Anpassung der Dimensionierung an den Klimawandel

FE 4.332

Forschungsstelle:	ISAC GmbH Ingenieurgesellschaft für Straßenwesen, Aachen
Bearbeiter:	Renken, L. / Lehmkuhl, J. / Neumann, J., / Liu, C. / Ulrich, M.
Auftraggeber:	Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Bonn
Abschluss:	Juli 2024

1 Einführung

Mit den Veröffentlichungen der IPCC (2018) und Bundesregierung (2022) wird die Dringlichkeit der Anpassung der Dimensionierung der Straßen an den Klimawandel deutlich. Obwohl die Regelwerke für die Dimensionierung von Verkehrsflächen in den letzten Jahren an den aktuellen Klimazustand angepasst wurden (Augter und Kayser 2016; Blume und Plehm 2009; Villaret und andere 2019), sind die Auswirkungen der zukünftigen Klimaänderungen auf die Verkehrsflächen noch nicht berücksichtigt. Die Methodik für die Aktualisierung der Regelwerke für die Dimensionierung von Verkehrsflächen an den Klimawandel ist in Augter und Kayser (2016), Blume und Plehm (2009) und Villaret und andere (2019) beschrieben, in welchen zeitlichen Abständen die Regelwerke aktualisiert werden müssen, wurde bisher noch nicht betrachtet. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Dimensionierung von Verkehrsflächenbefestigungen untersucht. Darüber hinaus wurde ein Verfahren zur Anpassung der Regelwerke zur rechnerischen und empirischen Dimensionierung an den Klimawandel auf Basis projizierter Klimadaten erstellt.

2 Aufgabenstellung und Vorbereitung der Wetterdatenbasis

Für eine ausreichende Datengrundlage mussten zunächst aktuelle und zukünftige Wetterdaten akquiriert werden. Diese Daten (insbesondere Sonnenstrahlung (SSR) und Lufttemperatur in 2 m Höhe (T2M)) sind von entscheidender Bedeutung für die Berechnung der thermischen Belastung in Verkehrsflächenbefestigungen, da diese die Grundlage für alle nachfolgenden Berechnungen bilden. Um eine hohe Präzision zu gewährleisten, wurde eine Zielauflösung von räumlich 5x5 km und zeitlich einer Stunde angestrebt. Die Eingangsdaten bestehen aus Referenzdatensätzen, die bereits in dieser räumlichen und zeitlichen Zielauflösung vorlagen, sowie Klimaprojektionsdaten, die zwar die räumliche, aber nicht die angestrebte zeitliche Auflösung aufwiesen, da sie nur tägliche Werte beinhalten.

Um diese Klimaprojektionsdaten auf die gewünschte Auflösung zu bringen, wurden verschiedene Techniken wie das Quantilmapping zur Bias-Korrektur und die multivariate statistische Interpolation zur Erhöhung der zeitlichen Auflösung angewendet. Diese Ansätze ermöglichen es, die täglichen Daten der Klimamodelle auf eine stündliche Auflösung herunterzuskalieren. Hierfür wurde eine statistisch-deterministische, multivariate Regressionsinterpolation von täglichen Klimamitteln auf stündliche Wetterdaten auf Basis von historischen Referenzdaten eingesetzt, um den Tagesgang der Klimavariablen zu definieren.

Die Klimaprojektionsdatensätze stammen aus den regionalen Klimaprojektionsensembles des Deutschen Wetterdienstes, dem DWD-Kernensemble. Für dieses Projekt konnten Klimamodelle für drei verschiedene Klimaszenarien verwendet werden: RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5. Diese Szenarien repräsentierten unterschiedliche Annahmen über zukünftige Treibhausgasemissionen und deren Auswirkungen auf das Klima. Bei RCP2.6 handelt es sich um ein Szenario mit wirksamen globalen Klimaschutzmaßnahmen, bei RCP8.5 um ein Szenario ohne wirksamen globalen Klimaschutz und bei RCP4.5 um einen Mittelweg. Durch die Verwendung dieser drei Szenarien konnte ein breites Spektrum möglicher zukünftiger Klimabedingungen abgedeckt werden.

Die aufbereiteten Klimadaten wurden so verarbeitet, dass sie direkt in thermischen und mechanischen Modellen verwendet werden konnten. Dies ermöglicht die Berechnung von Oberflächentemperaturen, Temperaturgradienten und den daraus resultierenden mechanischen Beanspruchungen mit den dafür vorgesehenen Modellen.

Durch die angewendete Methodik konnte sichergestellt werden, dass die Klimadaten eine Detailtiefe aufweisen, die für die projektspezifischen technischen und wissenschaftlichen Anforderungen geeignet ist.

3 Berechnung mit Modellen

Anschließend wurde ein umfangreiches thermisches FVM-Modell mit Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM) erstellt. Dieses Modell ermöglicht die Berechnung des Temperaturverlaufs innerhalb von Verkehrsflächenbefestigungen durch eine Fourier-Gleichung und liefert wichtige Erkenntnisse über die Auswirkungen verschiedener Wetterbedingungen (unter anderem die SSR und die T2M) auf die Straßen. Das Modell wurde so konfiguriert, dass die Wetterdaten aus dem vorherigen Schritt verarbeitet werden. Da die Berechnung des Temperaturverlaufs in Verkehrsflächenbefestigungen sehr rechenintensiv ist, wurde das Modell derart optimiert, dass die Vernetzung des Modells so grob wie möglich, jedoch nur so fein wie nötig ist. Die anderen Konfigurationen des Modells wie beispielsweise die Berechnungsschrittweite, die Toleranz der Konvergenz und das Speichern der Ergebnisse wurden ebenfalls optimiert, um die Berechnung zu beschleunigen.

Im nächsten Schritt wurden die mechanischen Modelle für die Baustoffe Beton und Asphalt erstellt, um die Auswirkungen der Temperaturänderung auf die Nutzungsdauer (ND) der

Verkehrsflächenbefestigungen (zulässige Lastwechselzahl) zu untersuchen. Die Eingabedaten für die thermische Belastung stammten aus dem thermischen Modell. Das mechanische Modell für Beton basierte auf dem Verfahren nach RDO Beton, Entwurfsfassung (2018) sowie einem FE-Modell aus Neumann und andere (2023). Die mithilfe der Modelle durchgeführte Sensitivitätsanalyse der ND hat ergeben, dass die Temperatur- und Sonnenstrahlungsänderung einen großen Einfluss auf die ND der Betonbauweise hat:

$$\Delta \mathrm{ND}_B = 2{,}78 \Delta \mathrm{SSR} + 6{,}88 \Delta \mathrm{T2M}$$

Das mechanische Modell für Asphalt basierte auf dem Verfahren gemäß den RDO Asphalt (2009). Um die Erstellung von Klima-induzierten Straßentemperaturkarten (KiST-Karten) für Asphalt zu vereinfachen, wurden ebenfalls die Schadenssummen nach der Regressionsmethode aus Augter und Kayser (2016) (KiST-Methode) berechnet. Die Sensitivitätsanalyse zeigte, dass die Temperaturänderung einen großen Einfluss auf die Schadenssummen beziehungsweise die ND hat:

$$\Delta \mathrm{ND}_A = 10 \Delta \mathrm{T2M}$$

Um die Berechnung der thermischen Belastung sowohl lokal als auch in der Cloud zu automatisieren, wurde das Modell in einem Docker-Container bereitgestellt. Dies erleichterte den Zugang und die Nutzung des Modells erheblich. Der Programmiercode zusammen mit einer Anleitung wurde an den Auftraggeber übergeben, um Daten aus neuen Klimamodellen für die Erstellung und Aktualisierung der Richtlinien zu verwenden.

4 Erstellung der Klimakarten

Weitere Untersuchungen umfasste die Erstellung der Frosteinwirkungszonenkarte (FWZ-Karte) für die RStO (2012) und der KiST-Karte für RDO Asphalt (2009) und RDO Beton (2009).

Eine Erstellung von FWZ-Karten für die historische Referenzperiode 1991 bis 2020 und für zukünftige Klimaperioden unter den Szenarien RCP 2.6, 4.5 und 8.5 wurde vorgenommen, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Frosteindringtiefe zu verstehen. Diese Karten basieren auf dem 30-jährigen Wiederkehrwert der Frosteindringtiefe, die aus der Dauer und Intensität von Frostperioden mit negativen Mitteltemperaturen abgeleitet wird. Längere Frostperioden führen zu einer tieferen Frosteindringung, was insbesondere für den frostsicheren Unterbau im Straßenbau relevant ist. Die FWZ-Karten für die Referenzperiode zeigen, dass sich die Frosteindringtiefe bereits heute verringert hat und dass sich diese Tendenz unter den verschiedenen Klimaszenarien in unterschiedlichem Maße fortsetzen wird. Dies bedeutet, dass in vielen Regionen Deutschlands in der Zukunft der frostsichere Unterbau von Straßenbauwerken weniger stark ausgeführt werden könnte als bisher, insbesondere unter der Annahme der Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5. Unter den Annahmen eines RCP2.6 ist keine wesentliche Veränderung der Frosteindringtiefe zu erwarten. Obwohl die detaillierten FWZ-Karten für die zukünftigen Perioden noch nicht verfügbar sind, ist die allgemeine Verringerung der Frosteindringtiefe ein klares Zeichen für die Veränderungen, die der Klimawandel mit sich bringt. Die Anpassung des frostsicheren Unterbaus an die veränderten Bedingungen könnte zu Kostenersparnissen im Straßenbau führen und eine effizientere Nutzung von Ressourcen ermöglichen. Insgesamt bieten die FWZ-Karten eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die Planung einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Infrastruktur, die die Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt und in praktische Planungs- und Bauüberlegungen integriert werden kann.

Die Erstellung der KiST-Karten für die Asphaltbauweise der Referenzperiode 1991-2020 und zukünftige Klimaperioden basieren auf der KiST-Methode nach Augter und Kayser (2016).

Diese Darstellung ermöglicht es, räumliche Unterschiede im Ausmaß des thermischen Schädigungspotenzials klar zu identifizieren. Die Ergebnisse des Projekts zeigen klar, dass Asphaltbeläge in der Zukunft aufgrund erhöhter Temperaturen besonderen thermischen Belastungen ausgesetzt sein werden. Die erwarteten Änderungen in der Gesamtschädigung sind für die Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 so erheblich, dass die derzeit höchsten beobachteten Schädigungswerte in der Zukunft aller Voraussicht nach an allen Standorten in Deutschland übertroffen werden. Die KiST-Karten bieten dabei eine Orientierungshilfe, um Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren und umzusetzen.

Die Erstellung der KiST-Karten für die Betonbauweise beruht auf einer Kombination der Ergebnisse aus thermisch-mechanischer Modellierung mit Wetter- und Klimadaten, siehe auch Villaret und andere (2019). Bei diesem Prozess wurden die Ergebnisse von Punkt-Berechnungen zum mechanischen äquivalenten Temperaturgradienten in der Betondecke in Beziehung zu Klimavariablen gesetzt. Da sich die Solarstrahlung in den Klimamodellen durch zunehmende Perioden mit hoher Sonnenscheindauer kaum oder nur moderat verändert, war auch die Änderung des mechanischen äquivalenten Temperaturgradienten und dessen Häufigkeitsverteilung relativ gering. Diese Verteilung, beziehungsweise deren 90. Perzentil, wurde auf den KiST-Karten für Beton dargestellt. Die KiST-Karten für Beton bieten eine wichtige Orientierungshilfe, um zukünftige Schäden zu minimieren und die Betonstrukturen effektiver an die erwarteten klimatischen Bedingungen anzupassen. Sie ermöglichen eine gezielte Planung und Umsetzung von Bau- und Instandhaltungsarbeiten, die auf die spezifischen Anforderungen und Risiken jeder Region abgestimmt sind.

5 Auswirkungen des Klimawandels auf die Regelwerke

Die Aktualisierung der KiST-Karten hat ergeben, dass die Frosteindringtiefe durch den Klimawandel insgesamt abnehmen wird, was zu niedrigeren Material- und Bauaufwendungen für den Frostschutz von Straßenoberbauten führen dürfte. Auf der anderen Seite werden sich die thermischen Randbedingungen,

insbesondere für Asphalt-, aber auch für Betonoberbauten, verschlechtern. Dies erfordert Anpassungen sowohl in den Konstruktionsmethoden als auch in der Dicke der Konstruktionen und den gewählten Materialparametern. Solche Anpassungen müssen sich auch in den Regelwerken niederschlagen, um den neuen Herausforderungen gerecht zu werden. Unter Klimaszenario RCP2.6 waren jedoch nur wenig signifikante Änderungen im Vergleich zur Referenzperiode zu erwarten. Jedoch zeigten die Szenarien RCP4.5 und 8.5 bereits in naher Zukunft relevante Änderungen, die unter RCP8.5 besonders verstärkt waren. Dies unterstrich die Notwendigkeit, künftige Bauprojekte und Infrastrukturmaßnahmen an die erwarteten klimatischen Bedingungen anzupassen.

Ebenso wichtig ist das kontinuierliche Klima-Monitoring. Dies spielt eine entscheidende Rolle bei der Entscheidungsfindung über Anpassungsprozesse und ermöglicht es, auf Basis der wahrscheinlichsten Entwicklungen der zukünftigen Treibhausgasemissionen und den damit verbundenen klimatischen Veränderungen zu planen. Ein regelmäßiges Monitoring bietet die notwendige Datengrundlage, um auf Veränderungen zeitnah und effektiv reagieren zu können und ist somit unerlässlich für die nachhaltige Gestaltung und Erhaltung der Infrastruktur. Dafür wurden Schwellenwerte mit der Sensitivitätsanalyse für die Aktualisierung der KiST-Karten bestimmt: Fünf Jahre Reduzierung der ND. Für FWZ-Karten ist die Sensitivitätsanalyse nicht möglich und die Schwellenwerte für die Aktualisierung wurden nicht festgelegt. Diese Schwellenwerte sind relevant um sicherzustellen, dass die Karten stets aktuell und repräsentativ für die aktuellen Umweltbedingungen sind.

6 Zusammenfassung und Folgerung für die Praxis

Das Ziel, ein Verfahren zur Anpassung der Regelwerke zur rechnerischen und empirischen Dimensionierung an den Klimawandel auf Basis projizierter Klimadaten zu erstellen, wurde erreicht. Die Erweiterbarkeit dieses Verfahrens und des entsprechenden Programmiercodes ermöglichen eine zukünftige Aktualisierung der KiST-Karten mit den neuen Klimaszenarien, neuen Dimensionierungsmodellen sowie neuen Klimamodellen.