

Diploma Thesis

Quality testing of bituminous concrete joints under laboratory conditions

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

DIPLOMARBEIT

Qualitätsprüfung von bituminösen Betonfugen unter Laborbedingungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Edris Mohammad Paknehad, BSc

Matr.Nr.: 01525068

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Ronald Blab**

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

Dipl.-Ing. **Pia Mandahus**

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien,
Gusshausstraße 28/230/3, A-1040 Wien

Wien, im April 2022

Kurzfassung

Das Materialverhalten des Betons ist wesentlich, wenn es um die Bemessung von Betonfahrbahnen geht. Um Schäden durch Schwindverformungen zu vermeiden, werden Scheinfugen in regelmäßigen Abständen angeordnet.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine automatisierte Methode zur Qualitätsprüfung bituminöser Fugenfüllmaterialien auf Grundlage von Thermographie zu entwickeln. Es wurden dabei Versuche im Labor mit einer Klimakammer und mit Wärmestrahlern durchgeführt. Es kamen insgesamt drei verschiedene Wärmestrahler zur Anwendung. Die Versuche wurden an drei verschiedenen Betonprobekörpern durchgeführt. Weiters wurde das Verfahren der Thermographie herangezogen, um die Ergebnisse der Versuche zu visualisieren. Schließlich wurde ein Kombinationsversuch aus Klimakammer und Wärmestrahler vollzogen, um den Bedingungen der Realität näher zu kommen.

Die numerischen Daten aus den Wärmebildern wurden in Excel-Tabellen erfasst und dort entsprechend ausgewertet. Darauf aufbauend konnte ein Verfahren zur Identifikation von Fugen mit fehlender Fugenfüllung entwickelt werden. Die entwickelte Prüfmethode erweist sich als geeignet, um gut abgedichtete Fugen von mangelhaften zu unterscheiden.

Abstract

The material behavior of concrete is essential when it comes to rigid pavement design. In order to avoid damage caused by shrinkage deformation, contraction joints are arranged at regular intervals.

The aim of this work is to develop an automated method for quality control of bituminous concrete joint fillings. Tests were carried out in the laboratory with a climatic chamber and with radiant heaters. A total of three different radiant heaters were used. The tests were carried out on three different concrete specimens. Furthermore, the method of thermography was used to visualize the results of the tests. Finally, a combination test of climatic chamber and thermal emitter was carried out in order to get closer to the conditions of reality.

The numerical data from the thermal images were recorded in Excel spreadsheets and evaluated accordingly. Based on this, a method to identify missing joint fillings was developed. The test method developed proved to be suitable for distinguishing well-sealed joints from defective ones.

Danksagung

Ein herzliches Dankeschön an Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab sowie Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Lukas Eberhardsteiner, die mir das Verfassen dieser Diplomarbeit am Institut für Verkehrswissenschaften ermöglicht haben.

Besonderer Dank gilt Herrn Ing. Peter Lammerhuber der mir größtmögliche Flexibilität während meiner Tätigkeit beim Projekt Brückenneubau A23 HSSM ermöglicht hat. Er ist stets auf meine Bedürfnisse eingegangen und hat mir somit die Erstellung dieser Arbeit ermöglicht.

Mein größter Dank gebührt meinen Eltern Zakia und Esmail, die mir nicht nur das Studium, sondern sehr viel mehr ermöglicht haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Grundlagen.....	7
1.1	Problemstellung.....	7
1.2	Geschichtlicher Rückblick des Straßenbaus.....	9
1.3	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	9
2	Straßeninfrastruktur in Österreich.....	10
2.1	Straßennetz.....	10
2.2	Ausgaben für Erhaltung und Neubau.....	11
3	Straßenbaustoffe.....	12
3.1	Boden und Gestein.....	12
3.2	Kalk und Zement.....	14
3.3	Bitumen.....	15
3.3.1	Allgemein.....	15
3.3.2	Gewinnung und Herstellung.....	15
3.3.3	Eigenschaften.....	16
3.3.4	Einteilung von Bitumen.....	19
4	Fahrbahndecke aus Beton.....	21
4.1	Grundsätzliches.....	21
4.2	Einführung in die mechanischen Eigenschaften.....	22
4.3	Bauweisen.....	22
4.3.1	Deckensysteme.....	22
4.4	Konstruktive Ausbildung - Fugen.....	25
4.4.1	Plattengeometrie, Fugenfüllung.....	25
4.4.2	Fugenarten.....	26
4.4.3	Dübel und Anker.....	29
4.4.4	Fugenherstellung.....	29
4.4.5	Kontrolle und Sanierung.....	30
5	Experimentelles Programm.....	31
5.1	Probekörper.....	31
5.2	Thermographie.....	32
5.3	Versuchsaufbau Klimakammer.....	33
5.3.1	Betonstraßen - Temperaturbeanspruchung.....	33
5.3.2	Frost-Tau-Wechsel.....	36
5.3.3	Tag 1.....	39

5.3.4	Tag 2.....	40
5.3.5	Tag 3.....	41
5.3.6	Tag 4.....	47
5.4	Infrarotstrahler	48
5.4.1	Variantenstudie mit fugenlosem Probekörper.....	48
5.4.2	Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung.....	51
5.4.3	Probekörper mit halber Fugenfüllung.....	54
5.5	Klimakammer und Infrarotstrahler	57
5.5.1	Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer -20 °C.....	58
5.5.2	Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer -20 °C	61
5.5.3	Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 0 °C.....	63
5.5.4	Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 0 °C	65
5.5.5	Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 20 °C.....	67
5.5.6	Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 20 °C.....	69
5.5.7	Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 40 °C.....	70
5.5.8	Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 40 °C.....	71
6	Entwicklung einer automatisierten Methode zur Qualitätsprüfung	72
6.1	Kombination: Thermographie & Excel.....	72
6.2	Auswertung der Ergebnisse – Klimakammer	72
6.2.1	Tag 1.....	72
6.2.2	Tag 2.....	73
6.2.3	Tag 3.....	74
6.2.4	Tag 4.....	77
6.3	Auswertung der Ergebnisse - Infrarotstrahler	78
6.3.1	Probekörper mit voller Bitumenfüllung	78
6.3.2	Probekörper mit halber Bitumenfüllung.....	79
6.4	Auswertung der Ergebnisse des Kombinationsversuches	80
6.4.1	Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 0 °C.....	81
6.4.2	Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 0 °C	81
6.4.3	Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 20 °C.....	82
6.4.4	Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 20 °C.....	82
6.4.5	Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 40 °C.....	83
6.4.6	Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 40 °C.....	83
6.4.7	Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer -20 °C	84

6.4.8	Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer -20 °C	84
6.5	Nummerische Auswertung der Ergebnisse - Kombinationsversuch	85
7	Resümee.....	86
8	Verzeichnisse	87
8.1	Literaturverzeichnis	87
8.2	Abbildungsverzeichnis	89
8.3	Tabellenverzeichnis.....	92

1 Einleitung und Grundlagen

1.1 Problemstellung

Die Geschichte des Betonstraßenbaus begann in Europa im Jahre 1856 in Schottland, wo erste Ausführungen von Betondecken hergestellt wurden. Ungefähr 50 Jahre später, also im Jahr 1904 wurden bereits die ersten händischen Betonstraßen in Österreich errichtet [1].

Im Laufe der Zeit gewann die Betondeckenbauweise die Gunst der Autofahrer, da sie vor allem in Bezug auf Verformungsresistenz der herkömmlichen Asphaltbauweise überlegen ist. Aufgrund ihrer vielen Vorteile gilt die Waschbetonbauweise, welche eine Sonderform der Betondeckenbauweise darstellt, als Norm für das hochrangige österreichische Straßennetz [2]. Im innerstädtischen Bereich werden Betondecken im Bereich von Kreuzungen, Kreisverkehren, Bushaltestellen und Steigungsbereichen hergestellt [2]. Dies sind jene Verkehrsorte, an denen Kraftfahrzeuge nur sehr langsam vorankommen, beziehungsweise an denen ein Stop & Go-Verkehr herrscht. Ein weiteres Anwendungsgebiet stellen Tunnel ab einer Röhrenlänge von mehr als 1 km dar [3].

Um eine lange Lebensdauer der Betondecke gewährleisten zu können, muss auf eine sorgfältige Ausführung der Baugrundsätze sowie auf die richtige Auswahl der Baustoffe geachtet werden. Besonders entscheidend für eine lange Lebensdauer sind die Plattendicke, Fugenausteilung und Entwässerung der Fahrbahn [2].

Bei der Bemessung und Dimensionierung der Betonfahrbahndecke muss großer Wert auf das Materialverhalten des Betons gelegt werden. Der Terminus „Schwinden“ beschreibt eine Abnahme des Betonvolumens während der Hydratations- und Austrocknungsphase. Schwindverformungen sind lastunabhängig und bei Behinderung dieser entstehen Zugspannungen, welche schließlich Risse induzieren können [4]. Temperaturspannungen haben eine Volumenänderung zur Folge. Dabei kann das Bauteil sich entweder verlängern oder verkürzen. Besonderes Augenmerk bei der Planung solcher Fahrbahndecken ist auf die Überlagerung von Wärmedehnungen und Schwindverformungen zu legen, da sie die Rissbildung erheblich verstärken. Neben der erhöhten Rissgefahr können eine Vielzahl weiterer Schäden (siehe Abb. 1 & Abb. 2) entstehen, wie Kantenschäden, Aufschlüsseln, Aufwölben und Verformung der Platte [5]. Aufgrund der enormen Gefahr, welche sich hinter Wärme- und Schwindverformungen verbirgt, muss auf eine ausreichende Dimensionierung der Dehnungsfugen geachtet werden. Die Aufgabe der Dehnungsfugen besteht darin, die thermischen und hygrischen Verformungen aufzunehmen und gleichzeitig die resultierenden Spannungen zu verringern.



Abb. 1: "Blow Up" an einer Betonfahrbahn [5]



Abb. 2: Kantenschäden an einer Betonfahrbahn [5]

1.2 Geschichtlicher Rückblick des Straßenbaus

Die Geburtsstunde des Straßenbaus geht auf das römische Reich zurück. Zu jener Zeit wurde aus militärischen Gründen der Straßenbau unter Gaius Julius Caesar sehr weit vorangetrieben, sodass ein europaweites Straßennetz entstand. Neben Pflastersteinen wurde auch römischer Beton (opus caementitium) als Fahrbahndecke eingesetzt. Letztendlich besiegelte der Untergang des römischen Reiches den Verfall des bis dahin aufgebauten Straßennetzes. Dies führte dazu, dass die straßenbautechnischen Errungenschaften im Mittelalter in Vergessenheit geraten sind. Erst ab dem 18. Jahrhundert erlebte der Straßenbau einen Aufschwung aufgrund von politischen, militärischen sowie ökonomischen Beweggründen.

Durch die rasch wachsende Motorisierung seit den 1950er Jahren, gewann der Straßenbau immer mehr an Bedeutung. Um den wachsenden Ansprüchen gerecht zu werden, wurde seit dem 18. Jahrhundert bis dato kontinuierliche Straßenforschung betrieben. Im 20. Jahrhundert führte der steigende Motorisierungsgrad zu enormer Staubentwicklung über den Straßen. Um die Staubbelastung einzudämmen, wurden diese mit Teer gebunden. Ungeachtet dessen wird Teer seit den 1970er Jahren aufgrund seiner krebserregenden Wirkung nicht mehr eingesetzt und durch Bitumen ersetzt [1].

1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde der Forschungsfrage nachgegangen, wie der Zustand bituminöser Betonfugenfüllungen quantifizierbar gemacht werden kann. Die Arbeit besteht aus einer Kombination von Zusammenfassung literarischer Werke, mit abschließender Dokumentation und Auswertung der Laborversuche.

Bevor die Qualitätsprüfung im Labor näher beschrieben wird, wird im Laufe der Arbeit ein Überblick über die österreichische Straßeninfrastruktur, die Straßenbaustoffe und Fugen im Straßenbau gegeben. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf den Arten, Wirkungsweisen und Einfluss der Fugen sowie auf dem Bindemittel Bitumen.

Für die Zustandserfassung der bituminösen Betonfugen wurden zwei Versuchsmethoden im Labor eingesetzt. Angewendet wurden die Klimakammer sowie verschiedene Wärmestrahler. Es kamen insgesamt drei verschiedene Wärmestrahler zum Einsatz, mit denen im weiteren Fortgang eine Variantenstudie durchgeführt wurde. Zur Qualitätsprüfung wurden drei verschiedene Probekörper herangezogen. Zwei dieser Körper wurden mit Fuge und ein Körper ohne Fuge hergestellt. Die Versuchskörper mit Fuge unterschieden sich lediglich im Hinblick auf Menge und Ausführung der Fugenfüllung. Zum einen wurde einer der Probekörper einer Frost-Tau-Wechsel Beanspruchung ausgesetzt und zum anderen wurden die weiteren Probekörper mittels Infrarotstrahler bestrahlt. Um die Einflüsse auf die Fuge quantifizierbar zu machen, wurde auf das Verfahren der Thermographie zurückgegriffen.

2 Straßeninfrastruktur in Österreich

2.1 Straßennetz

Die Gesamtlänge des österreichischen Straßennetzes beträgt 126.356,752 km (Stand 1.1.2021). Davon machten 2.257,752 km die Bundesstraßen aus, welche sich nochmals in Autobahnen und Schnellstraßen unterteilen lassen (siehe Abb. 3 & Abb. 4). Prozentual gesehen macht das hochrangige Straßennetz lediglich rund 1,80 % der Gesamtnetzlänge aus, jedoch werden hier etwa ein Drittel der KFZ-Kilometer zurückgelegt [7].

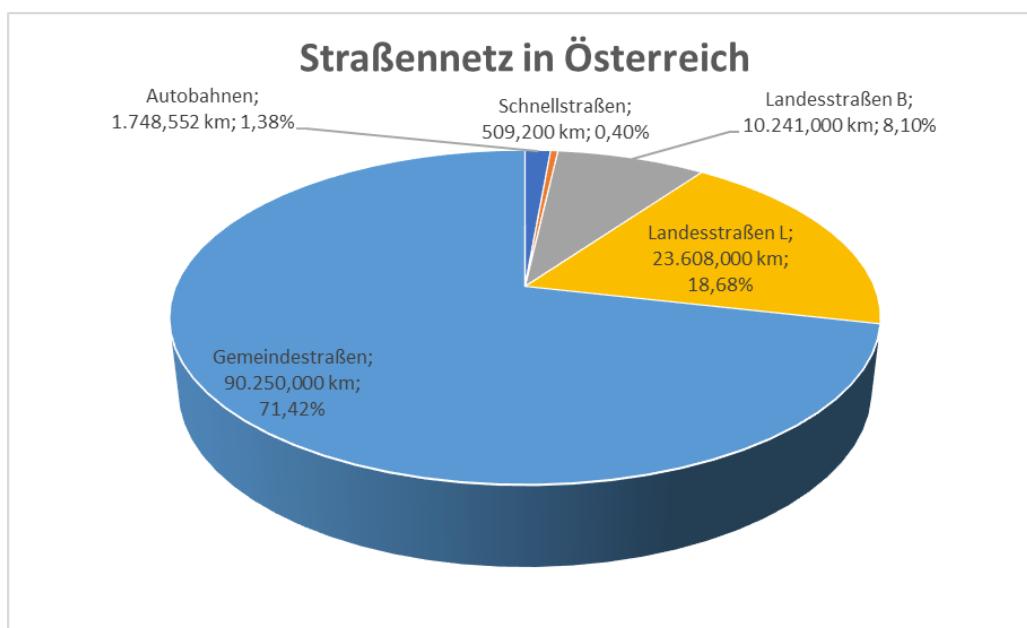


Abb. 3: Straßennetz in Österreich [6]

Längen (km)

Bundesland	Autobahnen	Schnellstraßen	Bundesstraßen insgesamt	Landesstraßen B 1) 2)	Landesstraßen L 2)	Gemeindestraßen 3)	Straßennetz insgesamt
W	43,094	11,899	54,993	221		2.566	2.841,993
NÖ	380,040	174,069	554,109	3.057	10.632	20.501	34.744,109
Bgl	79,931	62,546	142,477	579	1.199	7.198	9.118,477
OÖ	298,890	21,956	320,846	1.577	4.380	14.479	20.756,846
Sbg	143,626		143,626	701	675	7.684	9.203,626
Stm	307,768	158,776	466,544	1.599	3.326	18.370	23.761,544
Ktn	242,504	17,749	260,253	1.164	1.609	8.079	11.112,253
T	189,326	34,103	223,429	1.038	1.280	9.143	11.684,429
Vbg	63,373	28,102	91,475	305	507	2.230	3.133,475
A	1.748,552	509,200	2.257,752	10.241	23.608	90.250	126.356,752

1) ehemalige Bundesstraßen B; im Bundesland Wien nunmehr Gemeindestraßen, im Bundesland Vorarlberg nunmehr Landesstraßen L

2) Stand 1.1.2021

3) ohne Güterwege; Stand 1.1.2021

Abb. 4: Aufteilung des österreichischen Straßennetzes auf die Bundesländer [6]

2.2 Ausgaben für Erhaltung und Neubau

Die Abbildung 5 veranschaulicht die Ausgaben für den Neubau, die Erhaltung sowie die sonstigen Kosten des hochrangigen Straßennetzes, die in den Jahren 2005 bis 2019 angefallen sind. Die monetäre Belastung für die bauliche Erhaltung war seit dem Jahr 2010 größtenteils höher als die für den Neubau. Das Maximum an Ausgaben erfolgte im Jahr 2019 mit 1.056 Millionen Euro [6].

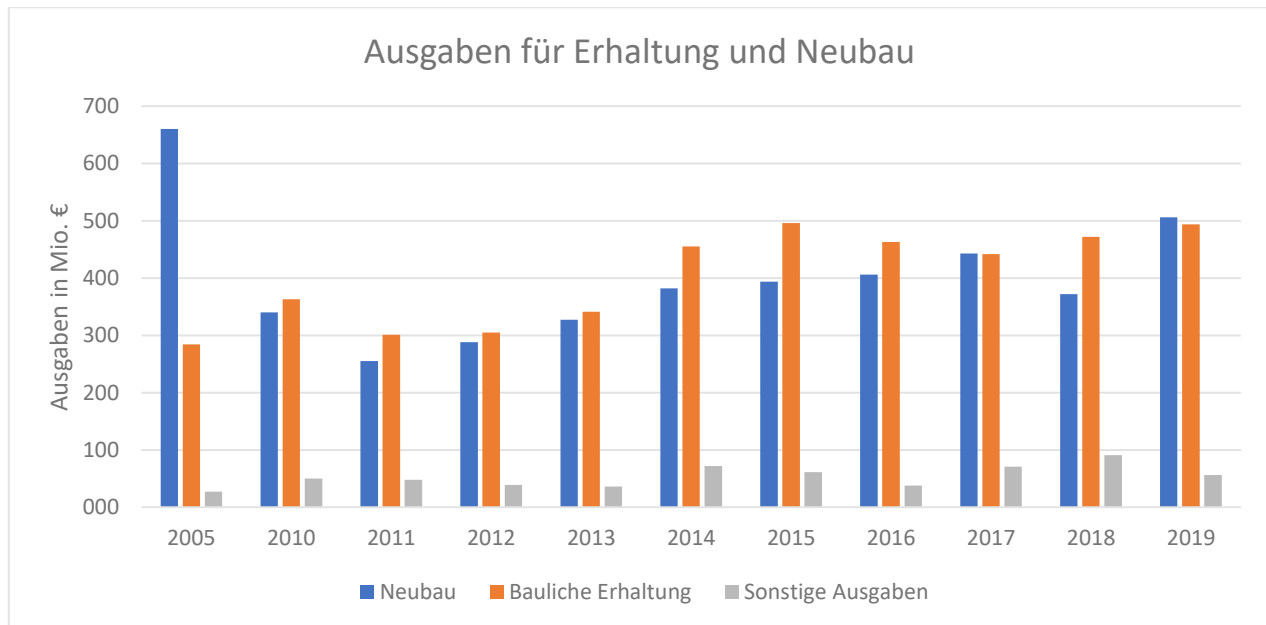


Abb. 5: Straßenbau- und Erhaltungsausgaben für das hochrangige Straßennetz [6]

Autobahnen und Schnellstraßen kosten in der Errichtung deutlich mehr als Gemeindestraßen. Die Errichtung von 1 km Gemeindestraße macht ungefähr 1,21 Mio. Euro aus, während 1 km Autobahn zwischen 6 und 20 Mio. Euro ausmachen kann. Letztere genannten Beträge können von Stadtautobahnen und Tunnels nochmals deutlich übertroffen werden [1].

Die Begehung und Sanierung des langen A + S Netzes ist sehr zeit- und kostenintensiv. Das hochrangige Straßennetz kann für Begehungen dieser Art nicht einfach gesperrt werden, wodurch sich die Thematik erschwert. Begehungen müssten unter laufendem Betrieb erfolgen. Es wären großräumige Absperrungen notwendig, um die Sicherheit der Arbeiter zu gewährleisten. Dies ist ein wesentlicher Grund, weshalb der Forschungsfrage dieser Arbeit nachgegangen wird.

3 Straßenbaustoffe

Die wichtigsten Materialien, die im Straßenbau zur Anwendung kommen sind Gesteinskörnungen und Bindemittel. Während im Betonoberbau Zement als Bindemittel zum Einsatz kommt, wird im Asphaltoberbau Bitumen eingesetzt.

3.1 Boden und Gestein

Boden:

Als Boden werden Lockergesteine, beziehungsweise Sedimente verstanden, welche grob aufgeteilt werden in Mineralböden und Böden organischer Abstammung (siehe Abb. 6). Im Bauwesen werden Böden organischen Ursprungs in der Regel nicht zur Lastabtragung genutzt, da diese keinen tragfähigen Erdboden darstellen. Im Gegensatz dazu werden mineralische Böden sehr wohl zur Ableitung der Lasten als tragfähiger Untergrund verwendet. Die Aufteilung mineralischer Böden erfolgt in bindige, schwach-bindige und nichtbindige Böden. Die Korngröße 0,063 mm gilt als Grenze zwischen bindigen und nichtbindigen Böden. Des Weiteren ist anzumerken, dass Böden nicht nur als Baugrund zum Einsatz kommen, sondern auch als Baustoff verwendet werden (z.B. Dichteschichtmaterial, Filterschichtmaterial, Drainagematerial, Schüttmaterial, etc.) [8]

- Bindige Böden: Bindige Böden sind sehr feinkörnige Böden mit einer Korngröße von 0,063 mm bis $< 0,002$ mm. Die Eigenschaften sind maßgebend vom in situ Wassergehalt abhängig. Bei derartigen Böden sind vorbeugende Maßnahmen zu setzen, um den Boden vor Überwässerung, aber auch vor Austrocknung zu bewahren.
- Nichtbindige Böden: Der Einfluss des Wassergehaltes auf die Eigenschaften nichtbindiger Böden ist wesentlich geringer als bei bindigen Böden. Die Korngröße bewegt sich im Bereich von 0,063 mm bis 2,0 mm. Nichtbindige Böden eignen sich besonders gut als tragfähiger Boden [8].

Das Material Boden wird im Straßenbau vorwiegend zur Herstellung von Dammschüttungen, zur Verwendung als ungebundene Tragschicht oder auch zur Bodenstabilisierung eingesetzt.

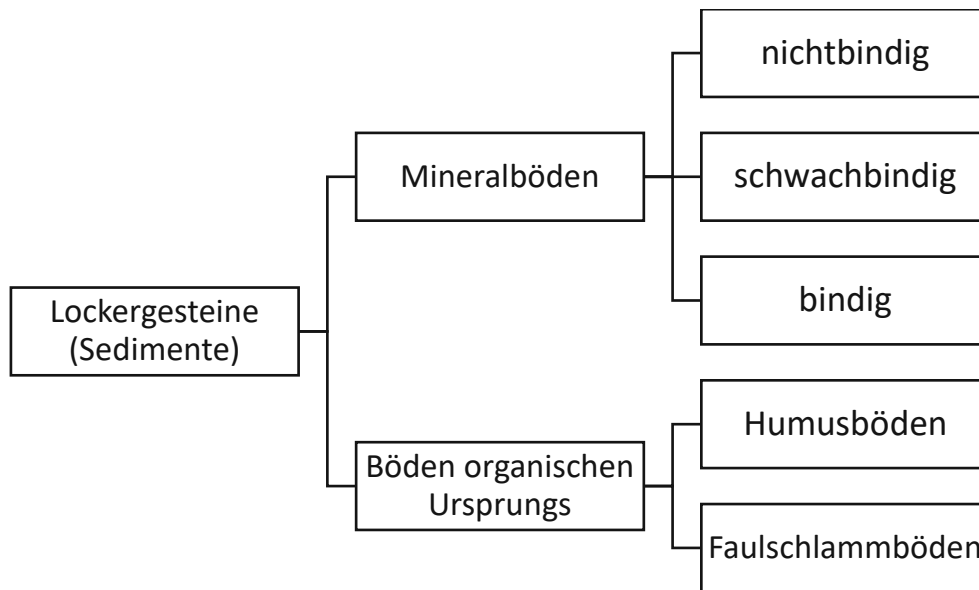


Abb. 6: Einteilung der Lockergesteine [8]

Da Böden unterschiedlicher nicht sein können, muss deren Eignung als Baustoff sowie als Baugrund zuerst nachgewiesen werden, um diese verwenden zu können.

Gestein:

- Fels, beziehungsweise Gestein ist „*das in situ vorliegende Gestein einschließlich seiner Trennflächen*“ [9]. Die Abbildung 7 stellt die Einteilung der Festgesteine dar. Im Straßenbau werden hauptsächlich Magmatide, Sedimentgesteine und Metamorphite eingesetzt. Darüber hinaus finden auch künstliche Gesteinsstoffe, sowie Recyclingmaterialien (z.B. rezyklierter Asphalt / Beton) ihre Anwendung im Straßenwesen. In Österreich werden Gesteine aus Schottergruben und Steinbrüchen gewonnen. Anschließend werden diese je nach Erfordernis einmal oder mehrmals nachgebrochen, um die gewünschten Körnungen zu erhalten. Die Gesteinskörnung beschreibt das körnige Material, welches in den verschiedensten Bereichen des Bauwesens zur Anwendung kommt. Letztere kann natürlich, industriell oder rezykliert hergestellt sein. Der Korndurchmesser des Größtkorns im Straßenwesen beträgt ≤ 45 mm [5].

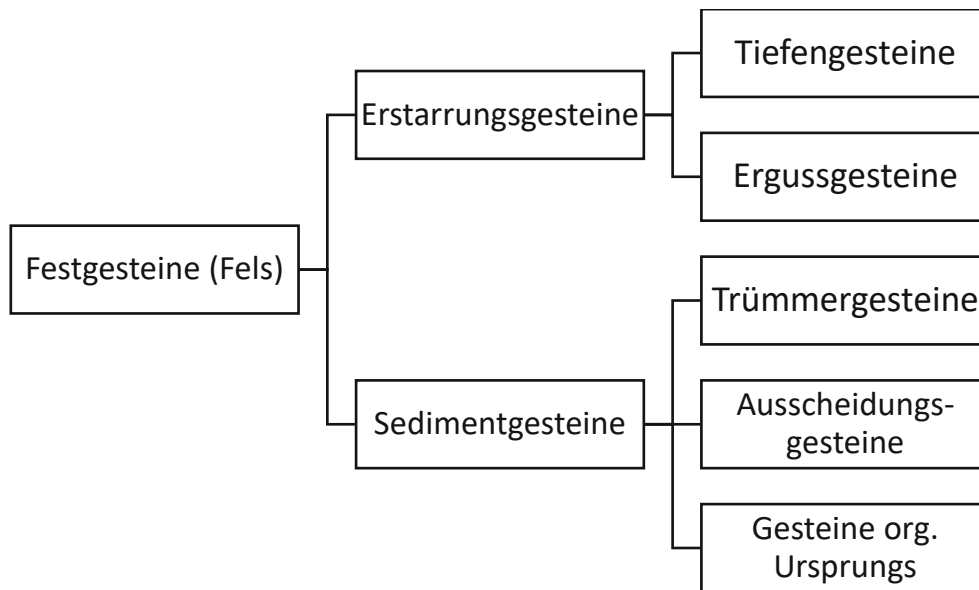


Abb. 7: Einteilung der Festgesteine [8]

3.2 Kalk und Zement

Zu den hydraulischen Bindemitteln zählen Zement und hydraulischer Kalk, welche gezielt die mechanischen Eigenschaften des Untergrundes verändern und eine hydrophobe Wirkung erfahren. Das Anmachen des Wassers mit dem Bindemittel bewirkt eine Bodenverfestigung und auch eine Bodenverbesserung. Um die Bodenstabilisierung durchzuführen, gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen das Ortmischverfahren (Mixed-in-place) und zum anderen das Zentralmischverfahren (Mixed-in-plant). Beim Ortmischverfahren wird das Bindemittel dem zu stabilisierenden Boden direkt auf der Baustelle beigemischt. Im Vergleich dazu wird beim Zentralmischverfahren das Bindemittel mit dem Boden in Mischwerken aufbereitet und anschließend auf die Baustelle verfrachtet [8].

Im Straßenbau wird die Kalkstabilisierung zur Verbesserung und Verfestigung des Bodens eingesetzt. Zudem wird Kalksteinmehl als Füllzugabe bei Asphalt verwendet. Durch die Füllzugabe im Asphalt kommt es zu besserer Affinität zwischen der Gesteinskörnung und dem Bitumen [5]. Zu diesem Zweck reichen 2 bis 3 % Kalk aus [8].

Der Baustoff Zement wird ebenfalls zur Stabilisierung des Bodens eingesetzt und ist wesentlicher Bestandteil für die Herstellung jeglicher Art von Tragwerken aus Beton. Laut [8] wird für die Zementstabilisierung des Bodens eine Höchstgrenze von 9 % definiert. Aus bodenmechanischer Sicht bringt die Zementstabilisierung eine Reihe von Vorteilen mit sich. Hierzu zählen insbesondere die Erhöhung der Festigkeit, der Steifigkeit, der Kohäsion und der Frost-Tau-Beständigkeit. Um die Früchte beider Bindemittel zu ernten, kann auch mit einer Kalk-Zement-Stabilisierung gearbeitet werden [8]. Zement ist wesentlicher Bestandteil des Betons. Bei Berührung mit Wasser kommt es zur Hydratation, das heißt der Zement erhärtet.

3.3 Bitumen

3.3.1 Allgemein

Bitumen ist ein „*schwerflüchtiges, dunkelfarbiges Gemisch verschiedener organischer Substanzen, deren viskoelastisches Verhalten sich mit der Temperatur ändert*“ [5]. Seit den 1970er Jahren ersetzt Bitumen Teer als Bindemittel im Straßenbau aufgrund dessen kanzerogener Wirkung. Die Nachfrage des Bitumens ist seit dem Verbot von Teer insbesondere im Straßenbau rapide gestiegen. Weitere Anwendungsgebiete stellen die Abdichtungsindustrie, der Hochbau, sowie der Wasserbau dar. Ebenso wird Bitumen als Fugenfüllung eingesetzt.

Eine fundamentale Materialeigenschaft des Bitumens stellt seine Konsistenz dar, welche von der Umgebungstemperatur stark beeinflusst wird. Bei Tieftemperaturen wird das Bitumen härter und weist ein sprödes Bruchverhalten auf. Demgegenüber steht sein viskoses Materialverhalten bei steigender Umgebungstemperatur. Diese Zustandsänderungen sind reversibel [11].

3.3.2 Gewinnung und Herstellung

Naturasphalte verkörpern auf natürliche Art und Weise vorkommendes Bitumen. Abhängig vom Gewinnungsort des Rohöls kann Bitumen in seiner chemischen Zusammensetzung sehr unterschiedlich sein (siehe Abb. 8) [11].

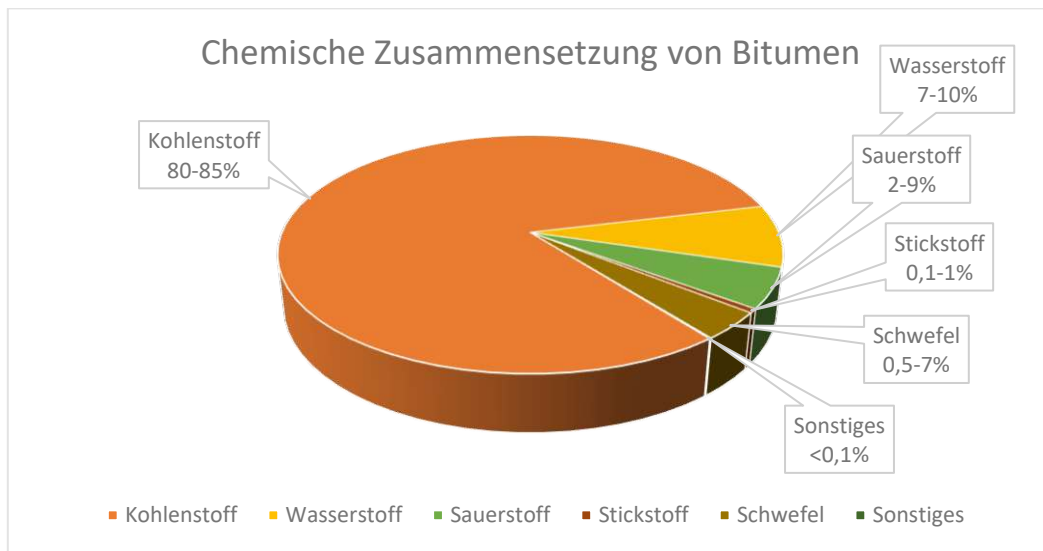


Abb. 8: Chemische Zusammensetzung Bitumen [11]

Die technische Gewinnung von Bitumen aus Erdölen erfolgt durch Destillation in Raffinerien. In Österreich gibt es momentan nur eine Raffiniere, die in Schwechat beheimatet ist. Beim Destillationsvorgang ist zwischen Destillation unter normaler Atmosphäre und der Vakuumdestillation, wobei mit der Destillation unter normaler Atmosphäre begonnen und mit

der Vakuumdestillation das Prozedere vollendet wird, zu differieren. Der nicht mehr destillierbare Rückstand aus der Vakuumdestillation ist das Bitumen [1]. Dieser macht im Durchschnitt einen Anteil von 4 % in der Raffinerie Schwechat aus (siehe Abb. 9) [10].

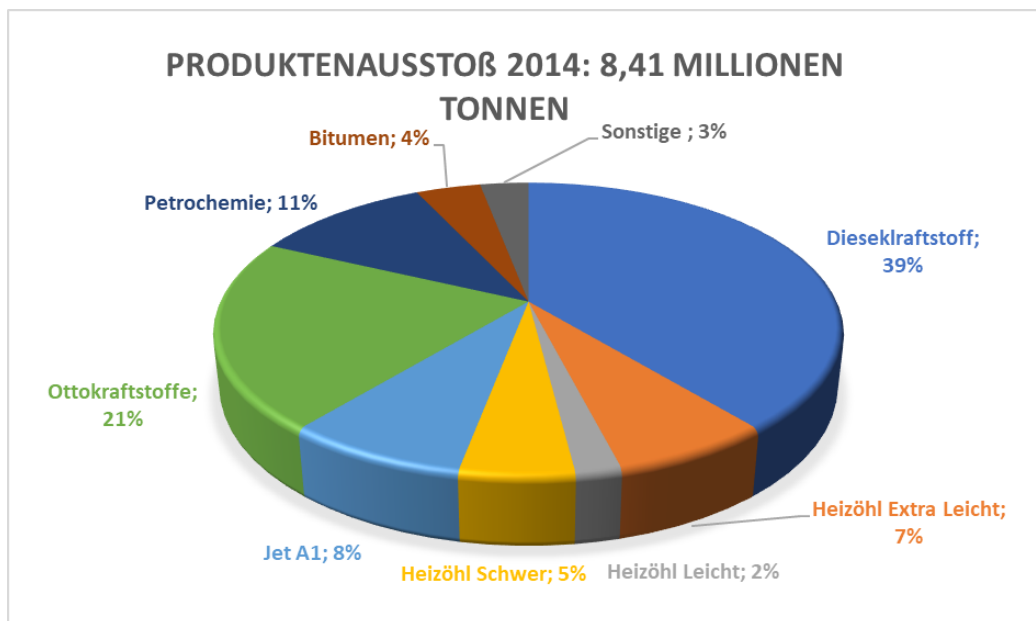


Abb. 9: Produktausstoß Raffinerie Schwechat 2014 [10]

3.3.3 Eigenschaften

3.3.3.1 Physikalische Eigenschaften

Aufgrund seiner technischen Eigenschaften (siehe Tabelle 1) findet Bitumen insbesondere im Straßenbau große Verwendung.

Die Dichte des Bitumens nimmt mit steigender Temperatur ab und bewegt sich im Bereich von 1,01 bis 1,07 g/cm³ bei einer Umgebungstemperatur von 25° Celsius. Bitumen weist mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,17 \frac{W}{m \cdot K}$ eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf. Folglich handelt es sich bei Bitumen um einen wärmedämmenden Baustoff. Im Industrie- und Kabelbau wird seine geringe elektrische Leitfähigkeit ausgenutzt und als Isolierung verwendet [11].

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Bitumen [11]

Eigenschaft	Beschreibung
Farbe	schwarz
Aggregatzustand	im Gebrauchstemperaturbereich praktisch fest
Viskosität	temperaturabhängig
Dichte	1,01 bis 1,07 g/cm ³ (bei 25° C)
Alterung	empfindlich gegenüber: Sauerstoff, UV-Strahlung, thermischer Beanspruchung
Empfindlichkeit gegenüber Chemikalien	praktisch resistent
Empfindlichkeit gegenüber Kraftstoffe	empfindlich
Entflammbarkeit	schwer entflammbar
Verformungsverhalten	visko-elastisch, thermo-viskos
Wasserdurchlässigkeit	praktisch wasserundurchlässig

3.3.3.2 Verformungsverhalten

Die Anfälligkeit des Bitumens gegenüber Verformungen ist primär abhängig von der Umgebungstemperatur. Je tiefer die Temperatur, desto stärker wird das elastische Verhalten des Bitumens. Im Kontrast zum Tieftemperaturbereich steht sein Verformungsverhalten bei Erwärmung. Bei steigender Umgebungstemperatur erweicht das Bitumen und wird sensibler gegenüber Verformungen. Im Hinblick auf Verarbeitbarkeit und Einbau spielen seine thermoviskosen Eigenschaften eine essentielle Rolle. Bei harten Bitumensorten bedarf es höherer Verarbeitungstemperaturen als bei weicheren Sorten. Des Weiteren ist das viskose Verhalten bei weichen Bitumensorten stärker ausgeprägt als bei harten Sorten [11].

Zusätzlich ist das Verformungsverhalten nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Belastungsdauer abhängig. Das elastische Materialverhalten des Bitumens dominiert bei kurzzeitiger Belastung, während bei dauerhafter Beanspruchung besonders die viskosen Eigenschaften hervortreten [11]. „Das zeit- und temperaturabhängige Verformungsverhalten von Bitumen wird gekennzeichnet durch einen Steifigkeitsmodul, kurz als Steifigkeit bezeichnet“ [11].

Abschließend sei noch die Relaxation, eine strukturmechanische Eigenschaft viskoelastischer Materialien, erwähnt. Das Relaxationsvermögen stellt eine weitere zeit- und temperaturabhängige Charakteristik des Bitumens dar. Die Effekte der Relaxation werden bei bituminösen Betonfugen und auch bei Asphaltfahrbahnen ausgenutzt. Mit ihrer Hilfe können die auftretenden Zugspannungen in den betroffenen Bauelementen aufgenommen und abgebaut werden [11].

3.3.3.3 Verhalten gegenüber Wasser

Bitumen eignet sich hervorragend zu Abdichtungszwecken gegen die Einwirkung von flüssigem Wasser und auch gegen Wasserdampf. Wird Bitumen in Wasser eingetaucht, so ist dieser nahezu unlöslich. Basierend auf seiner hohen Diffusionswiderstandszahl ($\mu = 50.000$) fungiert es als eine Art Dampfsperre. Historisch betrachtet geht seine Anwendung im Abdichtungs- und Isolierungsbereich einige Jahrtausende zurück. Darüber hinaus werden unter Zuhilfenahme bituminöser Baustoffe Korrosionsschutzschichten hergestellt [11].

3.3.3.4 Verhalten gegenüber Chemikalien

Wesentlich für den Straßen- und Wegebau ist auch die chemische Widerstandsfähigkeit. Bei Raumtemperatur weist Bitumen gegenüber den meisten organischen und anorganischen Salzen, Basen, und schwachen Säuren eine gute chemische Beständigkeit auf. Problematisch können hingegen Öle, Fette und unpolare Lösungsmittel, wie Benzin werden. Die chemische Beständigkeit ist abhängig von der Härte des Bitumens. Je härter, desto chemisch widerstandsfähiger ist es [11]. *„Von technischer Bedeutung ist die Beständigkeit gegen Tausalztlösung (Winterdienst), Harnstoff (schnell wirkendes Enteisungsmittel für Flugbetriebsflächen) und Jauche (ländlicher Wegebau).“* [11]

3.3.3.5 Alterung des Bitumens

Unter Alterung des Bitumens wird dessen Verhärtung und Versprödung unter Umwelteinflüsse verstanden. Die Ursache hierfür ist die simultane Einwirkung von Sauerstoff, UV-Strahlung, sowie Wärme. Diese bewirken eine oxidative und destillative Veränderung des Bitumens, welche sich primär auf die Oberfläche auswirkt. Bei der destillativen Alterung kommt es zum Verdunsten niedrigsiedender und weicherer Ölanteile. Der Grad der destillativen Alterung ist abhängig von der Bitumensorte, der Temperatur und der Oberfläche. Im Gegensatz dazu ist der Umfang der oxidativen Alterung abhängig von der Luftzutrittsmöglichkeit, der Temperatur und dem Licht [11].

Parallel dazu kann Bitumen nach dem zeitlichen Verlauf seiner Alterung gruppiert werden (siehe Abb. 10). Der Alterungsindex stellt dabei das Verhältnis von gealtertem Bitumen zu nicht gealtertem Bitumen dar. Die erste Phase der Alterung tritt bereits während des Mischvorganges auf. Die Alterung während der Lagerung, dem Transport und dem Einbau entspricht der zweiten Phase der Alterung bzw. ist im Fachjargon unter Kurzzeitalterung bekannt. Die dritte Phase der Alterung basiert auf den ersten zwei Phasen der Bitumenalterung und einer mehrjährigen Liegezeit [1].

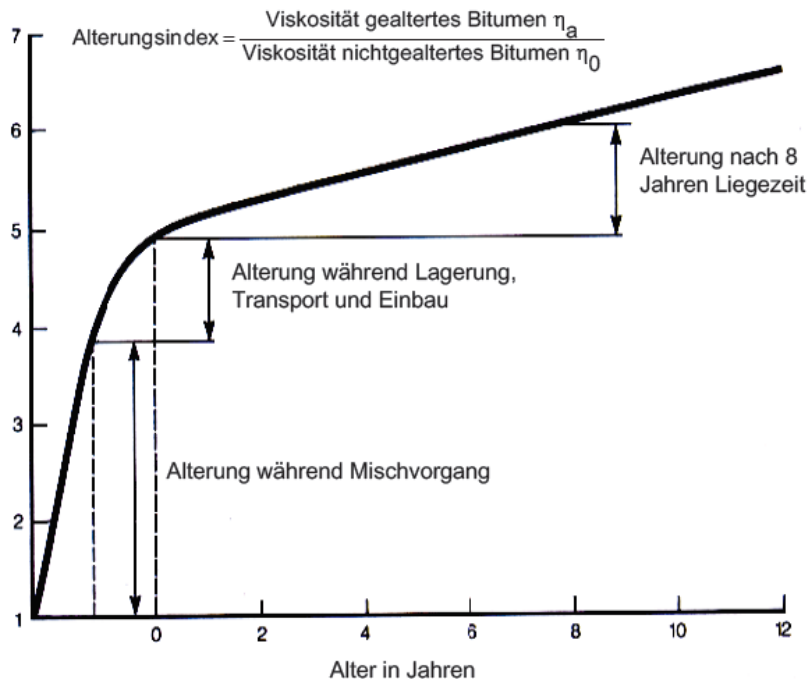


Abb. 10: Alterung des Bitumens über die Zeit [1]

3.3.4 Einteilung von Bitumen

Die Abbildung 11 zeigt die Einteilung des Bitumens nach seinem Anwendungsgebiet. Die Gattung des Straßenbaubitumens unterteilt sich weiter in Destillationsbitumen, Hochvakuumbitumen, Weichbitumen, sowie harte Straßenbaubitumen. Die Gebrauchsspanne von Straßenbaubitumen bewegt sich im Bereich von 70 K [11].

Polymermodifizierte Bitumen (PmB) weisen im Vergleich zu herkömmlichen Straßenbaubitumen eine erhöhte Gebrauchsspanne auf [1].

Bitumenemulsionen entstehen durch eine feine Durchmischung von Bitumen, Wasser und einem Stabilisator (Emulgator) in einer Kolloidmühle. Die Farbe der Bitumenemulsion ist nicht wie gewohnt schwarz, sondern bräunlich, da das Bitumen (disperse Phase) von Wasser (kontinuierliche Phase) umgeben ist. Das Brechen der Emulsion impliziert das Ausscheiden des Emulsionswassers, wodurch es zur Verfestigung kommt [5].

Eingesetzt werden Bitumenemulsionen insbesondere für Oberflächenbehandlungen [5].

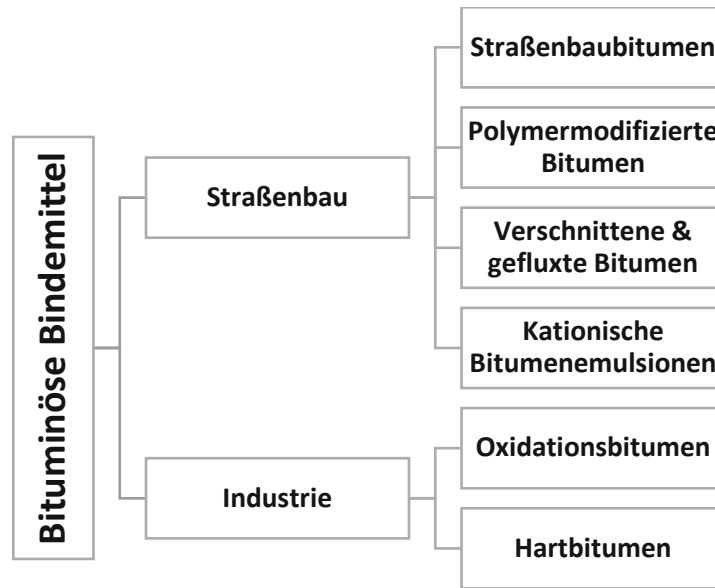


Abb. 11: Einteilung bituminöser Bindemittel [1]

4 Fahrbahndecke aus Beton

4.1 Grundsätzliches

Betonfahrbahnen müssen im Laufe ihrer Lebensdauer, sowohl lastabhängige als auch lastunabhängige Spannungen schadensfrei aufnehmen können. Die lastabhängigen Spannungen werden durch die Verkehrsbelastung induziert, die sowohl statischer, als auch dynamischer Natur sein können. Zu den lastunabhängigen Spannungen zählen zum einen die hygrischen Betoneigenschaften und zum anderen das temperaturabhängige Verhalten. Bei den Schwind- und Temperaturspannungen handelt es sich um Zwängungsspannungen, deren Ursprung in der behinderten Verformung liegt. Letztere Spannungen werden im Normalfall bei zutage treten von Rissen abgebaut. Für die Dimensionierung spielen neben der Spannungsgröße auch die Überrollungshäufigkeit und die Einwirkungsdauer eine ausschlaggebende Rolle. Im Vordergrund der Bemessung steht die Ermittlung der auftretenden Biegezugspannungen und die Plattenverwölbungen. Der Garant für eine lange Lebensdauer der Betondecke ist die Vermeidung von wilden Rissen. Hiervon ausgenommen ist das Deckensystem mit durchgehender Bewehrung [13].

Der Betondeckenbau ist eine kompetente Bauweise, wenn es darum geht tragfähige, verformungsarme und dauerhafte Fahrbahndecken herzustellen. Bautechnisch gesehen stellen Betonstraßen starre, biege feste Konstruktionen dar. Die Fahrbahn wird dabei in Platten eingeteilt und die einzelnen Teile haben aus statischer Sicht die gleiche Wirkung wie Platten. Bei dieser Konstruktionsart kommt es unter Verkehrsbelastung zu einer gleichmäßigen Druckspannungsverteilung. Im Vergleich dazu stellt die Asphaltfahrbahn ein flexibles Deckensystem mit einer ungleichmäßigen Druckspannungsverteilung dar (siehe Abb. 12) [12].

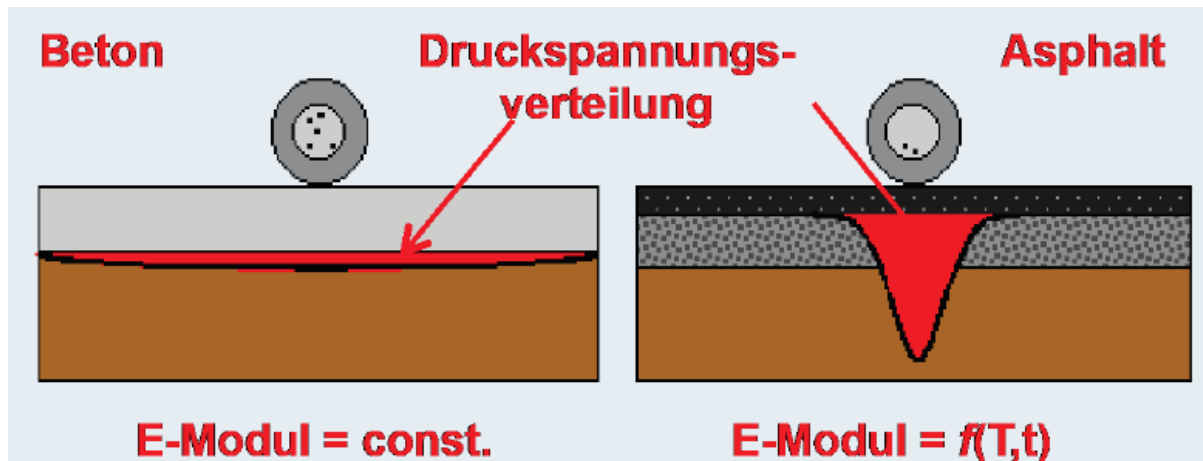


Abb. 12: Vergleich - Tragverhalten Beton & Asphalt [1]

Laut [12] eignen sich Fahrbahnen aus Beton für jegliche Art von Verkehrsflächen aufgrund ihrer besonders guten Eigenschaften im Hinblick auf Festigkeit, Lastverteilung, Griffigkeit, Helligkeit und Verformungswiderstand. Durch die hohe Resistenz gegenüber Verformungen bilden sich im Gegensatz zur Asphaltdecke keine Spurrinnen.

4.2 Einführung in die mechanischen Eigenschaften

Als Beton wird ein Gemisch aus Gesteinskörnung bezeichnet, welches unter Zugabe von Wasser und dem Bindemittel Zement zur Konsolidierung des Zementsteins führt. Die hydraulische Erhärtung von Zement wird auch als Hydratation bezeichnet und ist immer mit einer Wärmeentwicklung verbunden. Zur Beschreibung des Verhältnisses aus anrechenbarem Wasser zu Bindemittelgehalt dient der W/B-Wert. Jener Wert bestimmt die Festigkeit der Betonfahrbahndecke und ist von der Festigkeit des Zementsteins, sowie von der Expositions-kategorie abhängig. In Österreich muss für Fahrbahndecken die Expositions-kategorie XF4 eingehalten werden, bei dem ein W/B-Wert von höchstens 0,45 nicht überschritten werden darf. Des Weiteren muss ein entsprechender Luftgehalt sichergestellt werden, damit die Vergrößerung des Betonvolumens beim Gefrieren von Wasser aufgenommen werden kann [5].

4.3 Bauweisen

In der Regel wird zwischen vier verschiedenen Betondeckensystemen differenziert, die sich lediglich durch die Ausführung der Bewehrung (mit/ohne, schlaff/vorgespannt) unterscheiden. Dabei werden die Betondecken durch Fugen in einzelne Platten unterteilt, um unkontrollierten Rissen vorzubeugen und um Längenänderungen aufnehmen zu können. Die Herstellung der Betondecke kann dabei in die einschichtige und zweischichtige Bauweise gegliedert werden. Die Betonage der einschichtigen Bauweise erfolgt über die gesamte Dicke als eine Einheit. Im Vergleich dazu wird bei der zweischichtigen Bauweise die Decke nicht einheitlich betoniert, sondern in Unterbeton und Oberbeton gegliedert [5].

4.3.1 Deckensysteme

Wie in Kapitel 4.3 bereits angeführt, kann eine Gliederung in folgende Deckensysteme erfolgen:

- Unbewehrte Betondecke ohne Raumfuge: Bei dieser Bauweise weisen die Platten eine Länge von kleiner als das 25-fache der Plattendicke auf. Dabei wird die Betondecke durch Längs- und Querfugen in einzelne Platten getrennt. Im Bereich der Querfugen werden Dübel im Zentrum der Plattendicke eingebracht (siehe Abb. 13). Die unbewehrte Betondecke charakterisiert die gegenwärtige österreichische Standardbauweise, bei der die Scheinfugen verdübelt werden [5]. Die kurze Plattenlänge ($L < 25D$) hat den Vorteil, dass die Biegespannungen klein ausfallen und dadurch unkontrollierten Querrissen Einhalt geboten wird [13].

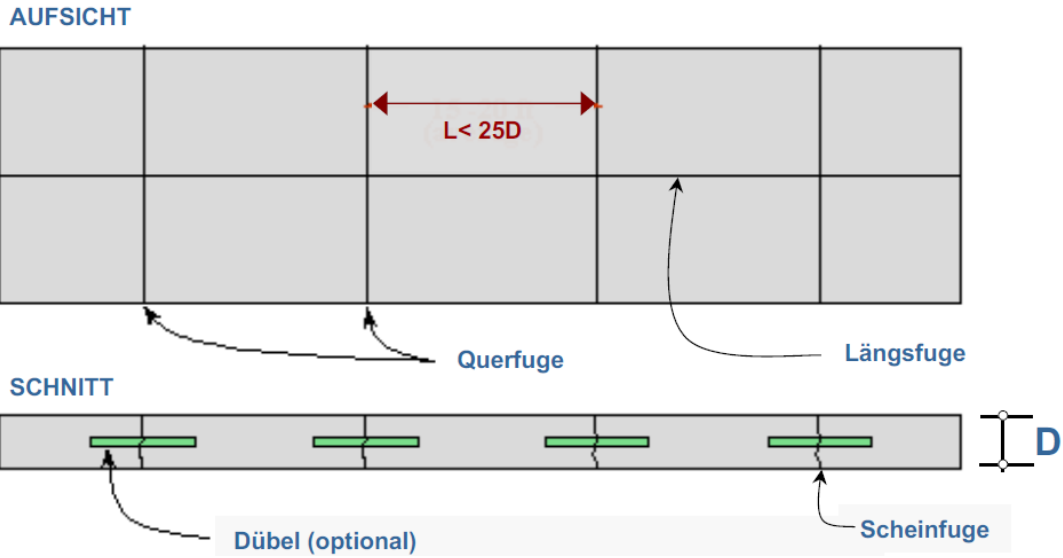


Abb. 13: Betondecke ohne Raumfuge, unbewehrt [5]

- **Bewehrte Betondecke mit Raumfuge:** Die Plattenlänge beträgt mindestens das 25-fache der Plattendicke und die Betondecke wird ebenfalls durch Längs- und Querfugen in einzelne Platten geteilt. Die Verlegung der Bewehrung erfolgt oberflächennah und immer zwischen zwei Raumfugen (siehe Abb. 14). Mit Hilfe von Dübeln werden die getrennten Betonplatten im Bereich der Raumfugen miteinander verbunden [5]. Durch die Bewehrung sollen die Rissbreite von Schwindrissen klein gehalten, die Tragfähigkeit der Betondecke aufrechterhalten und der Fahrkomfort gewährleistet werden [13].

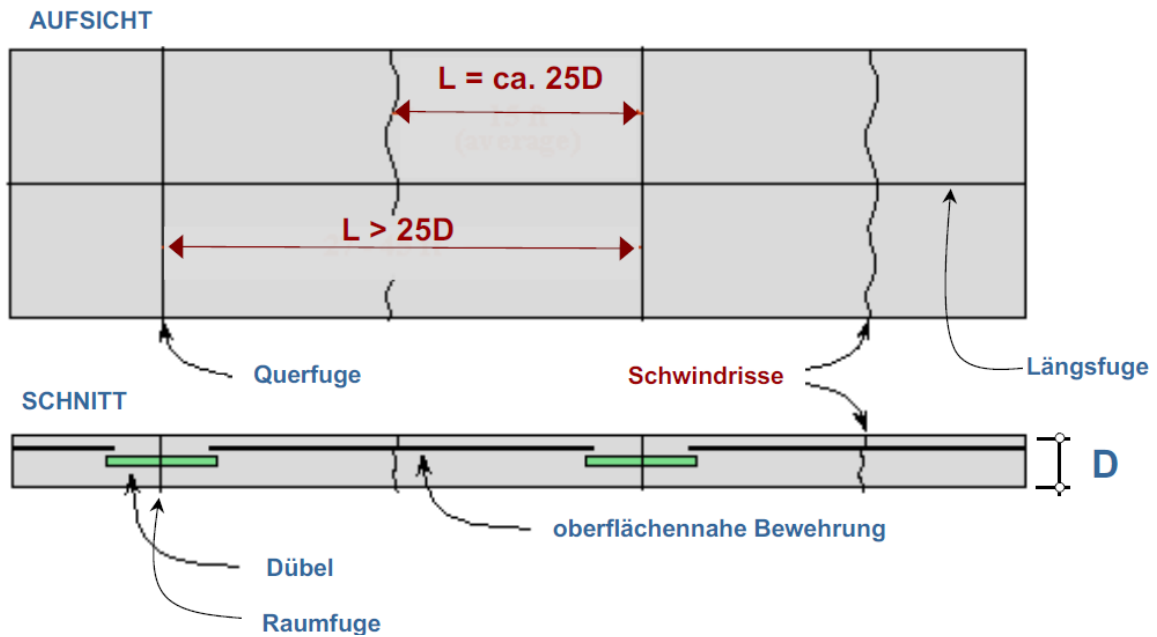


Abb. 14: Betondecke bewehrt mit Raumfuge [5]

- Durchgehend bewehrte Betondecke: In Europa kommt die bewehrte Betondecke vor allem in Belgien und Frankreich zum Einsatz. Des Weiteren hat sie sich zur Standardbauweise für den Hochgeschwindigkeitsverkehr der deutschen Bahn entwickelt [13]. Die durchgehende Bewehrung wird in der Mittellage des Querschnittes verlegt und die Risse können sich in einem Abstand von 0,4 bis 2,0 Meter frei ausbilden [5].

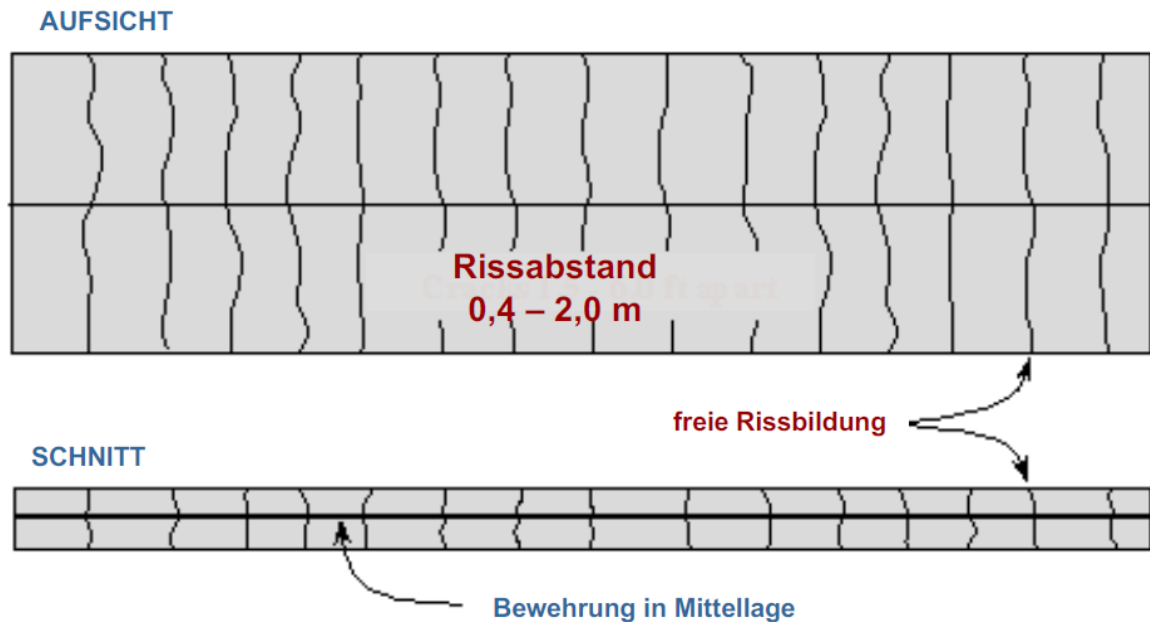


Abb. 15: Durchgehend bewehrte Betondecke [5]

- Vorgespannte Betondecke: Die Spannbetondecke ist eine Sonderform und kommt beispielsweise im Flugplatzbau zum Einsatz. Das Vorspannen der Betondecke erfolgt entweder in longitudinaler oder in longitudinaler und transversaler Richtung. Aus mechanischer Sicht leitet die Vorspannung Druckspannungen in die Betondecke ein, wodurch die Biegezugspannungen abgemindert werden. Folglich sind Plattenlängen von bis zu 300 m realisierbar und die Dicke der Decke reduziert sich um 40 bis 50 % im Vergleich zu gewöhnlichen Decken [5].

4.4 Konstruktive Ausbildung - Fugen

4.4.1 Plattengeometrie, Fugenfüllung

Betondecken werden durch Fugen in einzelne Platten unterteilt. Die Feldlänge einer Platte ist definiert durch die Distanz von einer Querfuge zur nächsten Querfuge. Weiters definiert der Abstand von einer Längsfuge zur nächsten Längsfuge bzw. zum Plattenrand die Feldbreite der Platte (siehe Abb. 16) [5].

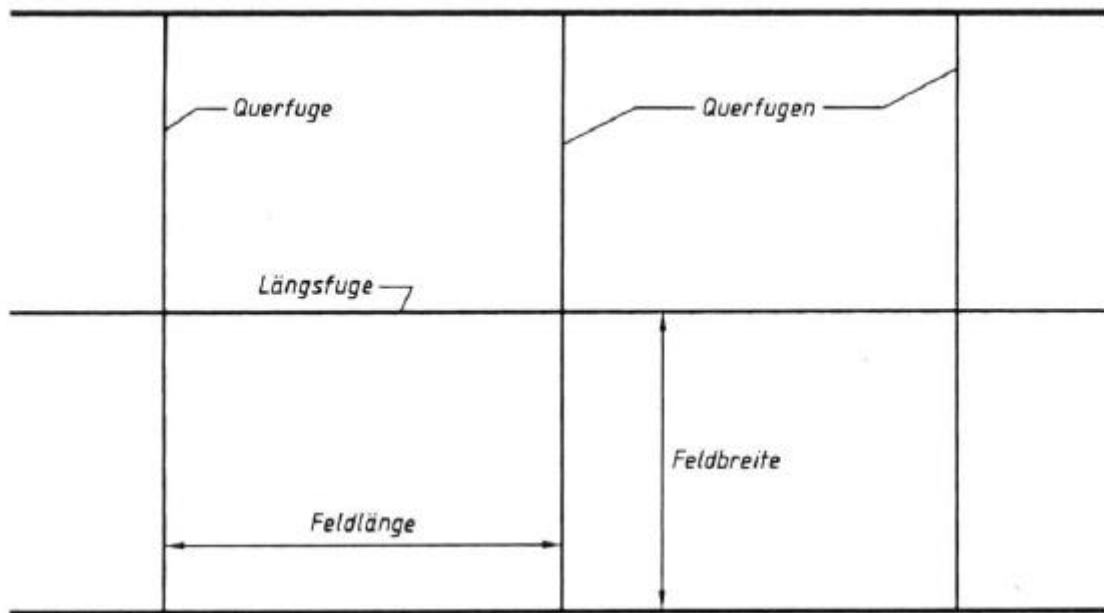


Abb. 16: Plattengeometrie Betondecke [5]

Die Feldlänge ist aufgrund von Wölbspannungen beschränkt und sollte allenfalls das 25-fache der Plattendicke nicht überschreiten. Die Praxis zeigt jedoch, dass im allgemeinen Feldlängen von 5 m hergestellt werden und der Grenzwert nicht vollständig ausgenutzt wird. Die Problematik größerer Fugenabstände liegt in der höheren Auslastung der Fugenfüllungen [13].

„Zur Herstellung von Fugenmassen werden Straßenbaubitumen bzw. geblasene Bitumen mit mineralischen Füllstoffen und Elastomeren, Weichmachern und Kunststoffen gemischt“ [14]. Fugenmassen werden vielseitig eingesetzt und dienen hauptsächlich dem Verfüllen von Fugen und dem Ausbessern von Rissen. In Bezug auf Verarbeitung wird in heiß verarbeitbare Fugenmassen, kalt verarbeitbare Fugenmassen, Fugenprofile und Fugenbänder unterschieden. Heiß verarbeitbare Fugenfüllungen kommen auf allen Verkehrsflächen aus Beton und Asphalt zum Einsatz, während kalt verarbeitbare Fugenfüllungen nur in Betonfahrbahnen angewendet werden. Gegenwärtig werden elastomere Fugenprofile für Fugen mit erhöhten Bewegungen favorisiert, da diese Längenänderungen bis 35 % der Fugenbreite aufnehmen können. Im Gegensatz dazu sind heiß verarbeitbare Fugenfüllungen für Längenänderungen der Fugenbreite bis 25 % ausgelegt [14].

4.4.2 Fugenarten

- **Raumfuge:** Die wesentliche Aufgabe der Raumfuge besteht darin den Betonquerschnitt zur Gänze zu trennen, um eine schadlose Ausbreitung der Decke zu ermöglichen. Die Problematik dieser Bauweise liegt in den Temperaturendehnungen. Die Erwärmung der Betondecke führt zu einer Modifikation der Auflagerbedingungen und gleichzeitig zu größeren Biegezugspannungen. Im Allgemeinen werden verdübelte bzw. verankerte Raumfugen für bewehrte Betondecken eingesetzt. Jedoch können sie auch in Ausnahmefällen bei Änderung der Betonplattendicke, vor und nach Objekten mit einer Übergangskonstruktion, in Anschlussbereichen, sowie bei engen Radien angewendet werden. Bei unbewehrten Betondecken mit Raumfugen entsprechen die Raumfugen den verdübelten Querfugen. Die Aufsteckhülse am Ende des Dübels sollte ein Dehnungsraum von ungefähr 20 mm aufweisen, sodass die Funktionalität und das Zusammenwirken von Dübel und Betonplatte harmonisieren. Der obere Fugenspalt soll eine Tiefe von 20 mm aufweisen und ist mit einer elastischen Fugenmasse zu verschließen (siehe Abb. 17) [12]. Bei Einbauten und Randeinfassungen werden unverdübelte bzw. unverankerte Raumfugen, sogenannte Trennfugen, eingesetzt [1].

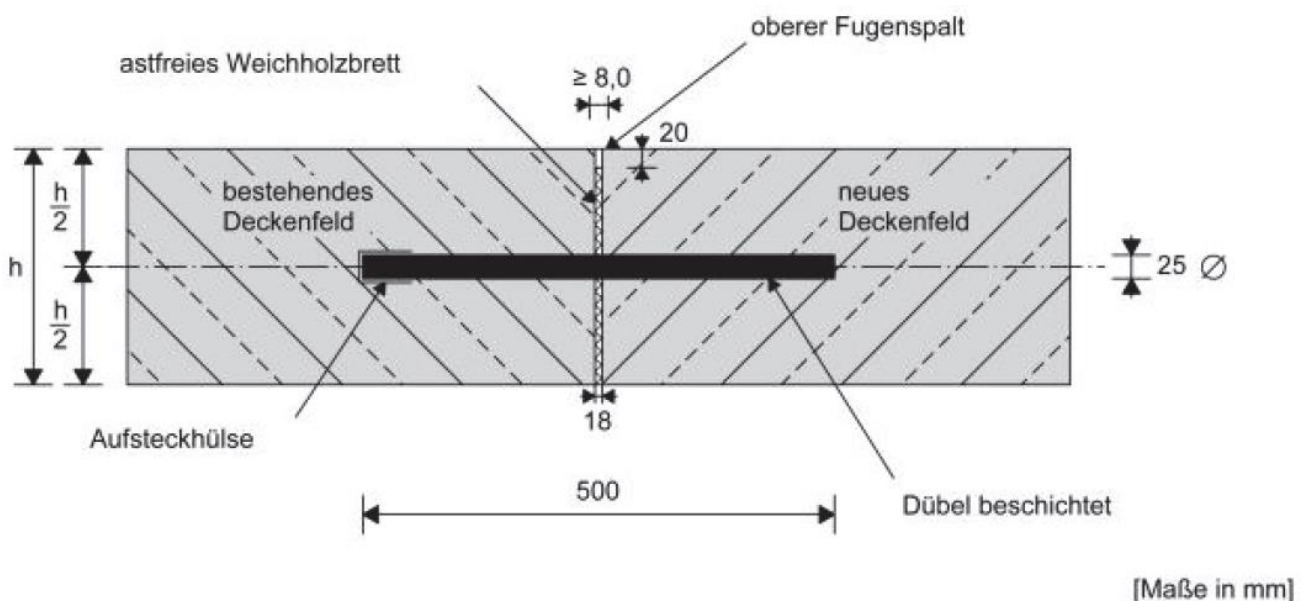


Abb. 17: Betondecke unbewehrt mit Raumfuge [1]

- **Scheinfuge:** Die Hauptaufgabe von Scheinfugen liegt in der kontrollierten Rissbildung, da sonst wilde Risse durch das Schwindverhalten des Betons entstehen würden. Die Scheinfuge stellt eine Sollbruchstelle dar und teilt die Betondecke durch Längs- und Querscheinfugen in einzelne Platten auf. Längsscheinfugen werden verankert und Querscheinfugen werden verdübelt. Innerhalb weniger Stunden reißt die Betondecke aufgrund der Schwindspannungen unter der Sollbruchstelle auf die gesamte Deckendicke durch (siehe Abb. 18). Der Zeitpunkt des Fugenschnittes ist an die Wetterlage sowie weiteren Faktoren gebunden und erfolgt im Regelfall in der Zeit von 8 bis 24 Stunden nach der Betonage [5].

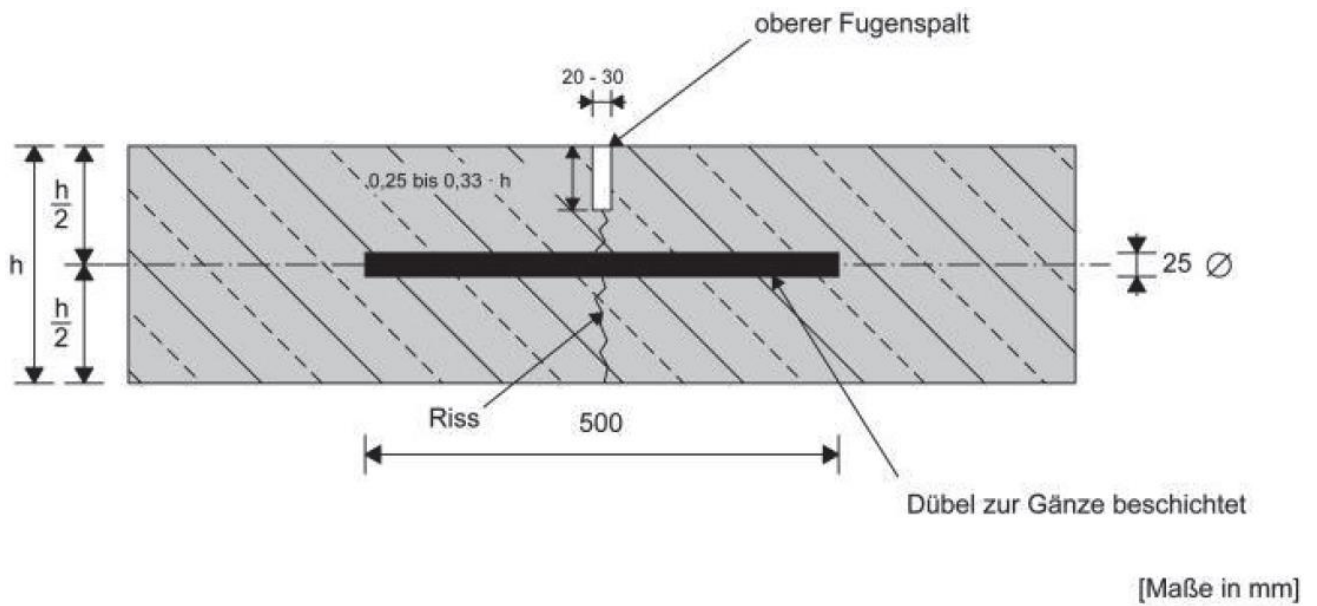


Abb. 18: Betondecke mit Scheinfuge [1]

In Abhängigkeit von der Lastklasse wird zwischen unverschlossenen und verschlossenen Scheinfugen unterschieden. Beide Arten weisen eine Breite von 2 bis 3 mm auf. Die Fugentiefe ist von der Mächtigkeit der Betonplatte abhängig. Das Verfüllen der Fugen kann durch Fugenmassen oder Fugenprofile erfolgen (siehe Abb. 19 & Abb. 20) [5]. Im hochrangigen Straßennetz werden Fugenprofile bei Querscheinfugen eingesetzt und Heißvergussmassen bei Längsscheinfugen. Um eine gute Haftwirkung zwischen Fugenmasse und Fugenflanken zu erzielen, müssen die Fugenflanken vorher getrocknet und anschließend gesäubert werden [12].

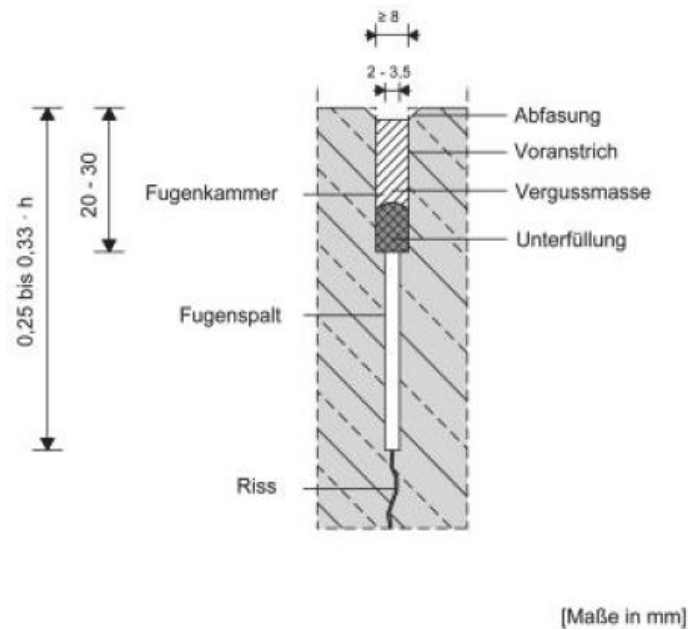


Abb. 19: Scheinfuge schmal geschnitten, unverschlossen [1]

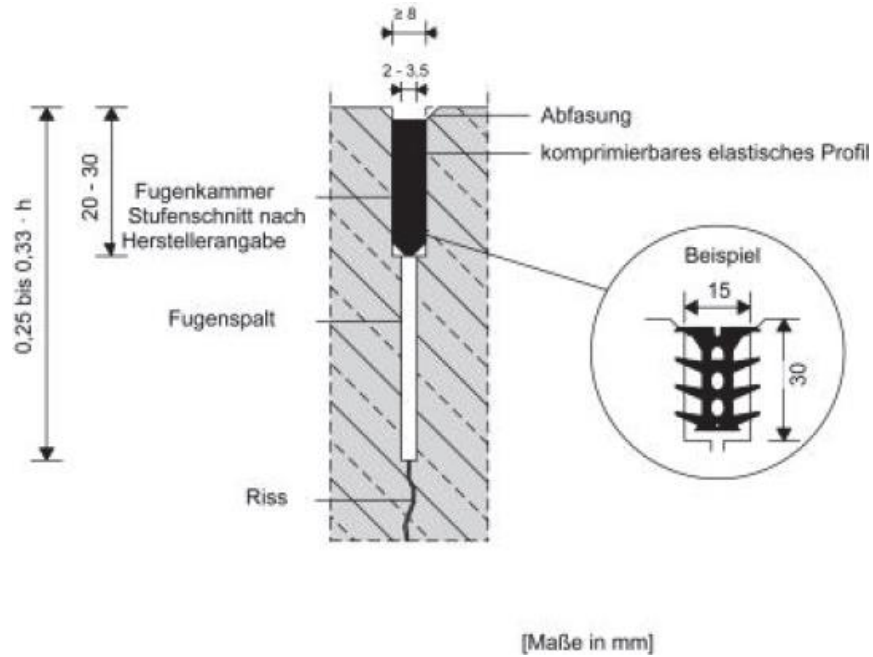


Abb. 20: Aufgeweitete Scheinfuge, verschlossen [1]

- **Pressfuge:** Pressfugen sind anzuordnen, wenn ein neues Deckenfeld an ein bestehendes Deckenfeld anbetoniert wird. Der obere Bereich der Pressfuge wird mit einer Tiefe von 20 mm und einer Breite von 8 mm angekerbt und anschließend abgedichtet. Vor der Betonage des neuen Deckenfeldes an das Bestandsfeld, muss der Querschnitt mit einem Bitumenfilm versehen werden (siehe Abb. 21). Werden Pressfugen als Querpressfugen hergestellt, sind diese zu verdübeln. Bei Herstellung als Längspressfugen sind diese zu verankern [5].

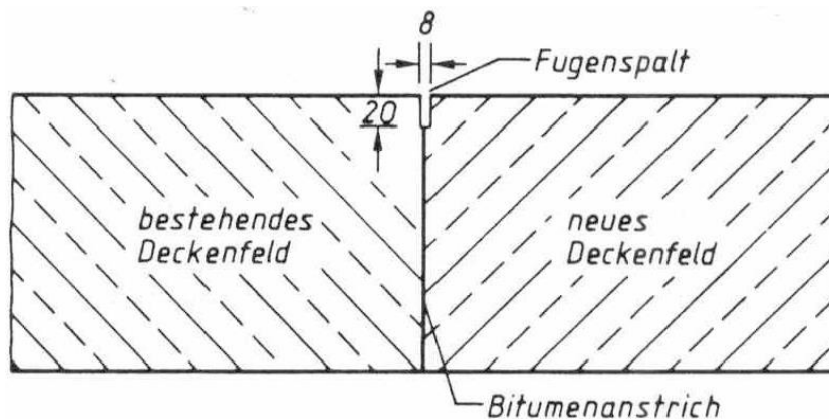


Abb. 21: Pressfuge [5]

- **Tagesabschlussfuge:** Diese Art der Fuge ist nach Abschluss jeder Tagesleistung, sowie nach Freilassen von Betonfeldern anzuordnen. Tagesabschlussfugen werden verdübelt und sind nach demselben Prinzip wie Pressfugen auszuführen. Zu Beginn der nächsten Tagesleistung wird die Betondecke unter Rücksichtnahme der Fugenteilung bis zum

störungsfreien Beton zurechtgeschnitten (siehe Abb. 22 oben). Das Einbringen der Dübel kann auf drei unterschiedliche Weisen erfolgen. Der Dübel kann direkt in die vorhandene Betondecke eingebohrt oder mittels Stahl- oder Kunststoffrohren in das Deckenfeld eingerüttelt werden. Das Einbohren des Dübels birgt die Gefahr der mangelnden Positionsgenauigkeit. In Abbildung 22 (unten) ist zu sehen, wie zwei angrenzende Deckenfelder zu betonieren sind. Im ersten Schritt werden die Dübel eingebohrt und anschließend wird das freie Deckenfeld mit Fließbeton befüllt [5].

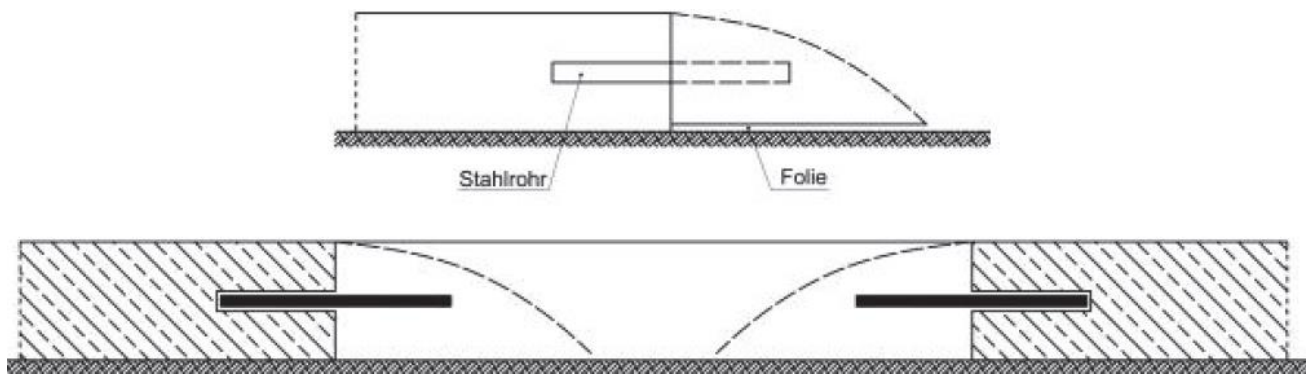


Abb. 22: Tagesabschlussfuge [1]

4.4.3 Dübel und Anker

Bei der Überfahrt von Fugen entstehen sowohl in den Dübeln als auch in den Ankern Schub- und Biegespannungen. Eine Laststeigerung bewirkt eine Zunahme der Einspannlänge des Dübels bzw. des Ankers. Im Hinblick auf Temperaturänderungen kommt es zu Dehnungen im Dübel bzw. im Anker. Die Aufgabe dieser beiden Objekte besteht darin, beim Überrollen der Fuge durch ein Fahrzeug, die auftretende Querkraft aufzunehmen und abzuleiten [13].

4.4.4 Fugenherstellung

Prinzipiell werden für die Herstellung der Kerben, Fugensägen mit wassergekühlten Diamantsägeblättern eingesetzt. Die Herausforderung bei der Herstellung der Fuge besteht in der Bestimmung des passenden Zeitpunktes. Ein zu frühes Schneiden führt zum Kantenausbruch und ein spätes Schneiden kann zu Anrissen führen. Entscheidend für die Herstellung der Fugen sind die Witterungslage und die Temperatur. Während des Fugenschnittes ist darauf zu achten, dass der anfallende Schneidschlamm zu entfernen ist. Nach ungefähr 1 bis 2 Wochen wird der Kerbschnitt auf die erforderliche Fugenbreite aufgeweitet. Parallel dazu erfolgt das Abdichten des Fugenspaltes. Der Spalt kann entweder mittels bituminöser Vergussmassen verfüllt werden oder mit elastomeren Fugenprofilen abgedichtet werden [13].

4.4.5 Kontrolle und Sanierung

Die durchschnittliche Lebensdauer bituminöser Fugenmassen beträgt im Regelfall 5 bis 8 Jahre, danach sind diese nur mehr unzureichend wirksam. Die Lebenszeit kann vor allem durch eine ungenaue Herstellung der Fugenbreite an die Rissbewegung deutlich verkürzt werden. Laut [13] soll nach einer abgeschlossenen Kontrolle die Fugenmasse erneuert werden. Für das Beseitigen der in situ vorliegenden Fugenfüllung wird im Allgemeinen ein Traktor mit mechanischer oder hydraulischer Ausreißanlage eingesetzt. Während des Ausreißens können Kantenschäden hervorgerufen werden. Treten diese auf, so sind weitere Sanierungsmaßnahmen zu planen und eventuell muss der Fugenspalt durch Schneiden aufgeweitet werden. Rückstände der bestehenden Fugenmasse können im Spalt verweilen, wenn die Rückstände mit der neuen Fugenfüllung kompatibel sind und die Haftung der Restmasse an den Flanken sichergestellt werden kann. Die Arbeitsschritte zur Einbringung der neuen Fugenfüllung entsprechen spiegelbildlich jenen des Neubaus [13].

5 Experimentelles Programm

Dieser Kapitel ist der Hauptteil der vorliegenden Arbeit. Die zu Beginn ausformulierte Fragestellung wird hier nun untersucht. Dafür wurde eine Reihe an Versuche im Labor durchgeführt und anschließend ausgewertet.

5.1 Probekörper

Als Prüfgegenstand wurden drei quadratische Betonkörper mit Waschbetonoberfläche hergestellt, davon zwei mit Fuge (siehe Abb. 23) und einer ohne Fuge (siehe Abb. 24). Die Probekörper mit Fuge unterscheiden sich einzig durch die Menge und Ausführung der Fugenmasse. Als Fugenfüllung kam eine Heißvergussmasse zum Einsatz. Die Abmessungen dieser Prüfkörper wie Länge, Breite und Höhe waren stets ident:

- Länge, Breite: 30 cm
- Höhe: 8,5 cm
- Fugentiefe: 4 cm
- Fugenbreite: 1,2 cm



Abb. 23: Probekörper mit Fuge



Abb. 24: Probekörper ohne Fuge

5.2 Thermographie

Die Thermographie ist ein zerstörungsfreies Verfahren zur Lokalisierung von Defekten und Ungleichmäßigkeiten in Bauteilen. Das primäre Anwendungsgebiet ist die Werkstoffdiagnostik, darüber hinaus wird sie auch im Bauwesen bzw. in der Bauphysik eingesetzt. Das Lichtspektrum ist ein Teil des elektromagnetischen Spektrums und stellt den für das menschliche Auge sichtbaren Bereich dar. Die Wellenlänge der Infrarotstrahlung befindet sich innerhalb der Wellenlänge der Mikrowellen und der des sichtbaren Lichtes. Die Infrarotstrahlung wird in der Thermographie genutzt, um Oberflächentemperaturen von Objekten bildlich darzustellen. Als Maß gilt die Stärke der Infrarotstrahlung, welche sich in der Farbgebung der Temperatur unterscheidet [15].

In der Farbskala werden kühlere Temperaturen eher bläulich-violett dargestellt und wärmere Temperaturen werden rötlich-gelblich abgebildet. Die Abbildung 25 zeigt die Aufnahme einer verglasten Pfosten-Riegel-Konstruktion. Jene Konstruktion ist sowohl Außenluft berührt als auch Innenluft berührt. Es ist deutlich zu erkennen, dass es einen Temperaturunterschied zwischen der Verglasung und der Pfosten-Riegel-Konstruktion gibt.

Mithilfe der Wärmebildkamera wurden alle durchgeführten Versuche der vorliegenden Arbeit dokumentiert und die Auswirkungen der Experimente sichtbar und quantifizierbar gemacht.

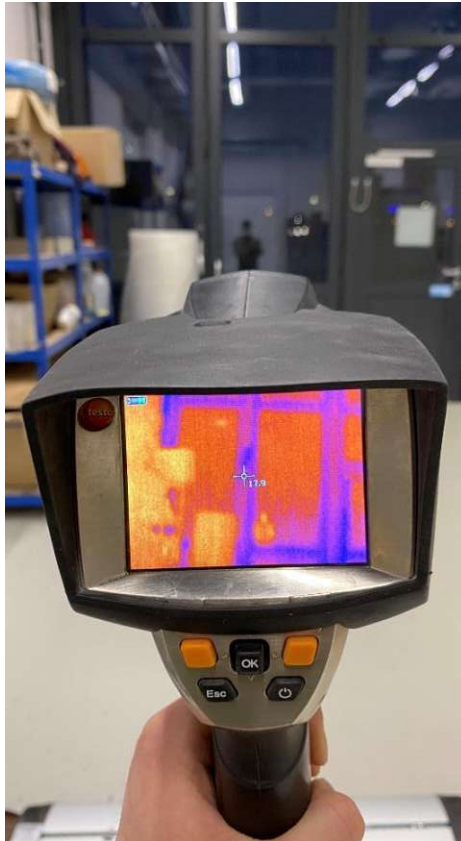


Abb. 25: Aufnahme mittels Wärmebildkamera

5.3 Versuchsaufbau Klimakammer

5.3.1 Betonstraßen – Temperaturbeanspruchung

Fahrbahnen sind im Regelfall der direkten Witterung ausgesetzt und erfahren somit große Temperaturschwankungen. Die Schwankungen des Temperaturverlaufes treten innerhalb eines Tages (Tag/Nacht), sowie innerhalb der vier Jahreszeiten auf. Diese klimatisch bedingten Temperaturänderungen induzieren Bewegungen in Längsrichtung der Fahrbahn. Darüber hinaus kommt es zu einer Unterscheidung in gleichmäßige und ungleichmäßige Temperaturänderungen.

- Gleichmäßige Temperaturbeanspruchung: Bei Fahrbahnen aus Beton induziert eine gleichmäßige Abkühlung eine Verkürzung der Betondecke und eine gleichmäßige Erwärmung induziert eine Verlängerung der Betondecke [13]. Eine Behinderung dieser Bewegungen durch Reibung führt zum Entstehen von Zwängungen in der Betonplatte. Durch die Abkühlung der Betondecke entstehen Zugspannungen (siehe Abb. 26) und durch die Erwärmung entstehen Druckspannungen (siehe Abb. 27) [13].

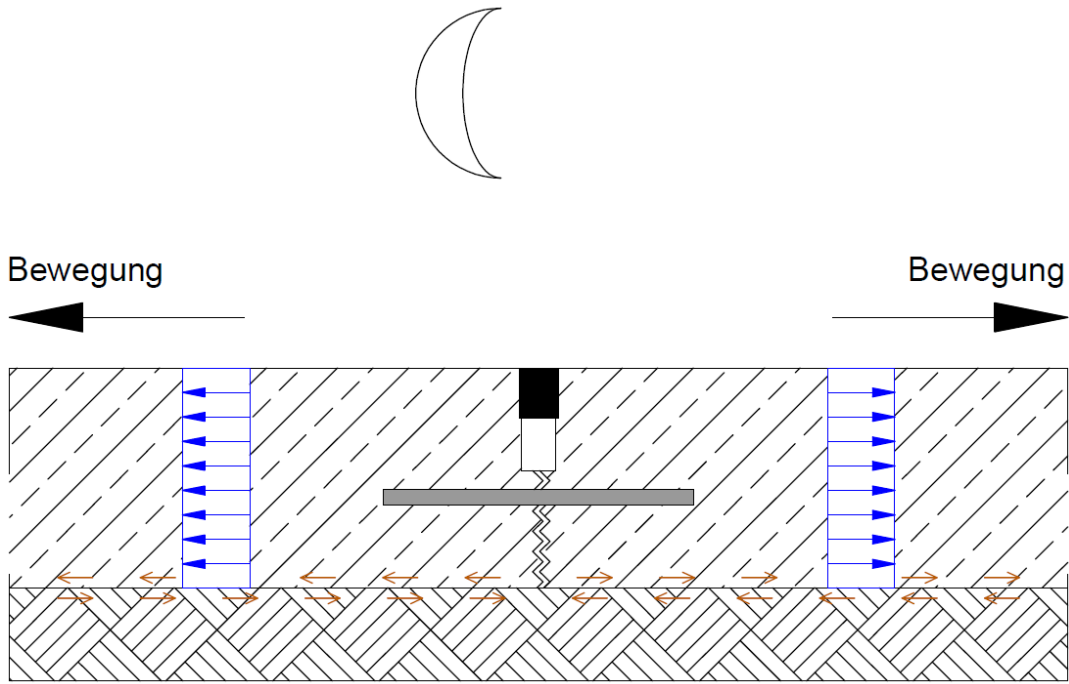


Abb. 26: Gleichmäßige Temperaturbeanspruchung beim Abkühlen

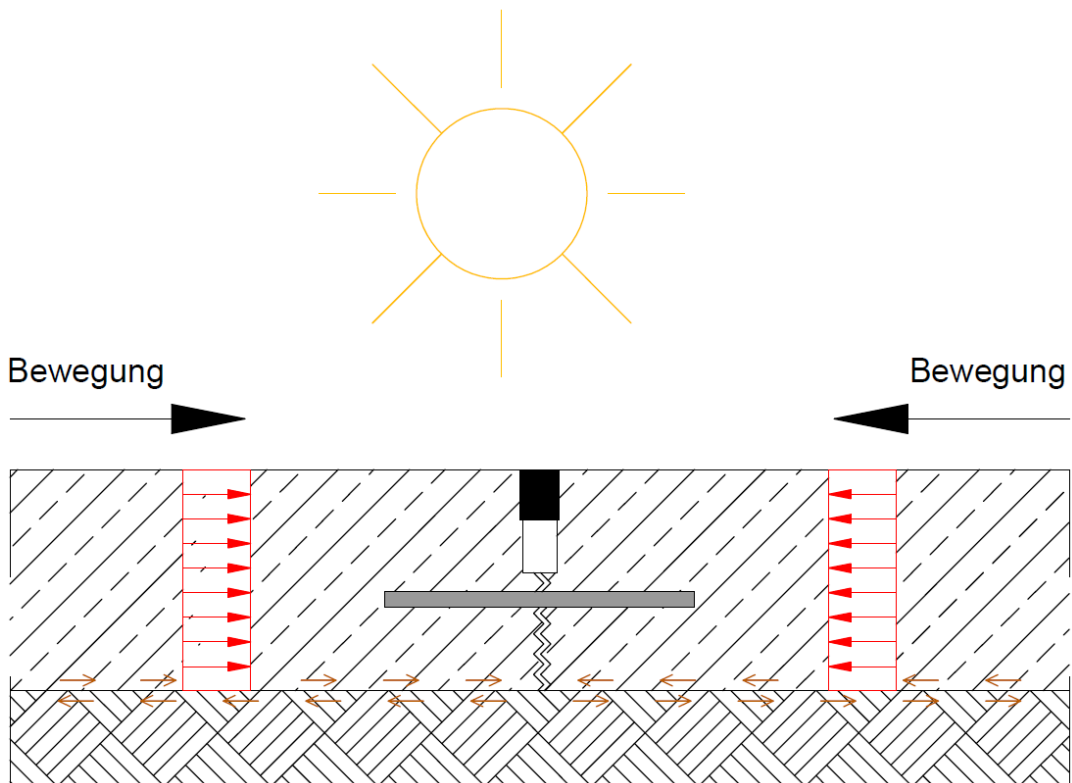


Abb. 27: Gleichmäßige Temperaturbeanspruchung beim Erwärmen

- Ungleichmäßige Temperaturbeanspruchung: Bei ungleichmäßiger Temperaturverteilung über den Querschnitt entstehen Temperaturgradienten. Letztere

können zum Aufwölben oder zum Aufschüsseln der Betondecke führen. Dabei ist zwischen der Abkühlung von oben und der Erwärmung von oben zu unterscheiden. Der Zustand „Abkühlung von oben“ (siehe Abb. 28) tritt während der Nacht, sowie bei Gewitterregen auf. Die Abkühlung führt zu einer Verkürzung der Fasern an der Oberseite der Betondecke und zu einer Ausdehnung der Fasern an der Unterseite der Betondecke. Infolgedessen kommt es zu einem Aufschüsseln der Betondecke. Im Regelfall sind die entstehenden Spannungen beim Aufschüsseln für die Bemessung irrelevant [5].

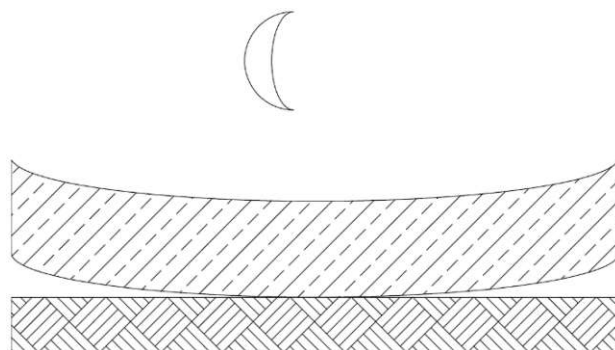


Abb. 28: Ungleichmäßige Temperaturverteilung beim Abkühlen

Im Vergleich dazu tritt der Zustand „Erwärmung von oben“ (siehe Abb. 29) bei direkter Sonnenbestrahlung auf und kommt nur an wenigen Sommertagen im Jahr vor. Die Erwärmung führt zu einer Verkürzung der Fasern an der Unterseite der Betondecke und zu einer Ausdehnung der Fasern an der Oberseite. Infolgedessen kommt es zum Aufwölben der Betondecke. Im Gegensatz zum Zustand „Abkühlen von oben“ sind in diesem Zustand die auftretenden Spannungen für die Bemessung maßgebend [5]. Das Hochwölben führt dazu, dass die Betondecke nur mehr auf ihren Plattenrändern aufliegt. Parallel dazu fängt das Eigengewicht der Decke an diesem Zustand entgegenzuwirken. Folglich entsteht durch das Eigengewicht ein Biegemoment an der Unterseite, welches Biegezugspannungen (Wölbspennungen) hervorbringt [13]. Für die Bemessung sind die Wölbspennungen mit jenen aus der Verkehrsbelastung zu überlagern [5].

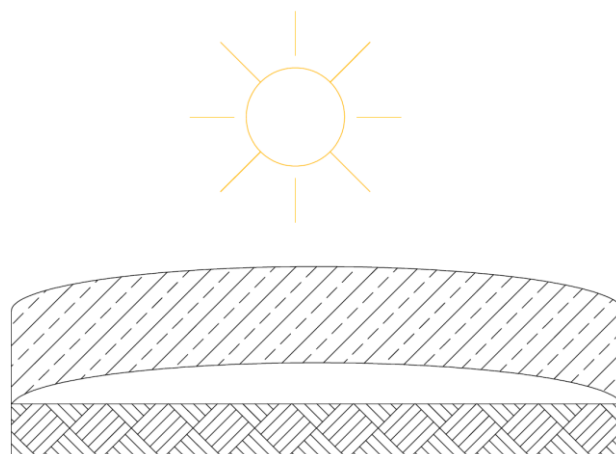


Abb. 29: Ungleichmäßige Temperaturverteilung beim Erwärmen

5.3.2 Frost-Tau-Wechsel

Um die klimatisch bedingten Temperaturänderungen im Labor nachzustellen, wurde eine Klimakammer verwendet. Die Klimakammer weist folgende, für den Versuch wichtige, technische Eigenschaften auf [16]:

- Temperaturbereich: -40° C bis +80° C
- Relative Luftfeuchte: 10 % bis 98 % (über +3° C)
- Mittlere Aufheizrate: 4,8 °C/min
- Mittlere Abkühlrate: 4,8 °C/min

Unter Bedachtnahme der technischen Spezifikationen, sowie der in der Realität tatsächlich auftretenden Temperaturen (Winter bis -20 °C & Sommer bis über +40 °C [17]) in Straßenfahrbahnen, wurde ein Frost-Tau-Zyklus für den Probekörper festgelegt.

In der Abbildung 30 sind die einzelnen Phasen des definierten Frost-Tau-Kreislaufes ersichtlich. Zu Beginn ist eine Temperatur von -20 °C geplant, die über eine Dauer von einer Stunde konstant gehalten wird. In der zweiten Phase wird der Klimakammer zwei Stunden Zeit gegeben, um die Innentemperatur von -20 °C auf +60 °C zu erwärmen. Anschließend wird die Temperatur von +60 °C für die Dauer von einer Stunde konstant gehalten. Im Kontrast zur Phase 2 wird in der Phase 4 die Temperatur von +60 °C auf -20 °C innerhalb von zwei Stunden abgekühlt. Die letzte Phase dauert lediglich eine Minute und soll den Übergang von einem Zyklus zum nächsten Zyklus darstellen. Für einen vollständigen Zyklus benötigt die Klimakammer eine Zeit von 361 Minuten bzw. 6 Stunden. Zur besseren Veranschaulichung dieses Kreislaufes wird auf die Abbildung 31 verwiesen.

	Phase	Temperatur	Dauer je Phase	
	1	-20 C°	60 min	Konstant
	2	-20 C°	120 min	Aufwärmphase
	3	60 C°	60 min	Konstant
	4	60 C°	120 min	Abkühlphase
	5	-20 C°	1 min	Puffer
Je Zyklus			361 min	

Abb. 30: Gesamtphasen eines Zyklus

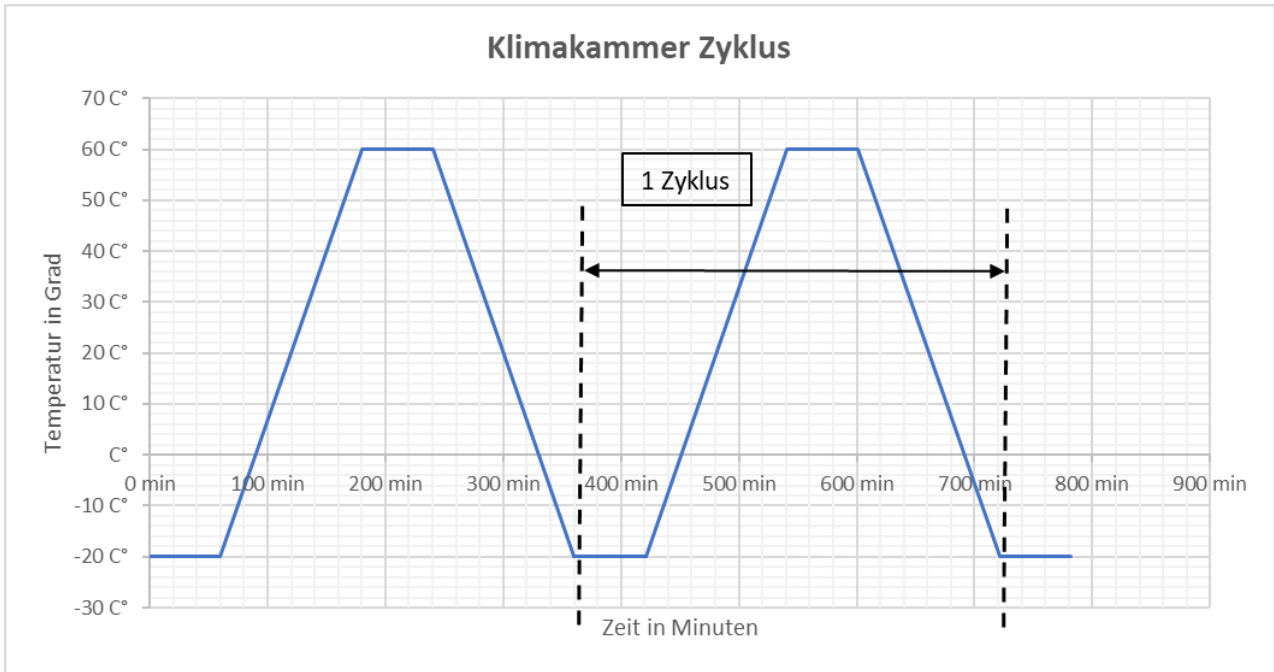


Abb. 31: Zyklus Klimakammer

Der Probekörper hat insgesamt 72 Stunden in der Klimakammer verbracht und wurde somit 12 Zyklen besonders realitätsnaher Temperaturänderungen ausgesetzt. Dieser Probekörper (siehe Abb. 32) war der einzige von den insgesamt drei Probekörpern, der diesem Versuch unterzogen wurde.



Abb. 32: Probekörper 1

An jedem einzelnen der insgesamt vier Versuchstage wurden zu einem bestimmten Zeitpunkt Wärmebildfotos geschossen. Überdies wurden am dritten Tag des Versuches zu jeder einzelnen Phase, Wärmebildfotos geschossen und am letzten Tag an drei Phasen. Dies ermöglicht eine genauere Betrachtung der Auswirkung der Temperaturbeanspruchung auf den Probekörper. Diese Versuchsreihe wurde am 19.01.2021 (ca. 14:11 Uhr) begonnen und dauerte bis zum 22.01.2021 (ca. 14:30) an.

5.3.3 Tag 1

Am ersten Tag des Experimentes wurde der Probekörper mit der Wärmebildkamera abfotografiert, bevor dieser in die Klimakammer gestellt wurde. Die Durchschnittstemperatur betrug zu diesem Zeitpunkt +18,9 °C. Die Höchsttemperatur betrug +19,1 °C und die Tiefsttemperatur betrug +18,6 °C. Das Wärmebild zeigt eine gleichmäßige Temperaturverteilung zwischen Waschbetonoberfläche und bituminöser Fugenmasse (siehe Abb. 33). Zusätzlich wurde ein Temperaturprofil (P1) entlang des Probekörpers gelegt (siehe Abb. 33 & Abb. 34).

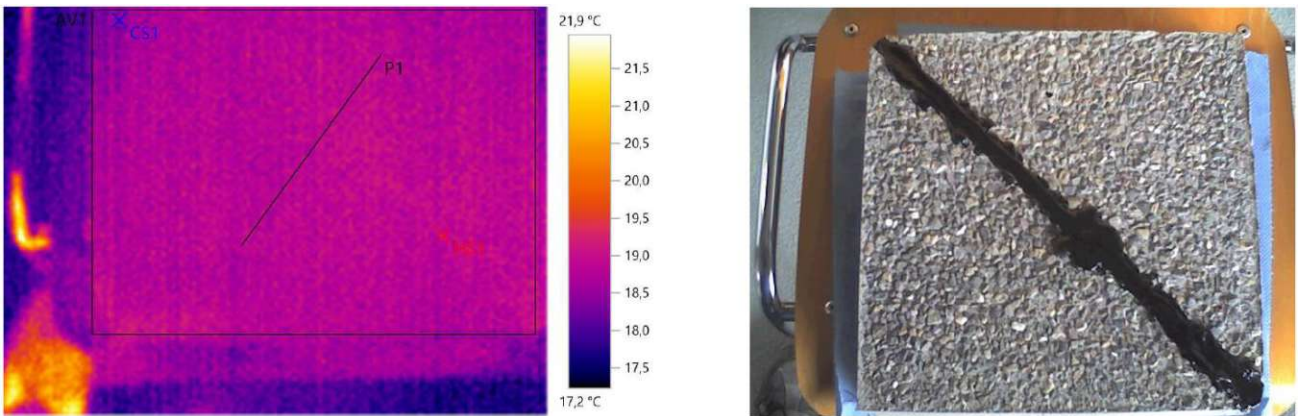


Abb. 33: Wärmebild & Echtbild - Tag 1

Minimum: 18,6 °C Maximum: 19,1 °C Mittelwert: 18,9 °C

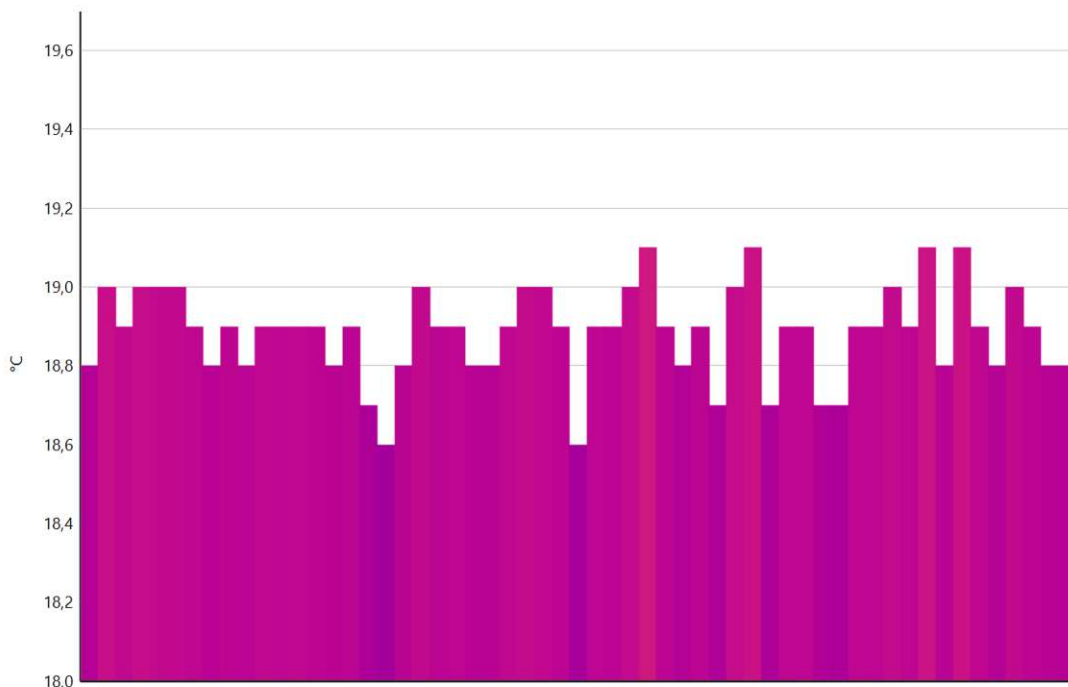


Abb. 34: Temperaturprofil P1 - Tag 1

5.3.4 Tag 2

Zum Zeitpunkt der Aufnahme der Wärmebildfotos verweilte der Prüfkörper bereits 27 Stunden (4,5 Frost-Tau-Zyklen) in der Klimakammer. Der Probekörper befand sich in diesem Moment in der Aufwärmphase der Phase zwei. Die Temperatur in der Klimakammer betrug +42,4 °C und die Oberfläche des Probekörpers war feucht. Aus dem Wärmebildfoto ist ersichtlich, dass insbesondere die Ecken deutlich wärmer waren als der Kern (siehe Abb. 35). Das Temperaturprofil (P1) zeigt einen parabolischen Verlauf und erreicht Tiefsttemperaturen kurz vor der Fugenmasse. Im Bereich der Fugenfüllung steigt die Temperatur leicht an (siehe Abb. 36). Dies ist darin begründet, dass der Werkstoff Bitumen eine geringere Wärmeleitfähigkeit besitzt und somit Wärme besser speichern kann als Beton.

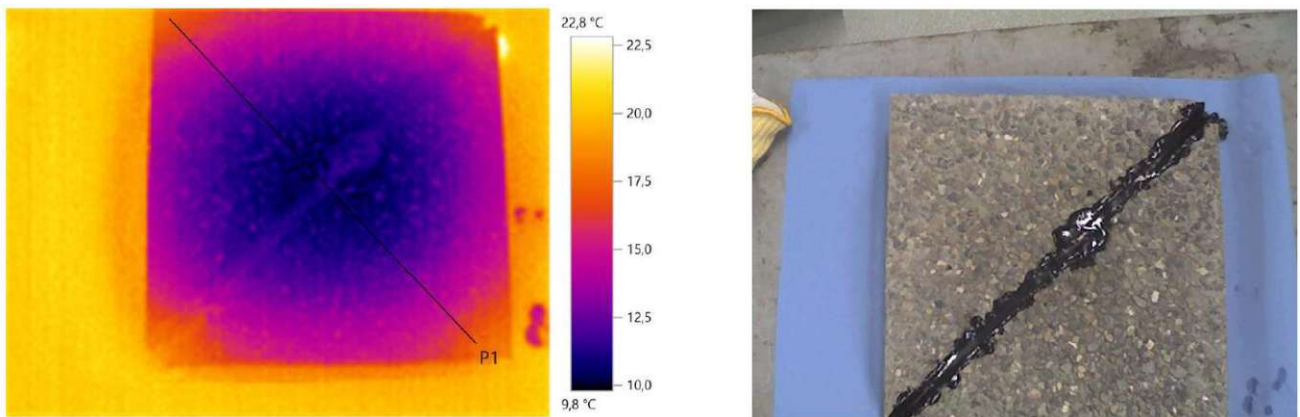


Abb. 35: Wärmebild & Echtbild - Tag 2

Minimum: 10,1 °C Maximum: 17,4 °C Mittelwert: 12,8 °C

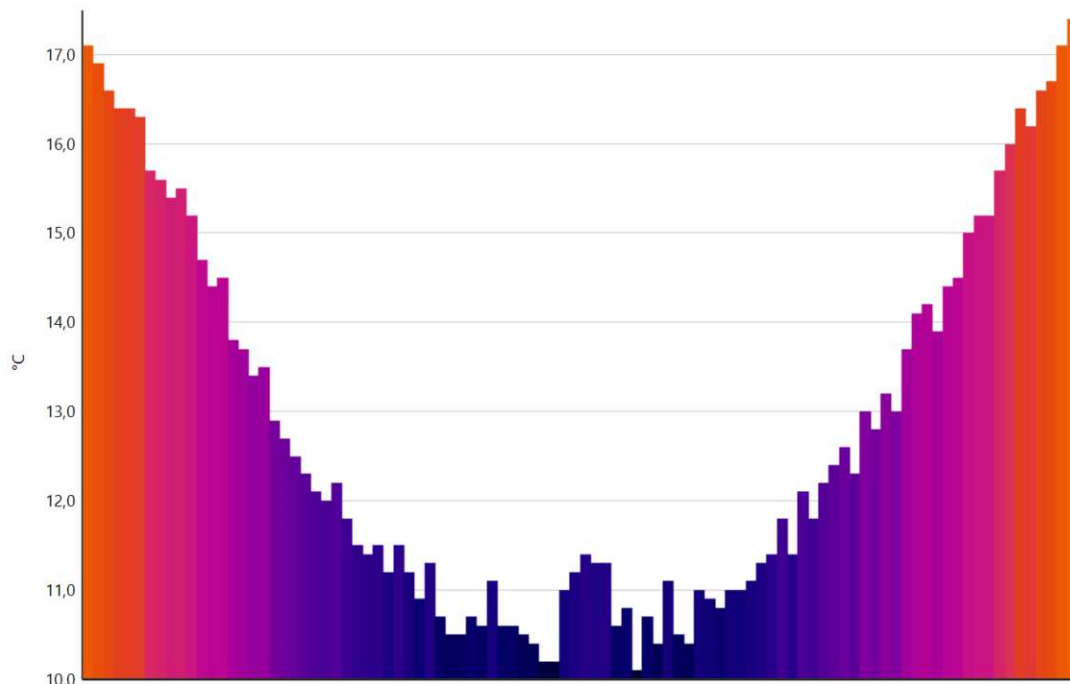


Abb. 36: Temperaturprofil P1 - Tag 2

5.3.5 Tag 3

Der dritte Tag ist der einzige Tag gewesen, an dem alle Phasen mithilfe der Wärmebildkamera aufgenommen und dokumentiert wurden. Die Abbildung 37 zeigt den chronologischen Verlauf der Wärmebildaufnahmen des dritten Tages. Die Fotodokumentation begann mit der Station 1 und endete fünf Stunden später mit der Station 6. Zwischen den einzelnen Stationen vergingen jeweils 60 Minuten.

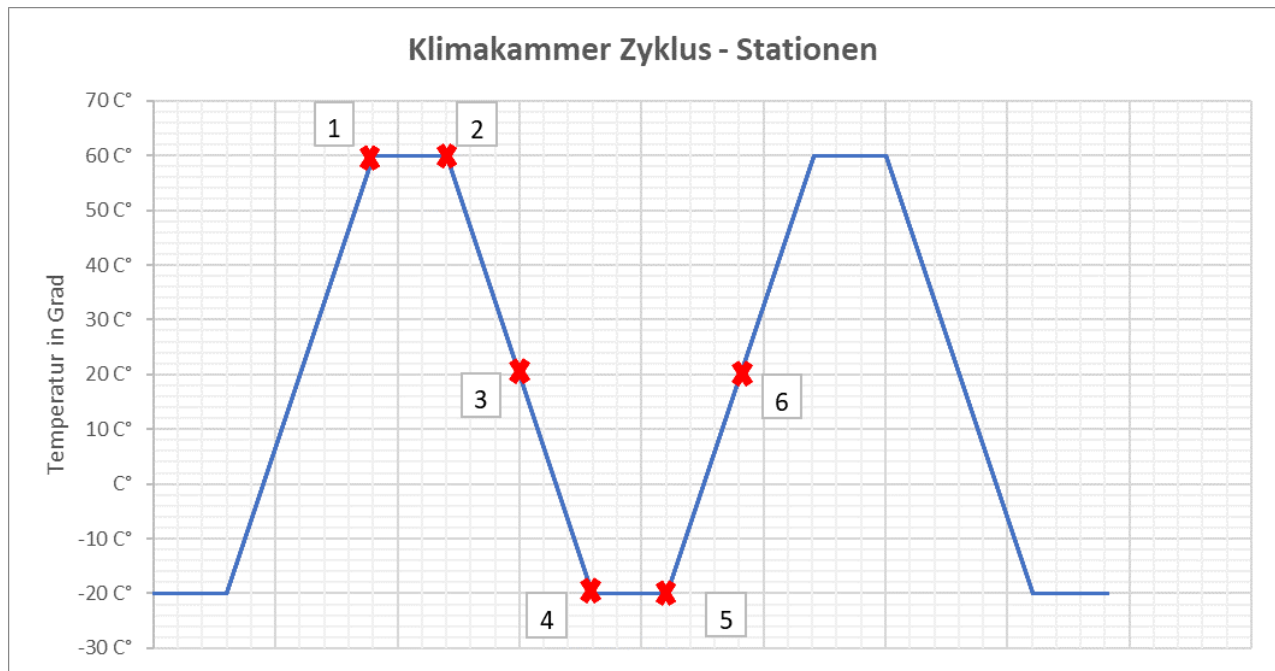


Abb. 37: Klimakammer Zyklus - Tag 3

- Station 1 (21.01.21, 12:11): Der Probekörper befand sich zu diesem Zeitpunkt bereits 46 Stunden in der Klimakammer. Es wurden also rund 7,7 Frost-Tau-Kreisläufe vollzogen. Die Innentemperatur der Klimakammer betrug 56,6 °C. Insbesondere die Ecken des Probekörpers weisen höhere Temperaturen auf als dessen Kern (siehe Abb. 38). Die Höchsttemperatur entlang des Temperaturprofils (P1) betrug +41,8 °C, während die Tiefsttemperatur +34,1 °C betrug. Der parabolische Temperaturverlauf wurde beibehalten und erreicht seinen Tiefpunkt im Bereich der Fugenfüllung (siehe Abb. 39). Aufgrund des ähnlichen parabolischen Temperaturverlaufes zum zweiten Tag kann hier noch von keiner schadhafte Fugenfüllung gesprochen werden. Der Temperaturunterschied von ungefähr 5 °C, zwischen Beton und Fugenmasse liegt in der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Bitumens. Je geringer dieser Parameter, desto besser dämmt ein Werkstoff.

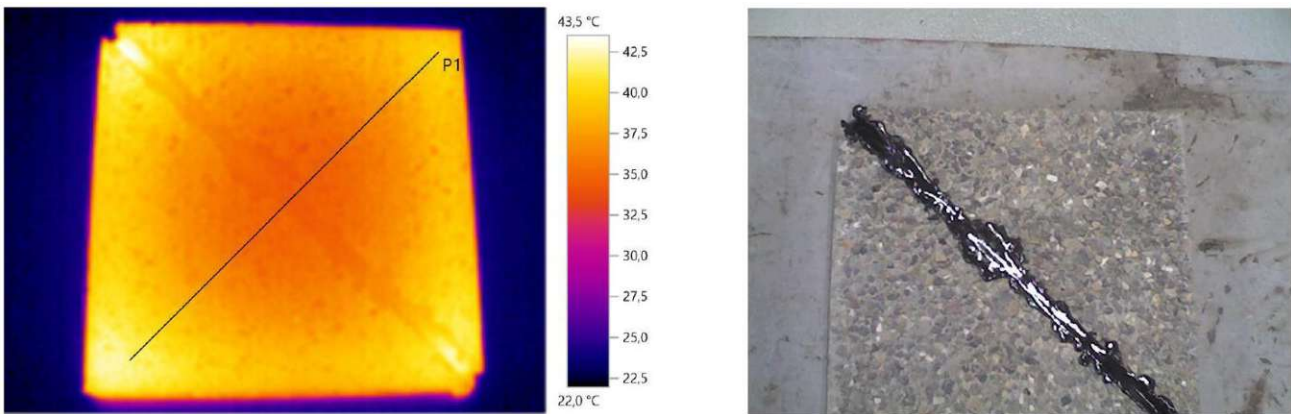


Abb. 38: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 1

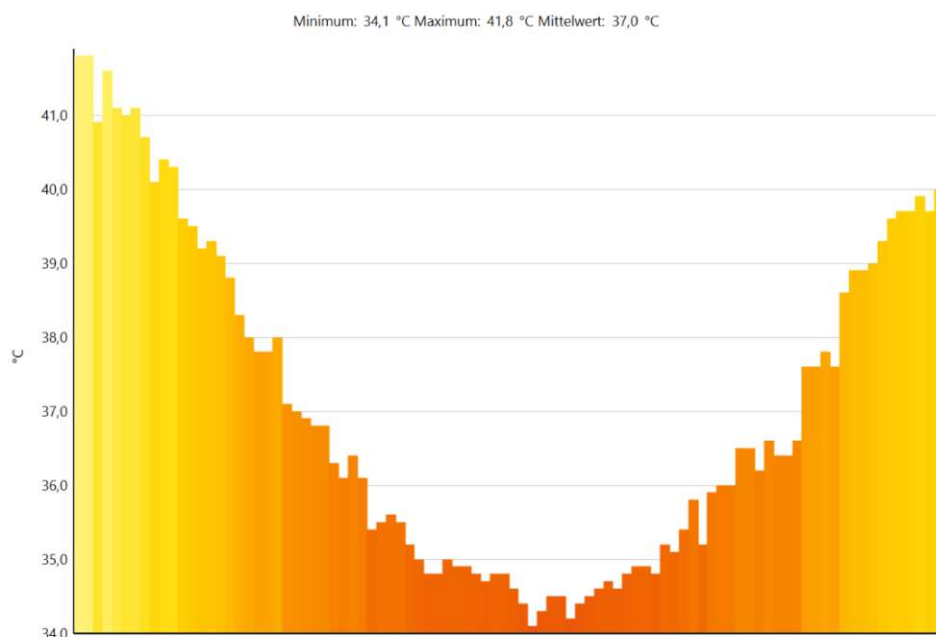


Abb. 39: Temperaturprofil P1 - Tag 3 Station 1

- Station 2 (21.01.21, 13:11): Der Probekörper befand sich bereits 47 Stunden in der Klimakammer. Es wurden also rund 7,83 Frost-Tau-Kreisläufe vollzogen. Der Klimaschrank kühlte sukzessiv die Innentemperatur ab, um die Zieltemperatur der nächsten Phase zu erreichen. Die Ecken des Probekörpers kühlten wie gewohnt schneller ab als der Kern (siehe Abb. 40 & 41). Des Weiteren ist der parabolische Temperaturverlauf verloren gegangen. Im Bereich der Fugenfüllung herrscht eine ungefähre Temperatur von +36,3 °C, während links und rechts neben der Fugenfüllung die Temperatur etwa +38,5 °C ausmacht (siehe Abb. 41).

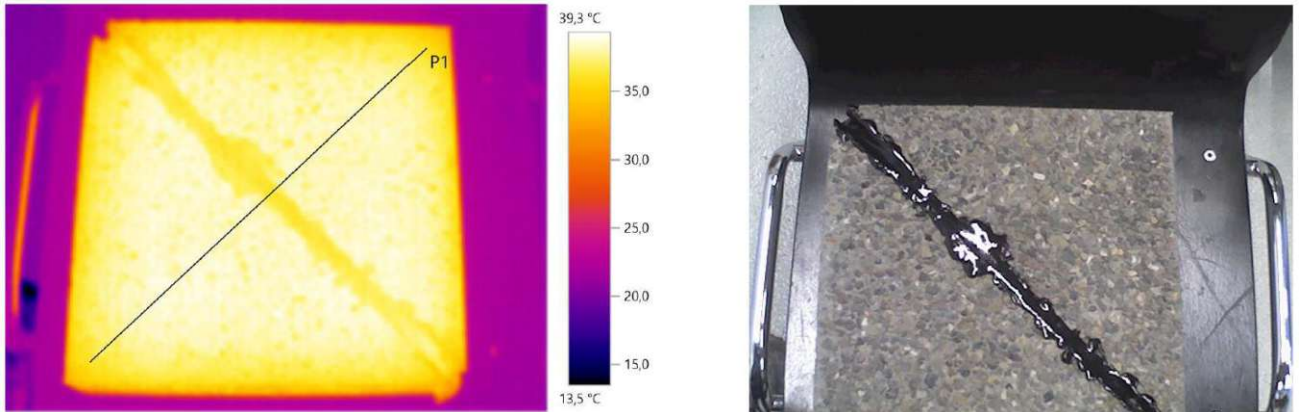


Abb. 40: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 2

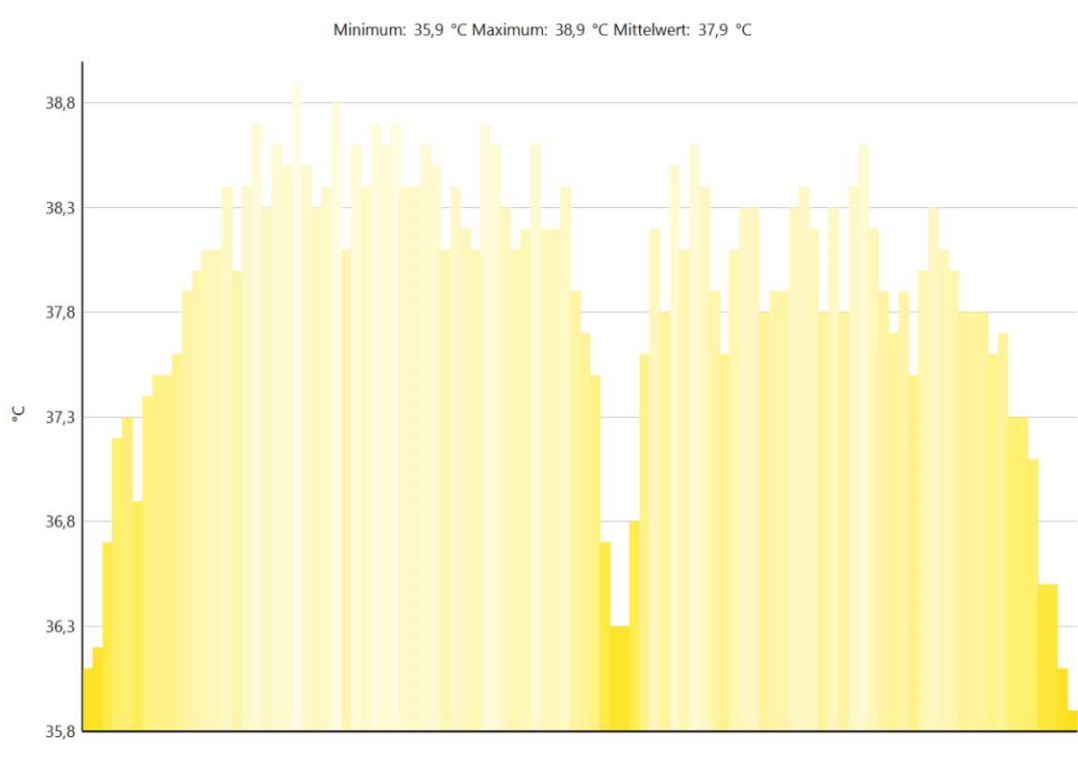


Abb. 41: Temperaturprofil P1 – Tag 3 Station 2

- Station 3 (21.01.21, 14:11): Der Prüfkörper befand sich nun 48 Stunden in der Klimakammer. Es wurden also genau 8 Frost-Tau-Zyklen vollzogen. Die Innentemperatur der Klimakammer betrug zu diesem Zeitpunkt $-17,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Station 3 befindet sich mitten in der Abkühlphase 4. Die Ecken nehmen die Temperaturänderungen wie gewohnt als erstes auf und sind kühler als der Kern (siehe Abb. 42). Das Temperaturprofil (P1) zeigt diesmal, dass die Temperatur der Fugenmasse verglichen mit der umliegenden Betonoberfläche nahezu ident ist und einer negativen Parabel gleicht (siehe Abb. 43).

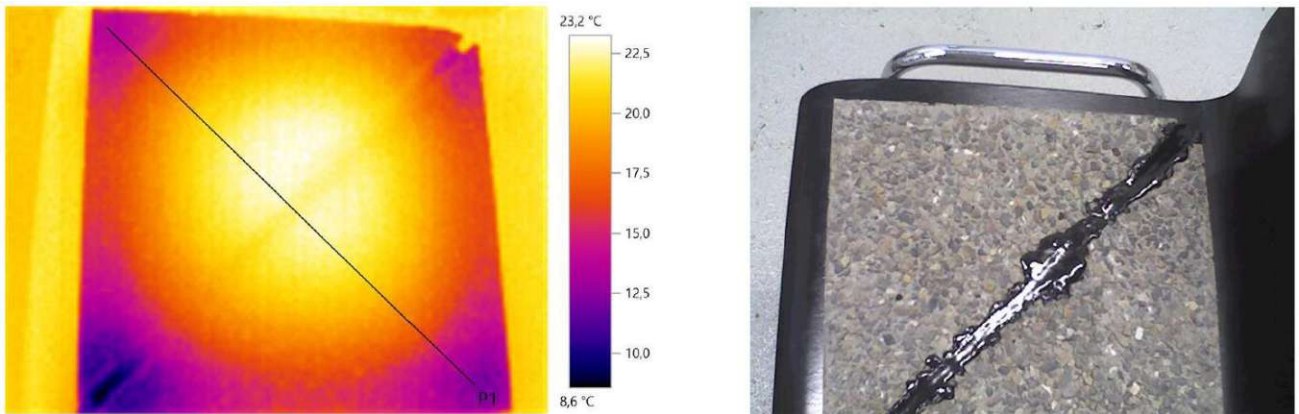


Abb. 42: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 3

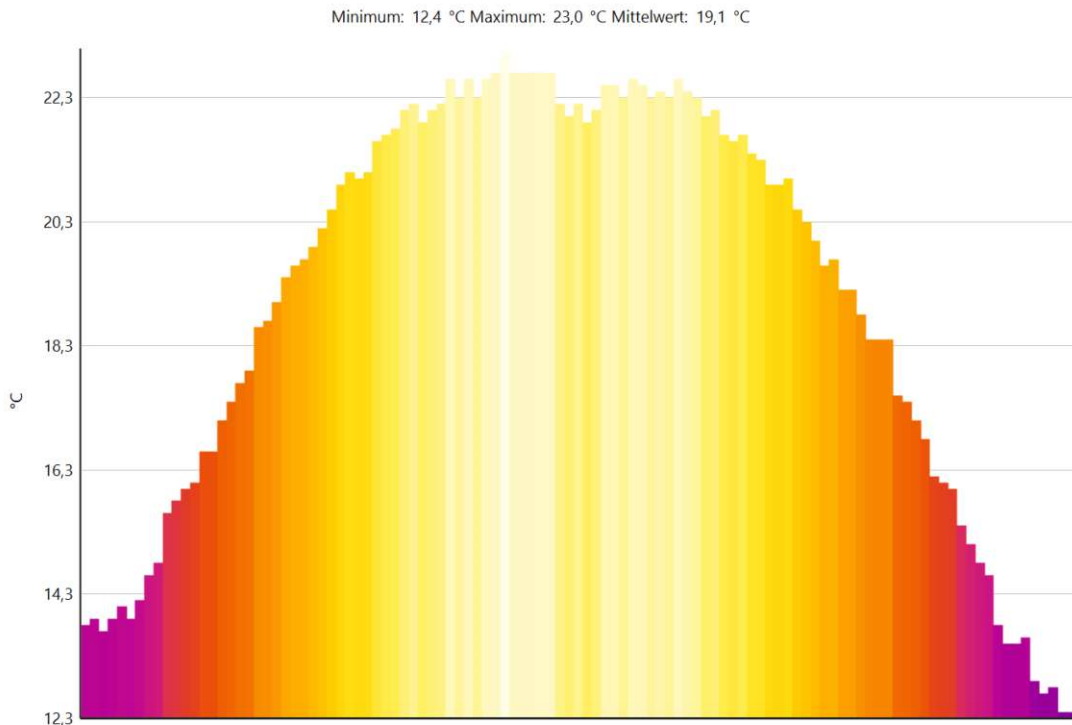


Abb. 43: Temperaturprofil P1 - Tag 3 Station 3

- Station 4 (21.01.2021, 15:11): Zu diesem Zeitpunkt befand sich der Prüfkörper bereits 49 Stunden in der Klimakammer. Es wurden 8,17 Frost-Tau-Zyklen vollzogen. Die Innentemperatur der Klimakammer betrug zu diesem Zeitpunkt -20,0 °C. Die Station vier befindet sich in jener Phase, in der die Temperatur für 60 Minuten konstant gehalten wird. Die Ecken und Kanten des Probekörpers weisen tiefere Temperaturen auf als der Kern (siehe Abb. 44). Auch hier weisen die Fugenmasse, sowie die umgebende Betonoberfläche nahezu gleiche Temperaturen auf. Das Temperaturprofil entspricht einer negativen Parabel (siehe Abb. 45).

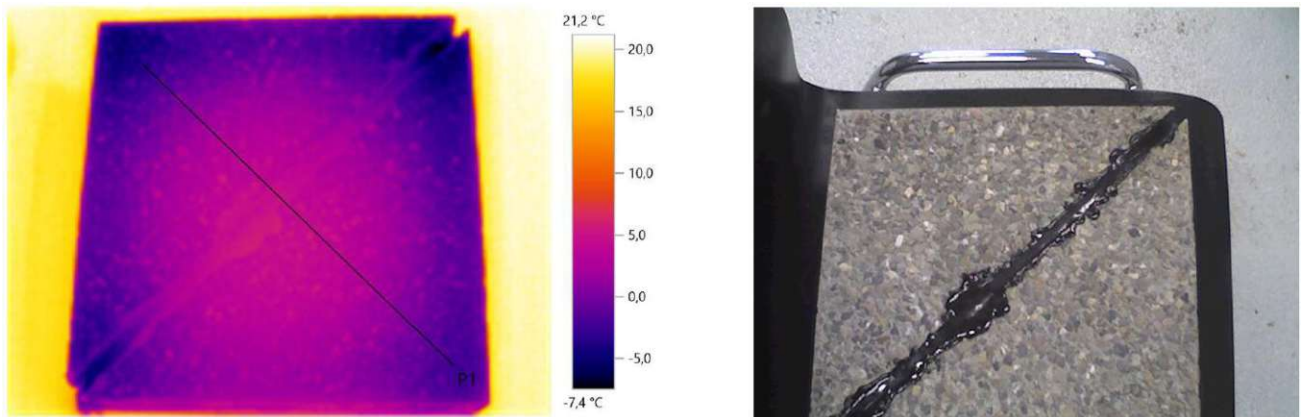


Abb. 44: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 4

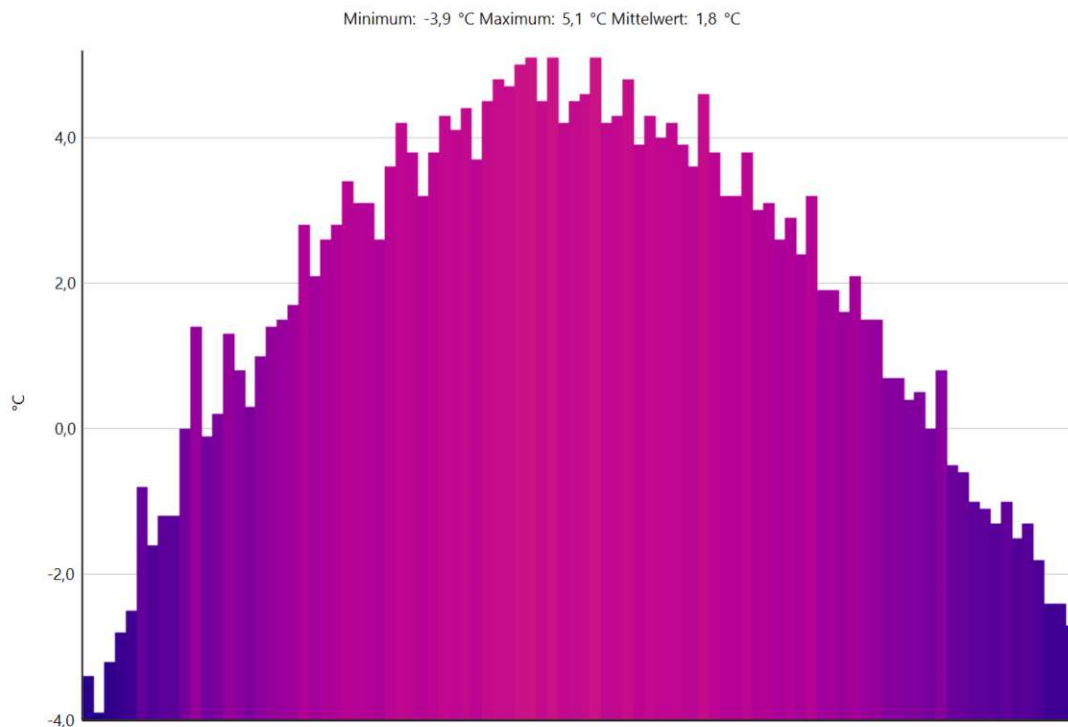


Abb. 45: Temperaturprofil P1 - Tag 3 Station 4

- Station 5 (21.01.2021, 16:11): Zu diesem Zeitpunkt befand sich der Prüfkörper bereits 50 Stunden in der Klimakammer. Es wurden 8,33 Frost-Tau-Zyklen vollzogen. Die Innentemperatur der Klimakammer betrug zu diesem Zeitpunkt +13,0 °C. Die Station 5 befindet sich im Anfangsstadium der Aufwärmphase 2.

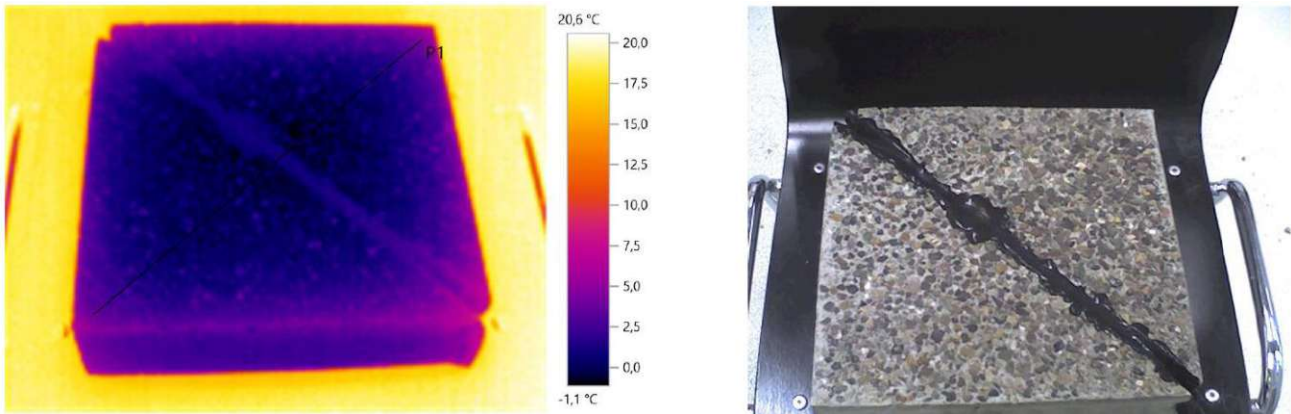


Abb. 46: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 5

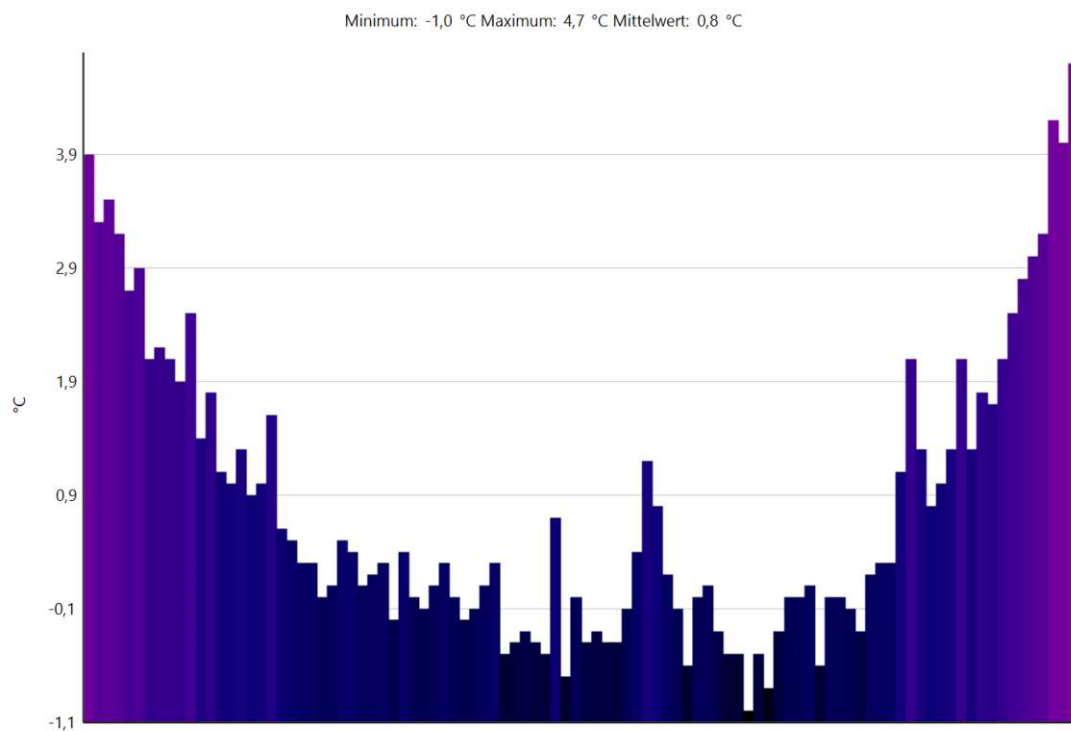


Abb. 47: Temperaturprofil P1 - Tag 3 Station 5

- Station 6 (21.01.2021, 17:11): Zu diesem Zeitpunkt befand sich der Prüfkörper bereits 51 Stunden in der Klimakammer. Es wurden 8,5 Frost-Tau-Zyklen vollzogen. Die Innentemperatur der Klimakammer betrug zu diesem Zeitpunkt +44,2 °C. Die Station 6 befindet sich im Zentrum der Aufwärmphase 2.

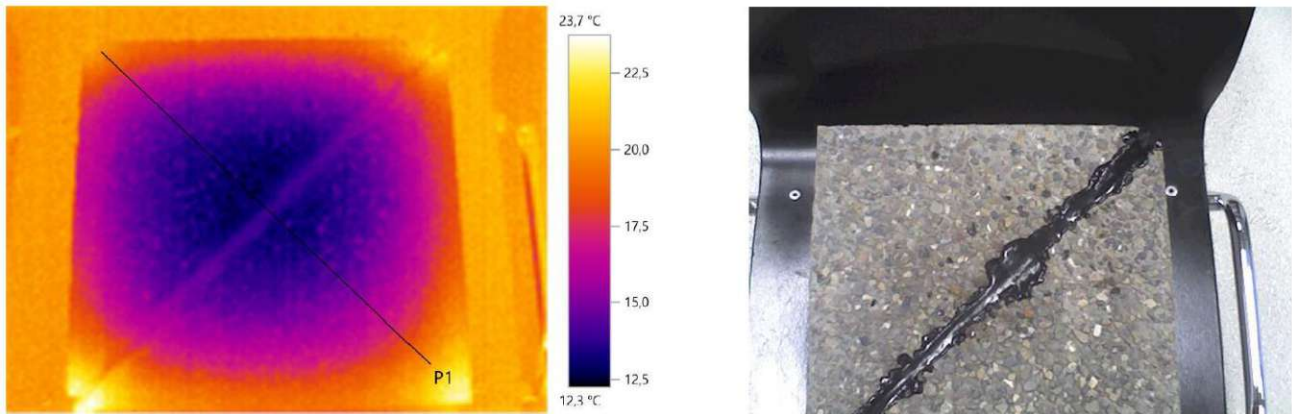


Abb. 48: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 6

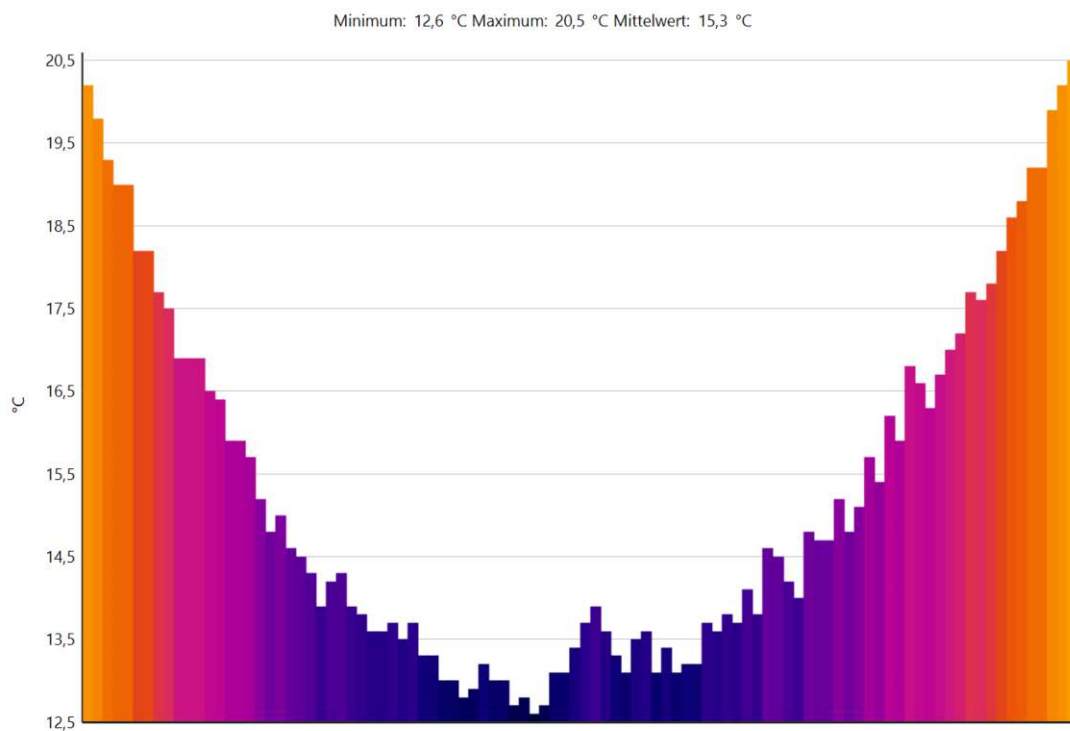


Abb. 49: Temperaturprofil P1 – Tag 3 Station 6

5.3.6 Tag 4

Am letzten Tag erfolgten die Aufnahmen an den Stationen 1, 2 und 3. Da die Auswertung der Wärmebilder dieses Tages, sich von den Wärmebildern des Vortages nicht unterscheiden, werden diese nicht nochmal aufgezeigt, da sie die gleichen Daten liefern. Die zusätzlichen Frost-Tau-Zyklen an diesem Tag brachten keine Änderung in der Temperaturlinie.

5.4 Infrarotstrahler

Um die Einflüsse direkter Sonnenstrahlung auf Betonfahrbahnen nachzubilden, welche insbesondere an heißen, windstillen Sommertagen vorkommen, wurden die Proben mittels Infrarotstrahler bestrahlt. Aufgrund dieser Tatsache wurden drei verschiedene Infrarotstrahler unterschiedlicher Hersteller für die weitere Versuchsdurchführung geprüft, um mit diesen eine Variantenstudie durchzuführen und den geeignetsten Strahler herauszufiltern.

5.4.1 Variantenstudie mit fugenlosem Probekörper

Die Variantenstudie wurde am fugenlosen Probekörper durchgeführt. Das Ziel dieser Studie war es jene Infrarotstrahler ausfindig zu machen, welche eine gleichmäßige Wärmestrahlung aufwiesen. Ein weiteres Auswahlkriterium bestand darin, dass nach einer Bestrahlungszeit von 5 bis 10 Minuten der Betonkörper eine Oberflächentemperatur von ungefähr 50 °C bis 60 °C aufzuweisen hat. Nach jedem Einzelversuch wurde dem Probekörper ausreichend Zeit gegeben, damit dieser auf Umgebungstemperatur abkühlen konnte. Diese beiden Anforderungen wurden als Kriterien zur Auswahl der geeignetsten Infrarotstrahler herangezogen. Die Distanz zwischen Probekörper-Oberkante und Infrarotstrahler wurde stets gleich gehalten und betrug 27 cm (siehe Abb. 50).

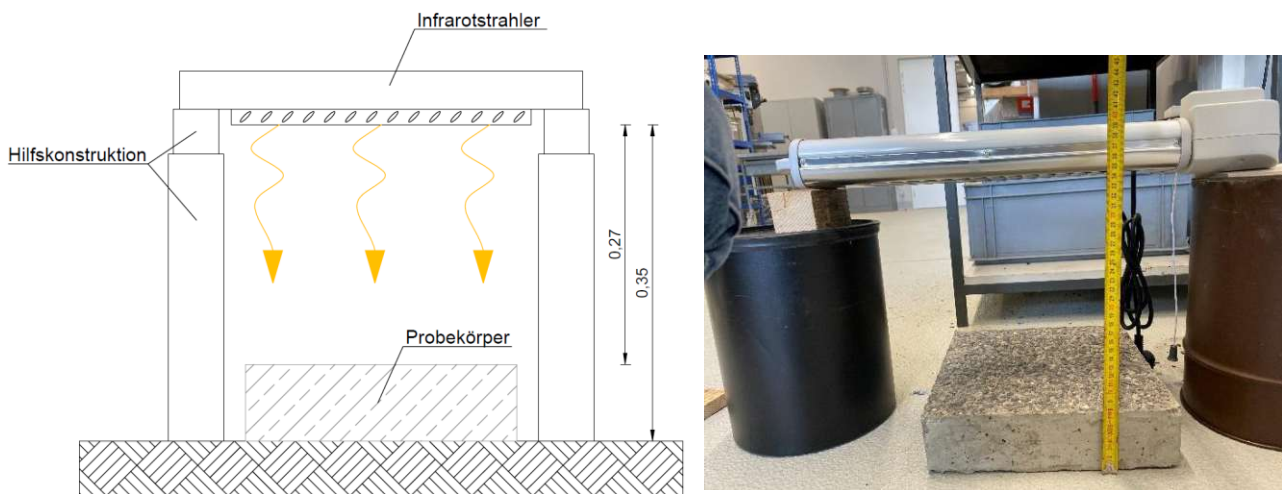


Abb. 50: Versuchsaufbau – Bestrahlung des fugenlosen Probekörpers

- Strahler Nr. 1 (Einhell QH 1800): Der erste Infrarotstrahler besteht aus 3 Quarzheizstäben, welche 3 verschiedenen Leistungsstufen (600/1200/1800 W) ermöglichen [18]. Der Versuchsbeginn wurde mit der geringsten Leistungsstufe durchgeführt und mit der zweiten Stufe aufgrund von Komplikationen beendet. Nach einer Bestrahlungszeit von 10 Minuten erreichte der Probekörper eine Oberflächentemperatur von ungefähr 40 °C bei der ersten Leistungsstufe (600 W). Mit der Leistungsstufe 2 (1200 W) und einer 10-minütigen Bestrahlungszeit konnte eine um 5 °C höhere Oberflächentemperatur erreicht werden als mit der

Leistungsstufe 1. Bei der dritten Leistungsstufe (1800 W) kam es nach ungefähr 3 Minuten zu einer leichten Rauchentwicklung im Gehäuse des Heizstrahlers, weshalb der Versuch beendet werden musste (siehe Tabelle 2). Folglich wurde dieser Infrarotstrahler nicht weiter in Betracht gezogen, da die gewünschte Oberflächentemperatur von 50 °C mit diesem Modell nicht erreicht werden konnte.

Tabelle 2: Variantenstudie - Infrarotstrahler Einhell QH 1800

Einhell QH 1800			
	Bestrahlung	erreichte Oberflächentemperatur	Komplikation
Stufe 1	10,00 min	ca. 40,00 °C	Nein
Stufe 2	10,00 min	ca. 45,00 °C	Nein
Stufe 3	-	-	Rauchentwicklung

- Strahler Nr. 2 (Masterheater QH-191): Der Masterheater besitzt einen Drehregler, mit dem eine Leistung von bis zu 2500 W erreicht werden kann [19]. Die Bestrahlung mit der geringsten Stufe wärmte die Oberfläche des Probekörper nach 10 Minuten auf eine Temperatur von 40 °C auf. Bei mittlerer Stufe erreichte die Oberflächentemperatur ungefähr 60 °C. Ein weiterer Versuch bei höchster Stufe erübrigte sich, da die gewünschte Temperatur bereits erreicht wurde (siehe Tabelle 3). Gut zu erkennen ist, dass bei richtiger Positionierung eine gleichmäßige Wärmeverteilung möglich ist (siehe Abb. 51). Somit sind die beiden Anforderungen aus Kapitel 5.4.1 erfüllt und eine weitere Verwendung dieses Heizstrahlers für die Versuche ist legitim.

Tabelle 3: Variantenstudie - Infrarotstrahler Master Heater QH-191

Master Heater QH-191			
	Bestrahlung	erreichte Oberflächentemperatur	Komplikation
geringste Stufe	10,00 min	ca. 40,00 °C	Nein
mittlere Stufe	10,00 min	ca. 60,00 °C	Nein
höchste Stufe	-	-	-

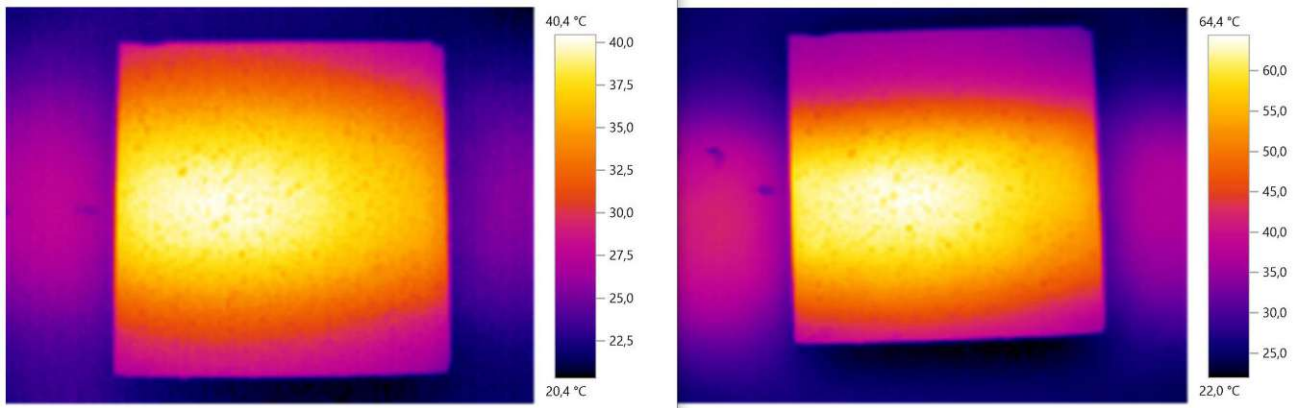


Abb. 51: Wärmeverteilung Master Heater - geringste Stufe links & höchste Stufe rechts

- Strahler Nr. 3 (Infrarotstrahler Yizhi): Dieser Heizstrahler entspricht einem gewöhnlichen Infrarotstrahler bestehend aus einer einzigen Infrarotlampe als Wärmequelle. Das Produkt besitzt nur eine Leistungsstufe, mit der eine Leistung von 100 W erreicht werden kann [20]. Nach 10 Minuten Bestrahlungszeit erwärmte sich die Oberfläche des Probekörpers auf eine Temperatur von ungefähr 35 °C. Die Temperaturverteilung war zwar gleichmäßig, wurde jedoch mit diesem Strahler nicht weitergearbeitet, da die festgelegte Temperatur von mindestens 50 °C nicht erreicht wurde.

Der Heizstrahler Nr. 2 (Masterheater) wurde für die weiteren Versuche eingesetzt. Die beiden anderen Strahler wurden aussortiert, da diese die festgelegten Anforderungen nicht ausreichend erfüllen konnten. Mit dem Masterheater erfolgte die weitere Versuchsdurchführung. Die Probekörper wurden hierfür weiterhin mit drei unterschiedlichen Stufen zu je 10 Minuten bestrahlt. Nach jedem Einzelversuch wurde den Probekörpern reichlich Zeit gegeben, damit diese wieder auf Normaltemperatur abkühlen konnten.

5.4.2 Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung

- Temperaturstufe 1: Die Abbildungen 52 und 53 zeigen den Wärmeverlauf und das Temperaturprofil P1. Die bituminöse Fuge weist die Höchsttemperatur mit über 45 °C auf. Im Vergleich dazu weist die benachbarte Betonoberfläche eine um ca. 5 °C geringere Temperatur auf. Der Temperaturverlauf (siehe Abb. 53) ähnelt keinem der Verläufe aus den Versuchen der Klimakammer.

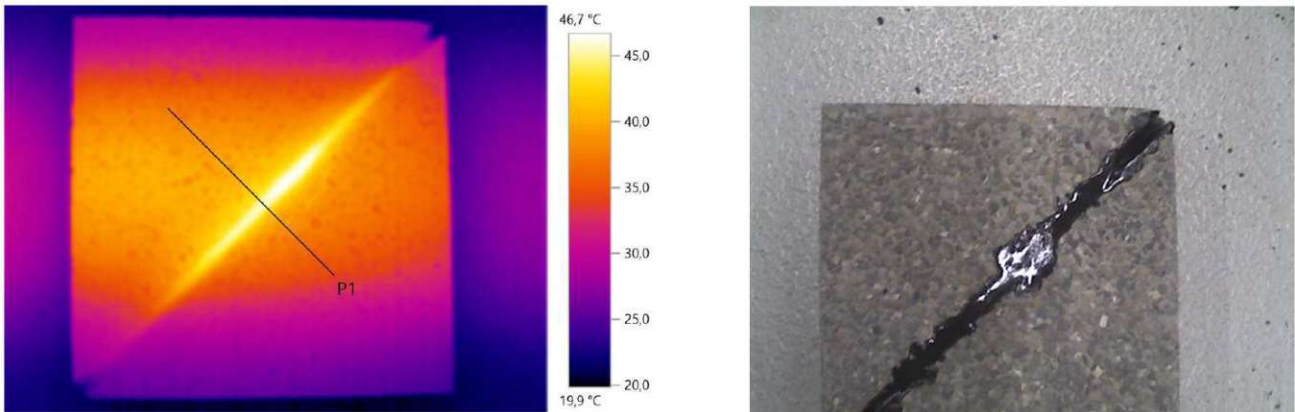


Abb. 52: Wärmeverlauf & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 1

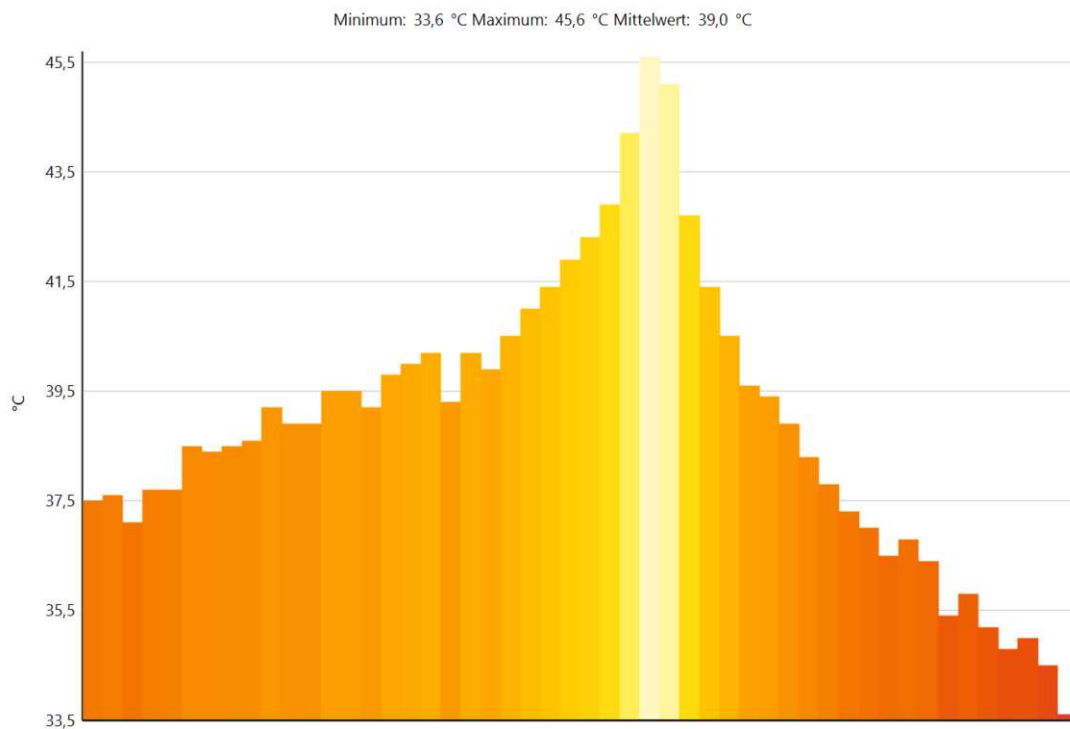


Abb. 53: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 1

- Temperaturstufe 2: Der wesentliche Unterschied zwischen der Temperaturstufe 1 und der Temperaturstufe 2 besteht darin, dass die Waschbetonoberfläche im Bereich des gelegten Temperaturprofils P1 eine Temperatur von rund 60 °C erreicht hat (siehe Abb. 52 & Abb. 53 und Abb. 54 & Abb. 55). Betonstraßen erreichen an heißen Sommertagen genau diese Temperaturen [17]. Die Temperaturdifferenz zwischen bituminöser Fuge und Waschbetonoberfläche hat sich bereits um einiges vergrößert und liegt nun im zweistelligen Bereich (siehe Abb. 55).

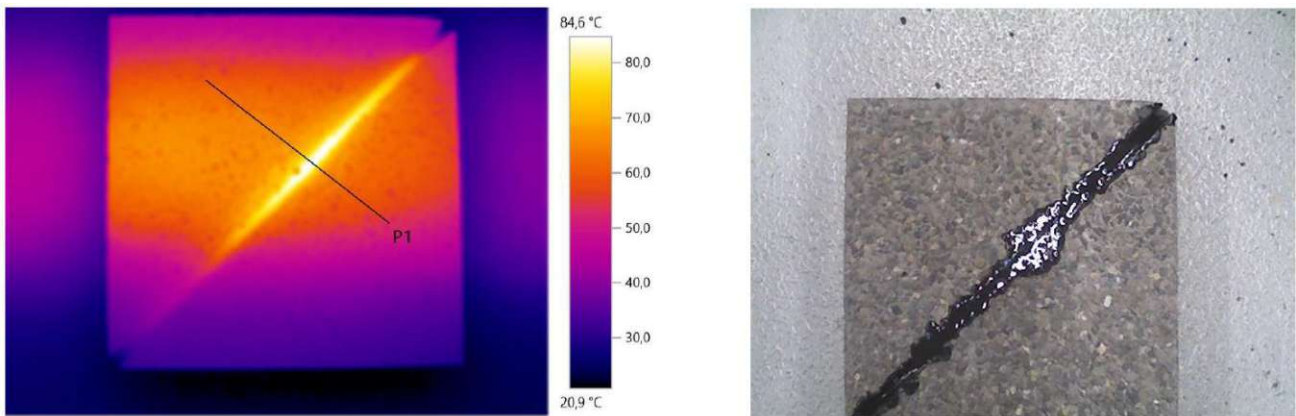


Abb. 54: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 2

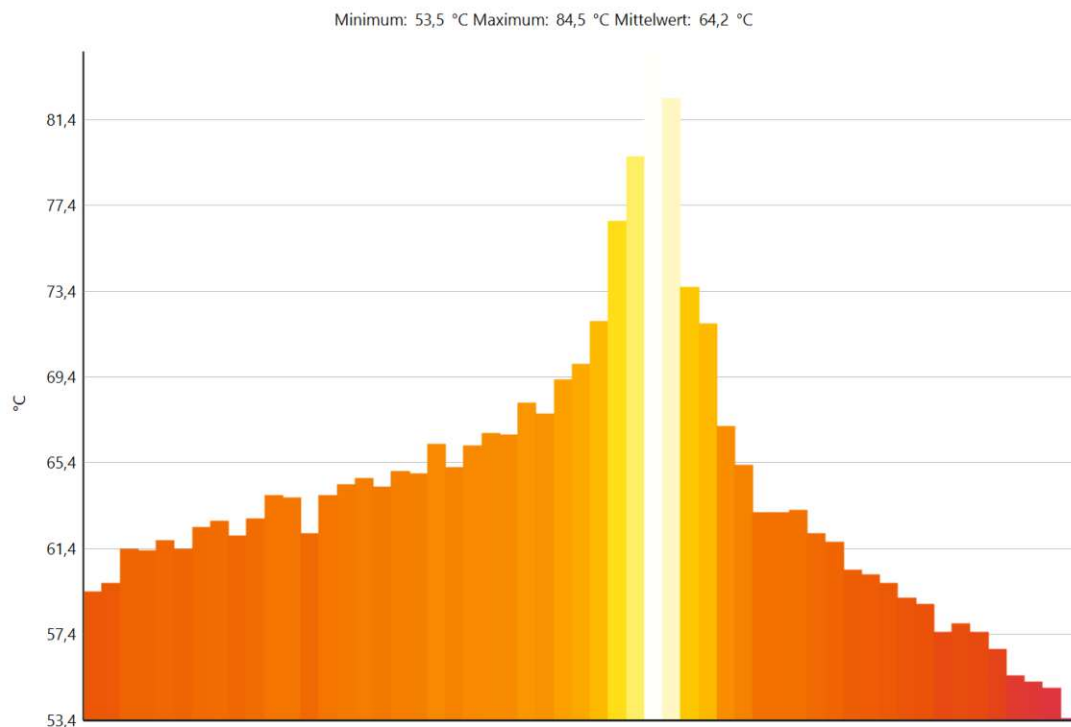


Abb. 55: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 2

- Temperaturprofil 3: Aus Gründen der Vollständigkeit werden auch die Resultate der Temperaturstufe 3 aufgezeigt. Die Betonoberfläche weist hier eine Temperatur von etwa 84 °C auf. Tatsächlich wird diese Temperatur in der Realität kaum erreicht und ist daher nicht relevant. In der bituminösen Fugenfüllung herrscht eine Temperatur von über 100 °C (siehe Abb. 56 & Abb. 57).

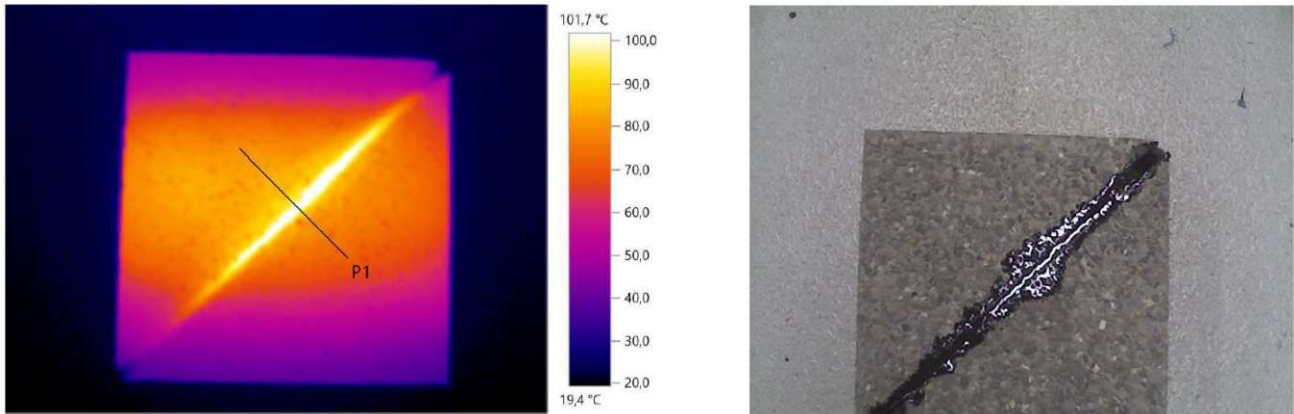


Abb. 56: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 3

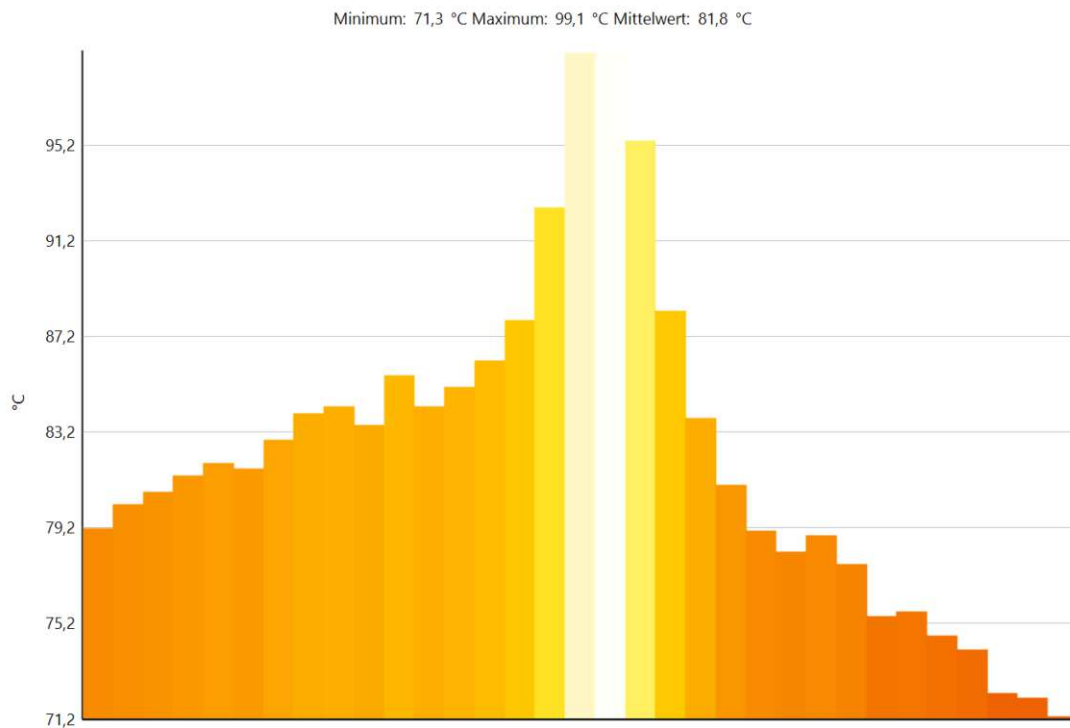


Abb. 57: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 3

5.4.3 Probekörper mit halber Fugenfüllung

Bei diesem Probekörper wurde die Fuge nur bis zur halben Fugenhöhe gefüllt. Damit sollen schadhafte Fugen nachgeahmt werden, die im Laufe der Zeit durch Beschädigungen an Oberflächensubstanz verloren haben.

- Temperaturstufe 1: Die Abbildungen 58 und 59 zeigen die Wärmebildaufnahme, sowie das Temperaturprofil P1 auf. Der Verlauf des Temperaturprofils der halben Fugenfüllung (siehe Abb. 59) erinnert stark an jenen des Temperaturprofils, während der Station 2 im Versuch der Klimakammer (siehe Abb. 41). Innerhalb der Fugenfüllung kommt es zu einem Temperatursturz von wenigen Grad.

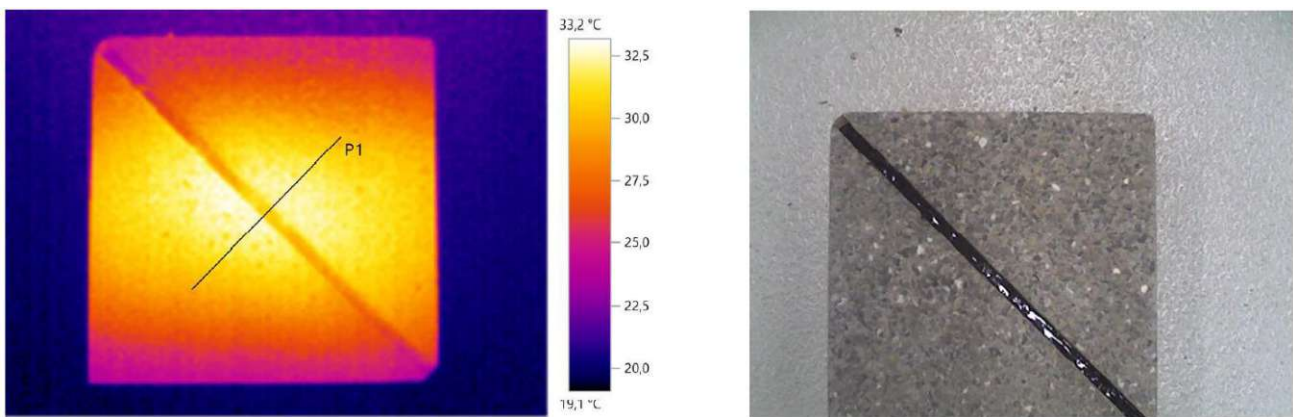


Abb. 58: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 1

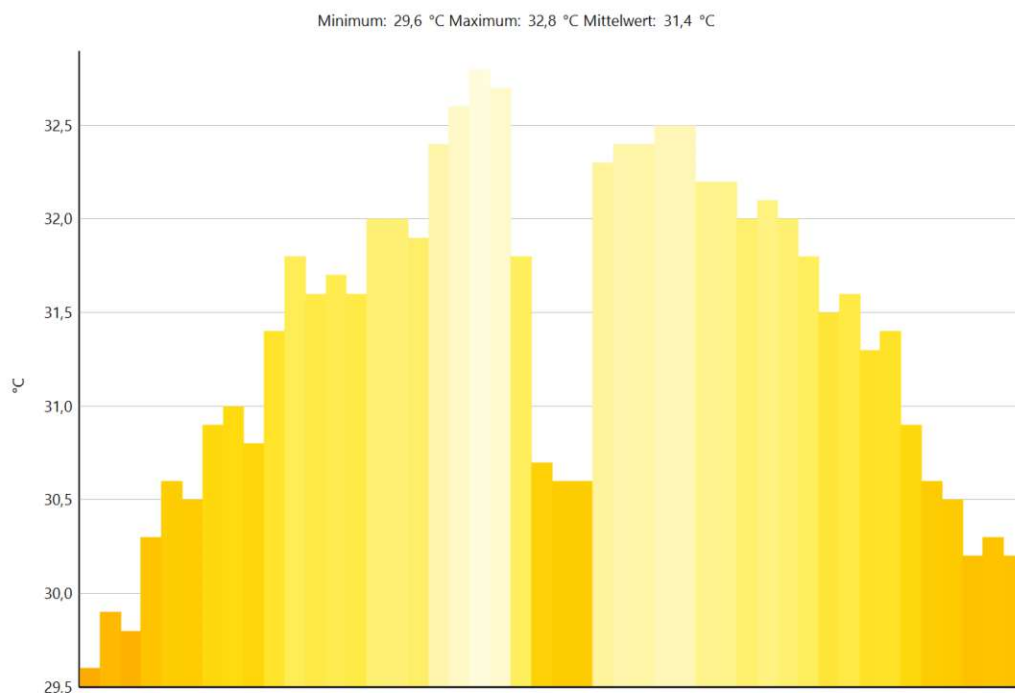


Abb. 59: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 1

- Temperaturstufe 2: Die Oberflächentemperaturen des Betons betragen hier zwischen 50 °C bis 60 °C und stellen daher realitätsnahe Straßentemperaturen dar. Der Temperatursturz zwischen Fugenfüllung und Betonoberfläche ist weiterhin vorhanden und hat sich etwas vergrößert (siehe Abb. 60 & Abb. 61).

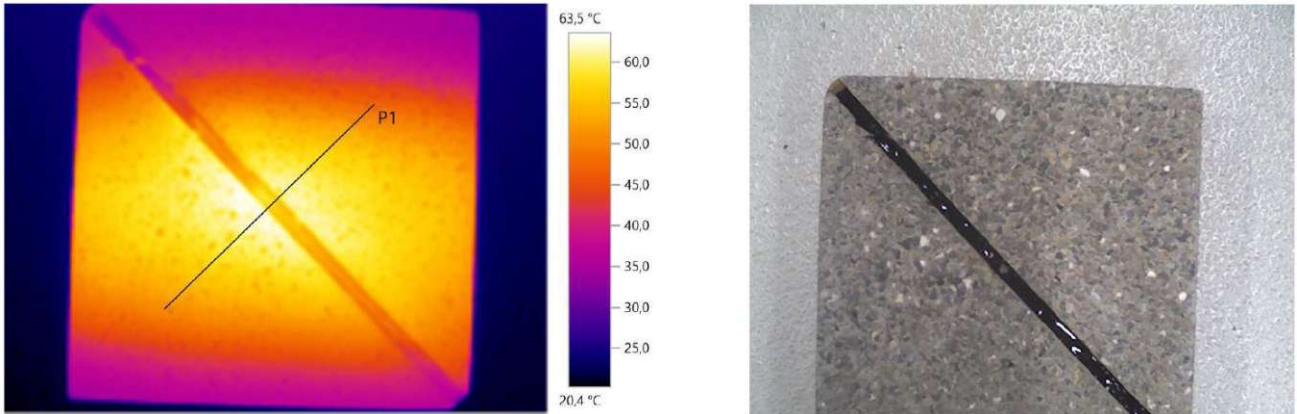


Abb. 60: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 2

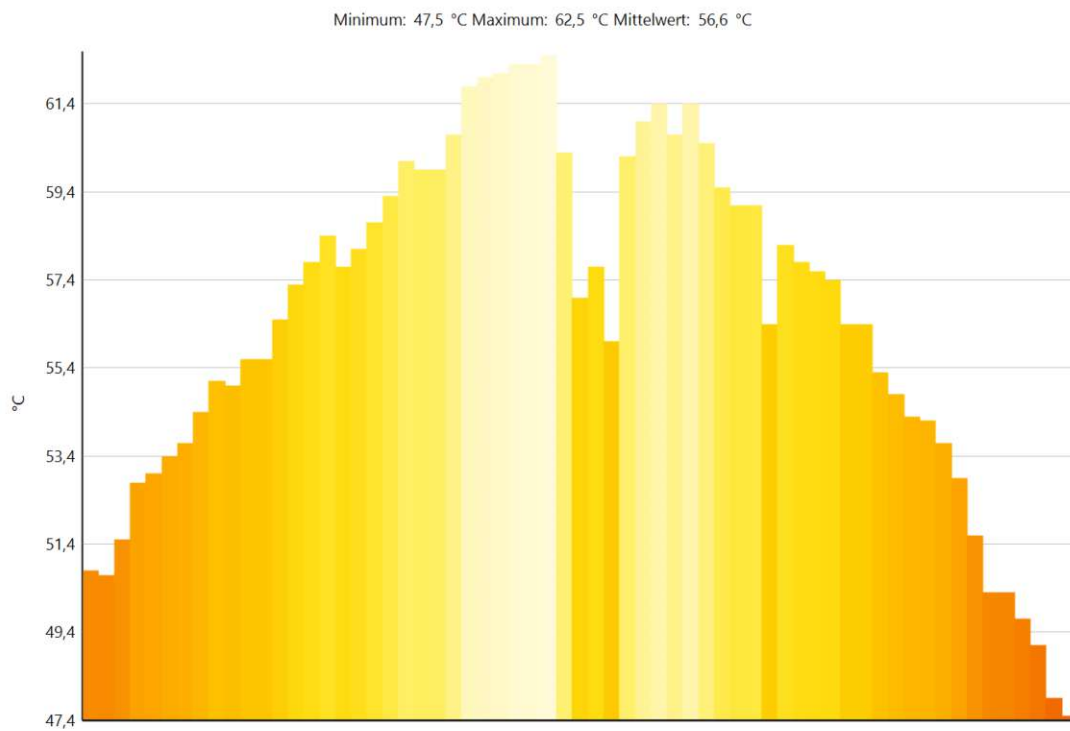


Abb. 61: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 2

- Temperaturprofil 3: Aus Gründen der Vollständigkeit werden auch hier die Resultate der Temperaturstufe 3 aufgezeigt. Die Betonoberfläche weist hier eine Temperatur von über 87 °C auf. Tatsächlich wird diese Temperatur in der Realität kaum erreicht und ist daher nicht relevant. In der bituminösen Fugenfüllung kommt es zu einem Temperatursturz (siehe Abb. 62 & Abb. 63).

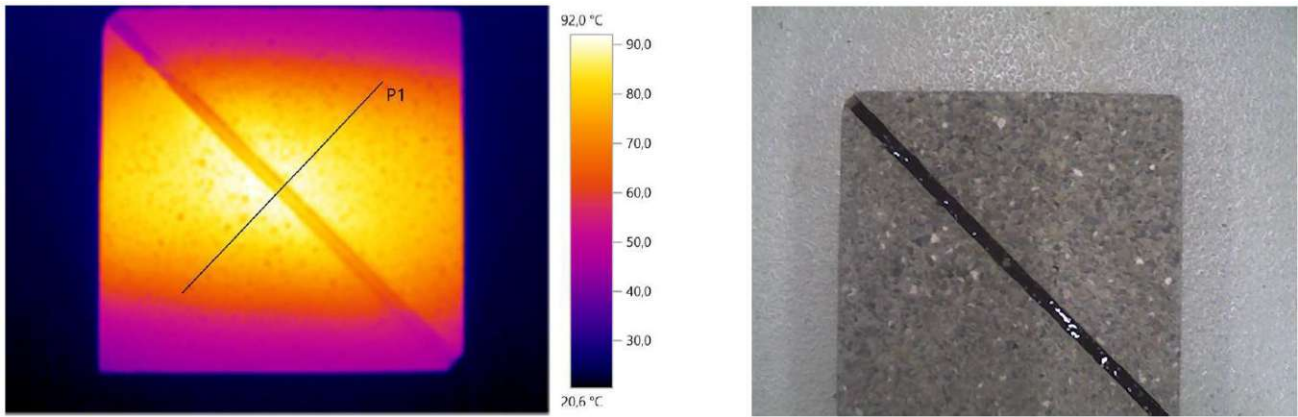


Abb. 62: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 3

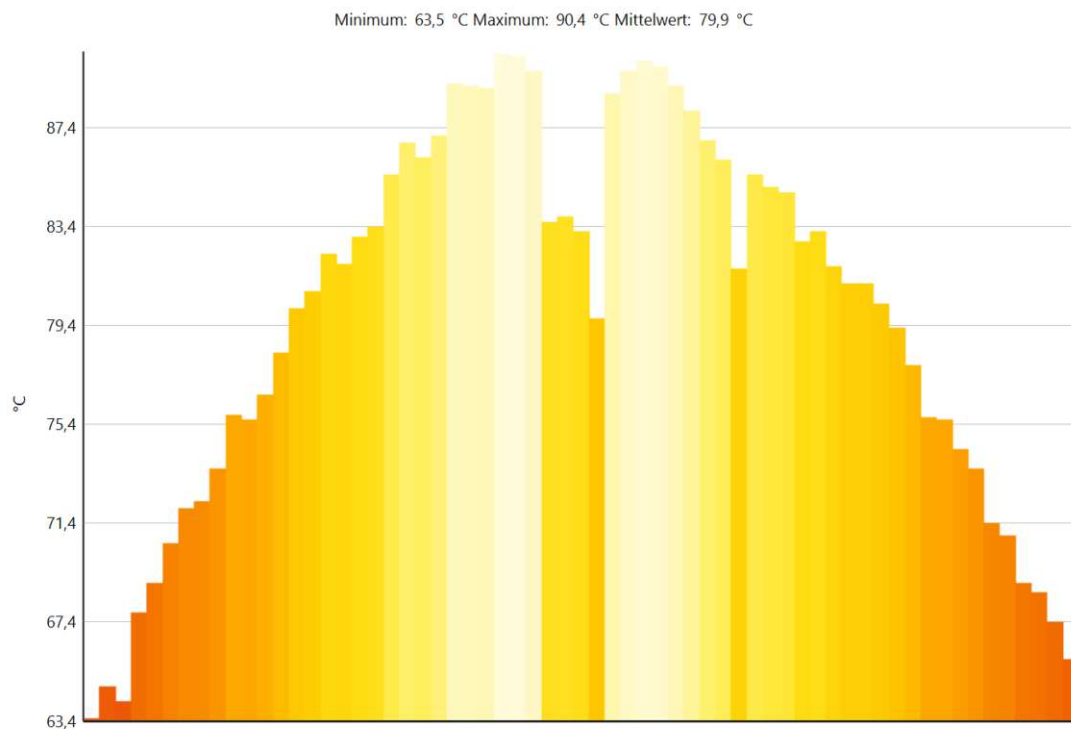


Abb. 63: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 3

5.5 Klimakammer und Infrarotstrahler

Um realitätsnähere Forschungsergebnisse zu erhalten, wurden die Probekörper durch beide Untersuchungsmethoden belastet. Alle drei Probekörper wurden zeitgleich in die Klimakammer gestellt. Sie wurden vier verschiedenen Temperaturen (-20 °C, 0 °C, 20 °C & 40 °C) für je 24 Stunden (insgesamt 4 Tage) ausgesetzt. Nach jeder einzelnen Temperaturstufe der Klimakammer wurde jeweils ein Probekörper herausgenommen und mit dem Infrarotstrahler bestrahlt. Ebenso wurden beim Infrarotstrahler drei verschiedene Temperaturstufen eingesetzt. Der Versuchsaufbau des Infrarotstrahlers ist in Abbildung 50 zu sehen. Die Probekörper wurden jeweils fünf Minuten lang mit den unterschiedlichen Temperaturstufen bestrahlt.

5.5.1 Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer -20 °C

Die Abbildung 64 zeigt den Wärmeverlauf des Probekörpers direkt nach dem Herausnehmen aus der Klimakammer. Die Tiefsttemperatur betrug in diesem Moment -18,4 °C. Das Temperaturprofil, welches orthogonal zur Fuge gelegt wurde, ist in der Abbildung 65 ersichtlich. Es ist gut zu erkennen, dass sich die Oberflächentemperatur der Fugenfüllung, von der des Betons wesentlich unterscheidet.

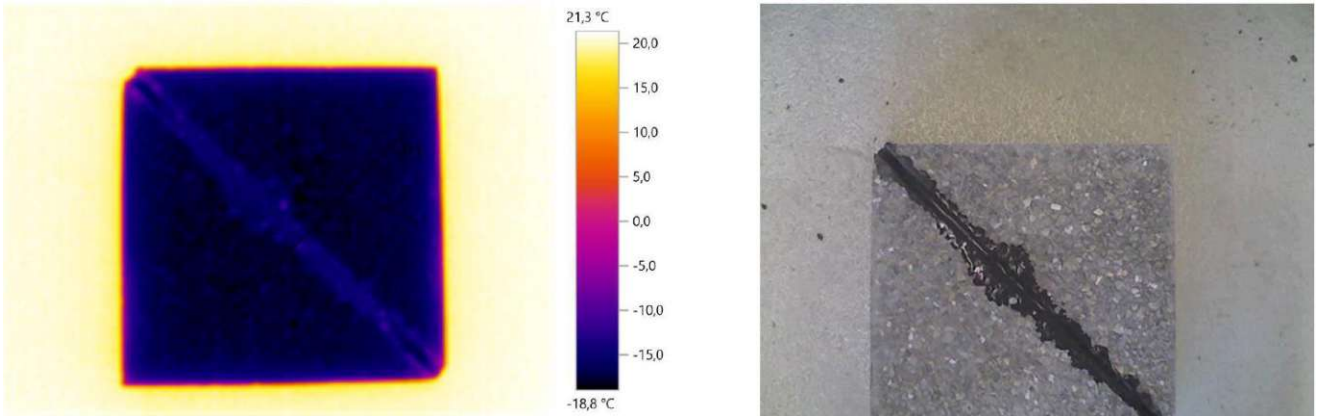


Abb. 64: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C)

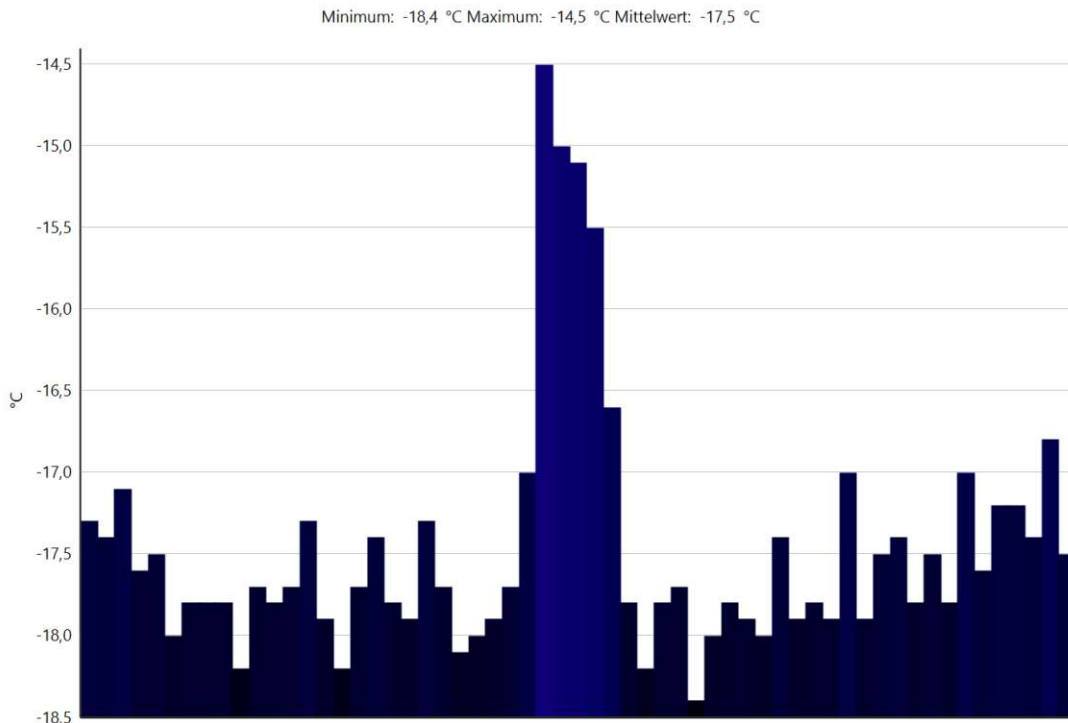


Abb. 65: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C)

- Temperaturstufe 1 – Infrarotstrahler: Die Fugentemperatur betrug nach fünf Minuten Bestrahlungszeit 22,3 °C. Die Betonoberflächentemperatur im Bereich der Fuge ist wesentlich geringer. Die Mindesttemperatur entlang des Temperaturprofils beträgt 4,4 °C und ist auf die Betonoberfläche zurückzuführen (siehe Abb. 66 & Abb. 67).

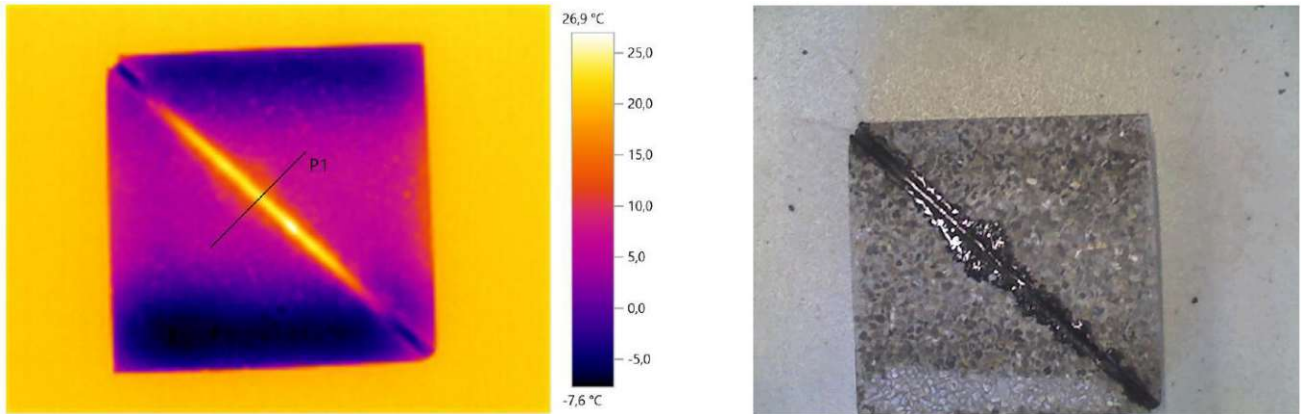


Abb. 66: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (-20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 1)

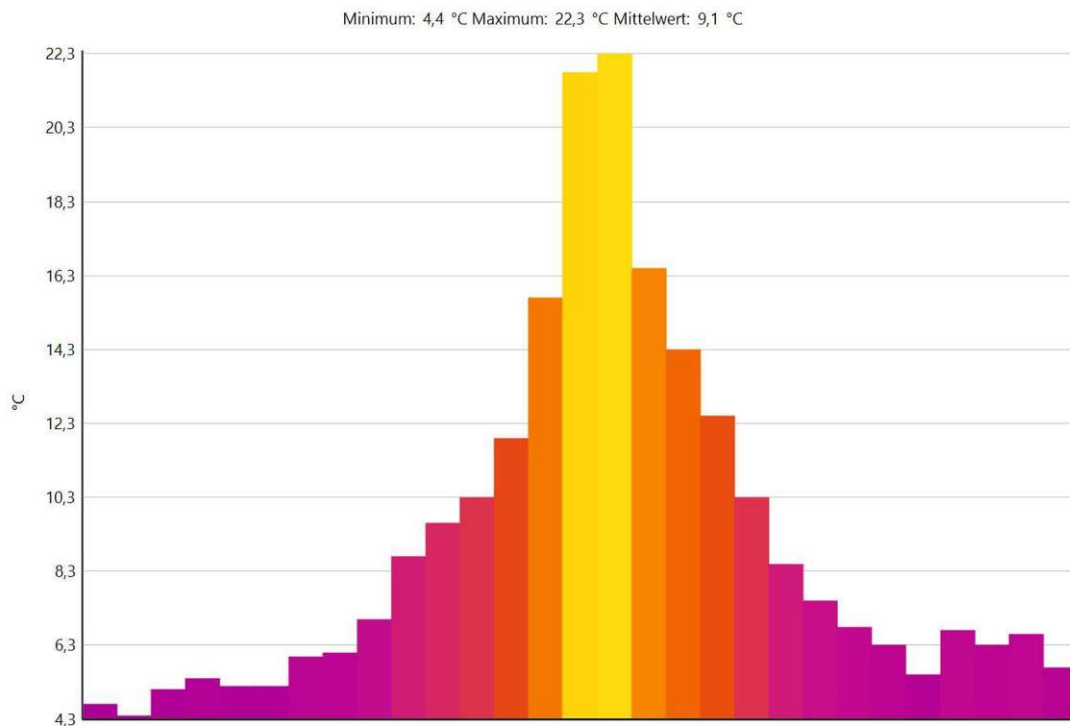


Abb. 67: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (-20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 1)

- Temperaturstufe 2 – Infrarotstrahler: Die Fugentemperatur betrug nach fünf Minuten Bestrahlungszeit mehr als 61,9 °C. Die Betonoberflächentemperatur im Bereich der Fuge weist eine um die Hälfte geringere Temperatur auf (siehe Abb. 68 & Abb. 69).

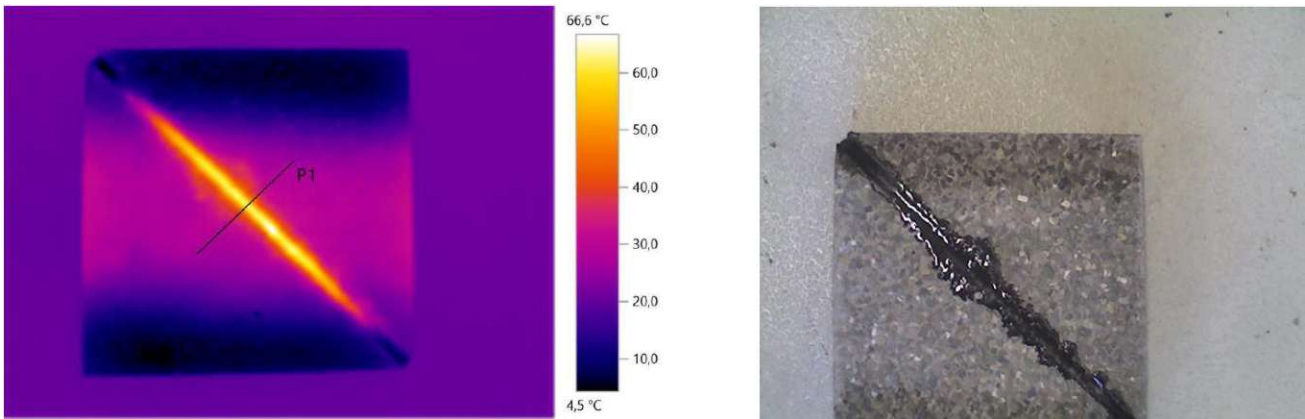


Abb. 68: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

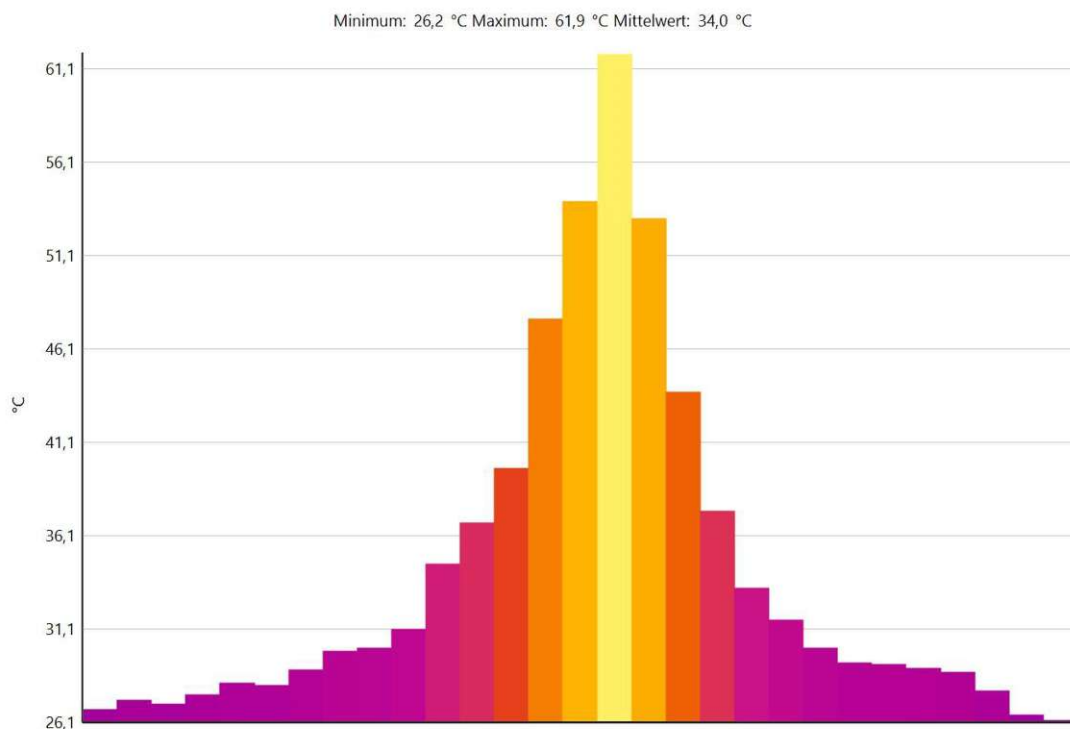


Abb. 69: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

- Temperaturstufe 3 – Infrarotstrahler: Die Verläufe werden nicht aufgezeigt, da sie dieselben Ergebnisse aufzeigen wie die beiden vorherigen Temperaturstufen.

5.5.2 Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer -20 °C

Die Abbildung 70 zeigt den Wärmeverlauf des Probekörpers direkt nach dem Herausnehmen aus der Klimakammer. Die Tiefsttemperatur betrug in diesem Moment $-19,7\text{ °C}$. Das Temperaturprofil, welches orthogonal zur Fuge gelegt wurde, ist in der Abbildung 71 ersichtlich. Es ist gut zu erkennen, dass sich die Oberflächentemperatur der Fugenfüllung, von der des Betons wesentlich unterscheidet. Sie ist deutlich kälter als die Temperatur des Betons (siehe Temperatursturz).

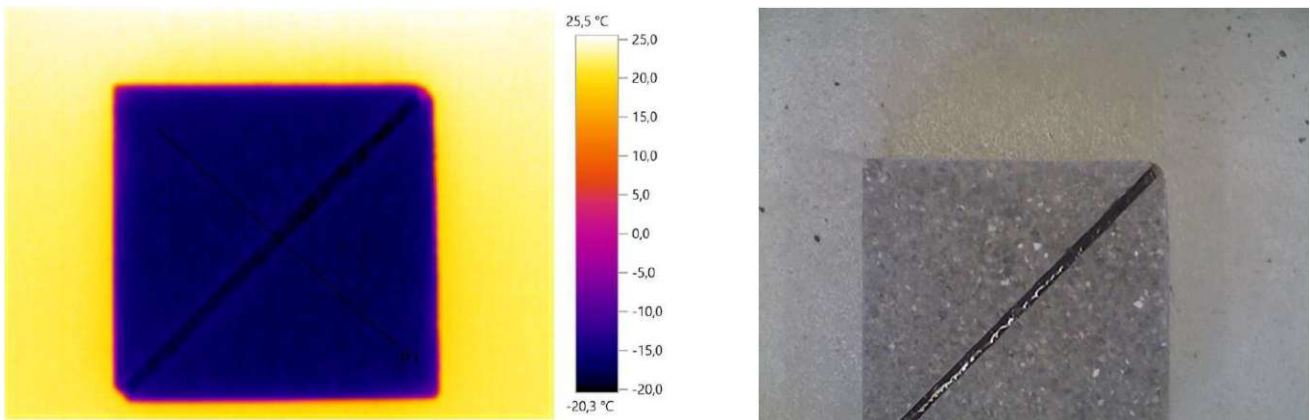


Abb. 70: Wärmeverlauf & Echtaufnahme des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (-20°C)

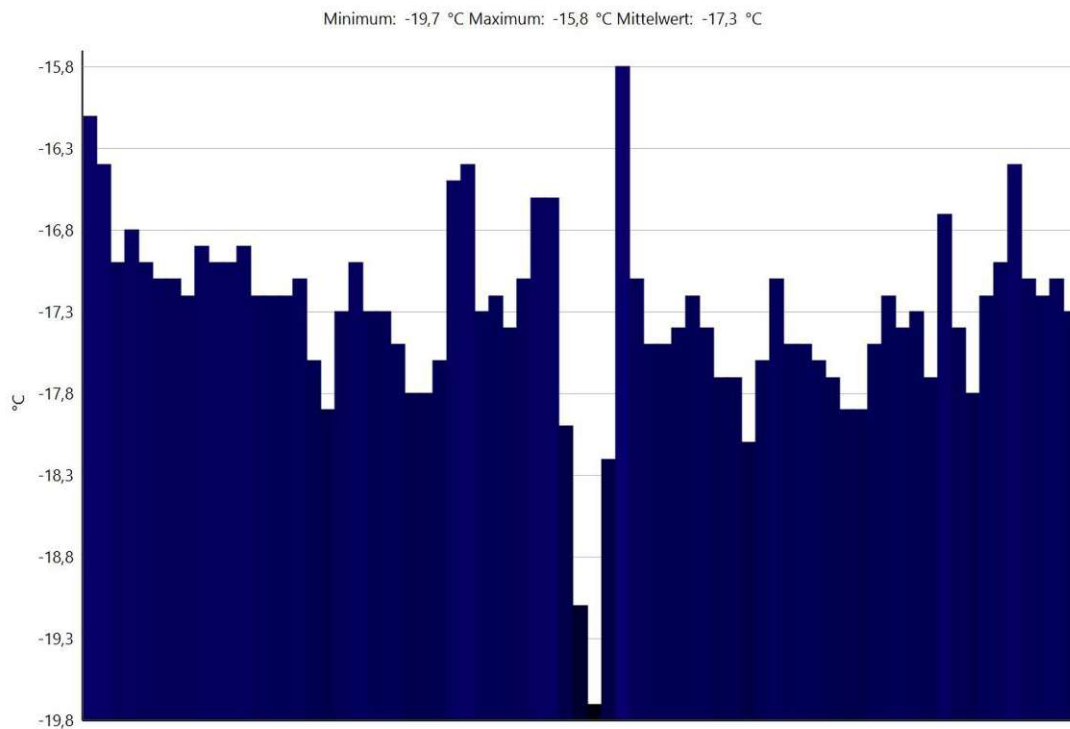


Abb. 71: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (-20°C)

Alle drei Temperaturstufen weisen ähnliche Verläufe auf, daher werden nur die Ergebnisse der Temperaturstufe 2 aufgezeigt.

- Temperaturstufe 2 – Infrarotstrahler: Die Fugentemperatur betrug nach fünf Minuten Bestrahlungszeit ungefähr 14,7 °C. Die Betonoberflächentemperatur im Bereich der Fuge ist wesentlich höher. Die Höchsttemperatur entlang des Temperaturprofils liegt bei 27,0 °C und ist auf die Betonoberfläche zurückzuführen (siehe Abb. 72 & Abb. 73).

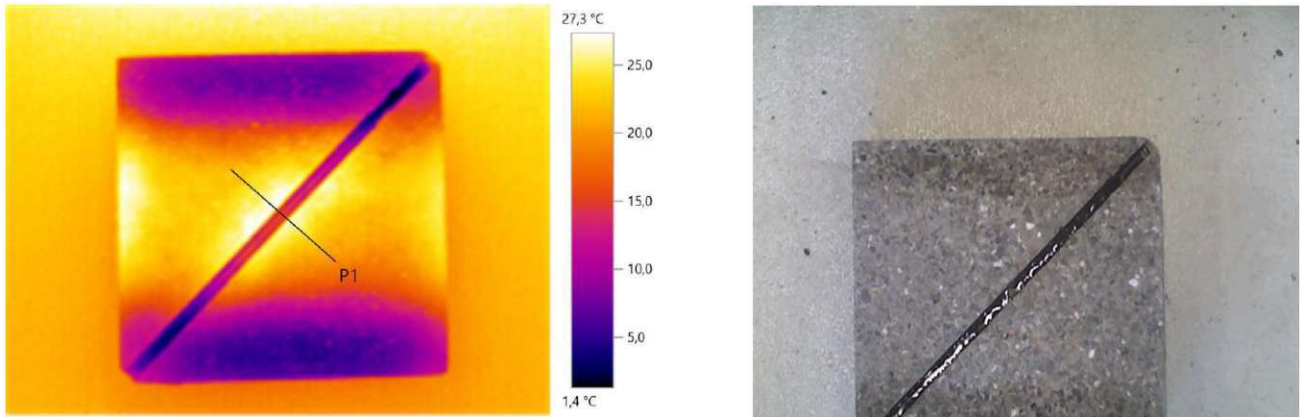


Abb. 72: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

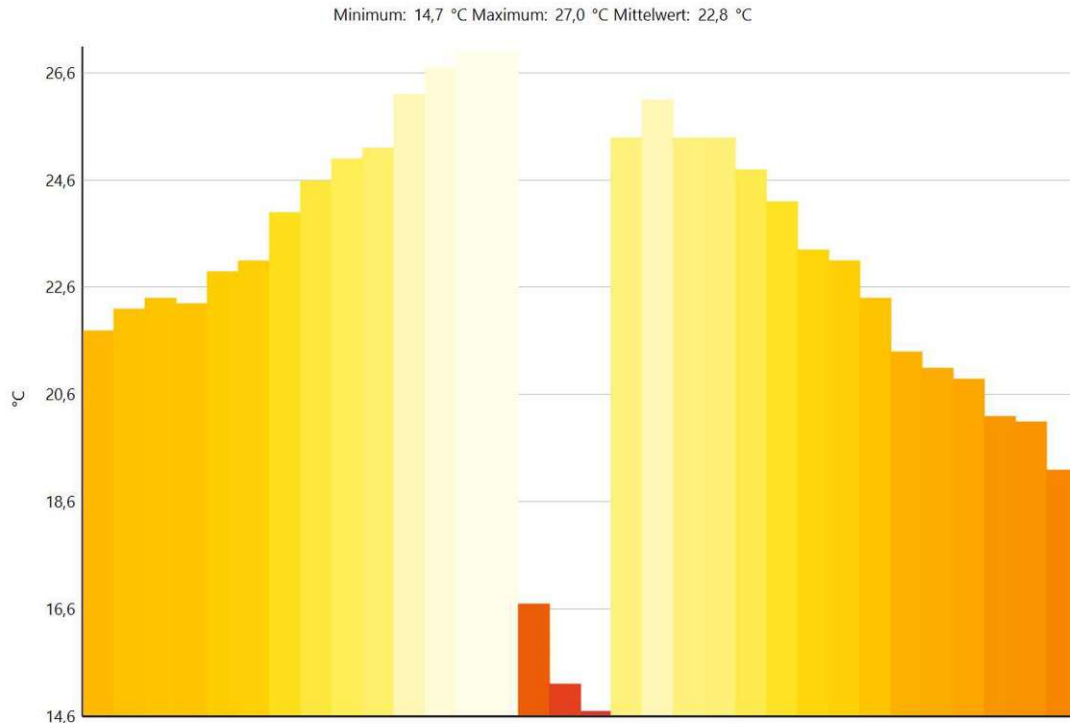


Abb. 73: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

5.5.3 Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 0 °C

Die Abbildung 74 zeigt den Wärmeverlauf des Probekörpers direkt nach dem Herausnehmen aus der Klimakammer. Die Tiefsttemperatur betrug in diesem Moment 0,3 °C. Das Temperaturprofil, welches orthogonal zur Fuge gelegt wurde, ist in der Abbildung 75 ersichtlich.

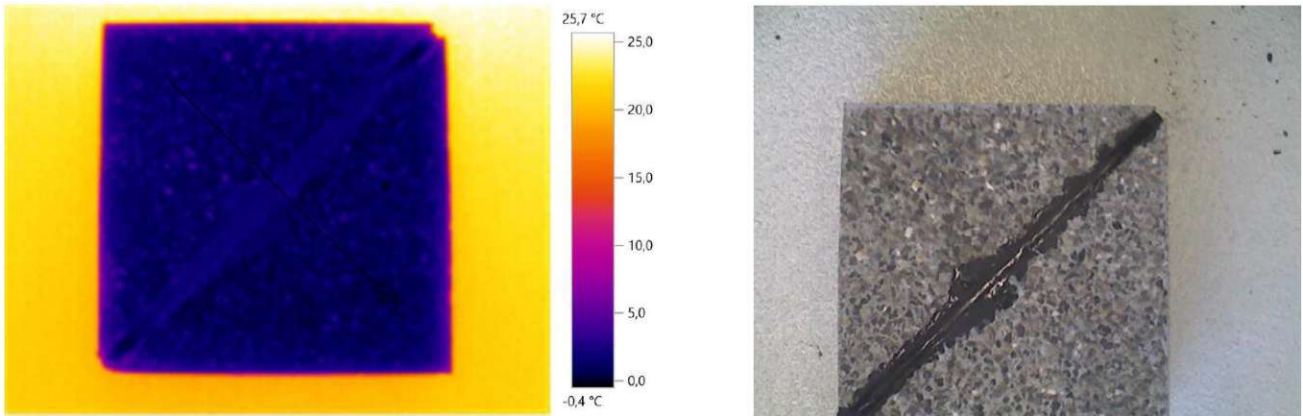


Abb. 74: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C)

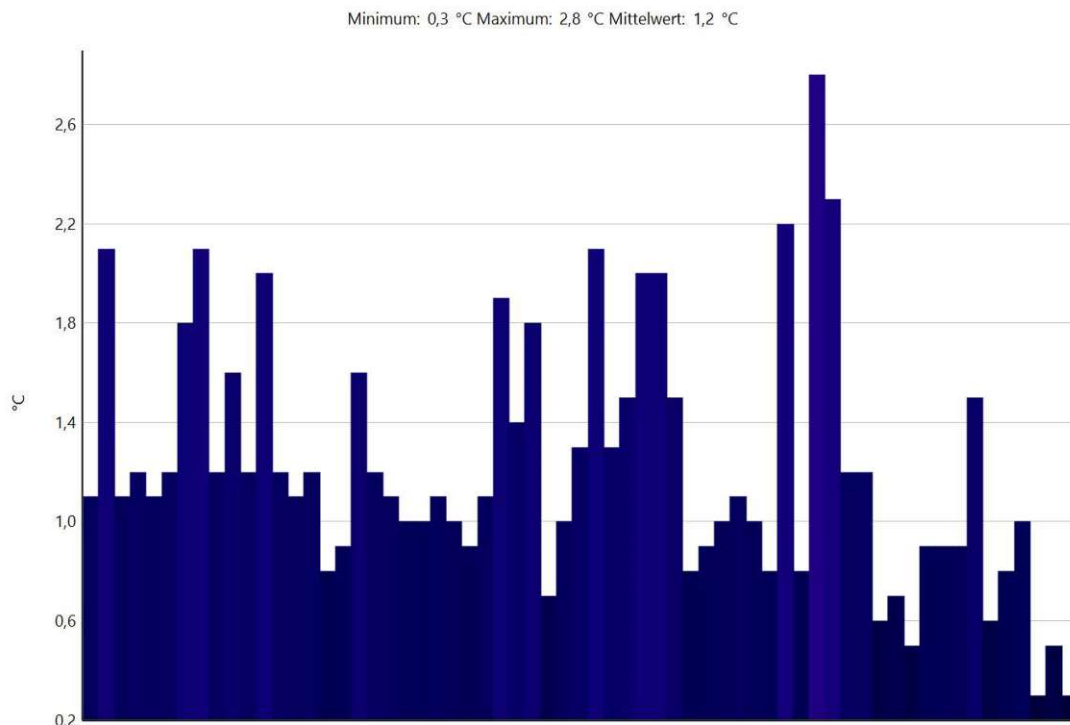


Abb. 75: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C)

Alle drei Temperaturstufen weisen ähnliche Verläufe auf, daher werden nur die Ergebnisse der Temperaturstufe 2 aufgezeigt.

- Temperaturstufe 2 – Infrarotstrahler: Die Fugentemperatur betrug nach fünf Minuten Bestrahlungszeit 59,2 °C. Die Betonoberflächentemperatur im Bereich der Fuge ist wesentlich geringer. Die Mindesttemperatur entlang des Temperaturprofils liegt bei 34,0 °C und ist auf die Betonoberfläche zurückzuführen (siehe Abb. 76 & Abb. 77).

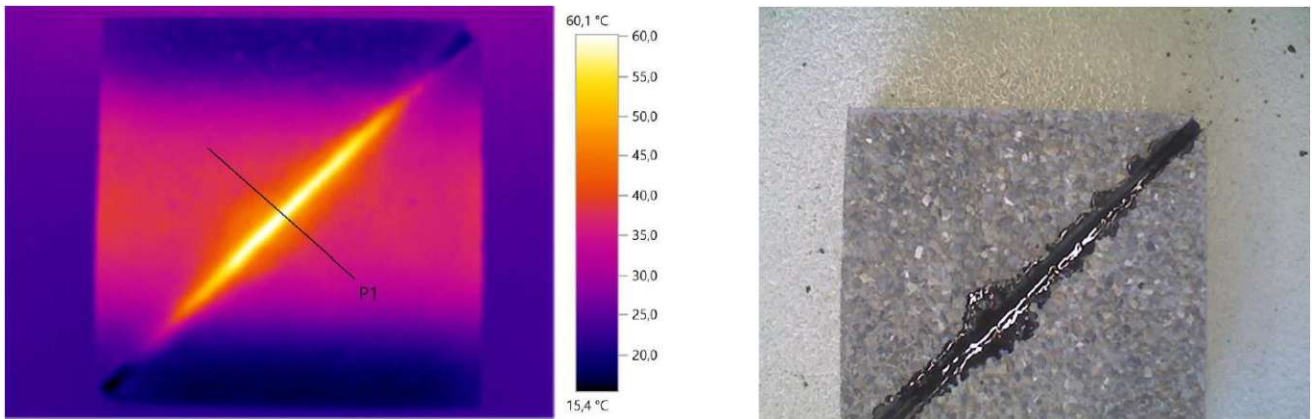


Abb. 76: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

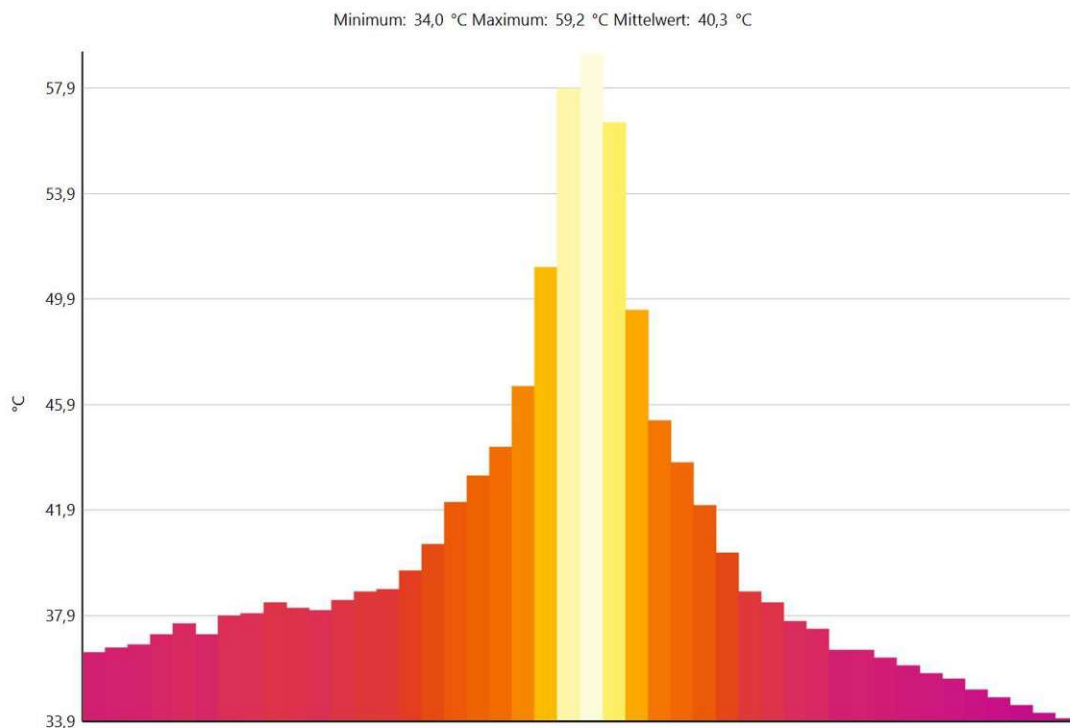


Abb. 77: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

5.5.4 Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 0 °C

Die Abbildung 78 zeigt den Wärmeverlauf des Probekörpers direkt nach dem Herausnehmen aus der Klimakammer. Die Tiefsttemperatur betrug in diesem Moment $-0,3\text{ °C}$. Das Temperaturprofil, welches orthogonal zur Fuge gelegt wurde, ist in der Abbildung 79 ersichtlich. Es ist gut zu erkennen, dass sich die Oberflächentemperatur der Fugenfüllung, von der des Betons um einige Grade unterscheidet. Sie ist deutlich kälter als die Temperatur des Betons (siehe Temperatursturz).

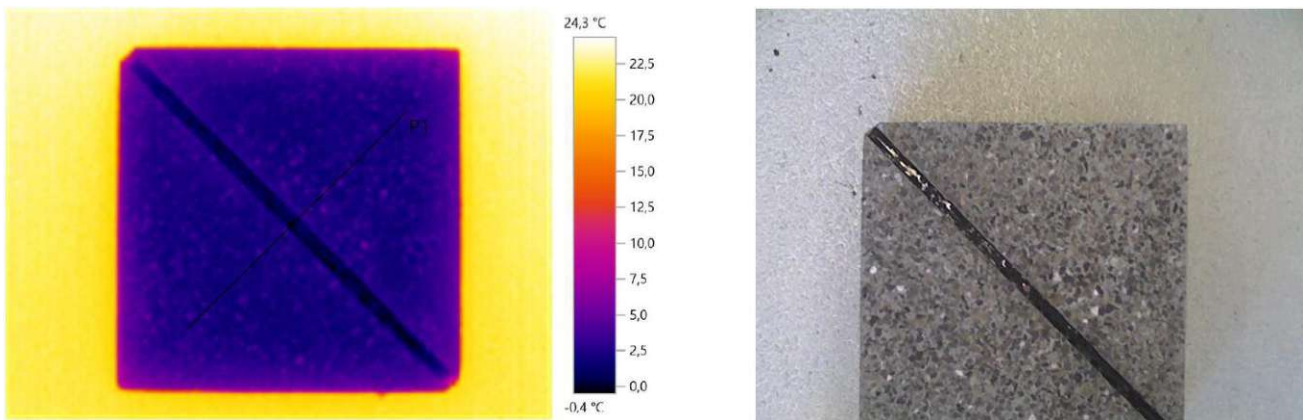


Abb. 78: Wärmeverlauf & Echtaufnahme des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (0 °C)

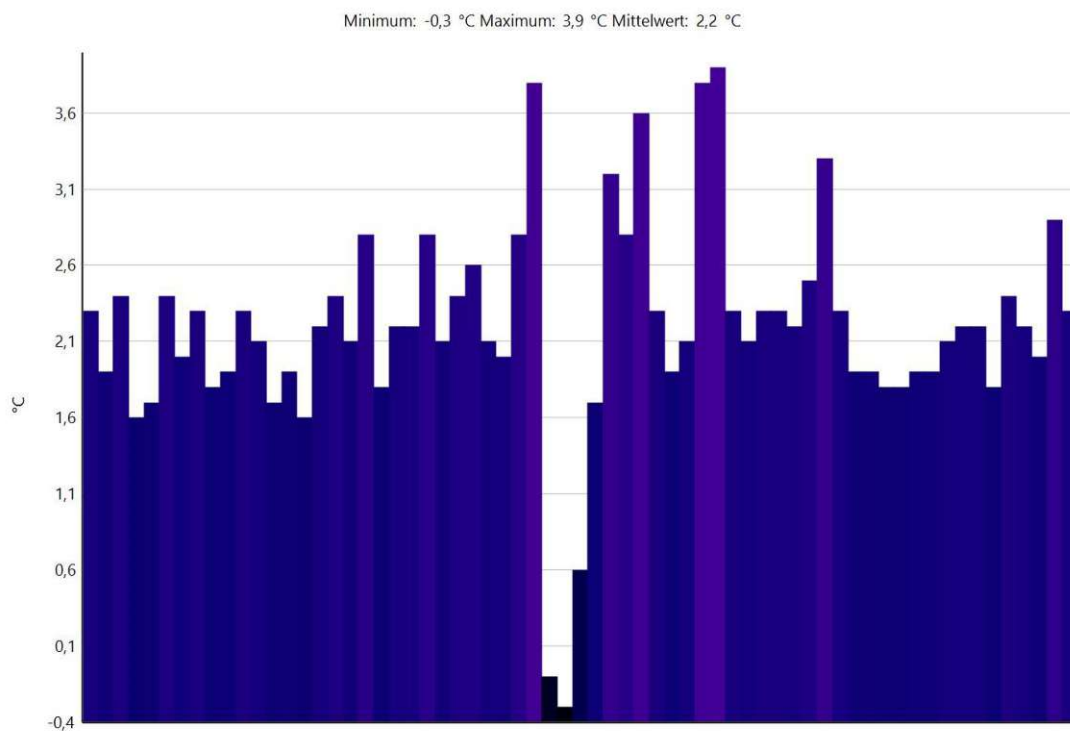


Abb. 79: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (0 °C)

Alle drei Temperaturstufen weisen ähnliche Verläufe auf, daher werden nur die Ergebnisse der Temperaturstufe 2 aufgezeigt.

- Temperaturstufe 2 – Infrarotstrahler: Die Fugentemperatur betrug nach fünf Minuten Bestrahlungszeit ungefähr 32,1 °C. Die Betonoberflächentemperatur im Bereich der Fuge ist wesentlich höher. Die Höchsttemperatur entlang des Temperaturprofils liegt bei über 44,0 °C und ist auf die Betonoberfläche zurückzuführen (siehe Abb. 80 & Abb. 81).

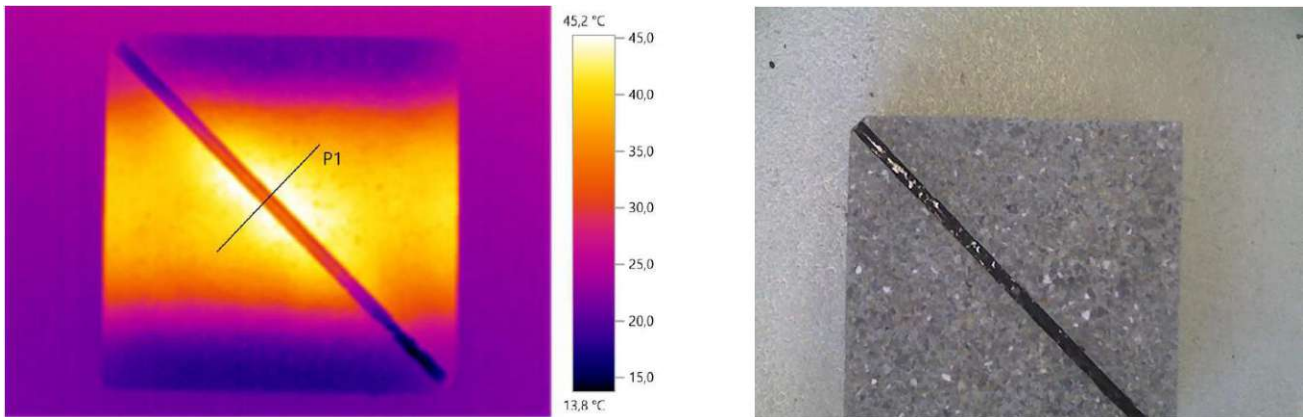


Abb. 80: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

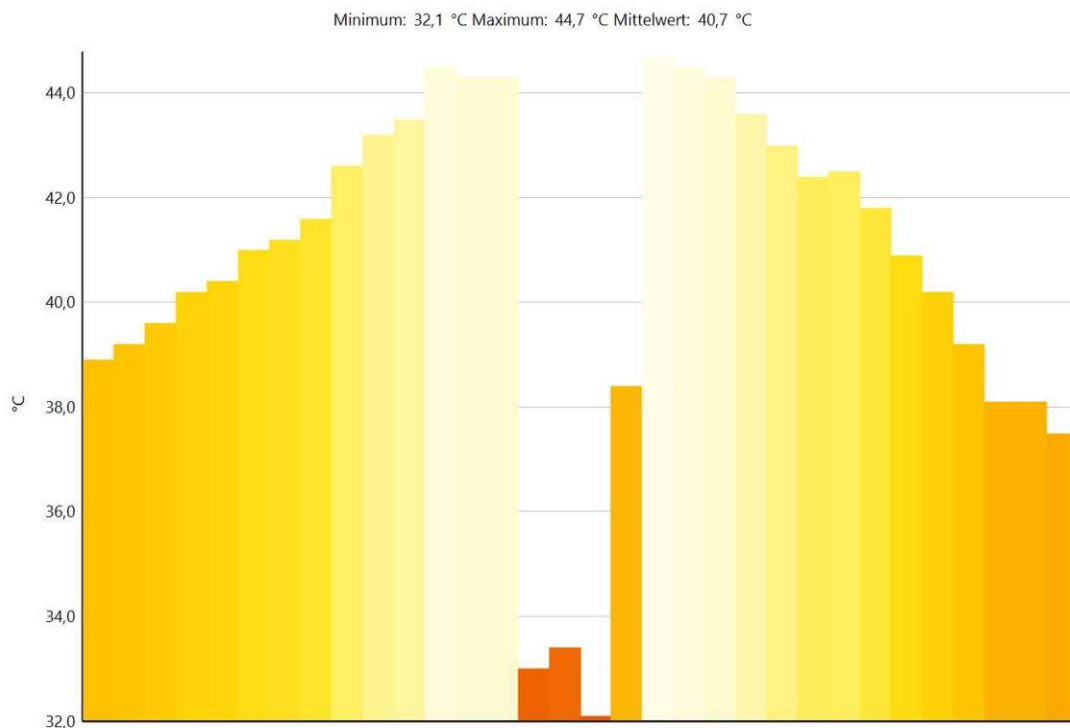


Abb. 81: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

5.5.5 Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 20 °C

Die Abbildung 82 zeigt den Wärmebildverlauf des Probekörpers direkt nach dem Herausnehmen aus der Klimakammer. Die Tiefsttemperatur betrug in diesem Moment 21,9 °C. Das Temperaturprofil, welches orthogonal zur Fuge gelegt wurde, ist in der Abbildung 83 ersichtlich. Der Betonkörper weist einen gleichmäßigen Temperaturverlauf auf.

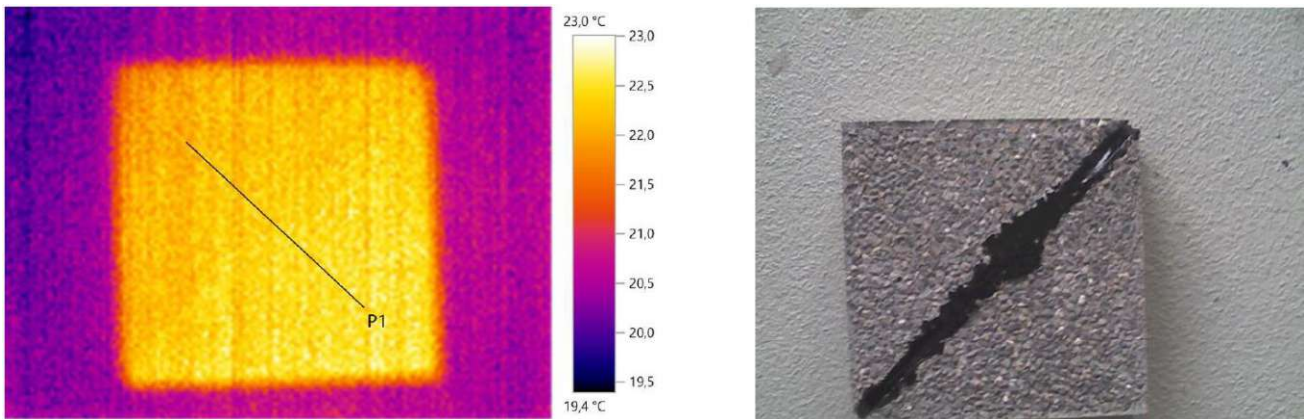


Abb. 82: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C)

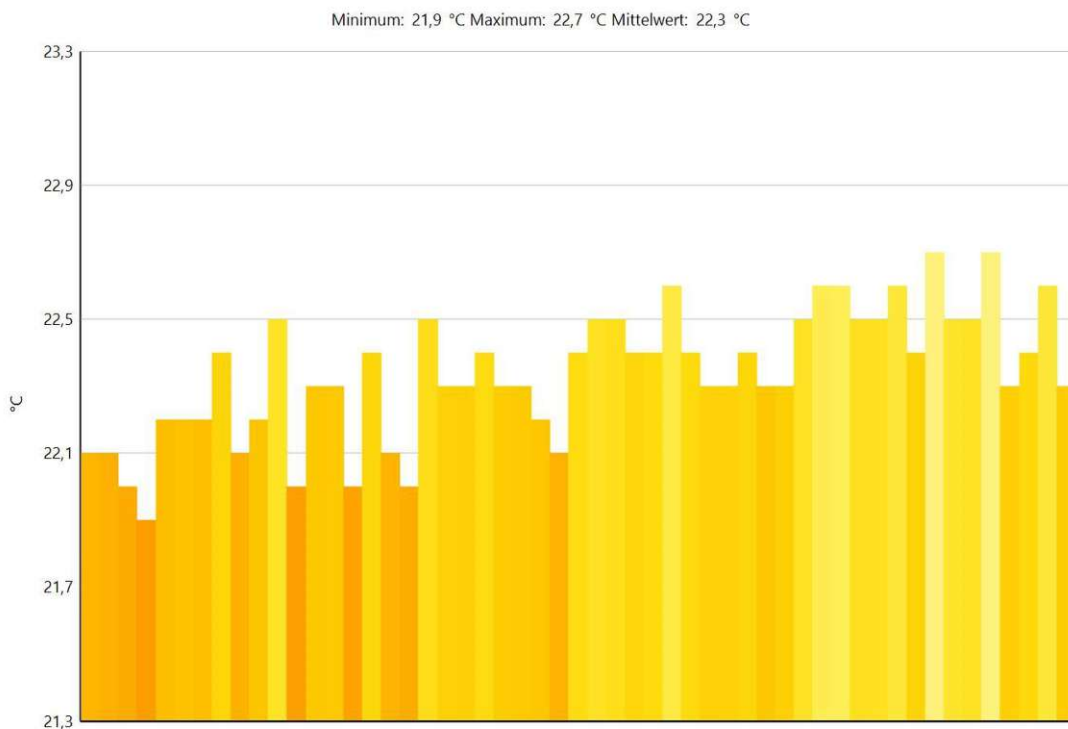


Abb. 83: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C)

Alle drei Temperaturstufen weisen ähnliche Verläufe auf, daher werden nur die Ergebnisse der Temperaturstufe 2 aufgezeigt.

- Temperaturstufe 2 – Infrarotstrahler: Die Fugentemperatur betrug nach fünf Minuten Bestrahlungszeit über 101,0 °C. Die Betonoberflächentemperatur im Bereich der Fuge ist wesentlich geringer. Die Tiefsttemperatur entlang des Temperaturprofils liegt bei etwa 67,1 °C und ist auf die Betonoberfläche zurückzuführen (siehe Abb. 84 & Abb. 85).

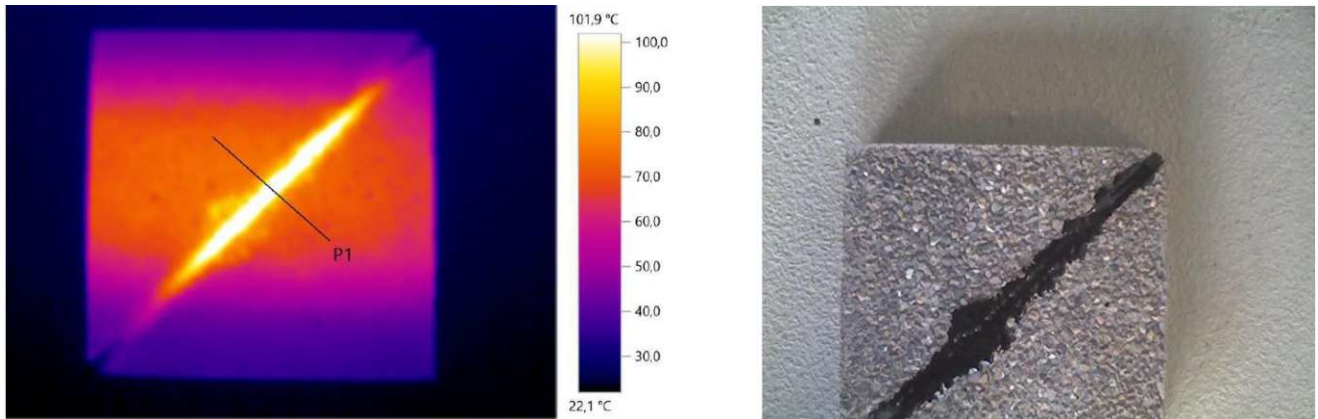


Abb. 84: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

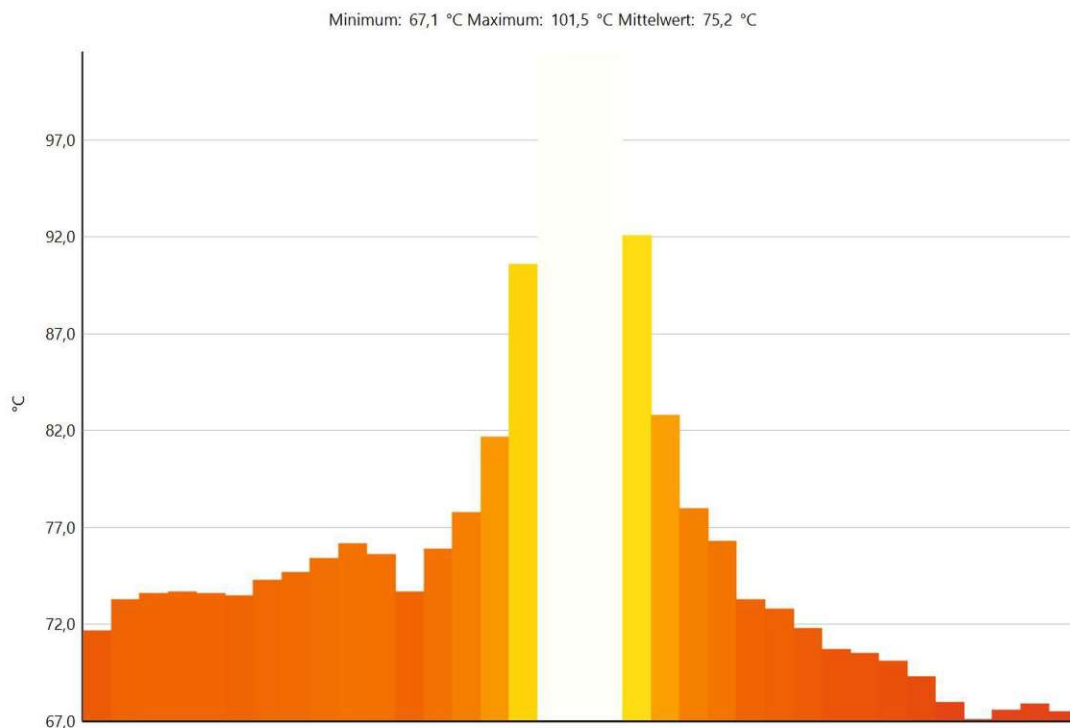


Abb. 85: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

5.5.6 Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 20 °C

Der Verlauf der Klimakammer ist ähnlich wie in Kapitel 5.5.5 und wird daher nicht nochmals aufgezeigt. Alle drei Temperaturstufen weisen ähnliche Verläufe auf, daher werden nur die Ergebnisse der Temperaturstufe 2 aufgezeigt.

- Temperaturstufe 2 – Infrarotstrahler: Die Fugentemperatur betrug nach fünf Minuten Bestrahlungszeit ungefähr 55,6 °C. Die Betonoberflächentemperatur im Bereich der Fuge ist wesentlich höher (siehe Abb. 86 & Abb. 87).

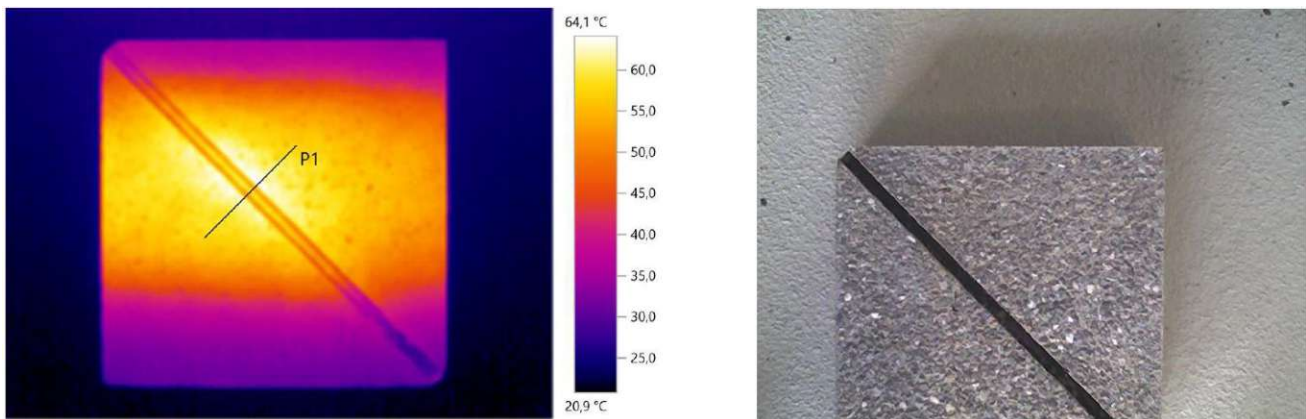


Abb. 86: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

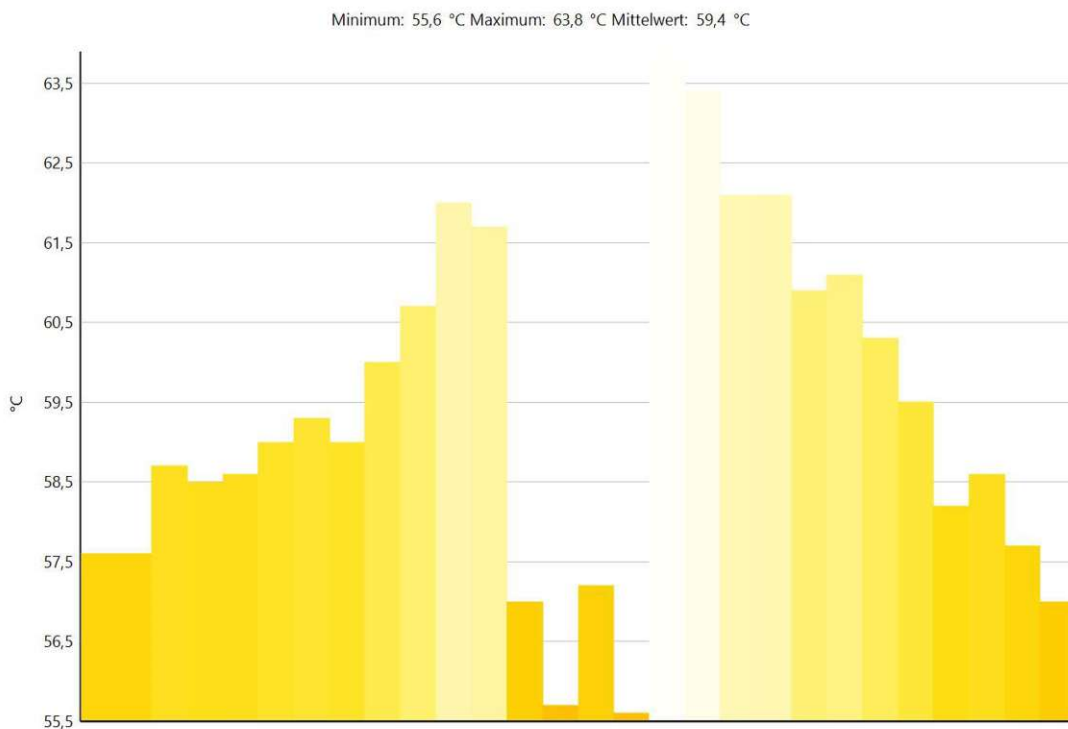


Abb. 87: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

5.5.7 Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 40 °C

Der Verlauf der Klimakammer ist ähnlich wie in Kapitel 5.5.5 und wird daher nicht nochmals aufgezeigt. Alle drei Temperaturstufen weisen ähnliche Verläufe auf, daher werden nur die Ergebnisse der Temperaturstufe 2 aufgezeigt.

- Temperaturstufe 2 – Infrarotstrahler: Die Fugentemperatur betrug nach fünf Minuten Bestrahlungszeit über 99,0 °C. Die Betonoberflächentemperatur im Bereich der Fuge ist wesentlich geringer. Die Tiefsttemperatur entlang des Temperaturprofils liegt bei 69,9 °C und ist auf die Betonoberfläche zurückzuführen (siehe Abb. 88 & Abb. 89).

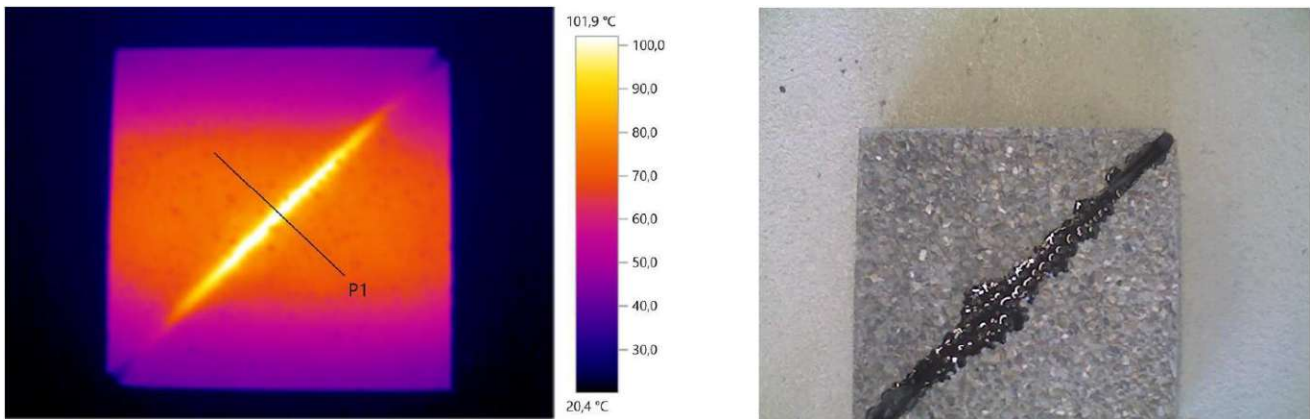


Abb. 88: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (40°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

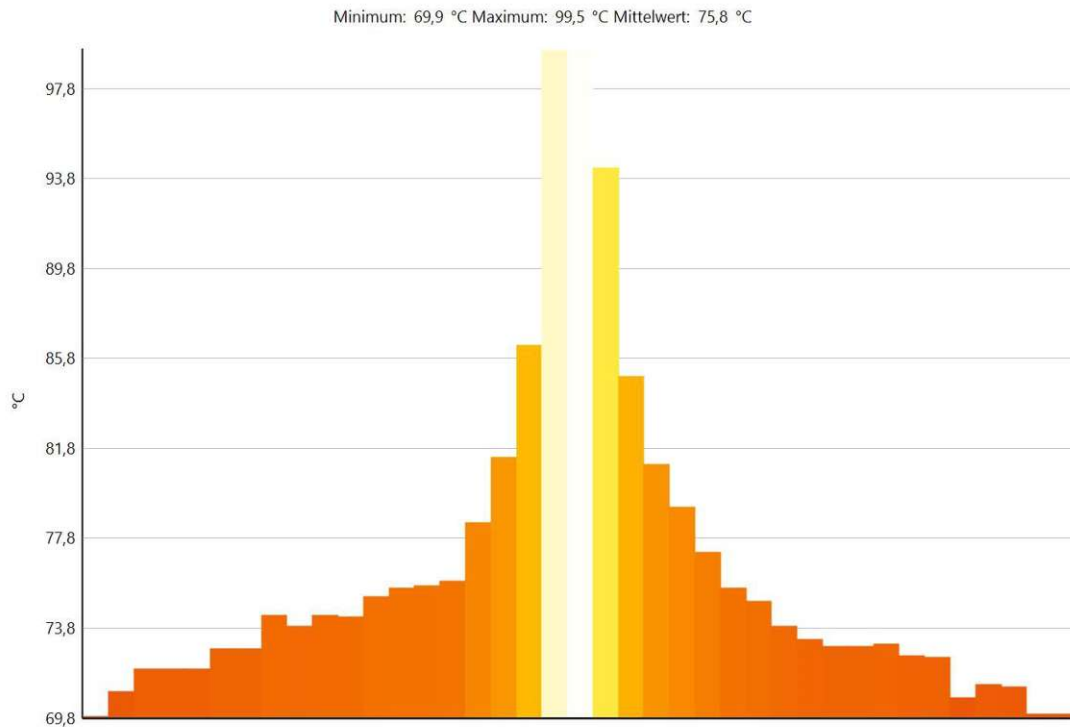


Abb. 89: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (40°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

5.5.8 Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 40 °C

Der Verlauf der Klimakammer ist ähnlich wie in Kapitel 5.5.5 und wird daher nicht nochmals aufgezeigt. Alle drei Temperaturstufen weisen ähnliche Verläufe auf, daher werden nur die Ergebnisse der Temperaturstufe 2 aufgezeigt.

- Temperaturstufe 2 – Infrarotstrahler: Die Fugentemperatur betrug nach fünf Minuten Bestrahlungszeit ungefähr 64,0 °C. Die Betonoberflächentemperatur im Bereich der Fuge ist wesentlich höher (siehe Abb. 90 & Abb. 91).

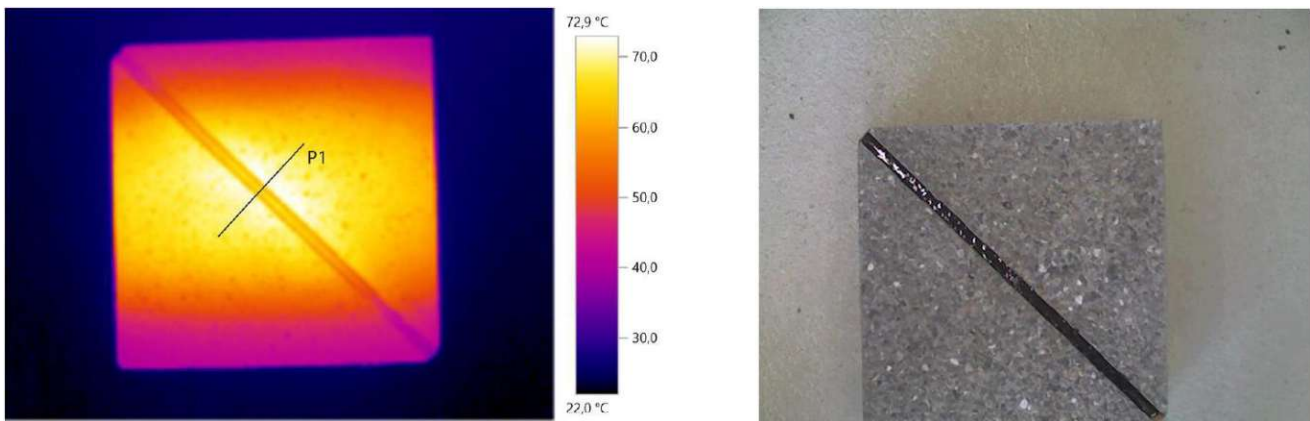


Abb. 90: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (40°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

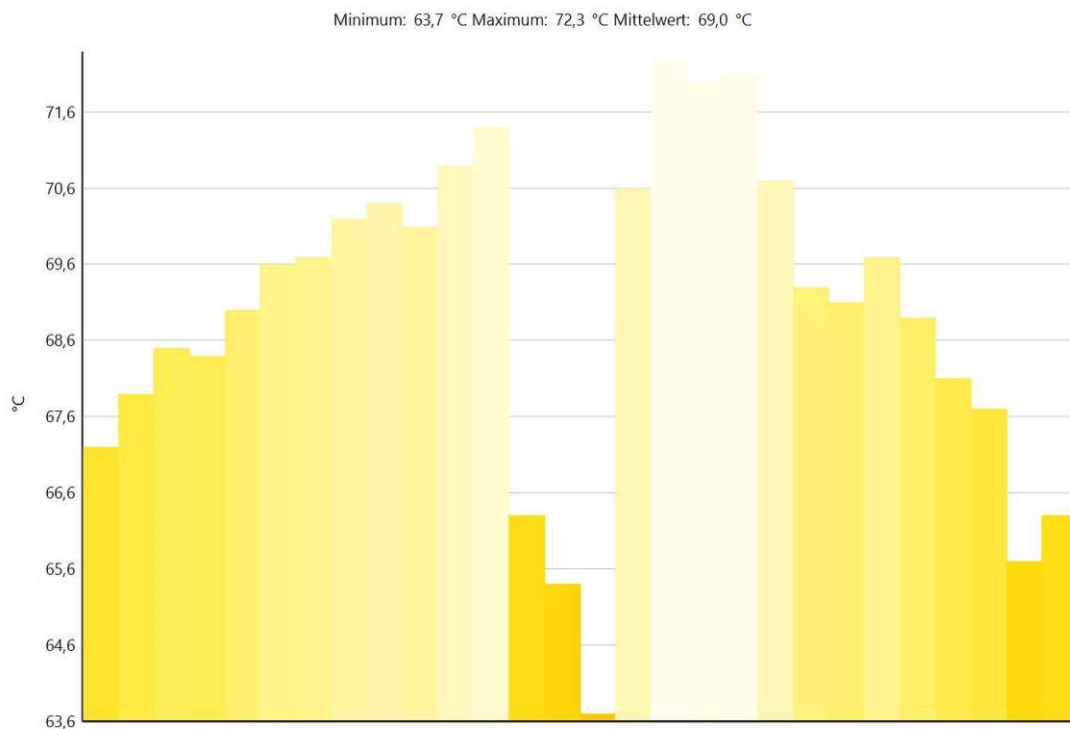


Abb. 91: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (40°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)

6 Entwicklung einer automatisierten Methode zur Qualitätsprüfung

6.1 Kombination: Thermographie & Excel

Die Intention dieser Arbeit ist es eine automatisierte Methode zur Zustandserfassung bituminöser Betonfugen zu entwickeln. Um diese Zielvorstellung zu realisieren wurde folgende Software benutzt: Excel, IRSoft.

Die verwendete Wärmebildkamera der Marke Testo ermöglicht neben der Aufnahme von Wärmebildern auch ihre Auswertung mithilfe einer unentgeltlich zur Verfügung gestellten Software (IRSoft). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wurde ebendiese Freeware genutzt, um die Wärmebilder auszuwerten und um die Ergebnisse in Excel-Tabellen zu exportieren. Jede Stelle im Wärmebild besitzt eine bestimmte Temperatur. Dadurch wird jeder Zelle einer Spalte eine Temperatur zugeteilt.

Es wird auf der Arbeit von [21] aufgebaut. Zunächst wird die maximale Temperatur des gesamten Bereiches berechnet und als 100 % definiert. Anschließend soll der Mittelwert all jener Zellen berechnet werden, dessen Oberflächentemperatur größer als $0,9 \cdot T_{\max}$ ist. Zusätzlich sollen letztere Zellen farblich (rot) hinterlegt werden. Somit ergibt sich folgender Zusammenhang:

Gute Fuge:

$$T_{Fuge} > T_{Beton}$$

Schlechte Fuge:

$$T_{Fuge} < T_{Beton}$$

Bei gleichbleibender Lufttemperatur stellt sich dieselbe Oberflächentemperatur sowohl im Beton als auch in der Fugenmasse ein. Dies bedeutet, dass auch bei einer gut abgedichteten Fuge nahezu die gesamte Oberfläche rot markiert wird.

6.2 Auswertung der Ergebnisse – Klimakammer

6.2.1 Tag 1

Dies war jener Zeitpunkt, bevor der Probekörper in der Klimakammer gelagert wurde. Hier wurden alle Punkte der Oberfläche des Probekörpers farblich markiert (siehe Abb. 92 & Kapitel 5.3.3). Der Grund hierfür liegt darin, dass der Probekörper sich über einen längeren Zeitraum

unter gleichmäßiger Raumtemperatur befand. Dadurch stellte sich dieselbe Temperatur in der bituminösen Fuge und dem Beton ein.

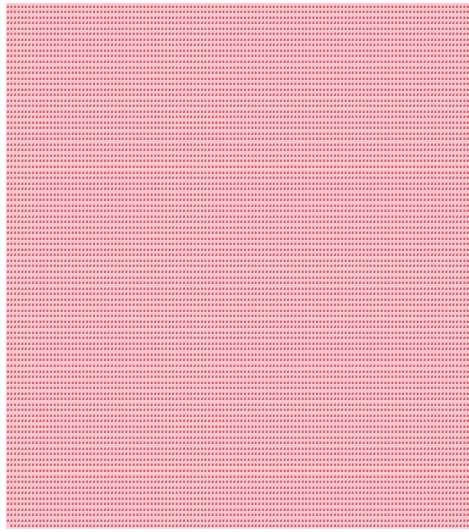


Abb. 92: Automatisierte Excelauswertung des ersten Tages – Probekörper ohne Fuge

6.2.2 Tag 2

Es lässt sich gut erkennen, dass die Ecken eine höhere Temperatur aufweisen und auch rot markiert sind (siehe Abb. 93 & Kapitel 5.3.4). Der Probekörper befand sich zu diesem Zeitpunkt in der Aufwärmphase der Phase zwei.

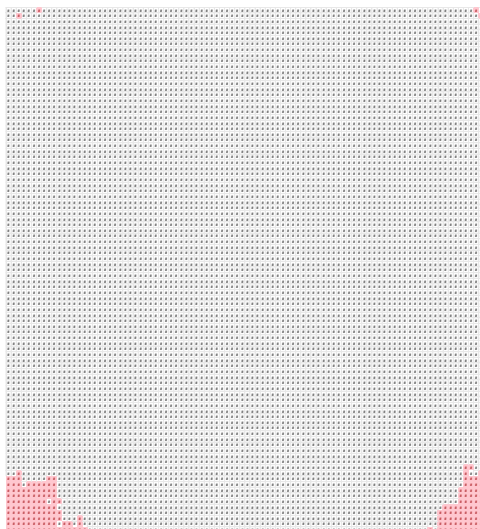


Abb. 93: Automatisierte Excelauswertung Tag 2

6.2.3 Tag 3

Die Abbildungen 94 & 95 (siehe Kapitel 5.3.5) verdeutlichen wie die Oberfläche, von den Ecken aus bis zum Kern hin, dieselbe Temperatur annimmt. Die Kühlphasen sind in den Abbildungen 96 bis 98 (siehe Kapitel 5.3.5) gut zu erkennen. Die Ecken kühlen deutlich schneller ab wie der Kern. In der Abbildung 99 (siehe Kapitel 5.3.5) ist der Beginn des nächsten Zyklus ersichtlich. Dieser weist wieder rot markierte Ecken auf. Dieser weist wieder rot markierte Ecken auf.

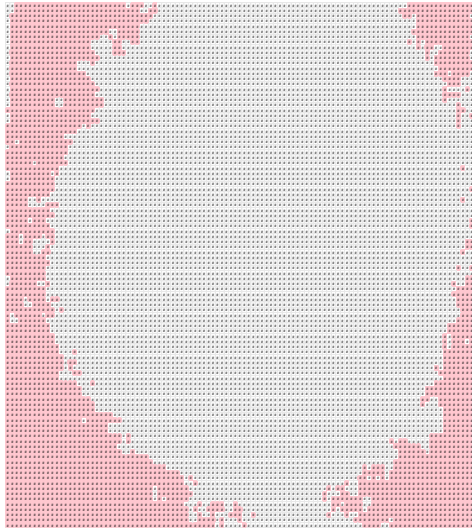


Abb. 94: Automatisierte Excelauswertung Tag 3, Station 1

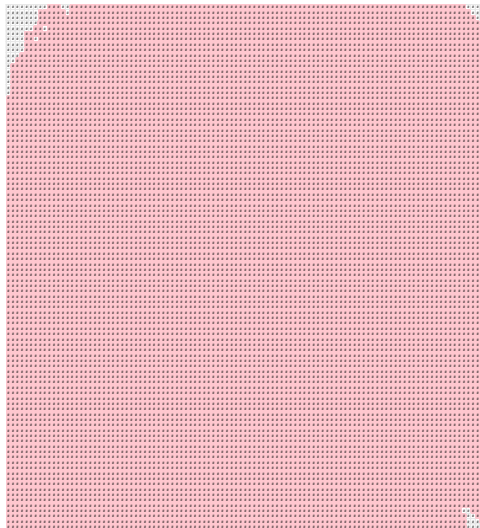


Abb. 95: Automatisierte Excelauswertung Tag 3, Station 2

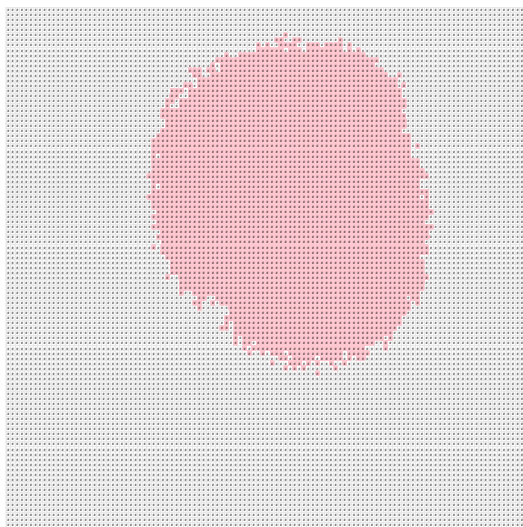


Abb. 96: Automatisierte Excelauswertung Tag 3, Station 3

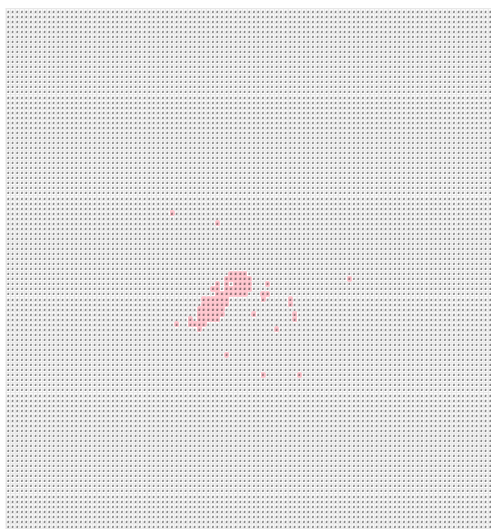


Abb. 97: Automatisierte Excelauswertung Tag 3, Station 4

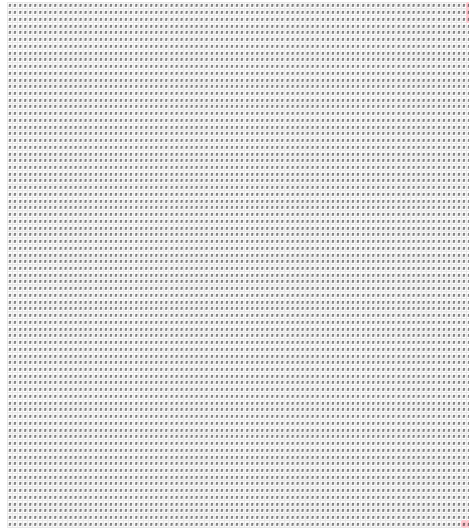


Abb. 98: Automatisierte Excelswertung Tag 3, Station 5

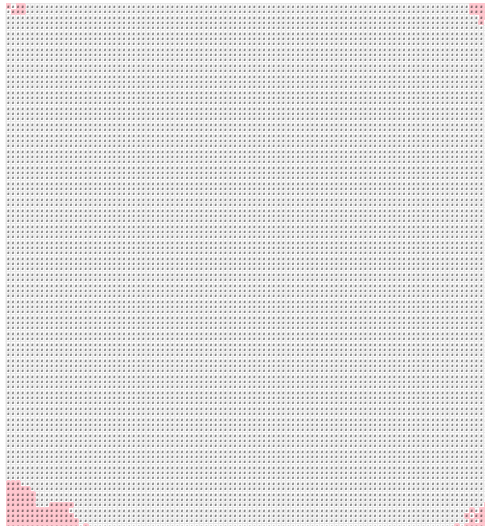


Abb. 99: Automatisierte Excelswertung Tag 3, Station 6

6.2.4 Tag 4

Aus Gründen der Vollständigkeit ist die Auswertung des vierten Tages angeführt. Die Ergebnisse sind ähnlich wie die der vorherigen Tage (siehe Abb. 100 – Abb. 102 & Kapitel 5.3.6).

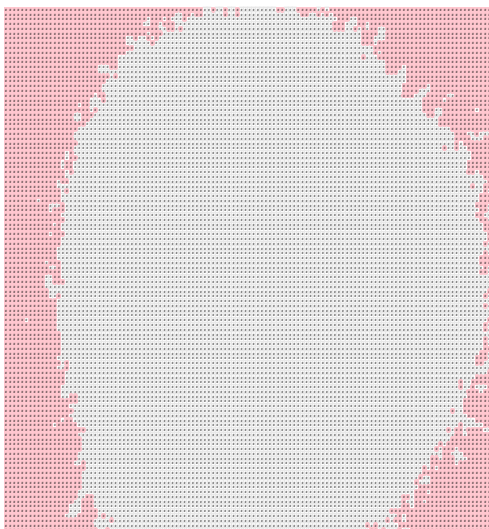


Abb. 100: Automatisierte Excelauswertung Tag 4, Station 1

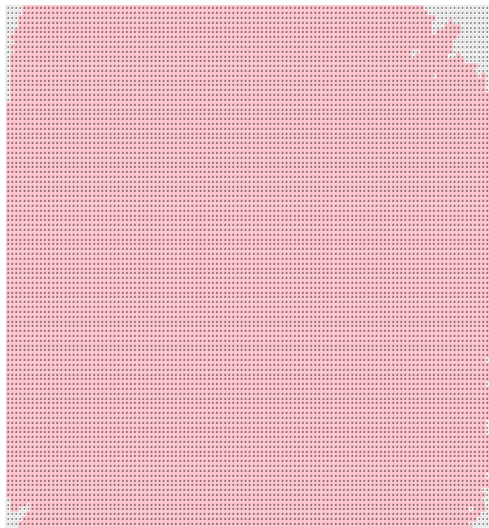


Abb. 101: Automatisierte Excelauswertung Tag 4, Station 2

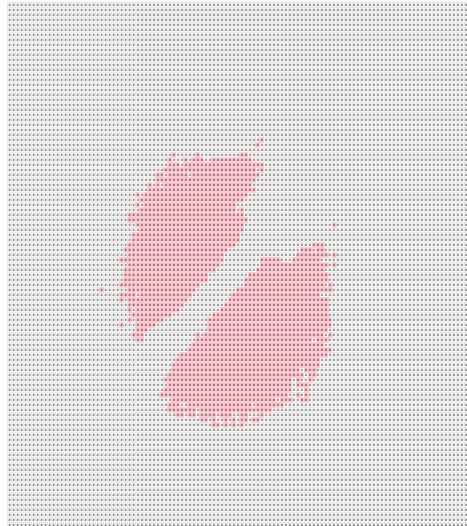


Abb. 102: Automatisierte Excelauswertung Tag 4, Station 3

6.3 Auswertung der Ergebnisse - Infrarotstrahler

6.3.1 Probekörper mit voller Bitumenfüllung

Die Abbildungen 103 & 104 (siehe Kapitel 5.4.2) stellen ein Musterbeispiel dar, wie eine gut abgedichtete Fuge auszusehen hat. Durch die direkte Bestrahlung des Infrarotstrahlers, welche mit den Sonnenstrahlen gleichgesetzt werden kann, erhöht sich die Oberflächentemperatur der Fugenmasse deutlich schneller als die des Betons. Die Ergebnisse der Auswertung sind ident mit den Versuchen aus [21], welche auf realen Straßen im Rahmen von Feldversuchen durchgeführt wurden.

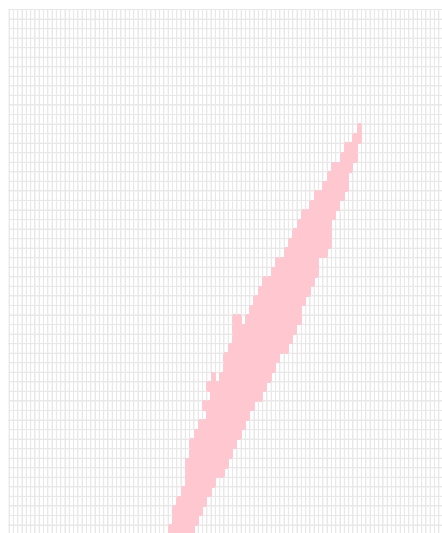


Abb. 103: Automatisierte Excelauswertung Tag 6, Stufe 1- Probekörper mit voller Bitumenfüllung

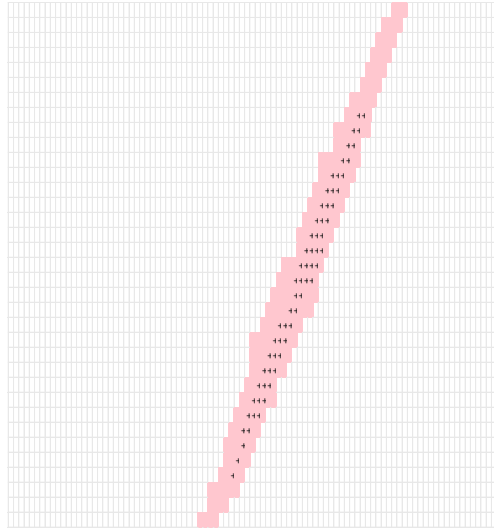


Abb. 104: Automatisierte Excelauswertung Tag 6, Stufe 3- Probekörper mit voller Bitumenfüllung

6.3.2 Probekörper mit halber Bitumenfüllung

Die Abbildungen 105 & 106 (siehe Kapitel 5.4.3) sind ein Paradebeispiel einer mangelhaften Fuge. Durch die fehlerhafte Fuge kommt es zu einer rapiden Erwärmung der Betonoberfläche. Bei einer mangelhaften Fuge werden deutlich mehr Zellen rot markiert im Gegensatz zu einer einwandfreien Fuge. Auch hier sind die Ergebnisse der Auswertung ident mit den Versuchen aus [21].

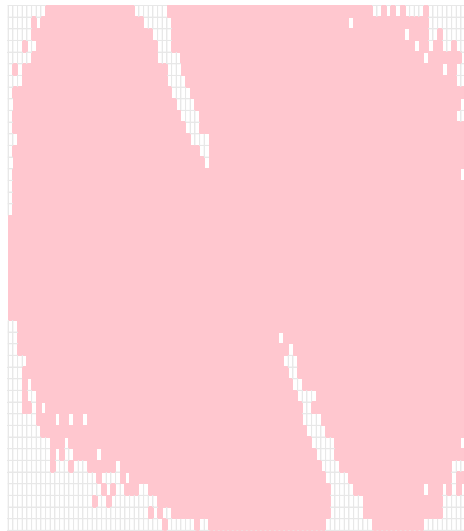


Abb. 105: Automatisierte Excelauswertung Tag 7, Stufe 1- Probekörper mit halber Bitumenfüllung

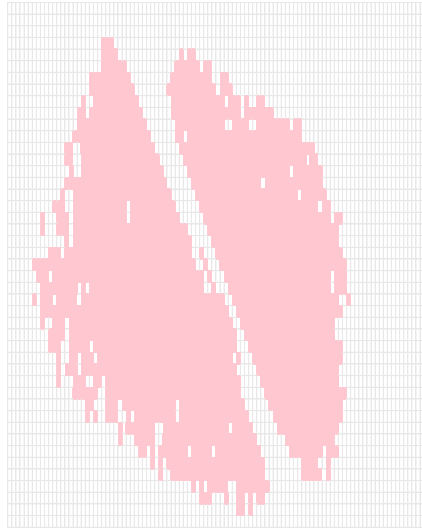


Abb. 106: Automatisierte Excelauswertung Tag 7, Stufe 3- Probekörper mit halber Bitumenfüllung

6.4 Auswertung der Ergebnisse des Kombinationsversuches

Im Folgenden werden nur die Ergebnisse der Versuchskombination Klimakammer-Infrarotstrahler aufgezeigt. Beim Infrarotstrahler wurde ausschließlich die relevante Temperaturstufe (Stufe 2) analysiert, da die beiden anderen Temperaturstufen ähnliche Verläufe aufwiesen, jedoch mit einem geringeren bzw. höheren Temperaturverlauf.

Die Auswertung zeigt, dass bei einer erstklassig abgedichteten Fuge die Lufttemperatur nur eine untergeordnete Rolle spielt. Nach allen vier Temperaturphasen (- 20 °C, 0 °C, 20 °C & 40 °C) und anschließender Bestrahlung ist dasselbe Muster zu erkennen (siehe Abb. 107, 109, 111 & 113). Die Fuge weist eine höhere Oberflächentemperatur auf als die Betonoberfläche. Folglich sind nur die Zellen im Bereich der Fugenmasse rot markiert.

Im Vergleich dazu kommt es bei einer mangelhaft abgedichteten Fuge zum genauen Gegenteil. Es ist gut zu erkennen, dass hier wesentlich mehr Zellen farblich markiert sind. Weiters weist die Betonoberfläche entweder eine höhere Temperatur auf oder nahezu ähnlich der Fuge (siehe Abb. 108, 110, 112 & 114).

6.4.1 Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 0 °C

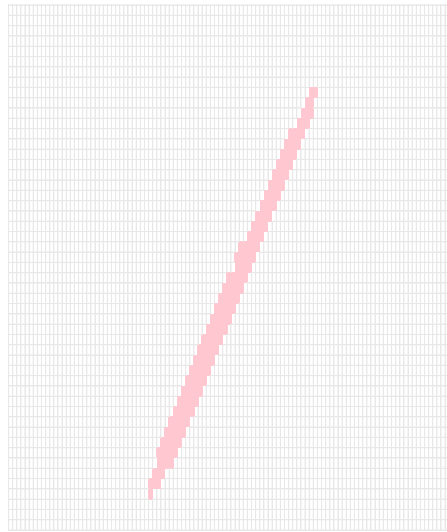


Abb. 107: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (0 °C Klimakammer) - Probekörper mit voller Bitumenfüllung

6.4.2 Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 0 °C

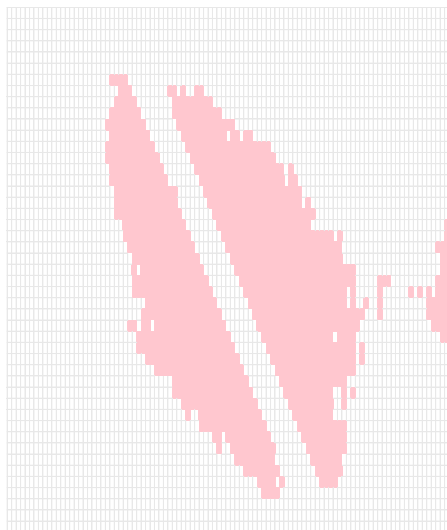


Abb. 108: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (0 °C Klimakammer) - Probekörper mit halber Bitumenfüllung

6.4.3 Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 20 °C

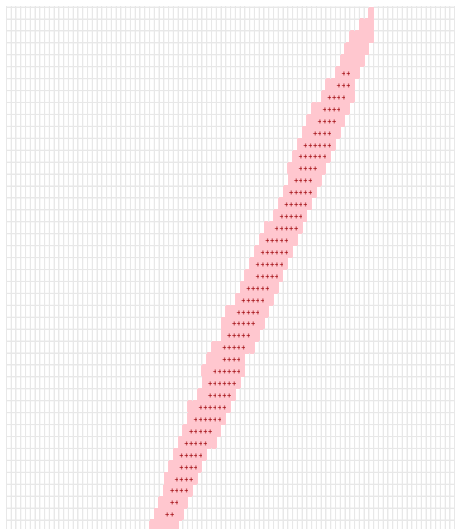


Abb. 109: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (20 C° Klimakammer) - Probekörper mit voller Bitumenfüllung

6.4.4 Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 20 °C

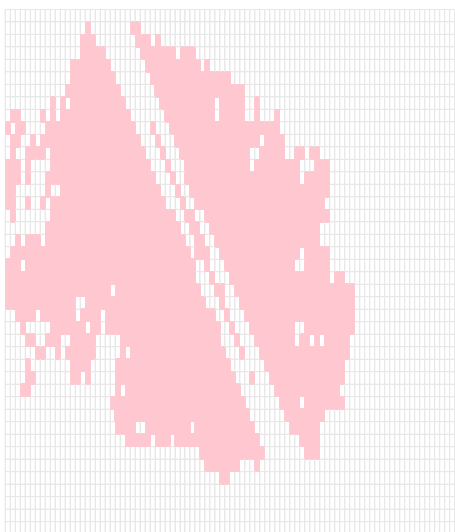


Abb. 110: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (20 C° Klimakammer) - Probekörper mit halber Bitumenfüllung

6.4.5 Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 40 °C

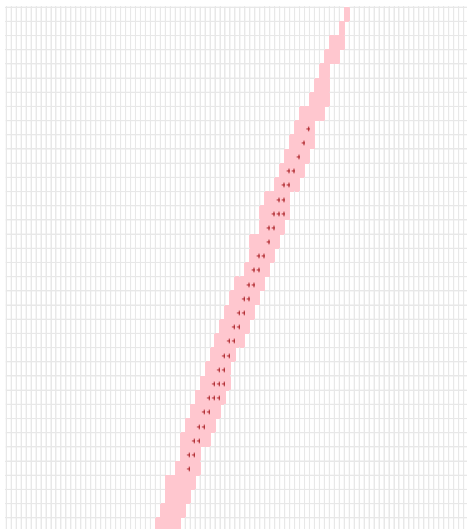


Abb. 111: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (40 °C Klimakammer) - Probekörper mit voller Bitumenfüllung

6.4.6 Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer 40 °C

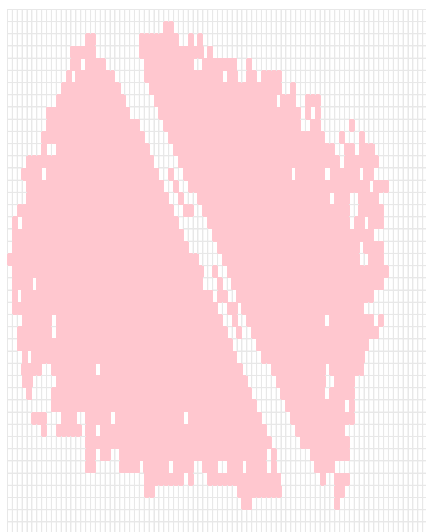


Abb. 112: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (40 °C Klimakammer) - Probekörper mit halber Bitumenfüllung

6.4.7 Probekörper mit voller bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer -20 °C

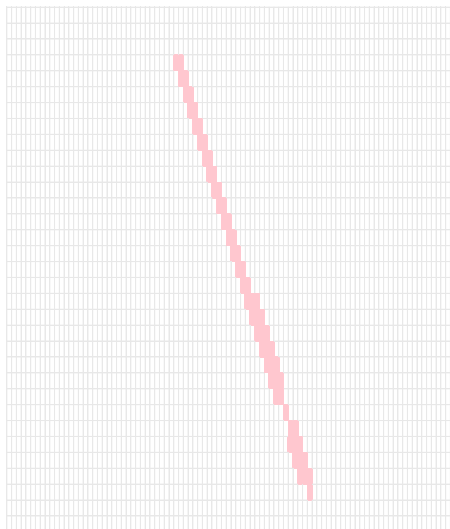


Abb. 113: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (-20 C° Klimakammer) - Probekörper mit voller Bitumenfüllung

6.4.8 Probekörper mit halber bituminöser Fugenfüllung: Klimakammer -20 °C

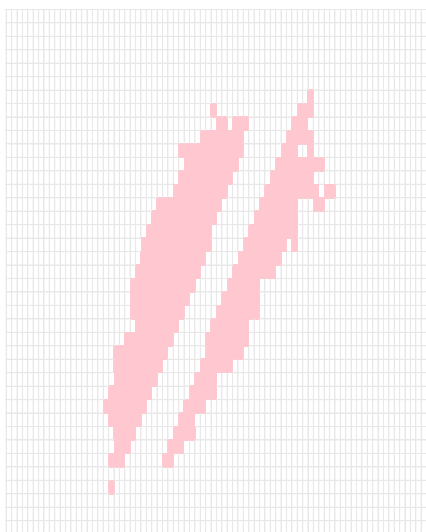


Abb. 114: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (-20 C° Klimakammer) - Probekörper mit halber Bitumenfüllung

6.5 Numerische Auswertung der Ergebnisse - Kombinationsversuch

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuchskombination Klimakammer-Infrarotstrahler untersucht. Beim Infrarotstrahler wurde ausschließlich die relevante Temperaturstufe (Stufe 2) analysiert.

In der dritten und vierten Spalte der Tabelle 4 wurden die Mittelwerte der Temperaturen der höchsten 10 % und der verbleibenden 90 % abgebildet. Die Differenz dieser beiden (ΔT) ist in der letzten Spalte ersichtlich.

Tabelle 4: Numerische Auswertung - Kombinationsversuch

Bezeichnung	Fugenzustand	Mittelwerte		ΔT
		T der höchsten 10 %	T der restlichen 90 %	
Volle Fugenfüllung 0 °C (siehe Abb. 107)	gut	57,18 °C	37,79 °C	19,39 °C
Halbe Fugenfüllung 0 °C (siehe Abb. 108)	mangelhaft	42,46 °C	37,62 °C	4,84 °C
Volle Fugenfüllung 20 °C (siehe Abb. 109)	gut	96,71 °C	71,17 °C	25,54 °C
Halbe Fugenfüllung 20 °C (siehe Abb. 110)	mangelhaft	59,58 °C	54,85 °C	4,73 °C
Volle Fugenfüllung 40 °C (siehe Abb. 111)	gut	97,14 °C	73,12 °C	24,02 °C
Halbe Fugenfüllung 40 °C (siehe Abb. 112)	mangelhaft	68,09 °C	63,22 °C	4,87 °C
Volle Fugenfüllung -20 °C (siehe Abb. 113)	gut	61,61 °C	30,79 °C	30,82 °C
Halbe Fugenfüllung -20 °C (siehe Abb. 114)	mangelhaft	25,53 °C	21,23 °C	4,30 °C
Bezeichnung	Fugenzustand	Mittelwert ΔT aus obiger Tabelle		
Volle Fugenfüllung	gut	24,94 °C		
Halbe Fugenfüllung	mangelhaft	4,69 °C		

Zum Schluss wurde der Mittelwert der Temperaturdifferenzen ΔT für den Probekörper mit voller Fugenfüllung als auch für den Probekörper mit halber Fugenfüllung gebildet. Gut abgedichtete Fugen weisen hohe Temperaturdifferenzen auf. Im Gegensatz dazu weisen mangelhaft abgedichtete Fugen nur geringe Temperaturdifferenzen auf. Das Delta zwischen der guten und der mangelhaften Fuge liegt in diesem Fall bei 20,26 °C.

7 Resümee

Mithilfe der entwickelten Methode zur Qualitätsprüfung bituminöser Fugenmassen können über deren Zustand zuverlässige Aussagen getroffen werden. Das Prinzip basiert auf der Auswertung thermographischer Wärmebilder. Durch die divergierenden Oberflächentemperaturen der Probekörper können gute von mangelhaften Fugenfüllungen unterschieden werden.

Eine gut abgedichtete Fuge weist eine hohe Temperaturdifferenz zwischen Fuge und Betonoberfläche auf. Im Gegensatz dazu weist eine mangelhafte Fuge eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Fuge und Betonoberfläche auf.

Es hat sich gezeigt, dass insbesondere durch die direkte Bestrahlung der Probekörper mit einem Infrarotstrahler ein ähnliches Verhalten wie in der Natur aufweist. Durch die Kombination der Temperierung aus Klimakammer sowie Wärmestrahler konnte die Beanspruchung der Realität noch viel näher angepasst werden.

Schlussfolgernd ist zu erwähnen, dass nun eine Methode existiert, mit der der Zustand bituminöser Fugenmassen ermittelt werden kann. Darauf aufbauend können praxistaugliche Instrumente entwickelt werden, um den Zustand der Fugen auf den Straßen zu identifizieren. Unter anderem kann eine Wärmebildkamera direkt an einem KFZ montiert werden, welcher den IST- Zustand der Straßen beim Befahren aufnimmt. Anschließend können die Daten in das Excel-Programm eingespeist werden, wodurch die Beschaffenheit der Fugen ermittelt wird. Folglich kann die Auswertung als Grundlage für die Entscheidung zur Fugensanierung dienen.

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

- [1] Blab, R. "Straßenwesen, Studienunterlagen zur Vorlesung. " *Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen, Technische Universität Wien* (2019)
- [2] Breyer, G., Litzka, J. & Steigenberger, J. "Die Betonstraße – eine nachhaltige Bauweise mit Zukunft. " (2009). [Zugriff am: 03.04.2021]. Verfügbar unter:
<https://literatur.zement.at/themen/48-infrastruktur-strassenbau/5373-die-betonstrasse-eine-nachhaltige-bauweise-mit-zukunft>
- [3] RVS 09.01.23 (9.234), Ausgabe September 2001: Projektierungsrichtlinien für Tunnel, Bauliche Gestaltung – Innenausbau, Österr. Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (FSV), Wien
- [4] Kolleger, J. "Skriptum zur Betonbau Vorlesung nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015. " *Institut für Tragkonstruktionen, Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau, Technische Universität Wien* (2018)
- [5] Blab, R. "Straßenbau und Straßenerhaltung, Studienunterlagen zur Vorlesung. " *Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen, Technische Universität Wien* (2019)
- [6] BMK, "Statistik Straße & Verkehr. " *Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität* (2021). [Zugriff am: 05.04.2021]. Verfügbar unter:
https://www.bmk.gv.at/themen/verkehr/strasse/publikationen/statistik_strasseverkehr.html
- [7] BMK, "Faktenblatt – Gesamtverkehrsplan für Österreich. " *Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität* (2012). [Zugriff am: 05.04.2021]. Verfügbar unter:
https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:a4eda441-7d50-4f9d-921e-ec0b6d313b5b/fb_strasse_schiene_netz.pdf
- [8] Adam, D. "Grundbau und Bodenmechanik, Studienunterlagen zur Vorlesung. " *Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Wien* (2019)
- [9] Preh, A. "Angewandte Felsmechanik, Skriptum zur Vorlesung. " *Institut für Geotechnik, Forschungsbereich für Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien* (2019)
- [10] OMV, "Raffinerie Schwechat. " (2016). [Zugriff am: 13.04.2021]. Verfügbar unter:
http://ahgroup.at/user_files/SE-&-VO/UNT.044_Industrieexkursion/OMV_Raffinerie-Schwechat.pdf
- [11] Neroth, G., Vollenschaar, D. "Wendehorst Baustoffkunde. " *Vollständig überarbeitete Auflage ed. Wiesbaden: Vieweg Teubner* (2011)
- [12] Blab, R. "Betonstraßen - Das Handbuch: Leitfaden Für Die Praxis. " *Wien: Zement Beton, Handels- U. Werbeges.m.b.H.*, (2012)

- [13] Bergmeister, K., Wörner, J. "Beton-Kalender 2007. " *D-69451 Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2006. 353-478. Web.*
- [14] Wiehler, H.-G., Wellner, F., "Straßenbau: Konstruktion und Ausführung 5. " *stark bearb. Aufl., Berlin: Huss-Medien, Verl. Bauwesen. (2005)*
- [15] Bauch, J. & Rosenkranz, R. "Physikalische Werkstoffdiagnostik: Ein Kompendium wichtiger Analytikmethoden für Ingenieure und Physiker. " *Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg. (2017)*
- [16] Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen. [Zugriff am: 16.05.2021]. Verfügbar unter:
<https://www.ivws.tuwien.ac.at/labor/geraeteuebersicht/sonstige-geraete/klimakammer/>
- [17] ASFINAG, Dirnbacher, H. "ASFINAG: Auch Autobahnen leiden unter den hohen Temperaturen. " (2002). [Zugriff am: 16.05.2021]. Verfügbar unter:
https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20020618_OT0250/asfinag-auch-autobahnen-leiden-unter-den-hohen-temperaturen
- [18] Einhell Germany AG, Quarzheizstrahler QH 1800. [Zugriff am: 30.05.2021]. Verfügbar unter: https://www.einhell-werksverkauf.de/de_DE/2338511-qh-1800.html
- [19] Master Heater, Quartz Heater Model No. QH-191, technische Daten auf der Produktverpackung. [Zugriff am: 04.06.2021]. Verfügbar unter:
https://www.amazon.de/gp/product/B08NGQPN3J/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o03_s01?ie=UTF8&th=1
- [20] Yuyte, Infrarotlampe, technische Daten auf der Produktverpackung. [Zugriff am: 04.06.2021]. Verfügbar unter:
https://www.amazon.de/gp/product/B08LH47T3J/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o03_s00?ie=UTF8&th=1
- [21] Abd El Rehim, H. "Qualitätsprüfung von Betonstraßenfugen mithilfe von Thermographie. " Bachelorarbeit: *Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen, Technische Universität Wien. (2021)*

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: "Blow Up" an einer Betonfahrbahn [5].....	8
Abb. 2: Kantenschäden an einer Betonfahrbahn [5]	8
Abb. 3: Straßennetz in Österreich [6].....	10
Abb. 4: Aufteilung des österreichischen Straßennetzes auf die Bundesländer [6]	10
Abb. 5: Straßenbau- und Erhaltungsausgaben für das hochrangige Straßennetz [6].....	11
Abb. 6: Einteilung der Lockergesteine [8]	13
Abb. 7: Einteilung der Festgesteine [8]	14
Abb. 8: Chemische Zusammensetzung Bitumen [11]	15
Abb. 9: Produktausstoß Raffinerie Schwechat 2014 [10]	16
Abb. 10: Alterung des Bitumens über die Zeit [1]	19
Abb. 11: Einteilung bituminöser Bindemittel [1]	20
Abb. 12: Vergleich - Tragverhalten Beton & Asphalt [1]	21
Abb. 13: Betondecke ohne Raumfuge, unbewehrt [5]	23
Abb. 14: Betondecke bewehrt mit Raumfuge [5].....	23
Abb. 15: Durchgehend bewehrte Betondecke [5]	24
Abb. 16: Plattengeometrie Betondecke [5].....	25
Abb. 17: Betondecke unbewehrt mit Raumfuge [1]	26
Abb. 18: Betondecke mit Scheinfuge [1]	27
Abb. 19: Scheinfuge schmal geschnitten, unverschlossen [1]	27
Abb. 20: Aufgeweitete Scheinfuge, verschlossen [1].....	28
Abb. 21: Pressfuge [5]	28
Abb. 22: Tagesabschlussfuge [1].....	29
Abb. 23: Probekörper mit Fuge	31
Abb. 24: Probekörper ohne Fuge	32
Abb. 25: Aufnahme mittels Wärmebildkamera.....	33
Abb. 26: Gleichmäßige Temperaturbeanspruchung beim Abkühlen	34
Abb. 27: Gleichmäßige Temperaturbeanspruchung beim Erwärmen	34
Abb. 28: Ungleichmäßige Temperaturverteilung beim Abkühlen	35
Abb. 29: Ungleichmäßige Temperaturverteilung beim Erwärmen	35
Abb. 30: Gesamtphasen eines Zyklus	36
Abb. 31: Zyklus Klimakammer	37
Abb. 32: Probekörper 1.....	37
Abb. 33: Wärmebild & Echtbild - Tag 1	39
Abb. 34: Temperaturprofil P1 – Tag 1	39
Abb. 35: Wärmebild & Echtbild - Tag 2	40
Abb. 36: Temperaturprofil P1 – Tag 2	40
Abb. 37: Klimakammer Zyklus - Tag 3	41
Abb. 38: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 1	42
Abb. 39: Temperaturprofil P1 – Tag 3 Station 1	42
Abb. 40: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 2	43
Abb. 41: Temperaturprofil P1 – Tag 3 Station 2	43
Abb. 42: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 3	44

Abb. 43: Temperaturprofil P1 – Tag 3 Station 3	44
Abb. 44: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 4	45
Abb. 45: Temperaturprofil P1 – Tag 3 Station 4	45
Abb. 46: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 5	46
Abb. 47: Temperaturprofil P1 – Tag 3 Station 5	46
Abb. 48: Wärmebild & Echtbild - Tag 3 Station 6	47
Abb. 49: Temperaturprofil P1 – Tag 3 Station 6	47
Abb. 50: Versuchsaufbau – Bestrahlung des fugenlosen Probekörpers	48
Abb. 51: Wärmeverteilung Master Heater - geringste Stufe links & höchste Stufe rechts	50
Abb. 52: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 1	51
Abb. 53: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 1	51
Abb. 54: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 2	52
Abb. 55: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 2	52
Abb. 56: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 3	53
Abb. 57: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Stufe 3	53
Abb. 58: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 1	54
Abb. 59: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 1	54
Abb. 60: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 2	55
Abb. 61: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 2	55
Abb. 62: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 3	56
Abb. 63: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Stufe 3	56
Abb. 64: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C)	58
Abb. 65: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C)	58
Abb. 66: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 1)	59
Abb. 67: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 1)	59
Abb. 68: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	60
Abb. 69: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	60
Abb. 70: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C)	61
Abb. 71: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C)	61
Abb. 72: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	62
Abb. 73: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (- 20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	62
Abb. 74: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C)	63
Abb. 75: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C)	63

Abb. 76: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2).....	64
Abb. 77: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2).....	64
Abb. 78: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C)	65
Abb. 79: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C)	65
Abb. 80: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2).....	66
Abb. 81: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (0°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2).....	66
Abb. 82: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C).....	67
Abb. 83: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C).....	67
Abb. 84: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	68
Abb. 85: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	68
Abb. 86: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	69
Abb. 87: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (20°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	69
Abb. 88: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (40°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	70
Abb. 89: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit voller Bitumenfüllung - Klimakammer (40°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	70
Abb. 90: Wärmebild & Echtbild des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (40°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	71
Abb. 91: Temperaturprofil P1 des Probekörpers mit halber Bitumenfüllung - Klimakammer (40°C) & Infrarotstrahler (Stufe 2)	71
Abb. 92: Automatisierte Excelauswertung des ersten Tages – Probekörper ohne Fuge	73
Abb. 93: Automatisierte Excelauswertung Tag 2	73
Abb. 94: Automatisierte Excelauswertung Tag 3, Station 1	74
Abb. 95: Automatisierte Excelauswertung Tag 3, Station 2	74
Abb. 96: Automatisierte Excelauswertung Tag 3, Station 3	75
Abb. 97: Automatisierte Excelauswertung Tag 3, Station 4	75
Abb. 98: Automatisierte Excelauswertung Tag 3, Station 5	76
Abb. 99: Automatisierte Excelauswertung Tag 3, Station 6	76
Abb. 100: Automatisierte Excelauswertung Tag 4, Station 1.....	77
Abb. 101: Automatisierte Excelauswertung Tag 4, Station 2.....	77
Abb. 102: Automatisierte Excelauswertung Tag 4, Station 3.....	78
Abb. 103: Automatisierte Excelauswertung Tag 6, Stufe 1- Probekörper mit voller Bitumenfüllung	78

Abb. 104: Automatisierte Excelauswertung Tag 6, Stufe 3- Probekörper mit voller Bitumenfüllung	79
Abb. 105: Automatisierte Excelauswertung Tag 7, Stufe 1- Probekörper mit halber Bitumenfüllung	79
Abb. 106: Automatisierte Excelauswertung Tag 7, Stufe 3- Probekörper mit halber Bitumenfüllung	80
Abb. 107: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (0 C° Klimakammer) - Probekörper mit voller Bitumenfüllung	81
Abb. 108: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (0 C° Klimakammer) - Probekörper mit halber Bitumenfüllung	81
Abb. 109: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (20 C° Klimakammer) - Probekörper mit voller Bitumenfüllung	82
Abb. 110: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (20 C° Klimakammer) - Probekörper mit halber Bitumenfüllung	82
Abb. 111: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (40 C° Klimakammer) - Probekörper mit voller Bitumenfüllung	83
Abb. 112: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (40 C° Klimakammer) - Probekörper mit halber Bitumenfüllung	83
Abb. 113: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (-20 C° Klimakammer) - Probekörper mit voller Bitumenfüllung	84
Abb. 114: Automatisierte Excelauswertung Kombinationsversuch (-20 C° Klimakammer) - Probekörper mit halber Bitumenfüllung	84

8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Bitumen [11]	17
Tabelle 2: Variantenstudie - Infrarotstrahler Einhell QH 1800	49
Tabelle 3: Variantenstudie - Infrarotstrahler Master Heater QH-191.....	49
Tabelle 4: Numerische Auswertung - Kombinationsversuch	85