
7.5. Messsensorik und Messkampagnen	35
8. Literaturverzeichnis	36

1. Aufgabenstellung

Das Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für Straßenwesen der Technischen Universität Wien wurde durch die Stadt Wien – Straßenverwaltung und Straßenbau (MA 28), Lienfeldergasse 96, A-1170 Wien, vertreten durch Herr DI Wolfgang Ablinger mit dem Forschungsprojekt „Klimafitte Asphaltbeläge gegen Hitzeinseln in der Stadt“ beauftragt.

Im Rahmen dieses Projektes wurden Lösungen zur Entschärfung von städtischen Hitzeinseln auf dem Anwendungsbereich des Straßenbaus entwickelt und auf Labormaßstab umfassend geprüft. Der Fokus des Projekts liegt auf der Entwicklung von Straßenbelägen für Gehsteige, Radwege und Pkw-Stellplätze. Damit sollen Verkehrsflächen dazu beitragen, die Stadt Wien klimafit in die Zukunft zu bringen. Hierfür wurden, wie im Angebot festgelegt, folgende Arbeitspakete untersucht:

- AP1 – Literatur- und Projektstudie
- AP2 – Rezeptoptimierung und Mischguteigenschaften
- AP3 – Untersuchungen zur Energiebilanz
- AP4 – Konzept für eine Probestrecke

Anders als im Angebot angeführt, wurde das AP2 reduziert und die mechanischen Kennwerte der Mischgüter nicht ermittelt, um mehr Ressourcen für den Kern des Projekts im AP3 zur Verfügung zu haben. Im AP3 wurden mehr Varianten untersucht als im ursprünglichen Angebot enthalten: Es wurden zusätzlich auch Asphalte mit transparenten Bindemitteln (3 zusätzliche Varianten) mit ins Untersuchungsprogramm aufgenommen, sowie halbstarre Deckschichten (2 zusätzliche Varianten). Dafür wurden keine Variante mit Graphenfasern ins Programm aufgenommen, da die Literaturstudie gezeigt hat, dass diese Varianten in vorhergehenden Untersuchungen keinen Vorteil bei der sommerlichen Erwärmung von Asphaltdeckschichten gebracht haben.

Die in diesem Bericht ausgeführten Hintergründe basieren unter anderem auf der im Zuge dieses Projektes entstandenen Diplomarbeit „Laboruntersuchungen zum sommerlichen Temperaturverhalten von bitumengebunden Deckschichten als Maßnahme zur Reduzierung von städtischen Hitzeinseln“ [1]. Diese Diplomarbeit wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber für 2 Jahre (bis Oktober 2025) für die Öffentlichkeit gesperrt.

2. Motivation

Mit einer steigenden Anzahl an Hitzetagen und der gleichzeitig in den nächsten Jahrzehnten prognostiziert ansteigenden Einwohnerzahl in Wien ist die zunehmende sommerliche Erwärmung in Form von Hitzeinseln (Urban Heat Islands – UHI) eine Herausforderung für die Zukunft einer lebenswerten Stadt. Versiegelte Flächen und fehlende natürlich Beschattung durch entsprechende Bepflanzung tragen wesentlich zum Phänomen der UHI bei. Speziell natürliche Beschattung hat großes Potenzial der städtischen Überhitzung Abhilfe zu schaffen. Nicht überall ist dies im dicht verbauten Gebiet umsetzbar. Gleichzeitig tragen Verkehrsflächen zwar wesentlich zur Versiegelung im urbanen Raum bei, auf der anderen Seite setzt ein inklusive Verkehrssystem voraus, dass alle Menschen, unabhängig von ihren körperlichen Fähigkeiten, ihr tägliches Mobilitätsbedürfnis befriedigen können.

Die Bewirkung einer Hitzeentlastung in Städten durch Straßenbeläge kann durch „Cool Pavement – Technologien“ implementiert werden. Der Begriff „Cool Pavement“ umfasst alle Straßenbelagstechnologien, die im Vergleich zu herkömmlich verwendeten Straßenbelägen durch ihre thermischen Eigenschaften eine Reduzierung der Wärmeübertragung bewirken können [2, 3]. In diesem Bericht wird zu dem in der internationalen Literatur verwendeten Begriff „Cool Pavement“ als Synonym „klimafitte Straßenbeläge“ verwendet.

3. Stand der Technik

Die Entwicklung klimafitter Straßenbeläge kann in vier Ansätze unterteilt werden:

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

Eine Verbesserung des thermischen Verhaltens kann durch Veränderung der Wärmeleitfähigkeit, der Oberflächenreflexion, der Wärmekapazität und des Wärmeemissionsgrads erreicht werden. Die Verdunstung kann durch Einsatz von durchlässigen offenporigen Belägen und wasserrückhaltenden Belägen, wie halbstarren Deckschichten modifiziert werden. Durch Verbesserung der Konvektion, welche mit der Rauheit der Beläge sowie Geschwindigkeit und Temperatur der Luftströme zusammenhängen, kann die Konvektionsrate beeinflusst werden. Eine Reduktion der Wärmeenergie kann durch schattenspendende Bäume oder Überdachungen sowie durch aktive mechanische Kühlung, wie beispielsweise durch eingebettete Rohre mit zirkulierendem Wasser erreicht werden [3-5].

In dieser Forschungsarbeit liegt der Fokus einerseits auf der Entwicklung offenporiger Asphalte (PA) im Anwendungsgebiet der Geh- und Radwege. Durch Minimierung der feinen Zuschlagstoffe kann ein Hohlraumgehalt von bis zu 25 % erreicht werden [5]. Ein Vorteil von offenporigen Asphalten liegt im Regenwassermanagement. Durch die langsame Versickerung bei Regeneignissen kann die Kanalisation entlastet werden. Zeitgleich kann das Wasser oberflächennahe gebunden werden und anschließend verdunsten [3, 6]. Als nachteilig gilt die Verschmutzungstendenz solcher Beläge. Besondere Reinigungsstrategien und -verfahren sollten hier berücksichtigt werden [5, 7]. Im trockenen Zustand wirkt die Luft in den Poren wie ein Isolator, wodurch die Wärmeleitfähigkeit und der Wärmestrom gedämpft werden [3, 5, 8]. Der Konvektionsgrad kann durch die Rauheit und große Oberfläche der offenporigen Beläge erhöht werden [3, 8]. Die Folgen von Frost-Tauwechseln in den Wintermonaten können nicht außer Acht gelassen werden [5]. Aufgrund der thermischen Eigenschaften im trockenen Zustand, der Frost-Tau-Wechsel-Problematik und der geringen Anzahl an Regentagen in den Sommermonaten in Wien sollte bei dem Einbau solcher Straßenbeläge in nicht humiden und warmen Klimazonen eine besonderes Augenmerk auf die Systematik der Entwässerung gelegt werden [4, 5].

Zusätzlich zu den im Angebot festgelegten Mischgutkonzeptionen wurden andererseits halbstarre Deckschichten (HSD) auf ihr thermisches Verhalten geprüft. Halbstarre Deckschichten können bei höheren Lastklassen eingesetzt werden. Sie haben die Fähigkeit Wasser oberflächennahe zu speichern. Außerdem verfügen HSD über ein höheres Rückstrahlvermögen [5]. Es besteht die Möglichkeit Zeolithen in die Zementschlämme, die Sekundärkomponente solcher halbstarren Deckschichten, einzubringen. Zeolithen sind hydratisierte Alumosilikat-Mineralien, die eine gute Wasserrückhaltekapazität haben und den Verdunstungsprozess verstärken [9, 10].

Neben der Erforschung der Temperaturentwicklung von PA und HSD wurde zudem der Einfluss des Reflexionsverhaltens untersucht. Das Rückstrahlvermögen stellt laut Literatur eine bedeutende Rolle in der Minimierung der Oberflächentemperaturen, vor allem der Tagesmaximaltemperaturen, der Beläge dar [3, 5]. Der Einfluss des Rückstrahlvermögens wurde in diesem Projekt durch Einfärben der Oberflächen, Verwendung von helleren Bindemitteln und Gestein, Zugabe von Farbpigmenten, Entfernen des oberflächennahen Bitumens und Zugabe von Zementzuschlägen überprüft [3-5].

4. Materialien und Methoden

4.1. Materialien

Im Folgenden werden die geprüften Mischgutkonzeptionen überblicksartig vorgestellt. Es wurden 7 Mischgüter auf ihr Temperaturverhalten geprüft und miteinander verglichen. Ein weiteres Mischgut (AC 11 rot) wurde bei der Messung des Reflexionsverhaltens berücksichtigt.

4.1.1. Ausgangsstoffe

Die für die Mischung der Probepplatten eingesetzten Ausgangsgesteine umfassen Ganggestein (Hartsteinwerk Loja), dolomitischer Kalkstein (Steinbruch Hollitzer) und Dolomitstein (Steinbruch Gaaden), wobei letztere aufgrund ihrer hellen Farbe und dem damit einhergehenden höheren Rückstrahlvermögen verwendet wurden [11-13].

Als Bindemittel wurde ein Bitumen der Penetrationsklasse 20/30 verwendet. Das Bitumen wurde nicht nur für die Mischung des Gussasphalts, sondern auch für die der offenporigen Asphalte herangezogen. Durch die Verwendung des härteren Bindemittels konnten temperaturinduzierte Verformungen, welche durch die intensive Wärmeeinstrahlung im Prüfstand ausgelöst wurden, entgegengewirkt werden. Dadurch konnte der Ein- und Ausbau aus dem Prüfstand erleichtert werden. Neben dem erwähnten Bitumen wurde „Bituclair EN“, ein synthetisch transparentes Bindemittel der Firma Colas GmbH, zur Mischung der Asphaltbetone verwendet [14].

4.1.2. Referenzasphalt – Gussasphalt (MA 8 [+ weiß])

Als Vergleichsmaterial diente ein im Geh- und Radwegebau in Österreich häufig verwendeter Gussasphalt. Die Probekörper wurden im Labor gemischt und vergossen und auf die Maße 26x32x4 cm geschnitten. Die Korngrößenverteilung des Gesteins und Rezeptur der Platten entsprechen dem österreichischen Regelwerk und können in Abbildung 4-1 ausgelesen werden.

Nach der thermischen Prüfung der Probekörper, wurden die Oberfläche weiß eingefärbt (siehe Abbildung 4-2) und erneut geprüft. So konnte ein Rückschluss auf den Stellenwert von hohen Rückstrahlkapazitäten während thermisch induzierter Belastung gestellt werden.

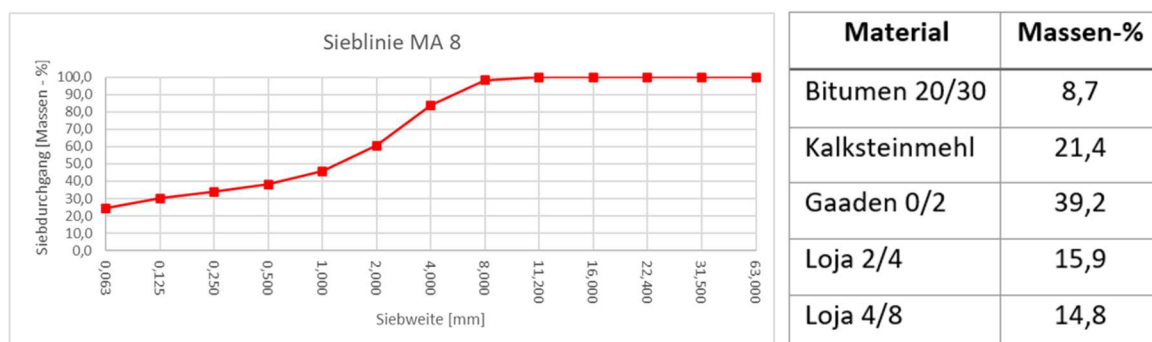


Abbildung 4-1 Korngrößenverteilung - Sieblinie MA 8 (links) Rezeptur Platte MA 8 (rechts)



Abbildung 4-2 Dokumentation: MA 8 20/30, nicht sandgestrahlt (links und Mitte) und MA 8 20/30 weiß (rechts)

4.1.3. Offenporige Asphalte (PA 4 [+ sand /weiß] und PA 8 [+ sand /weiß])

Für die Konzeptionierung der offenporigen Asphalte wurden die in der Literatur [7] beschriebenen Korngrößenverteilungen als Grundstein für die Dimensionierung verwendet. Dadurch, dass es keine Mischgutanforderungen für offenporigen Asphalten mit Größtkorn 4 mm (PA 4) in der ÖNORM B3586-1 [15] gibt, wurde die Sieblinie im Zuge der Hohlraummaximierung angepasst. Der PA 8 wurde zur Hohlraummaximierung an die Sieblinie laut RVS 08.97.05 und ÖNORM B3586-1 PA 8 P4 angepasst [15], [16].

Um die entsprechenden Korngrößenverteilungen herzustellen, wurde die Körnung trocken gesiebt. Es wurden dem Mischgut Viatop Premium Pellets als Armierungszusatz hinzugefügt. Die Hohlraumgehalte der offenporigen Mischgüter wurden mit 25% (PA 8) und 23% (PA 4) nach ÖNORM EN 12697-8 bemessen [17].

Im weiteren Schritt wurden die Platten sandgestrahlt und weiß angestrichen. Wie schon bei dem Gussasphalt besteht auch hier die Motivation darin, eine Aussage über das Wärme-Rückstrahlvermögen der Platten machen zu können. Durch den Prozess des Sandstrahlens kann der Bitumenfilm von den Oberflächen entfernt werden. Somit kann die oberflächliche Bindemittelabrieb im eingebauten Zustand nach benutzerinduziertem Verschleiß im Labor nachgestellt werden. Die Kornstruktur des PA 4 reagierte empfindlich auf den hohen Druck während des Sandstrahlprozesses. Es kam zu augenscheinlich feststellbarem Kornausbruch.

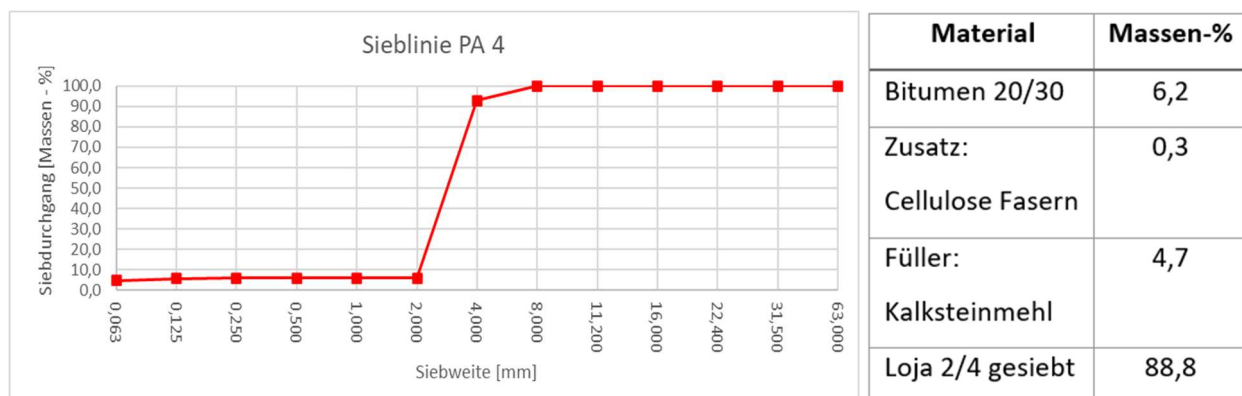


Abbildung 4-3 Korngrößenverteilung - Sieblinie PA 4 (links) Rezeptur Platte PA 4 (rechts)



Abbildung 4-4 Dokumentation: PA 4 20/30, nicht sandgestrahlt (links), sandgestrahlt (Mitte) und weiß angestrichen (rechts)

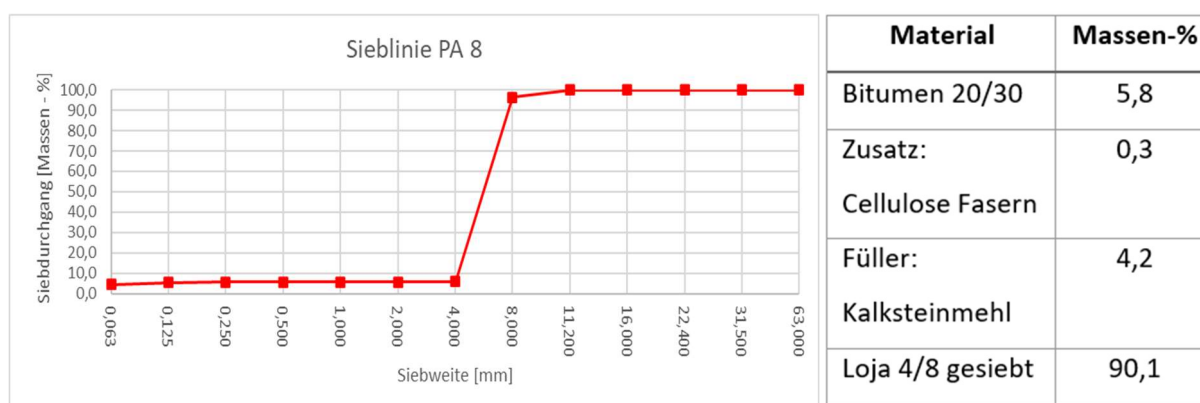


Abbildung 4-5 Korngrößenverteilung - Sieblinie PA 8 (links) Rezeptur Platte PA 8 (rechts)



Abbildung 4-6 Dokumentation: PA 8 20/30, nicht sandgestrahlt (links), sandgestrahlt (Mitte) und weiß angestrichen (rechts)

4.1.4. Asphaltbeton mit synthetischem, transparentem Bindemittel (AC 11 trans, AC 8 gelb und AC 11 rot)

Für die Mischungen der Asphaltbetone wurde ein transparentes Bindemittel verwendet (siehe Tabelle 4-1 und Abbildung 4-7). Dieses wurde mit hellem Gestein gemischt, um den Grad der Wärmereflexion zu erhöhen. Das Mischgut des AC 11 trans wurde im Labor hergestellt. Die beiden anderen Mischgüter wurden extern gemischt. Der AC 8 gelb wurde während des Projekts von der Fa. Pittel+Brausewetter GmbH bei der Baustelle ÖBB Ebreichsdorf eingebaut. Durch die Zugabe von Titandioxid und gelben Pigmenten konnte bei diesem Mischgut das Rückstrahlvermögen erhöht werden. Es wurden Platten des Mischguts im Labor verdichtet und in weiterer Folge untersucht. Außerdem wurden rote Asphaltplatten, hergestellt von Fa. Nievelt Labor GmbH, mit demselben Bindemittel und roten Pigmenten untersucht. Die gelieferten Probekörper des roten

Asphaltmischguts wurden im Zuge des Projektes auf ihr Rückstrahlverhalten getestet, nicht jedoch auf ihre thermischen Eigenschaften.

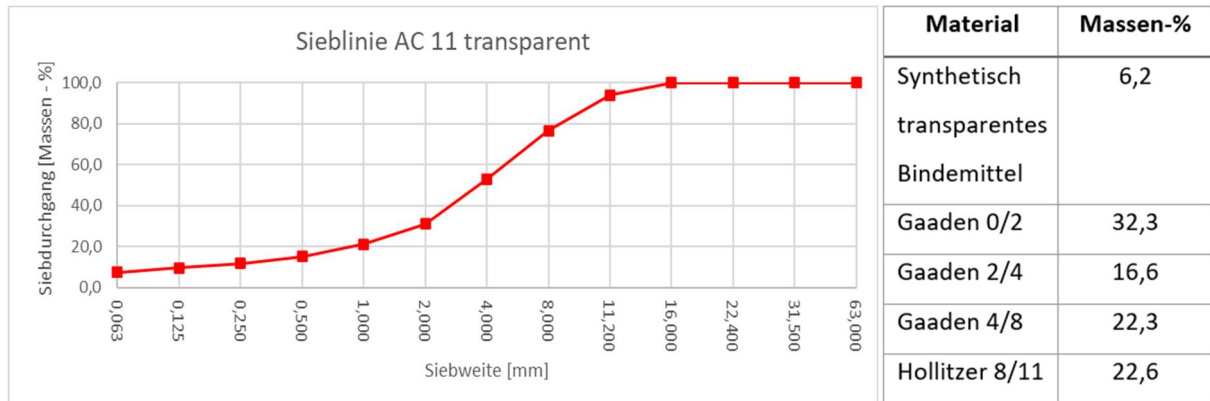


Abbildung 4-7 Korngrößenverteilung - Sieblinie AC 11 trans (links) Rezeptur Platte AC 11 trans (rechts)

Tabelle 4-1 Rezeptur Platte AC 8 gelb

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



Abbildung 4-8 Dokumentation: AC 11 trans (links), AC 8 gelb (Mitte) und AC 11 rot (rechts) alle nicht sandgestrahlt

4.1.5. Halbstarre Deckschichten (HSD 8 [+ Zeo])

Als Primärgerüst der halbstarren Deckschichten wurden die Massenanteile und Sieblinie des PA 8 P4 (siehe Abbildung 4-5) verwendet. Anschließend wurde in die Hohlräume Zementschlämme eingebracht. Als Mörtel für die Mischung der Zementschlämme diente ein Hochleistungsfließmörtel für halbstarre Deckschichten der Fa. Baumit GmbH [18]. Durch die Zugabe von Zeolithen konnte die Wasserspeicherkapazität der HSD erhöht werden. Die für die Probekörper „HSD 8 Zeo“ verwendeten Zeolithen der Fa. Baumit GmbH sind natürliche Zeolithen, die aus der Slowakei stammen. Die Massenanteile der Probeplatten können in Tabelle 4-2 ausgelesen

werden. Die Platten wurden nach dem Einschlammprozess sandgestrahlt (siehe Abbildung 4-9) und erst anschließend auf ihr Temperaturverhalten getestet.

Die Wasserspeicherkapazität (γ) wurde gemäß der nachfolgenden Formel (1) berechnet. Das Wasserspeichervermögen konnte durch Zugabe von Zeolithen von 2,2% auf 3,3% erhöht werden.

$$\gamma = \frac{m_w - m_d}{m_d} * 100 \quad (1)$$

Die Berechnung der Wasseraufnahme erfolgte nach ÖNORM EN 1170-6 [19] für vorgefertigte Betonerzeugnisse, wurde jedoch unter Laborbedingungen nach ÖNORM EN 12697-6 [20] für die Bestimmung von Raumdichten von Asphaltprobekörpern durchgeführt.

Tabelle 4-2 Massenanteile Platte HSD (HSD 8 und HSD 8 Zeo)

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



Abbildung 4-9 HSD 8 Zeolithe (links: nicht sandgestrahlt, rechts: sandgestrahlt)

4.2. Methoden

Die Mischung der Asphaltrezepturen erfolgte nach ÖNORM EN 12697-35 [21]. Die Platten wurden mit einem Walzsegmentverdichter hergestellt gemäß ÖNORM EN 12697-33 [22]. Es wurden jeweils 2 Platten jedes Mischgutes hergestellt.

Auf eine Analyse der mechanischen Kennwerte wurde zugunsten der Erhöhung der Anzahl an Mischgut-Varianten für die Temperaturmessungen verzichtet. Nachdem die bituminös gebundenen Mischgüter (bis auf den PA 4) dem österreichischen Regelwerk entsprechen, kann von entsprechendem Gebrauchsverhalten ausgegangen werden. Für die Mischgüter mit synthetischem Bindemittel gibt es Erfahrungswerte, sodass von einer Verformungsbeständigkeit mittels Spurbildungsprüfung entsprechend einem AC 11 deck A2 ausgegangen werden kann.

4.2.1. Prüfstand & Methodik der Labormessungen

Die Probekörper wurden in zwei identen, eigens konzipierten Prüfständen auf ihr thermisches Verhalten hin geprüft. Der Aufbau dieser Prüfstände ist in Abbildung 4-10 skizziert und besteht aus einer Holzkiste, welche mit Styropor ausgekleidet wurde. Es wurde eine Drainage-Schicht eingebaut, auf welche die Probekörperplatten aufgelegt werden konnten. Die Probekörper wurden mit einer 150 Watt-Tageslichtlampe bestrahlt [23].

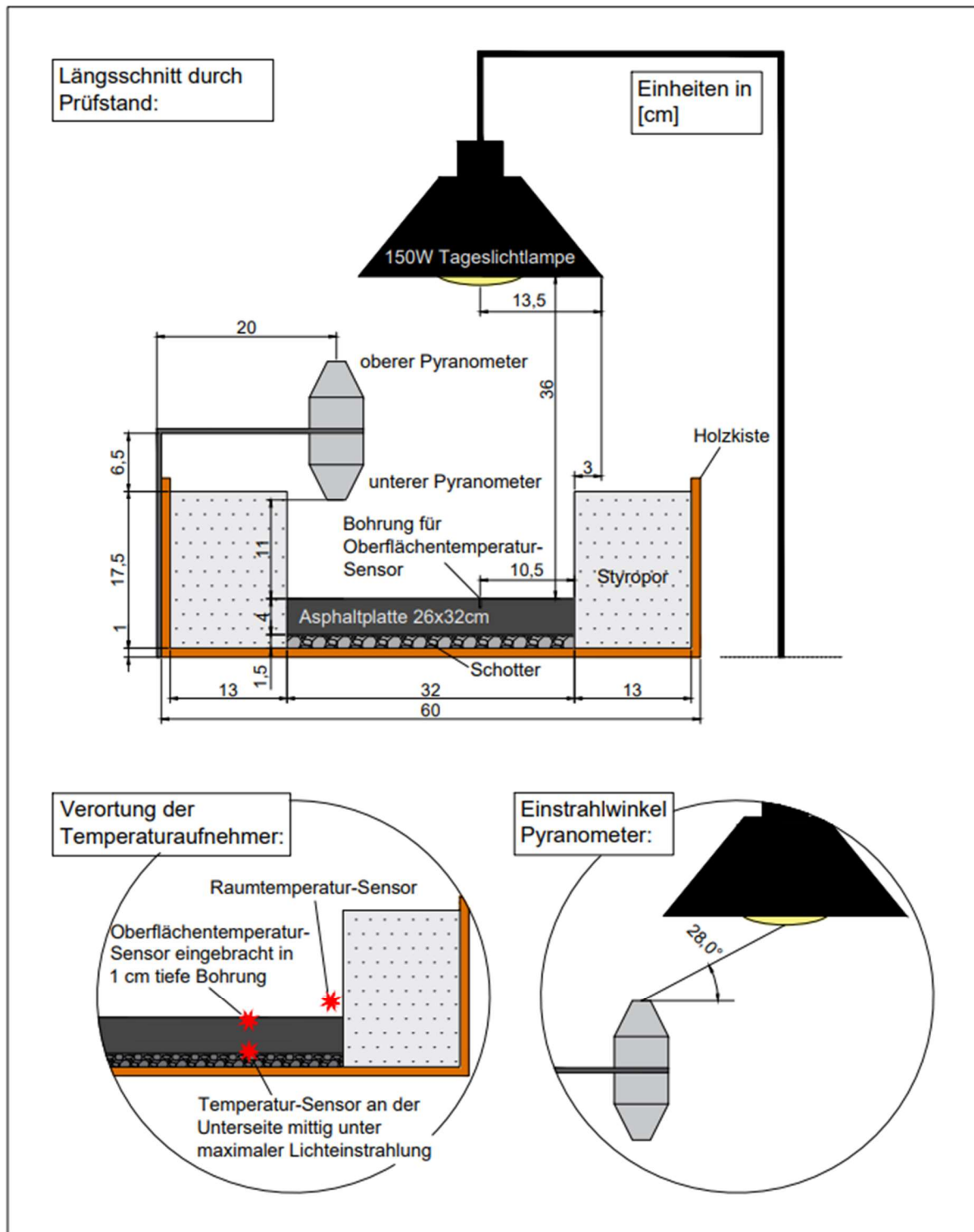


Abbildung 4-10 Schematischer Aufbau des entwickelten Prüfstandes

Das Rückstrahlverhalten konnte über zwei gegengleich gerichtete Pyranometer aufgezeichnet werden. Wobei die Einstrahlung ($I_{inc,28}$) von dem nach oben gerichtetem Pyranometer und die Oberflächenreflexionsstrahlung der Probekörper (I_{ref}) von dem nach unten zeigendem Pyranometer dokumentiert wurde. Der Quotient aus reflektierender zu einstrahlender Sonnenstrahlung wird als Albedo-Wert, oder Albedo, α_{90} bezeichnet. Dieser Kennwert nimmt Werte von 0 bis 1 an, wobei ein Wert von 1 vollkommene Reflexion bedeutet.

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

Aufgrund der platztechnischen Optimierung des Prüfstands wurden die Pyranometer am Rand des Prüfstands angeordnet. Durch den flachen Einfallswinkel der Strahlung von 28° auf den oberen Pyranometer (siehe Abbildung 4-10 rechts unten) wurde der Nenner $I_{inc,28}$ mit einem Faktor von 1,67 multipliziert, siehe Formel (2). Somit können die Albedo-Werte mit den in internationaler Literatur erwähnten Werten verglichen werden. Als Grundlage für den Umrechnungsfaktor diente ein entsprechender Zusammenhang aus der Literatur [24]. Die genauen Begründungen und Herleitungen für diesen Umrechnungsfaktor bei flachen Winkeln können in der im Zuge des Projekts verfassten Diplomarbeit nachgelesen werden [1]. Die Albedo-Messung dient in erster Linie der Vergleichbarkeit der getesteten Probekörper dieses Projektes und ist nicht genormt durchgeführt worden.

Während der Albedo-Messung wurde der Raum abgedunkelt. Als alleinige Lichtquelle diente die Tageslichtlampe von einem der beiden Prüfstände. Die Messung der Albedo wurde 50 Minuten lang durchgeführt, anschließend konnte ein Mittelwert gebildet werden, der als α_{90} dokumentiert wurde.

Die Temperaturen wurden über 3 Sensoren während des gesamten Prüfzeitraums im Minuten-Takt aufgezeichnet. Die Verortung der Temperatursensoren ist in Abbildung 4-10 links unten dargestellt. Der Raumtemperatur-Sensor ist im Eck des Prüfstands 2 cm über der Belagsoberfläche angebracht. Der Oberflächensensor liegt in einem vorgebohrten Loch im Drittpunkt, nicht direkt unter der Lampe. Mittig zwischen Drainage-Schicht und Probekörper liegt der Sensor an der Unterseite. Zusätzlich wurden Momentaufnahmen der Oberflächentemperaturen mit einer Thermokameraaufnahme gemacht. Damit wurde eine 2-dimensionale Analyse der Temperaturen ermöglicht.

Die Temperaturen wurden über zwei Zyklen aufgenommen. Es wurde zwischen einem 17-stündigen und einem 22-stündigem Versuch unterschieden, siehe Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12.

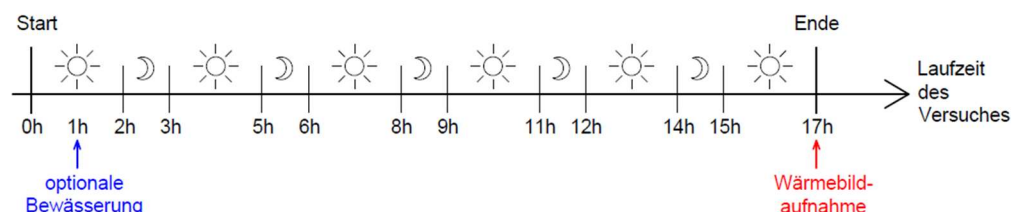


Abbildung 4-11 Versuchsablauf der 17h-Messung im Prüfstand

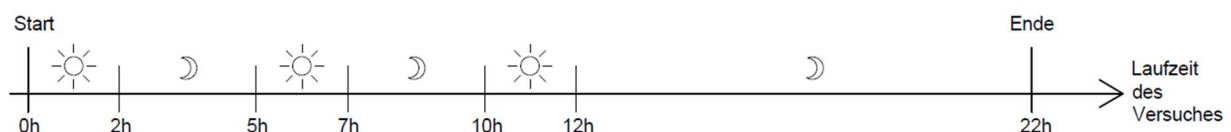


Abbildung 4-12 Versuchsablauf der 22h-Messung im Prüfstand

Beide Versuche gliedern sich in Beleuchtungs- und Abkühlphasen. Hiermit sollen typische sommerliche Hitzeperioden simuliert werden. Wobei bei dem 17-stündigen Versuch das Verhältnis von 2-stündigen Beleuchtungsphasen und 1-stündigen Abkühlphasen, dass in den Sommermonaten in Österreich typische Verhältnis von Tages- zu Nachtzeiten (16 h:8 h), nachempfunden werden soll. In diesem Versuch wurde neben Trockenmessungen das Verhalten der Materialien unter Befeuchtung erforscht. Hierfür wurden die Probekörper mit 234 ml Wasser (Befeuchtungszustand 1) nach einer Stunde mit einer Sprühflasche gleichmäßig befeuchtet. Zusätzlich wurden die Hohlräume der nicht sandgestrahlten oder weiß angestrichenen offenporigen Asphalte mittels Befeuchtungszustand 2 zur Gänze gefüllt. Die Wassermenge in diesem Befeuchtungszustand beläuft sich rückgerechnet auf den Hohlraumgehalt von 23 % des PA 4 auf 765 ml und von 25 % des PA 8 auf 823 ml Wasser. Mittels Befeuchtungszustand 2 soll ermittelt werden, wie viel Wasser bei den offenporigen Asphalten oberflächennahe gebunden werden kann und welchen Einfluss die Wassermenge auf die gemessenen Temperaturen hat. Der 22-stündige Versuch wurde lediglich im trockenen Zustand durchgeführt und dient der vertiefenden Untersuchung des Abkühlverhaltens der Straßenbeläge. Die Probekörper können in der letzten Phase des Versuches vollständig abkühlen.

Um die Wiederholbarkeit der Messergebnisse der Sensoren zu überprüfen, wurden dieselben Probekörper an verschiedenen Tagen gemessen und deren Ergebnisse im 17 h-Versuch verglichen. Zwar wurde unter Laborbedingungen gemessen, es konnten jedoch Abweichungen aufgrund von externen Einflussfaktoren nicht ausgeschlossen werden. Beispiele für diese Messungenauigkeiten umfassen:

- Nicht konstante Raumtemperaturen trotz Klimatisierung im Labor während heißer Sommertage
- Einmessungsfehler, wie Schiefelage der Lampe, Tiefe des Bohrlochs (Oberflächentempersensor) und Platzierung der Sensoren
- Abstand der beiden Tageslichtlampen von ~1 Meter im selben Raum (Einfluss der Wärmeausbreitung)
- Verformung der Probekörper bei wiederholten Messungen unter hoher Wärmeeinstrahlung

Speziell bei den offenporigen Asphalten hatten die besprochenen Messungenauigkeiten einen deutlichen Einfluss (siehe Abbildung 4-13 anhand verschiedener Messungen des PA 4 PK 1) vor allem an der Oberfläche der Probekörper.

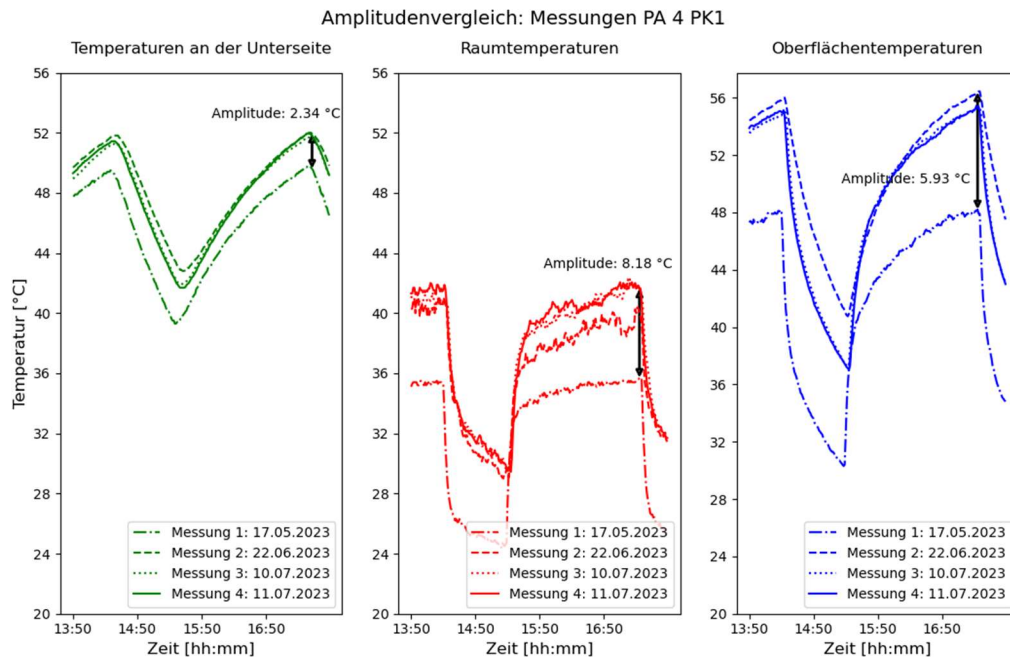


Abbildung 4-13 Abweichungen der Temperaturmessungen desselben Probekörpers: PA 4 Probekörper 1

Im Vergleich dazu wurde bei dem Vergleichsasphalt (Gussasphalt) wenig Einfluss der externen Faktoren beobachtet, siehe Abbildung 4-14.

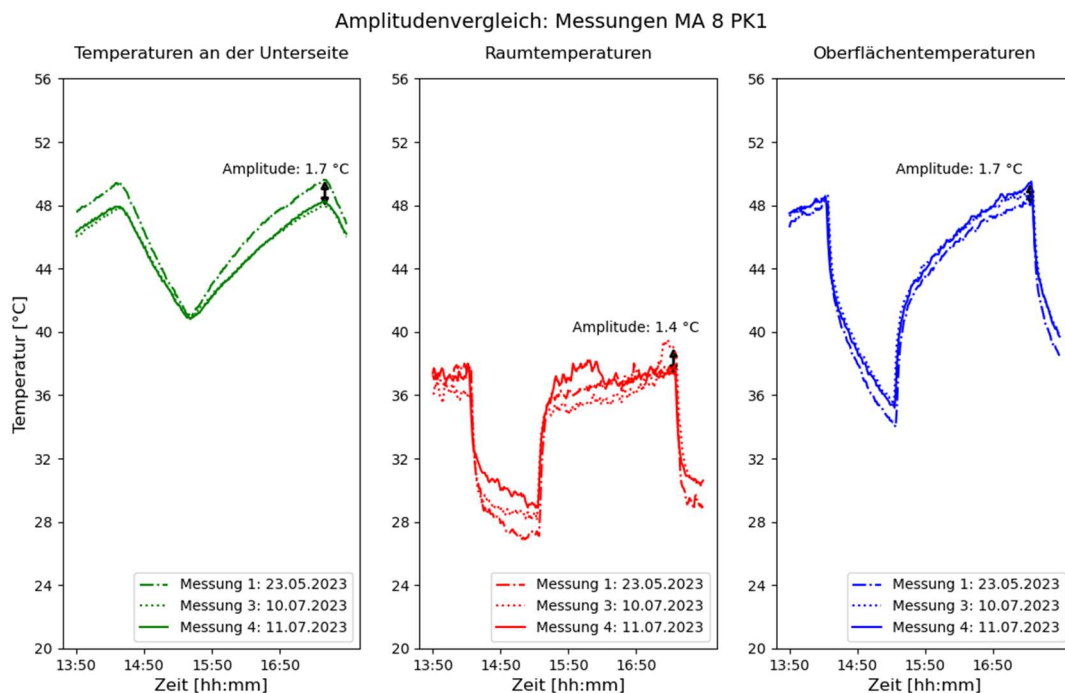


Abbildung 4-14 Abweichungen der Temperaturmessungen desselben Probekörpers: MA 8 Probekörper 1

Aufgrund des geringeren Einflusses von Messungenauigkeiten wurden die Sensoren an der Unterseite (siehe v.a. Abbildung 4-13) in den folgenden Kapiteln verglichen. Für Aussagen über die Oberflächentemperaturen (mit Ausnahme der aufgezeichneten Temperaturdifferenz nach den Befeuhtungsereignissen – siehe Abbildung 4-19) wurden Thermokameraaufzeichnung, die am

Ende des 17 h-Versuches gemacht wurden (siehe Abbildung 4-11), herangezogen. Durch die Wärmebilder können Maximaltemperaturen an den Oberflächen lokalisiert werden.

Um die Messungen der unterschiedlichen Mischgüter in Korrelation zu bringen, wurden Vergleichsparameter implementiert. Sie umfassen lokale Maximal- und Minimaltemperaturen, Abkühlraten und -zeiten an den Unterseiten sowie die Temperaturdifferenz zwischen der Oberflächentemperatur vor Befeuchtung und eine Stunde nach dem Befeuchtungsereignis. Die Nomenklatur zur Bezeichnung der Vergleichsparameter kann in Abbildung 4-15 ausgelesen werden.

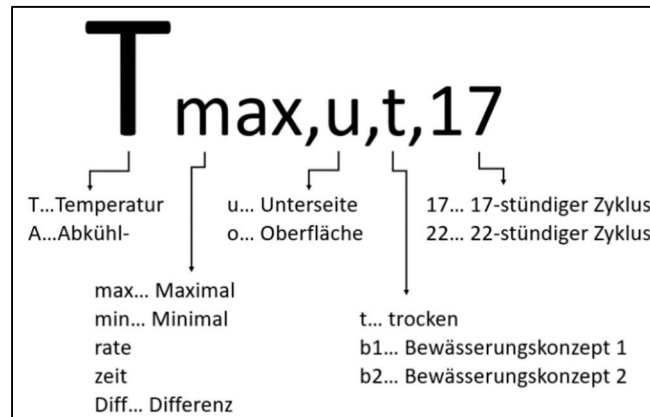


Abbildung 4-15 Terminologie der Vergleichsparameter

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 4-16, Abbildung 4-17, Abbildung 4-18, Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20) zeigen die Vergleichsparameter, welche in Kapitel 5 behandelt werden.

Diese Parameter umfassen unter anderem lokale Maximal- und Minimaltemperaturen gemessen durch den Sensor an der Unterseite der Platte. Im 17-stündigen Versuch wurden die lokalen Minimaltemperaturen zur 15. Stunde ($T_{\min,u,t,17}$, $T_{\min,u,b1,17}$ und $T_{\min,u,b2,17}$) und die lokalen Maximaltemperaturen zur 17. Stunde ($T_{\max,u,t,17}$, $T_{\max,u,b1,17}$ und $T_{\max,u,b2,17}$) der Versuchslaufzeit aufgenommen. Im 22-stündigen Versuch wurden die lokalen Extremwerte an der Unterseite der Platte nach 10 Stunden ($T_{\min,u,t,22}$) und 12 Stunden ($T_{\max,u,t,22}$) verglichen.

Zusätzlich konnten durch Thermokameraaufnahmen zum Ende des 17-stündigen Versuches die folgenden lokalen Maximalwerte $T_{\max,o,t,17}$, $T_{\max,o,b1,17}$ und $T_{\max,o,b2,17}$ an der Oberfläche der Platten aufgenommen werden. Der Vergleich der lokalen Maximalwerte an der Oberfläche und Unterseite der Probekörper ermöglicht eine direkte Aussage über den negativen Einfluss der Beläge zur Bildung städtischer Hitzeinseln. Die lokalen Minimaltemperaturen geben einen ersten Hinweis auf das Abkühlverhalten der Belagsmaterialien. Um dieses jedoch ausgiebiger analysieren zu können, wurden Abkühlraten in beiden Versuchsdurchläufen dokumentiert. Im 17-stündigen Versuch wurden die Parameter $A_{\text{rate},u,t,17}$, $A_{\text{rate},u,b1,17}$, $A_{\text{rate},u,b2,17}$ und im 22-stündigen Versuch der Vergleichsparameter $A_{\text{rate},u,t,22}$ gemessen. Da die Abkühlraten, ähnlich wie die Minimaltemperaturen, stark von den gemessenen Maximaltemperaturen abhängen, wurde die Abkühlzeit ($A_{\text{zeit},u,t,22}$) auf 28 °C im 22-stündigen Versuch untersucht. Dieser Vergleichsparameter hängt gleichermaßen von dem restlichen Temperaturverhalten ab, zeigt jedoch deutlich, welche Belagsmaterialien die Fähigkeit haben, ihr gespeicherte Wärme rasch abzugeben.

Zuletzt wurden die kurzzeitigen Temperaturdifferenzen im befeuchteten Zustand analysiert. Hierfür wurden die Vergleichsparameter $T_{\text{diff},o,b1,17}$ und $T_{\text{diff},o,b2,17}$ der Temperaturentnahmen der Oberflächensensoren ausgewertet. Die Parameter dokumentieren die Differenz zwischen der Temperatur direkt vor dem Befeuchtungsereignis und eine Stunde danach. Ein negativer Wert zeigt eine

Temperaturabnahme, trotz durchgehender Beleuchtungsphase, und ein positiver Wert zeigt eine Temperaturzunahme zu dem Wert, der nach einer Stunde gemessen wurde.

Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus

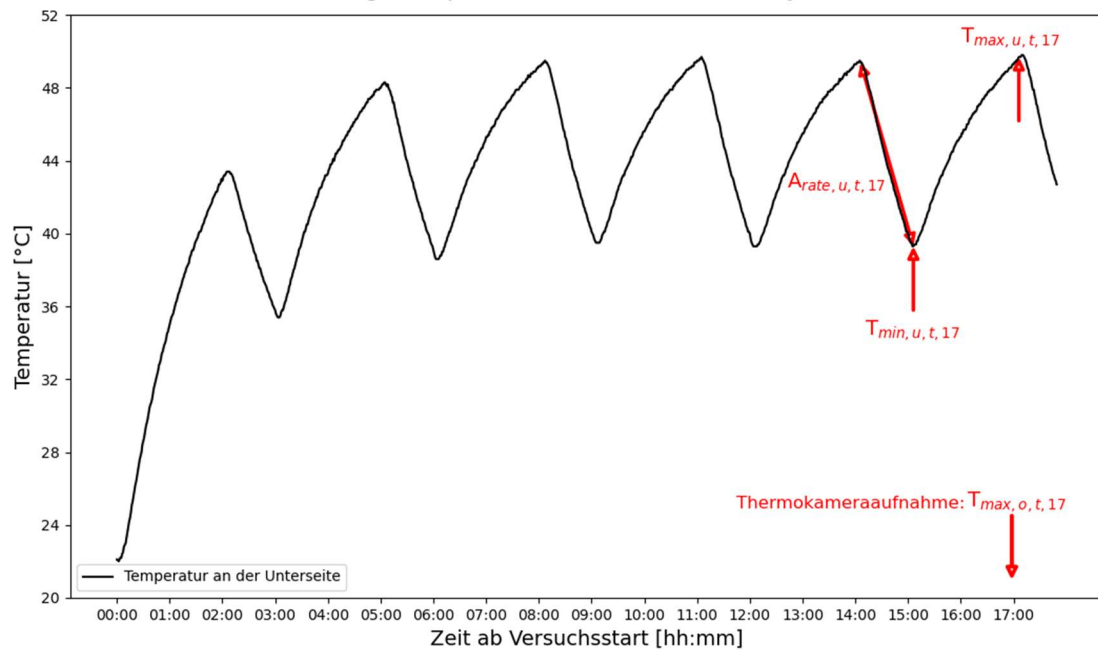


Abbildung 4-16 Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus im trockenen Zustand

Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus - 1. Bewässerungskonzept (Regenereignis)

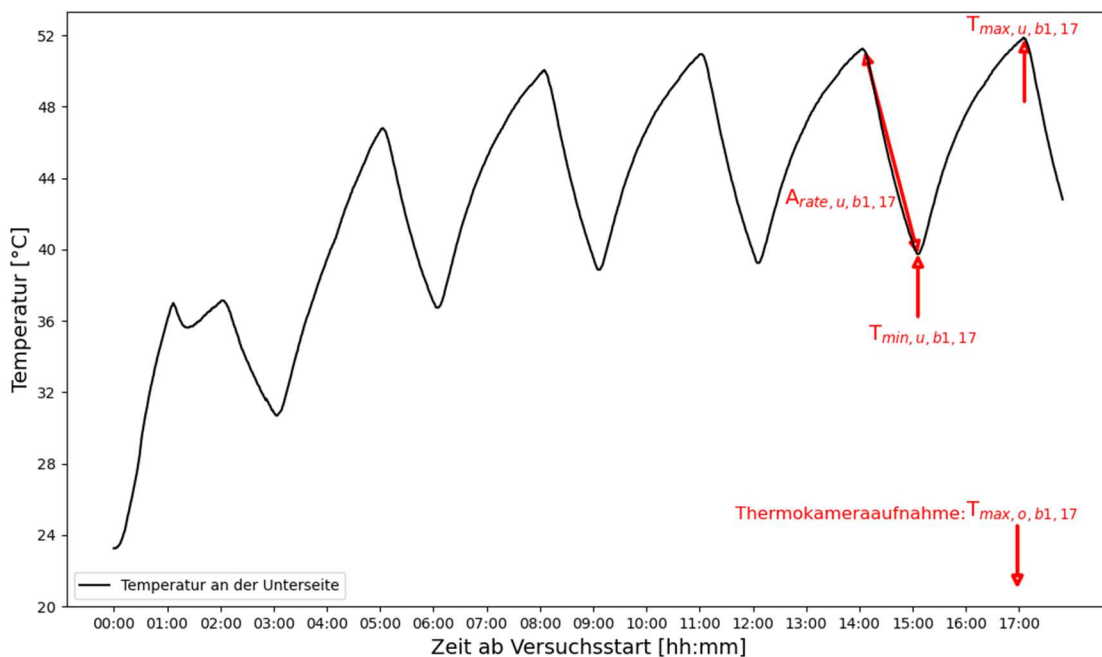


Abbildung 4-17 Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus – Befeuchtungskonzept 1

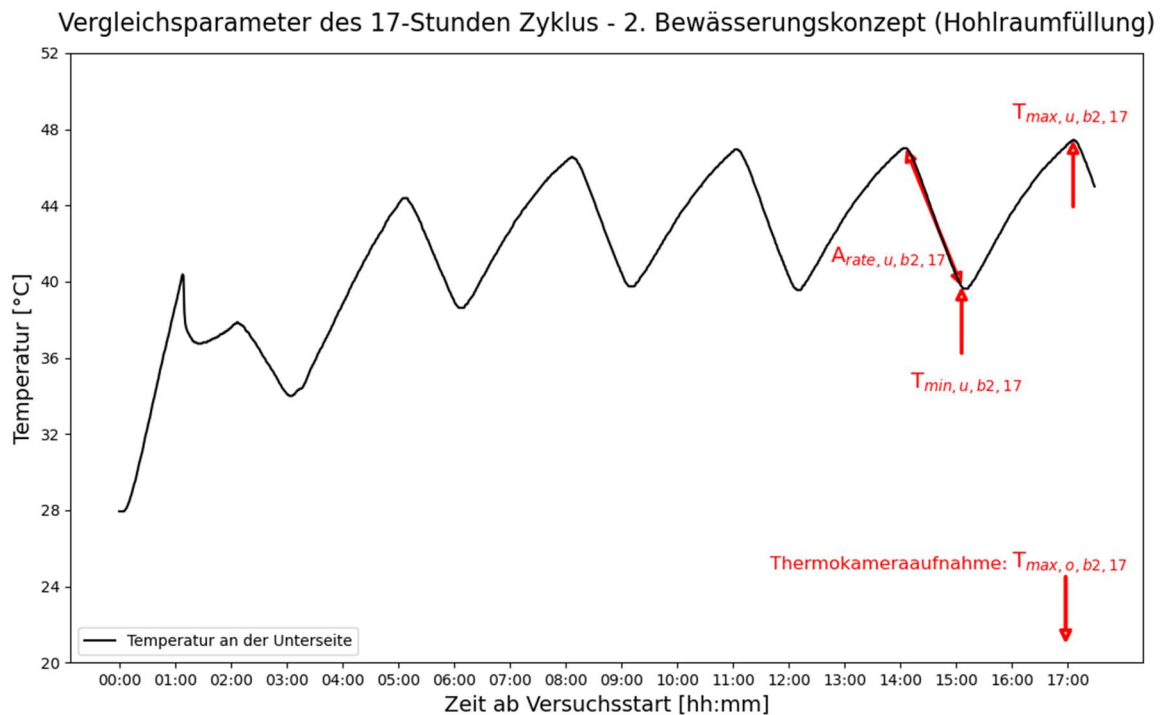


Abbildung 4-18 Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus – Befeuchtungskonzept 2

Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus Temperaturen an der Oberfläche

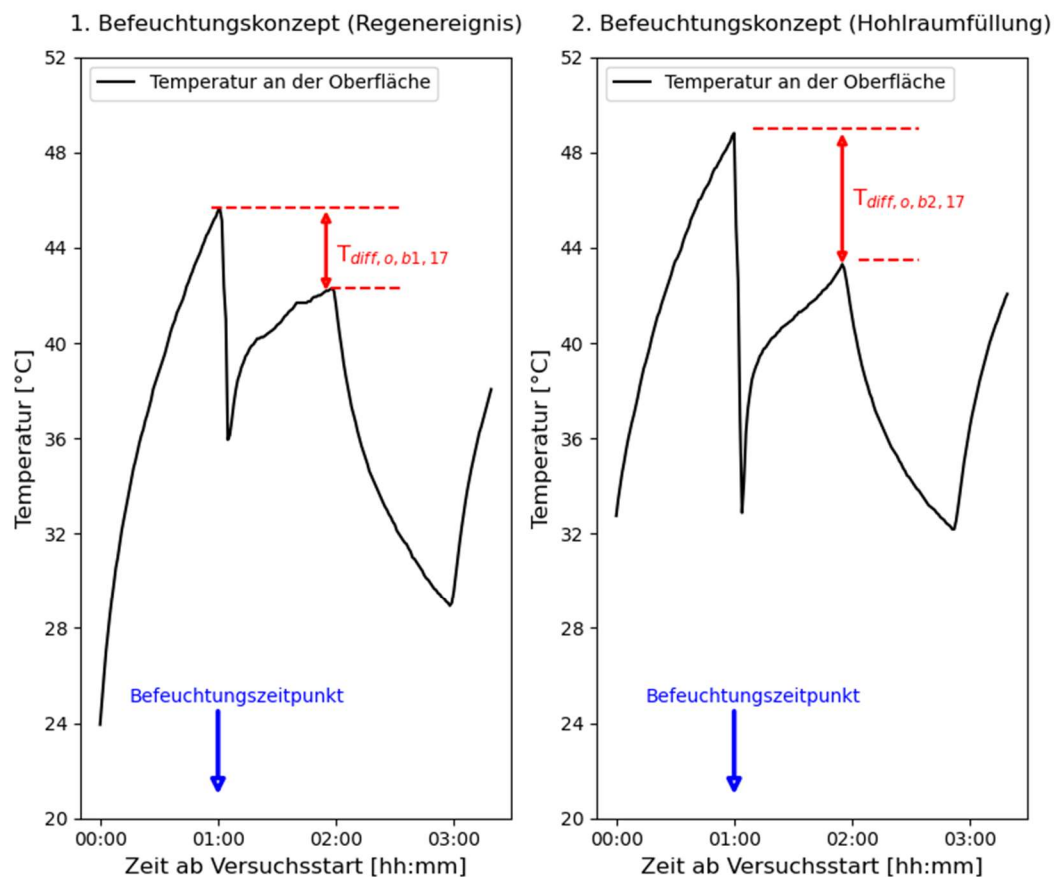


Abbildung 4-19 Vergleichsparameter des 17-Stunden Zyklus unter Befeuchtung an der Oberfläche

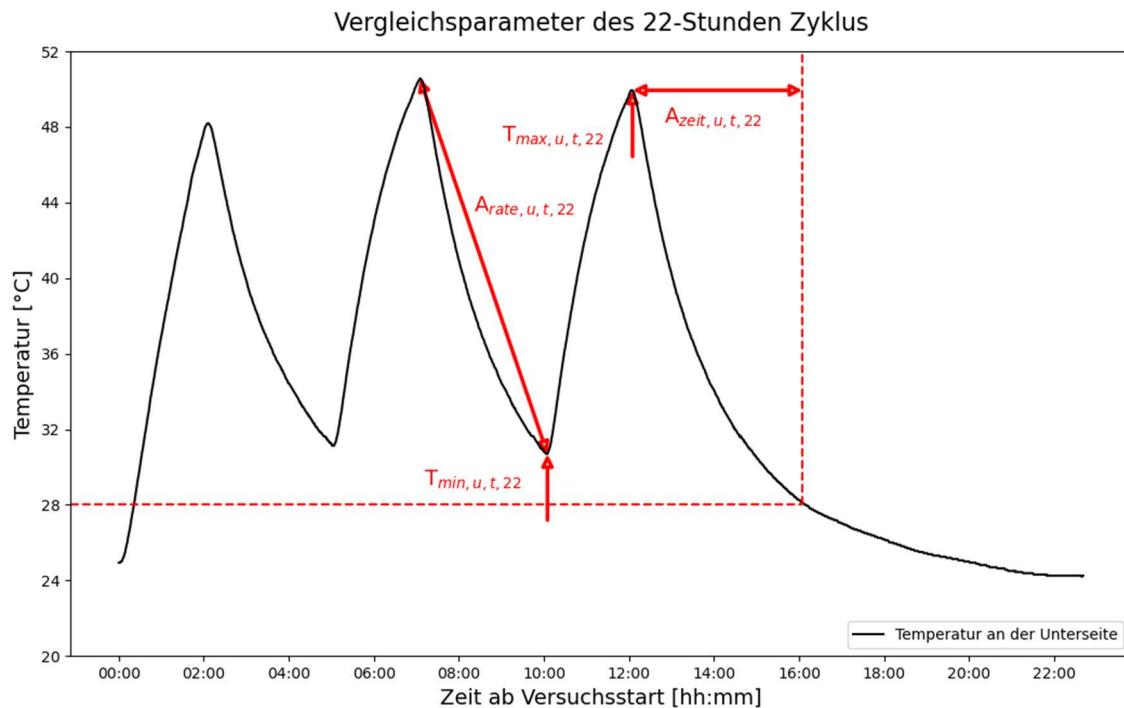


Abbildung 4-20 Vergleichsparameter des 22-Stunden Zyklus im trockenen Zustand

4.2.2. Grundlagen der Modellierung

Basierend auf Kapitel 3 der Diplomarbeit „Entwicklung und Implementierung eines verbesserten numerischen Modells zur Dimensionierung frostsicherer Straßenoberbauten“ wurden die Oberflächentemperaturen der Belagsmaterialien modelliert [25]. In den folgenden Absätzen werden die Annahmen zur Simulation von Temperaturen in Straßenkörpern dieser grundlegenden Arbeit zusammengefasst dargestellt:

Die Grundlage zur Abschätzung der Oberflächentemperaturen am Straßenkörper mittels computerbasierter Modellierung bildet die Wärmeleitgleichung oder Diffusionsgleichung. Es handelt sich um eine homogene partielle Differentialgleichung 2. Ordnung mit konstanten materialabhängigen Koeffizienten.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{\lambda}{c_{vol}} \quad (4)$$

wobei λ die Wärmeleitzahl in $Wm^{-1}K^{-1}$, c die Wärmekapazität in $Jkg^{-1}K^{-1}$ und ρ die Dichte in $kg m^{-3}$ beschreiben. Zur Abschätzung der Oberflächentemperatur wurde die Wärmeleitgleichung mithilfe der Finiten Differenzen Methode (FDM), für den 1-dimensionalen Fall, numerisch gelöst. Dabei wurden die infinitesimal kleinen Differentiale durch finite Differenzenquotienten entsprechender Ordnung approximiert, wodurch das Temperaturprofil iterativ zu jedem Zeitpunkt ausgehend vom vorangegangenen berechnet werden konnte.

Zur Berücksichtigung der oben beschriebenen Einflussfaktoren wurde eine Energiebilanz am Straßenkörper aufgestellt.

$$Q + B + L + V = 0 \quad (5)$$

Dabei beschreibt Q die gesamte Strahlungsbilanz, also alle eingehenden und ausgehenden sowie kurzwelligen und langwelligen Strahlungsanteile in Wm^{-2} , B den Bodenwärmestrom zufolge Konduktion in Wm^{-2} , L die latente Wärme zufolge Konvektion in Wm^{-2} und V die Verdunstungsenergie in Wm^{-2} .

Nach Ansetzen der entsprechenden Randbedingungen an der Oberfläche und im Untergrund sowie der Verknüpfung der beiden Grundgleichungen über den Term des Bodenstroms B wurde ein physikalisches Modell zur Abschätzung der Temperatur im Straßenkörper abgeleitet.

In der Simulation wurden folgende Materialparameter bzw. Schichtdicken angesetzt:

Tabelle 4-3 Materialparameterannahme für Modellierung

	$\lambda [Wm^{-1}K^{-1}]$	$c [Jkg^{-1}K^{-1}]$	$\rho [kgm^{-3}]$	$dx [m]$	Quelle
MA	0.70	1010	2350	0.25	[26, 27]
PA	0.85	946	2100	0.25	[28, 29]
AC	1.112	823	2356	0.25	[28, 30]
HSD	1.010	734	2120	0.25	[30]
ung. o. TS	0.7	1400	1800	0.2	[31]
ung. u. TS	0.7	1400	1800	0.3	[31]
Untergrund	1.5	1670	1200	-	[31]

Die kurzwellige Strahlung wurde anhand der geometrischen Beziehungen zwischen Sonne und Erde und des Albedos des jeweiligen Probekörpers abgeschätzt [32].

$$Q_{sw} = \alpha \cdot (910 \cos z - 30), \quad (6)$$

wobei α den experimentell ermittelten Albedo-Wert (siehe Abbildung 5-1) und z den Sonnenzenitwinkel beschreibt. Die langwellige Strahlung ist definiert als

$$Q_{lw} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (7)$$

wobei ε_a den Emissionskoeffizienten der Luft, σ die Stefan-Boltzmann-Konstante in $Wm^{-2}K^{-1}$, T_a die Lufttemperatur in K , ε den Emissionskoeffizienten des Straßenbelags und T_s die Oberflächentemperatur in K beschreibt. Der langwellige, von der Atmosphäre abstrahlende, auf den Straßenkörper eingehende Anteil wurde mittels empirischen Ansatzes aus flächendeckenden Oberflächentemperaturdaten abgeschätzt [33], [25].

$$Q_{lw} = \sigma T_a^4 (G - H \cdot 10^J e) \quad (8)$$

wobei e den Sättigungsdampfdruck bei entsprechender Temperatur und $G = 0.201$, $H = 0.129$ sowie $J = 0.076$ den Regressionsparametern entspricht. Für den emittierenden Anteil wurde bei allen Deckschichten ein für Straßenkonstruktionen typischer Emissionsfaktor ε von 0.93 angesetzt, wobei dieser laut Literatur nach Konstruktionstyp variiert und einen beachtlichen Einfluss auf die Temperaturen der Straßenkörper haben kann [3, 4].

Der Bodenstrom B zufolge Konvektion wurde als materialabhängige Größe über folgende Differentialgleichung definiert:

$$B = \lambda \frac{\partial T}{\partial x^2} \quad (9)$$

Die latente Wärme L zufolge Konvektion wurde über das Newton'schen Abkühlungsgesetzes definiert:

$$L = \alpha (T_s - T_a) \quad (10)$$

wobei α den Wärmeübergangskoeffizienten in $Wm^{-2}K^{-1}$, T_s die Oberflächentemperatur in K und T_a die Lufttemperatur in K beschreibt.

Die Verdunstungsenergie V wurde nicht berücksichtigt, da Hitzeperioden, bei denen Niederschlagsereignisse ausblieben, untersucht wurden.

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1. Experimentelle Ergebnisse

Im Folgenden werden die Forschungsergebnisse durch Grafiken dargestellt und veranschaulicht. Aufgrund der Fülle an gemessenen Daten werden die aufgenommenen Temperaturverläufe der Sensoren, Wärmebildaufnahmen und zusammenfassenden Ergebnistabellen dem Anhang hinzugefügt.

5.1.1. Albedo

Die Mittelung der 50-minütigen Versuchsergebnisse nach Formel (2) sind in Abbildung 5-1 auszulesen. Geringe Albedo-Werte weisen auf hohe Wärmespeicherung im bestrahlten Körper hin, hohe Albedo-Werte hingegen auf hohes Reflexionsvermögen der Oberfläche. Die Gegenüberstellung der Mischgüter hinsichtlich ihres Rückstrahlvermögens zeigt geringe Albedo bei den schwarzen, bituminösen Oberflächen des Gussasphaltes und den openporigen Asphalten. Nach dem Sandstrahlen der PA-Oberflächen konnten eine erhöhte Rückstrahlkapazität festgestellt werden. Derartige Erscheinungsbilder können voraussichtlich aufgrund von Bitumenabtrag nach einigen Jahren der Abnutzung beobachtet werden. Halbstarre Deckschichten weisen ein etwas höheres Rückstrahlvermögen auf als die getesteten sandgestrahlten Probekörper. Die Albedo der durch Bituclair gebundenen Asphaltbetone variieren abhängig von den zugegebenen Pigmenten und TiO_2 . Es ist nur eine geringe Verbesserung der Albedo durch Zugabe von roten Pigmenten (siehe Abbildung 5-1 AC 11 rot) im Vergleich zu dem Asphaltbeton ohne Farbzugabe (siehe Abbildung 5-1 AC 11 trans) feststellbar. Der gelbe AC 8 weist in dieser Gruppe die höchsten Albedo-Werte auf. Bei den Rückstrahlkapazitäten der weiß eingefärbten Oberflächen, welche zuvor schwarz waren, sind stark erhöhte Albedo-Werte beobachtbar. Der eingefärbte Gussasphalt konnte aufgrund seiner glatten Oberfläche eine beinahe komplette Wärmereflexion erzielen.

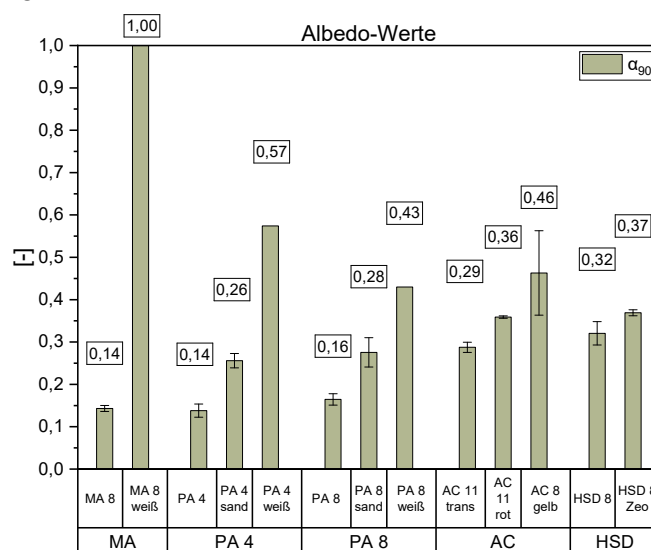


Abbildung 5-1 Albedo-Mittelwerte der Platten

5.1.2. Temperaturverhalten

In den folgenden Balkendiagrammen werden die gemessenen Vergleichsparameter dargestellt. Im trockenen Zustand wurden Mittelwerte der Temperaturmessungen gebildet und mit einem X

gekennzeichnet. Diese dienen der Stärkung der Aussagekraft und der Erleichterung des Vergleichs der verschiedenen Mischgüter, durch die Einbeziehung von 4 statt 2 Messungen. In den folgenden Balkendiagrammen ist besonders bei der Interpretation des thermischen Verhaltens der weiß eingefärbten Oberflächen Vorsicht geboten. Ein derartiges Reflexionsverhalten währt nur wenige Tage im frisch eingefärbten Zustand und kann aufgrund von Verschmutzung nicht mit vertretbarem Aufwand aufrechterhalten werden.

Abbildung 5-2 zeigt die gemessenen Maximaltemperaturen der Sensoren an der Unterseite der Platte. Links sind die Versuchsergebnisse der trockenen Messung und rechts jene nach Befeuchtungsereignis 1 und 2 einsehbar. Eine Korrelation der Maximaltemperaturen zu der gemessenen Albedo ist ersichtlich, siehe niedrige Temperaturen bei MA 8 weiß und hohe Temperaturen bei den schwarzen Asphalten (MA 8, PA 4 und PA 8). Außerdem kann eine Temperaturabnahme an den offenporigen Belägen nach Entfernung des oberflächennahen Bitumens festgestellt werden. Das Temperaturniveau der anderen klimafitten Beläge (AC 11 trans, AC 8 gelb, HSD 8 und HSD 8 Zeo) kann durch die sandgestrahlten PA jedoch nicht erreicht werden. Durch Einfärbung der Oberflächen in weiß ist dies möglich. Der PA 4 zeigt in Abbildung 5-1 niedrigere Albedo-Werte als der PA 8. Auch die aufgezeichneten Maximaltemperaturen an der Unterseite sind etwas niedriger als bei dem PA 8. Im Balkendiagramm der befeuchteten Versuche ist zu erkennen, dass die Wassermenge (Befeuchtungsereignis 1: 234 ml, Befeuchtungsereignis 2: Hohlraumfüllung bis zu 823 ml) einen bedeutenden Einfluss auf die Maximaltemperaturen, welche 16 Stunden nach dem Befeuchtungsereignis gemessen wurden, hatten. Die Reihung der Mischgüter im direkten Vergleich der trockenen und befeuchteten (Befeuchtungskonzept 1) 17 h-Messung ist ähnlich. Der Einfluss der Feuchte auf den MA 8 ist vermutlich auf das aufgestaute Wasser im Prüfstand zurückzuführen.

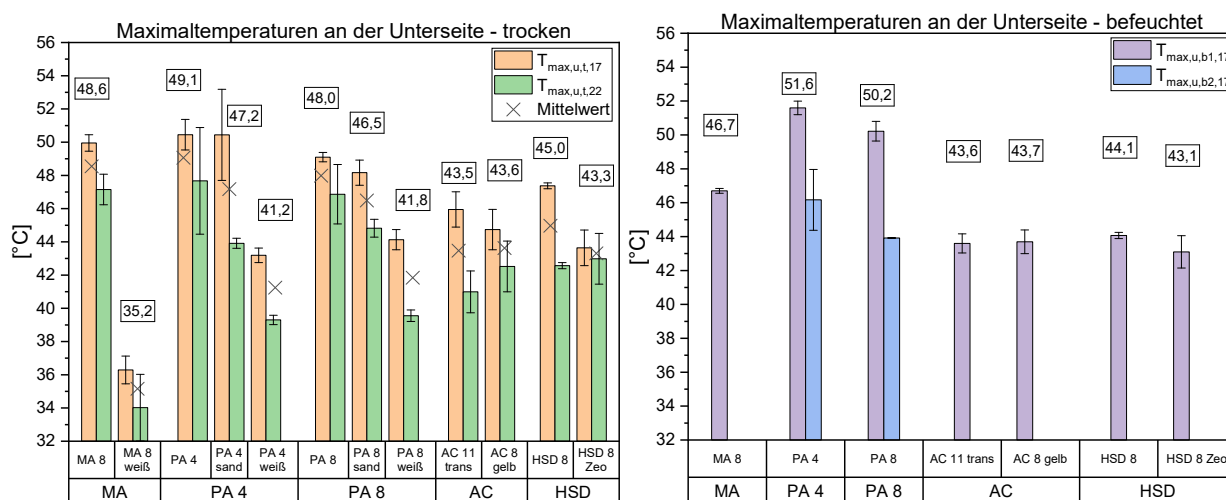


Abbildung 5-2 Maximaltemperaturen an der Unterseite der Platten im trockenen Zustand (links) befeuchtet (rechts)

Die mittels Thermokameraaufnahmen gemessenen lokalen Maximaltemperaturen an den Oberflächen sind in Abbildung 5-3 dargestellt. Der Einfluss der Albedo auf die Temperaturen ist wie erwartet insbesondere an der Oberfläche sehr deutlich erkennbar. Als Ausreißer ist der MA 8 weiß wie auch bei den restlichen Vergleichsparameter erkennbar. Die weiß angestrichenen PA-Probekörper weisen eine ähnliche Maximaloberflächentemperatur wie der AC 8 gelb auf, bei ähnlichen Albedo-Werten. Auch in Abbildung 5-3 ist die Reihung der Mischgüter für die trockenen und befeuchteten Messung vergleichbar.

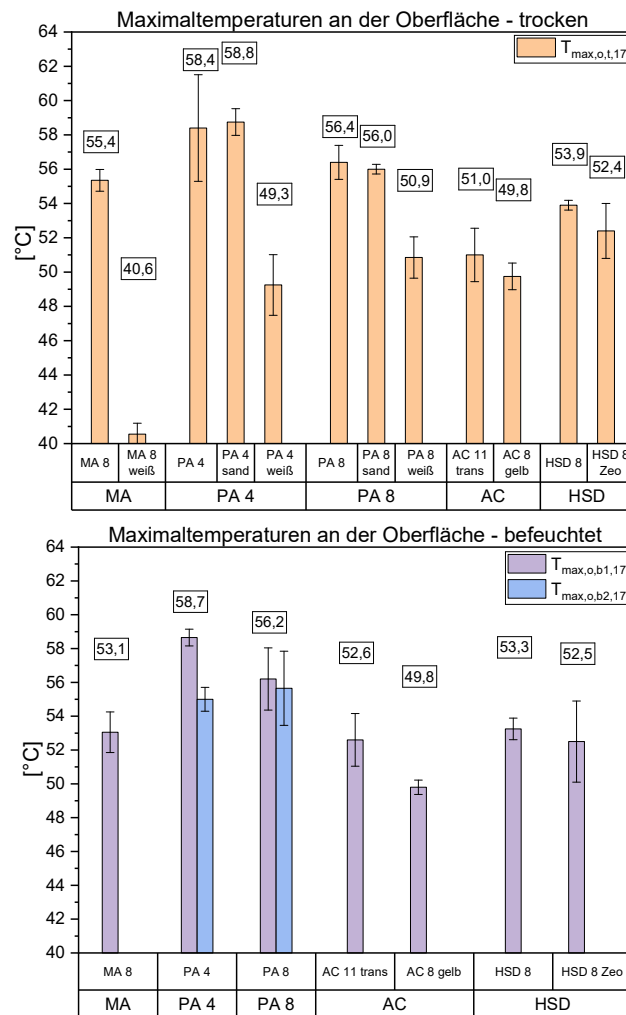


Abbildung 5-3 Maximaltemperaturen an der Oberfläche der Platten im trockenen Zustand (links) befeuchtet (rechts)

Abbildung 5-4 stellt den Vergleich der lokalen Minimaltemperaturen dar. Die Minimaltemperaturen geben einen ersten Indikator für das Abkühlverhalten der Beläge. Beläge mit hohen Maximaltemperaturen haben, abhängig von ihren Abkühlraten, tendenziell auch hohe Minimaltemperaturen. Wobei die Minimaltemperaturen nicht so stark voneinander abweichen wie die in Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 ausgewerteten Maximaltemperaturen. Die minimalen Temperaturmittelwerte der weiß angestrichenen offenporigen Asphalte sind aufgrund ihrer geringen Dichte und des günstigen Abkühlverhaltens niedriger als die der restlichen Beläge, mit Ausnahme des MA 8 weiß. Zuzufolge Abbildung 5-4 rechts hat die Befeuchtungsmenge keinen großen Einfluss auf die Minimaltemperaturen.

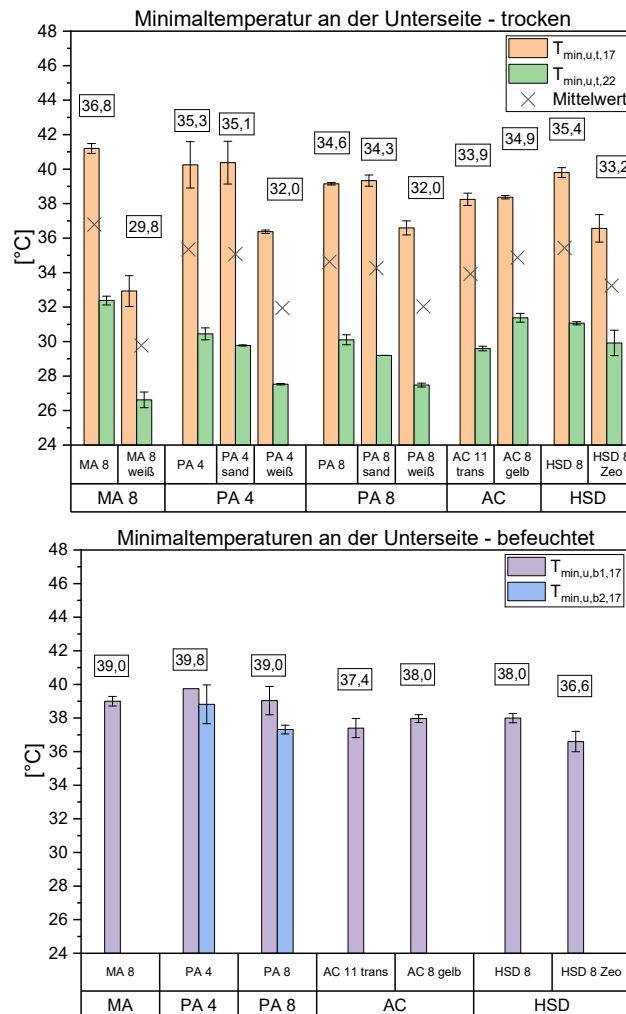


Abbildung 5-4 Minimaltemperaturen an der Unterseite der Platten im trockenen Zustand (links) befeuchtet (rechts)

Die in Abbildung 5-5 dargestellten Temperaturdifferenzen, gemessen mittels Oberflächentemperatursensoren, zeigen den kurzfristigen Einfluss der Befeuchtung auf die Materialien. Die Temperaturdifferenz zwischen dem Zeitpunkt kurz vor dem Befeuchtungsereignis und eine Stunde danach wurde berechnet. Während dieser Stunde wurden die Probekörper weiter mit der Tageslichtlampe bestrahlt. Die ermittelten Temperaturdifferenzen an der Oberfläche geben einen Hinweis auf die Abkühlkapazität der Beläge im Sommer direkt nach einem Regenereignis. Wobei negative Werte eine Abnahme der Temperaturen an der Oberfläche bedeuten. Die wasserinduzierte Abkühlung scheint mit dem Porengehalt der Beläge zu korrelieren. Offenporige Beläge, aber auch Asphaltbetone, zeigen eine Abkühlung direkt nach dem Befeuchtungsereignis. Durch Zugabe von Zeolithen kann eine erhöhte Wasserspeicherkapazität bei den halbstarren Deckschichten festgestellt werden. Bei dem MA 8 und dem HSD 8 ohne Zeolithen sind die geringsten Effekte des Befeuchtungsereignisses beobachtbar.

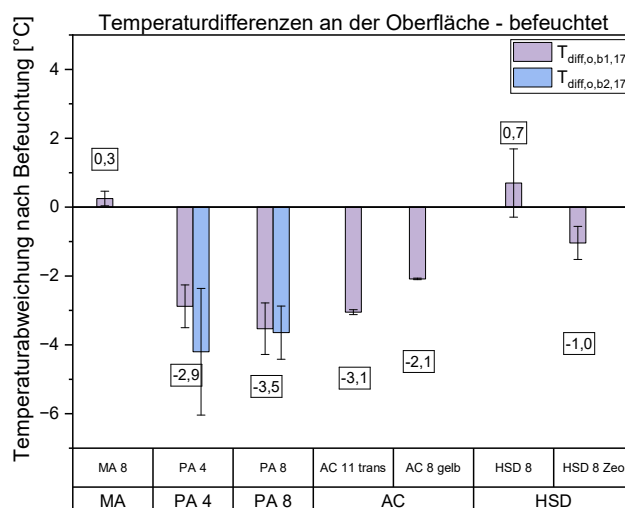


Abbildung 5-5 Temperaturdifferenzen an der Oberfläche der Platten nach Befeuchtung

Abbildung 5-6 deutet auf ein positives Abkühlverhalten der offenporigen Asphalte und des Gussasphaltes hin. Es ist jedoch zu beachten, dass Beläge mit hohen Maximaltemperaturen mehr Wärmeenergie gespeichert haben, die abgegeben werden kann. Beläge, welche sich ohnehin nicht so stark erhitzt haben, können auch nicht so weit abkühlen. Das bedeutet, die dargestellten Abkühlraten in Abbildung 5-6 sollten mit Vorsicht interpretiert werden. Dementsprechend ist es sinnvoll die Abkühldauer der Beläge auf einen Grenzwert zu interpretieren. Die in Abbildung 5-7 dargestellten Abkühlzeiten, weisen auf ein schlechtes Abkühlverhalten des dichten Gussasphalts hin. Im Gegensatz dazu können die offenporigen Asphalte, trotz der hohen Temperaturen (siehe Abbildung 5-2), schnell auf 28°C abkühlen. Es ist ein Zusammenhang zwischen der Dichte der Materialien und deren Abkühlverhalten ablesbar.

Auch hier sind die Ergebnisse der weiß eingefärbten Asphalte wenig überraschend. Dadurch, dass die Probekörper MA 8 weiß nur Maximaltemperaturen von etwa 34°C im 22-Stunden-Versuch an der Unterseite hatten (siehe Abbildung 5-2), ist eine geringe Abkühlzeit auf 28°C voraussehbar.

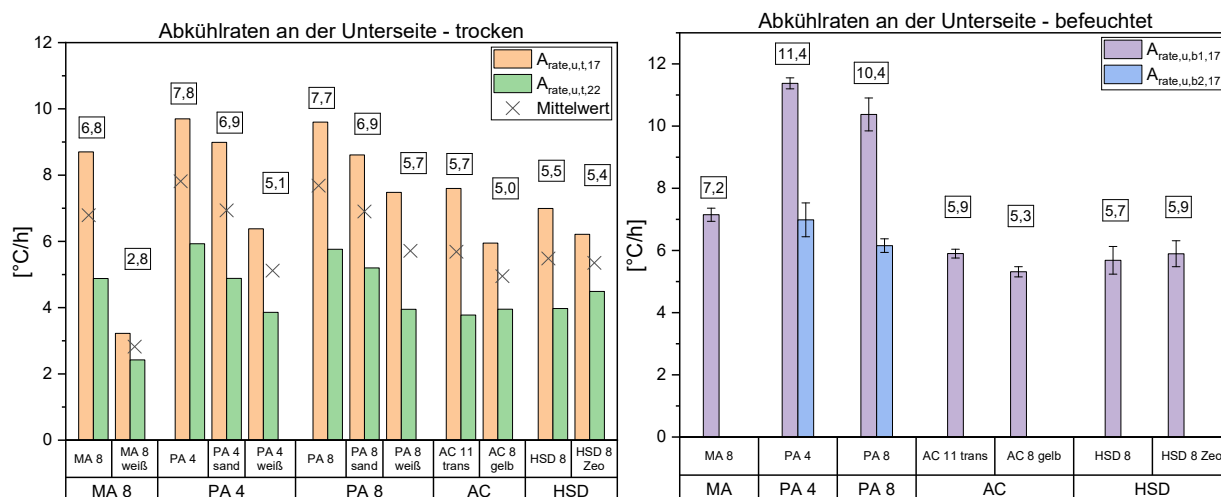


Abbildung 5-6 Abkühlraten an der Unterseite der Platten im trockenen Zustand (links) befeuchtet (rechts)

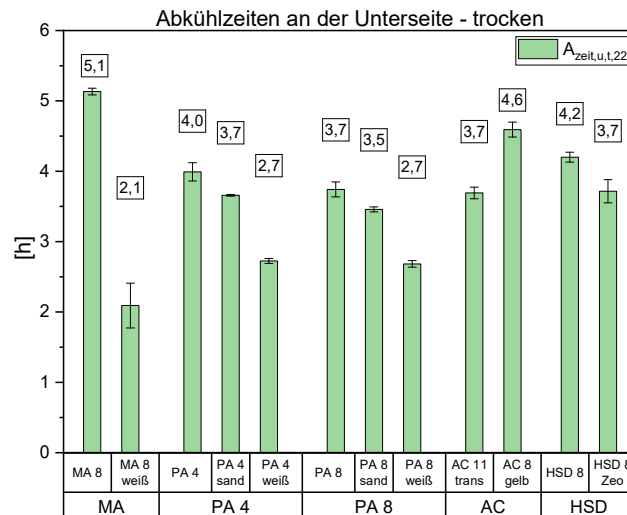


Abbildung 5-7 Abkühlzeit auf 28°C an der Unterseite der Platten im trockenen Zustand

5.2. Modellierungsergebnisse

Um den Modellierungs-Output mit den gemessenen Laborprüfungen vergleichen zu können fokussiert die Auswertung auf eine markante 3-tägige Hitzeperiode im August 2015. Hierbei wurden die Tagestemperaturen der Oberflächen der untersuchten Materialien abgebildet (siehe Abbildung 5-8). Die Temperaturen der Beläge heben sich abhängig von den angenommenen Materialparametern, siehe Tabelle 4-3, und den gemessenen Albedo-Werten voneinander ab. Durch Ermittlung der Emissionsgrade, Dichten, Wärmespeicherkapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten der untersuchten Materialien (siehe Kapitel 4.1) könnten in Zukunft genauerer Modellierungen durchgeführt werden.

Dadurch, dass in der Modellierung laborgeprüfte Albedo-Werte herangezogen wurden und ein Albedo von 1 einer totalen Reflexion entspricht, wurde der weiß eingefärbte Gussasphalt nicht modelliert, da dies modelltechnisch nicht abbildbar ist.

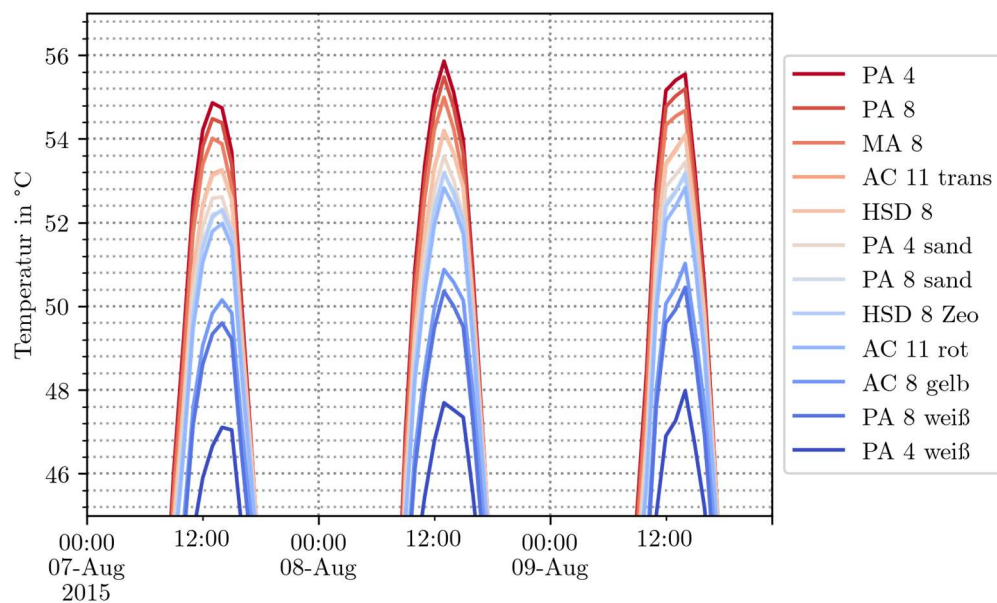


Abbildung 5-8 Modellierung der Oberflächentemperaturen während einer Hitzeperiode in Wien im August 2015

Die in Abbildung 5-8 dargestellten Maximaltemperaturen deuten auf einen Einfluss der Albedo auf das Temperaturverhalten der Beläge hin. Der positive Einfluss hochreflektierender Oberflächen wurde auch in der Laborstudie beobachtet. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass bei hoch reflektierenden (sehr hellen, glatten) Oberflächen die Lufttemperatur tagsüber nahe an der Oberfläche stark ansteigt, was zu hoher Hitzebelastung von Nutzer_innen führt. Ebenso ist die Blendwirkung nicht zu vernachlässigen.

Die Auswertung der Maximaltemperaturen aus dem Modell ($T_{\max,o,modelliert}$) der in Abbildung 5-8 dokumentierten Temperaturverläufe wurde in Abbildung 5-10 mit den gemessenen Maximaltemperaturen an der Oberfläche ($T_{\max,o,t,17}$) verglichen, dargestellt.

In der Modellierung sind die Temperaturen der offenporigen Asphalte tendenziell geringer als jene im Prüfstand. Die Asphaltbetone mit synthetisch transparentem Bindemittel weisen wiederum höhere Temperaturen in der Modellierung auf. Diese Abweichungen können vermutlich auf die gewählten Materialparameter der Modellierung zurückgeführt werden. Insgesamt zeigen die experimentell ermittelten und modellierten Maximaltemperaturen an der Oberfläche vergleichbare Ergebnisse. Die Größenordnung der Temperaturen des Prüfstands stimmen mit jenen der modellierten Hitzeperioden im Feld überein. Somit konnte im Rahmen der Modellierung auch das Konzept des Versuchsstand validiert werden.

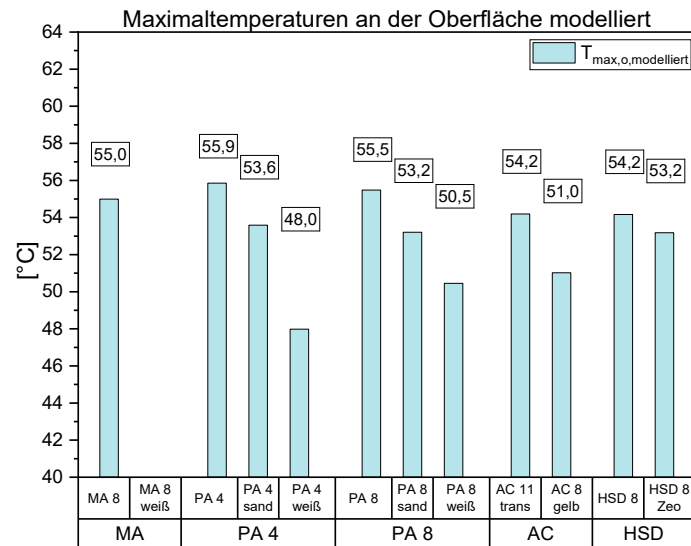


Abbildung 5-9 Maximaltemperaturen an der Oberfläche nach Modellierung

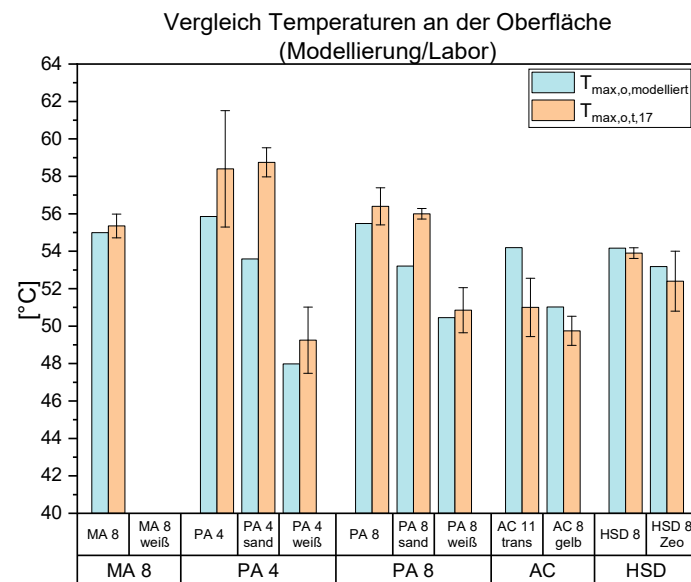


Abbildung 5-10 Vergleich der Maximaltemperaturen an der Oberfläche (Modellierung / Labor)

6. Schlussfolgerungen

Um die Forschungsergebnisse gegenüberstellen zu können, wird eine Wertung eingeführt. Diese Wertung stellt nicht die tatsächlichen Zusammenhänge zwischen den Belägen dar, da es sich um linear bewertete Vergleichsstudien handelt. Dennoch zeigen die in Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 dargestellten Wertungen, mit dem in Abbildung 6-1 dokumentierten Bewertungsschlüssel, die Stärken und Schwächen der Belagsmaterialien auf.



Abbildung 6-1 Bewertungsschlüssel

Um Fehlinterpretationen der Ergebnisse zu vermeiden, wurde die Ergebnisbewertung in zwei Vergleichsstudien geteilt. Vergleichsstudie 1 (siehe Abbildung 6-2) bewertet jene Straßenbeläge bei denen Feucht- und Trockenmessungen vorliegen. Hier sind die weiterverarbeiteten Asphalte durch sandgestrahlte und weiß eingefärbte Oberflächen nicht enthalten. Speziell das Einfärben der Oberflächen und die damit einhergehende beinahe totale Reflexion des MA 8 weiß ist im eingebauten Zustand nicht erreichbar. Dementsprechend sind zwar die Forschungsergebnisse der Vergleichsstudie 2 (siehe Abbildung 6-3) gleichermaßen interessant, aber ebenso mit Vorsicht zu genießen. Bei den Bewertungen ist die Albedo-Messung des roten AC 11 nicht enthalten. Die potenzielle Reihung wäre ähnlich der des AC 11 trans anzunehmen.

In Vergleichsstudie 1 wurde eine 1:1 Gewichtung herangezogen, das bedeutet jede Bewertung erfolgte durch eine direkte Zuordnung zu einem Straßenbelag. Bei der zweiten Vergleichsstudie wurde allen Bewertungskategorien zwei Beläge zugeordnet, mit Ausnahme der Kategorien „~/+“ und „~/–“, denen nur ein Straßenbelag zugeordnet wurde.

Aus den Forschungsergebnissen dieses Projektes geht klar heraus, dass der in Wien herkömmlich verwendete Gussasphalt in der implementierten Wertung im Vergleich zu den klimafitten Belägen kein gutes, sommerliches Temperaturverhalten aufweist.

Eine Korrelation zwischen den Albedo- und Temperaturwerten wird erwartet. Besonders eindrücklich ist diese Vermutung durch den Vergleich der Gussasphalt-Probekörper im Initial- und eingefärbten Zustand erkennbar. Das Einfärben der Oberflächen ist zu derzeitigem Stand der Technik aufgrund von Verschleißspuren keine dauerhafte Aufhellungsmaßnahme. Dementsprechend sind die Lösungen der mit transparentem Bindemittel gefärbten Asphaltbetone mit Aufhellungsgestein vielversprechend. Besonders der gelb eingefärbte AC 8 hatte in den Vergleichsstudien geringe Temperaturen. Das Abkühlverhalten kann womöglich durch die Korngrößenverteilung, welche die Dichte der Beläge beeinflusst, verbessert werden. Der nicht so stark reflektierende AC 11 transparent hatte zwar höhere Temperaturen, aber ein schnelleres Abkühlverhalten. Durch die hellgraue Oberfläche der halbstarren Deckschichten kann das Rückstrahlverhalten ebenso verbessert werden. Auch hier konnten geringe Temperaturen und Abkühlverhalten erzielt werden. Derartige Straßenbeläge könnten Anwendung im hochrangigen Verkehrsnetz finden. Nachteilig ist jedoch der aufwendige Herstellungsprozess anzusehen.

Die geprüften offenporigen Asphalte überzeugen durch ihr schnelles Abkühlverhalten und ihre Fähigkeit Wasser oberflächennahe zu speichern bzw. im Sinne des Schwammstadtprinzips an den Untergrund abzugeben. Verdeutlicht wird diese Eigenschaft durch die Temperaturabnahme des Parameters $T_{\text{diff,u,b1},17}$.

Vergleichsstudie 1 befeuchtet und trocken:											
	α_{90}	$T_{\max,u,t,17}$	$T_{\max,u,t,22}$	$T_{\max,u,b,17}$	$T_{\max,o,t,17}$	$T_{\max,o,b,17}$	$T_{\min,u,t,17}$	$T_{\min,u,t,22}$	$T_{\min,u,b,17}$	$T_{\text{diff},u,b,17}$	$A_{\text{zeit},u,t,22}$
MA 8											
PA 4											
PA 8											
AC 11 trans											
AC 8 gelb											
HSD 8											
HSD 8 Zeo											

Abbildung 6-2 Wertung der Forschungsergebnisse -Vergleichsstudie 1

Vergleichsstudie 2 trocken:							
	α_{90}	$T_{\max,u,t,17}$	$T_{\max,u,t,22}$	$T_{\max,o,t,17}$	$T_{\min,u,t,17}$	$T_{\min,u,t,22}$	$A_{\text{zeit},u,t,22}$
MA 8							
MA 8 weiß							
PA 4							
PA 4 sand							
PA 4 weiß							
PA 8							
PA 8 sand							
PA 8 weiß							
AC 11 trans							
AC 8 gelb							
HSD 8							
HSD 8 Zeo							

Abbildung 6-3 Wertung der Forschungsergebnisse - Vergleichsstudie 2

Aufgrund der im Zuge dieses Projektes durchgeführten Versuche und studierten Literatur sollten folgende Aspekte bei der Wahl eines klimafitten Belags berücksichtigt werden:

- Maßnahmen zur Reflexionserhöhung (Erhöhung des Albedo-Werts) sollten in dicht bebauten Gebieten nur eingeschränkt eingesetzt werden. Die abgestrahlte Wärme kann von Fassaden, geparkten Fahrzeugen, oder Personen absorbiert werden und führt in Folge zu keiner Minimierung des UHI-Effektes. Es können im Gegenteil dadurch vermehrt Hitzeinseln während des Tages entstehen.
- Hohe Albedo-Werte an Straßenbelägen können das Wohlbefinden von Verkehrsteilnehmer_innen beeinträchtigen [34], aber auch zu Sichteinschränkungen führen. Auch die Barrierefreiheit für Menschen mit Sehbeeinträchtigungen muss gewährleistet werden.

- Anders als für Dächer, bei denen hohe Albedo-Werte sinnvoll sein können, sollte das Reflexionsvermögen bei Straßenbelägen nach oben hin begrenzt werden. Eine diffuse Reflexion (wie etwa bei offenporigem Asphalt oder auch Asphaltbeton) ist dabei jedenfalls einer gerichteten Reflexion (wie annähernd bei Gussasphalt) zu bevorzugen.
- Durch Verschmutzungen können die anfänglich hohen Albedo-Werte von sehr hellen Belägen nach einigen Jahren deutlich abnehmen. Zeitgleich führt Abrieb bei den anfänglich durch Bitumen dunklen Oberflächen zu einer Aufhellung. Eine Studie zeigt dazu, dass sich anfänglich helle (Beton-)Beläge und dunkle (Asphalt-)Beläge nach einigen Jahren in Bezug auf ihre Albedo-Werte angleichen [35]. Von Vorteil ist daher auf jeden Fall die Nutzung eines hellen Gesteins, das langfristig zu einer Aufhellung von Asphaltbelägen führt.
- Die Kosten des verwendeten transparentem Bindemittels sind deutlich höher als jene von herkömmlich verwendetem Bitumen. Der Einsatz von Emulsionen des transparenten Bindemittels in kalten Dünnenschichtdecken mit geringer Schichtdicke auf herkömmlichem Asphaltbeton kann diesen Kostenfaktor reduzieren.
- Die Hohlräume von offenporigen Asphalten können durch Verschmutzung mit der Zeit verstopfen. Insbesondere bei PA mit kleiner Körnung führen derartige Effekte zu einer Reduktion der vorteiligen Eigenschaften solcher Straßenbeläge. Aus diesem Grund ist es wichtig eine adäquate Reinigungsstrategie für offenporige Beläge zu entwickeln. Mechanische Reinigungsprozesse können zu einer Schädigung der Kornstruktur führen [7].
- Offenporige Asphalt sind anfälliger für Kornausbrüche durch Frost-Tau-Wechsel als dichte Asphaltbeläge. Daher sind die Lebensdauern von offenporigen Asphaltdeckschichten geringer als jene von dichten Asphaltbelägen.
- Halbstarre Deckschichten sind mit einem aufwendigen Herstellungsprozess verbunden. Der Einbau sollte auf hoch belastete Flächen beschränkt werden.
- Durch eingemischte Zeolithen in die Zementschlämme der halbstarren Deckschichten werden die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Vor der Anwendung von HSD mit Zeolithen muss die Festigkeit der Zementschlämme geprüft und die Rezeptur ggf. optimiert werden.

7. Empfehlungen für die Probestrecken

In Absprache mit dem Auftraggeber soll eine Probestrecke angelegt werden, auf der die Temperaturentwicklung im Sommer, aber auch die baupraktische Umsetzbarkeit und die Möglichkeit zur örtlichen Versickerung unter realen Bedingungen untersucht wird. Dazu werden auf einem Rad- und ggf. Gehweg verschiedene Varianten direkt miteinander verglichen:

- Referenzvariante – Standardoberbau eines Rad- und ggf. Gehwegs laut Planungsunterlagen der Stadt Wien mit einer Gussasphaltdeckschicht, einer bituminösen Tragschicht und ungebundenen Tragschichten mit Lastklasse LK0,4 gemäß dem Regelwerk (RVS). Diese Variante dient als Referenz und dem heutigen Stand der Technik entsprechend.
- Variante „Offenporiger Asphaltbelag“ – Oberbau eines Rad- und ggf. Gehwegs mit dem Fokus auf Wasserdurchlässigkeit zur örtlichen Versickerung. Dazu wird die bituminöse Deckschicht als offenporiger Asphalt (PA) ausgeführt. Die Tragschicht wird als Drainbetonschicht konzipiert. Somit kann die Wasserdurchlässigkeit bis zur ungebundenen Tragschicht gewährleistet werden. Diese Variante soll einerseits die Hitzebelastung reduzieren, indem raschere Abkühlzeiten und die Möglichkeit zur Bewässerung vor und während Hitzewellen realisiert werden. Zudem kann Niederschlagswasser direkt durch den Oberbau in den anstehenden Boden entwässern und Wasser im dicht besiedelten Gebiet gehalten werden (Schwammstadt-Prinzip).
- Variante „Heller Asphaltbelag“ – Oberbau eines Rad- und ggf. Gehwegs mit Fokus auf helle Oberfläche. Dazu wird die bituminöse Deckschicht mit transparentem Bindemittel und Aufhellungsgestein ausgeführt. Der darunterliegende Aufbau wird gemäß dem Standardoberbau der Stadt Wien ausgeführt. Diese Variante soll die Hitzebelastung reduzieren, indem geringere Oberflächentemperaturen durch höheres Rückstrahlvermögen (Albedo-Wert) auftreten.
- Variante „Aufhellungsgestein“ – Oberbau eines Rad- und ggf. Gehwegs mit Fokus auf helle Oberfläche. Dazu wird die Deckschicht mit bituminösem Bindemittel und Aufhellungsgestein ausgeführt. Vor der Verkehrsfreigabe wird der oberflächliche Bindemittelfilm durch Kugelstrahlen oder vergleichbare Verfahren entfernt. Diese Variante soll die Hitzebelastung reduzieren, indem geringere Oberflächentemperaturen durch höheres, diffuses Rückstrahlvermögen (Albedo-Wert) auftreten.

Die Probestrecke wird entsprechend mit Sensorik ausgestattet, um die Temperaturentwicklung nahe der Oberfläche und in den Oberbau kontinuierlich aufzeichnen zu können. Vor und während Hitzeperioden werden zusätzlich Messkampagnen durchgeführt, bei denen die Oberflächentemperaturen und die Temperaturen in 1,5 m Höhe analysiert werden, um deren Entwicklung im Vergleich der vier Varianten untersuchen zu können.

Die Probestrecke sollte so gelegen sein, dass die verschiedenen Varianten in etwa gleiche Beschattung aufweisen bzw. vollkommen frei von Beschattung sind, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Eine Mindestlänge pro Variante von 75 m, im Optimalfall von 100 m wird empfohlen.

7.1. Referenzvariante

Die Referenzvariante dient als Basis für den Vergleich mit den beiden Klimafitten Alternativen. Die Ausführung richtet sich nach den Planungsunterlagen der Stadt Wien für die bituminöse

Deck- und Tragschicht, sowie für die ungebundenen Tragschichten. Für die Anforderungen an die Ausgangsstoffe, das Mischgut, sowie die Ausführung gelten die entsprechenden Normen und Richtlinien.

7.2. Offenporiger Asphaltbelag

Diese Variante dient der Verringerung der Hitzebelastung im Sommer, sowie der örtlichen Versickerung von Niederschlagswasser. Bei der Ausführung sind daher neue Wege zu beschreiten, die zwar angelehnt an das vorhandene Normen- und Regelwerk (RVS) sind, jedoch in manchen Punkten notwendige Abweichungen beinhalten. Damit eine örtliche Versickerung sichergestellt ist, muss der gesamte Oberbau eine entsprechende Wasserdurchlässigkeit aufweisen.

Bituminöse Deckschicht

Die Deckschicht wird als offenporiger Asphalt PA8¹ P2 nach ÖNORM B 3586-1 ausgeführt, wobei ein Hohlraumgehalt von 25 % anzustreben ist. Ansonsten gelten die Anforderungen gemäß der angeführten Norm und der RVS 08.97.01 bzw. RVS 08.16.01.

Als Gesteinsklasse ist G1 zu wählen.

Bei der Wahl der Bindemittelsorte ist einerseits die Standfestigkeit maßgebend und andererseits die Rissbeständigkeit bei tiefen Temperaturen. Es wird daher empfohlen im Rahmen der Mischgutoptimierung sowohl ein Bindemittel der Sorte PmB 25/55-65, als auch der Sorte PmB 45/80-65 zu berücksichtigen und für Mischgüter mit beiden Bindemitteln Abkühlprüfungen nach ÖNORM EN 12697-46 durchzuführen. Eine maximale Bruchtemperatur $TSRST_{max-25,0}$ ist dabei der Zielwert. Wird dieser Zielwert mit dem härteren PmB erreicht, so ist dieses zu verwenden, um eine hohe Verformungsbeständigkeit zu gewährleisten.

Tragschicht

Die Tragschicht wird als Drainbetonschicht ausgeführt. Die Umsetzung einer Tragschicht auf Zementbasis erleichtert den Einbauprozess des Gesamtaufbaus² und sichert gleichzeitig die Durchlässigkeit dieser Schicht.

Ungebundene untere Tragschicht

Für die ungebundene Tragschicht gelten die Anforderungen gemäß RVS 08.15.01

Oberbaubemessung, Ausführung und Betrieb

Gemäß RVS 03.08.63 ist eine Deckschicht des Typs PA mit 50 % ihrer tatsächlichen Schichtdicke anzurechnen. Die Deckschicht PA 8 P2 kann mit einer max. Schichtdicke von 4,0 cm eingebaut werden. Folglich trägt sie mit 2,0 cm zur Oberbaubemessung und somit zur Wahl der Lastklasse bei. Die Realisierung der Tragschicht als Drainbeton erfolgt auf Grundlage von Erfahrungswerten und Forschungsergebnissen der Stadt Wien und ist mit 15 cm bis 20 cm konzipiert.

¹ Eine Deckschicht mit einem Größtkorn 4 mm (PA 4) ist im Österreichischen Regelwerk nicht vorgesehen. Ein PA 4 wurde zwar im Rahmen dieses Forschungsprojekts untersucht. Aufgrund der ungünstigen Erfahrungen in der Praxis, vor allem das rasche Verstopfen der kleinen Hohlräume und der verstärkte Kornausbruch beim Reinigen mit Druck-Spül-Saug-Maschinen, wird diese Variante nicht für die Probestrecke empfohlen.

² Bei einer optionalen Ausführung einer Tragschicht eines offenporigen Asphalts müsste der Einbau heiß auf heiß erfolgen. Das Vorspritzen mit einer Emulsion als Haftgrund ist nicht möglich, um sicherzustellen, dass eine durchgängige Wasserdurchlässigkeit aller Schichten gewährleistet ist.

Eine durchgängige Drainagefähigkeit von der Oberfläche bis in die ungebundene Tragschicht muss sichergestellt werden. Dabei ist zu erwähnen, dass das Niederschlagswasser aufgrund der hohen Porosität der Trag- und Deckschicht schnell versickern kann, bevor es an die weniger durchlässige ungebundene untere Tragschicht stößt. Dies könnte zu Stauwasser oberhalb der ungebundenen Tragschicht führen. Bei entsprechender Frosteindringtiefe bis zur Oberkante der ungebundenen Tragschicht (19 cm bis 24 cm unter FOK) kann nicht ausgeschlossen werden, dass es in der ungebundenen Tragschicht zu Frost-Tau-Wechseln und somit Aufplatzungen im Drainbeton kommt.

Im Betrieb ist vor allem auf den Winterdienst Bedacht zu nehmen, sowie ggf. auf die Reinigung der Oberfläche, um dauerhafte Drainagefähigkeit sicherzustellen. In Bezug auf den Winterdienst ist frühzeitig das Einvernehmen mit der MA48 herzustellen, um den winterlichen Betrieb abzustimmen. In keinem Fall ist eine Streuung mit abstumpfenden Mitteln (Splittstreuung) zu empfehlen, da die oberflächlichen Hohlräume dadurch verstopft werden. Die Bestimmungen der Winterdienst-Verordnung der Stadt Wien in der geltenden Fassung ist sinngemäß wie für unversiegelte Bodenflächen anzuwenden.

Durch Staub- und Schmutzeintrag kann es zu einem teilweisen Verschluss der oberflächlichen Hohlräume kommen. Um die Funktion des offenporigen Aufbaus sicherzustellen, ist eine regelmäßige Reinigung mit Spezialgeräten (etwa Druck-Spül-Saug-Maschinen) zu empfehlen.

7.3. Heller Asphaltbelag

Diese Varianten hat zum Ziel die sommerliche Erwärmung durch verbessertes Rückstrahlverhalten (Albedo-Wert) zu verringern. Die Deckschicht ist dabei wie im Rahmen dieses Forschungsprojekts als „AC 8 gelb“ auszuführen. Als Ausgangsstoffe ist transparentes Bindemittel (z.B. „Bituclair BHNS“ der Fa. Colas GmbH), helles Hartgestein (z.B. Steinbruch Gaaden oder St. Jakob), gelbes Pigment und Titandioxid zu verwenden. Die sonstigen Anforderungen an Mischgut, Ausführung und Schicht entsprechen einem AC 11 deck A2 gemäß ÖNORM B 3580-1 bzw. RVS 08.97.01 und RVS 08.16.01.

Der weitere Oberbau entspricht dem Standardaufbau gemäß Planungsunterlagen der Stadt Wien.

7.4. Deckschicht mit Aufhellungsgestein

Diese Varianten hat ebenso zum Ziel die sommerliche Erwärmung durch verbessertes Rückstrahlverhalten (Albedo-Wert) zu verringern. Die Deckschicht ist dabei als AC 11 deck A2 gemäß ÖNORM B 3580-1 ausgeführt. Die grobe und feine Gesteinskörnung besteht aus hellem Hartgestein (z.B. Steinbruch Gaaden oder St. Jakob). Die sonstigen Anforderungen an Mischgut, Ausführung und Schicht entsprechen einem AC 11 deck A2 gemäß ÖNORM B 3580-1 bzw. RVS 08.97.01 und RVS 08.16.01. Vor Verkehrsfreigabe wird die Oberfläche kugelgestrahlt oder mit ähnlichen Verfahren (z.B. Kombination aus Hochdruck-Wasserstrahlen, Schleifen, Hochdruck-Wasserstrahlen) behandelt, um den oberflächlichen Bindemittelfilm zu entfernen und so die helle Gesteinskörnung bereits frühzeitig freizulegen.

Der weitere Oberbau entspricht dem Standardaufbau gemäß Planungsunterlagen der Stadt Wien.

7.5. Messsensorik und Messkampagnen

Für die Temperaturmessung in den Schichten wird empfohlen, kabellose Sensoren einzubauen bzw. nach dem Einbau einzubringen. Solche Sensoren haben den Vorteil, dass sie ohne weitere Verkabelung installiert werden können und zu beliebigem Zeitpunkt mittels NFC-Technologie ausgelesen werden können. Je Variante sollten an zwei Stellen Sensoren eingebaut werden, wobei ein Sensor oberflächennahe, ein Sensor in etwa 4cm Tiefe und ein weiterer in etwa 8cm Tiefe liegen sollte. Zudem wird der Einbau von Feuchtigkeitssensoren an der Schichtgrenze zwischen Asphalttragschicht und ungebundener oberer Tragschicht bzw. am Unterbauplanum empfohlen. Hiermit können Aussagen über die Durchlässigkeit der gebundenen und ungebundenen Schichten des Aufbaus getroffen werden.

Vor und während Hitzeperioden sind weitere Messungen vor Ort empfohlen, bei denen der Verlauf der Oberflächentemperaturen, sowie der Lufttemperaturen in 1,5 m und der Albedo-Wert aufgezeichnet werden. So kann der Einfluss der Varianten auf die Temperaturentwicklung im Sommer geprüft werden. Eine solche Messkampagne sollte zeitnah nach der Fertigstellung durchgeführt werden, um die Eigenschaften der nicht abgefahrenen und verschmutzten Beläge zu messen. Eine weitere Messkampagne wird zwei bis drei Jahre nach Fertigstellung empfohlen, damit die Eigenschaften nach einigen Jahren im Betrieb geprüft werden können.

Univ. Prof. DI Dr. Bernhard Hofko

Proj. Ass. Dipl.-Ing. Sophie Stüwe

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Lukas Eberhardsteiner

Proj. Ass. Dipl.-Ing. David Zhou

Wien, im November 2023

8. Literaturverzeichnis

1. Stüwe, S., *Laboruntersuchungen zum sommerlichen Temperaturverhalten von bitumengebundenen Deckschichten als Maßnahme zur Reduzierung von städtischen Hitzeinseln*, in *Institut für Verkehrswissenschaften - Forschungsbereich Straßenbau*. 2023, Technische Universität Wien: Wien, Österreich. p. 60.
2. Pan, F., et al., *Building the cooling roads with high thermal conductivity pavements to relieve urban heat island effect*, in *Construction and Building Materials* 346. 2022. p. 1-10.
3. Li, H., *Evaluation of Cool Pavement Strategies for Heat Island Mitigation*. 2012, California: University of California, Davis.
4. Santamouris, M., *Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. **26**: p. 224-240.
5. Hendel, M., *Cool pavements*, in *Eco-Efficient Pavement Construction Materials*. 2020, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Vereingte Staaten von Amerika.
6. Speight, J.G., *Uses of Asphalt*, in *Asphalt Materials Science and Technology*. 2015, Butterworth-Heinemann: Oxford. p. 341-359.
7. Ellebjerg, L. and H. Bendtsen, *Two-layer porous asphalt – lifecycle - The Øster Søgade experiment*. 2008, Danish Road Directorate: Hedehusene, Denmark.
8. Wu, H., et al., *Characterizing thermal behaviors of various pavement materials and their thermal impacts on ambient environment*. *Journal of Cleaner Production*, 2018. **172**: p. 1358-1367.
9. Higashiyama, H., et al., *Field measurements of road surface temperature of several asphalt pavements with temperature rise reducing function*, in *Case Studies in Construction Materials* 4. 2016. p. 73-80.
10. Peng, B., et al., *Semi-flexible pavement with glass for alleviating the heat island effect*. *Construction and Building Materials*, 2023. **367**.
11. <https://www.mineral.eu/gaaden>. [aufgerufen am 05.02.2023].
12. <https://www.rohrdorfer.at/sand-und-kies/steinbruch-hollitzer/>. [aufgerufen am 16.03.2023].
13. <https://www.loja.at/>. [aufgerufen am 09.10.2023].
14. <http://colas.at/wp-content/uploads/2020/05/TDB-BITUCLAIR-2020.pdf>. [aufgerufen am 12.07.2023].
15. *Asphaltemischgut - Mischgutanforderungen - Offenporiger Asphalt Teil 1: Empirische Anforderungen ÖNORM B 3586-1*. 2018.
16. FSV, *RVS 08.97.05: Anforderungen an Asphaltemischgut*. 2015, Forschungsgesellschaft Straße-Schienen-Verkehr: Vienna, Austria.
17. CEN, *Asphalt - Prüfverfahren Teil 8: Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern ÖNORM EN 12697-8*. 2019, Wien.
18. <https://baumit.at/baumit-bitucem>. [aufgerufen am 20.07.2023].

19. CEN, *Vorgefertigte Betonerzeugnisse - Prüfverfahren für Glasfaserbeton - Teil 6: Bestimmung der Wasseraufnahme mittels Tauchverfahren und der Trockenrohdichte* ÖNORM EN 1170-6. 1998, Wien.
20. CEN, *Asphalt - Prüfverfahren Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern* ÖNORM EN 12697-6. 2020, Wien.
21. CEN, *Asphalt - Prüfverfahren Teil 35: Labormischung*. 2016, Wien.
22. CEN, *Asphalt - Prüfverfahren Teil 33: Probestückvorbereitung mittels Walsverdichtungsgerät*. 2023, Wien.
23. www.reptilienkosmos.de. [aufgerufen am 13.08.2023]; Available from: https://www.reptilienkosmos.de/terrarium-shop/beleuchtung/tageslichtlampen/exo-terra-daylight-basking-spot_135_3994.
24. Chen, J., et al., *Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials*. Construction and Building Materials, 2019. **202**: p. 46 - 57.
25. Zhou, D.Q.D., *Entwicklung und Implementierung eines verbesserten numerischen Modells zur Dimensionierung frostsicherer Straßenoberbauten*. Development and implementation of an improved numerical model for the dimensioning of frost-resisting roadstructures. 2023, Wien: Wien. 80 Blätter, Illustrationen, Diagramme, Karten.
26. Du, Y., et al., *Characterization of thermal, high-temperature rheological and fatigue properties of asphalt mastic containing fly ash cenosphere*. Construction and Building Materials, 2020. **233**: p. 117345.
27. <https://mastic-asphalt.eu/de/gussasphalt/bauphysikalische-daten>. [aufgerufen am 13.11.2023].
28. Hassn, A., et al., *Thermal properties of asphalt pavements under dry and wet conditions*. Materials & Design, 2016. **91**: p. 432-439.
29. Hassn, A., et al., *Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures*. Construction and Building Materials, 2016. **115**: p. 327-335.
30. Dong, Q., et al., *Investigation on the cooling and evaporation behavior of Semi-Flexible Water Retaining Pavement based on laboratory test and thermal-mass coupling analysis*. Materials (Basel), 2019. **12**(ISSN: 1996-1944).
31. Ingenieure, V.D., *Thermische Nutzung des Untergrunds, in Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*. 2010, Beuth Verlag: Düsseldorf, Deutschland. p. 33.
32. Czeplak, F.K.a.G., *Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud*. Solar Energy, 1980. **24**: p. 177-189.
33. Patel, B.J.D.a.W.A.H.a.A.J., *CLIMATIC-MATERIALS-STRUCTURAL PAVEMENT ANALYSIS PROGRAM*. Transportation Research Record, 1986.
34. Erell, E., et al., *Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons, in Urban Climate*. 2014.
35. Alleman, J.E. and M. Heitzman, *Quantifying Pavement Albedo, in Final Report Dezember 2019*. 2019, National Center of Asphalt Technology: Auburn.

ANHANG

Projektnummer: 22423

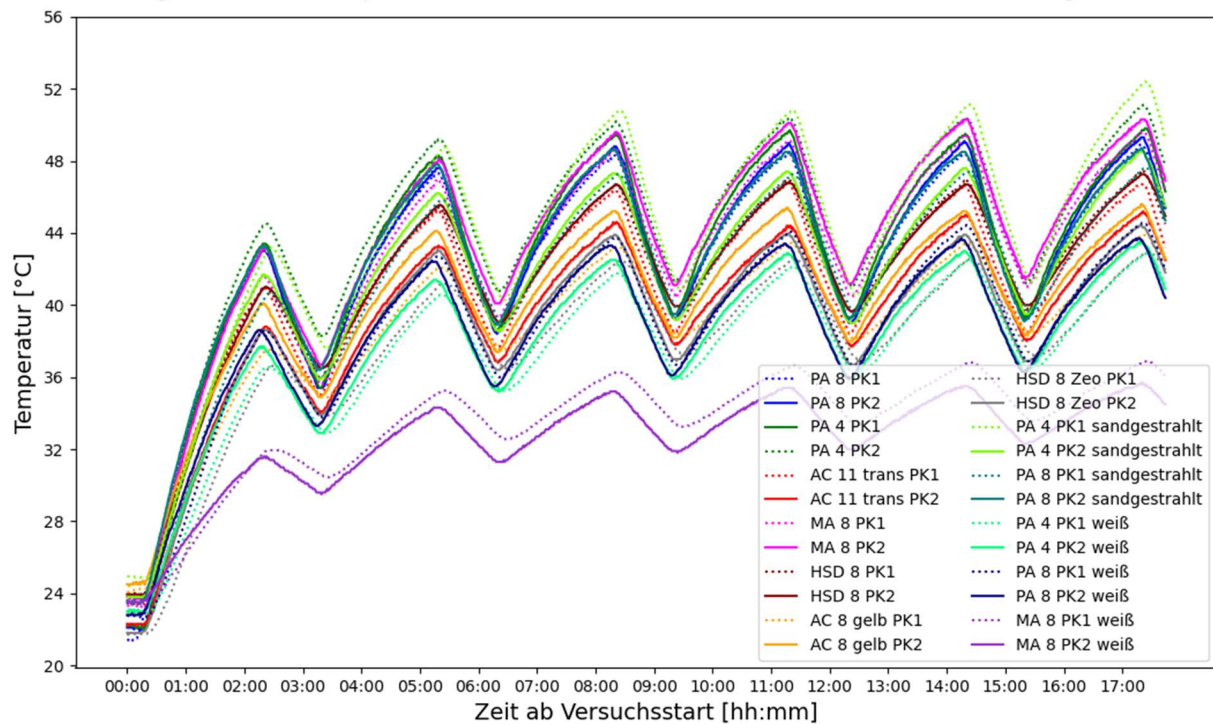
Dieser Anhang beinhaltet sämtliche Prüfberichte.

Versuche trocken:		$T_{\max,u,t,17}$ [°C]	$T_{\min,u,t,17}$ [°C]	$A_{\text{rate},u,t,17}$ [°C/h]	$T_{\max,o,t,17}$ [°C]	$T_{\max,u,t,22}$ [°C]	$T_{\min,u,t,22}$ [°C]	$A_{\text{rate},u,t,22}$ [°C/h]	$A_{\text{zeit},u,t,22}$ [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 4 sandgestrahlt	PK1	52,4	41,3	9,9	59,3	44,1	29,8	4,9	3,7
PA 4 sandgestrahlt	PK2	48,5	39,5	8,1	58,2	43,7	29,8	4,8	3,7
PA 4 weiß	PK1	42,9	36,4	6,1	50,5	39,5	27,6	3,9	2,8
PA 4 weiß	PK2	43,5	36,3	6,7	48,0	39,1	27,5	3,8	2,7
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
PA 8 sandgestrahlt	PK1	47,6	39,6	7,8	56,2	44,4	29,2	5,1	3,5
PA 8 sandgestrahlt	PK2	48,7	39,1	9,4	55,8	45,2	29,2	5,3	3,4
PA 8 weiß	PK1	44,6	36,9	7,6	51,7	39,3	27,6	3,8	2,7
PA 8 weiß	PK2	43,7	36,3	7,4	50,0	39,8	27,4	4,1	2,7
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
MA 8 weiß	PK1	36,9	33,6	3,3	41,0	35,4	26,9	2,8	2,3
MA 8 weiß	PK2	35,7	32,3	3,2	40,1	32,6	26,3	2,0	1,9
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

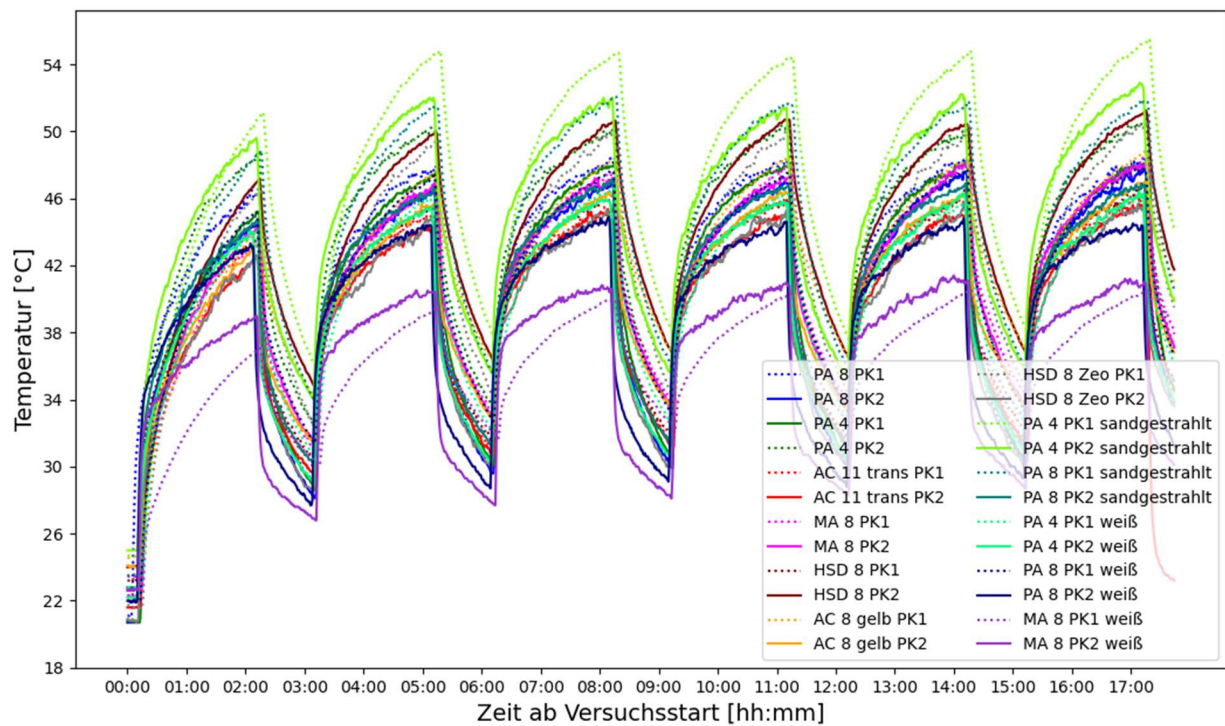
Versuche unter Befeuchtung:		$T_{\max,u,b,17}$ [°C]	$T_{\min,u,b,17}$ [°C]	$A_{\text{rate},u,b,17}$ [°C/h]	$T_{\max,o,b,17}$ [°C]	$T_{\text{diff},o,b,17}$ [°C]	$T_{\max,u,b,27}$ [°C]	$T_{\min,u,b,27}$ [°C]	$A_{\text{rate},u,b,27}$ [°C/h]	$T_{\max,o,b,27}$ [°C]	$T_{\text{diff},o,b,27}$ [°C]
PA 4	PK1	51,9	39,8	11,5	58,3	-3,3	47,4	39,6	7,4	55,5	-5,5
PA 4	PK2	51,3	39,8	11,3	59,0	-2,4	44,9	38,0	6,6	54,5	-2,9
PA 8	PK1	49,8	38,4	10,8	54,9	-3,0	43,9	37,1	6,3	57,2	-4,2
PA 8	PK2	50,6	39,6	10,0	57,5	-4,1	43,9	37,5	6,0	54,1	-3,1
AC 11 trans	PK1	43,2	37,0	5,8	51,5	-3,1					
AC 11 trans	PK2	44,0	37,8	6,0	53,7	-3,0					
MA 8	PK1	46,6	39,2	7,0	53,9	0,1					
MA 8	PK2	46,8	38,8	7,3	52,2	0,4					
HSD 8	PK1	44,2	37,8	6,0	53,7	0,0					
HSD 8	PK2	43,9	38,2	5,4	52,8	1,4					
AC 8 gelb	PK1	44,2	38,1	5,4	50,1	-2,1					
AC 8 gelb	PK2	43,2	37,8	5,2	49,5	-2,1					
HSD 8 Zeo	PK1	43,8	37,1	6,2	50,8	-1,4					
HSD 8 Zeo	PK2	42,4	36,2	5,6	54,2	-0,7					

		α_{90} [°]	α_{90} [°] Ø	γ [%]	γ [%] Ø
PA 4	PK1	0,149	0,138		
PA 4	PK2	0,127			
PA 4 sandgestrahlt	PK1	0,268	0,256		
PA 4 sandgestrahlt	PK2	0,244			
PA 4 weiß	PK1	0,574	0,574		
PA 4 weiß	PK2	0,574			
PA 8	PK1	0,174	0,165		
PA 8	PK2	0,155			
PA 8 sandgestrahlt	PK1	0,300	0,276		
PA 8 sandgestrahlt	PK2	0,251			
PA 8 weiß	PK1	0,430	0,430		
PA 8 weiß	PK2	0,430			
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			
MA 8 weiß	PK1	1,000	1,000		
MA 8 weiß	PK2	1,000			
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			
AC 11 rot	PK1	0,357	0,359		
AC 11 rot	PK2	0,361			
HSD 8 Zeo	PK1	0,396	0,369	3,013	3,301
HSD 8 Zeo	PK2	0,342		3,589	

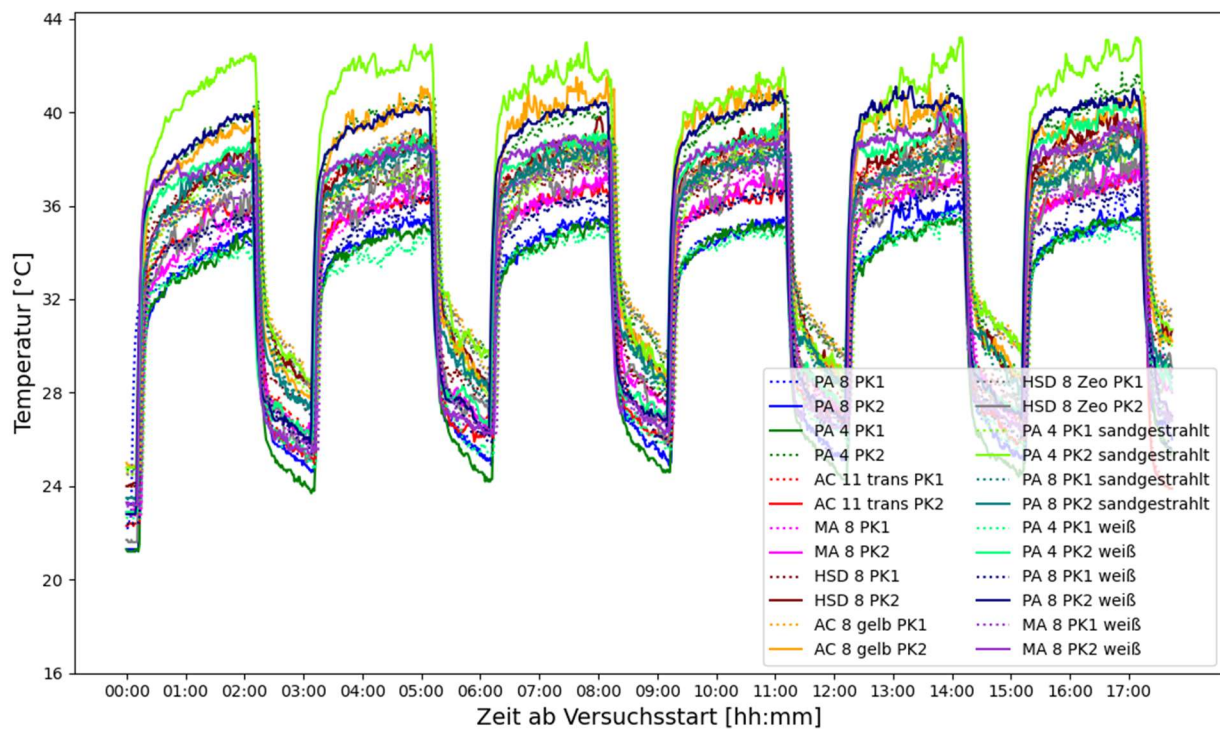
gemessene Temperaturen an der Unterseite im trockenen Zustand Vergleich



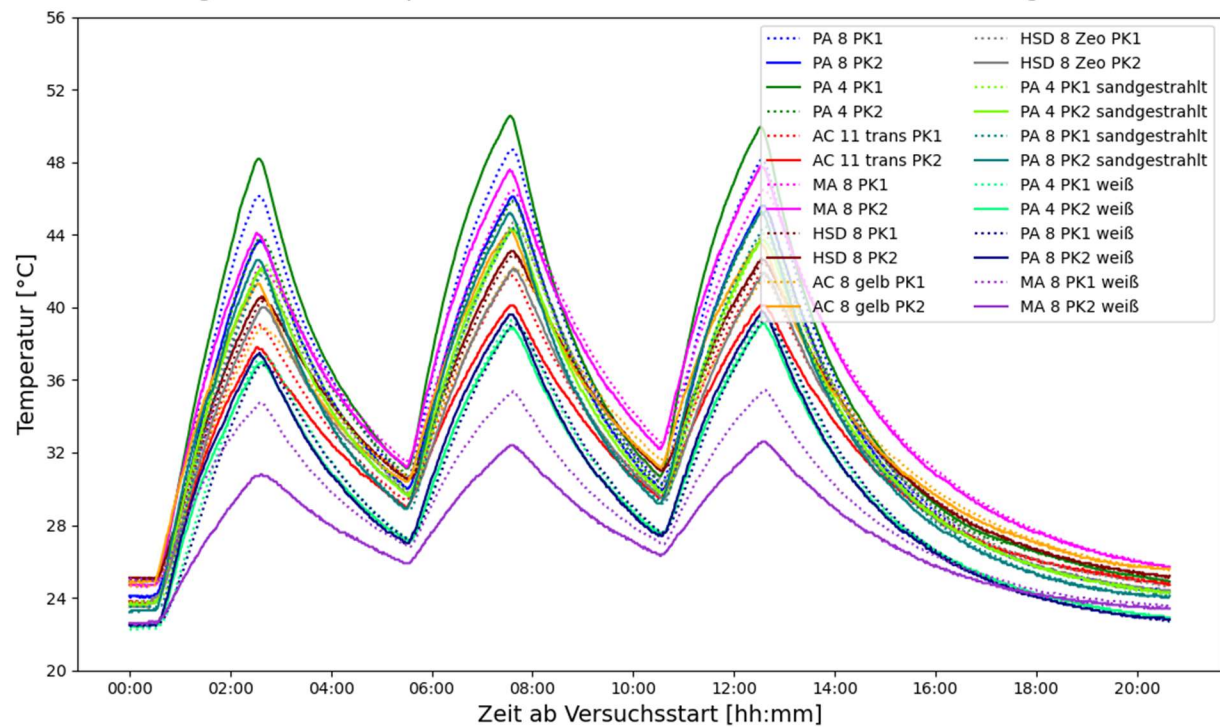
gemessene Oberflächentemperaturen im trockenen Zustand Vergleich



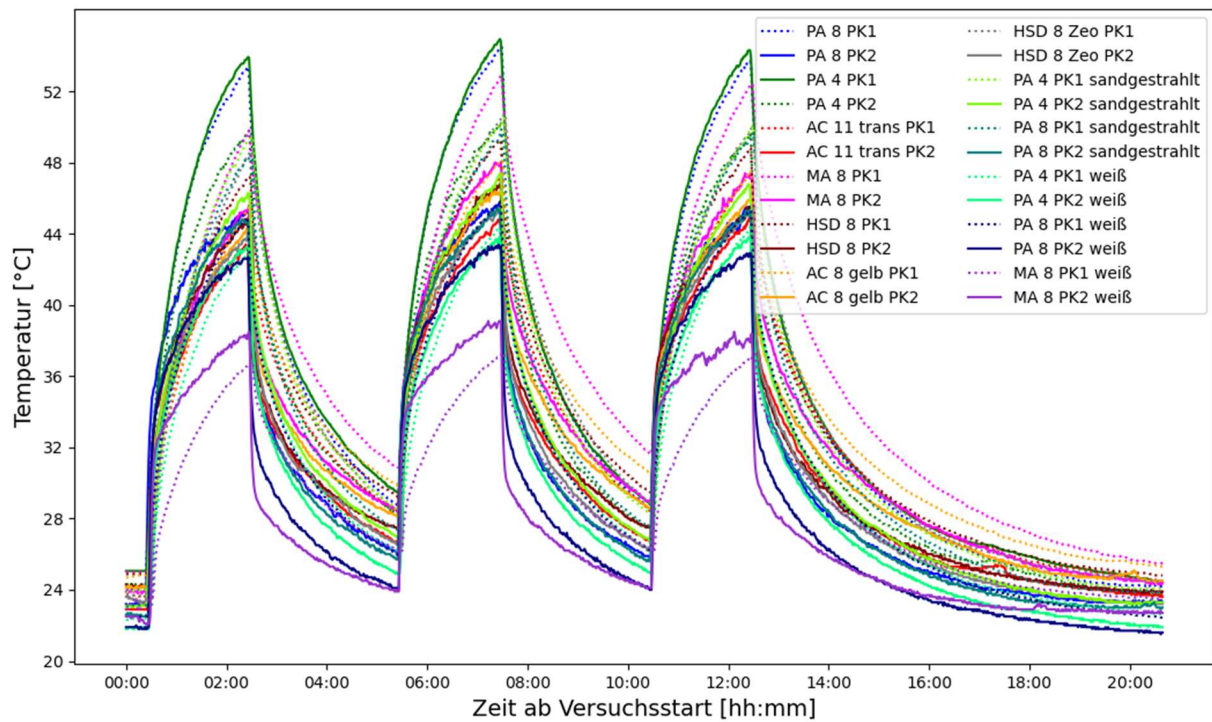
gemessene Raumtemperaturen 2-3cm über der Oberfläche im trockenen Zustand Vergleich



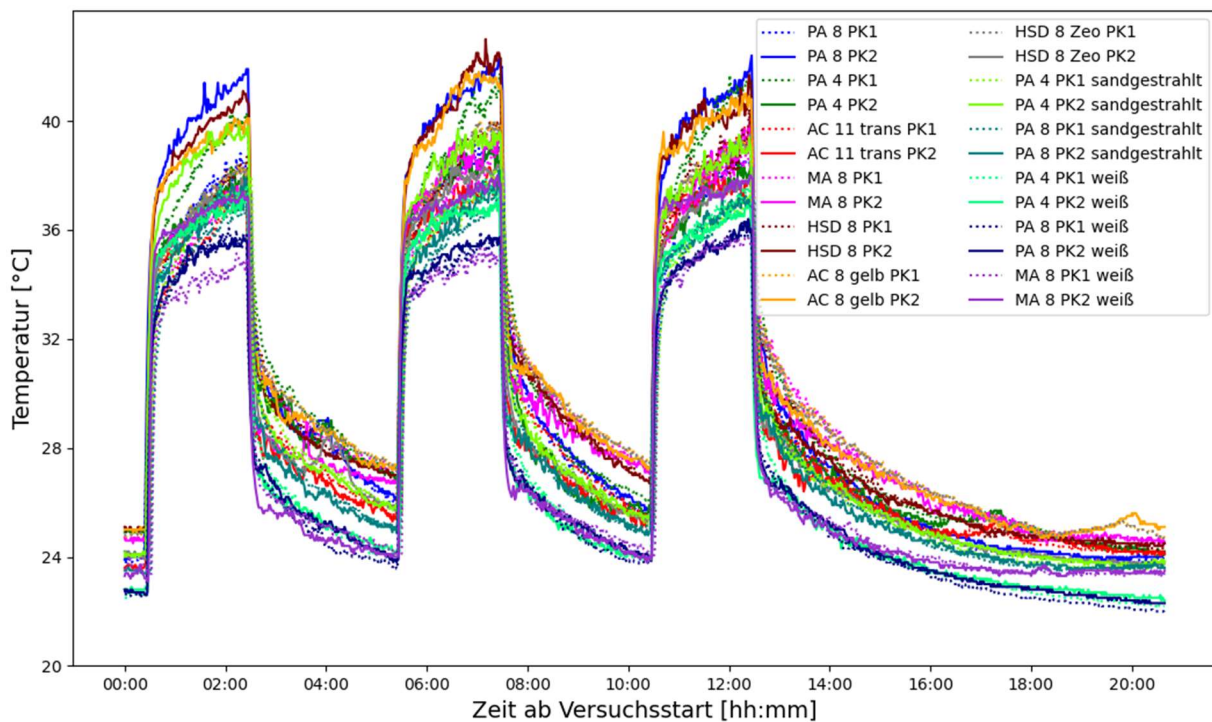
gemessene Temperaturen an der Unterseite im 22h-Versuch Vergleich



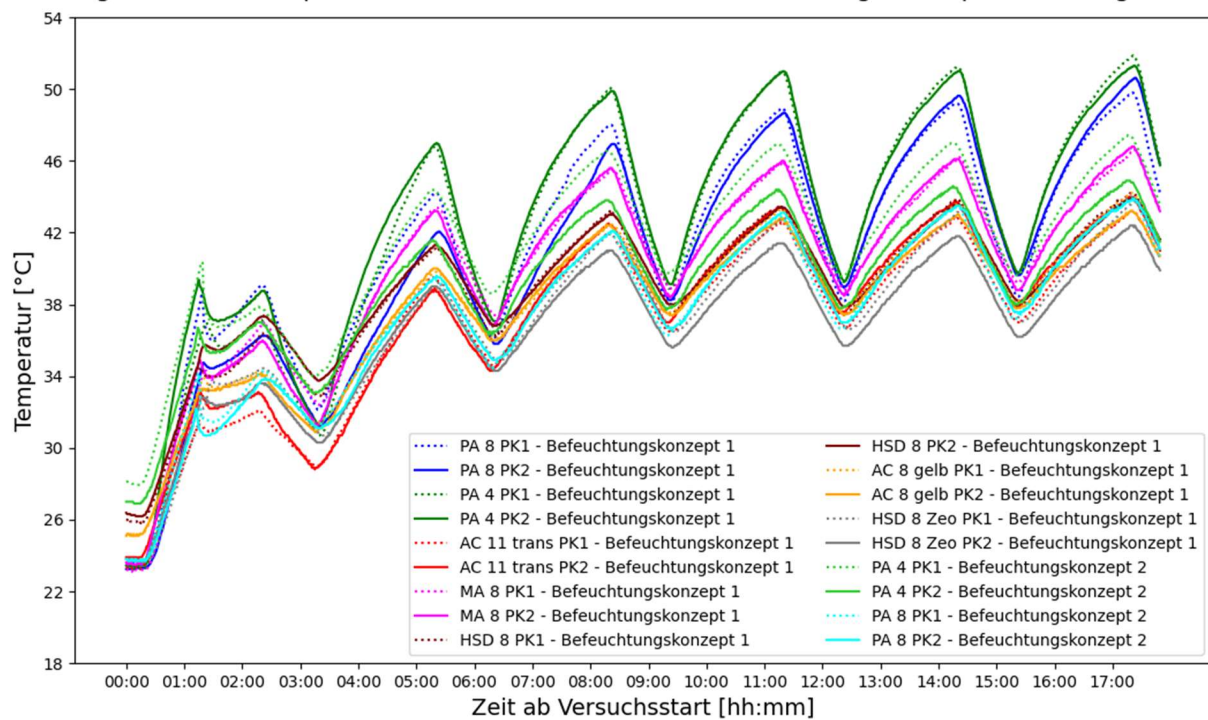
gemessene Oberflächentemperaturen im 22h-Versuch Vergleich



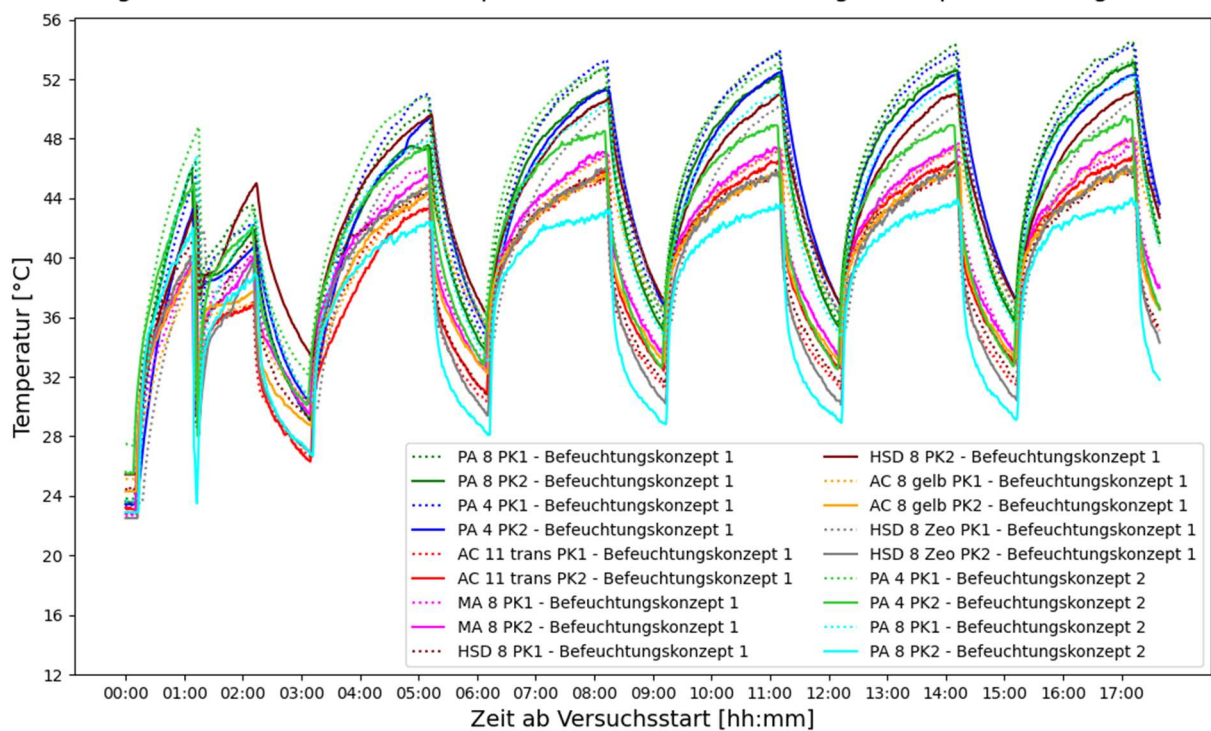
gemessene Raumtemperaturen 2-3cm über der Oberfläche im 22h-Versuch Vergleich



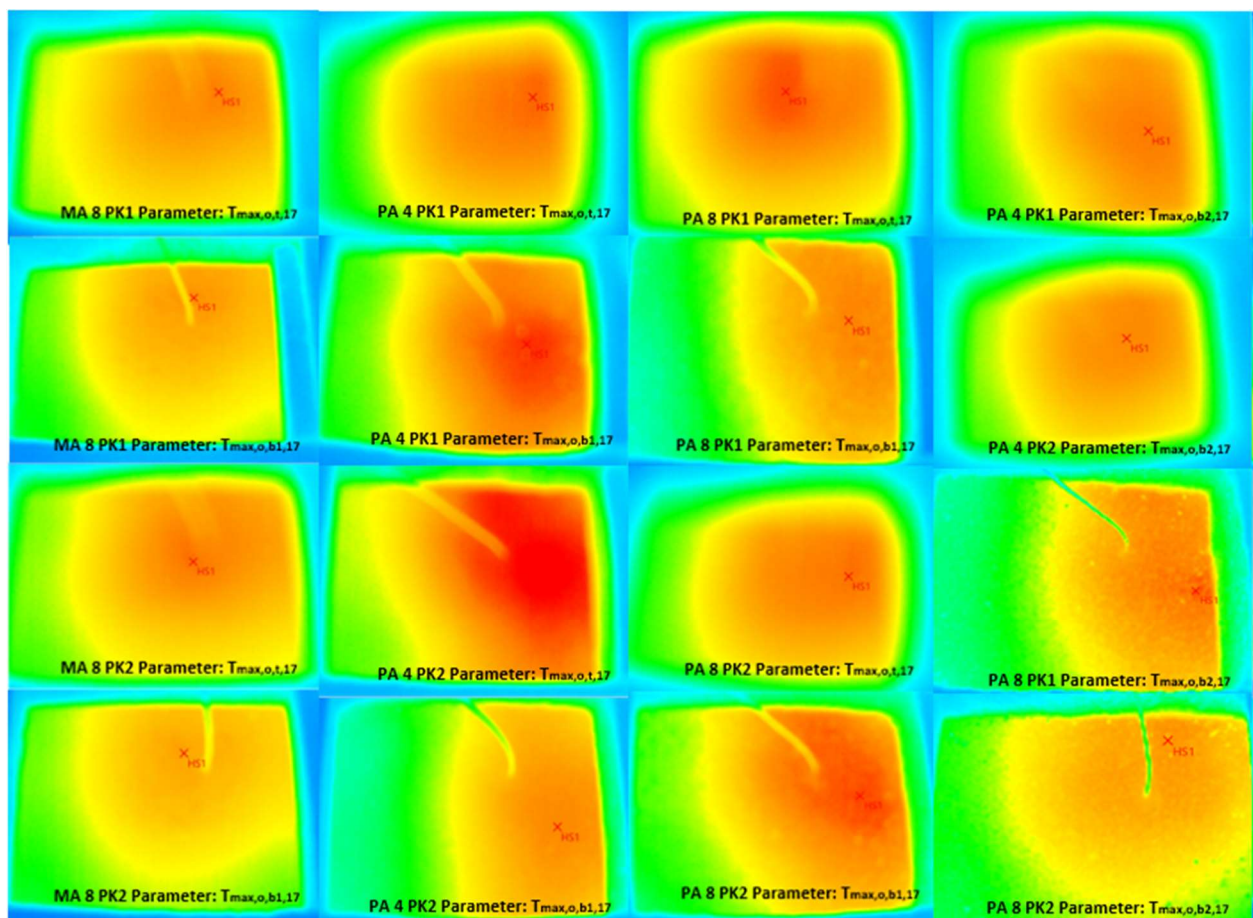
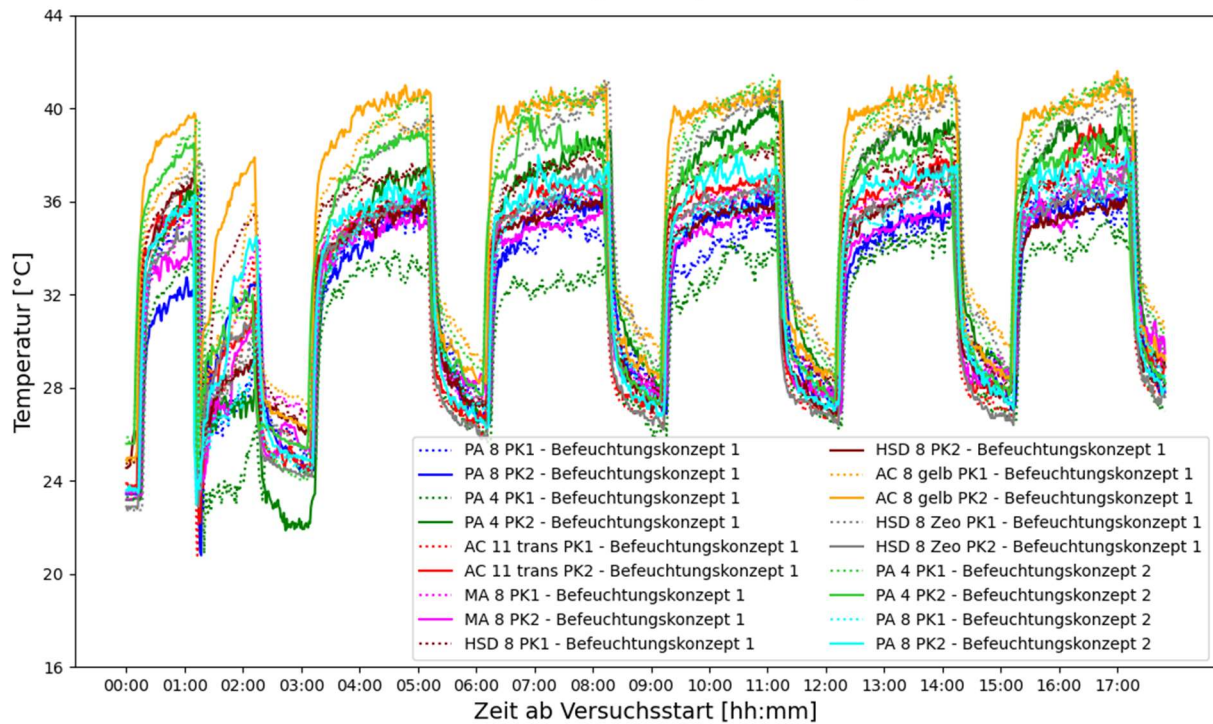
gemessene Temperatur an der Unterseite nach Befeuchtungskonzept 1 & 2 Vergleich

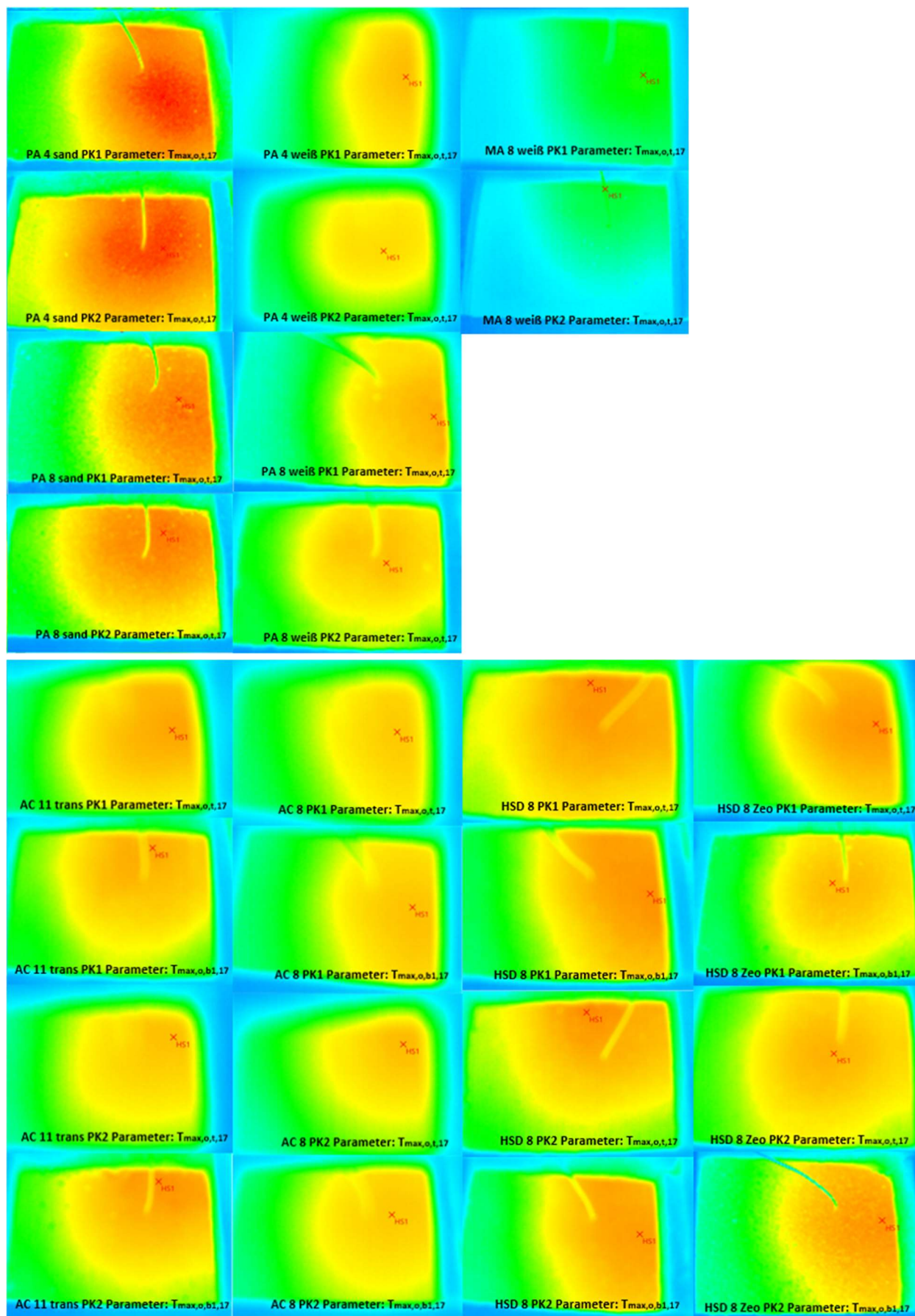


gemessene Oberflächentemperaturen nach Befeuchtungskonzept 1 & 2 Vergleich



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





	++	+	~/+	~	~/-	-	--
Ø MA 8		Arate,u,t,17	Arate,u,t,22 Arate,u,b1,17		Tmax,o,t,17 Tmax,u,b1,17 Tmin,u,b1,17 Tmax,o,b1,17	Tmax,u,t,17 Tdiff,o,b1,17	α90 Tmin,u,t,17 Tmax,u,t,22 Tmin,u,t,22 Azeit,u,t,22
Ø MA 8 weiß	α90 Tmax,u,t,17 Tmin,u,t,17 Tmax,o,t,17 Tmax,u,t,22 Tmin,u,t,22 Azeit,u,t,22						Arate,u,t,17 Arate,u,t,22
Ø PA 4	Arate,u,t,17 Arate,u,t,22 Arate,u,b1,17		Tdiff,o,b1,17			Tmin,u,t,17 Tmin,u,t,22 Azeit,u,t,22	α90 Tmax,u,t,17 Tmax,o,t,17 Tmax,u,t,22 Tmax,u,b1,17 Tmin,u,b1,17 Tmax,o,b1,17
Ø PA 4 sandg.		Arate,u,t,17 Arate,u,t,22	Azeit,u,t,22	Tmin,u,t,22	Tmax,u,t,22	α90	Tmax,u,t,17 Tmin,u,t,17 Tmax,o,t,17
Ø PA 4 weiß	α90 Tmax,u,t,17 Tmin,u,t,17 Tmax,o,t,17 Tmax,u,t,22	Tmin,u,t,22 Azeit,u,t,22				Arate,u,t,17 Arate,u,t,22	
Ø PA 8	Arate,u,t,17 Arate,u,t,22 Tdiff,o,b1,17	Arate,u,b1,17		Tmin,u,t,17	Tmin,u,t,22 Azeit,u,t,22	α90 Tmax,u,t,17 Tmax,o,t,17 Tmax,u,t,22 Tmax,u,b1,17 Tmin,u,b1,17 Tmax,o,b1,17	
Ø PA 8 sandg.		Tmin,u,t,22 Azeit,u,t,22 Arate,u,t,22	Arate,u,t,17		α90 Tmax,u,t,17 Tmin,u,t,17	Tmax,o,t,17 Tmax,u,t,22	
Ø PA 8 weiß	Tmin,u,t,22 Azeit,u,t,22	α90 Tmax,u,t,17 Tmin,u,t,17 Tmax,o,t,17 Tmax,u,t,22		Arate,u,t,17		Arate,u,t,22	
Ø AC 11		Tmax,u,t,22 Tmax,u,b1,17 Tmin,u,b1,17 Tdiff,o,b1,17	Tmin,u,t,17 Tmax,o,t,17 Tmin,u,t,22	α90 Tmax,u,t,17 Arate,u,t,17 Azeit,u,t,22 Tmax,o,b1,17	Arate,u,b1,17		Arate,u,t,22
Ø AC 8 gelb		α90 Tmax,o,t,17	Tmax,u,t,17 Tmax,u,t,22 Tmax,u,b1,17 Tmin,u,b1,17 Tmax,o,b1,17	Tmin,u,t,17 Tdiff,o,b1,17	Arate,u,t,22		Tmin,u,t,22 Arate,u,t,17 Azeit,u,t,22 Arate,u,b1,17
Ø HSD 8		Tmax,o,b1,17		α90 Tmax,u,t,17 Tmax,o,t,17 Tmax,u,t,22 Arate,u,t,22 Tmax,u,b1,17 Tmin,u,b1,17	Arate,u,t,17	Tmin,u,t,17 Tmin,u,t,22 Azeit,u,t,22 Arate,u,b1,17	Tdiff,o,b1,17
Ø HSD 8 Zeo	Tmax,u,b1,17 Tmin,u,b1,17 Tmax,o,b1,17	Tmax,u,t,17 Tmin,u,t,17		Tmax,o,t,17 Tmax,u,t,22 Tmin,u,t,22 Arate,u,t,22 Azeit,u,t,22 Arate,u,b1,17	Tdiff,o,b1,17	Arate,u,t,17	