

Überprüfung und Bewertung der Frostdimensionierung nach den RStO

FA 5.148

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau
(Prof. Dr.-Ing. habil. F. Wellner)

Bearbeiter: Patzak, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Dezember 2009

1 Aufgabenstellung

Die Dimensionierung des Straßenaufbaus erfolgt derzeit in Deutschland auf Grundlage von Erfahrungen mit dem Ziel, ein ausreichendes Tragverhalten und eine ausreichende Frostsicherheit für den festgelegten Nutzungszeitraum zu gewährleisten.

Die derzeitigen Frostschutzmaßnahmen basieren auf den Erfahrungen der vergangenen Jahrzehnte in der Bundesrepublik Deutschland. Die hierbei maßgebenden klimatischen Bedingungen resultieren aus dem Winter des Jahres 1962/63, dem strengsten Winter seit 1933. Die regionalen Temperaturunterschiede dieses "Bemessungswinters" spiegeln sich in den festgelegten Frostindizes wider. Der Frostindex wird als Produkt aus negativer Tagesmitteltemperatur der Luft (gemessen in 2,0 m Höhe über dem Erdboden) und der Einwirkdauer definiert. Folglich wird der Frostindex zusammen mit der Einheit Gradtage ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$) verwendet. Die Temperatursummenkurve negativer Gradtage ist somit ein Indikator für eine aufgetretene Kälteperiode. Definitionsgemäß können sich Kälteperioden aus einzelnen Frostperioden zusammensetzen, wenn der zwischen den Kälteperioden liegende Zeitraum mit positiven Tagesmitteltemperaturen (Tautage) nicht mehr als 2 Tage umfasst. Auf Basis festgelegter Frostindexbereiche wird in Deutschland zwischen drei maßgebenden Frosteinwirkungszonen unterschieden, die bei der Bemessung des frostsicheren Oberbaus gemäß den RStO berücksichtigt werden.

Ansätze zur Abschätzung der Frosteinwirkungen auf Basis des Frostindex reichen bis in das 19. Jahrhundert (Lamé u. Clapeyron 1831; Stefan 1881 u. a.) zurück. Viele später durchgeführte Untersuchungen griffen die Ansätze auf und entwickelten diese weiter. Die Anfänge stellten hierbei einfache lineare Zusammenhänge dar, welche im weiteren Verlauf bis zur Mehrschichtentheorie reichten. Im Mittelpunkt stand häufig der Ansatz über einen funktionalen Zusammenhang die Frosteinwirkung aus dem Frostindex zu bestimmen. Zusätzliche Randbedingungen werden durch spezifische Koeffizienten berücksichtigt.

Grundsätzlich ist bekannt, dass Frosteinwirkungen bis deutlich unter das Straßenplanum auftreten können. Erfahrungen frostsicherer Straßen des klassifizierten Straßennetzes haben jedoch gezeigt, dass die Dicke des frostsicheren Oberbaus in einer Dicke von etwa 2/3 der maximalen Frosteinwirkung ausreichend ist, um Frostschäden zu vermeiden.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Überprüfung und Aktualisierung der Dimensionierung des frostsicheren Oberbaus nach den RStO 2001. Grundlage hierfür stellen aktuelle Klimadaten, numerische Berechnungsverfahren und statistische Auswertungsmethoden dar, mit denen Frosteinwirkungen bestimmt und analysiert werden. Mittels numerischer Simulationsrechnungen werden die Temperaturen in der Fahrbahn und im Untergrund sowie die Frosteinwirkung über mehrere aufeinanderfolgende Jahre berechnet. Somit können bestehende funktionale Zusammenhänge, wie u.a. die Abhängigkeit der

Frosteinwirkung vom Frostindex explizit überprüft und Optimierungen bzw. mögliche Alternativen aufgezeigt werden. Besonderes Augenmerk wird auf den Verlauf der Frosteinwirkung gelegt. Dabei soll explizit analysiert werden, welche Auswirkungen verschiedene Unterbrechungszeiträume auf die Frostindexbestimmung und folglich auf die prognostizierte Frosteinwirkung haben. Weitere Einflussgrößen, wie die Datengrundlage oder das Schichtensystem (Bauklasse), werden in der Untersuchung ebenfalls berücksichtigt.

Der unterschiedliche, mehrschichtige Fahrbahnaufbau in Verbindung mit den möglichen Straßenbaustoffen macht es zudem erforderlich, Einflüsse thermophysikalischer Materialparameter sowie verschiedener Schichtdicken zu erfassen. Durch numerische Simulation instationärer Temperaturfelder können hierbei Veränderungen der Frosteinwirkung berechnet und differenziert werden. Das vorliegende Forschungsvorhaben baut auf dem Forschungsprojekt FA 5.144 "Aktualisierung der Frostdimensionierung im Straßenbau" auf, bei dem für 221 Messstationen die Frostindizes der letzten 50 Jahre statistisch ausgewertet wurden. Die Ergebnisse dieses Projekts werden für das vorliegende Forschungsvorhaben herangezogen, um auf Basis dieser Daten mögliche auftretende Frosteinwirkungen und die daraus resultierenden notwendigen Dicken des frostsicheren Oberbaus zu berechnen und mit den gemäß den RStO vorgegebenen Dicken des frostsicheren Oberbaus zu vergleichen.

2 Untersuchungsmethodik

Schwerpunkt und Kern des Forschungsprojekts ist die numerische Simulation von Temperaturen in der Straßenbefestigung und im Untergrund. Damit werden Temperaturen in Mehrschichtensystemen über mehrere aufeinanderfolgende Jahre im Allgemeinen und negative Temperaturen (bezogen auf die Grad-Celsius-Skala) und folglich Frosteinwirkungen im Speziellen berechnet. Die numerischen Simulationsrechnungen basieren auf einem an der Technischen Universität Dresden entwickelten Berechnungsmodell zur eindimensionalen instationären Temperaturfelderfassung.

Zwingend notwendige Randbedingung für Temperaturberechnungen ist die Kenntnis lokaler klimatischer Einflussfaktoren. Diese stellen in Kombination mit den thermophysikalischen Materialparametern und der Schichtenstruktur des konstruktiven Straßenoberbaus und des Untergrunds die maßgebenden Einflussgrößen dar. Klimatische Einflussfaktoren umfassen u. a. die Lufttemperatur, den Bewölkungsgrad, den Niederschlag und die Globalstrahlung. Unter die thermophysikalischen Materialparameter fallen u. a. die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität sowie die Temperaturleitfähigkeit. Die Struktur des Mehrschichtensystems "Fahrbahn" wird in Anlehnung an ausgewählte Bauklassen nach den RStO 2001 und damit durch Schichtenanzahl und Schichtdicke festgelegt.

Die unterschiedlichen Schichten der Fahrbahnkonstruktion sind im Zuge der Temperaturfelderfassung differenziert zu berücksichtigen. Während thermophysikalische Materialparameter gebundener Oberbauschichten (Asphalt, Beton) temperaturunabhängig verwendet werden können, sind ungebundene Gesteinskornmische wie die Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) und der Untergrund zwingend temperaturabhängig zu berücksichtigen. Neben dem Korngerüst und der Luft enthalten Gesteinskornmische zusätzliche Wasseranteile. Wasser besitzt die Eigenschaft, seinen Aggregatzustand temperaturabhängig zu verändern, woraus materialspezifische Besonderheiten resultieren. Beispielsweise werden temporäre strukturelle Änderungen der Stoffmatrix bei gleichzeitiger Änderung der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität hervorgerufen, wodurch die Modellierung erheblich erschwert wird.

Geeignete theoretische Modellansätze sollen deshalb das bestehende Berechnungsverfahren erweitern, um realitätsnahe Temperatursimulationen für ungebundene Mehrschichtensysteme durchführen zu können. Die Validierung der Simulationsergebnisse erfolgt anhand von Bodentemperaturmessungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

Aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren auf die Frosteindringung werden Sensitivitätsuntersuchungen hinsichtlich der Frosteindringung für verschiedene Fahrbahnkonstruktionen (Bauklassen) durchgeführt. Hierbei werden die Einflusscharakteristiken einzelner Einflussgrößen analysiert und repräsentative Referenzparameter abgeleitet.

Die numerische Simulation der Frosteindringung in die Fahrbahnkonstruktion und den Untergrund wurde über einen Zeitraum von 15 aufeinanderfolgenden Jahren auf Basis der Klimadaten verschiedener Wetterstationen des DWD durchgeführt. Für die berechneten Frosteindringungen wurde im weiteren Untersuchungsablauf überprüft, ob ein funktionaler Zusammenhang zum Frostindex hergestellt werden kann und welche funktionale Formulierung am geeignetsten erscheint. Das hierfür erarbeitete Auswertungsverfahren wurde programmiertechnisch derart realisiert, dass der Frostindex und damit eine zugeordnete Frosteindringung für beliebige Unterbrechungszeiträume berechnet werden konnte. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden Unterbrechungszeiträume der Kälteperiode von bis zu 4 Tautagen berücksichtigt. Dabei konnte der Einfluss der Unterbrechungsdauer auf die Frosteindringung und damit auch auf den Zusammenhang zwischen Frostindex und Frosteindringung explizit analysiert werden.

Weiteres Ziel war es, die Ergebnisse des Forschungsprojekts FA 5.144 "Aktualisierung der Frostdimensionierung im Straßenbau" zu verwenden, um durch die Kopplung zu den Ergebnissen der numerischen Simulationsrechnungen Rückschlüsse über mögliche auftretende Frosteindringungen zu erhalten. In Anlehnung an Häufigkeiten und Wiederkehrwerte maximal aufgetretener Frostindizes werden Frosteindringungen berechnet und zugeordnet. Durch wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtungen werden zusätzliche Sicherheitsniveaus der berechneten Frosteindringung festgelegt. Schlussendlich wird die derzeitige Frostsicherheit überprüft und bewertet. Im Flussdiagramm (Bild 1) ist zur Verdeutlichung der grundlegende Untersuchungsablauf schematisch dargestellt.

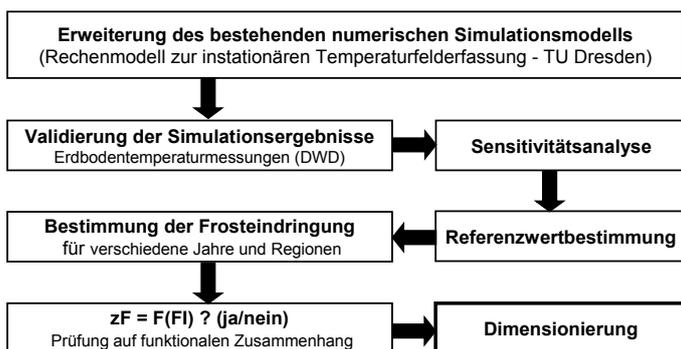


Bild 1: Schematischer Untersuchungsablauf

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Sensitivität

Im ersten Untersuchungsteil wurden die Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt. Deren Ergebnisse lieferten die Grundlage für die weitergehenden Simulationsrechnungen. Ziel hierbei war die Einschätzung der Auswirkungen ausgewählter Untersuchungsgrößen auf die Frosteindringung. Die potenziellen Einflussgrößen für das Schichtensystem der Fahrbahn einschließ-

lich des anstehenden Untergrunds sind äußerst vielfältig. Aus den unterschiedlichen Bauklassen und Bauweisen sowie den im Straßenbau eingesetzten verschiedenen Baustoffen resultiert ein sehr breites Materialparameterspektrum. Ingenieurtechnische und praxisnahe Gesichtspunkte führten zur Begrenzung des Untersuchungsumfangs, um die angestrebten Berechnungen im zeitlichen Rahmen zu ermöglichen.

Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass die thermisch bedingten Eigenschaften jeder untersuchten Schicht der Fahrbahnkonstruktion (gebundener Oberbau, ungebundene Tragschicht und Untergrund) Einfluss auf das Temperaturfeld der Gesamtkonstruktion und damit auch auf die Frosteindringung haben. Aus dem definierten Spektrum möglicher thermischer Materialparameter konnte herausgearbeitet werden, welchen Einflusscharakter die untersuchten Einzelschichten aufweisen. Des Weiteren wurde dargestellt, dass die Kombination günstiger bzw. ungünstiger thermischer Materialparameter des gesamten Mehrschichtensystems zu erheblichen Differenzen der Frosteindringung führen kann.

Zusätzlich wurde das spektrale Reflexionsverhalten des gebundenen Oberbaus sensitiv erfasst. Dadurch konnte gezeigt werden, dass sowohl der kurzwellige als auch der langwellige Reflexionsgrad zu Veränderungen des Temperaturfelds in der gesamten Fahrbahnkonstruktion und damit auch zu veränderten Frosteindringungen führt. Deutlich wird hierbei auch, dass gerade für die derzeit verwendeten vielfältigen Asphaltgemische das Verständnis thermophysikalischer und spektraler Eigenschaften dringend zu erweitern ist.

Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass der Gesamtschichtenaufbau des thermisch betrachteten Mehrschichtensystems Einfluss auf die Frosteindringung hat. Unabhängig von den gewählten Parameterkombinationen des Schichtensystems wurde gezeigt, dass mit einer Zunahme der Stärke des frostsicheren Oberbaus eine temporär schnellere Durchfrierung und damit größere Frosteindringung einhergeht.

3.2 Prognostizierung der Frosteindringung auf Grundlage dimensionierungsrelevanter Frostindizes

Auf Basis der thermischen Materialparameteranalyse der Sensitivitätsrechnungen wurde anhand der numerisch simulierten Temperaturen in der Fahrbahnkonstruktion und im Untergrund überprüft, ob auf Basis einzelner Ausgangsdaten (Lufttemperatur, Einwirkdauer) Zusammenhänge zur Frosteindringung hergestellt werden können. Zusätzlich wurde untersucht, welche Einflüsse bei der Ableitung relevanter funktionaler Zusammenhänge von Bedeutung sind.

Grundlage der Berechnung waren Klimadaten von 10 Messstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) über einen durchgehenden Zeitraum von 15 Jahren. Die Frosteindringungen wurden sowohl stündlich als auch über 24 h gemittelt berechnet. Für die Auswertung der Berechnungsergebnisse wurden Selektionsalgorithmen und verschiedene Untersuchungsebenen verwendet, um unterschiedliche Herangehensweisen berücksichtigen und direkt vergleichen zu können. Unter der Durchführung paralleler Berechnungsalgorithmen ist zu verstehen, dass die gesuchten Output-Faktoren (Frostindex und Frosteindringung) randbedingungsabhängig berechnet werden. Die verschiedenen Untersuchungsebenen erlauben schrittweise gezielte Datenselektion sowie Fehler- und Plausibilitätsprüfungen.

Der Frostindex (FI) wurde sowohl auf Basis der Lufttemperatur FI_{TL} als auch auf Basis der Fahrbahnoberflächentemperatur FI_{TFO} berechnet. Zusätzlich wurde eine Differenzierung der Frostunterbrechungsdauer bei der Berechnung des Frostindex von 0 bis maximal 4 Tagen berücksichtigt. Die Frosteindringung (Z_F) wurde ebenfalls für zwei mögliche Fälle unterschieden.

Zum einen wurden stündliche Frosteindringungen ($z_{F(SW)}$) berechnet und zum anderen tägliche, d. h. über 24 h gemittelte Frosteindringungen ($z_{F(MW)}$) bestimmt. Aus dem berechneten Gesamtdatenpool konnten verschiedene Zuordnungen (Wertepaare) gebildet werden. Jedem sowohl auf Basis der Luft- als auch auf Basis der Fahrbahnoberflächentemperatur berechneten Frostindex wurde die numerisch simulierte Frosteindringung zugeordnet. Mit der Zuordnung von zwei Frosteindringungen pro Frostindex und 0 bis maximal 4 möglichen Tautagen standen folglich 10 unterschiedliche Datenpools zur Auswertung zur Verfügung.

3.3 Einfluss der Frostunterbrechungsdauer auf die Prognosefunktion

Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass die Zunahme des Frostindex eine qualitative Erhöhung der Frosteindringung mit sich bringt. Für die funktionale Beschreibung des empirischen Zusammenhangs lieferte eine 3-parametrische logarithmische Funktion die beste Anpassungsgüte. Bestätigt wurde somit, dass auf Basis des Frostindex die Frosteindringung prognostiziert werden kann.

Die Untersuchung des empirischen Zusammenhanges zwischen Frostindex (FI) und Frosteindringung (z_F) zeigte jedoch auch, dass lokale Zuordnungsprobleme feststellbar sind. Es ist bekannt, dass die Bildung der Temperatursummenkurve problembehaftet ist, wenn die Summe der Temperaturen der Tautage größer ist als die Summe der Temperaturen von Tagen mit negativer Tagesmitteltemperatur. Ebenfalls ungeeignet sind Frostindizes bei einer gleichzeitig vorliegenden Frosteindringung von 0 cm. Dieser Sachverhalt liegt dann vor, wenn die Lufttemperatur negative, die Fahrbahnoberflächentemperatur jedoch positive Grad-Celsius-Temperaturen aufweist. Folglich kann keine Frosteindringung existieren.

Neben diesen bereits bekannten ungeeigneten Zuordnungen, die eine untergeordnete Bedeutung haben, wurden im Zuge der vorliegenden Untersuchung zwei weitere Problempunkte herausgearbeitet. Zum einen führen definitionsgemäße Berechnungen der Frostindizes dazu, dass zu Berechnungsbeginn nicht geprüft und ausgeschlossen werden kann, dass völlige Frostfreiheit (ausschließlich positive Temperaturen in Fahrbahn und Untergrund) vorliegt. Zum anderen treten bei vergleichsweise großen Frostindizes nicht zwangsläufig große Frosteindringungen auf. Diese "kritischen" Zuordnungsprobleme wurden explizit definiert, um eine entsprechende Datenanalyse und -selektion vornehmen zu können.

Im Ergebnis wurde eine Referenzfunktion zur Prognose der Frosteindringung auf Basis des Frostindex bestimmt. Anhand der Referenzfunktion konnte untersucht werden, welche Differenzen zu erwarten sind, wenn sich Einflussgrößen für die Berechnung funktionaler Zusammenhänge ändern. Hierbei konnte dargestellt werden, dass die maximal zulässige Frostunterbrechung (Tautage) bei der Berechnung des Frostindex, Einfluss auf die Prognosefunktion zur Bestimmung der Frosteindringung hat. Explizit konnte aufgezeigt werden, dass eine steigende Frostunterbrechungsdauer zu reduzierten prognostizierten Erwartungswerten der Frosteindringung führt.

3.4 Einfluss des thermischen Schichtensystems/Bauklasse

In den Sensitivitätsuntersuchungen wurde u. a. erarbeitet, dass die Dicke des frostsicheren Oberbaus und damit die Bauklasse Einfluss auf die Tiefe der Frosteindringung hat. Mit der entsprechenden relativen bauklassenabhängigen Veränderung der zu erwartenden Frosteindringung ergibt sich folglich ein Funktionskorridor, der die prognostizierte frostindex- und bauklassenabhängige Frosteindringung wiedergibt. Mit Bezug auf die Referenzbauklasse (BK III) und dem daraus resultierenden Erwartungswert der Frosteindringung wurde gezeigt, dass thermisch bedingte Mehr- und Minderdicken bei verändertem Schichtensystem (Bauklasse) zu berücksichtigen sind.

Am Beispiel der explizit untersuchten Bauklassen SV, III und V wurde dargelegt, dass bei gleichem Frostindexwert und Bauklasse SV Mehrdicken von 5 cm sowie bei Bauklasse V Minderdicken von 5 cm gegenüber dem Referenzschichtensystem (BK III) prognostiziert werden können.

3.5 Einfluss der Datengrundlage

Im Weiteren wurde überprüft, ob mögliche Einschränkungen zu erwarten sind, wenn die Referenzfunktion als Prognosefunktion zur Bestimmung der Frosteindringung beliebigen Stichproben genügen soll. Konkret wurde untersucht, ob für beliebige nicht selektierte Ausgangsdaten dimensionierungsrelevante Einschränkungen zu erwarten sind, wenn die Referenzfunktion zur Prognose der Frosteindringung Verwendung findet. Für die Bewertung möglicher Überschreitungen berechneter Frosteindringungen wurden zusätzliche Quantilfunktionen festgelegt. Für diese Funktionen wurden festgelegte Sicherheitsniveaus α_i (90, 95 und 99 %) bei einseitiger Verteilung verwendet, da ausschließlich die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des prognostizierten Erwartungswerts der Frosteindringung von Bedeutung ist.

Auf Basis des zur Auswertung zur Verfügung stehenden Datensatzes konnte festgestellt werden, dass die Lage der Wertepaare im Vergleich zum Erwartungswert vorrangig im vergleichsweise kleinen Frostindexbereich zu Überschreitungen führte. Grundsätzlich bietet jedoch die vom Sicherheitsniveau abhängige Prognose der Frosteindringung die Möglichkeit, einzelfallspezifische Entscheidungshilfe und folglich auch Entscheidungssicherheit für die frostsichere Dimensionierung zu geben.

4 Folgerungen für die Praxis

Für die Dimensionierung von Straßenkonstruktionen ist es grundsätzlich erforderlich, die zu erwartenden klimatischen und damit auch winterlichen Randbedingungen zu kennen, um über den angestrebten Benutzungszeitraum das Auftreten von Schadenshäufigkeiten zu reduzieren. Bekanntes Schädigungspotenzial für Straßenkonstruktionen in den Wintermonaten stellen sowohl die Prozesse beim Gefrieren des im Boden vorhandenen Wassers als auch der Tragfähigkeitsverlust des Untergrunds infolge ungenügender Drainagefähigkeit in der Tauphase dar. Deshalb wurde im Zuge der vorliegenden Untersuchung geprüft, welche Frosteindringung in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren zu erwarten ist. Da sich Fahrbahnkonstruktionen durch unterschiedliche Schichten, Schichtdicken und vor allem unterschiedliche Baustoffe auszeichnen, stellt sich die thermophysikalische Erfassung als äußerst komplex dar. Im Zuge der durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen wurde auf Basis praxisnaher Kennwerte und Annahmen gezeigt, dass die einzelnen Subschichten teilweise erheblichen Einfluss auf die maximalen Frosteindringungen haben können. Deshalb ist die Kenntnis nicht nur tragfähigkeitsrelevanter, sondern auch thermophysikalischer Materialparameter für jegliche Temperaturbetrachtungen essenzielle Voraussetzung. Bereits die Untersuchung der Eigenschaften gebundener Oberbauschichten in Verbindung mit den Reflexionseigenschaften zeigte deren relevanten Einfluss auf die Frosteindringung. Gerade für die derzeit verwendeten vielfältigen Asphaltgemische ist das Verständnis thermophysikalischer und spektraler Eigenschaften dringend zu erweitern. Auch für die Betrachtung ungebundener Schichten sind zustandsabhängige differenzierte Betrachtungen notwendig, um beispielsweise Aufschluss über den temporären Wassergehalt und die schichtenspezifische Wasserverteilung zu erhalten. Die Bestätigung des generellen

Zusammenhang zwischen Frostindex und Frosteindringung in modifizierter Form stellt den Ausgangspunkt des Dimensionierungsverfahrens und gleichermaßen die Schnittstelle zur Frosteinwirkungszonenkarte sowohl auf Basis des maximalen Frostindex (FIX) als auch auf Basis der 30-jährigen Wiederkehrwerte des maximalen Frostindex (FI30) dar.

Derzeitiger Dimensionierungsausgangspunkt ist der Winter 1962/63, der, wie auch im Forschungsprojekt FA 5.144 gezeigt, von seinen klimatischen Randbedingungen in ähnlicher Form bisher nicht wieder auftrat. Die deshalb vergleichend betrachteten, auf ökonomischen Überlegungen basierenden 30-jährigen Wiederkehrwerte der maximalen Frostindizes sind gebietsspezifisch zum Teil geringer, führen aber in Verbindung mit den Untersuchungsergebnissen zu sehr ähnlichen Dicken im Vergleich zum aktuellen frostsicheren Oberbau, sodass die in den RStO festgelegten Schichtmächtigkeiten des frostsicheren Oberbaus im Wesentlichen bestätigt werden. Im Rahmen der untersuchten Schichtensysteme (Bauklassen) konnte auch gezeigt werden, dass thermisch bedingte bauklassenspezifische Unterschiede vorliegen, die zu unterschiedlichen Prognosewerten der Frosteindringung und damit auch zu unterschiedlichen Ausgangsdicken des frostsicheren Oberbaus führen.

Zeitgemäße, möglichst genaue numerische Temperatursimulationen führen jedoch nur dann zu ökonomischem und ressourcenschonendem Materialeinsatz, wenn die aus der prognostizierten Frosteindringung resultierende frostsichere Dimensionierung gleiche Aufmerksamkeit erfährt. Deshalb bedarf der aktuelle empirische Ansatz für die Festlegung der Richtwerte des frostsicheren Straßenaufbaus aus der zu erwartenden Frosteindringung einer dringenden Überprüfung.