



# DIPLOMARBEIT

## Master Thesis

### **Berücksichtigung der Frosteinwirkung in der Oberbaubemessung**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

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

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Lukas Eberhardsteiner

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Kristina Bayraktarova

E230

Institut für Verkehrswissenschaften

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Peter Heldrung

1528016

Am Graben 1A, 83043 Bad Aibling



## **Kurzfassung**

Die Straßenoberbaurichtlinie in Österreich stellt ein Bemessungsverfahren zur Verfügung, welches die Auswahl eines standardisierten Straßenaufbaus ermöglicht. Dabei erfolgt keine gesonderte Berücksichtigung der Frosteinwirkung. Allerdings wird explizit die Möglichkeit eingeräumt, eine Schichtdickenanpassung, bei schlechten hydrogeologischen Bedingungen sowie bei einer wahrscheinlich zu erwartenden ungünstigen Frosteinwirkung vornehmen zu können. Somit ergibt sich ein großer Anpassungsspielraum in der Richtlinie.

Zu Beginn der Arbeit wird der Mechanismus der Eislinsenbildung geschildert, um die schädigende Wirkung der Frosteinwirkung auf den Straßenoberbau näher zu erläutern. Auch wird der Stand der Technik bei der Frostdimensionierung in Deutschland, der Schweiz und den USA beschrieben. Vor diesem Hintergrund wurde eine telefonische Umfrage durchgeführt, mit dem Ziel nähere Informationen zur gewählten Frostdimensionierung zu erhalten. Hierbei wurden Vertreter der Bundesländer und der ASFINAG befragt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Recherche und der Umfrage wird versucht einen vereinfachten Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Frosteinwirkung für eine Frostdimensionierung in Österreich zu definieren. Das Vorgehen wird durch eine softwaregestützte Temperatureindringungsberechnung überprüft.

## Abstract

The current pavement design guideline in Austria provides a number of different standardized pavement structures. This guideline does not consider a specific adjustment of the layer thicknesses because of frost action. It is the responsibility of the designer to take measures in order to avoid frost damage if the frost penetration is expected to reach a critical depth or the pavement structure is built under difficult hydrogeological conditions. Thus, there is no uniform approach in each federal state in Austria.

The first part of the thesis deals with the ice lens theory and the mechanism of frost damage. Furthermore, the frost pavement design procedures in the guidelines and standards of Germany, Switzerland and the USA are described. Consequently, a telephone survey was conducted with representatives of the federal states to gather information about the chosen frost design approach. The result of the survey and the literature research shows the necessity of a user-friendly frost design approach in the austrian pavement guideline. So the next step was to find a simplified relation between air freezing temperature and frost penetration to estimate and adjust the thickness of the unbound layers. By using a one-dimensional finite-difference solution that is implemented in a software tool for the temperature simulation of the pavement layers it could be shown that a parabolic relation between freezing temperature and frost penetration exists. Further steps are necessary to implement a simplified equation for each standardized pavement structure in the design guideline.

---

# Inhaltsverzeichnis

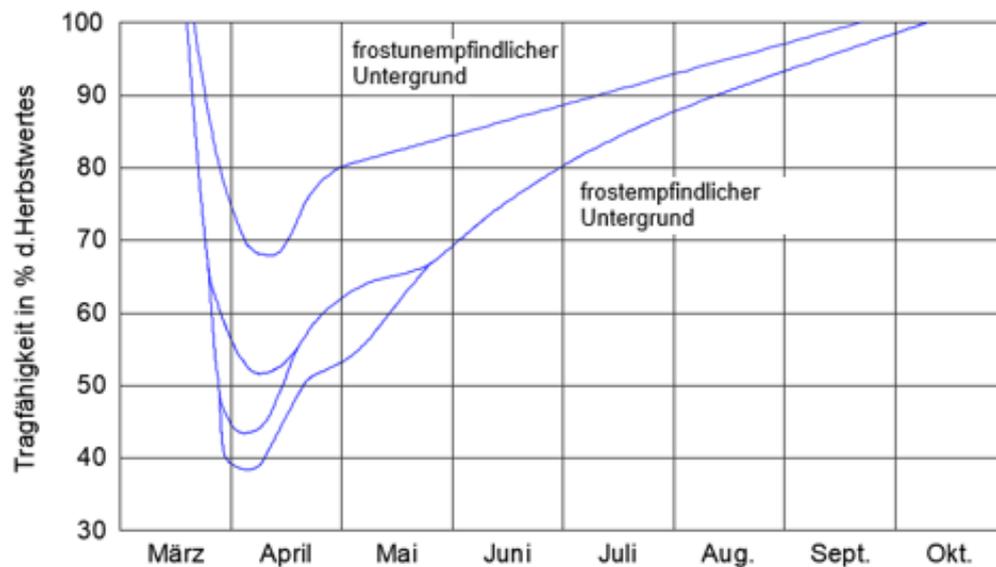
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>7</b>
1.1	Hintergrund und Problemstellung.....	7
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	8
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Frosteinwirkung</b> .....	<b>9</b>
2.1	Eislinsenbildung und Frostschäden .....	9
2.1.1	Wasser im Boden .....	15
2.1.2	Frostempfindlicher Boden .....	18
2.1.3	Frostindex und Frosteindringung .....	24
2.2	Einflussgrößen .....	28
<b>3</b>	<b>Bemessung der Frostsicherheit im Straßenoberbau</b> .....	<b>32</b>
3.1	Bemessung in Österreich .....	32
3.2	Umfrage zur Frostbemessung in Österreich .....	39
3.3	Bemessung in Deutschland.....	43
3.4	Bemessung in der Schweiz .....	50
3.5	Bemessung in den USA .....	55
<b>4</b>	<b>Entwicklung einer Methodik zur Berücksichtigung der Frosteinwirkung bei der Dimensionierung von ungebundenen Tragschichten</b> .....	<b>66</b>
4.1	Abgrenzung und Eingangparameter.....	66
4.2	Herangehensweise und Ergebnisse.....	68
<b>5</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>75</b>
5.1	Abbildungsverzeichnis .....	76
5.2	Tabellenverzeichnis .....	78
5.3	Quellenverzeichnis .....	80
5.4	Berechnungsergebnisse .....	85
5.5	Interviews .....	91



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Problemstellung

Neben der einwirkenden mechanischen Verkehrsbelastung wird der Straßenaufbau während seiner Lebensdauer auch durch klimatische Einwirkungen beansprucht. In den Wintermonaten kann Frosteinwirkung zu Fahrbahnschädigungen führen. Einerseits führt die Umwandlung von in den Fahrbahnkörper eingedrungenen Wasser zu Eis zu einer Volumenvergrößerung. Diese Volumenvergrößerung wiederum begünstigt oberflächennahe Rissbildungen und beim Auftauen des Eises können Schlaglöcher entstehen. Andererseits dringt bei länger anhaltender Frosteinwirkung die 0°-Isotherme in tieferliegende Straßenschichten ein. Dies führt dazu, dass sich bei ungünstigen Randbedingungen ein Eislinnenwachstum einstellt, was Frosthebungen des Straßenoberbaus zur Folge hat und beim Auftauen ebenfalls die Tragfähigkeit durch Bodenaufweichung herabsetzt. Nachstehend ist eine jahreszeitliche Darstellung (siehe Abbildung 1) des Zusammenhanges zwischen Frostempfindlichkeit und Tragfähigkeit eines Straßenuntergrundes, bezogen auf die Tragfähigkeit im Herbst. Der Tragfähigkeitsverlust in den wärmeren Frühlingsmonaten ist deutlich zu erkennen.



**Abb. 1 : Jahreszeitliche Tragfähigkeitsänderung des Untergrundes modifiziert aus (Wistuba, Litzka et al. 2001)**

Um den Folgen der Frosteinwirkung entgegenzuwirken fungieren im Straßenbau die ungebundenen Tragschichten als Frostschutzschichten. Diese gewährleisten, bei intakten Entwässerungsvorkehrungen in Kombination mit dem Einsatz von frostunempfindlichem Material, eine Unterbindung des Eislinnenwachstums. In der österreichischen Oberbaubemessung für standardisierte Straßenaufbauten (RVS 03.08.63) erfolgt keine geregelte Schichtdickenanpassung der ungebundenen Tragschichten. Dies kann allerdings projektspezifisch notwendig sein, wenn eine sehr hohe Frosteinwirkung zu erwarten ist. Die Berücksichtigung der Erhöhung der ungebundenen Tragschichten liegt in der Verantwortung der jeweiligen Planungsstelle.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel der Arbeit ist es Kenntnisse über das Vorgehen der Frostdimensionierung zu schaffen. Einerseits soll dies durch eine Literaturrecherche zur Frostdimensionierung in der Schweiz, Deutschland und den USA erreicht werden. Weiters soll eine telefonische Umfrage in Österreich durchgeführt werden, um die zu erwartenden landesspezifischen Unterschiede in der Schichtdickenanpassung bzw. der Frostdimensionierung zu ermitteln. Hierbei werden acht Teilnehmer aus jeweils verschiedenen Bundesländern interviewt. Die Gespräche werden aufgezeichnet und daraus eine Transkription erstellt, eine zusammenfassende Darstellung ist der Arbeit beigelegt. Die Ergebnisse werden aus datenschutzrechtlichen Gründen anonymisiert dargestellt.

Weiter erfolgt die Entwicklung einer vereinfachten Frostdimensionierungsmethode für die standardisierten Oberbautypen. Hierzu soll ein grundsätzliches Vorgehen geprüft werden unter Zuhilfenahme, des mittels Finiten-Analyse Tool umgesetzten, Temperaturdifferenzverfahrens. Durch Temperaturberechnungen an einem gewählten Straßenaufbau soll der isoliert betrachtete Zusammenhang der maximalen Frosttemperatur und der Frosteindringung untersucht werden und ob sich daraus eine Dimensionierungsgleichung ableiten lässt. Durch das Einsetzen einer minimalsten Lufttemperatur ergibt sich eine angenäherte Frosteindringung, die in der Oberbaubemessung herangezogen werden kann, um gegebenenfalls die Dicke der ungebundenen Tragschichten anzupassen.

## 2 Grundlagen der Frosteinwirkung

### 2.1 Eislinnenbildung und Frostschäden

Unter atmosphärischen Druckverhältnissen gefriert Wasser bei einer Temperatur von  $0^{\circ}\text{C}$ . Verlagert sich die  $0^{\circ}$ -Isotherme, die Frostgrenze, aufgrund von Frostwetter in den Boden entstehen gefrorene Bodenbereiche. In dieser Frosttiefe gefriert das vorhandene Porenwasser zu Eis, was zu einer Volumenvergrößerung von ca. 9% führt. Der Prozess der sofortigen und unmittelbaren Eisbildung wird *in-situ freezing* (Takagi 1980) genannt.

Daneben existiert ein weiterer Mechanismus, bei dem Wasser im Boden gefrieren kann, der Prozess der Eislinnenbildung. Hierbei wandern Wassermoleküle, ausgehend von einem Wasserreservoir, zur Eislinne. Dieser Vorgang wird *segregation freezing* genannt (Takagi 1980). Zur Darstellung dieses Vorgangs wird in der Literatur überwiegend ein theoretisches Modell verwendet, welches nach den Arbeiten von (Konrad und Morgenstern 1980) zusammengestellt wurde. Dieses ist in Abbildung 2 ersichtlich. Dabei bildet sich die Eislinne im unteren Bereich der gefrorenen Bodenzone im Grenzbereich zum sogenannten *frozen fringe*, auch Frostsaum genannt (Konrad und Morgenstern 1980). Der Frostsaum umfasst den Bereich zwischen der  $0^{\circ}$ -Isotherme (Frostfront) und der unteren Schicht der Eislinne (Gefrierfront). Der Boden ist hier zwar auch gefroren aber beinhaltet keine eigenen Eislinnen.

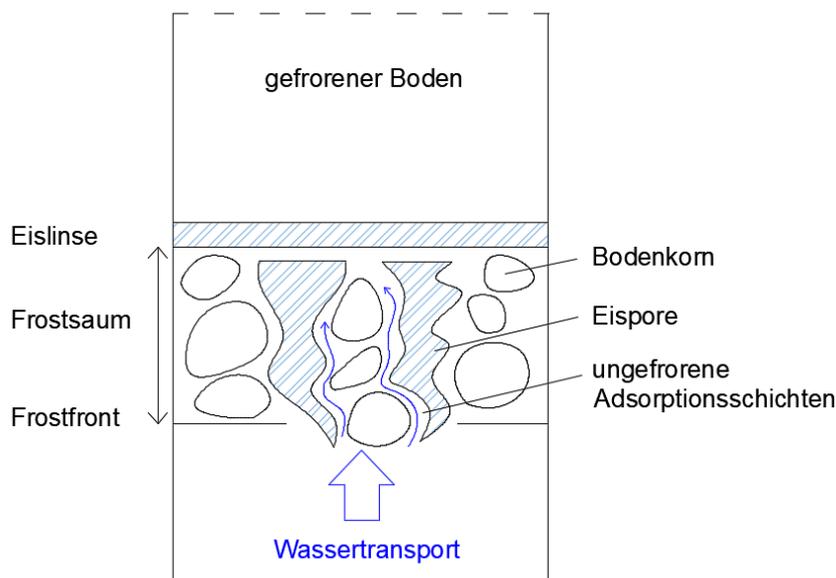


Abb. 2: Schema der Eislinnenbildung nach (Lottmann 2003)

Der Zustrom von Wassermolekülen durch den *frozen fringe* zur Eislinne ist nur mittels vorhandenem Porenwasser nicht zu erklären. Vielmehr ist dieses teilweise gefroren (Eisporen) und nur bedingt leitfähig im Frostsaum. Die Adsorptionsschichten, die sich um die Bodenpartikel befinden, weisen hingegen einen Gefrierpunkt auf, der deutlich unter  $0^{\circ}\text{C}$  liegen kann (Lottmann 2003). Somit kann der Wassertransport an den Hydrathüllen der Bodenpartikel erfolgen, obwohl der umliegende Boden bereits gefroren ist (Takagi 1980).

Die hydraulische Leitung hin zur Gefrierfront entsteht durch eine Sogwirkung, die auch Gefriersog genannt wird. Der Sog entsteht aus einer intermolekularen Wechselwirkung zwischen Eis- und Bodenpartikel, dies bewirkt ein Druckunterschied in den adsorptiven Wasserschichten (Rempel,

Wettlaufer et al. 2004). Dadurch wird bei der Bildung von Eislin sen zunächst das umliegende Wasser angesaugt und anschließend auch Wasser aus den angrenzenden Adsorptionsschichten (Takagi 1980). Das nun fehlende Wasser in der Hydrathülle wird durch ein benachbartes Ion, der angrenzenden Hülle, nachgezogen. Dadurch rücken kontinuierlich Wassermoleküle auf. Auch die Volumenvergrößerung durch Eisbildung führt zu einem Sogeffekt. Ergänzend zur schematisch dargestellten Eislin senbildung in Abbildung 2, ist in Abbildung 3 ein Versuchskörper dargestellt. Es lassen sich deutlich die Eislin senlagen erkennen.

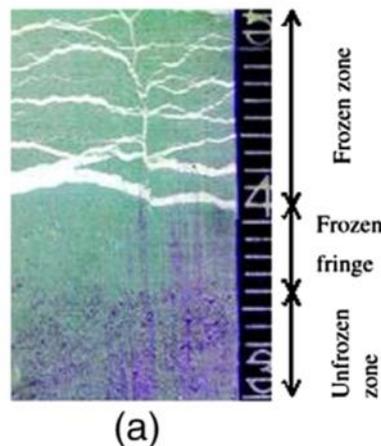


Abb. 3 - Netzartige Eislin senstruktur, *frozen fringe* (Azmatch, Se go et al. 2011)

Es existiert derzeit keine praktische Berechnungsmethode zur genauen Bestimmung des Gefrier sogs bzw. der Saugspannung, die alle physikalischen Randbedingungen berücksichtigt. Auch gibt es keine Prognosemöglichkeit, um die Lage und Dicke der Eislin se im Boden zu bestimmen. Als gesichert gilt, dass die Dicke abhängig von den Temperaturgradienten, der Höhe der Saugspannung und der Wasserdurchlässigkeit des Bodens ist (Unold 2006). Die Bereiche im Boden lassen sich anhand der Temperatur eingrenzen. Unterhalb der Eislin se befindet sich die Segregationstemperatur  $T_s$  (Konrad und Morgenstern 1980).  $T_s$  ist kleiner als die Temperatur an der Frostfront mit  $T_i = 0^\circ \text{C}$ , die *in-situ freezing*-Temperatur, dazwischen befindet sich der Frostsaum (Konrad und Morgenstern 1980).

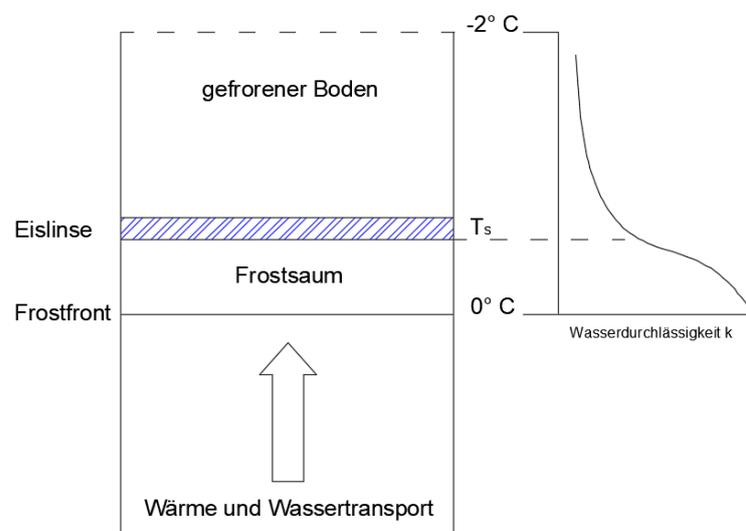


Abb. 4 - Temperatur und Wasserdurchlässigkeit nach (Unold 2006)

Die Wasserdurchlässigkeit nimmt mit absinkender Temperatur hin zur Temperatur  $T_s$  ab (vgl. Abbildung 4). Beim Phasenübergang des nachströmenden Wassers zu Eis, wird Umwandlungswärme freigesetzt. Ist der Betrag gleich der entzogenen Energie beim Gefriervorgang, dann wird eine Eislinsenbildung im *frozen fringe* verhindert und es stellt sich ein kontinuierlicher Zustrom ein, der ein stationäres Eislinsenwachstum zur Folge hat (Konrad und Morgenstern 1980). Dies führt zur Entstehung von dickeren Eislinsen (Lottmann 2003), die unter anderem in Permafrostböden (vgl. Abb. 5) eine Dicke von mehreren Metern erreichen können (Unold 2006).



Abb. 5 - Eislinse im Boden des Adventdalen auf Spitzbergen (Dege 2012)

Verringert sich die Durchlässigkeit weiter, dann strömt weniger Wasser nach und die freigesetzte Umwandlungswärme wird kleiner als die Gefriertemperatur. Dadurch verschiebt sich der Frost nach unten in den Boden. Bei raschem Eindringen der  $0^\circ$ - Isotherme, infolge von starkem Frost, bilden sich mehrere dünnere Eislinsen (vgl. Abbildung 3). (Benson und Othman 1993, Lottmann 2003)

#### Frostschäden infolge Eislinsenbildung

Frosthebungen können durch *in-situ freezing* und der reinen Volumenzunahme, bei der Phasenumwandlung von Wasser zu Eis, in Oberflächennähe induziert werden. Wird die Volumenausdehnung, durch umschließende Flächen im Zuge von Frostversuchen behindert, baut sich eine Druckspannung auf. Wird der Grenzzustand zwischen Frostdruckkraft bzw. Auflast und Eigengewicht überschritten, folgen Frosthebungen. Die volumetrischen Frosthebungen lassen sich auch durch hohe Auflasten  $> 10 \text{ N/mm}^2$  nicht abschwächen (Fillibeck 2012), allerdings werden die Spannungen durch die Hebungen abgebaut.

Der zusätzliche entscheidend schädigende Mechanismus für Straßenoberbauten ist der Vorgang der Eislinsenbildung. Für exakte Frosthebungsberechnungen werden zahlreiche Randbedingungen benötigt, unter anderem Kenntnisse über anzutreffende Böden, die Lage und das Vorhandensein von Wasserreservoirs. Eine genaue Bestimmung der zu erwartenden Volumenänderung ist anhand von Frosthebungsversuchen, der jeweiligen Bodenproben möglich. Aus Versuchen ist bekannt, dass die Frosthebungen induziert durch das Eislinsenwachstum, abhängig sind von Auflasten. Nach (Konrad 1994, Kellner 2007) baut die Auflast, den Unterdruck bzw. die Höhe der Saugspannung ab. Daneben ist der Unterdruck abhängig vom Bodenmaterial und dem Temperaturgradienten. Baupraktisch lässt sich die Hebung des Eislinsenwachstums, durch dicke Oberbauschichten mit erhöhten Eigengewicht, einschränken.

Der Zusammenhang zwischen volumetrischer Hebung und Hebung infolge Eislinsenbildung ist in Abb. 6 dargestellt. Dies ist das Ergebnis einer rechnerischen Simulation von Versuchsergebnissen

(Kellner 2007), die drei Hebungsphasen definiert. In der ersten Phase kommt es zu reinen volumetrischen Hebungen, wie zuvor beschrieben durch *in-situ freezing* und raschen Eindringen der 0°-Isotherme. In der zweiten Phase stellt sich durch ein verlangsamtes Fortschreiten der Gefrierfront eine stationäre Eislinsenbildung ein, die schließlich in der dritten Phase alle weiteren Hebungen verursacht.

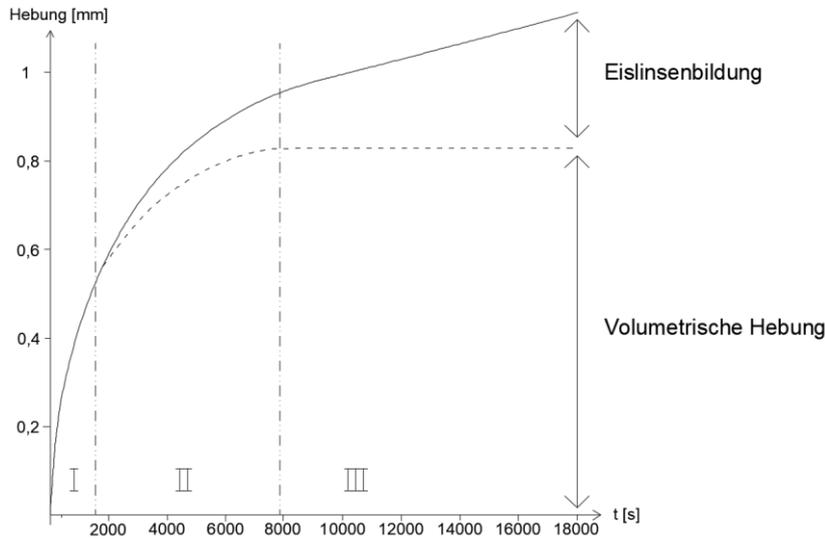


Abb. 6 - Hebungsanteile aus *in-situ freezing* und Eislinsenbildung (Kellner 2007)

Sichtbare Frostschäden infolge Eislinsenbildung entstehen durch unregelmäßige Frosthebungen am Straßenkörper. Begünstigt durch unterschiedliche Wassergehalte bzw. durch unregelmäßiges Vorhandensein von Wasseransammlungen sowie durch unterschiedliche Frosteindringungstiefen. An Straßenrändern verringert sich die Wärmeleitfähigkeit durch bewachsene Bankettbereiche oder durch Schneeansammlung (FGSV 2013). Temperaturmessungen an Straßenkörpern (vgl. Abb. 7) belegen, dass die Frosteindringung in Straßenmitte, dies entspricht der durchgezogenen Linie in der rechten Teilgrafik, weiter fortschreiten kann. Die ungleichmäßigen Hebungen sind bei Asphaltstraßen anhand einer wellenartigen Fahrbahnoberfläche zu erkennen. Auch bei Betondecken kann es zu Frosthebungen kommen, dies führt u.a. zu unterschiedlichen Höhenlagen der Betonplatten im Fugenbereich.

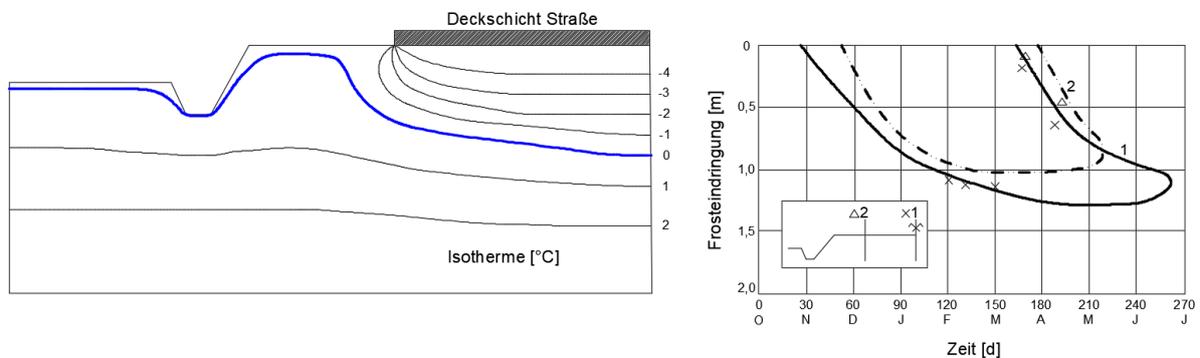
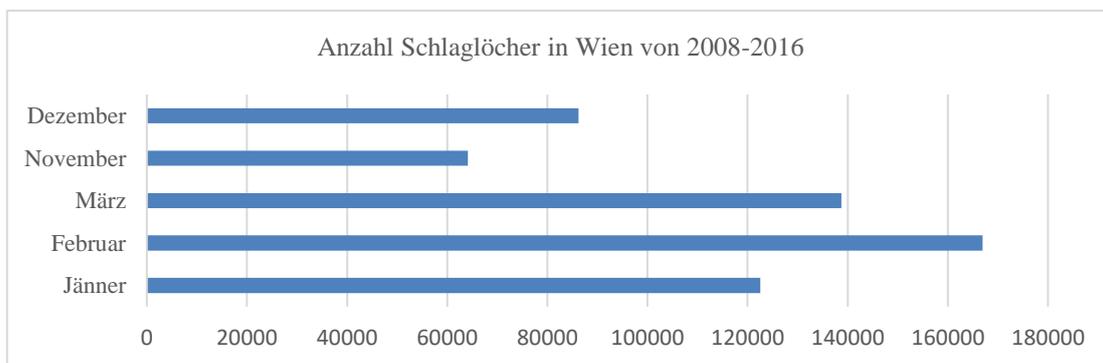


Abb. 7 - Prognostizierter veränderlicher Verlauf der Isotherme nach 150 Tagen (links), gemessene Frosteinträngung Straßenrand und Straßenmitte (rechts), für einen Straßenquerschnitt in Quebec modifiziert nach (Konrad 1994)

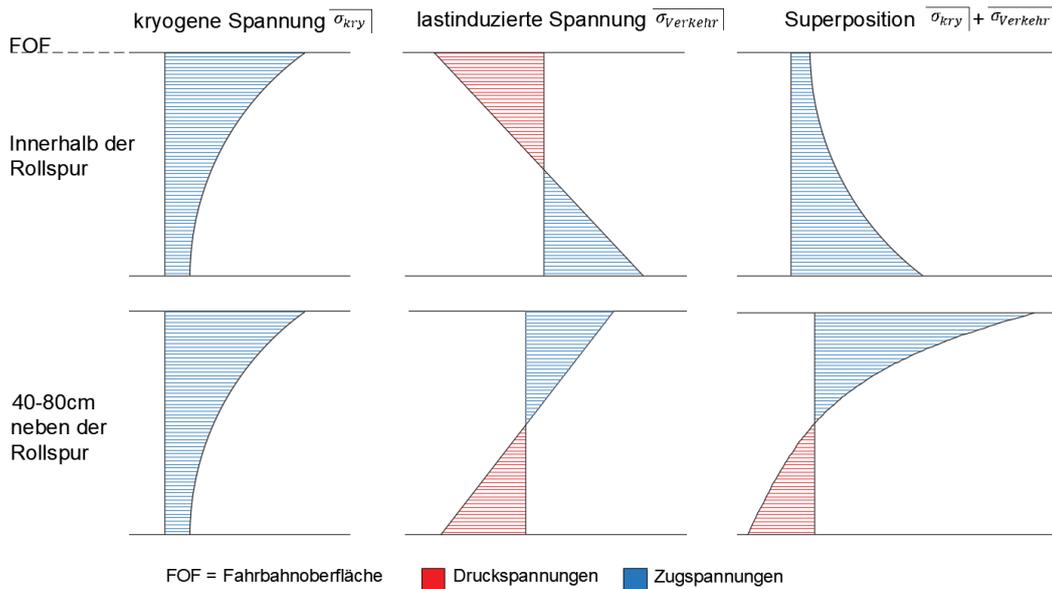
Beim jahreszeitlichen Wechsel führt das Auftauen von Eisanreicherungen zu einer Umstrukturierung im Bodengefüge. Sowohl bei oberflächennahe Eisanreicherungen als auch bei meist tiefer

liegenden Eislinsen. Dies kann die Wasserdurchlässigkeit von Bodenschichten erhöhen, durch die Ausbildung von Makroporen und durch Rissbildungen im Bodengefüge infolge der Volumenreduzierung (Unold 2006). Erhöhte Wasserdurchlässigkeit ist ein begünstigendes Wachstumskriterium für Eislinsen, bei erneuten Frostperioden. Andererseits wäre eine hohe Wasserdurchlässigkeit zum Zeitpunkt des Auftauens wünschenswert, um das Schmelzwasser zügig aus dem Straßenaufbau abzuführen. Die Entwässerung ist allerdings durch tieferliegende gefrorenen Schichten behindert und zudem abhängig von der Durchlässigkeit der Bodenart. Das Wasser führt zu Aufweichung und Umstrukturierung im Boden. Die frühjahreszeitlichen Tragfähigkeitsverluste (Abbildung 1) von frostempfindlichen Böden können, in Verbindung mit einwirkenden Verkehrslasten, u.a. zur Ausbildung von Schlaglöchern führen. Ausgehend von Daten der MA 28, der Stadt Wien ist in Abb. 8 die kumulierte Anzahl der Schlaglöcher für den Stadtbereich Wien dargestellt. Im Stadtstraßenbereich ist aufgrund der oft anzutreffenden seitlichen Bebauung, der verstärkten Entwässerungsvorkehrungen, der klimatologischen Einflussfaktoren und dem genaueren Wissensstand von anstehenden Grundwasser eher von oberflächennahen volumetrischen Hebungen und Auftauschäden auszugehen. Dennoch verdeutlicht die Auswertung den Anstieg der Schäden in den frühjahreszeitlichen Monaten.



**Abb. 8 - Kumulierte Anzahl der Schlaglöcher von 2008 bis 2016 (MA 28 Stadtentwicklung und Stadtplanung)**

Asphalt, als zusammengesetzter Baustoff aus Gesteinskörnung und Bitumen, ist hinsichtlich seiner Festigkeitseigenschaften abhängig von der Temperatur. Das Materialverhalten führt bei starker Kälteeinwirkung zur erhöhter Steifigkeit. Die niedrige Temperatur bewirkt zudem ein Zusammenziehen des Asphaltkörpers. Die Bewegung wird durch den steifen Verbund der Straße in Längsrichtung behindert und es entstehen sogenannte kryogene Zugspannungen (Wistuba 2006). Diese thermisch induzierten mechanischen Spannungen führen, durch das eingeschränkte Relaxationsverhalten des Asphalts bei niedrigen Temperaturen, bei Erreichen der Zugfestigkeit zum Riss (Wistuba, Lackner et al. 2006). Die Kälterisse in der Asphaltdeckschicht verlaufen dabei quer zur Längsrichtung. Die kryogene Spannung  $\sigma_{kry}$  sowie die Versagenstemperatur  $T_{Ausfall}$  können anhand des Abkühlversuches TSRST (*tensile stress restrained specimen test*) gemäß ÖNORM EN 12697-46 ermittelt werden.



**Abb. 9 - Schematische Darstellung - Superposition der kryogenen Spannung und lastinduzierten Spannung in einer Asphalttragschicht nach (Arand 2004)**

Wie Abbildung 9 zeigt, wirkt  $\sigma_{kry}$  an der Fahrbahnoberfläche als Zugspannung und nimmt mit der Eindringung in den Asphaltkörper ab. Darüber hinaus erfahren die Schichten eine lastinduzierte Spannung durch Lasteinwirkung des Straßenverkehrs  $\sigma_{Verkehr}$ . Die Last wird am Berührungspunkt Deckschicht – Reifen eingeleitet und führt zu oberflächennahen Druckspannungen. Hingegen tritt  $\sigma_{Verkehr}$  im Abstand von ca. 40 – 80 cm als Zugspannung auf (Arand 2004). Dort befindet sich, nach Superposition von  $\sigma_{kry}$  und  $\sigma_{Verkehr}$ , die maximale Zugspannungsbeanspruchung der Asphaltdeckschicht. Unter starker Frosteinwirkung können so längslaufende Kälterisse auftreten (vgl. Abbildung A2). (Arand 2004, Wistuba 2006)



**Abb. 10 - links: versiegelter Riss quer zur Fahrbahn (WAPA 2018); rechts: Längsriss infolge starker Abkühlung und Verkehrsbelastung (Wistuba 2006)**

Betonfahrbahnen erfahren im Winter eine Schädigung durch Frost-Tau-Wechselbeanspruchung. Dabei kann flüssiges Wasser durch den Einsatz von Taumittel durch bestehende Risse in den Betonkörper eindringen. Durch die Volumenvergrößerung beim Gefriervorgang kommt es dann zu Abplatzungen und Fahrbahnschädigungen. Neben den rissinduzierten Schädigungen, dient das Mikroislinsenmodell nach Setzer (Setzer 2002, Stark und Wicht 2013) zur Beschreibung der Frosteinwirkung im Beton (siehe Abb. 11):

Dabei beschreibt Setzer ein Drei-Phasen-Gleichgewicht, aus flüssigen Wasser, Wasserdampf und im Makrobereich Eis, das sich durch Eindringung der  $0^{\circ}$ -Isotherme in die Betonschicht einstellt. Durch das voranschreitende Gefrieren entsteht ein Unterdruck im ungefrorenen Gelporenwasser, das zur Kontraktion der umgebenden Betonmatrix führt. Wird ein kritischer Druckunterschied überschritten und das sogenannte mechanische Stabilitätskriterium verletzt, dann wandert das Gelwasser zur Mikroeislinse und gefriert.

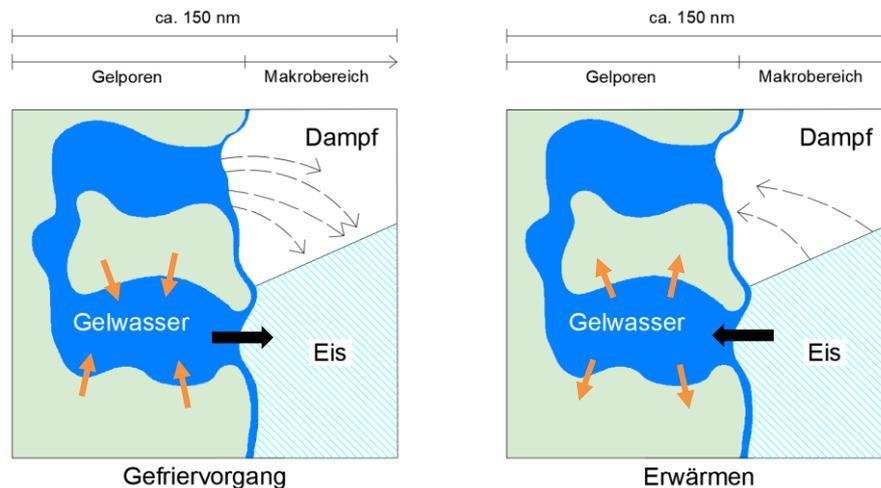


Abb. 11 – Schematische Darstellung Mikroeislinnenmodell nach (Setzer 2002)

Findet eine Erwärmung statt, dann dehnt sich die umgebende Matrix wieder aus. Allerdings verbleibt ein Großteil des gefrorenen Gelporenwassers an der Eislinse. Dies führt zu einer zusätzlichen Ansaugung von ungefrorenem Wasser (Taumittelsatz) in die Gelporen, dieses Phänomen wird als „Mikroeislinnenpumpe“ bezeichnet. Der Sättigungsgrad des Betons steigt mit den Frost-Tau-Wechseln an und führt zur Schädigung des Betongefüges.

Damit der Vorgang der Eislinnenbildung im Boden ablaufen kann, müssen drei Voraussetzungen gegeben sein, es muss Wasser im Boden, eine Frosttemperatur bzw. Frosteinwirkung sowie eine generelle Frostepfindlichkeit des Bodens vorliegen. Diese Kriterien werden auf den folgenden Seiten näher beschrieben.

### 2.1.1 Wasser im Boden

Der Boden besteht aus einem Feststoffgerüst aus Partikeln mit je nach Bodenart unterschiedlichen Partikeldurchmessern von Ton ( $d < 0,002$  mm) bis zu Stein ( $d > 60$  mm). Zwischen den Partikeln befinden sich die Poren, die Hohlräume des Bodengerüsts. Die Anzahl der Poren und ihre Durchmesser sind wiederum abhängig von der Dichte des Bodens sowie seiner Partikelgröße. Diese können entweder wassergefüllt, gasgefüllt oder beides sein.

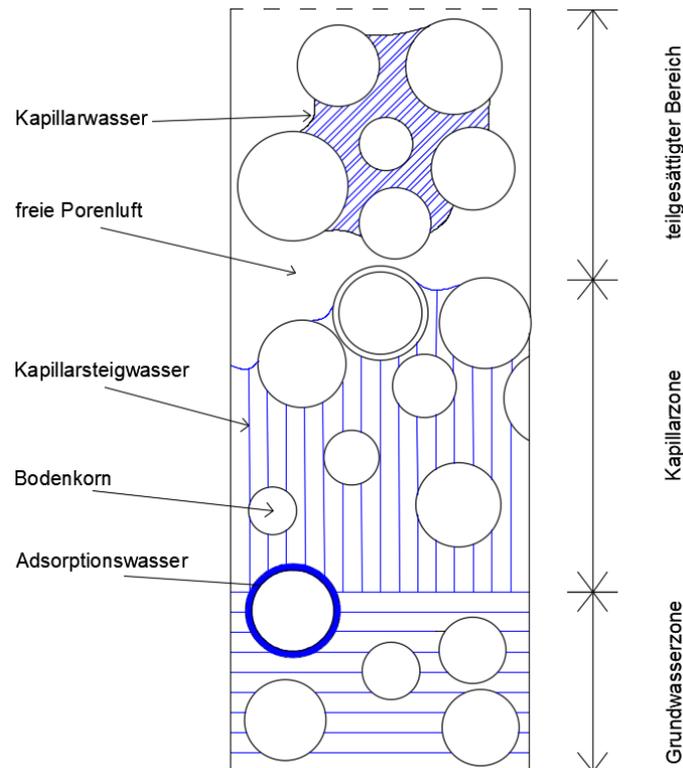


Abb. 12 - Porenwasser im Boden nach (Boley, Adam et al. 2012)

Das Wasser, das nicht in Form von Schichten um die Bodenpartikel gebunden ist, heißt Porenwasser. Dieses ist in der gesättigten Bodenzone, dem Grundwasserbereich, das freie Wasser (siehe Abbildung 12). Im eingeschlossenen Kapillarbereich bzw. der Kapillarzone befindet sich das Kapillarsteigwasser, die Poren in dieser Zone sind alle mit Kapillarwasser gefüllt (Boley, Adam et al. 2012). Der Bereich bildet sich aufgrund der aktiven Kapillarität, d.h. das Wasser steigt kapillar vom Grundwasserspiegel bis zur Höhe  $h_{ka}$  auf, während im teilgesättigten Bereich das Kapillarwasser aufgrund passiver Kapillarität hängen bleibt (Boley, Adam et al. 2012, Möller 2013).

Die physikalischen Anziehungskräfte der Kohäsion sowie der Adhäsion sind die Ursache der Kapillarität. Durch Kohäsion ziehen sich die Wasserstoffmoleküle gegenseitig an, durch die Adhäsion wird das Wasser von der einschließenden Oberfläche angezogen (Eichler, Kronfeldt et al. 2016). Ist die Adhäsion größer als die Kohäsion, dann benetzt das Wasser möglichst viel der Oberfläche, dadurch entsteht eine nach oben gerichtete Kraft aufgrund der Oberflächenspannung (Eichler, Kronfeldt et al. 2016). Die Kohäsion wirkt dagegen, sodass sich ein konkaver Wasserkörper bildet, der tragende Meniskus (Lottmann 2003). Das Wasser steigt bis zu einer begrenzenden Höhe auf. Die kapillare Steighöhe  $h_{ka}$  ist generell abhängig vom Porendurchmesser und durch folgende Formel definiert (Möller 2013):

$$h_k = \frac{4 \cdot \sigma_0 \cdot \cos \alpha}{d \cdot \gamma_w} \quad [1]$$

$\sigma_0$  = die Oberflächenspannung, abhängig von der Temperatur [N/cm<sup>2</sup>]

$\alpha$  = Benetzungswinkel, abhängig von der Bodenart

$d$  = Durchmesser der Porenkanäle [cm]

$\gamma_w$  = Wichte des Wassers [N/cm<sup>3</sup>]

- Je kleiner der Durchmesser der Porenkanäle im Boden, desto größer ist die kapillare Steighöhe.

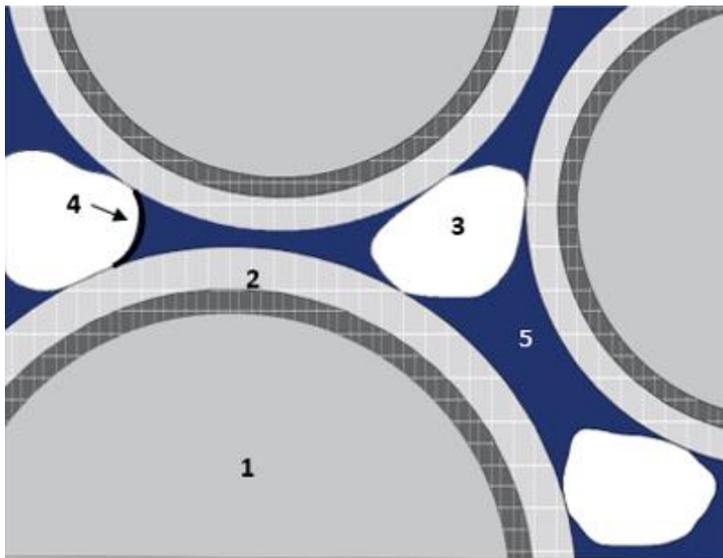
- So lässt sich auch die Höhe  $h_{kp}$  bestimmen, die Höhe in Folge der passiven Kapillarität bzw. die Höhe der Rückhaltung (Boley, Adam et al. 2012). Bei einer Grundwasserabsenkung senkt sich auch das Kapillarsteigwasser  $h_{ka}$  aus dem Baugrund ab, das darüberliegende Kapillarwasser bleibt davon unberührt und wird durch die Kapillarwirkung, der passiven Kapillarität, im teilgesättigten Bereich gehalten (vgl. Abbildung 12) (Möller 2013). Es hält sich durch die kapillaren Kräfte, die größer als die Schwerkraft sind, in den kleinsten Poren und ist wie die aufsteigende Höhe  $h_{ka}$ , durch die Porengröße begrenzt. So kann absickerndes Wasser in oberen Bodenschichten gehalten werden.

Somit kann in Abhängigkeit der geologischen Bedingungen und des Baugrundes, die Kapillarität zu einer Wasseransammlung in frostgefährdeten Bodenzonen führen. Allerdings haben Böden mit größerer Kapillarität, kleinere Porendurchmesser sowie eine geringere Durchlässigkeit für Wasser und somit insgesamt ein geringeres Wassertransportvermögen (FGSV 2013). Dies schwächt den Wasserzufluss infolge Sogwirkung zur Eislinse ab, jedoch mindert es wiederum die Fähigkeit des Versickerns von Oberflächenwasser. Kapillaraktive Böden bzw. Böden mit hohen Feinanteilen haben eine negative Auswirkung auf die Frostsicherheit. Eine Aufstellung von Erfahrungswerten für  $h_{kp}$  nach Bodenarten bzw. Korngröße (siehe Tabelle 1) zeigt, dass vor allem Schluff- und Tonanteile eine große kapillare Rückhaltehöhe ermöglichen.

**Tabelle 1 - Erfahrungswerte für die kapillare Rückhaltehöhe  $h_{kp}$  (Möller 2013)**

	d [mm]	$h_{kp}$ [m]
Grobkies bis Mittelkies	63 – 20	bis 0,05 m
Grobsand	2,0 – 0,63	0,5 m
Mittel- Feinsand	0,63 – 0,063	1,0 m
Schluff	0,063 – 0,002	5 m
Ton	< 0,002	50 m

Wasser im Boden, das von Bodenteilchen gebunden wird nennt man Adsorptionswasser. Es umhüllt ein Mineralkorn in mehreren Schichten mit Schichtdicken von einigen Molekülen, dabei gehen die negativ geladenen Bodenteilchen mit den positiv geladenen Wasserstoff-Ionen eine Bindung ein (Lottmann 2003). Wobei einige Tonminerale eine starke negative Ladung aufweisen, dadurch kann die Schichtdicke für das gesamte gebundene Wasser um ein Tonmineral  $2,5 * 10^{-8}$  m betragen (Boley, Adam et al. 2012). In der schematischen Darstellung in Abbildung 13 sind die Adsorptionsschichten bewusst überhöht dargestellt. Auch dargestellt ist der tragende Meniskus, der sich aus der zuvor beschriebenen kapillaren Wechselwirkung der Adhäsion und Kohäsion ergibt. Die starke Bindungsenergie zwischen Wasser und Tonmineral führt zu einer Herabsetzung der Gefriertemperatur für das Adsorptionswasser, dadurch können auch gefrorene Böden mit hohem Anteil an Feinanteilen eine Wasserwanderung über die Adsorptionsschichten hin zur Eislinse ermöglichen (Takagi 1980, Lottmann 2003, Unold 2006). Neben den mineralogischen Bindungseigenschaften, weisen alle Feinanteile eine vergrößerte Oberfläche auf und können dadurch mit mehr Wasser benetzt werden. Zudem ist die Tiefenlage des Grundwassers von großer Bedeutung für die Frostsicherheit, anstehende Wasseransammlungen sind eine Bedingung für Eislinnenbildung.



- 1) Festes Bodenteilchen
- 2) Adsorptionsschichten
- 3) Luftpore
- 4) Tragender Meniskus
- 5) Kapillarwasser

**Abb. 13 - Schematische Darstellung – Adsorptionswasser, Kapillarwasser mit Meniskus**

Neben dem vorhandenen Bodenwasser wirkt auch Oberflächenwasser auf den Straßenaufbau ein. Der Wassergehalt in den Schichten ist abhängig von der eindringenden Niederschlagsmenge und unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen. Im Zusammenhang mit Frostsicherheit steht eine funktionierende Entwässerung. Zunächst muss Oberflächenwasser von der Fahrbahnoberfläche seitlich abgeführt werden. Weiters sollte seitlich oder durch die Fahrbahn eingedrungenes Wasser, zu keiner Wasseransammlung in einer Straßenschicht führen. Die Entwässerung im Straßenkörper erfolgt über ungebundene Tragschichten und sollte einwandfrei sichergestellt sein (RVS 08.15.01), ohne zusätzliche Feinanteilanreicherungen, die die Durchlässigkeit gefährden. Untersuchungen zur Durchlässigkeit von ungebundenen Tragschichten mittels Infiltrometer-Feldversuchen (Wolf 2014) ergaben, dass die Wasserdurchlässigkeit bzw. der Infiltrationsbeiwert stark vom Baustellenverkehr abhängen, jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zum erreichten Verformungsmodul der ungebundenen Tragschichten besteht. Es wird auf die Notwendigkeit von Feldversuchen zur genauen Ermittlung hingewiesen. Eine indirekte Berücksichtigung der Durchlässigkeit erfolgt in Österreich u.a. durch die Bestimmung der Feinanteilmenge nach Baustelleneinbau bzw. nach Verdichten, in Zuge des Nachweises der Frostsicherheit (Kapitel 3.1).

### 2.1.2 Frostempfindlicher Boden

Für die Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Böden, gibt es mehrere Kenngrößen, die der Klassifizierung und Beschreibung der Bodenmaterialien dienen. Die Zusammensetzung des Bodens ist anhand einer Korngrößenverteilung beschrieben. Sind die Masseanteile [%] der Korngrößenbereiche einer Ausgangsmenge bekannt, dann kann der Boden weiter klassifiziert werden. In Abhängigkeit des Feinkornanteils bzw. der Feinanteile (FA), d.h. aller Anteile  $< 0,063$  mm, lässt sich der Boden einteilen in (ÖNORM B 4400-1): Grobkörnigen Boden (FA  $< 5$  % der Masse); Feinkörniger Boden (FA  $> 40$  % der Masse); Gemischtkörniger Boden (FA zwischen 5 – 40 % der Masse)

Zur Bestimmung der Massenanteile einer Bodenprobe ist eine Siebung an einer Siebanlage vorgesehen. Das Sieblienenverfahren zu Bestimmung der Korngrößenverteilung von Gesteinskörnungen erfolgt nach der ÖNORM EN 933-1. Dies kann nach dem Trockenverfahren oder Nassverfahren erfolgen, wobei gemischtkörniger Boden mit Waschung bestimmt werden soll. Hierbei wird die Bodenprobe gewaschen, getrocknet und gesiebt. Gesiebt wird die Probe nachdem der Feinanteil von der Ausgangsmenge durch Auswaschung separiert ist. Der Feinanteil fällt durch die unterste

Maschenweite von 0,063 mm. Die separierte Feinkornmenge wird in einer Schale aufgefangen, getrocknet, gewogen und schließlich als prozentualer Anteil berechnet nach (ÖNORM EN 933-1):

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100 \quad [2]$$

$f$  = prozentualer Anteil des Durchgangs von Feinanteilen  
 $M_1$  = Trockenmasse der Ausgangsmenge [kg]  
 $M_2$  = Trockenmasse des (gesamten Rückstandes auf 0,063 mm Sieb [kg]  
 $P$  = Masse der Feinkornmenge [kg]

Grobkörniger Boden hat eine geringe Kapillarität (Grobkies ca.  $h_{kp} = 0,05\text{m}$  (siehe Tabelle 1)) und der Wassertransport unter  $0^\circ\text{C}$  ist aufgrund vernachlässigbarer adsorptiver Wasserschichten nicht gegeben. Gefriervorgänge beschränken sich daher auf *in-situ freezing*, ohne Ausbildung von starken Hebungsrücken (Unold 2006). Daher ist das Korngrößenkriterium in den Straßenbaurichtlinien von besonderer Bedeutung. Nach dem Kornkriterium von Casagrande sind Böden als frostempfindlich einzustufen (Ruckli 1950), wenn:

- $C_U > 15$  mit mehr als 3 M.% der Korngrößen 0,02 mm
- $C_U < 5$  mit mehr als 10 M.% der Korngrößen 0,02 mm

Die Ungleichförmigkeitszahl und Krümmungszahl sind definiert als:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad [3]$$

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad [4]$$

$D_x$  = Massenanteil [%] einer Korngröße [mm]

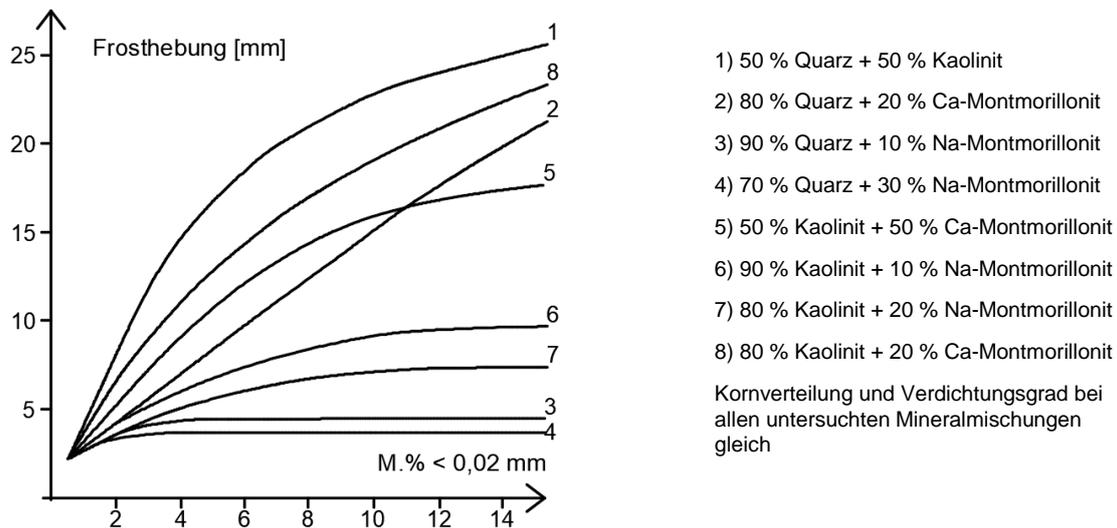
Die durch Krümmungszahl und Ungleichförmigkeitszahl festgelegte normative Bezeichnung der Korngrößenverteilung ist in Tabelle 2 angeführt.

**Tabelle 2 – Korngrößenverteilung nach (ÖNORM B 4400-1)**

Abkürzung	Bezeichnung der Korngrößenverteilung	Krümmungszahl $C_C$	Ungleichförmigkeitszahl $C_U$
W	weitgestufte	$1 < C_C < 3$	$> 15$
G	Gut gestufte oder mäßig verlaufend	$< 1$	6 bis 15
E	Enggestufte bzw. steil verlaufend	$< 1$	$< 6$
I	Intermittierend bzw. stufenförmig	Beliebig (üblicherweise $< 0,5$ )	Üblicherweise hoch

Die Beschränkung des zulässigen Anteils  $< 0,02$  mm auf 3 M.%, findet auch in der österreichischen Normung Anwendung (Kapitel 3.2) und wurde in zahlreichen Frosthebungsversuchen als

gültiges Kriterium nachgewiesen (Waibel 1975). Die Ermittlung des Masseanteils  $< 0,02$  mm erfolgt anhand einer Sedimentationsanalyse oder Siebanalyse mit Maschenweite 0,02 mm (ÖNORM B 4810). Mehrere Versuchsreihen von Frosthebungen führten zur Erkenntnis, dass die Beschränkung auf das Korngrößenkriterium als einziges Kriterium für die Frostsicherheitsbestimmung von ungebundenen Tragschichten, als nicht ausreichend anzusehen ist (Waibel 1975, Brandl 1977, Brandl 2005).



**Abb. 14 - Frosthebungsraten in Abhängigkeit des Kornanteils  $< 0,02$  mm und dem Mineralbestand der Feinanteile für sandige Kiese „Donaukiese“ (Brandl 2005)**

In Abbildung 14 ist deutlich zu erkennen, dass unterschiedliche Mineralkonzentrationen in den Feinanteilen eine in der Höhe unterschiedliche Frosthebung zur Folge haben. Daher wird neben dem Korngrößenkriterium auch das Mineralkriterium in der österreichischen Normung berücksichtigt. Die Festlegung und genaue Angabe der prozentuellen Mineralanteile in der ÖNORM B 4811 gehen auf (Waibel 1975, Brandl 1977) zurück. Dabei wird unterschieden zwischen aktiven und nicht-aktiven Mineralen (siehe Tabelle 3).

**Tabelle 3 – Auszug des Mineralkriteriums aus (ÖNORM B 4811)**

Zulässiger Anteil < 0,02 mm  3 M.% bis maximal 5 M.%	1) Nicht aktive Minerale: 100% sind zulässig 2) Gemenge aus nicht aktiven und aktiven Mineralen sind zulässig, wobei die nachstehend angeführten Grenzwerte (a bis e) nicht überschritten werden dürfen und zusätzlich die folgenden Grenzwerte (f bis i) von Kombinationen der aktiven Minerale nicht überschritten werden dürfen:  a) 10% Kaolinitgruppe b) 30% Chloritgruppe c) 30% Vermikulitgruppe d) 40% Smektitgruppe (z.B. Montmorillonit) e) 50% Glimmergruppe f) 60% Glimmergruppe + Chloritgruppe g) 50% Glimmergruppe + Chloritgruppe + Kaolinitgruppe h) 50% Glimmergruppe + Kaolinitgruppe i) 40% Glimmergruppe + Chloritgruppe + Kaolinitgruppe j) Weitere hier nicht angeführte Mischungen von Schichtsilikaten sind bis zu einer Gesamtsumme von maximal 40% zulässig  Wenn aufgrund einer intensiven rotbraunen Färbung des Materials der Verdacht auf das Vorhandensein von Eisenhydroxiden besteht, sind Frosthebungsprüfungen durchzuführen
---	--

Unter Aktivität ist die Oberflächenaktivität der Minerale zu verstehen, d.h. die Fähigkeit aufgrund ihrer negativ elektrischen Oberflächenladung „aktiv“ auf die Umgebung zu reagieren und Bindungen einzugehen z.B. mit Wassermolekülen (Kolymbas 2011). Als inaktive Minerale sind u.a. Quarz, Feldspat und Karbonate anzusehen, diese weisen auch die geringsten Adsorptionswasserschichten auf (Waibel 1975). Als aktive Minerale werden die Gruppen in Tabelle 3 berücksichtigt. Dabei handelt es sich um Tonminerale die aus Schichtsilikaten aufgebaut sind und deren mikroskopischer Aufbau auf unterschiedliche Anordnung von flachen Plättchen beruht (Kolymbas 2011). Weiters kann differenziert werden in Zweischichttonminerale und Dreischichtminerale, die sich durch eine unterschiedliche Bindungsart im Plättchen- bzw. Schichtaufbau unterscheiden (Götze und Göbbels 2017). Dies führt zu unterschiedlichen Auswirkungen auf die Fähigkeit zur Frosthebung. So hat Kaolinit keine Neigung zur Quellvergrößerung, allerdings sind starke Wasserhüllen vorhanden, die einen Wassernachschub gewährleisten (Waibel 1975). Die Smektitgruppe hat eine hohe Quellfähigkeit, was eine Verstopfung der Poren bedingt und den Wassernachschub entgegenwirkt, allerdings treten Tragfähigkeitsverluste in der Tauperiode auf (Schwaighofer und Kugler 2002). Dieser Zusammenhang verdeutlicht, dass zur Beurteilung der Frostsicherheit auch die jahreszeitlichen Tragfähigkeitsschwankungen der unteren Straßenschichten berücksichtigt werden müssen. Der Mineralgehalt lässt sich im Labor bestimmen mittels Röntgendiffraktionsanalyse (ÖNORM B 4810).

Wie zuvor beschrieben wächst mit der prozentuellen Menge an Feinanteilen die Fähigkeit zum Wassertransport zur Eislinse, in Abhängigkeit dazu steht das Mineralkriterium für einige Tonminerale. Unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit des Wasserzuflusses, entwickelten Konrad und Morgenstern (Konrad und Morgenstern 1980, Konrad 1994) das Segregationspotenzial, welches ebenfalls ein Kriterium zur Beschreibung der Frostempfindlichkeit eines Bodens darstellt. Dieses lässt sich durch labortechnische Frosthebungsversuche ermitteln und ist definiert als „Wasserzustromgeschwindigkeit“ *water intake flux*, durch die Größe des Temperaturgradienten.

$$SP_0 = \frac{v_0}{\text{grad } T} \quad [5]$$

$SP_0$  = Segregationspotenzial ermittelt ohne Auflast [ $\text{mm}^2/\text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ ]

$V_0$  = Wasserzuströmgeschwindigkeit ohne Auflast [mm/s]  
 grad  $T$  = Temperaturgradient [°C/mm]

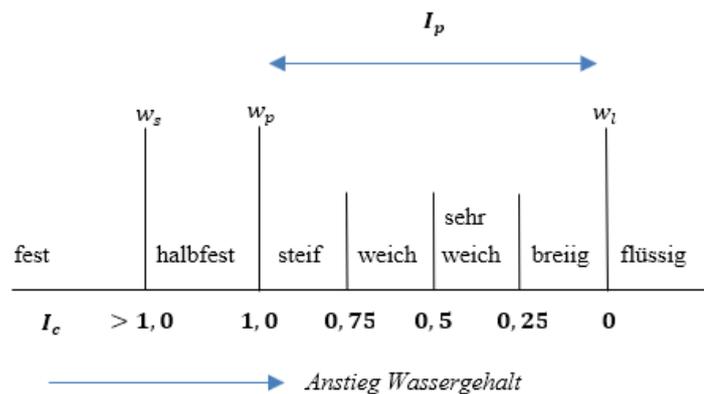
Für dieses Modell gilt die Annahme, dass die Durchlässigkeit im Frostsaum konstant ist und sich dort keine Eislinnen bilden (vgl. Abbildung 2 und 3). Die Wasserzuströmgeschwindigkeit und der Temperaturgradient, gemessen über die Höhe des ungefrorenen Bodens und des Frostsaums, werden bei konstanten Temperaturbedingungen zum Zeitpunkt der Ausbildung der letzten Eislinne versuchstechnisch bestimmt. Im Versuchsaufbau wird eine eindimensionale Frosttemperatur an der Oberseite aufgetragen sowie eine Wasserzufuhr am Boden, bei konstanter Temperatur, sichergestellt. Wie bereits erwähnt, sind Frosthebungsraten infolge Eislinnenbildung abhängig von der Auflast. Das Segregationspotenzial infolge Auflast  $SP$  ergibt sich mit:

$$SP = SP_0 * e^{-(a*P_e)} \tag{6}$$

$SP_0$  = Segregationspotenzial ermittelt ohne Auflast [mm<sup>2</sup>/s·°C]  
 $P_e$  = Überlagerungsspannung aus Auflast  
 $a$  = Bodenkonstante

Je größer  $SP$ , desto größer ist die Frostempfindlichkeit des Bodens. Anhand der Versuchsdurchführungen wurde nachgewiesen, dass das Eislinnenwachstum von der Auflast abhängt. Auch wurden Berechnungsformeln abgeleitet, die eine genauere Vorhersage der Frosthebungsraten erlauben. Allerdings ist die versuchstechnische Ermittlung baupraktisch zu aufwändig.

In anderen Straßenbaurichtlinien u.a. der Schweiz und Deutschland, dient zudem die Plastizität als Zuordnungskriterium für die Einteilung in frostsichere Böden. Die Plastizität ist ein Maß zur Konsistenzbestimmung von bindigen Böden, d.h. von Böden mit großen Anteilen an Lehm oder Schluff. Grobkörniger Boden hat eine Plastizität von Null.



Legende:

$w_s$  = Schrumpfgrenze, Wassergehalt in % zur Gesamtmasse  
 $w_l$  = Fließgrenze, Wassergehalt in % zur Gesamtmasse  
 $w_p$  = Plastizitätsgrenze, Wassergehalt in % zur Gesamtmasse

Abb. 15 - Atterberg'sche Grenzen als Konsistenzband nach (Boley, Adam et al. 2012)

Die Konsistenzzahl  $I_c$  und die Plastizitätszahl  $I_p$  sind definiert nach (ÖNORM B 4411)

$$I_c = \frac{w_l - w}{w_l - w_p} \quad [7]$$

$$I_p = w_l - w_p \quad [8]$$

Die Konsistenz wird folglich über den Wassergehalt einer Bodenprobe beschrieben, wobei die Atterberg'schen Grenzen empirisch bestimmbar sind. Bei der Ermittlung von  $w_l$  kommt das Fließgrenzengerät nach Casagrande zum Einsatz. Die Ausrollgrenze bzw. Plastizitätsgrenze  $w_p$  ist anhand des Ausrollversuches nach Atterberg ermittelbar. Zur weiteren Differenzierung zwischen Ton und Schluff kann die Zuordnung an einem Plastizitätsdiagramm erfolgen: Zu gering plastisch (L), mittelplastisch (M) und ausgeprägt plastisch (A) (siehe ÖNORM B 4411). (ÖNORM B 4411)

Festzuhalten ist, dass die Angabe eines einzelnen Kriteriums zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Böden nicht ausreicht. Böden mit höheren Feinanteilen weisen tendenziell eine erhöhte Frostempfindlichkeit bzw. Frosthebungsrate auf. Allerdings ist eine pauschale Aussage aufgrund der mineralogischen Kriterien nicht möglich. Die Plastizität ist ein umstrittenes Bestimmungskriterium, so lässt sich der ausgeprägt plastische Kaolin-Ton (TA), der stark frostempfindliche Eigenschaften aufweist (Unold 2006), nach den Frostempfindlichkeitsklassen der ZTV E-StB 09 als mittel bis gering frostempfindlich einstufen.

### 2.1.3 Frostindex und Frosteindringung

Nachfolgend soll ein Überblick gegeben werden, über den im Straßenbau verwendeten Frostindex, der teilweise in den Bemessungsrichtlinien verwendet wird. Zudem ermöglicht die Größe des Frostindex einen Vergleich bzw. die Bestimmung von bemessungsrelevanten Frostperioden. Weiter sollen vorhandene Möglichkeiten zur Bestimmung der Frosteindringung beschrieben werden, ohne die kein Eislinnenwachstum stattfindet.

In Österreich (Chlan und Litzka 1988) und Deutschland (FGSV 2013) ist der Frostindex [ $^{\circ}\text{C d}$ ] definiert, als Aufsummierung des Produkts, der täglichen mittleren Tageslufttemperatur  $< 0^{\circ}\text{C}$  mit der Dauer 1 Tag, über die Dauer der Kältetage (Gleichung [9]). Einzelne Frostperioden werden zu Kälteperioden zusammengefasst, wenn zwischenliegende Tauphasen nicht länger als zwei Tage andauern. In dieser kurzen Periode ist nicht mit einem signifikanten Auftauen zu rechnen. Der maßgebende Frostindex, einer Kälteperiode bzw. Frostperiode, ist graphisch definiert (siehe Abbildung 16), als die Differenz zwischen dem Maximum und Minimum der Temperatursummenkurve einer Kälte- oder Frostperiode. Diese Definition erfolgt auch in der schweizerischen Strabdimensionierung (SN 670 140b).

$$FI = \left| \sum_{i=1}^n T_{m,i} * d \right| [^{\circ}\text{C} * d] \quad [9]$$

- $n$  = Kälteperiode in Tagen  
 $T_m$  = mittlere Tageslufttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ];  
 Mittelwert aus maximaler und minimaler Tageslufttemperatur  
 $d$  = 1 Tag

Die Temperatursummenkurve ergibt sich durch Aufsummieren des täglichen Frostindex unter Berücksichtigung des Vorzeichens der Temperatur.

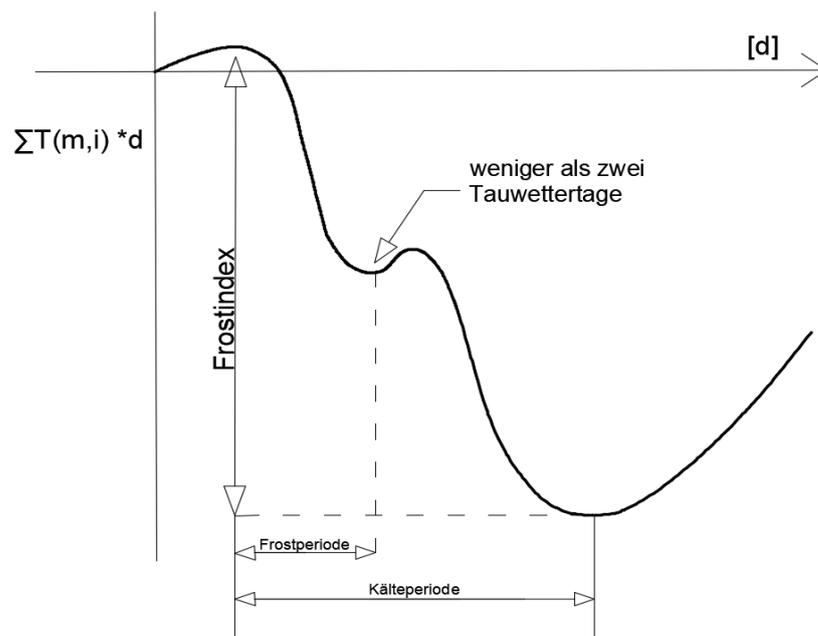


Abb. 16 – Temperatursummenkurve und Frostindex nach (FGSV 2013)

In der Oberbaubemessung der Schweiz (Kapitel 3.4) existiert eine Frostindexkarte und in Deutschland eine Frostzonenkarte (Kapitel 3.3). Eine österreichische Frostzonenkarte wurde 1988 veröffentlicht (Chlan und Litzka 1988), die als Grundlage genutzt werden kann, um die Frosteindringung abzuschätzen. Jedoch ist sie nicht Bestandteil der RVS-Richtlinie 03.08.63. Die maßgebenden Frostindizes, ermittelt aus den mittleren Tageslufttemperaturen, beziehen sich dabei auf den Winter 1962/1963, dieser war einer der strengsten Winter des 20. Jahrhunderts, mit sehr langanhaltender Frostdauer in Mitteleuropa bzw. Österreich und dem Winter von 1963/1964, der maßgebend für südliche Landesteile Österreichs (östliche Steiermark, Kärnten, Osttirol) war. Die Karte von 1988 ist in Regionen eingeteilt und kann zur Abschätzung herangezogen werden. Die vorgeschlagenen Schichtdickenänderungen der ungebundenen Tragschichten sind, in Abhängigkeit der Frostempfindlichkeitsklassen gemäß Tabelle 10, anhand der maßgebenden Frostindizes in Tabelle 4 angeführt. Eine andere Darstellung ist in der Forschungsarbeit zum Thema Klimakenngrößen für den Straßenoberbau in Österreich (Wistuba, Litzka et al. 2001) enthalten. Anhand von 154 Klimastationen wurde der maßgebende Frostindex, über den Zeitraum von 1962 bis 1964, bestimmt. Dabei wurden Klimaregionen definiert, die in Höhenlagen von 500m-Schritten eingeteilt wurden, ausgehend von 0 m bis > 1500 m. Für jede Region wiederum wurde der maßgebende Frostindex bestimmt und in einer Frostindexkarte dargestellt (Abbildung 18).

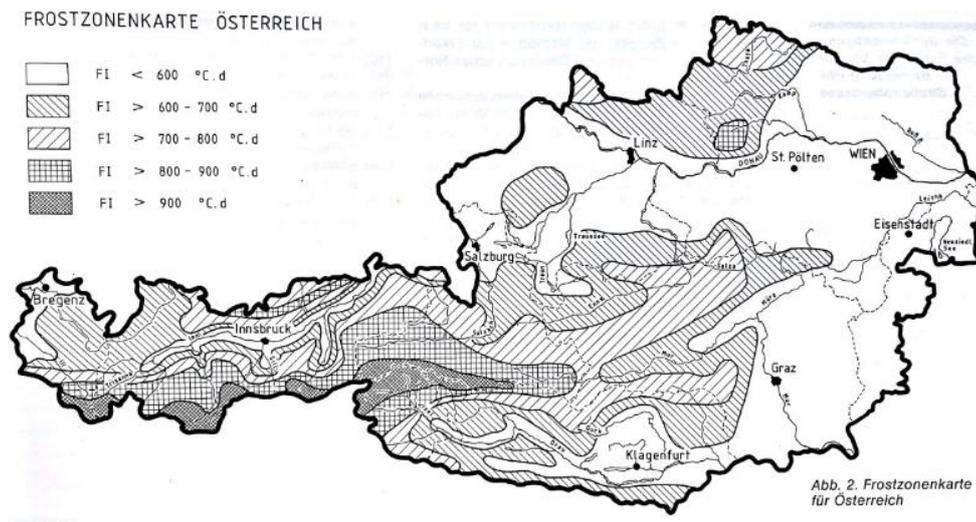


Abb. 17 – Frostzonenkarte Österreich (Chlan und Litzka 1988)

Tabelle 4 - Schichtdickenänderung der ungebundenen Tragschicht (für veraltete Bautypen 1 und 2) nach (Chlan und Litzka 1988)

FI [°C · d]	Frostempfindlichkeitsklassen (Tabelle 10)	
	F3	F2
> 600 - 700	15 cm	-
> 700 - 800	25 cm	10 cm
> 800 - 900	35 cm	20 cm
> 900	45 cm	30 cm

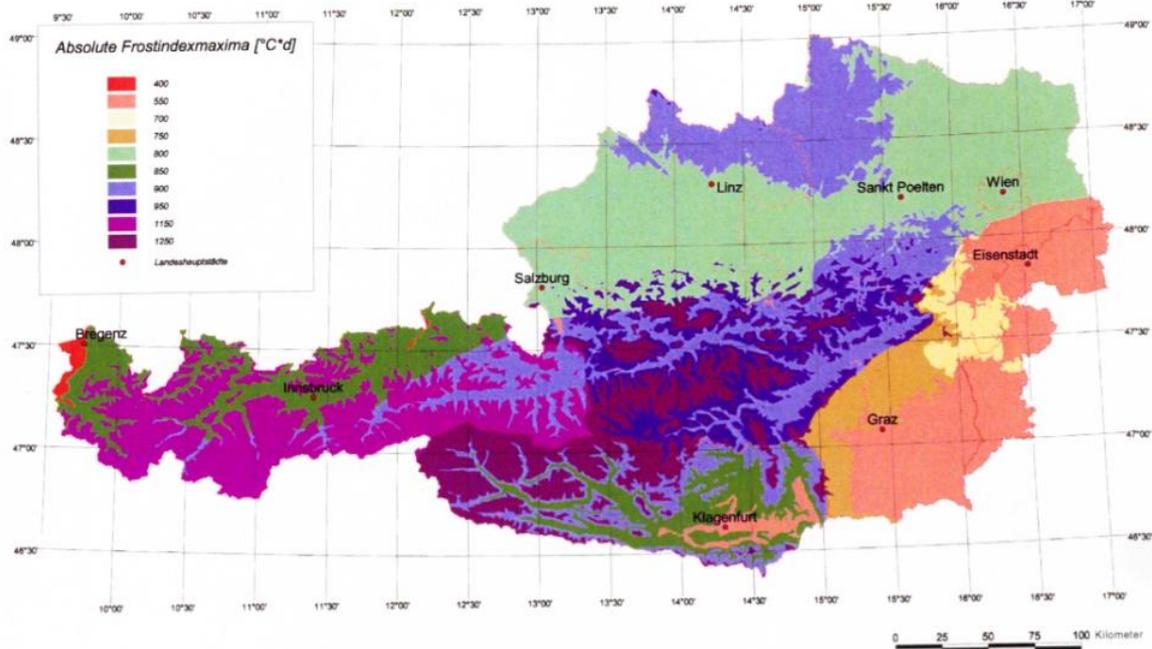


Abb. 18 – Klimazonenkarte mit absoluten Frostindexmaxima [°C·d] (Wistuba, Litzka et al. 2001)

Der maßgebende Frostindex ist erwartungsgemäß in alpinen Bereichen deutlich erhöht. Bei Darstellung der maximalen Indizes (siehe Abbildung 18) für die Daten von 1962 bis 1964, ergibt sich ein Frostindex zwischen 400 [°C d] und 1250 [°C d] für Österreich.

Frostindex in der wärmetechnischen Bemessung für Gebäudegründungen

Für Gebäudegründungen ist die Frosteinwirkung als Einflussgröße von besonderer Bedeutung, da auch hier Frosthebungsmechanismen zur Schädigung führen können. In der ÖNORM EN ISO 13793 wird ein Frostindex berücksichtigt, der sich aus der Differenz von 0 °C und der täglichen mittleren Außentemperatur [°C] bildet:

$$FI = 24 * \sum_j(\theta_f - \theta_{d,j}) \tag{10}$$

$$\theta_f = 0^\circ C$$

$$\theta_{d,j} = \text{mittlere tägliche Außenlufttemperatur für den Tag } j \text{ [}^\circ C\text{]}$$

Die Summe für jeden Frosttag, kann auch zeitweise positiv sein, wenn positive Tagesmitteltemperaturen auftreten. Wobei nur dann Auftautage berücksichtigt werden, wenn diese nicht zum vollständigen Auftauen des Bodens führen, d.h. wenn Fläche B kleiner ist als Fläche A (Abbildung 19). Im umgekehrten Fall beginnt die Frostperiode erst nach der Auftauperiode. (ÖNORM EN ISO 13793)

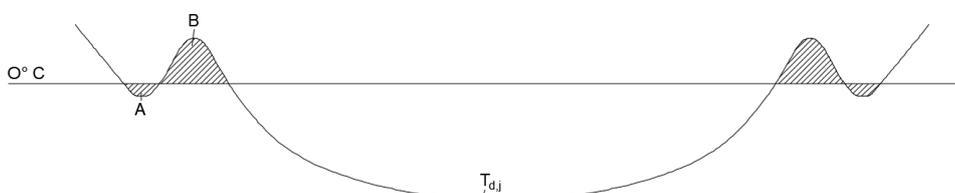


Abb. 19 – Frostindex für Gebäudegründungen (ÖNORM EN ISO 13793)

### Näherungsformel zur Berechnung der Frosteindringung nach (Behr 1984)

Zwischen dem Frostindex, der für die Größe einer Frosteinwirkung steht, der Frosteindringung besteht ein Zusammenhang. In den Untersuchungen nach (Behr 1984) wurden softwaregestützte Frosteindringungsberechnungen durchgeführt, dessen Ergebnisse durch praktische Großversuche bestätigt wurden. Er berechnete für eine Frostperiode von 60 Tagen, die Eindringung  $z_F$  [cm] der 0°-Isotherme. In Abhängigkeit von variierenden Oberflächentemperaturen  $T_{O,i}$  von -3°C bis -15°C (siehe Abbildung 20) ergaben sich unterschiedliche Eindringtiefen für folgenden Straßenaufbau:

4 cm Asphaltfeinbeton ( $\lambda = 1,31$  W/mK); 8 cm Asphaltbinder ( $\lambda = 1,06$  W/mK); 15 cm bituminöse Tragschicht ( $\lambda = 1,40$  W/mK); 50 cm Frostschutzkies mit  $w = 0,04$  ( $\lambda = 2,05$  W/mK) und bis 5 m Tiefe Schluff mit  $w = 0,15$  ( $\lambda = 1,71$  W/mK).

Auf Grundlage dieser Berechnung, wurde eine grobe Näherungsformel abgeleitet. Zunächst durch das Umformen von Gleichung [9], um einen Index  $FI_O$  mit Bezug zur Temperatur  $T_{O,i}$ , zu erhalten:

$$FI = \sum_{i=1}^n T_{m,i} * d = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n T_{O,i} * d = \frac{1}{k} FI_O \quad [11]$$

Wobei die Lufttemperatur als 25% niedriger angenommen wurde als die Oberflächentemperatur auf der Fahrbahnoberfläche,  $k = 0,8$ .

Durch Auftragen des berechneten  $FI_O$ , ermittelt aus den verwendeten Oberflächentemperaturen und der Frostdauer  $t_{max} = 60$  d und der Frosteindringung  $z_F$ , ist der Zusammenhang zwischen Frostindex und Frosteindringung graphisch dargestellt. Daraus ergibt sich die allgemeine Näherungsformel:

$$z_F = A_O (FI_O)^b \quad [12]$$

bzw.

$$z_F = A (FI)^b \quad [13]$$

$$A_O = 16,7 \text{ [cm/(}^\circ\text{C}\cdot\text{d)}^b]$$

$$A = 15,6 \text{ [cm/(}^\circ\text{C}\cdot\text{d)}^b]$$

$$b = 0,3$$

Die Faustformel hat für den angegebenen Schichtaufbau, mit den angegebenen Wärmeleitzahlen und für mittelstrenge Frostperioden (Oberflächentemperaturen von -6°C bis -9°C) eine ungefähre Genauigkeit von  $\pm 3$  cm für  $z_F$ . Auch wurden konstante Oberflächentemperaturen verwendet.

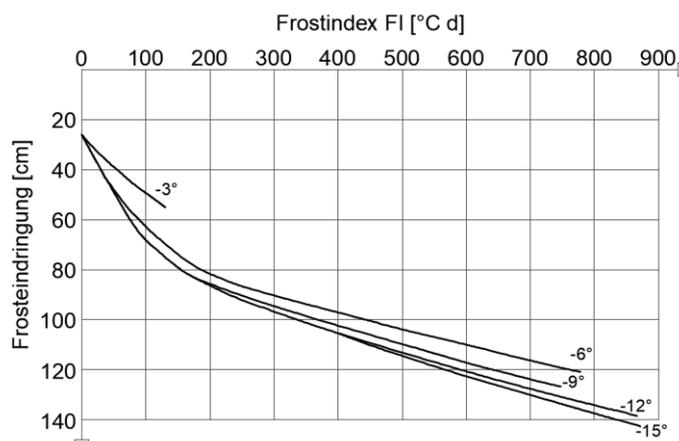
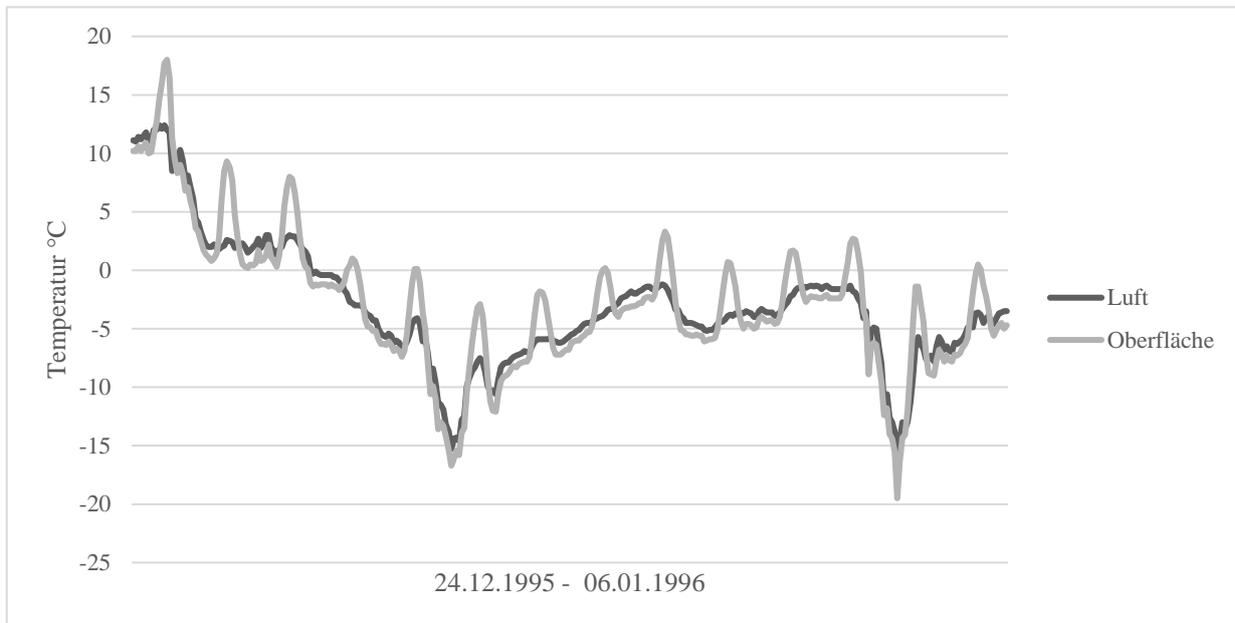


Abb. 20 -  $z_F$  in Abhängigkeit des Frostindex  $FI_O$  und  $T_O$  (Behr 1984)

## 2.2 Einflussgrößen

Die Temperatureindringung in den Straßenkörper wird durch zahlreiche Einflussgrößen bestimmt. Dabei ist die Oberflächentemperatur unterschiedlich zur gemessenen Lufttemperatur. Ein Vergleich der mittels Temperaturdifferenzverfahren berechneten Oberflächentemperatur (Kapitel 4) mit den gemessenen Lufttemperaturdaten der Station Groß Enzersdorf, zeigt den täglichen Anstieg der Oberflächentemperatur im Temperaturverlauf.



**Abb. 21 – Vergleich der Lufttemperaturdaten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und der berechneten Oberflächentemperatur für eine Asphaltdeckschicht an der Station Groß Enzersdorf**

Die Tagesspitzen der Oberflächentemperatur ergeben sich durch den Einfluss der Sonneneinstrahlung. Dabei erfolgt der maßgebliche Energieeintrag bzw. die Temperaturerhöhung an der Straßenoberfläche, durch den Anteil der kurzwelligen Strahlungsbilanz  $Q_k$  (Wistuba 2002):

$$Q_k = D + H - R \quad [14]$$

- $D$  = Direkte Sonneneinstrahlung  
 $H$  = diffuse Himmelsstrahlung  
 $R$  = kurzwellige Reflexionsstrahlung

Die diffuse Himmelsstrahlung ist der Anteil der kurzwelligen Strahlung, der nicht direkt auf der Erdoberfläche ankommt, sondern durch vorherige Wechselwirkung mit Molekülen der Erdatmosphäre einen indirekten Strahlungsanteil darstellt. Weiters wird zur Vermeidung der messtechnischen Bestimmung der kurzwelligen Reflexionsstrahlung, der dimensionslose Albedo-Wert verwendet (siehe Tabelle 5). Er steht für das Reflexionsvermögen und ist eine oberflächenabhängige Größe.

$$Q_k = (1 - \alpha_s) * G \quad [15]$$

- $G$  =  $D + H$   
 $\alpha_s$  = Albedo der Straßenoberfläche

**Tabelle 5 – Größenordnung Albedo-Werte für kurzwellige Strahlungsanteile (Krispel et al. 2017)**

Asphalt	5 – 20 %
Beton	10 – 35 %
Beton weiß	70 %
Wiese	15 – 25 %
Laubwald	15 – 20 %

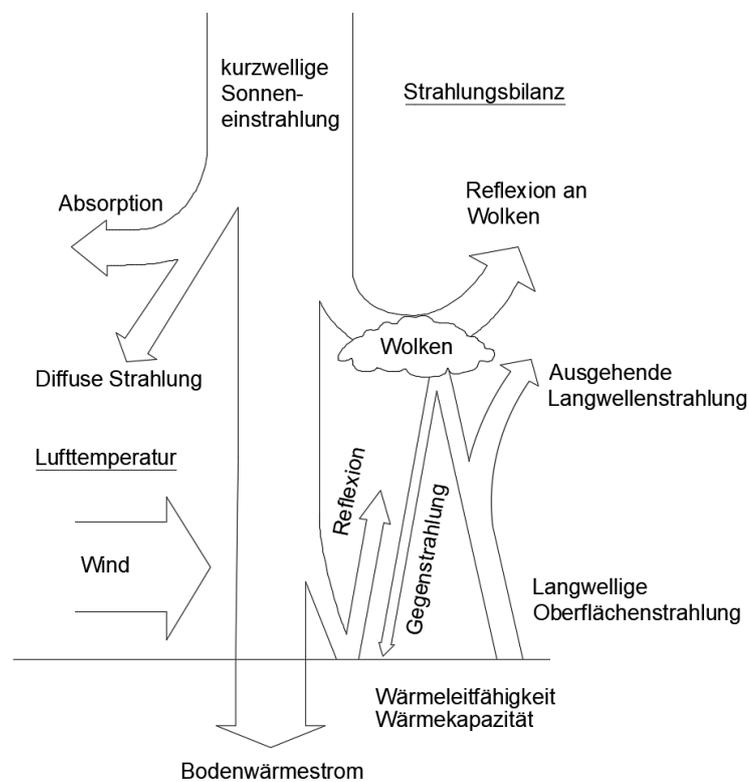
Neben den kurzwelligen Strahlungsanteilen sind für eine Gesamtstrahlungsbilanz auch die langwelligen Strahlungsanteile zu berücksichtigen. Die temperaturbedingte Abgabe von Strahlungsanteilen des Straßenkörpers erfolgt durch langwellige Strahlung. Diese wird teilweise an der Wolkendecke reflektiert und trifft als Gegenstrahlung wieder auf der Oberfläche ein.

$$Q_L = AG - A \tag{16}$$

$AG =$  Gegenstrahlung  
 $A =$  Ausgehende Langwellenstrahlung

Demnach ist die Gesamtstrahlungsbilanz:

$$Q = (1 - \alpha_s) * G + AG - A \tag{17}$$



**Abb. 22 – Übersicht Einflussgrößen der Schichttemperatur modifiziert nach (Dempsey, Herlache et al. 1986).**

Einen wesentlichen Einfluss auf den Temperatureintrag in den Straßenkörper hat die Windgeschwindigkeit. Im verwendeten Temperaturdifferenzverfahren (Wistuba 2002) wird der Einfluss der Windgeschwindigkeit durch die Implementierung einer Wärmeübergangszahl in die Differenzgleichungen berücksichtigt.

**Tabelle 6 – Einflussgrößen Temperaturdifferenzverfahren der TU Wien (Wistuba 2002)**

Klimadaten	Materialkennwerte
Stündliche Lufttemperaturdaten	Dichte
Stündliche Windgeschwindigkeit	Wärmeleitfähigkeit
Jahreszeitliche Strahlungsbilanz	Wärmekapazität
Konstante Schichttemperatur in 2m Tiefe	

Die wichtigsten materialtechnischen Einflussgrößen für die Frosteindringung sind die Wärmeleitfähigkeit der jeweiligen Straßenschichten, sowie die Wärmekapazität.

#### Wärmeleitfähigkeit von Böden

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [ $W/mK$ ] ist die Wärmemenge, die in einer Zeiteinheit durch eine Bodenschicht geleitet wird, sofern ein Temperaturgefälle vorliegt. Sie ist abhängig vom Wassergehalt der Bodenschicht und der Wärmeleitfähigkeit der Bodenkörnung. Aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit von Wasser ist der Wärmetransport bei wassergesättigten Böden erhöht, in Abhängigkeit des ausgefüllten Porenraums. Zudem hat Eis eine höhere Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{Eis} = 2,2$  [ $W/mK$ ] als flüssiges Wasser  $\lambda_{Wasser,20^\circ C} = 0,60$  [ $W/mK$ ] (Kurzweil, Frenzel et al. 2014).

**Tabelle 7 – empfohlene  $\lambda$ -Rechenwerte für Lockergesteine und volumenbezogene Wärmekapazität  $c_v$  nach (VDI 4640 (2010))**

Gestein	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [ $W/mK$ ]	volumenbezogene Wärmekapazität $c_v$ [ $MJ/m^3K$ ]
Kies, trocken	0,4	1,3 – 1,6
Kies, wassergesättigt	1,8	2,2 – 2,6
Sand, trocken	0,4	1,3 – 1,6
Sand, wassergesättigt	2,4	2,2 – 2,8
Ton, Schluff trocken	0,5	1,5 – 1,6
Ton, Schluff wassergesättigt	1,8	2,0 – 2,8

Die Wärmeleitfähigkeit der gebundenen Schichten kann für Normalbeton, je nach Luftporengehalt, zwischen  $\lambda_{Betton} = 1,15$  [ $W/mK$ ] -  $2,0$  [ $W/mK$ ] und für Asphalt bei  $\lambda_{Asphalt} = 0,70$  [ $W/mK$ ] angegeben werden (Willems 2007).

### Wärmekapazität von Böden

Die spezifische Wärmekapazität  $c_m$  gibt an wieviel Wärmemenge  $\Delta Q$  [J] benötigt wird um einen Stoff mit der Masse  $m = 1 \text{ kg}$  mit einer Temperaturänderung  $\Delta T$  um 1K zu erwärmen bzw. abzukühlen.

$$c_m = \frac{\Delta Q}{\Delta T * m} \left[ \frac{J}{kg K} \right] \quad [18]$$

Die volumenbezogene Wärmekapazität ist  $c_v$  und ergibt sich aus  $c_m$  multipliziert mit der Dichte  $\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

$$c_v = c_m * \rho \left[ \frac{J}{m^3 K} \right] \quad [19]$$

Mit zunehmenden Wassergehalt erhöht sich die volumenbezogene Wärmekapazität eines Bodens. Gleichzeitig hat ein gefrorener Boden mit  $c_{m,Eis} = 2,0 \frac{J}{kg K}$  eine deutlich niedrigere Wärmekapazität als Wasser  $c_{m,Wasser,10^\circ C} = 4,19 \frac{J}{kg K}$  (Kurzweil, Frenzel et al. 2014). Diese spezifische Eigenschaft von gefrorenem Wasser begünstigt, neben der größeren Wärmeleitfähigkeit von Eis, eine schnellere Frosteindringung.

### 3 Bemessung der Frostsicherheit im Straßenoberbau

Diese Arbeit setzt sich mit den Methoden zur Berücksichtigung der Frosteinwirkung in der Oberbaubemessung in Österreich auseinander. Weiters erfolgt ein Vergleich mit ausländischen Normen (Deutschland, Schweiz, USA). Die Bemessung in Österreich erfolgt anhand der Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS), die von der österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV) ausgearbeitet werden. Laut RVS 03.08.63 (2016) werden die Schichten grundsätzlich in Oberbau, Unterbau und Untergrund eingeteilt. Der Oberbau beinhaltet, ausgehend vom Unterbauplanum, die untere Tragschicht, eine obere Tragschicht und die Deckschicht. Die untere Tragschicht wird als ungebundene Schicht ausgeführt. Bei der oberen Tragschicht wird zwischen ungebundener und gebundener Tragschicht unterschieden.

#### 3.1 Bemessung in Österreich

##### Oberbaubemessung nach RVS 03.08.63 (2016)

Die Richtlinie beinhaltet die Handlungsvorschriften für die Bemessung des Straßenoberbaus, bei Straßenneubauten und Erneuerungen ohne stufenweisen Ausbau. Nach dem Prinzip der Bemessung werden Lastklassen, mittels des zu errechnenden Bemessungsnormlastwechsels BNLW, ausgewählt. Anhand der Lastklassen und mittels der Bautypen, den standardisierten Straßenoberbauten, erfolgt die Auswahl nach der Bemessung. Eine Übersicht des Bemessungsablaufes zeigt nachstehende Abbildung.

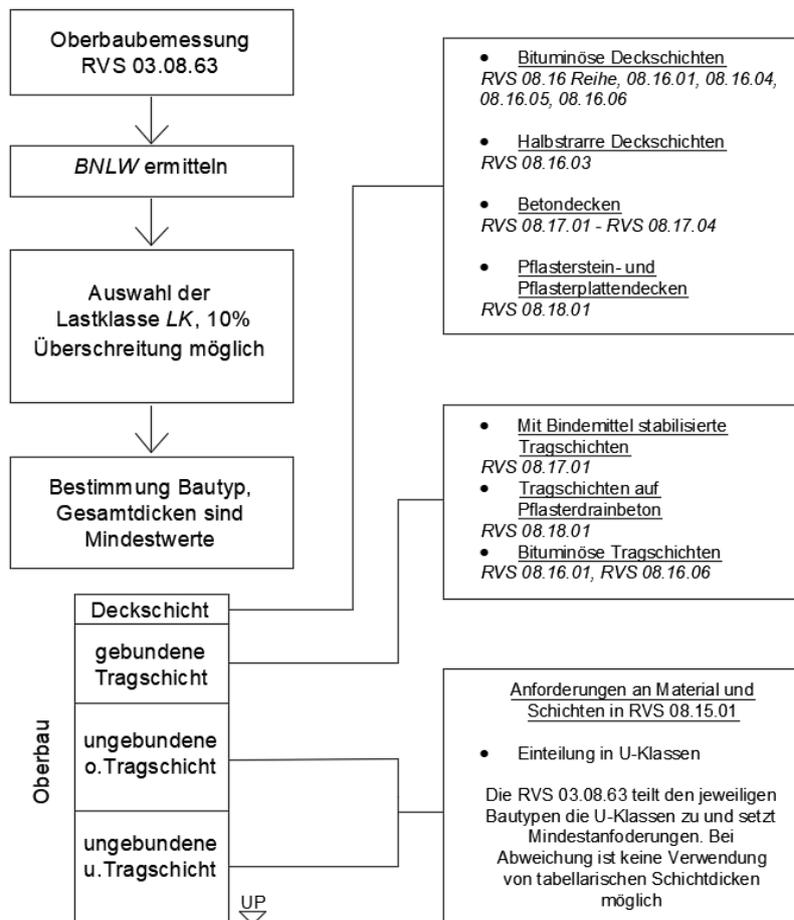


Abb. 23 - RVS Regelungen für Oberbauschichten

Dabei sind folgende Bautypen angegeben: (vgl. RVS 03.08.63 (2016))

- fünf Bautypen für Oberbauten mit Asphaltbefestigungen (AS1 – AS5)
- zwei Bautypen für Oberbauten mit Betondecken (BE1 – BE2)
- vier Bautypen für Pflasterstein- und Pflasterplattendecken in ungebundener Bauweise mit ungebundener oberer Tragschicht (PF1 – PF 4)
- vier Bautypen für Pflasterstein- und Pflasterplattendecken in ungebundener Bauweise mit Pflasterdrainbetontragschicht (PF 5 – PF 8)

Der Bemessungsnormlastwechsel  $BNLW$  bezieht sich auf den höchstbelasteten Fahrstreifen. Er ist definiert als die Anzahl an Übergängen der Normachslast von 100 kN und wird wie folgt nach RVS 03.08.63 (2016) bestimmt:

$$BNLW = NLW_{\text{tägl}} * R * V * S * 365 * n * z \quad [20]$$

$NLW_{\text{tägl}}$  Anzahl der durchschnittlichen täglichen Normlastwechsel für den gesamten Querschnitt zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

1. Berechnung, wenn die jährlich durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke  $JDTV_i$  der Fahrzeugkategorie  $i$  im gesamten Querschnitt bekannt ist:

$$NLW_{\text{tägl}} = \sum_i JDTV_i * \ddot{A}_i \quad [21]$$

$JDTV_i$  ermittelt aus Verkehrszählungen gemäß RVS 02.01.12 [Kfz/24h]

$\ddot{A}_i$  Mittlerer Äquivalenzwert der jeweiligen Fahrzeugkategorie  $i$  (siehe Tabelle 1 in RVS 03.08.63)

2. Berechnung, wenn keine Ergebnisse aus Verkehrszählungen mit Unterscheidung der Fahrzeuge in Fahrzeugkategorien  $i$  vorliegen:

$$NLW_{\text{tägl}} = JDTV_{\text{ges}} * \ddot{A}_{JDTLV} \quad [22]$$

$JDTV_{\text{ges}}$  Jährlich durchschnittliche tägliche Lastverkehrsstärke (LKW, LKW-ähnliche Fahrzeuge und Busse je 24h, alle Tage) für den gesamten Querschnitt zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe, ermittelt aus Verkehrszählungen gemäß RVS 02.01.12 bzw. aufgrund von Abschätzungen über  $JDTV$ -Wert und Lastverkehrsanteil [Fz/24h]

$\ddot{A}_{JDTLV}$  Mittlerer Äquivalenzwert des  $JDTLV$ - Kollektivs für die entsprechende Straßenkategorie gemäß (siehe Tabelle 2 in RVS 03.08.63)

$R$  Richtungsfaktor für die Aufteilung des Lastverkehrs auf die Fahrrichtungen (0,5 bei gleichmäßiger Aufteilung des Lastverkehrs auf beide Fahrrichtungen)

$V$  Faktor zur Berücksichtigung der Verteilung des Lastverkehrs auf mehrere Richtungsfahrstreifen (1,0 bei einem bzw. zwei Richtungsfahrstreifen; 0,9 bei drei oder mehr Richtungsfahrstreifen)

$S$  Faktor zur Berücksichtigung der Fahrspurverteilung innerhalb des Fahrstreifens gemäß (siehe Tabelle 3 in RVS 03.08.63)

$n$  Bemessungsperiode in Jahren (für Bundesstraßen A und S gilt im Regelfall eine Bemessungsperiode von 30 Jahren, Im Regelfall 20 Jahre für bituminöse Befestigungen und Pflasterstein- und Pflasterplattendecken bzw. 30 Jahre für Betondecken; Abweichungen sind vom Auftraggeber festzulegen)

$z$  Zuwachsfaktor unter Berücksichtigung einer jährlichen Zuwachsrate  $p$  [%]

$$z = \frac{q^n - 1}{n * (q - 1)} \quad \text{mit } q = 1 + \frac{p}{100} \quad [23]$$

In der Richtlinie ist festgehalten, dass die Zuwachsrate auf Basis von Verkehrserzählungen bzw. Prognosen bestimmt werden soll. Liegen keine Daten vor, dann ist  $p = 2\%$  bei Bundesstraßen A und Bundesstraßen S sowie  $p = 1\%$  für sonstige Straßen. (vgl. Tabelle 4 in RVS 03.08.63 (2016))

Ist der Wert ermittelt, erfolgt die Zuordnung zur Lastklasse, die abgekürzt ist durch „LK“ und der oberen Grenze der Lastklasse *BNLW* (in Mio.). Bei Straßenoberbauten mit Asphaltbefestigungen ist die größte noch tabellarisch erfasste Lastklasse LK163 und bei Betondecken LK185. Darüberhinausgehende Bemessungsnormlastwechsel führen zur gesonderten Bemessung. Außerdem darf bei der Lastklassenzuordnung der *BNLW* um 10% überschritten werden. Siehe Bemessungstabellen im Anhang der RVS 03.08.63, nachfolgend ein Auszug in Abbildung 23 für Oberbauten mit Betondecken.

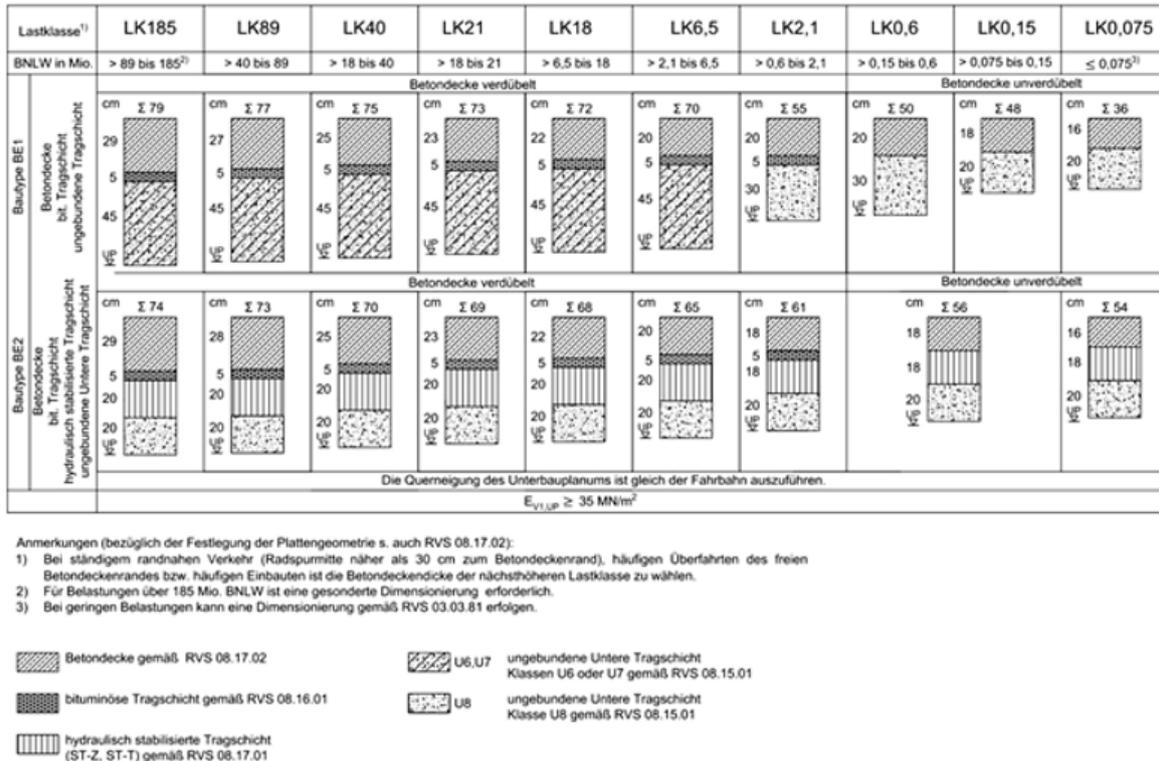


Abb. 24 - Bemessungstabelle für Oberbauten mit Betondecken aus (RVS 03.08.63 (2016))

Tragfähigkeit des Untergrunds bzw. Unterbaus

Die mit der Jahreszeit schwankenden klimatischen Einwirkungen, bedingen mit dem veränderlichen hydrologischen Verhältnissen in Bodenschichten, eine veränderliche Tragfähigkeit des Untergrunds bzw. auf dem Unterbauplanum. Im Zusammenhang dazu steht die Frostsicherheit des anstehenden Bodens, diese wird nicht durch Materialanforderungen, wie bei den ungebundenen Tragschichten, berücksichtigt. Ein Mindestwert für den Verformungsmodul auf dem Unterbauplanum  $E_{v1} \geq 35 \text{ MN/m}^2$  wird vorausgesetzt (RVS 03.08.63 2016). Der  $E_{v1}$  ist ein statisches Verformungsmodul ermittelt durch den statischen Lastplattenversuch. Sollte diese Mindesttragfähigkeit nicht erreicht werden, sollen Bodenaustausch oder Bodenverbesserung erfolgen (RVS 03.08.63 2016).

Der Mindestwert  $E_{v1}$  lässt sich zurückführen auf die periodischen Schwankungen des dynamischen E-Moduls  $E_{dyn}$ , mit niedrigstem Wert für die Tauperiode (16.03. – 15.05.), durch den näherungsweise Zusammenhang (Litzka, Molzer et al. 1996):

$$2 * E_{v1} = E_{dyn} \quad [24]$$

$$2 * 35 \text{ MN/m}^2 = 70 \text{ MN/m}^2$$

**Tabelle 8 - Änderungen der Untergrundtragfähigkeit während des Jahres (Litzka, Molzer et al. 1996)**

Tragfähigkeitsperiode	Untergrundtragfähigkeit [%]	Angesetzter Modul $E_{dyn}$ [ MN/m <sup>2</sup> ]
16.12. – 15.03.	200	280
16.03. – 15.05.	50	70
16.05. – 15.06.	70	100
16.06. – 15.12.	100	140

### Tragfähigkeit der ungebundenen Tragschichten

In der RVS 08.15.01 sind Mindestanforderungen an die ungebundenen oberen und unteren Tragschichten definiert (Tabelle 2 in RVS 08.15.01 (2017)). Diese gilt es, zusammen mit definierten Grenzwerten der RVS 03.08.63, einzuhalten. Dabei handelt es sich um statische Verformungsmodule  $E_{v1}$  (Erstbelastung) und  $E_{v2}$  (Zweitbelastung). Eine Berücksichtigung der frostbedingten Tragfähigkeitserhöhung und der taubedingten Tragfähigkeitsreduzierung der ungebundenen Tragschichten, erfolgt in der detaillierten rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßen gemäß RVS 03.08.68. Dabei ergibt sich die periodische Tragfähigkeit der ungebundenen unteren Tragschicht durch das Verhältnis von (RVS 03.08.63 (2018)):

$$\frac{E_{\text{ungebundene, untere Tragschicht}}}{E_{\text{Untergrund}}} = 2,80 \quad [25]$$

Wobei die Werte des Steifigkeitsmoduls  $E_{\text{Untergrund}}$  den angesetzten Modulwerten aus Tabelle 3.2.1 entsprechen. Dadurch ergibt sich für die Winterperiode  $E_{\text{ung.,u. Tragschicht}} = 2,80 * 280 = 784 \text{ MN/m}^2$  und für die Tauperiode ein  $E_{\text{ung.,u. Tragschicht}} = 2,80 * 70 = 196 \text{ MN/m}^2$ . Die E-Module der oberen ungebundenen Tragschichten stehen wiederum im Verhältnis zu den unteren ungebundenen Tragschichten (Tabelle 10 in RVS 03.08.63 (2018)).

### Frostsicherheit des Oberbaus

Zudem wird grundsätzlich in der Richtlinie ein frostsicherer Oberbau gefordert. Die angegebenen Schichtdicken aller Bautypen sind Minstdicken, die in begründeten Fällen abgeändert werden dürfen. Hierzu werden drei Fälle angeführt: (vgl. RVS 03.08.63 (2016))

**Tabelle 9 – Kriterien zur Änderung der standardisierten Schichtdicken (RVS 03.08.63)**

1	In alpinen Bereichen mit langen Frostperioden und hoher Frosteindringung
2	Bei ungünstigen Wasserverhältnissen im Untergrund mit Grund- oder Schichtwasser dauernd oder zeitweise höher als 1,5 m unter dem Unterbauplanum
3	Bei günstigen (milden) Klimaeinflüssen und geschlossener seitlicher Bebauung entlang der Straße

Aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen der Frosteindringung soll der Dickenänderung entweder eine Frosteindringungsberechnung oder langjährige Erfahrungen und Kenntnisse der örtlichen Verhältnisse zu Grunde liegen. Weiter kann die Anordnung einer ungebundenen Tragschicht entfallen, sofern der Untergrund oder bei Dammausführung der Unterbau, aus frostsicherem Material besteht und die Festlegungen nach RVS 08.15.01 erfüllt (vgl. RVS 03.08.63 (2016)). Im Straßenbau fungieren ungebundene Tragschichten als Frostschutzschichten. Diese müssen gegebene Anforderungen erfüllen und sind in der RVS 08.15.01 näher beschrieben.

#### Frostdimensionierung ungebundener Tragschichten

Die eingebauten Tragschichten müssen materialtechnische Anforderungen erfüllen und bestehen daher aus Gesteinskörnungen mit CE-Kennzeichnung. In der RVS 08.15.01 (2017) erfolgt die Zuordnung der Kennwerte zu den jeweiligen U-Klassen von U1 bis U10. Darüber hinaus ist das Korngemisch einer Eignungsprüfung zu unterziehen. Die ausführenden Unternehmen können auch Material einbauen, das vor Ort gewonnen wird. Die CE-Kennzeichnung ist in diesem Fall nicht möglich und nicht gefordert, allerdings ist die Prüfung verpflichtend. (RVS 08.15.01 (2017); ÖNORM B 3132 (2016))

Die Konformitätskennzeichnung alleine reicht nicht für die Qualitätssicherung aus. Die zusätzlichen Vorgaben der RVS 08.15.01 sind einzuhalten. Die wichtigsten Angaben in Hinblick auf die Frostsicherheit bei der Zuordnung zu den U-Klassen sind die Beurteilung der Frostsicherheit des Korngemisches und der Widerstand der Kornklasse 8/16 gegen Frost-Tau-Wechsel.

#### Anforderung der Frostbeständigkeit an die Kornklasse 8/16

Beträgt die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung nach Durchführung eines 24-stündigen Wasserbads (ÖNORM EN 1097-6), weniger als 2 M-%, dann ist der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel erfüllt. Ist der Nachweis nicht möglich, dann erfolgt eine zehnmahlige Frost-Tau Beanspruchung einer Messprobe (ÖNORM EN 1367-1). Hierbei wird die Masse vor und nach dem Versuch bestimmt und daraus der prozentuelle Massenverlust ermittelt. Ist der Verlust der Masse  $\leq 2$  M-%, dann ist die Wechselbeständigkeit gegeben. Für Recyclingmaterial gelten gesonderte Bestimmungen. (RVS 08.15.01 (2017))

#### Anforderungen an die Frostsicherheit des Korngemisches

Der Gehalt an Feinanteilen ( $< 0,063$  mm) darf 3 M-% nicht überschreiten, oder ein positiver Nachweis gemäß ÖNORM B 4811 liegt vor (Abbildung 25). Dort ist ein Feinanteil von maximal 4 M-% zulässig, da die Ermittlung an verdichteten Bodenproben oder nach dem Baustelleneinbau erfolgt und somit der Feinteilzuwachs berücksichtigt wird. Der Nachweis für die eingebauten Schichten ist nach ÖNORM B 4811 zu führen. Die Nachweise des Tonmineralbestandes bzw. der Frosthebung (ÖNORM B 4810), sind zwei Jahre gültig. (RVS 08.15.01 (2017))

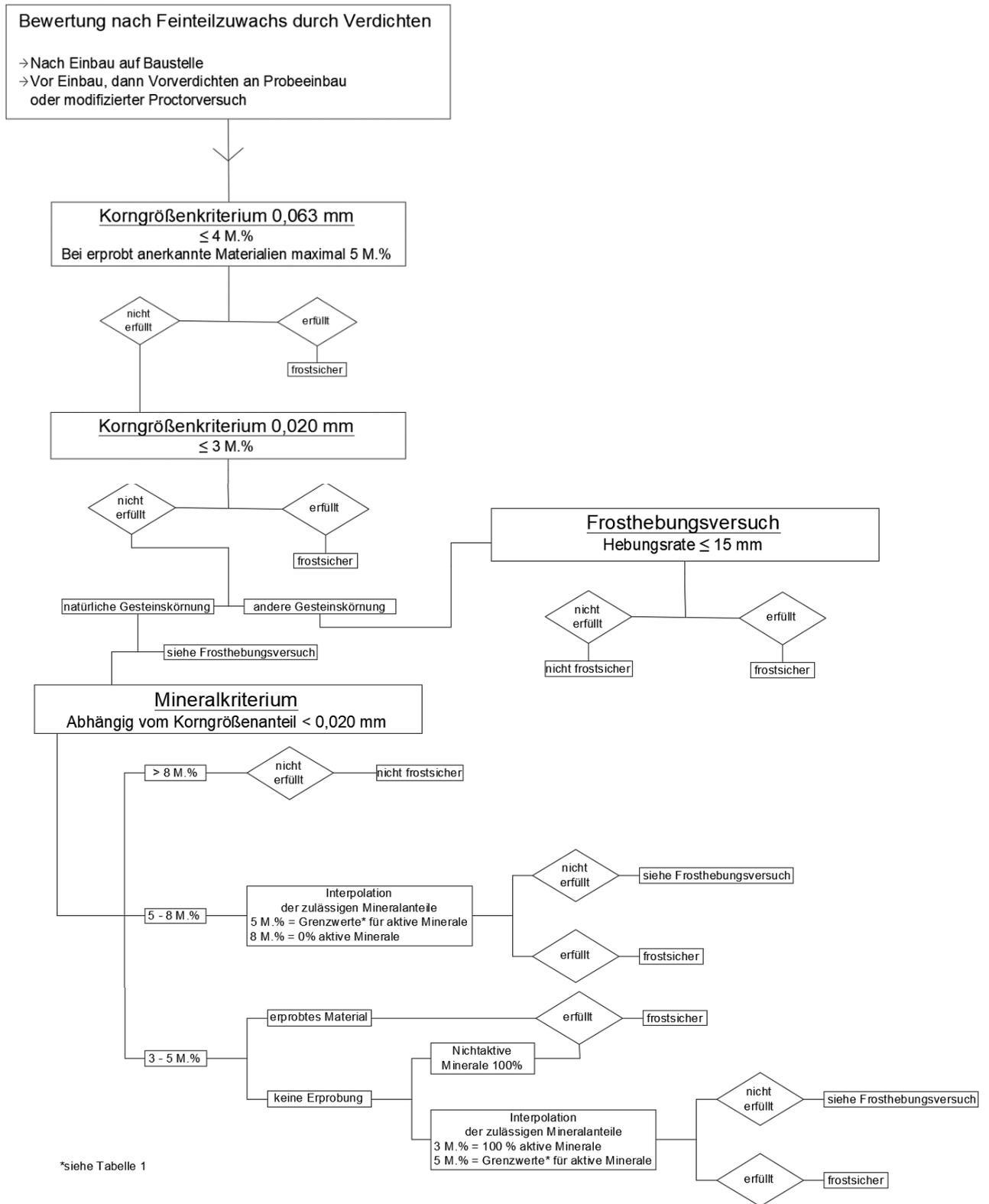


Abb. 25 - Ablaufschema der Frostsicherheitsbestimmung in Österreich nach (ÖNORM B 4811)

### Frosthebungsversuch in Österreich

Grundlegender Ablauf des Frosthebungsversuchs nach ÖNORM B 4810:

1. Die Probekörperherstellung erfolgt ohne Sieblinienanteile  $> 31,5$  mm und unter Berücksichtigung der Proctordichte und des optimalen Wassergehalts. Es werden mindestens fünf Temperaturmessfühler eingebaut. Zwei Proben werden mit einer Auflast von  $0,5 \text{ N/cm}^2$  belastet.
2. Die Prüfkörper befinden sich in einer isolierten Wanne. Am Boden des Prüfkörpers befindet sich eine Filterplatte, die eine Wasserdurchlässigkeit gewährleisten soll. Dadurch wird der Wassertransport von unten berücksichtigt, bei einer erlaubten Temperatur von  $3,5^\circ - 4,5^\circ$  Celsius. In die Prüfvorrichtung wird Wasser bis oberhalb der Unterkante der Probe gefüllt, für 24h dieser Zustand gewahrt. Das soll einen möglichst natürlichen Wassergehalt in dem Probekörper erzeugen.
3. Es erfolgt eine Befrostung die 96 h andauert. Sie soll eine Frosteindringung von näherungsweise 20 mm pro Tag sicherstellen. Die Eindringtiefe soll sich am Ende der Befrostungszeit in der Mitte der Probe befinden.
4. Die Frosteindringung soll durch die jeweilig notwendige Frosttemperatur auf Höhe der Mitte gehalten werden, für eine Dauer von 72 h.
5. Danach erfolgt die Tauphase von 24 h bei Raumtemperatur.
6. Der Maximalwert der Hebung darf maximal 15 mm betragen, wobei die Messung nur gültig ist, wenn die Hebungsraten abgeklungen ist (vgl. (ÖNORM B 4811) und die Einzelhebungswerte der Proben nicht mehr als 2 mm vom Mittelwert abweichen. Sind die Kriterien erfüllt ist der Bodenkörper frostsicher.

Demnach erfolgt eine Vernachlässigung der Frost-Tau Wechsel Beanspruchung der Böden. Dies ist kritisch zu sehen, da das Auftauen der Eislinsen eine Umstrukturierung im Bodengefüge zur Folge hat und sich bei erneuter Frosteinwirkung eine andere Hebungsraten ergeben kann (siehe Abbildung 26). Zudem sei erwähnt, dass die Mineralkriterien anhand eines „Standardversuches“ Einzug in die Normung fanden, dieser weicht vom aktuellen Frosthebungsversuch allerdings ab (Brandl 2005).

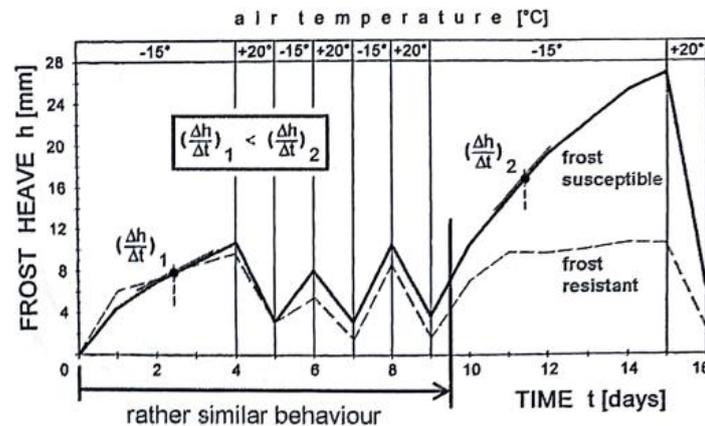


Abb. 26 – Auswertung eines Standardversuches für Frosthebungen (Brandl 2005)

In Abbildung 26 ist der Einfluss von Frost-Tau-Zyklen auf die Frosthebung, für zwei mineralogisch unterschiedliche sandige Kiese mit geringen Schluffanteil, dargestellt. Die Temperatur liegt im zyklischen Schwankungsbereich  $-15^{\circ}\text{C}$  bis  $+20^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2 Umfrage zur Frostbemessung in Österreich

Im Zuge der Arbeit wurde eine Umfrage durchgeführt, mit dem Ziel, nähere Informationen zur Anpassung der Oberbaudicken, infolge einer Frosteinwirkung, zu erhalten. Der Bemessungsspielraum (siehe Kapitel 3.2, Frostsicherheit des Oberbaus) ermöglicht eine abgeänderte Dickenfestlegung, da die in der standardisierten Oberbaubemessung RVS 03.08.63 angegebenen Bautypen, Minstdicken darstellen. Die Umfrage wurde anhand telefonischer Interviews durchgeführt, die aufgezeichnet wurden. In zwei Fällen wurden schriftliche Antworten gegeben. Anschließend erfolgte eine Transkription, deren zusammenfassende Darstellung sich im Anhang der Arbeit befindet. Die acht Umfrageteilnehmer repräsentieren sieben verschiedene Bundesländer in Österreich und die ASFINAG und werden anonymisiert angeführt mit Teilnehmer 1 bis Teilnehmer 8.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der telefonischen Umfrage präsentiert werden. Die Darstellung beschränkt sich dabei auf wesentliche Kernaussagen der acht Umfrageteilnehmer. Folgende Fragen wurden gestellt, mit dem Ziel, Informationen über die Anpassung der ungebundenen Tragschichten infolge Frosteinwirkung, zu erhalten:

1. Welche Richtlinien werden verwendet?  
(Finden zusätzlich interne Bemessungskataloge oder Leitfäden Anwendung?)
2. Wie gehen Sie vor, wenn verschiedene lokale Verhältnisse anzutreffen sind?  
(Schlechte hydrogeologische Verhältnisse, Einschnitt...)
3. Erfolgt eine Abänderung der Schichtdicken (Gesamtdicke), wenn ja auf welcher Grundlage?
4. Werden Bodenuntersuchungen durchgeführt? Welche?
5. Liegen Probleme bei der Bemessung vor?
6. Entsteht das Interesse an einer neuen Richtlinie?

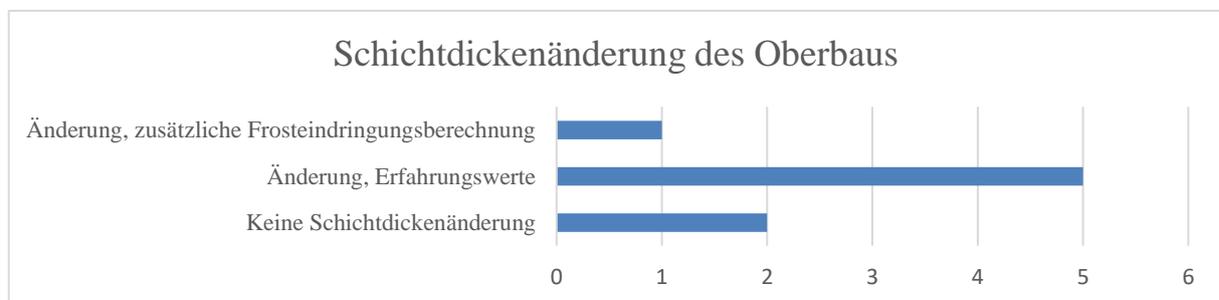
Kurzfassung der Antworten:

1. Alle Teilnehmer gaben an, die gängigen RVS Richtlinien, einschließlich der RVS 03.08.63, zur Oberbaubemessung anzuwenden. Interne Bemessungskataloge mit spezifischen Angaben zur Abänderung der ungebundenen Tragschichten der Oberbautypen liegen bei drei Teilnehmern vor.

2. Die Vorgehensweise bei schlechten hydrogeologischen Bedingungen beschränkt sich nach Angaben der Befragten auf keine konkrete bautechnische Maßnahme. Auch wurden keine Aussagen getroffen zu wechselnden lokalen Verhältnissen (z.B. Einschnitt-Damm), viel mehr gaben alle Beteiligten an, bedarfsgerechte örtliche Anpassung vorzunehmen. Folgende präferierte Maßnahmen wurden genannt:

- Bodenaustausch
- Zementstabilisierung
- Kalkstabilisierung
- Gesonderte Entwässerungsmaßnahmen
- Geotextil
- Erhöhte Verdichtungsanforderungen

3. Die Schichtdickenänderung der ungebundenen Tragschichten erfolgt auf Grundlage von Erfahrungswerten. Für Teilnehmer 1 sind im niedrigen Lastklassenbereich kleinere Schichtdicken für ungebundene Tragschichten vorgesehen, sofern Frostepfindlichkeitsklassen eingehalten werden. Ausgehend von Frosteindringungsberechnungen für die klimatologischen Bedingungen in Teilnehmerland 1, in Zusammenarbeit mit der TU Wien (Kreis 2016), konnte das Einsparungspotential ermittelt werden.



**Abb. 27 – Angaben zur Schichtdickenänderung**

- Für Landesstraßen von Teilnehmer 2 erfolgt keine Abänderung der ungebundenen Schichtdicken (= 50 cm) für die Bautypen AS1 der RVS 03.08.63. Allerdings kann ausgehend von Erfahrungswerten eine Schichtdickenerhöhung von +10 cm z.B. in höher gelegenen Straßenbauwerken vorgesehen werden.
- Aufgrund alpiner Verhältnisse wird bei Teilnehmer 7 das Schichtpaket der ungebundenen Tragschichten generell auf 60 cm erhöht. Ab 1000 m Höhe erfolgt eine zusätzliche Erhöhung auf 80 cm, sofern frostepfindlicher Boden vorliegt. Alternativ kann auch Bodenaustausch bzw. Bodenverbesserung erfolgen.
- Drei Befragte gaben an, Anpassungen basierend auf Erfahrungswerten vorzunehmen. Dabei sind keine expliziten Schichtdicken vordefiniert.
- Bei zwei Befragten erfolgt keine Schichtdickenerhöhung der ungebundenen Tragschichten

4. Die Teilnehmer nannten auch hier alle regeltechnisch möglichen Untersuchungsmethoden und gaben keine einschränkenden Antworten. Präferiert genannt wurden Schürfe mit zusätzlicher labortechnischer Untersuchung (Korngrößenverteilung, Feinanteile).

5. Sieben von acht Teilnehmern gaben an, auf keine grundsätzlichen Probleme bei der Bemessung mittels RVS-Richtlinien zu stoßen. In einem Fall wurde darauf hingewiesen, dass es trotz Einhaltung der Richtlinienkriterien und zusätzlicher Entwässerungsmaßnahmen, vereinzelt zu Frostproblemen bei ungünstig gelegenen Straßenabschnitten kommen kann.

6. Die bestehende Bemessungssituation wird von den Befragten als ausreichend empfunden. In einem Fall wurde der Wunsch geäußert, genauere Festlegungen hinsichtlich der Anpassung an ungebundene Tragschichten infolge von Frosteinwirkung, zu treffen.

Die Kernaussage der Umfrage ist, dass die Anpassung der ungebundenen Tragschichten infolge Frosteinwirkung auf Erfahrungswerten beruht (siehe Abbildung 27). Nur zwei Teilnehmer konnten konkrete Schichtdickenänderungen angeben, die auch in einem landesspezifischen Dokument festgehalten sind. Zielführend wäre eine zusätzliche optionale Frostdimensionierung in der RVS 03.08.63.

Kritisch zu sehen sind die zweite und dritte Fragestellung, da sie zu allgemein gehalten sind. Dies mündete in nicht aussagekräftigen Antworten. Auch gaben alle Teilnehmer an, die gängigen RVS-Richtlinien anzuwenden, dadurch sind die möglichen labortechnischen Bodenuntersuchungen ohnehin durch das Regelwerk definiert.

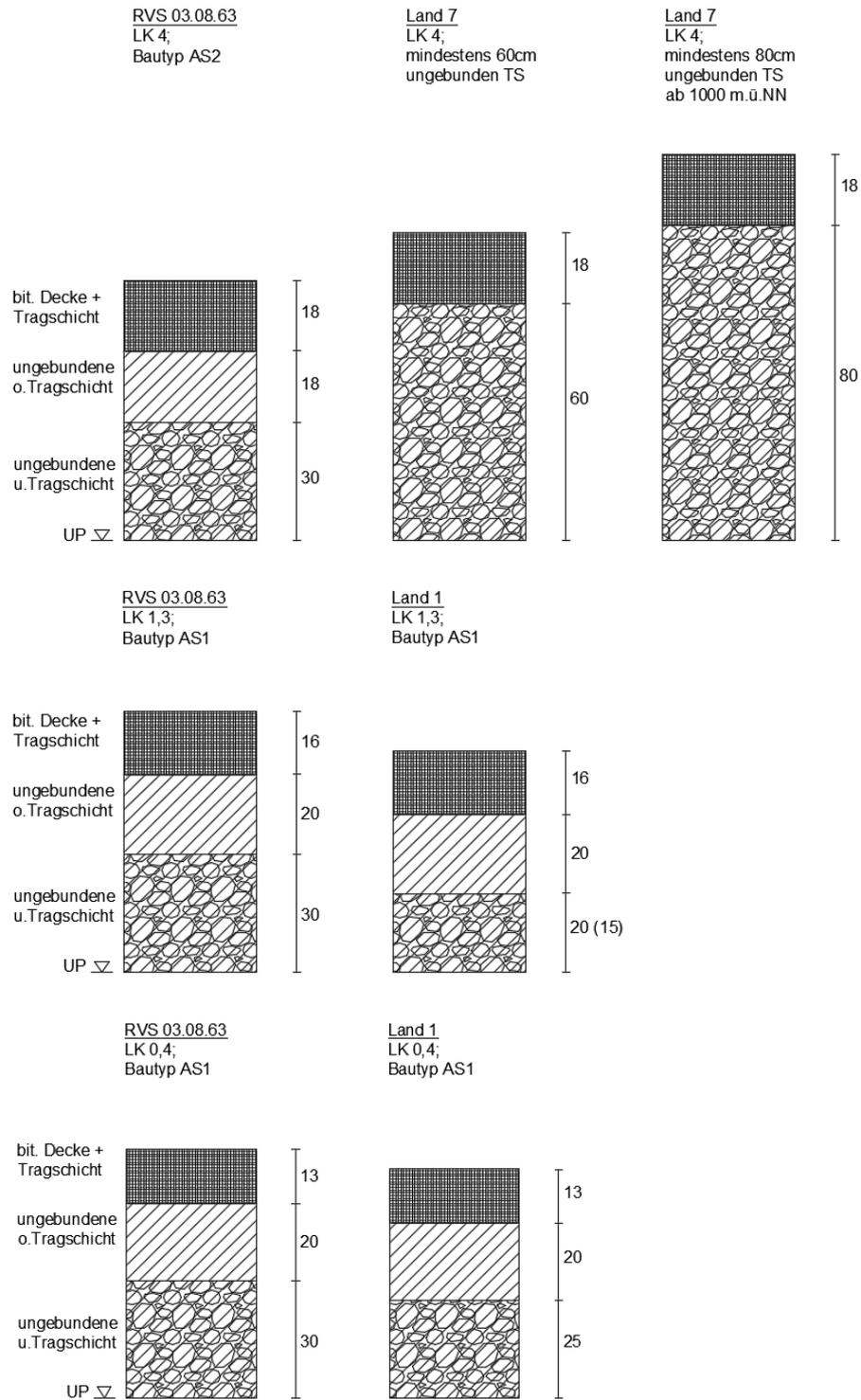


Abb. 28 – Schichtdickenänderung von ungebundenen Tragschichten zweier Umfrageteilnehmer

### 3.3 Bemessung in Deutschland

#### Oberbaubemessung nach RStO 12

In Deutschland erfolgt die Bemessung des Straßenoberbaus anhand der RStO, der Richtlinien für die Standardisierungen des Oberbaus von Verkehrsflächen, die aktuelle Ausgabe ist aus dem Jahr 2012. Verfasst wurde die RStO 12 von der Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Der Ausgangspunkt der Bemessung ist die Ermittlung der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung  $B$ , dies entspricht gewichteten äquivalenten Achsübergängen mit 10t Belastung. In der Richtlinie sind zwei mögliche Berechnungsmöglichkeiten angegeben. Die erste Richtlinie basiert auf DTV-Angaben, der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke, mit der Dimension Fahrzeuge pro Stunde und mehreren Faktoren. Die zweite Richtlinie setzt das Vorliegen detaillierter Achslastdaten voraus. Die Bemessung erfolgt für den Fahrsteifen mit der maximalen Verkehrsbelastung. (RStO 12)

Folgende Bauweisen sind tabellarisch angeführt:

- Sieben Bauweisen mit Asphaltdecken
- Sieben Bauweisen mit Betondecken
- Sieben Bauweisen mit Pflasterdecke
- Zwei Bauweisen mit vollgebundenem Oberbau (Asphalt oder Beton)

#### 1. Möglichkeit, Bestimmung von B anhand DTV Angaben: (vgl. RStO 12 Abschnitt.)

$$B = 365 * q_{Bm} * f_3 * \sum_{i=1}^N [DTA_{i-1}^{SV} * f_{1i} * f_{2i} * (1 + p_i)] \quad [26]$$

(optional Bestimmung von B mit konstanten Faktoren siehe Anhang 1 RStO 12)

$B$	Gewichtete 10-t-Achsübergänge im Nutzungszeitraum
$q_{Bm}$	Lastkollektivquotient für jeweilige bestimmte Straßenklasse, der die straßenklassenspezifische mittlere Beanspruchung der jeweiligen tatsächlichen Achsübergänge ausdrückt.
$f_3$	Steigungsfaktor
$N$	Anzahl der Nutzungsjahre (i.d.R. 30 Jahre)
$DTA_{i-1}^{SV}$	Durchschnittliche Anzahl der täglichen Achsübergänge ( $Aü$ ) des Schwerverkehrs im Nutzungsjahr $i-1$ $[Aü/24h]$ mit $DTA_{i-1}^{SV} = DTV_{i-1}^{SV} * f_{A_{i-1}}$ <span style="float: right;">[27]</span>
$DTV_{i-1}^{SV}$	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs im Nutzungsjahr $i-1$ $[Fz/24h]$
$f_{1i}$	Fahrstreifenfaktor im Nutzungsjahr $i$
$f_{2i}$	Fahrstreifenbreitenfaktor im Nutzungsjahr $i$
$f_{A_{i-1}}$	Durchschnittliche Achszahl pro Fahrzeug des Schwerverkehrs (Achszahlfaktor) im Nutzungsjahr $i-1$ $[A/Fz]$
$p_i$	Mittlere jährliche Zunahme des Schwerverkehrs im Nutzungsjahr $i$

## 2. Möglichkeit, Bestimmung von B anhand von Achslastdaten: (vgl. RStO 12 Abschnitt.)

$$B = 365 * f_3 * \sum_{i=1}^N [ EDTA_{i-1}^{SV} * f_{1i} * f_{2i} * (1 + p_i) ] \quad [28]$$

(optional Bestimmung von B mit konstanten Faktoren siehe Anhang 1 RStO 12)

$EDTA_{i-1}^{SV}$  Durchschnittliche Anzahl der täglichen äquivalenten Achsübergänge des Schwerverkehrs im Nutzungsjahr  $i-1$  mit:

$$EDTA_{i-1}^{SV} = \sum_k [ DTA_{(i-1)k}^{SV} * \left( \frac{L_k}{L_0} \right)^4 ] \quad [29]$$

$k$  Lastklasse, als Gruppe von Einzelachslasten definiert

$L_k$  Mittlere Achslast in der Lastklasse

$L_0$  Bezugsachslast: 10 t

Anhand der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung  $B$  [Mio.] erfolgt die Zuordnung zu einer Belastungsklasse  $Bk_x$  [Mio.]. Die höchste Klasse ist  $Bk_{100}$  für alle Beanspruchungen  $> 32$  Mio. und die kleinste ist  $Bk_{0,3}$  für  $B \leq 0,3$  Mio. Im nächsten Bemessungsschritt ist die Dicke der Frostschutzschicht zu ermitteln.

### Bestimmung der Frostschutzschichtdicke

In Abhängigkeit des im Planungsfall anzutreffenden Bodens, muss dieser einer Frostempfindlichkeitsklasse zugeordnet werden. Die Einteilung und Bezeichnung der Bodengruppen ist in der DIN 18196 und die Zuordnung in der Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, der ZTV E-StB 09, geregelt. Mittels Ungleichförmigkeitszahl und prozentuellen Gesamtmasseanteil der Feinteilmenge (siehe Abbildung 29), erfolgt die Einteilung in die Frostempfindlichkeitsklasse F1 bis F3.

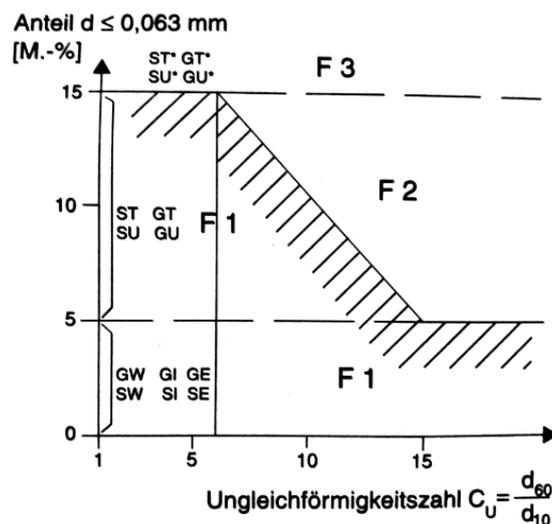


Abb.29 - Zuordnung der Frostempfindlichkeitsklassen (ZTV E-StB 09)

In Tabelle 10 sind die Frostempfindlichkeitsklassen mit den dazugehörigen Bodengruppen angegeben. Aufgrund der Zuordnung nach den Bodengruppen, sind die Kriterien für die Frostempfindlichkeit von Böden, in der Oberbaubemessung in Deutschland, maßgeblich mit den Bodenparametern der Korngrößenverteilung und der Plastizität verknüpft. Somit lässt sich ein Boden mit Tonanteilen entweder in die Klasse F2 oder F3 einstufen.

**Tabelle 10 - Frostempfindlichkeitsklassen nach ZTV E-StB 09**

	<b>Frostempfindlichkeit</b>	<b>Bodengruppen nach DIN 18196</b>																				
<b>F 1</b>	Nicht frostempfindlich	<table border="1"> <tr> <td>GW</td> <td>Weitgestufte Kies-Sand-Gemische</td> </tr> <tr> <td>GI</td> <td>Intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische</td> </tr> <tr> <td>GE</td> <td>Enggestufte Kiese</td> </tr> <tr> <td>SW</td> <td>Weitgestufte Sand-Kies-Gemische</td> </tr> <tr> <td>SI</td> <td>Intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische</td> </tr> <tr> <td>SE</td> <td>Enggestufte Sande</td> </tr> </table>	GW	Weitgestufte Kies-Sand-Gemische	GI	Intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische	GE	Enggestufte Kiese	SW	Weitgestufte Sand-Kies-Gemische	SI	Intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische	SE	Enggestufte Sande								
GW	Weitgestufte Kies-Sand-Gemische																					
GI	Intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische																					
GE	Enggestufte Kiese																					
SW	Weitgestufte Sand-Kies-Gemische																					
SI	Intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische																					
SE	Enggestufte Sande																					
<b>F 2</b>	Gering bis mittel frostempfindlich	<table border="1"> <tr> <td>TA</td> <td>Ausgeprägt plastische Tone; <math>w_L &gt; 50\%</math></td> </tr> <tr> <td>OT</td> <td>Tone mit organischen Beimengungen und organogenen Tone; <math>w_L &gt; 50\%</math></td> </tr> <tr> <td>OH</td> <td>Grob- bis gemischtkörnige Böden mit Beimengungen humoser Art</td> </tr> <tr> <td>OK</td> <td>Grob- bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen</td> </tr> <tr> <td>ST<sup>1</sup></td> <td>Sand-Ton-Gemische</td> </tr> <tr> <td>GT<sup>1</sup></td> <td>Kies-Ton-Gemische</td> </tr> <tr> <td>SU<sup>1</sup></td> <td>Sand-Schluff-Gemische</td> </tr> <tr> <td>GU<sup>1</sup></td> <td>Kies-Schluff-Gemische</td> </tr> </table>	TA	Ausgeprägt plastische Tone; $w_L > 50\%$	OT	Tone mit organischen Beimengungen und organogenen Tone; $w_L > 50\%$	OH	Grob- bis gemischtkörnige Böden mit Beimengungen humoser Art	OK	Grob- bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen	ST <sup>1</sup>	Sand-Ton-Gemische	GT <sup>1</sup>	Kies-Ton-Gemische	SU <sup>1</sup>	Sand-Schluff-Gemische	GU <sup>1</sup>	Kies-Schluff-Gemische				
TA	Ausgeprägt plastische Tone; $w_L > 50\%$																					
OT	Tone mit organischen Beimengungen und organogenen Tone; $w_L > 50\%$																					
OH	Grob- bis gemischtkörnige Böden mit Beimengungen humoser Art																					
OK	Grob- bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen																					
ST <sup>1</sup>	Sand-Ton-Gemische																					
GT <sup>1</sup>	Kies-Ton-Gemische																					
SU <sup>1</sup>	Sand-Schluff-Gemische																					
GU <sup>1</sup>	Kies-Schluff-Gemische																					
<b>F 3</b>	Sehr frostempfindlich	<table border="1"> <tr> <td>TL</td> <td>Leicht plastische Tone; <math>w_L &lt; 35\%</math></td> </tr> <tr> <td>TM</td> <td>Mittelpastische Tone; <math>35\% \leq w_L \leq 50\%</math></td> </tr> <tr> <td>UL</td> <td>Leicht plastische Schluffe; <math>w_L &lt; 35\%</math></td> </tr> <tr> <td>UM</td> <td>Mittelpastische Schluffe; <math>35\% \leq w_L \leq 50\%</math></td> </tr> <tr> <td>UA</td> <td>Ausgeprägt plastische Schluffe; <math>w_L &gt; 50\%</math></td> </tr> <tr> <td>OU</td> <td>Schluffe mit organischen Beimengungen und organogene Schluffe</td> </tr> <tr> <td>ST<sup>1</sup></td> <td>Sand-Ton-Gemische</td> </tr> <tr> <td>GT<sup>1</sup></td> <td>Kies-Ton-Gemische</td> </tr> <tr> <td>SU<sup>1</sup></td> <td>Sand-Schluff-Gemische</td> </tr> <tr> <td>GU<sup>1</sup></td> <td>Kies-Schluff-Gemische</td> </tr> </table>	TL	Leicht plastische Tone; $w_L < 35\%$	TM	Mittelpastische Tone; $35\% \leq w_L \leq 50\%$	UL	Leicht plastische Schluffe; $w_L < 35\%$	UM	Mittelpastische Schluffe; $35\% \leq w_L \leq 50\%$	UA	Ausgeprägt plastische Schluffe; $w_L > 50\%$	OU	Schluffe mit organischen Beimengungen und organogene Schluffe	ST <sup>1</sup>	Sand-Ton-Gemische	GT <sup>1</sup>	Kies-Ton-Gemische	SU <sup>1</sup>	Sand-Schluff-Gemische	GU <sup>1</sup>	Kies-Schluff-Gemische
TL	Leicht plastische Tone; $w_L < 35\%$																					
TM	Mittelpastische Tone; $35\% \leq w_L \leq 50\%$																					
UL	Leicht plastische Schluffe; $w_L < 35\%$																					
UM	Mittelpastische Schluffe; $35\% \leq w_L \leq 50\%$																					
UA	Ausgeprägt plastische Schluffe; $w_L > 50\%$																					
OU	Schluffe mit organischen Beimengungen und organogene Schluffe																					
ST <sup>1</sup>	Sand-Ton-Gemische																					
GT <sup>1</sup>	Kies-Ton-Gemische																					
SU <sup>1</sup>	Sand-Schluff-Gemische																					
GU <sup>1</sup>	Kies-Schluff-Gemische																					
<p>1) Für diese Böden kann eine Zuordnung sowohl zu F2 als auch F1 erfolgen, in Abhängigkeit von <math>C_u</math> und dem Anteil der Korngröße <math>\leq 0,063</math> mm in Masseprozent (siehe Abbildung 4.3). Auch sind diese Bodengruppen bei über 15% Masse der Feinanteile als F3 einzustufen. Wenn eine qualifizierte Bodenverbesserung mittels Bindemittleinsatz erfolgt, dann können alle Bodengruppen aus Klasse F3 herabgestuft werden zu F2. (ZTV E-StB 09)</p>																						

#### Zusätzliche Bestimmungen:

Für F2 - F3 Böden gilt: (ZTV E-StB 09)

- Auf dem Planum der Böden der Klasse F2 und F3 wird ein Verformungsmodul  $E_{v2} \geq 45$  MPa vorausgesetzt.
- Erfolgt die Oberbauausführung als vollgebundene Bauweise, dann ist für den Untergrund bzw. Unterbau der Klasse F3 (und F2 bei ungünstigen Wasserverhältnissen) eine Bodenverfestigung in Höhe von 15 cm vorzusehen.

Für F1 Böden gilt: (ZTV E-StB 09)

- Erfolgt die Straßenoberbaubemessung auf Böden der Klasse F1, kann die Frostschuttschicht komplett entfallen, wenn die Schicht in eine Tiefe von mindestens 120 cm reicht, in Abhängigkeit zur jeweiligen Frosteinwirkungszone
- Das Verformungsmodul ist mindestens  $E_{v2} \geq 100$  MPa. Wird das Kriterium nicht erreicht, dann erfolgt Bodenverfestigung oder der Aufschlag einer ungebundenen Tragschicht (siehe tabellarische Dickenangaben Tabelle 8, ZTV E-StB 09).

Die genannte Bodenbestimmung ist der Ausgangspunkt für die Bestimmung der Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus. In Kombination mit den ermittelten Belastungsklassen ergibt sich ein Ausgangswert, der in der Bemessung anzusetzen ist (siehe Tabelle 11).

**Tabelle 11 - Ausgangswerte für Frostdickenbestimmung nach (RStO 12)**

F - Klasse	Dicke [cm] bei Belastungsklasse		
	$Bk_{100} - Bk_{10}$	$Bk_{3,2} - Bk_{1,0}$	$Bk_{0,3}$
F2	55	50	40
F3	65	60	50

Die Schichtdickenerhöhung um 10 cm für Böden der Klasse F3 im Vergleich zu Böden der Klasse F2, ist auf erhöhte Tragfähigkeitsverluste der F3-Böden während der Auftauphase zurückzuführen (FGSV 2013). Der ermittelte Ausgangswert wird mit Zuschlägen [cm] versehen oder bei günstigen Verhältnissen mit Abzügen [cm]. Dabei fließen fünf zusammengestellte Einflussgrößen in die Bemessung mit ein (Abbildung 30). Theoretisch ist eine Dickenänderung um + 30 cm nach Berücksichtigung ungünstiger Einflussgrößen möglich. Der Einfluss der Frosteinwirkung wird durch Standortzuordnung des Bauvorhabens, anhand einer deutschlandweiten Zoneneinteilung, berücksichtigt.

1. Frosteinwirkung		
Zone I $\pm 0$ cm	Zone II + 5 cm	Zone III + 15 cm
2. lokale Klimaunterschiede		
Ungünstiger Einfluss z.B. Schattenlage/Nordhanglage + 5 cm	Kein besonderer Einfluss $\pm 0$ cm	Günstiger Einfluss durch geschlossene seitliche Bebauung - 5 cm
3. Wasserverhältnisse im Untergrund		
Kein Grund- und Schichtenwasser bis zu einer Tiefe von 1,5m unter Planum $\pm 0$ cm	Grund- oder Schichtwasser dauernd höher als 1,5 m unter Planum + 5 cm	
4. Lage der Gradiente		
Einschnitt, Anschnitt + 5 cm	Geländehöhe und Damm $\leq 2,0$ m, dann $\pm 0$ cm	Damm > 2,0m, dann - 5 cm
5. Entwässerung der Fahrbahn		
Entwässerung der Fahrbahn über Mulden, Gräben bzw. Böschungen $\pm 0$ cm	Entwässerung über Rinnen bzw. Abläufe und Rohrleitungen - 5 cm	

**Abb. 30 - Einflussgrößen für Frostbemessung in Deutschland nach (RStO 12)**

Die Frosteinwirkungszonen sind anhand einer Karte, mit einer Rastereinteilung von 1km<sup>2</sup>, ablesbar. Die zu Grunde liegende Einteilung der Frostzonen beruht auf einen maximalen Frostindex, der innerhalb einer Wiederkehrrate von 30 Jahren zu erwarten ist. Die statistische Ermittlung des Index greift auf Wetterdaten von 221 Wetterstationen, über einen Beobachtungszeitraum von 50 Jahren zurück und erfolgte im Zuge einer Forschungsarbeit des Deutschen Wetterdienstes. (Blume und Plehm 2009)

**Tabelle 12 - Gegenüberstellung  $z_F$  und Ausgangswerte nach (Blume und Plehm 2009)**

Frostzone		Frostindex (FI30)	Frosteindringungs- Berechnung [cm]		Ausgangswerte [cm] nach Tabelle 11 $Bk_{3,2} - Bk_{1,0}$	
			$z_F$	$0,6 * z_F$	F2- Boden	F3- Boden
I	± 0	≤ 250	82	49	50	60
II	+ 5	> 250 ≤ 330	89	53	55	65
III	+ 15	> 330 ≤ 580	105	63	65	75

Die Ausgangswerte aus Tabelle 11 basieren auf der Erfahrung, dass 60% der maximal errechenbaren Frosteindringungstiefe  $z_F$  als anzusetzende Dicke ausreichen, um einen frostsicheren Oberbau zu erhalten (FGSV 2013). Für den Frostindex basierend auf einer Wiederkehrrate von 30 Jahren, ergibt sich mit der Näherungsformel nach Behr (Kapitel 2.1.3) für die Berechnung von  $z_F$ , die Festlegung der Ausgangswerte.

#### Auswahl eines Straßenoberbaus

Mittels der ermittelten Bauklasse und der Frostschutzschichtdicke erfolgt eine tabellarische Auswahl der Bauweise. Im Folgenden findet sich ein Auszug aus den sieben Bauweisen mit Asphaltdecken (siehe Abbildung 32). Weitere wichtige technische Regelungen und Materialanforderungen für die Frostschutzschicht in Deutschland sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

(Dickenangaben in cm;  $\nabla$   $E_{v2}$ -Mindestwerte in MN/m<sup>2</sup>)

Zeile	Bauklasse	Bk <sub>100</sub>	Bk <sub>32</sub>	Bk <sub>10</sub>	Bk <sub>3,2</sub>	Bk <sub>1,8</sub>	Bk <sub>1,0</sub>	Bk <sub>0,3</sub>	
	B [Mio]	> 32	> 10 - 32	> 3,2 - 10	> 1,8 - 3,2	> 1,0 - 1,8	> 0,3 - 1,0	≤ 0,3	
	Dicke des frostsich. Oberbaues <sup>1)</sup>	55 65 75 85	55 65 75 85	55 65 75 85	45 55 65 75	45 55 65 75	35 45 55 65	35 45 55 65	
<b>Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht</b>									
1	Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalttragschicht	22	18	14	12	16	14	10	
	Frostschutzschicht	Σ34	Σ30	Σ26	Σ22	Σ20	Σ18	Σ14	
	Dicke der Frostschutzschicht	31 <sup>2)</sup> 41 51	25 <sup>3)</sup> 35 45 55	29 <sup>4)</sup> 39 49 59	33 <sup>5)</sup> 43 53	25 <sup>6)</sup> 35 45 55	17 <sup>7)</sup> 27 37 47	21 31 41 51	
<b>Asphalttragschicht und Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel auf Frostschutzschicht bzw. Schicht aus frostunempfindlichem Material</b>									
2.1	Asphaltdecke	12	12	12					
	Asphalttragschicht	14	10	8					
	Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT)	15	15	15					
	Dicke der Frostschutzschicht	34 <sup>2)</sup> 44	28 <sup>3)</sup> 38 48	30 <sup>4)</sup> 40 50	31 <sup>5)</sup> 41 51	25 <sup>6)</sup> 35 45 55	27 <sup>7)</sup> 37 47 57	21 31 41 51	
2.2	Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalttragschicht	18	14	10	10	12	10	10	
	Verfestigung	15	15	15	15	15	15	15	
	Dicke der Schicht aus frostunempfindlichem Material	10 <sup>4)</sup> 20 <sup>4)</sup> 30 40	14 <sup>4)</sup> 24 34 44	18 <sup>4)</sup> 28 38 48	10 <sup>4)</sup> 20 30 40	14 <sup>4)</sup> 24 34 44	6 <sup>4)</sup> 16 <sup>4)</sup> 26 36	6 <sup>4)</sup> 16 <sup>4)</sup> 26 36	
2.3	Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalttragschicht	18	14	10	10	12	10	10	
	Verfestigung	20	20	20	20	20	20	20	
	Dicke der Schicht aus frostunempfindlichem Material	5 <sup>4)</sup> 15 <sup>4)</sup> 25 35	9 <sup>4)</sup> 19 <sup>4)</sup> 29 39	13 <sup>4)</sup> 23 33 43	5 <sup>4)</sup> 15 <sup>4)</sup> 25 35	14 <sup>4)</sup> 24 34 44	6 <sup>4)</sup> 16 <sup>4)</sup> 26 36	6 <sup>4)</sup> 16 <sup>4)</sup> 26 36	
<b>Asphalttragschicht und Schottertragschicht auf Frostschutzschicht</b>									
3	Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalttragschicht	18	14	10	10	12	10	10	
	Schottertragschicht <sup>7)</sup> $E_{v2} \geq 150(120)$	15	15	15	15	15	15	15	
	Dicke der Frostschutzschicht	30 <sup>2)</sup> 40	34 <sup>2)</sup> 44	28 <sup>3)</sup> 38 48	30 <sup>2)</sup> 40	24 <sup>3)</sup> 34 44	26 <sup>3)</sup> 36 46	18 <sup>3)</sup> 28 38	
<b>Asphalttragschicht und Kiestragschicht auf Frostschutzschicht</b>									
4	Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalttragschicht	18	14	10	10	12	10	10	
	Kiestragschicht $E_{v2} \geq 150(120)$	20	20	20	20	20	20	20	
	Dicke der Frostschutzschicht	25 <sup>3)</sup> 35	29 <sup>3)</sup> 39	33 <sup>3)</sup> 43	25 <sup>3)</sup> 35	29 <sup>3)</sup> 39	31 <sup>2)</sup> 41	23 <sup>2)</sup> 33	
<b>Asphalttragschicht und Schotter- oder Kiestragschicht auf Schicht aus frostunempfindlichem Material</b>									
5	Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4	
	Asphalttragschicht	18	14	10	10	12	10	10	
	Schotter- oder Kiestragschicht	30 <sup>5)</sup>	30 <sup>5)</sup>	30 <sup>5)</sup>	30 <sup>5)</sup>	30 <sup>5)</sup>	30 <sup>5)</sup>	25 <sup>5)</sup>	
	Dicke der Schicht aus frostunempfindlichem Material	Ab 12 cm aus frostunempfindlichem Material, geringere Restdicke ist mit dem darüber liegenden Material auszugleichen							

1) Bei abweichenden Werten sind die Dicken der Frostschutzschicht bzw. des frostunempfindlichen Materials durch Differenzbildung zu bestimmen, siehe auch Tabelle 8  
 2) Mit rundkömigen Gesteinskörnungen nur bei örtlicher Bewehrung anwendbar  
 3) Nur mit gebrochenen Gesteinskörnungen und bei örtlicher Bewehrung anwendbar  
 4) Nur ausführen, wenn das frostunempfindliche Material und das zu verfestigende Material als eine Schicht eingebaut werden  
 5) Bei Kiestragschicht in Bauklassen Bk<sub>3,2</sub> bis Bk<sub>10</sub> in 40 cm Dicke, in Bauklassen Bk<sub>1,8</sub> und Bk<sub>1,0</sub> in 30 cm Dicke  
 6) Tragschichtschicht, siehe auch Abschnitt 3.3.3  
 7) alternativ: Abminderung der Asphalttragschicht um 2 cm bei 20 cm dicker Schottertragschicht und  $E_{v2} \geq 180$  MN/m<sup>2</sup> (in Bauklassen Bk<sub>1,8</sub> bis Bk<sub>10</sub>) bzw.  $E_{v2} \geq 150$  MN/m<sup>2</sup>

Abb. 31 - Bauweise mit Asphaltdecke für Fahrbahnen auf F2- und F3 Böden (RStO 12)

**Tabelle 13 - Materialtechnische Anforderungen an die Frostschuttschicht nach (TL Gestein-StB 04, TL SoB-StB 04, ZTV SoB-StB 04)**

Wasseraufnahme der Gesteinskörnung nach DIN EN 1097-6	<u>TL Gestein-StB 04</u> $WA_{cm,0,5}$ (entspricht einer Wasseraufnahme $\leq 0,5$ M. %) → Erfüllt dann Gesteinskörnung frostsicher								
Widerstand gegen Frostbeanspruchung der Gesteinskörnung nach DIN EN 1367-1	<u>TL Gestein-StB 04</u> Wenn Wasseraufnahmekriterium nicht erfüllt, dann Erfüllung einer dieser Anforderungen: <table border="1" data-bbox="831 568 1433 869"> <thead> <tr> <th>Frostwiderstand / Verlust in M. %</th> <th>Kategorie F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\leq 1</math></td> <td><math>F_1</math></td> </tr> <tr> <td><math>\leq 2</math></td> <td><math>F_2</math></td> </tr> <tr> <td><math>\leq 4</math></td> <td><math>F_4</math></td> </tr> </tbody> </table> Hier keine Angabe von Recyclingkörnung oder Körnung aus Müllverbrennung siehe TL SoB-StB	Frostwiderstand / Verlust in M. %	Kategorie F	$\leq 1$	$F_1$	$\leq 2$	$F_2$	$\leq 4$	$F_4$
Frostwiderstand / Verlust in M. %	Kategorie F								
$\leq 1$	$F_1$								
$\leq 2$	$F_2$								
$\leq 4$	$F_4$								
Verwendung von Baustoffgemischen für Frostschuttschichten	<u>TL SoB-StB 04</u> Folgende Baustoffgemische können verwendet werden: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0/2; 0/4; 0/5; 0/8; 0/11; 0/16; 0/22; 0/32; 0/45; 0/56; 0/63</li> <li>• Bodengruppen der F1 Klasse</li> </ul> <u>ZTV SoB-StB 04</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberfläche bis 20 cm Tiefe mit 0/8 – 0/63 und Böden GW und G</li> </ul>								
Feinanteile $< 0,063$ mm von Baustoffgemischen nach DIN EN 933-1 (vor Einbau)	<u>TL SoB-StB 04</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\leq 5</math> M.% für <math>UF_5</math></li> <li>• <math>\leq 3</math> M.% für <math>UF_3</math></li> </ul> → gilt nur für Bodengemische, wenn Grundwasseranstieg bis zum Planum reicht								
Frostempfindlichkeit von Baustoffgemischen	<u>TL SoB-StB 04</u> Es gibt keine nationale Angabe zur Frostempfindlichkeit von Gemischen								
Korngrößenverteilung von Baustoffgemischen nach DIN EN 933-1	<u>TL SoB-StB 04</u> Festgelegte mögliche Sieblinien → Vorgaben gelten nur für die oberen 20 cm der Frostschuttschicht, danach genügt als Anforderung der begrenzte Feinanteil (siehe oben)								
Feinanteil $< 0,063$ mm von Frostschuttschichten für den eingebauten Zustand	<u>ZTV SoB-StB 04</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\leq 7</math> M.%</li> <li>• wenn Grundwasser bis zur Schicht ansteht, dann <math>\leq 5</math> M.% für die unteren 20 cm</li> </ul>								
Verformungsmodul auf Frostschuttschicht (FSS)	➤ $E_{v2}$ 100 - 120 MN/m <sup>2</sup> in Abhängigkeit der Bauklasse, wenn über der FSS noch eine Kies-schicht eingebaut wird, dann $E_{v2}$ 80 MN/m <sup>2</sup> , sofern dort $E_{v2}$ 100 -120 MN/m <sup>2</sup> erreicht wird.								

### 3.4 Bemessung in der Schweiz

In der Schweiz erfolgt die Oberbaubemessung anhand der *SN 640 324 – Dimensionierung des Strassenaufbaus - Unterbau und Oberbau*. Hinsichtlich der Frosteinwirkung im Straßenoberbau ist die *SN 670 140b – Frost* von großer Bedeutung. Dabei basiert die gesamte Oberbaudimensionierung auf Forschungsergebnissen der amerikanischen AASHO Road Tests. Die Dimensionierung lässt sich einteilen in die Tragfähigkeitsdimensionierung und in die Frostdimensionierung.

#### Tragfähigkeitsdimensionierung gemäß (SN 640 324)

Die maßgebende Belastung der Straße wird durch eine äquivalente Verkehrslast berücksichtigt, die äquivalente tägliche Verkehrslast  $TF_n$ , oder durch die gesamte äquivalente Verkehrslast  $W_n$ , mit  $n$  als Anzahl der Bemessungsjahre (SN 640 320). Bei der Dimensionierung unter zu Hilfeahme eines standardisierten Katalogs für Oberbautypen, erfolgt die Zuordnung von  $TF_{20}$  zu entsprechenden Verkehrslastklassen  $Ti_{20}$ . Die Verkehrslastklassen sind eingeteilt von  $T1_{20}$  (sehr leicht) bis  $T6_{20}$  (extrem schwer). Zusammen mit den Tragfähigkeitsklassen für Bodenarten (Tabelle 14) erlauben sie die Auswahl des Straßenoberbaus.

**Tabelle 14 - Bodentragfähigkeitsklassen (SN 640 320)**

Tragfähigkeitsklassen	Grenzwerte zur genaueren Bestimmung			
	$M_{E1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{V1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$CBR$ [%]	$k$ [MN/m <sup>3</sup> ]
<b>S0</b> Sehr geringe Tragfähigkeit	< 6	< 4,5	< 3	< 15
<b>S1</b> Geringe Tragfähigkeit	6...15	4,5...11,25	3...6	15...30
<b>S2</b> Geringe Tragfähigkeit	> 15...30	> 11,25...22,5	> 6...12	> 30...60
<b>S3</b> Sehr hohe Tragfähigkeit	> 30...60	> 22,5...45	> 12...25	> 60...100
<b>S4</b> Sehr hohe Tragfähigkeit	> 60	> 45	> 25	> 100

$M_{E1}$  und  $E_{V1}$  sind beides Erstbelastungsergebnisse aus Plattendruckversuchen, die allerdings unterschiedlich berechnet werden (SN 670 317). Der  $CBR$  California bearing ratio ist mittels CBR-Penetrometer Feldversuch zu ermitteln und  $k$  ist der Reaktionsmodul nach Westergaard, der sich mittels Plattenversuchen bestimmen lässt. Die Schweizer Norm gestattet auch die Verwendung von alternativen Tragfähigkeitsbestimmungsmethoden, sofern ein korrelierender Zusammenhang besteht.

Abweichend vom Oberbaukatalog können auch variable Schichtdicken für flexible und halbstarre bzw. bituminöse Oberbauten festgelegt werden. Hierzu lässt sich tabellarisch (siehe Tabelle 14) anhand der Tragfähigkeitsklassen des Bodens und wahlweise mit  $W_n$  oder  $Ti_{20}$ , ein erforderlicher Strukturwert  $SN_{erf}$  ablesen. Die Bemessung gilt als nachgewiesen, wenn  $SN_{erf} \leq SN_{dimensioniert}$ .

$$SN_{dimensioniert} = a_1 * D_1 + \dots + a_n * D_n \quad [30]$$

$a_n$  = Wert für die Tragfähigkeit einer Schicht (Tabelle 7) in SN 640 324

$D_n$  = Schichtdicke [cm]

Unter Anwendung derselben Auswahlkriterien, lässt sich für starre und kombinierte Oberbautypen, die minimal notwendige Dicke der Betondecke tabellarisch bestimmen, wobei die maximale Länge der Betondecke begrenzt ist.

### Frostdimensionierung

Der im ersten Bemessungsschritt auf Tragfähigkeit dimensionierte Oberbau, wird im zweiten Bemessungsschritt auf Frostsicherheit geprüft. Ergibt sich daraus eine notwendige Frostdimensionierung, dann wird die Dicke des Schichtpakets abgeändert oder ein anderer Oberbautyp ausgewählt. Dabei wird zunächst der Untergrund in Frostempfindlichkeitsklassen (Tabelle 17) eingeteilt. Ist ein Boden der Frostempfindlichkeitsklasse G1 (vernachlässigbar) oder G2 (leicht) anzutreffen, erfolgt keine Frostdimensionierung. Liegen allerdings schlechte hydrogeologische Bedingungen vor, sind auch für die Böden der Klasse G2 frostverhütenden Maßnahmen vorzusehen. (SN 640 324)

Im nächsten Schritt wird der Frostindex der Straße  $FI_s$  [ $^{\circ}\text{C Tag}$ ] ermittelt. Dieser bezieht sich, durch Berücksichtigung eines Strahlungsindex, auf die Temperatur an der Fahrbahnoberfläche (SN 670 140b):

$$FI_s = FI - RI \quad [31]$$

$RI$  = Strahlungsindex [ $^{\circ}\text{C Tag}$ ]

$FI$  = Frostindex der Luft [ $^{\circ}\text{C Tag}$ ]

Der Strahlungsindex lässt sich anhand eines Diagramms abschätzen. Dazu wird die mittlere Tagessumme der Globalstrahlung auf ebener Fläche  $GH$  [ $\text{kWh} * \text{m}^{-2}$ ] oder  $GH$  [ $\text{MJ} * \text{m}^{-2}$ ] benötigt, sowie die Strahlungsdauer [h] unter Berücksichtigung der regional üblichen Beschattung z.B. durch Gebirge. Zur genaueren Abschätzung werden in der Norm Beispiele angeführt. (SN 670 140b)

Der dimensionierungsrelevante Frostindex der Luft, ist der Mittelwert aus den drei Indizes der kältesten Winter einer Periode von 30 Jahren. Im Anhang der Norm befindet sich eine Frostindexkarte für die Schweiz, aus der der Frostindex abzulesen ist. Der kartographierte Dimensionierungswert, ist ermittelt nach der globalen Methode, d.h. die jeweiligen berechneten Frostindizes beziehen sich auf einen ganzen Winter und daraus wird der maßgebende Mittelwert angegeben. (SN 670 140b)

Ist  $FI_s$  bestimmt, größer als der kritische Frostindex  $FI_s^*$ , der aus dem Oberbaukatalog abzulesen ist, und ein frostempfindlicher Boden liegt vor, dann erfolgt eine Frostdimensionierung, wobei folgende Beziehung erfüllt werden muss (SN 670 140b):

$$d_s \geq f * X_{30} \quad [32]$$

$d_s$  = Oberbaudicke

$f$  = Frostdimensionierungsfaktor

$X_{30}$  = Mittlere Frosteindringtiefe der drei kältesten Winter in einer Periode von 30 Jahren (aus Frostindexkarte)

Die Oberbaudicke ergibt sich aus der Tragfähigkeitsdimensionierung bzw. dem Oberbaukatalog und muss, sofern die Bedingung aus Gleichung [32] nicht erreicht ist, erhöht werden. Der Frostdimensionierungsfaktor ist abhängig vom Oberbautyp, der Frostempfindlichkeitsklasse des Bodens, vom Frostindex  $FI_s$  und der Verkehrslastklasse. In Abbildung 33 ist beispielhaft ein Oberbau mit Betondeckschicht dargestellt, links als Ausführung für die zu erwartende Verkehrsbelastung  $T4_{20}$  und rechts mit geringerer Verkehrsbelastung  $T3_{20}$ . Der Faktor  $f$  ist für geringere Verkehrsbelastungen (Tabelle 16) niedriger und toleriert dadurch ein erhöhtes Schadensrisiko infolge Frosteinwirkung. Andererseits weist der rechte Schichtaufbau, infolge geringerer ungebundener Schichtdicke, einen niedrigeren kritischen Frostindex  $FI_s^*$  auf. (SN 640 320)

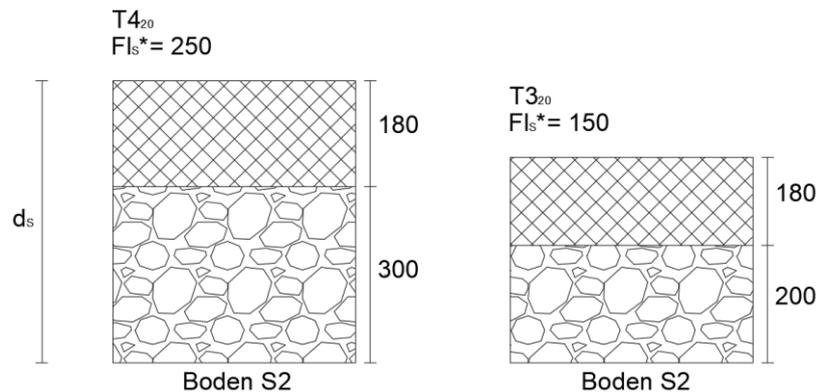


Abb. 32 - Beispiel für Oberbautyp mit Betondeckschicht auf ungebundenen Schichten gemäß (SN 640 320)

Tabelle 15 -  $f$  für Beispiel mit  $T4_{20}$  aus (SN 640 320)

$FI_s$	G3	G4
< 400	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>
400...600	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>
> 600	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>

Tabelle 16 -  $f$  für Beispiel mit  $T3_{20}$  aus (SN 640 320)

$FI_s$	G3	G4
< 400	<b>0,35</b>	<b>0,45</b>
400...600	<b>0,35</b>	<b>0,45</b>
> 600	<b>0,35</b>	<b>0,45</b>

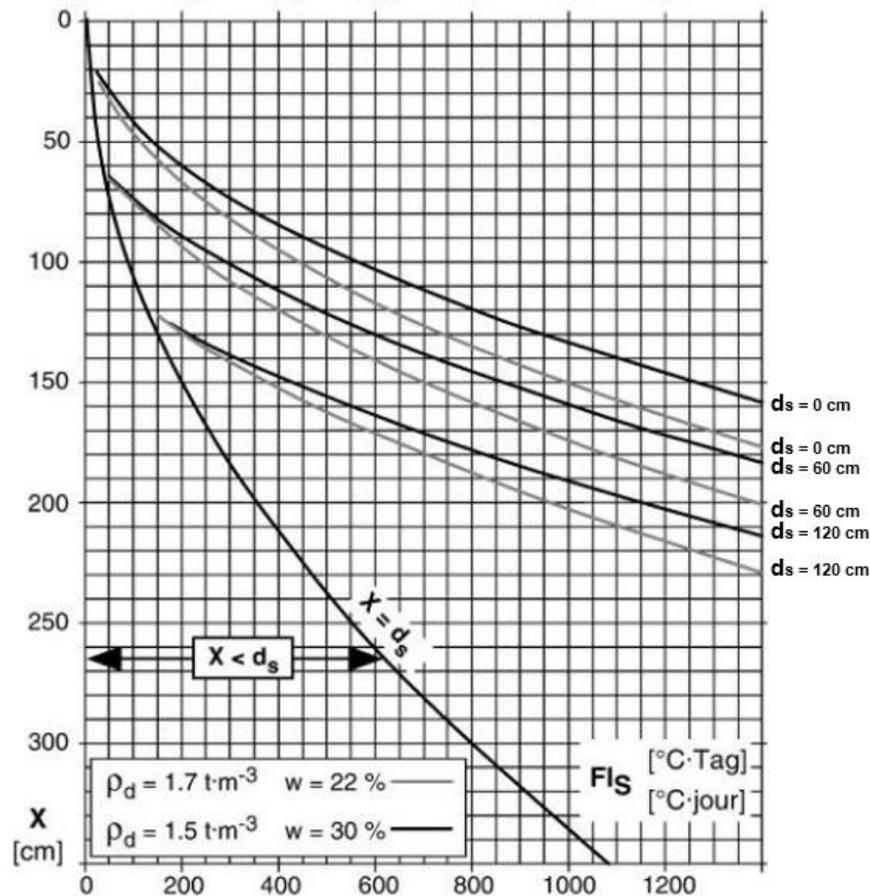


Abb. 33 - Bestimmung der Frosteindringtiefe  $X$  [cm] für die Frostempfindlichkeitsklasse G4 (SN 670 140b)

Die Frosteindringtiefe  $X_{30}$  ist an Diagrammen (Abbildung 34), für die Bodenklassen G3 und G4, zu ermitteln. In Abhängigkeit der Trockendichte und des Wassergehaltes des Untergrunds, der Oberbaudicke  $d_s$  und dem Frostindex  $FI_s$  an der Fahrbahnoberfläche. Eine Frostmessung am Bauort ist auch möglich, wobei die jeweiligen Frostindizes der Messungen mit dem lokalen dimensionierungsrelevanten Frostindex abgeglichen werden müssen. (SN 670 140b)

Weitere Kriterien:

- Für ungebundene Gemische gilt die Begrenzung des Feinanteils  $< 0,063$  mm auf 3 M.%. Bei Überschreitung ist ein Frosthebungsversuch zusammen mit einem CBR-Versuch vorzunehmen (SN 670 119 NA). Die Feinanteilbestimmung erfolgt gemäß europäisch harmonisierter Norm.
- Bodenaustausch bis zur Frosteindringtiefe  $X_{30}$  ist möglich, eine thermische Isolation (mindestens 4cm Dicke) unterhalb der Fundationsschicht jedoch mindestens 40 cm unter der Fahrbahnoberfläche sowie Bindemittel-Bodenstabilisierung des Unterbaus. (SN 640 324)
- Für exaktere Angaben zur Frostempfindlichkeit des Unterbaus, im Vergleich zu Tabelle 17, sind Frosthebungsversuche mit CBR-Versuch durchzuführen. Auch für „sehr organische“ Böden. (SN 670 140b)

**Tabelle 17 - Einteilung der Böden in Frostempfindlichkeitsklassen aufgrund ihrer Korngrößenverteilung und Plastizitätseigenschaften in Anwendung der USCS-Klassifikation gemäß SN 670 008a; aus (SN 670 140 b)**

Daten				Ergebnis
USCS gemäß SN 670 008a	Feinanteil (Korngröße kleiner als 0,02 mm) in %	Plastizitätsindex $I_p$ [%]	Steilheitskoeffizient $C_{ud} = d_{60}/d_{10}$	Frostempfindlichkeitsklasse
GW, GP	< 3			G1
	1...4		> 80	G1-G2
GW-GM, GP-GM	< 3			G1
	3...8			G2
	> 3		> 80	G2-G3
GW-GC, GP-GC	3...8			G2
	> 3		> 80	G2-G3
GM	< 3			G1
	3...8			G2
	> 3		> 80	G2-G3
GC, GC-GM				G3-G4
SW, SP	< 3			G1
	1...3		> 80	G1-G2
SW-SM, SP-SM	3...10			G2
	> 5		> 80	G2-G3
SW-SC, SP-SC	> 3			G2
	> 5			G2-G3
SM	3...10			G2
	> 5		> 80	G2-G3
	> 15			G3
SC, SC-SM				G3
ML		> 12		G3
		< 12		G4
CL-ML				G4
CL				G3-G4
CM		> 20		G3
		< 20		G3-G4
MH				G3
CH				G2
OL				G2-G3
OH, Pt				Sehr unterschiedlich
Bändertone und andere feinkörnige Bändersedimente				G4
<b>G1 = vernachlässigbar; G2 = leicht; G3 = mittel; G4 = stark</b>				

### 3.5 Bemessung in den USA

Die Straßenoberbaubemessung in den USA änderte sich mit der Einführung des *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG). Der MEPDG wurde erstmals 2008, von der *American Association of State Highway and Transportation* veröffentlicht. Im Zuge dessen wurde im Jahr 2011 die erste Version der begleitenden Bemessungssoftware *AASHTOWARE Pavement ME Design* zur Verfügung gestellt. Grundsätzlich ist der gesamte Ablauf der Straßenoberbaubemessung auf dieses Programm zugeschnitten. Das Programm ermöglicht die Bemessung in den USA und Kanada. (AASHTO 2015)

Die Anwendung der neuen Bemessungsmethode für Straßenaufbauten mit Betondeckschichten erfolgt in 14 Bundesstaaten der USA, weitere 31 Staaten (USA & Kanada) planen eine Einführung (Stand 2017), ähnlich ist die Situation für Straßenaufbauten mit Asphaltdeckschichten (APT 2018). Die Verwendung ist somit auf der bundesstaatlichen Ebene nicht verbindlich. Eine Übersicht über programmseitig mögliche Oberbauaufbauten ist in Tabelle 18 und 19 angegeben.

#### Mögliche Schichtaufbauten in der Bemessung nach dem MEPDG

**Tabelle 18 - Straßenoberbauten für Asphaltdeckschichten (flexible und halbstarre Tragschichten), Hot-Mix Asphalt Surfaced Pavements (HMA) nach (AASHTO 2015)**

Bezeichnung	Oberer Schichtaufbau <sup>1</sup>	Unterbau / Untergrund
Conventional Flexible Pavements	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Dünne Deckschichten<sup>2</sup> kleiner als ~ 15cm (6 in.)</li> <li>➤ (optional) wasserdurchlässige Asphalttragschicht</li> <li>➤ Ungebundene untere Tragschichten<sup>3</sup></li> </ul>	
Deep Strength Flexible Pavements	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dickere Deckschichten<sup>2</sup></li> <li>• Asphalttragschicht oder mit Asphalt stabilisierte Schicht</li> <li>• (optional) wasserdurchlässige Asphalttragschicht</li> <li>➤ Ungebundene untere Tragschichten<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ (alle optional) Damm, stabilisierter Untergrund, verbesserter Untergrund</li> </ul>
Full-Depth HMA Pavements	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dickere Deckschichten<sup>2</sup></li> <li>• Asphalttragschicht oder mit Asphalt stabilisierte Schicht</li> <li>• (optional) wasserdurchlässige Asphalttragschicht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Untergrund/ anstehender Boden<sup>4</sup>, (optional) Felsschicht mit maximaler Schichtdicke von 2,54 m (100 in.)</li> </ul>
Semi-Rigid Pavements	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deckschicht<sup>2</sup></li> <li>• Zementstabilisierte Tragschicht</li> <li>➤ (optional) Ungebundene untere Tragschichten<sup>3</sup></li> </ul>	
<p><sup>1</sup> Genaue Schichtdickenangaben nicht möglich. Die Schichtdicken sind für den ersten Oberbauentwurf aus Erfahrung festzulegen</p> <p><sup>2, 3, 4</sup> Eingabe von bis zu drei Schichten möglich</p>		

**Tabelle 19 - Straßenoberbauten für Betondeckschichten (starre Tragschichten), Portland Cement Concrete (PCC)-Surfaced Pavements nach (AASHTO 2015)**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Oberer Schichtaufbau<sup>1</sup></b>	<b>Unterbau / Untergrund</b>
Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)	<u>Betonfahrbahndecken mit Quer- und Längsfugen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Deckplatte mit Mindestdicke 25,4 cm (6 in.) und Querfugenabstand von 3 – 6 m (10 – 20 ft.)<sup>2</sup></li> <li>• (optional) wasserdurchlässige Asphalt- oder zementstabilisierte Tragschicht</li> <li>• (optional): Asphalt- oder zementstabilisierte Tragschicht, Magerbetonschicht, kalkstabilisierte Tragschicht</li> <li>• (optional) ungebundene untere Tragschichten (Gesteinskörnung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ (alle optional) Damm, stabilisierter Untergrund, verbesserter Untergrund</li> <li>➤ Untergrund/ anstehender Boden<sup>4</sup>, (optional) Felsschicht mit maximaler Schichtdicke von 2,54 m (100 in.)</li> </ul>
Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)	<u>Bewehrte Betondeckschichten<sup>1</sup></u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deckschicht mit Mindestdicke 17,8 cm (7 in.)</li> <li>• In der Mitte der Plattendicke Längsbewehrung, (optional) Querbewehrung</li> <li>• (optional) wasserdurchlässige Asphalt- oder zementstabilisierte Tragschicht</li> <li>• (optional): Asphalt- oder zementstabilisierte Tragschicht, Magerbetonschicht, kalkstabilisierte Tragschicht</li> <li>• (optional) ungebundene untere Tragschichten (Gesteinskörnung)</li> </ul>	
<p><sup>1</sup> Genaue Schichtdickenangaben nicht möglich. Die Schichtdicken sind für den ersten Oberbauentwurf aus Erfahrung festzulegen</p> <p><sup>2</sup> keine Längs- oder Querbewehrung, (optional) Verdübelung der Betonfahrbahnplatten, (optional) verbundene Längsfugenausführung</p> <p><sup>3</sup> Querfugen nur für bauliche Zwecke</p> <p><sup>4</sup> Eingabe von bis zu drei Schichten möglich</p>		

Bemessungsablauf des MEPDG:

Es können sowohl Oberbaubemessungen für Neubauten, als auch für Straßensanierungen durchgeführt werden. Der umfassende Grundgedanke des MEPDG lässt sich in drei Bemessungsstadien zusammenfassen.

1. Es erfolgt die Bestimmung aller notwendigen Eingangsgrößen für die softwaregestützte Berechnung unter zu Hilfenahme von Analysen oder Datenbanken. Zudem wird ein Zuverlässigkeitsniveau für die Dauerhaftigkeit des Straßenoberbaus definiert. Der Oberbau wird über die gesamte Bemessungszeit einer Schadenanalyse unterzogen (AASHTO 2015).

2. Es erfolgt die Eingabe eines ersten Bemessungsentwurfes (*trial design*), dieser wird einer Berechnung (*structural and performance analysis*) unterzogen. Anhand der einwirkenden Eingangsgrößen und den materialspezifischen Parametern des ersten definierten Straßenbaus berechnet das Programm die Dehnungs- und Spannungsreaktionen in den Oberbauschichten (Ceylan und Gopalakrishnan 2011). Hierzu erfolgt die Berechnung der Reaktionen in den gebundenen Tragschichten mittels linear-elastischer Berechnung, basierend auf der Mehrschichtentheorie, und für die ungebundenen Tragschichten, sofern die Nichtlinearität besonders berücksichtigt wird (Level 1), anhand einer nichtlinearen Finiten-Elemente Berechnung (Ceylan und Gopalakrishnan 2011, Li, Xiao et al. 2011). Die Ergebnisse der Dehnungsverteilungen des Berechnungsmodells, als *pavement response model* bezeichnet, dienen der schrittweisen Berechnung von Bemessungskennzahlen, die für Schadensformen an einem Straßenaufbau stehen. So fließen die Dehnungen in die Schadensberechnungsgleichungen mit ein, die wiederum durch zahlreiche empirisch gewonnene Anpassungsfaktoren definiert sind und deren Berechnung über die gesamte angesetzte Lebensdauer des Straßenaufbaus erfolgt. Aus der Summe der Schadensbemessungskennzahlen ergibt sich der programmspezifisch International Roughness Index (IRI), der für die Fahrbahnebenheit in Straßenlängsrichtung steht. Wird der Grenzwert des IRI nicht erreicht, müssen der Schichtaufbau oder die Materialien optimiert werden. (AASHTO 2015)
3. Im dritten Schritt des MEPDG soll der fertige Entwurf auf Alternativen unter Einbezug einer LifeCycle Cost Analysis (LCCA) und technischer Machbarkeit überprüft werden. (AASHTO 2015)

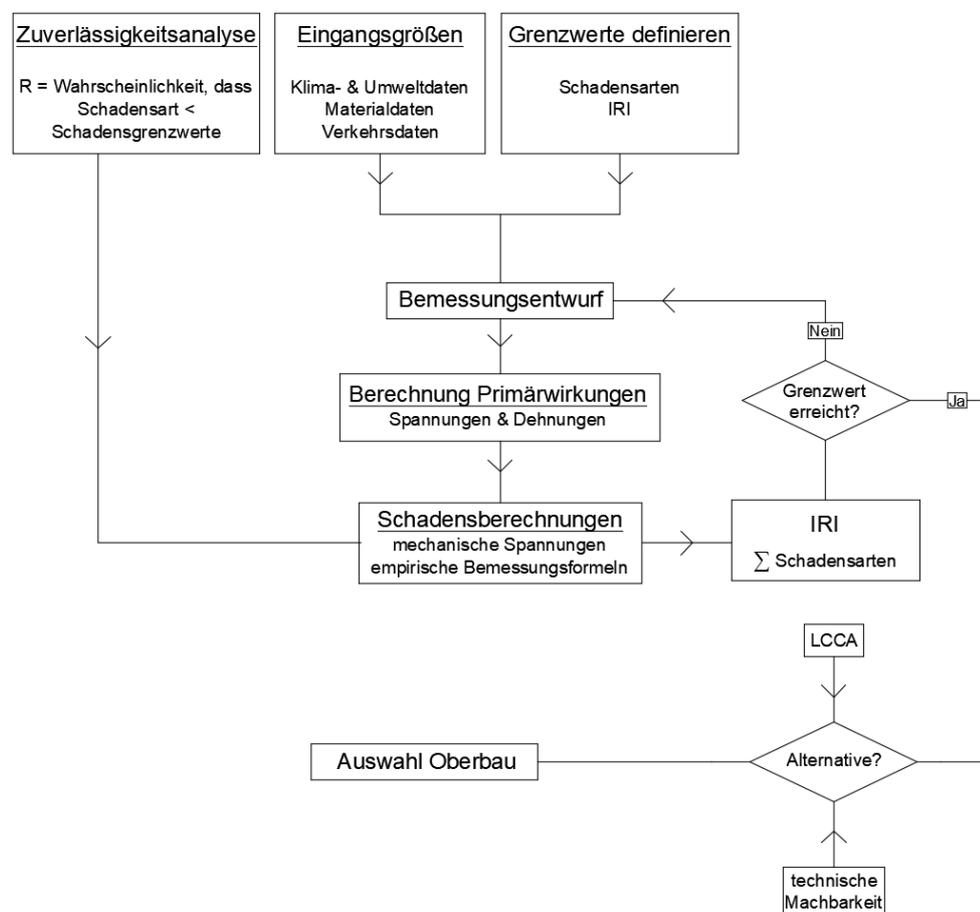


Abb. 34 - Grundsätzlicher Bemessungsablauf nach (AASHTO 2015)

Die Berechnung des IRI für flexible Straßenoberbauten mit Asphaltdeckschichten erfolgt mit folgender Gleichung (AASHTO 2015):

$$IRI = IRI_o + C_1(RD) + C_2(FC_{Total}) + C_3(TC) + C_4(SF) \quad [33]$$

- $IRI_o$  = Anfänglicher IRI nach Fertigstellung des Straßenaufbaus [in./mi.]  
 $C_{1,2,3,4}$  = Kalibrierungsfaktoren für Bemessungskennzahlen (siehe MEPDG 2015)  
 $RD$  = Mittelwert der Spurrillentiefe [in.]  
 $FC_{Total}$  = Fläche der Ermüdungsrisse als Prozentzahl zur gesamten Fläche des Fahrstreifens.  
 Ermüdungsrisse:  
 $\sum$  (Längsrisse, Reflektionsrisse, und netzartige Rissbildungen in der Rollspur)  
 Umrechnung der Risslängen durch Multiplikation mit 1,0 Längeneinheit [ft.]  
 $TC$  = Länge der Querrisse (Kälterisse) [ft./mi.]  
 $SF$  = Standortfaktor

$$SF = Age^{1,5} \{ \ln[(Precip + 1)(FI + 1)p_{02}] \} + \{ \ln[(Precip + 1)(PI + 1) p_{200}] \} \quad [34]$$

- $Age$  = Alter der Fahrbahn  
 $Precip$  = durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge [in.]  
 $FI$  = durchschnittlicher jährlicher Frostindex [°F days]  
 $PI$  = prozentueller Plastizitätsindex des Bodens  
 $p_{02}$  = Prozent des Siebdurchgangs durch Siebweite 0,02 mm  
 $p_{200}$  = Prozent des Siebdurchgangs durch die Siebweite 0.075 mm

Die Berechnungsgleichung für Asphalttschichten auf starren Tragschichten entspricht der Gleichung [33], mit abgeänderten Kalibrierungsfaktoren (siehe MEPDG-2 2015).

Die Ermittlung des IRI für Betonfahrbahndecken erfolgt mit folgender Gleichung (AASHTO 2015):

$$IRI = IRI_I + C_1 * CRK + C_2 * SPALL + C_3 * TFAULT + C_4 * SF \quad [35]$$

- $IRI_I$  = Anfänglicher IRI nach Fertigstellung des Straßenaufbaus [in./mi.]  
 $C_{1,2,3,4}$  = Kalibrierungsfaktoren für Bemessungskennzahlen (siehe MEPDG 2015)  
 $CRK$  = prozentueller Anteil der Betonfahrbahndecken mit Querrissen  
 $SPALL$  = Prozentzahl für Betonabplatzungen in Fahrbahnfugen  
 $TFAULT$  = Stufenbildung an den Fugen, aufsummiert über eine Meile [in.]  
 $SF$  = Standortfaktor

$$SF = Age (1 + 0,556 * FI)(1 + P_{200}) * 10^{-6} \quad [36]$$

- $Age$  = Alter der Fahrbahn  
 $FI$  = Frostindex [°F days]  
 $P_{200}$  = Prozent des Siebdurchgangs durch die Siebweite 0.075 mm

Für bewehrte Betonfahrbahndecken

$$IRI = IRI_I + C_1 * PO + C_2 * SF \quad [37]$$

- $IRI_I$  = Anfänglicher IRI nach Fertigstellung des Straßenaufbaus [in./mi.]  
 $C_{1,2}$  = Kalibrierungsfaktoren für Bemessungskennzahlen (siehe MEPDG 2015)  
 $PO$  = Punchout, Blockartiger Schadensbereich, [Punchouts/mi.]

Zahlreiche Anpassungsfaktoren für die Berechnungen der Bemessungskennzahlen des MEPDG basieren auf den Forschungsergebnissen und der Datenbank des *Long-Term Pavement Performance Programms* (LTPP). Ein Großteil der Datenerhebung erfolgte über einen Zeitraum von 20 Jahren, an rund 2500 getesteten Straßenabschnitten amerikanischer Highways und Schnellstraßen Kanadas (Li, Xiao et al. 2011). Das LTPP-Programm wird aktuell fortgeführt und erhebt unter anderem Klimadaten, Materialdaten, Verkehrsdaten und Schäden an Fahrbahnoberflächen von Schnellstraßen. Die Bemessung ist abhängig vom Informationsgehalt der Eingangsgrößen. Dabei wird zwischen drei Parameterlevels unterschieden. Level 1-Parameter werden direkt gemessen oder versuchstechnisch bestimmt, Level 2-Parameter werden indirekt aus korrelierenden vorliegenden Eingangsgrößen ermittelt und Level 3-Parameter sind nicht projektspezifische Standardwerte. Die Grenzwerte für die Schadensberechnungen sind vor der Bemessung zu definieren, im MEPDG 2015 werden Grenzwerte empfohlen. Ebenso ist das Zuverlässigkeitsniveau festzulegen auch hierfür sind empfohlene Werte angeführt.

#### Berücksichtigung der Frosteinwirkung in der Oberbaubemessung

In der Software des MEPDG ist das *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM) integriert, welches klimatische Umwelteinflussfaktoren berücksichtigt, um charakteristische Berechnungsgrößen der Straßenschichten anzupassen bzw. zu ermitteln, unter anderem (AASHTO 2015):

- die Temperatur in den Asphaltsschichten, auf stündlicher Basis für querverlaufende Kälterisse
- die Temperatur in den ungebundenen Tragschichten
- der durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt in den ungebundenen Tragschichten
- der Frostindex und die Anzahl der Frost-Tau-Zyklen (Zapata, Andrei et al. 2007)

Mit Hinblick auf die ungebundenen Tragschichten, erfolgt eine Berücksichtigung der Temperatur, des Feuchtigkeitsgehaltes und der Frost-Tau-Zyklen durch Berechnung von Anpassungsfaktoren  $F$  des *resilient modulus*  $M_R$ , mittels der berechneten Frosteindringung und der veränderlichen Feuchtigkeitswerte, innerhalb des EICM (Zapata, Andrei et al. 2007). Daher variiert der  $M_R$ , in Abhängigkeit der Zeit über den Bemessungszeitraum. Er ist die wichtigste Bemessungsvariable für ungebundene Schichten in der mechanischen Berechnung des MEPDG. Er wird als Eingangswert versuchstechnisch anhand eines Triaxialversuchs bestimmt, durch triaxiale, wiederkehrende und in der Größe gleichbleibende Belastung  $\sigma_d$  (Li und Selig 1994) und ist demzufolge ein Verformungsmodul:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad [37]$$

Der MEPDG empfiehlt den  $M_R$  als Eingangsgröße durch Labortests, unter optimalen Bedingungen, zu ermitteln, d.h. bei optimalen Wassergehalt und maximaler Trockendichte. Dann kann anhand gewonnener Regressionskoeffizienten  $k_x$  eine Berechnung (Level 1), mittels einer umfangreichen Berechnungsgleichung erfolgen (Ji, Siddiki et al. 2014, AASHTO 2015):

$$M_{Ropt} = k_1 P_a \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad [38]$$

$P_a$  = atmosphärischer Druck (101,325 kPa)

$k_{1,2,3}$  = Regressionskoeffizienten aus Triaxialversuch

$\theta$  =  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_d + 3 \sigma_3$

$\sigma_1$  = axiale Hauptspannung

$\sigma_3$  = allseitige Spannungsanteil aus Druckkammer im Triaxialversuch

$\sigma_2$  = Spannungsdeviator =  $\sigma_1 - \sigma_3$

$\tau_{oct}$  = oktaedrische Scherspannung =  $\frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$

Ist eine Level 1- Bemessung nicht möglich, erfolgt die Berechnung unter Einbezug anderer Eingangsgrößen (siehe Tabelle 20). Innerhalb des EICM wird  $M_R$  der ungebundenen Tragschichten, über die Bemessungszeit durch Faktoren  $F$  angepasst, für die Frostperiode mit  $F_F$ , für die Tauperiode  $F_R$  und für die ungefrorene Periode mit  $F_U$ .

$$M_R = M_{Ropt} * F(Y) \quad [39]$$

### 1. Frostperiode (Zapata, Andrei et al. 2007):

$$F_F = \frac{M_{Rfrz}}{M_{Ropt}} \quad [40]$$

$F_F$  = Anpassungsfaktor für Frost

$M_{Rfrz}$  =  $M_R$  für den gefrorenen Zustand

Erreicht die berechnete Frosteindringung die ungebundenen Schichten im Straßenaufbau, dann erfolgt eine Anpassung des Verformungsmoduls mittels  $F_F$ . Dabei muss ein Wert für das gefrorene Verformungsmodul im Programm hinterlegt sein.  $M_{Rfrz}$  ist unterschiedlich festgelegt, in Abhängigkeit eines gewichteten Plastizitätsindex. Für einen Plastizitätsindex  $WPI > 0$  ist  $M_{Rfrz}$  kleiner (6,90 MPa), als für  $WPI = 0$  (17,24 MPa). Grobkörnige Böden haben eine Plastizität von Null. Der gewichtete Plastizitätsindex wird berechnet nach (AASHTO 2015):

$$WPI = P_{200} * PI \quad [41]$$

$P_{200}$  = prozentuelle Durchgang durch Sieb Nr. 200 (Sieblochweite 0,074 mm)

$PI$  = Plastizitätsindex

### 2. Tauperiode (Zapata, Andrei et al. 2007, Nassiri und Bayat 2013):

$$\text{Wenn } (S_{equil} - S_{opt}) < 0; \quad \text{Dann: } F_R = RF + R_{equil} * RR * RF \quad [42]$$

$$\text{Wenn } (S_{equil} - S_{opt}) > 0; \quad \text{Dann: } F_R = R_{equil} * (RF + RR - RR * RF) \quad [43]$$

$S_{opt}$  [%], ist der mögliche Wassersättigungsgrad bei optimalen Bedingungen, dieser berechnet sich beispielsweise als Level 2-Parameter in Abhängigkeit des gewichteten Plastizitätsindex:

$$S_{opt} = 6,752 (WPI)^{0.147} + 78 \quad [44]$$

$S_{opt}$  als Level-1 Parameter ergibt sich aus einer Berechnung mit labortechnisch bestimmten Eingangsgrößen (maximale Trockendichte; spezifisches Bodengewicht, optimale Feuchtigkeitsge-

halt). Zudem muss in der Level-1 Bemessung die Bodenwasserspannung  $h$  [kPa] und der volumetrische Wassergehalt eines Bodens bekannt sein. Daraus lassen sich Parameter für Wasserspannungskurven berechnen, wobei für die umfangreichen Regressionsgleichungen auf die Literatur verwiesen wird (Zapata und Houston 2008).

Wasserspannungskurven verknüpfen den Zusammenhang zwischen dem Grad der Wassersättigung und der Saugspannung im Boden. Ist ein Boden vollkommen wassergesättigt, dies kann bei Tonböden auch bei über 100 % Wassergehalt liegen, dann ist die Saugspannung gleich Null (Jasmund und Lagaly 2013). Für Level-2 und Level-3 Inputdaten werden die Parameter der Wasserspannungskurve anhand empirisch gewonnener Gleichungen berechnet, dazu werden die bodenspezifischen Angaben,  $WPI$  und  $D_{60}$ , benötigt.

$S_{equil}$  [%], der Wassersättigungsgrad im Gleichgewichtszustand in den ungebundenen Tragschichten, ergibt sich durch eine Berechnungsgleichung anhand der Parameter der bestimmten Wasserspannungskurve und durch die Tiefe zum Grundwasserspiegels. (Zapata und Houston 2008)

$RF$  ist ein Reduktionsfaktor, der den Tragfähigkeitsverlust aufgrund von Wasseransammlung durch Eislinienbildung berücksichtigt. Die Neigung zur Ausbildung von Eislinien wurde mit den Bodenparametern  $P_{200}$  und  $PI$  für grob- und feinkörnige Bodenarten verknüpft, durch diese Eingangsgrößen wird  $RF$  ermittelt.

$R_{equil}$  ergibt sich anhand einer logarithmischen Regressionsgleichung, und ist abhängig vom Wassersättigungsgrad  $S_{equil} - S_{opt}$ .  $RR$ , *recovery ratio*, ist ein Verhältniswert, der den stetigen Wiederanstieg der Tragfähigkeit nach dem Taubeginn berücksichtigt.

$$RR = \frac{\Delta t}{T_R} \quad [45]$$

$\Delta t$  = Anzahl an Stunden seit Taubeginn

$T_R$  = Benötigte Wiederanstiegszeit bis das Schichtmaterial die Festigkeit im normalen (ungefrorenen) Zustand erreicht

Die Zeit  $T_R$  bis zur Wiedererlangung der Tragfähigkeit im ungefrorenen Zustand, ist programmseitig verknüpft mit dem gewichteten Plastizitätsindex, z.B.  $T_R = 90$  d für  $WPI < 0,1$ . Solange  $RR < 1$  ist, erfolgt die Berechnung des Anpassungsfaktors  $F_R$ .

### 3. Für die ungefrorene Periode (Zapata, Andrei et al. 2007)

$$\log F_U = a + \frac{b-a}{1+\exp[\ln(\frac{a}{b})+k_m(S-S_{opt})]} \quad [46]$$

$a$ ,  $b$ ,  $k_m$  sind hinterlegte Parameter für Bodenarten, diese sind eingeteilt in feinkörnig für  $P_{200} > 50\%$  und grobkörnig  $P_{200} < 50\%$ . ( $S - S_{opt}$ ) ist der veränderliche Wassersättigungsgrad.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bemessungssoftware anhand des Wassersättigungsgrad in den Straßenschichten und der bodenspezifischen Kriterien für frostgefährdete Böden eine Reduktion bzw. eine Erhöhung der Tragfähigkeit in den ungebundenen Tragschichten durchführt.

Die MEPDG Software bzw. das EICM benötigt folgende Eingangsgrößen:

- Wetterdaten auf stündlicher Basis
  - Lufttemperatur [F]
  - Windgeschwindigkeit [mi/h]

- Niederschlagsmenge [in.], die Feuchtigkeit in allen Schichten wird berechnet
- Relative Luftfeuchtigkeit [%]
- Prozentuelle Sonnenstrahlung [%], wobei 100% für wolkenfreien Himmel steht. Es kann eine Umrechnung von gemessener Sonneneinstrahlung, auf die prozentuelle Sonnenstrahlung erfolgen.

Die Wetterdaten können in der MEPDG-Software durch die Eingabe des projektspezifischen Standorts generiert werden. Das EICM benutzt Klimadaten von über 800 Wetterstationen und generiert eine virtuelle Wetterstation für die Standortkoordinaten. (Li, Xiao et al. 2011)

- Oberfläche des Straßenaufbaus für Asphalt- und Betondeckschichten: (Zapata, Andrei et al. 2007, Zapata und Houston 2008)
  - Wärmeleitfähigkeit (Messung für Level 1 und Standardwerte für Level 2,3)
  - Spezifische Wärmekapazität (Messung für Level 1 und Standardwerte für Level 2,3)
  - Absorption von Kurzwellenstrahlung (Messung für Level 1 und Standardwerte für Level 2,3)
- Tiefe zur Wasserschicht (Zapata, Andrei et al. 2007)
 

Wird benötigt zur Berücksichtigung des Wassergehaltes, dieser hat direkte Auswirkung auf  $M_R$ . Als Level 1 Eingangsgröße kann sie aus Bohrungen gewonnen werden. Die saisonalen Schwankungen der Grundwasserschicht sind für Level 1 und Level 2 zu berücksichtigen.

**Tabelle 20 - Materialeingangsgrößen von ungebundenen Schichten und anzutreffenden Untergrund nach (Zapata und Houston 2008)**

Eingangsgröße	Beschreibung M = Messung; S = Standardwert	Level 1	Level 2	Level 3
Atterberg'sche Grenzen		M	M	M
Sieblinienanalyse		M	M	M
Bodenklassifikation	Für Bestimmung des $M_R$			M <sup>1</sup>
$M_R$	als Mittelwerte aus Triaxialversuch		M	
Regressionskoeffizienten für $M_R$	Aus Triaxialversuch zur Berechnung nach (X.Y.2)	M		
Spezifisches Bodengewicht (der Schichten)		M	M	
Gesättigte Wasserleitfähigkeit	Für Level 2 in Abhängigkeit der Bodenklassifikation	M	M	
Maximale Trockendichte		M	M	
Optimaler Wassergehalt		M	M	
Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand		M	M / S	S
Spezifische Wärmekapazität		M	S	S
<i>Soil water characteristic curve</i> (SWCC)	Retentions- oder Wasserspannungskurve	M		

<sup>1</sup> Aus Sieblinienanalyse ermittelbar

Bei der Entwicklung des EICM wurde das *Climatic Materials-Structural Pavement Analysis* (CMS) Programm implementiert, das mittels der eingegebenen Wetterdaten und des definierten Schichtaufbaus eine eindimensionale Temperaturberechnung durchführt. Das Programm wurde an der Universität in Illinois entwickelt und verwendet wie das Temperaturdifferenzverfahren (Wistuba 2002), die eindimensionalen Fourierschen Differentialgleichung der Wärmeleitung. Durch die Finite-Differenzierung der Wärmeleitungsgleichung, berechnet das CMS-Tool die Temperatureindringung als Funktion der Zeit. Für die umfassenden Differenzgleichungen siehe

(Dempsey, Herlache et al. 1986). Das EICM berechnet zudem die Frosthebungen und Setzungen für das komplette Straßenschichtpaket über den gesamten Bemessungszeitraum.

Durch die Differentialgleichung am ersten definierten Knoten an der Straßenoberfläche werden folgende Anteile für den Wärmeübertrag und der Berechnung der stündlichen Schichttemperaturen berücksichtigt (Dempsey, Herlache et al. 1986):

$$Q_i - Q_r + Q_a - Q_e \pm Q_c \pm Q_g = 0 \quad [47]$$

$Q_i$  = eingehende Kurzwellenstrahlung

$Q_c$  = konvektiver Wärmestrom

$Q_r$  = reflektierte Kurzwellenstrahlung

$Q_g$  = Absorbierter Wärmestrom

$Q_a$  = Eingehende Langwellenstrahlung

$Q_e$  = Ausgehende Langwellenstrahlung

Der konvektive Wärmestrom findet statt, wenn die Lufttemperatur verschieden ist zur Temperatur am ersten Knoten auf der Straßenoberfläche.

#### Materialtechnische Anforderungen

Die softwaregestützte Schadensberechnung berücksichtigt keine Frosthebungen durch frostempfindliche Böden. Daher wird darauf hingewiesen Bodenaustausch oder Bodenverbesserungen durchzuführen, wobei der Untergrund eine Mindesttragfähigkeit für  $M_R = 68,95 \text{ MN/m}^2$  (10.000 Psi) erreichen sollte (AASHTO 2015). Zur Einschätzung der Frostempfindlichkeit von Böden werden die Angaben aus Tabelle 21 getroffen. Die Zuordnung stützt sich auf Ergebnisse von Bodenuntersuchungen, wie Siebversuchen und Versuchen zur Ermittlung der Atterberg'schen Grenzen. Exakte Angaben zu zulässigen Feinanteilmengen sind nicht definiert.

**Tabelle 21 - Abschätzung der Tragfähigkeit, Frostempfindlichkeit, Quelleigenschaften, Entwässerungsfähigkeit modifiziert nach (AASHTO 2015)**

<b>Bezeichnung</b> Übersetzt nach den Festlegungen von (Stein 2003)	<b>Belastbarkeit, ohne Frosteinwirkung</b>	<b>Frostempfindlichkeit</b>	<b>Kompressibilität und Expansion</b>	<b>Drainage Characteristics</b>
„Gute“ (ungleichförmig) gekörnte Kiese und Kies-Sand-Gemische, Wenig bis keine Feinanteile, <b>GW</b>	Sehr gut	Keine bis sehr leicht	Fast keine	Sehr gut
„Schlecht“ (gleichförmig) gekörnte Kiese und Kies-Sand-Gemische, Wenig bis keine Feinanteile, <b>GP</b>	Gut bis sehr gut	Keine bis sehr leicht	Fast keine	Sehr gut
Schluffige Kiese; „schlecht“ gekörnte Kiese und Kies-Sand-Gemische, <b>GM</b>	Gut bis sehr gut	Leicht bis mittel	Sehr leicht	Mittel bis schlecht
Sehr schluffige Kiese und Kies-Sand-Gemische, <b>GM</b>	Gut	Leicht bis mittel	Leicht	Schlecht bis quasi unempfindlich
Tonige Kiese (Feinanteil ist tonig), „schlecht“ gekörnte Kies-Sand-Ton-Gemische, <b>GC</b>	Gut	Leicht bis mittel	Leicht	Schlecht bis quasi undurchlässig
„Gut“ gekörnte Sande und Sand-Kies-Gemische, <b>SW</b>	Gut	Keine bis sehr leicht	Fast keine	Sehr gut
„Schlecht“ gekörnte Sande und Sand-Kies-Gemische; <b>SP</b>	Mittel bis gut	Keine bis sehr leicht	Fast keine	Sehr gut
Schluffige Sande, sand-Schluff-Gemische; <b>SP</b>	Mittel bis Gut	Leicht bis hoch	Sehr wenig	Schlecht bis mittel
Schluffige Sande, „schlecht“ gekörnte Sand-Schluff-Gemische; <b>SM</b>	Mittel	Leicht bis hoch	Leicht bis mittel	Schlecht bis quasi undurchlässig
Tonige Sande, „schlecht“ gekörnte Sand-Ton-Gemische; <b>SC</b>	Schlecht bis mittel	Leicht bis hoch	Leicht bis mittel	Schlecht bis quasi undurchlässig
Schluffe und sehr feine Sande, Gesteinsmehl, schluffige oder tonige Feinsand mit geringer Plastizität <sup>1</sup>	Schlecht bis mittel	Mittel bis sehr hoch	Leicht bis mittel	Schlecht bis mittel
Tone mit geringer bis mittlerer Plastizität, kiesige oder sandige Tone, schluffige Tone, leichte Tone	Schlecht bis mittel	Mittel bis hoch	Leicht bis mittel	Quasi undurchlässig
Organische Schluffe und organische Schluff-Tone mit geringer Plastizität <sup>1</sup>	Schlecht	Mittel bis hoch	Mittel bis hoch	Schlecht
Schluffe und schluffige Böden mit mittlerer bis hoher Plastizität <sup>2</sup>	Schlecht	Mittel bis sehr hoch	Hoch	Schlecht bis mittel
Tone mit sehr hoher Plastizität <sup>2</sup>	Schlecht bis mittel	Mittel bis sehr hoch	Hoch	undurchlässig
Organische Tone mit mittlerer bis hoher Plastizität <sup>2</sup>	Schlecht bis sehr schlecht	Mittel	Hoch	Quasi undurchlässig
Torf und andere stark organische Böden	Nicht geeignet	geringfügig	Sehr hoch	Schlecht bis mittel
<sup>1</sup> Fließgrenze kleiner als 50				
<sup>2</sup> Fließgrenze größer als 50				

Detailliertere Angaben sind im *U.S. Corps of Engineers Frost Design Soil Classification System* enthalten. Die Zuordnung zu Frostempfindlichkeitsgruppen erfolgt über die Feinanteilmenge, die Plastizitätsgrenze und Bodengruppen der USCS-Klassifizierung (siehe Tabelle 22). Für Kiesböden mit Feinanteil 0,02 mm von 1,5 – 3 % bzw. für sandige Böden mit Masseanteilen von 3 – 10 %, sollten zusätzliche Frostversuche durchgeführt werden (Chamberlain, Janoo et al. 1996).

**Tabelle 22 - U.S. Army Corps of Engineers Frost Design Soil Classification System  
modifiziert nach (Andersland and Ladanyi 2004)**

Frostempfindlichkeit	Frostgruppe	Bodenart	Feinanteil < 0,02mm in M.%	Typische Bodenklassifizierung (siehe Tabelle 21)
Geringfügig bis niedrig	NFS	A Kiese B Sande	A. 0 – 1,5 B. 0 - 3	A. GW, GP B. SW, SP
Gegebenenfalls	PFS	A Kiese B Sande	A. 1,5 – 3 B. 3 - 10	A. GW, GP B. SW, SP
Niedrig bis mittel	S1	Kiese	3 – 6	GW, GP, GW-GM, GP-GM
Sehr niedrig bis hoch	S2	Sande	3 - 6	SW,SP,SW-SM,SP-SM
Sehr niedrig bis hoch	F1	Kiese	6 - 10	GW, GW-GM, GP-GM
Mittel bis hoch	F2	Kiese	10 - 20	GM, GM-GC, GW-GM, GP-GM
Sehr niedrig bis sehr hoch	F2	Sande	6 – 15	SM, SW-SM, SP-SM
Mittel bis hoch	F3	Kiese	> 20	GM, GC
Niedrig bis hoch	F3	Sande except very fine silty sands	> 15	SM, SC
Sehr niedrig bis sehr hoch	F3	Tone, $I_p > 12$	-	CI, CH
Niedrig bis sehr hoch	F4	Alle Schluffe	-	MI, MH
Sehr niedrig bis hoch	F4	Sehr feine schluffige Sande	> 15	SM
Niedrig bis sehr hoch	F4	Tone, $I_p > 12$	-	CL, CL-ML
Sehr niedrig bis sehr hoch	F4	Tone und andere feinkörnige gebundene Sedimente	-	CL and ML; CL, ML, and SM; CL, CH, and ML; CL, CH, MI, and SM

NFS = Frostunempfindlich; PFS = Möglicherweise frostempfindlich

Wie Tabelle 23 zeigt, kann eine weitere Zuordnung mittels genormten Frosthebungsversuchen nach ASTM D 5918 erfolgen. Wobei die Klassifizierung anhand von Frosthebungsraten oder nach Auftauen durch CBR-Versuche erfolgt (Chamberlain, Janoo et al. 1996).

**Tabelle 23 - Frostempfindlichkeitsklassifizierung implementiert in der ASTM D 5918 (Johnson 2012)**

Hebungsrate (mm/Tag)	Aufgetauter CBR-Wert [%]	Frostempfindlichkeitsklassifizierung	Wahrscheinliche Frostgruppe
< 1	> 20	Vernachlässigbar	NFS, PFS
1 - 2	20-15	Sehr niedrig	S1, PFS
2 - 4	15 - 10	Niedrig	F1, S2, PFS
4 - 8	10 – 5	Mittel	F2
8 - 16	5 – 2	Hoch	F3
> 16	< 2	Sehr Hoch	F4

## 4 Entwicklung einer Methodik zur Berücksichtigung der Frosteinwirkung bei der Dimensionierung von ungebundenen Tragschichten

Dass die Schichtdickenanpassung der ungebundenen Tragschichten in vielen Anwendungsfällen auf Erfahrungswerten beruht

In vielen Anwendungsfällen beruht die Schichtdickenanpassung der ungebundenen Tragschichten auf Erfahrungswerten, das ist ein Ergebnis der telefonischen Umfrage (Kapitel 3.2.). Vor diesem Hintergrund wird geprüft, ob sich eine vereinfachte Frostdimensionierung des Straßenoberbaus in einen Bemessungsablauf bzw. in eine Richtlinie implementieren lässt, mit dem Ziel durch das Heranziehen von ortsbezogenen Temperaturdaten, eine Eindringungstiefe bestimmen zu können ohne separate softwaregestützte Berechnungen durchzuführen.

Zur Berechnung der Frosteindringung wird das von (Wistuba 2002) entwickelte Temperaturdifferenzverfahren verwendet. Durch die iterative Annäherung der Schichttemperaturen, unter Berücksichtigung der wichtigsten klimatologischen und materialspezifischen Randbedingungen, ergibt sich eine realitätsnahe berechnete Frosteindringung. Das Differenzverfahren beruht auf der eindimensionalen Fourierschen Differentialgleichung der Wärmeleitung und ähnelt in der mathematischen Formulierung und Differenzierung der Knoten, dem amerikanischen CMS-Tool. Die aktuelle programmtechnische Umsetzung (Kreis 2016) erfolgt durch die Finite-Elemente Software FEAP und Microsoft Excel. Das FEAP-Tool übernimmt die Berechnung der Temperaturverteilung im Straßenaufbau und generiert hierzu eine Output-Datei, die in einem Excel-Hauptdokument eingelesen wird. Die Eingangsparameter werden in selbigem Excel-Dokument formuliert, das wiederum eine Input-Datei für das FEAP-Programm generiert. Für die programmseitig hinterlegten mathematischen Gleichungen und deren Umsetzung wird auf die beiden in diesen Absatz genannten Quellen verwiesen.

### 4.1 Abgrenzung und Eingangsparameter

Es soll im Folgenden geprüft werden, ob sich für die Frostdimensionierung in der Oberbaubemessung, in Abhängigkeit von einer ortsbezogenen minimalsten Lufttemperatur  $T_{min}$ , eine Frosteindringung tabellarisch oder graphisch ermitteln lässt. So könnten maßgebende lokale Lufttemperaturdaten herangezogen werden, um für den jeweiligen Oberbautyp der RVS 03.08.63, die Eindringtiefe näherungsweise zu bestimmen und eine Schichtdickenanpassung der ungebundenen Tragschichten anzugeben.

Aufgrund der geographischen Gegebenheiten sind unterschiedliche Klimaregionen in Österreich vorhanden. Auch ist der Energieeintrag infolge der Sonneneinstrahlung und dem lokal einwirkende Wind, auf den Straßenoberbau, unterschiedlich. Diese Einflussgrößen werden im Temperaturdifferenzverfahren berücksichtigt. Daher ist eine ortsbezogene Bestimmung der Frosteindringung, mittels der isolierten Eingangsgröße der Lufttemperatur, eine Näherung. Zudem beeinflusst die Dauer der Frosteinwirkung die Frosteindringung  $z$  [m]. Schlussfolgernd bedeutet das, dass die örtliche Lufttemperatur  $T_{min}$  nur im Zusammenhang mit der Dauer der Frostperiode als Eingangsgröße für eine Näherungsbestimmung der Frosteindringtiefe  $z$  [m] herangezogen werden. Ansonsten führen negative Temperaturtagesspitzen bei insgesamt gering anhaltender Frostdauer, zu verfälschten Ergebnissen. Zur Bestimmung der Dauer einer maßgebenden Frostperiode sollte der Frostindex [ $^{\circ}\text{C d}$ ] verwendet werden.

Die Auswertung vorliegender Klimadaten für drei Messstationen, der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), zeigt einen abnehmenden Frostindex bei zunehmender Tagesminimumtemperatur.

**Tabelle 24 – Minimalste stündliche Tagestemperatur innerhalb Frostindexbereich (ZAMG)**

	$T_{min}$ im FI-Bereich [°C]	FI [°C d]
Wien Groß Enzersdorf	-19,5	158
Wien Hohe Warte	-14,1	142
Wien Innere Stadt	-11,9	114

Basierend auf diesen Werten wird die Annahme getroffen, dass ein korrelierender Zusammenhang zwischen Frostindex und dazugehöriger minimalster Lufttemperatur (Tabelle 24) besteht. Da nur Klimadaten (Luft- und Winddaten auf stündlicher Basis) der angeführten Messstationen vorliegen, wurden Frosteindringungsberechnungen mit den Daten der Station Groß Enzersdorf durchgeführt. Diese umfassen den Analysezeitraum vom 24.12.1995 bis 10.03.1996. Im Vergleich mit den anderen Stationen, ergibt sich hier der maximale Frostindex  $FI = 158$  °Cd und die minimalste Tageslufttemperatur  $T_{min} = -19,5$  °C. Aus den Ergebnissen der durchgeführten Berechnungen wird versucht eine Näherungsgleichung abzuleiten. So kann durch das Einsetzen einer minimalsten ortsbezogenen Tageslufttemperatur in die Gleichung, eine angenäherte Frosteindringung bestimmt werden. Die genauere Herangehensweise wird im nächsten Punkt beschrieben.

Um das Vorgehen zu prüfen, werden die Frosteindringungsberechnungen an einem Regelaufbau durchgeführt. Hierzu wird der Bautyp AS1, LK1,3 der RVS 03.08.63 gewählt. Die Materialkennwerte der Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Dichte (Tabelle 24) beziehen sich auf den trockenen Zustand, da diese Werte zu einer größeren und damit relevanten Frosteindringung führen. Dies ist das Ergebnis einer mit dem Programm durchgeführten Sensitivitätsanalyse (Kreis 2016). Zudem wird für die oberen ungebundenen Tragschichten dieselbe Dichte angenommen, wie für die unteren ungebundenen Tragschichten. Naheliegender wäre eine Erhöhung der Dichte, da in der RVS 08.15.01 ein erhöhter Verdichtungsgrad für die oberen ungebundenen Schichten gefordert ist. Allerdings dient das Berechnungsergebnis der isolierten Betrachtung des Zusammenhangs minimaler örtlicher Lufttemperatur und Frosteindringung unter sonst gleichbleibenden Eingangsparametern. Auch sind für die gewählten Daten bereits ähnliche Berechnungsergebnisse am Institut vorhanden, was die näherungsweise Überprüfung der durchgeführten Berechnung erlaubt.

**Tabelle 25 - Eingangsparameter Schichtaufbau mit Gesamtdicke 2 m**

	Asphaltdecke <sup>1</sup>	Obere u. Tragschicht <sup>2</sup>	Untere u. Tragschicht <sup>2</sup>	Sandiger Kies <sup>2</sup>
Schichtdicke [m]	0,16	0,20	0,30	1,34
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2120	1800	1800	2100
Wärmekapazität [kJ/m <sup>3</sup> K]	1950	1300	1300	1890
Wärmeleitzahl [W/m K]	0,70	0,40	0,40	0,50
	<sup>1</sup> (FGSV 1994); <sup>2</sup> (VDI 4640)			

Die Temperatur in 2m Tiefe ist programmseitig als Randbedingung hinterlegt. Sie wird für den betrachteten Zeitraum von 24.12 – 10.03 als konstant mit 7,6° C angenommen (Wistuba 2002). Die Strahlungsbilanz bleibt unverändert, der Modellansatz nach (Wistuba 2002) wird verwendet. Die höchste Strahlung tritt um 13 Uhr und 14 Uhr mit 60 W/m<sup>2</sup> auf (siehe Abb.35).

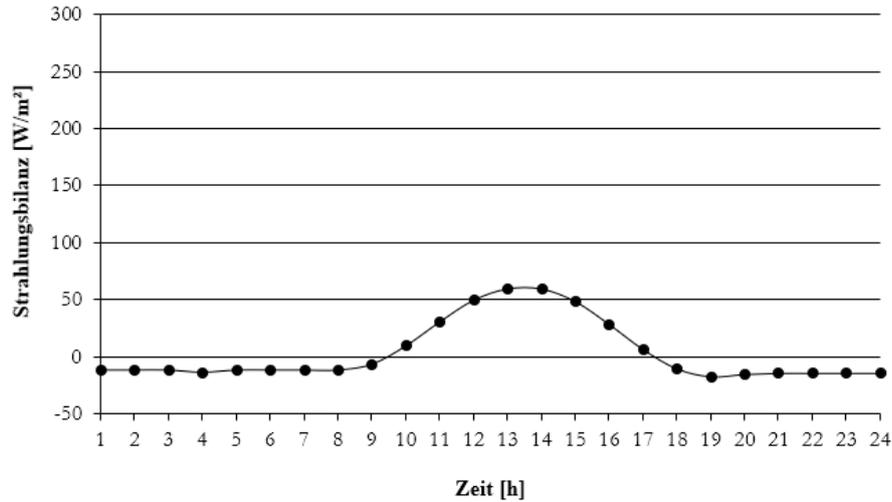


Abb. 35 - Tageslinie der Strahlungsbilanz für die Periode (16.12 – 15.3) (Wistuba 2002)

## 4.2 Herangehensweise und Ergebnisse

In einem ersten Schritt werden der Frostindex (bestimmt an der Station Groß Enzersdorf) und die minimalste Lufttemperatur als Referenztemperatur der Frostperiode (Frostindexbereich) ermittelt. In Abbildung 37 ist die grafische Ermittlung des Frostindexes gezeigt. Der Frostindex wird nach der Definition in Kapitel 2.1.3, als Differenz des Maximums und Minimums der Temperatursummenkurve einer Kälteperiode, bestimmt.

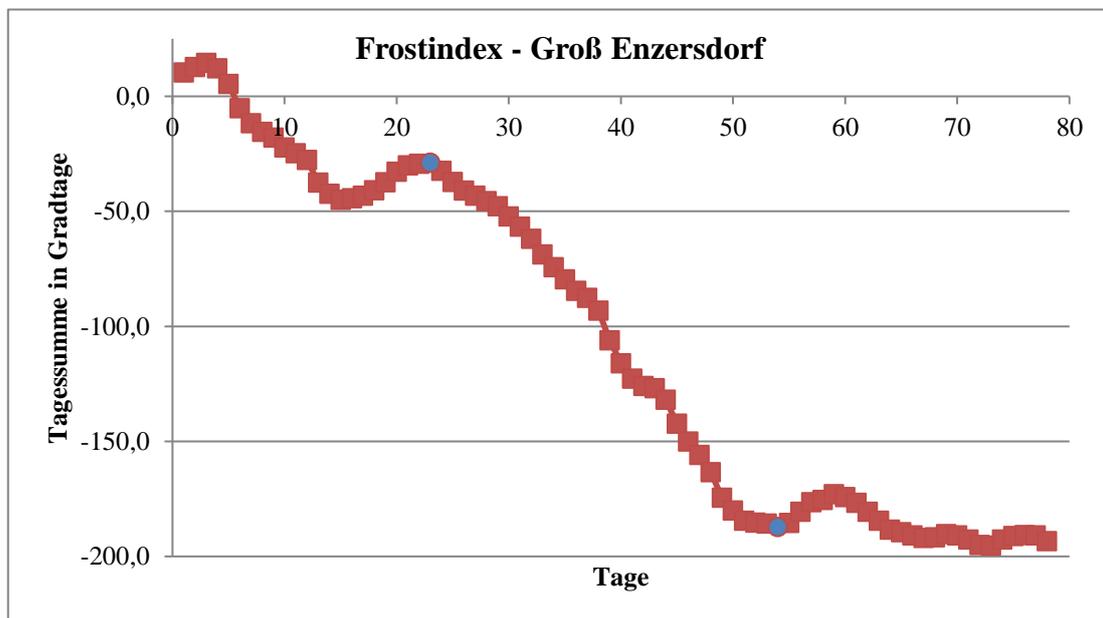


Abb. 36 – Frostindex Station Groß Enzersdorf (ZAMG)

$$T_{\text{Referenz}} = -19,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$FI = 158 \text{ [} ^\circ\text{C d]} \text{ (15.01 – 15.02.1996); Groß Enzersdorf}$$

Im zweiten Schritt werden die Anpassungsfaktoren  $F$  berechnet, gemäß Gleichung [48]. Die Basis bildet die Referenztemperatur des Frostindexbereiches.

$$F_n = \frac{T_{min,n}}{T_{Referenz}} \quad [48]$$

- $n$  = 1-6  
 $T_{min,n}$  = (-1°C, -5°C, -10°C, -15°C, -20°C, -25°C)  
 $T_{Referenz}$  = -19,5 °C (Groß Enzersdorf)

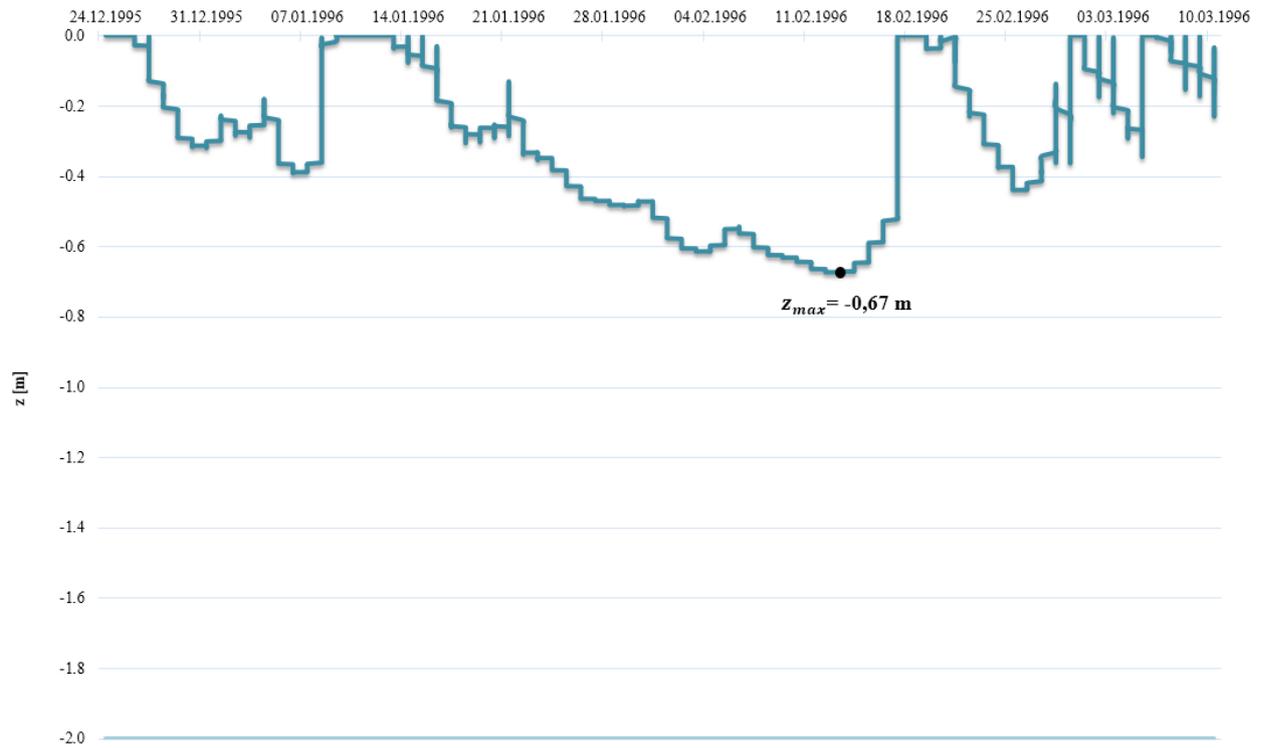
Die ermittelten Anpassungsfaktoren (siehe Tabelle 25) werden jeweils mit den Lufttemperaturdaten, für den Zeitraum vom 24.12.1995 – 10.03.1996, multipliziert. Danach wird die Frosteindringtiefe mittels Berechnungstool, jeweils mit den angepassten Lufttemperaturdaten, berechnet. Durch das Vorgehen wird die Frosteindringtiefe in Abhängigkeit der Temperaturen  $T_{min,1-6}$  dargestellt.

Da nur der isolierte Zusammenhang zwischen örtlicher minimaler Lufttemperatur und Frosteindringung betrachtet wird, bleiben alle anderen Eingangsgrößen der Berechnungen unverändert.

**Tabelle 26 – Anpassungsfaktoren F**

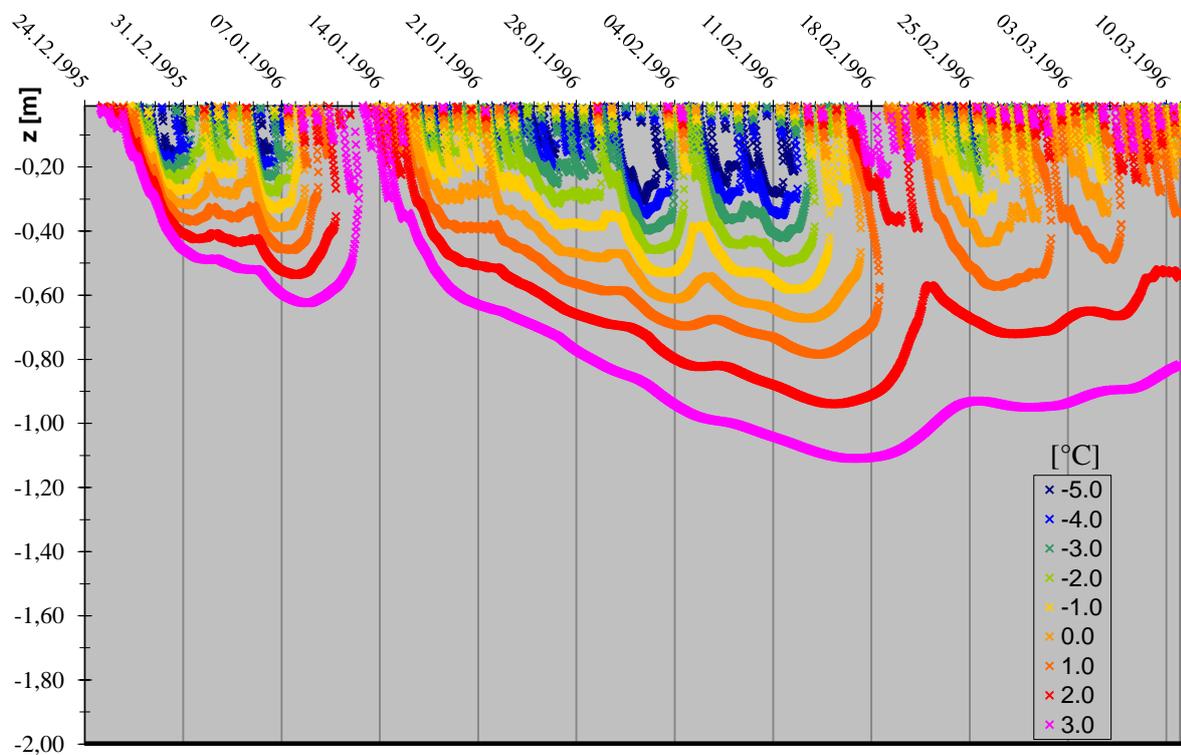
$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$
0.05128	0.25641	0.51282	0.76923	1.02564	1.28205

In Abbildung 38 ist das Ergebnis der Frosteindringung  $z$  [m] dargestellt, berechnet ohne Anpassungsfaktor. Die maximale errechnete Eindringtiefe  $z_{max}$  beträgt 0,67 m. Damit dringt die 0°-Isotherme bis in den Untergrund vor. Das Planum der unteren ungebundenen Tragschicht liegt für den gewählten Aufbau in einer Tief von 0,66 m.



**Abb. 37 - Frosteindringung  $z$  [m] ermittelt ohne Faktor, Station Groß Enzersdorf, Winter 95/96**

In Abbildung 39 ist der dazugehörige Verlauf der Isothermen dargestellt. Der abgebildete Verlauf der Frosteindringung aus der vorherigen Grafik entspricht in Abbildung 39 dem Verlauf der  $0^\circ$ -Isotherme (orange Linie).



**Abb. 38 - Verlauf der Isotherme ohne Faktor**

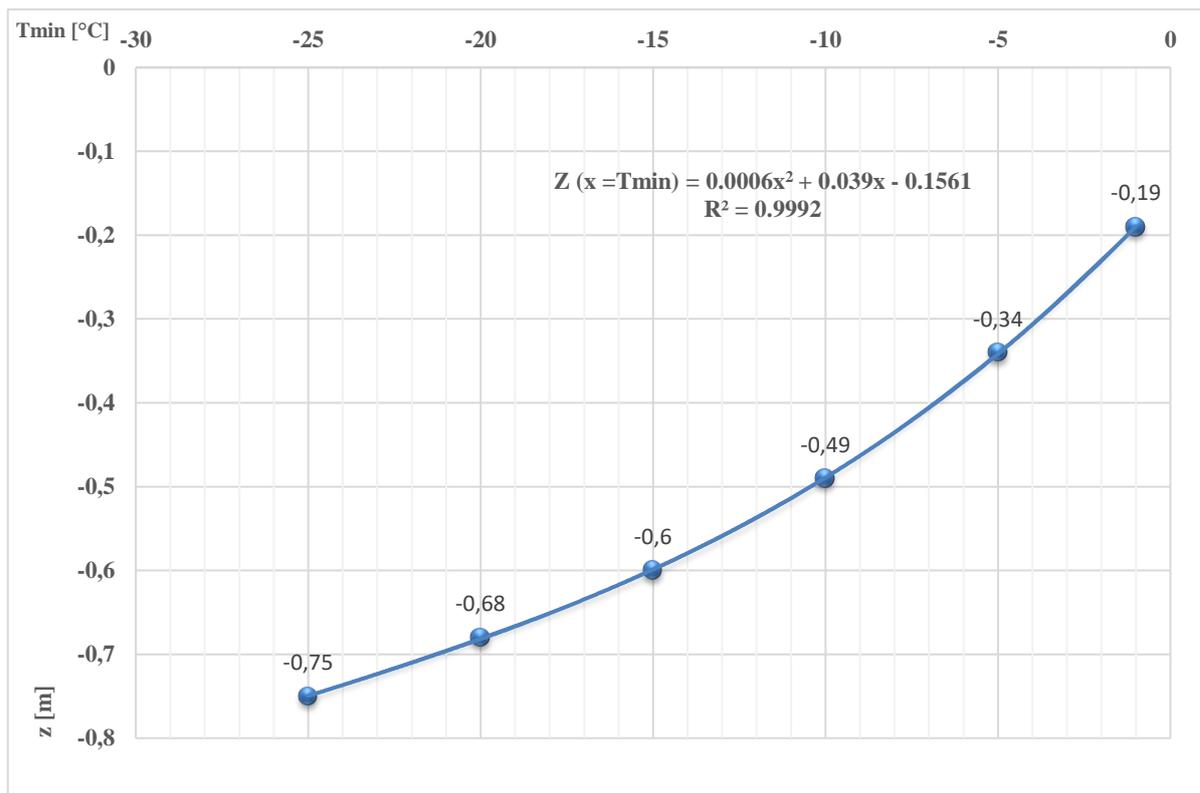
In Tabelle 26 und in Abbildung 40 sind die Ergebnisse aus den Simulationen der Frosteindringung in Abhängigkeit der Temperatur  $T_{min}$  [°C], dargestellt. Die Diagramme für die Frosteindringungsberechnungen der Bezugstemperaturen  $T_{min}$  bzw. in Abhängigkeit der Faktoren finden sich im Anhang.

Es zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen Frosteindringtiefe und der niedrigsten ortsbezogenen Lufttemperatur nicht linear ist. Er lässt sich passend mit einer quadratischen Funktion beschreiben (vgl. Abbildung 39). Damit lässt sich die Frosteindringtiefe ablesen oder durch das Einsetzen der jeweiligen ortsbezogenen Lufttemperatur (hier  $T_{min}$ ) in die Funktionsgleichung bestimmen.

Das Einsetzen einer niedrigeren Temperatur als  $T_{Referenz}$  mit größerem dazugehörigen Frostindexbereich würde ein Ergebnis liefern, das nicht auf der sicheren Seite liegt. Die Prüfung des Vorgehens zeigt, dass Messstationen mit möglichst großen FI und möglichst geringem  $T_{min}$  für die Ermittlung einer Näherungsgleichung herangezogen werden sollten.

**Tabelle 27 – Ergebnisse Frosteindringungsberechnungen**

$T_{min}$ [°C]	-1	-5	-10	-15	-20	-25
z [m]	-0,19	-0,34	-0,49	-0,60	-0,68	-0,75



**Abb. 39 -  $T_{min}$  und Frosteindringung, Station Groß Enzersdorf, Winter 95/96**

### Ausblick

Im nächsten Schritt sollte eine bemessungsrelevante Funktion der Frosteindringung ermittelt werden. Dies erlaubt die unkomplizierte näherungsweise Anpassung der Schichtdicken in der Straßenbemessung. Hierzu empfehlen sich Frosteindringungsberechnungen verschiedener, maßgebender Stationen in Österreich und damit liegt die Annäherung der Frosteindringung auf der sicheren Seite. Dabei ist ein ähnlicher parabelförmiger Verlauf der Frosteindringung in Abhängigkeit zur maßgebenden Referenztemperatur, zu erwarten. Denkbar wäre es auch für jede Klimaregion in Österreich eine Messstation auszuwählen, ähnlich zu den Frostzonenkarten (Abbildung 17 und 18). Auch ist es zielführend regionale Strahlungsbilanzen für die Wintermonate zu definieren. Durch die genannten Maßnahmen könnte die Annäherung der Frosteindringung weiter verbessert werden.

Dabei sollten für die Wetterstationen ein möglichst langer Aufzeichnungszeitraum für Lufttemperatur- und Winddaten vorliegen. Daraus lässt sich eine minimale Frosttemperatur bzw. Referenztemperatur ermitteln, mit einer angemessenen statistischen Wiederkehrrate in Bezug auf die Lebensdauer des Straßenbauwerkes. Aus einer vorliegenden Datenaufbereitung der ZAMG, Regionalstelle Kärnten und Steiermark aus dem Jahr 1996/1999 (Tabelle 27) ergibt sich z.B. die Station Tamsweg, als die Station mit der kältesten mittleren Jahrestemperatur, bei einem Beobachtungszeitraum von 20 Jahren.

Das Vorgehen sollte für alle standardisierten Straßenoberbautypen der RVS 03.08.63 durchgeführt werden. Außerdem wäre es für die Berechnung zielführend, für das überwiegend in Österreich verwendete Straßenbaumaterial, genaue thermophysikalische Eingangsparameter zu definieren. Die hier verwendeten Materialkennwerte für den reinen trockenen Zustand sind in der Realität nicht anzutreffen. Allerdings liegt die Annahme aufgrund der größeren Frosteindringung auf der sicheren Seite. Insgesamt sollte die Genauigkeit einer zukünftigen Näherungsgleichung, versuchs-technisch ermittelt werden.

**Tabelle 28 - Mittlere Jahrestemperaturminima mit zugehöriger Standardabweichung und Beobachtungszeitraum an 91 verschiedenen österreichischen Klimastationen, Datenaufbereitung durch die ZAMG (Wistuba, Litzka et al. 2001)**

Nr.	BL	Station	Länge [°]	Breite [°]	Höhe [m]	$T_{min}$ [°C]	$s-T_{min}$ [°C]	Jahre
1	B	Deutschkreuz	16,38	47,36	192	-15,6	3,1	17
2	B	Gerersdorf bei Güssing	16,14	47,04	280	-16,5	4,6	11
3	B	Glashütten	16,23	47,23	421	-16,3	2,8	20
4	B	Neusiedl am See	16,52	47,57	129	-13,9	4,9	10
5	B	Sopron-Ödenburg	16,36	47,41	234	-13,4	2,9	20
6	B	Wörtherberg	16,06	47,14	402	-13,3	2,5	20
7	K	Döllach	12,54	46,57	1010	-15,9	2,9	20
8	K	Ferlach	14,18	46,32	470	-17,3	3,1	20
9	K	Flattnitz	14,02	46,57	1438	-19,5	3,5	17
10	K	Fresach	13,41	46,43	735	-15,1	3,2	20
11	K	Friesach	14,25	46,57	634	-16,5	3,0	15
12	K	Heiligenblut	12,51	47,02	1242	-19,0	2,5	17
13	K	Höhenbergen-Tainach	14,33	46,38	437	-17,2	3,6	16
14	K	Iselsberg	12,52	46,51	1196	-18,6	2,6	15
15	K	Kolbnitz	13,18	46,53	603	-15,6	2,4	20
16	K	Kornat	12,53	46,41	1037	-15,1	2,7	20
17	K	Laas	13,00	46,41	800	-13,8	0,9	3

18	K	Loibl-Tunnel	14,15	46,27	1067	-15,3	2,8	20
19	K	Mallnitz	13,10	46,59	1185	-16,0	4,9	19
20	K	Radenthein	13,42	46,47	685	-15,4	2,5	20
21	K	Reisach	13,09	46,39	646	-19,4	3,0	20
22	K	Rupertiberg	14,06	46,34	715	-15,2	4,0	13
23	K	Spittal/Drau	13,32	46,46	524	-18,2	3,7	11
24	K	St.Veit/Glan	14,22	46,46	475	-19,3	3,7	20
25	NÖ	Aspang	16,06	47,33	498	-17,8	3,3	20
26	NÖ	Jauerling	15,22	48,21	860	-15,5	3,5	14
27	NÖ	Krems	15,37	48,25	207	-15,3	3,9	15
28	NÖ	Laa/Thaya	16,23	48,43	187	-16,2	4,4	11
29	NÖ	Oberndorf/Melk	15,13	48,04	297	-20,6	5,2	15
30	NÖ	Pottschach	16,01	47,42	415	-16,8	3,9	11
31	NÖ	Schwechat	16,34	48,07	178	-15,7	3,4	20
32	NÖ	Semmering-Kurort	15,50	47,38	1000	-18,0	3,6	11
33	NÖ	Weitra	14,54	48,42	580	-21,2	4,2	19
34	NÖ	Ybbs/Persenbeug	15,04	48,11	231	-14,3	4,8	11
35	OÖ	Aspach	13,18	48,11	440	-20,3	5,0	20
36	OÖ	Bad Ischl	13,38	47,43	469	-17,5	8,2	20
37	OÖ	Großraming	14,31	47,53	379	-17,4	4,1	20
38	OÖ	Grünau	13,57	47,51	540	-18,1	3,1	20
39	OÖ	Hörsching	14,11	48,14	297	-16,9	5,1	20
40	OÖ	Kirchdorf/Krems	14,08	47,54	440	-17,8	4,2	16
41	OÖ	Kollerschlag	13,50	48,36	725	-16,1	3,3	20
42	OÖ	Königswiesen	14,50	48,24	608	-19,6	3,1	20
43	OÖ	Kremsmünster	14,08	48,03	383	-16,4	4,9	20
44	OÖ	Mondsee	13,22	47,51	491	-12,9	2,9	20
45	OÖ	Passau-Oberhaus	13,29	48,35	409	-16,5	4,0	16
46	OÖ	Ried im Innkreis	13,29	48,13	435	-17,1	3,6	20
47	OÖ	Wels-Schleißheim	14,04	48,10	312	-16,2	5,7	11
48	OÖ	Weyregg	13,34	47,54	469	-14,0	2,9	20
49	OÖ	Windischgarsten	14,20	47,44	596	-20,2	4,4	11
50	OT	Silian	12,26	46,45	1075	-19,6	2,9	20
51	OT	St.Jakob/Def.	12,21	46,55	1400	-23,5	2,7	20
52	S	Abtenau	13,20	47,34	714	-18,7	3,4	15
53	S	Bad Gastein	13,08	47,07	1100	-16,9	2,7	20
54	S	Obertauern	13,34	47,16	1742	-19,8	3,6	9
55	S	Salzburg-Flughafen	13,00	47,48	434	-16,5	4,1	20
56	S	St. Johann im Pongau	13,11	47,19	634	-17,2	3,8	10
<b>57</b>	<b>S</b>	<b>Tamsweg</b>	<b>13,48</b>	<b>47,08</b>	<b>1012</b>	<b>-24,8</b>	<b>2,7</b>	<b>20</b>
58	S	Uttendorf	12,34	47,16	796	-21,0	6,6	20
59	St	Admont	14,27	47,34	646	-20,2	3,2	18
60	St	Deutschlandsberg	15,13	46,50	410	-14,6	3,3	15
61	St	Fischbach	15,40	47,26	1020	-15,4	3,2	11
62	St	Fürstenfeld	16,04	47,01	273	-19,0	6,4	20
63	St	Gleisdorf	15,43	47,07	375	-17,9	3,1	20
64	St	Graz-Flughafen	15,26	46,59	340	-17,3	4,0	20

65	St	Hieflau	14,45	47,36	492	-15,5	3,6	17
66	St	Kindberg	15,27	47,31	567	-18,1	4,0	11
67	St	Lobming	15,11	47,03	400	-16,9	3,4	20
68	St	Mürzzuschlag	15,41	47,36	755	-19,9	3,3	20
69	St	Oberwölz	14,17	47,12	810	-18,6	3,0	17
70	St	Oberzeiring	14,29	47,15	930	-18,5	3,7	11
71	St	Rechberg	15,26	47,16	926	-15,2	3,4	14
72	St	Seckau	14,47	47,17	874	-18,0	3,8	14
73	St	Weiz	15,38	47,13	465	-14,3	3,2	14
74	T	Haiming	10,51	47,15	695	-17,7	3,1	20
75	T	Innsbruck-Flughafen	11,21	47,16	578	-16,5	3,4	20
76	T	Innsbruck-Univ.	11,24	47,16	577	-12,3	3,5	8
77	T	Kirchbichl	12,05	47,31	498	-17,3	3,0	20
78	T	Kitzbühel	12,24	47,27	763	-18,8	2,9	16
79	T	Kufstein	12,10	47,35	495	-15,6	3,1	20
80	T	Nauders	10,30	46,54	1360	-19,2	2,9	17
81	T	Prutz	10,40	47,04	870	-16,9	2,7	13
82	T	St.Anton am Arlberg	10,16	47,08	1280	-21,7	3,4	14
83	T	Umhausen	10,56	47,08	1036	-16,2	2,8	20
84	V	Bregenz	9,44	47,30	424	-11,4	4,6	10
85	V	Buers	9,49	47,08	567	-16,9	3,4	20
86	V	Langen am Arlberg	10,07	47,08	1218	-16,5	4,1	20
87	V	Partenen	10,03	46,58	1028	-17,2	4,9	20
88	V	Schoppernau	10,01	47,19	835	-20,5	3,2	20
89	V	Warth	10,11	47,15	1475	-20,3	4,5	10
90	W	Wien-Mariabrunn	16,14	48,12	226	-17,3	4,3	16
91	W	Wien-Unterlaa	16,25	48,07	200	-14,6	3,6	20

## 5 Zusammenfassung

Der erste Teil der Arbeit beinhaltet die Literaturrecherche zum Thema Eislinsenbildung und Frosteinwirkung auf den Straßenoberbau. Festzuhalten ist, dass die mineralogischen Kriterien der Bodenarten, die Einflussgrößen beim Eislinsenwachstum und alle weiteren klimatologischen Faktoren, eine Vorhersage von Frosthebungen und Fahrbahnschädigungen erschweren. Die genauesten Erkenntnisse über anstehenden Baugrund liefern Frosthebungsversuche.

Der zweite Teil stellt eine umfangreiche Literaturrecherche zur Frostdimensionierung in der Schweiz, Deutschland und den USA dar. Dabei zeigte sich, dass die Straßenoberbaudimensionierung in den USA bei weitem die umfangreichste Bemessung bietet. Die Berücksichtigung der Frosteinwirkung stützt sich in der aktuellen Bemessungssoftware auf die Implementierung zahlreicher Teilprogramme. In allen untersuchten Richtlinien zur Bemessung der ungebundenen Tragschichten, erfolgt eine Schichtdickenanpassung in der Frostdimensionierung. Eine Ausnahme bildet die Richtliniensituation in Österreich, die in einer Bemessungssituation allerdings auch mehr Freiheiten einräumt. Die im selbigen Kapitel angeführte telefonische Umfrage macht deutlich, dass vor allem Erfahrungswerte in der Frostdimensionierung in Österreich herangezogen werden. Des Weiteren muss festgehalten werden, dass die Umfrage nicht die erhofften detaillierten praktischen Herangehensweisen, im Bereich der Dimensionierung der ungebundenen Tragschichten, ergab.

Die Tatsache das überwiegend Erfahrungswerte in der Schichtdickenanpassung verwendet werden und die standardisierten Straßenoberbauten keine richtlinienseitige Optimierung bieten, führte zur Überlegung der Ermittlung einer Näherungsgleichung. Das Vorgehen wurde geprüft und liefert, sofern die weiteren genannten Maßnahmen vollzogen werden, ein Ergebnis das auf der sicheren Seite liegt. Dadurch können maßgebende ortsbezogene Lufttemperaturdaten verwendet werden, um Anpassungen der ungebundenen Tragschichten vorzunehmen.

## 6 Anhang

### 6.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 : Jahreszeitliche Tragfähigkeitsänderung des Untergrunds modifiziert aus (Wistuba, Litzka et al. 2001)	7
Abb. 2: Schema der Eislinnenbildung nach (Lottmann 2003)	9
Abb. 3 - Netzartige Eislinnenstruktur, <i>frozen fringe</i> (Azmatch, Sego et al. 2011)	10
Abb. 4 - Temperatur und Wasserdurchlässigkeit nach (Unold 2006)	10
Abb. 5 - Eislinne im Boden des Adventdalen auf Spitzbergen (Dege 2012)	11
Abb. 6 - Hebungsanteile aus in-situ freezing und Eislinnenbildung (Kellner 2007)	12
Abb. 7 - Prognostizierter veränderlicher Verlauf der Isotherme nach 150 Tagen (links), gemessene Frosteindringtiefen Straßenrand und Straßenmitte (rechts), für einen Straßenquerschnitt in Quebec modifiziert nach (Konrad 1994)	12
Abb. 8 - Kumulierte Anzahl der Schlaglöcher von 2008 bis 2016 (MA 28 Stadtentwicklung und Stadtplanung)	13
Abb. 9 - Schematische Darstellung - Superposition der kryogenen Spannung und lastinduzierten Spannung in einer Asphalttragschicht nach (Arand 2004)	14
Abb. 10 - links: versiegelter Riss quer zur Fahrbahn (WAPA 2018); rechts: Längsriss infolge starker Abkühlung und Verkehrsbelastung (Wistuba 2006)	14
Abb. 11 – Schematische Darstellung Mikroeislinnenmodell nach (Setzer 2002)	15
Abb. 12 - Porenwasser im Boden nach (Boley, Adam et al. 2012)	16
Abb. 13 - Schematische Darstellung – Adsorptionswasser, Kapillarwasser mit Meniskus	18
Abb. 14 - Frosthebungsrate in Abhängigkeit des Kornanteils < 0,02 mm und dem Mineralbestand der Feinanteile für sandige Kiese „Donaukiese“ (Brandl 2005)	20
Abb. 15 - Atterberg'sche Grenzen als Konsistenzband nach (Boley, Adam et al. 2012)	22
Abb. 16 – Temperatursummenkurve und Frostindex nach (FGSV 2013)	24
Abb. 17 – Frostzonenkarte Österreich (Chlan und Litzka 1988)	25
Abb. 18 – Klimazonenkarte mit absoluten Frostindexmaxima [ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ] (Wistuba, Litzka et al. 2001)	26
Abb. 19 – Frostindex für Gebäudegründungen (ÖNORM EN ISO 13793)	26
Abb. 20 - $\mathbf{zF}$ in Abhängigkeit des Frostindex $\mathbf{FIO}$ und $\mathbf{TO}$ (Behr 1984)	27
Abb. 21 – Vergleich der Lufttemperaturdaten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und der berechneten Oberflächentemperatur für eine Asphaltdeckschicht an der Station Groß Enzersdorf	28
Abb. 22 – Übersicht Einflussgrößen der Schichttemperatur modifiziert nach (Dempsey, Herlache et al. 1986).	29
Abb. 23 - RVS Regelungen für Oberbauschichten	32
Abb. 24 - Bemessungstabelle für Oberbauten mit Betondecken aus (RVS 03.08.63 (2016))	34

Abb. 25 - Ablaufschema der Frostsicherheitsbestimmung in Österreich nach (ÖNORM B 4811)	37
Abb. 26 – Auswertung eines Standardversuches für Frosthebungen (Brandl 2005)	39
Abb. 27 – Angaben zur Schichtdickenänderung	40
Abb. 28 – Schichtdickenänderung von ungebundenen Tragschichten zweier Umfrageteilnehmer	42
Abb.29 - Zuordnung der Frostempfindlichkeitsklassen (ZTV E-StB 09)	44
Abb. 30 - Einflussgrößen für Frostbemessung in Deutschland nach (RStO 12)	46
Abb. 31 - Bauweise mit Asphaltdecke für Fahrbahnen auf F2- und F3 Böden (RStO 12)	48
Abb. 32 - Beispiel für Oberbautyp mit Betondeckschicht auf ungebundenen Schichten gemäß (SN 640 320)	52
Abb. 33 - Bestimmung der Frosteindringtiefe X [cm] für die Frostempfindlichkeitsklasse G4 (SN 670 140b)	53
Abb. 34 - Grundsätzlicher Bemessungsablauf nach (AASHTO 2015)	57
<b>Abb. 35 - Tageslinie der Strahlungsbilanz für die Periode (16.12 – 15.3) (Wistuba 2002)</b>	68
Abb. 36 – Frostindex Station Groß Enzersdorf (ZAMG)	68
Abb. 37 - Frosteindringung z [m] ermittelt ohne Faktor, Station Groß Enzersdorf, Winter 95/96	70
Abb. 38 - Verlauf der Isotherme ohne Faktor	70
Abb. 39 - <b>T<sub>min</sub></b> und Frosteindringung, Station Groß Enzersdorf, Winter 95/96	71
Abb. 40 - Maximale Frosteindringung für <b>T<sub>min</sub> = - 1 °C</b>	85
Abb. 41 - Isotherme für <b>T<sub>min</sub> = - 1 °C</b>	85
Abb. 42 - Maximale Frosteindringung für <b>T<sub>min</sub> = - 5 °C</b>	86
Abb. 43 - Isotherme für <b>T<sub>min</sub> = - 5 °C</b>	86
Abb. 44 - Maximale Frosteindringung für <b>T<sub>min</sub> = - 10 °C</b>	87
Abb. 45 - Isotherme für <b>T<sub>min</sub> = - 10 °C</b>	87
Abb. 46 - Maximale Frosteindringung für <b>T<sub>min</sub> = - 15 °C</b>	88
Abb. 47 - Isotherme für <b>T<sub>min</sub> = - 15 °C</b>	88
Abb. 48 - Maximale Frosteindringung für <b>T<sub>min</sub> = - 20 °C</b>	89
Abb. 49 - Isotherme für <b>T<sub>min</sub> = - 20 °C</b>	89
Abb. 50 - Maximale Frosteindringung für <b>T<sub>min</sub> = - 25 °C</b>	90
Abb. 51 - Maximale Frosteindringung für <b>T<sub>min</sub> = - 25 °C</b>	90

## 6.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Erfahrungswerte für die kapillare Rückhaltehöhe <b>h<sub>kp</sub></b> (Möller 2013)	17
Tabelle 2 – Korngrößenverteilung nach (ÖNORM B 4400-1)	19
Tabelle 3 – Auszug des Mineralkriteriums aus ÖNORM B 4811	21
Tabelle 4 - Schichtdickenänderung der ungebundenen Tragschicht (für veraltete Bautypen 1 und 2) nach (Chlan and Litzka 1988)	25
Tabelle 5 – Größenordnung Albedo-Werte für kurzweilige Strahlungsanteile (Stefan, Martin et al. 2017)	29
Tabelle 6 – Einflussgrößen Temperaturdifferenzverfahren der TU Wien (Wistuba)	30
Tabelle 7 – empfohlene $\lambda$ –Rechenwerte für Lockergesteine und volumenbezogene Wärmekapazität $c_v$ nach (VDI 4640 )	30
Tabelle 8 – Änderungen der Untergrundtragfähigkeit während des Jahres (Litzka, Molzer et al. 1996)	35
Tabelle 9 – Kriterien zur Änderung der standardisierten Schichtdicken (RVS 03.08.63)	36
Tabelle 10 - Frostempfindlichkeitsklassen nach ZTV E-StB 09	44
Tabelle 11 - Ausgangswerte für Frostdickenbestimmung nach RStO 12	46
Tabelle 12 - Gegenüberstellung <b>z<sub>F</sub></b> und Ausgangswerte nach (Blume and Plehm 2009)	47
Tabelle 13 - Materialtechnische Anforderungen an die Frostschuttschicht nach (TL Gestein-StB 04, TL SoB-StB 04, ZTV SoB-StB 04)	49
Tabelle 14 - Bodentragfähigkeitsklassen (SN 640 320)	50
Tabelle 15 - <b>f</b> für Beispiel mit <b>T420</b> aus (SN 640 320)	52
Tabelle 16 - <b>f</b> für Beispiel mit <b>T320</b> aus (SN 640 320)	52
Tabelle 17 - Einteilung der Böden in Frostempfindlichkeitsklassen aufgrund ihrer Korngrößenverteilung und Plastizitätseigenschaften in Anwendung der USCS-Klassifikation gemäß SN 670 008a; aus (SN 670 140 b)	54
Tabelle 18 - Straßenoberbauten für Asphaltdeckschichten (flexible und halbstarre Tragschichten), Hot-Mix Asphalt Surfaced Pavements (HMA) nach (MEPDG-2 2015)	55
Tabelle 19 - Straßenoberbauten für Betondeckschichten (starre Tragschichten), Portland Cement Concrete (PCC)-Surfaced Pavements nach (MEPDG-2 2015)	56
Tabelle 20 - Materialeingangsgrößen von ungebundenen Schichten und anzutreffenden Untergrund nach (Zapata and Houston 2008)	62
Tabelle 21 - Abschätzung der Tragfähigkeit, Frostempfindlichkeit, Quelleigenschaften, Entwässerungsfähigkeit (MEPDG-2 2015)	64
Tabelle 22 - U.S. Army Corps of Engineers Frost Design Soil Classification System Andersland and Ladanyi 2004)	65
Tabelle 23 - Frostempfindlichkeitsklassifizierung implementiert in der ASTM D 5918 (Johnson 2012)	65
Tabelle 24 - Eingangsparameter Schichtaufbau mit Gesamtdicke 2 m	67
Tabelle 25 – Anpassungsfaktoren F	69

---

Tabelle 26 – Ergebnisse Frosteindringungsberechnungen	71
Tabelle 27 - Mittlere Jahrestemperaturminima mit zugehöriger Standardabweichung und Beobachtungszeitraum an 91 verschiedenen österreichischen Klimastationen, Datenaufbereitung durch die ZAMG (Wistuba, Litzka et al. 2001)	72

### 6.3 Quellenverzeichnis

- AASHTO (2015): MEPDG-2: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Second Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC
- Andersland, O. B. & Ladanyi B. (2004): Frozen Ground Engineering, 2nd edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey
- APT (2018): Second annual meeting Denver October 2017, AASHTO Pavement ME National Users Group, Technical Report, Applied Pavement Technology Inc.
- Arand, W. (2004): Zur prüftechnischen Ansprache der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten - Teil 2. Bitumen 66. Jahrgang, Heft 2, S.70-75
- Azmatch, T. F., Sego, D. C., Arenson, L. U., Biggar, K. W. (2011): Tensile strength and stress-strain behaviour of Devon silt under frozen fringe conditions, Cold Regions Science and Technology, Vol. 68, pp. 85-90
- Behr, H. (1984): Über klimatische Grundlagen für Frostschutzmaßnahmen im Straßenbau, Straße und Autobahn, Heft 4, S. 135-140
- Benson, C. & Othman M. (1993): Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, pp. 276-294
- Blume, U. & Plehm T. (2009): Aktualisierung der Frostzonenkarte zur Dimensionierung des frostischeren Oberbaus, Straße und Autobahn, Heft 12 S. 793-799
- Boley, C., Adam, D., Englert, K., Ferrari, H., Fuchs, B., Haack, A., Marte, R., Meier, C., Meyer, F. & Morgen K. (2012): Handbuch Geotechnik, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Brandl, H. (1977): Ungebundene Tragschichten im Straßenbau: Verdichtung, Kornverfeinerung, Frostbeständigkeit, Tragverhalten, Dimensionierung, Qualitätsanforderungen, Prüfung, Straßenforschung, Heft 67, Bundesministerium für Bauten u. Technik, Wien
- Brandl, H. (2005): Frost-Tau-Verhalten von Böden und künstlichen Korngemischen. Vortrag: Erdbau für Verkehrswege 2005 in Nürnberg, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 83, S. 243-264
- Bulut, R., Muraleetharan, K. K., Zaman, M., Yue, E., Soltani H., Hossain, S. (2013): Evaluation of the Enhanced Integrated Climatic Model for Modulus-Based Construction Specification for Oklahoma Pavements, Report No. OTCREOS11.1-10-F, Oklahoma Transportation Center
- Ceylan, H. & Gopalakrishnan K. (2011): Computationally efficient surrogate response models for mechanistic-empirical pavement analysis and design, Structure and Infrastructure Engineering, Vol.7, pp. 297-306
- Chamberlain, E. J., Janoo V. C. & Ketcham S. A. (1996): Material Properties, Specifications and Testing for Pavements in Cold Regions, Roads and Airfields in Cold Regions: A State of the Practice Report, pp. 289-318
- Chlan, P. & Litzka J. (1988): Die Berücksichtigung des Frostindex bei der Bemessung des Straßenoberbaus, Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, Heft 5, S. 296-302
- Dege, E. (2012): abgerufen am 06.01.2018, von <http://www.panoramio.com/photo/65691834>
- Dempsey, B. J., Herlache W.A., Patel A.J. (1986): Climatic-materials-structural pavement analysis program, Transportation Research Record 1095, pp. 111-123

- Eichler, H. J., Kronfeldt H.-D. & Sahn J. (2016): Vielteilchensystem und Thermodynamik, Das neue Physiklische Grundpraktikum, Springer Berlin Heidelberg
- FGSV (1994): Entstehung und Verhütung von Frostschäden an Straßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Kirschbaum Verlag, Bonn
- FGSV (2013): Merkblatt für die Verhütung von Frostschäden an Straßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- Fillibeck, J. (2012): Oberflächensetzung beim Tunnelvortrieb im Lockergestein - Prognose Messung und Beeinflussung, unv. Habilitationsschrift, TU München, 2012
- Götze, J. & Göbbels M. (2017): Einführung in die Angewandte Mineralogie, Springer Spektrum
- Jasmund, K. & Lagaly G. (2013): Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt, Steinkopff-Verlag Heidelberg
- Ji, R., Siddiki, N., Nantung, T. & Kim D. (2014): Evaluation of Resilient Modulus of Subgrade and Base Materials in Indiana and Its Implementation in MEPDG, The Scientific World Journal, Vol. 2014, pp.14
- Johnson, A. (2012): Freeze-thaw performance of pavement foundation materials, unv. Master Thesis, Iowas State University, 2012
- Kellner, C. (2007): Frosthebungsverhalten von Böden infolge tief liegender Vereisungskörper, unv. DiSSERTATION, TU München, 2007
- Kolymbas, D. (2011): Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Konrad, J.-M. & Morgenstern, N. R. (1980): A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, pp. 473-486
- Konrad, J. M. (1994): Sixteenth Canadian Geotechnical Colloquium: Frost heave in soils: concepts and engineering, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 223-245.
- Kreis, H. (2016): Einflüsse von Tiefen Temperaturen auf Straßenaufbauten in Wien unter besonderer Berücksichtigung der Frosteindringung, Master Thesis, Universität für Bodenkultur Wien, 2016
- Krispel, S., Peyerl, M., Maier, G. & Weihs P. (2017): Urban Heat Islands – Reduktion von innerstädtischen Wärmeinseln durch Whitetopping, Bauphysik, Ausgabe 39, S. 33-40
- Kurzweil, P., Frenzel, B. & Gebhard F. (2014): Physik Formelsammlung: Mit Erläuterungen und Beispielen aus der Praxis für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Li, D. & Selig, E. T. (1994): Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils. Journal of Geotechnical Engineering , Vol. 120, pp. 939-957.
- Li, Q., Xiao, D. X., Wang, K. C. P., Hall, K. D. & Qiu, Y. (2011): Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view, Journal of Modern Transportation, Vol. 19, pp. 114-133
- Litzka, J., Molzer, C. & Blab, R. (1996): Modifikation der österreichischen Methode zur Dimensionierung des Straßenoberbaues: Straßenforschungsauftrag Nr. 3157 des Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Forschungsgesellschaft für das Verkehr und Straßenwesen im Österr. Ingenieur- und Architektenverein, Wien
- Lottmann, A. (2003): Tragfähigkeit und Frostempfindlichkeit von kalkbehandelten bindigen Böden im Planumbereich von Verkehrsflächen, unv. Dissertation, TU Cottbus 2003

- MA 28 Stadtentwicklung und Stadtplanung: Wissenswertes über Schlaglöcher (Folder der Magistratabteilung 28 - Straßenverwaltung und Straßenbau), abgerufen 18.02.2018, von <https://www.wien.gv.at/verkehr/strassen/pdf/schlaglochfolder.pdf>
- Möller, G. (2013): Geotechnik: Bodenmechanik. Ernst & Sohn, Berlin
- Nassiri, S. & Bayat A. (2013): Evaluation of MEPDG seasonal adjustment factors for the unbound layers' moduli using field moisture and temperature data, International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 6, pp. 45-51
- ÖNORM B 4400-1:2010 03 15 Geotechnik - Teil 1: Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden
- ÖNORM B 4411:2009 07 01: Geotechnik - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung von Fließ-, Plastizitäts- und Schrumpfgrenze unter Einbeziehung der VORNORM ÖNORM CEN ISO/TS 17892-12
- ÖNORM B 4810:2013 08 01 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Frostsicherheit von Gemischen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau
- ÖNORM B 4811:2013 08 01: Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten im Straßen im Straßen- und Flugplatzbau; Bewertung der Frostisicherheit
- ÖNORM EN 933-1: 2012 03 01 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren
- ÖNORM EN 1097-1:2013 08 15 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und Wasseraufnahme
- ÖNORM EN 1367-1:2007 06 01 Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung des Widerstands gegen Frost-Tau-Wechsel
- ÖNORM EN ISO 13793:2001 08 01 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmetechnische Bemessung von Gebäudegründungen zur Vermeidung von Frosthebung (ISO 13793:2001)
- Rempel, A. W., Wettlaufer, J. S. & Worster M. G. (2004): Premelting dynamics in a continuum model of frost heave, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 498, pp. 227-244
- RStO 12 (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- Ruckli, R. (1950): Der Frost im Baugrund, Springer Verlag, Wien
- Schwaighofer, B. & Kugler H. (2002): Frostsicherheit im Straßenbau - ein verbessertes Mineralkriterium : Straßenforschungsauftrag Nr. 3.238 des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien
- Setzer, M. J. (2002): Frostschaaden Grundlagen und Prüfung, Beton- und Stahlbetonbau, Ausgabe 97, S.350-359
- Stein, D. (2003): Grabenloser Leitungsbau, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- SN 640 320:2011 Dimensionierung des Strassenaufbaus: Äquivalente Verkehrslast, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS
- SN 640 324:2011 Dimensionierung des Strassenaufbaus: Unterbau und Oberbau, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS
- SN 670 140b:2001 Frost, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS

- SN 670 317b:1998 Böden; Plattendruckversuch EV und ME, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS
- SN 670 119-NA:2011 EN 13242/ EN 13285 Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulische Gemische für Ingenieur- und Strassenbau, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS
- Stark, J. & Wicht B. (2013): Dauerhaftigkeit von Beton, Springer Verlag Berlin Heidelberg
- Takagi, S. (1980): The adsorption force theory of frost heaving, Cold Regions Science and Technology , Vol. 3, pp. 57-81.
- TL Gestein-StB 04 (2004): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- TL SoB-StB 04 (2004): Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- Unold, F. (2006): Der Gefriersog bei der Bodenfrostsung und das Kompressionsverhalten des wieder aufgetauten Bodens, unv. Dissertation, Universität der Bundeswehr München 2006
- VDI (4640) (2010): Blatt 1:2010-06 Thermische Nutzung des Untergrunds; Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf
- Waibel, P. (1975): Der Einfluß der mineralogischen Zusammensetzung der Feinanteile auf die Frostsicherheit von Kiestragschichten, Bundesministerium für Bauten und Technik, Bundesstraßenverwaltung, Wien
- WAPA (2018): Washington Asphalt Pavement Association, abgerufen am 25.01.2018, von <http://www.asphaltwa.com/transverse-thermal-cracking/>
- Willems, W. M., Schild, K., Dinter, S., Stricker, D. (2007): Formeln und Tabellen Bauphysik, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden
- Wistuba, M. (2002): Klimaeinflüsse auf Asphaltstrassen, Maßgebende Temperatur für die analytische Oberbaubemessung in Österreich, unv. Dissertation, Technische Universität Wien 2002
- Wistuba, M. (2006): Vermeidung von Kälterissen in Asphaltstrassen, Strasse und Verkehr, Nr. 10, S. 20-23.
- Wistuba, M., Lackner, R., Blab, R. & Spiegl, M. (2006): Low-temperature performance prediction of asphalt mixtures used for LLP new approach based on fundamental test methods and numerical modeling, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 7, pp. 121-132.
- Wistuba, M., Litzka, J., Blab, R. (2001): Klimakenngrößen für den Straßenoberbau in Österreich: Straßenforschungsauftrag Nr. 3.219 des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien
- Wolf, M. (2014): Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel in Straßenbefestigungen, unv. Dissertation, Technische Universität Dresden 2014
- ZAMG: Stundendaten ( 24.12.1995 – 10.03.1996) für Klimastationen: Wien-Hohe Warte, Wien-Innere Stadt und Gross Enzersdorf , Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien
- Zapata, C. E., Andrei, D., Witczak, M. W. & Houston W. N. (2007): Incorporation of Environmental Effects in Pavement Design, Road Materials and Pavement Design, Vol. 8, pp. 667-693

- Zapata, C. E. & Houston, W. N. (2008): NCHRP Report 602 - Calibration and Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model for Pavement Design, The National Academies Press., Washington, DC
- ZTV E-StB 09 (2009): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

### 6.4 Berechnungsergebnisse

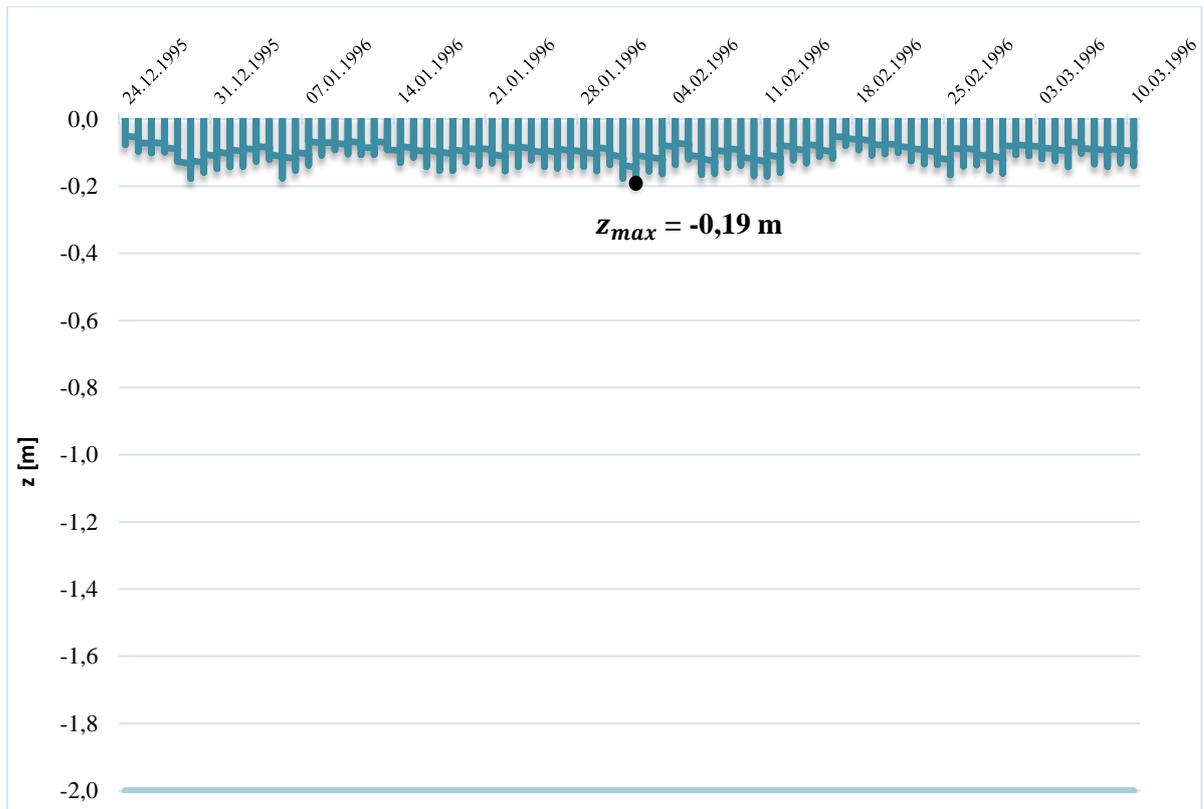


Abb. 40 - Maximale Frosteindringung für  $T_{min} = - 1 \text{ }^\circ\text{C}$

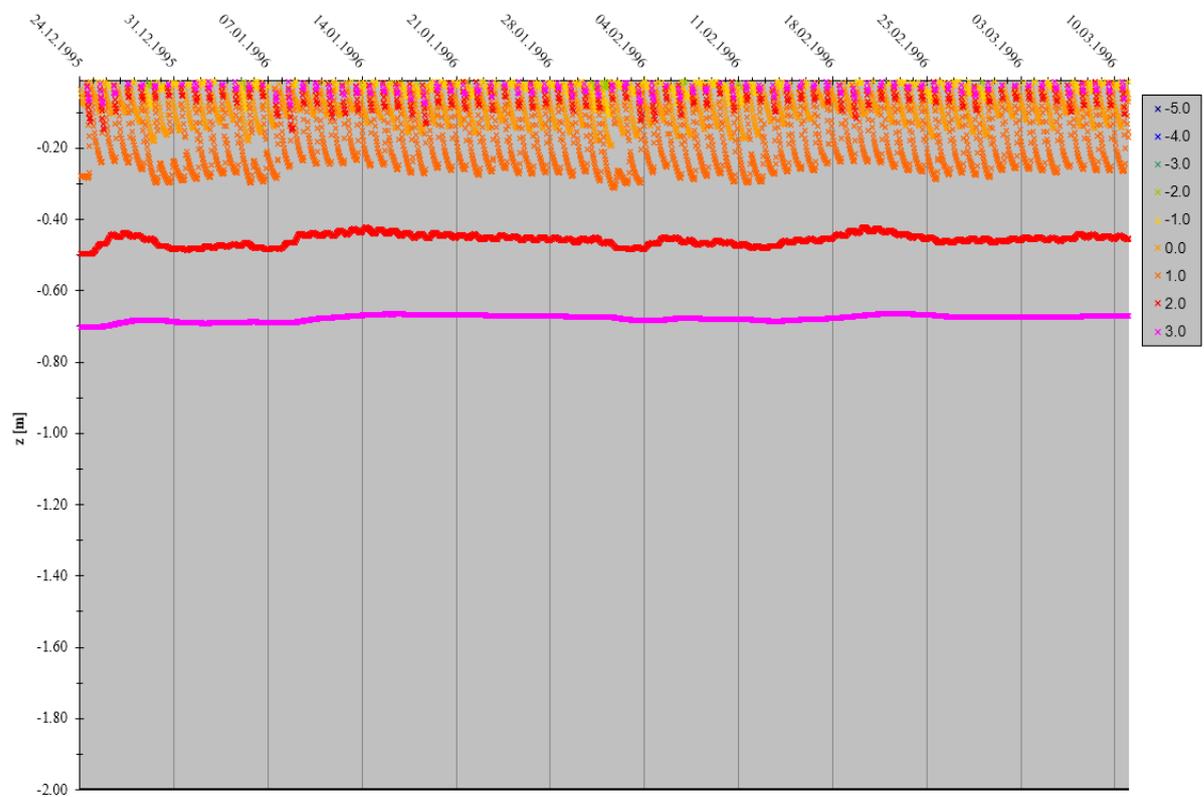


Abb. 41 - Isotherme für  $T_{min} = - 1 \text{ }^\circ\text{C}$

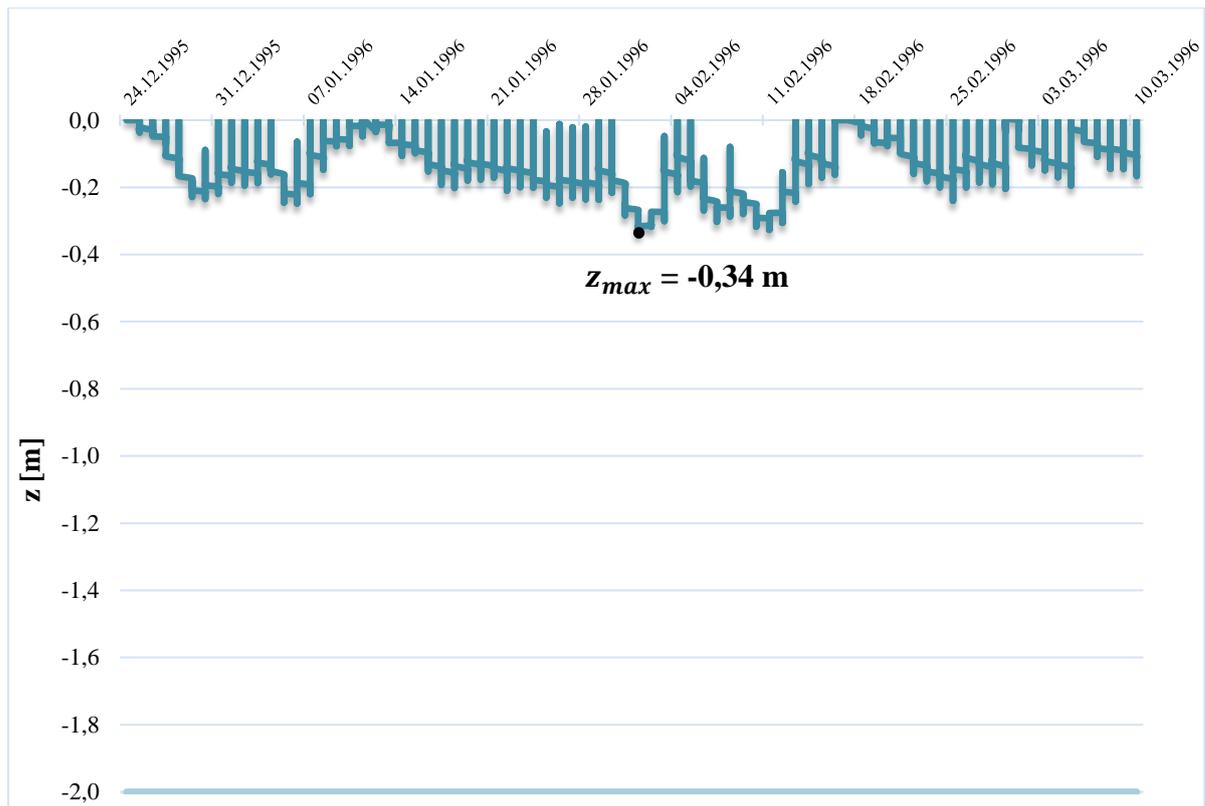


Abb. 42 - Maximale Frosteindringung für  $T_{min} = -5 \text{ °C}$

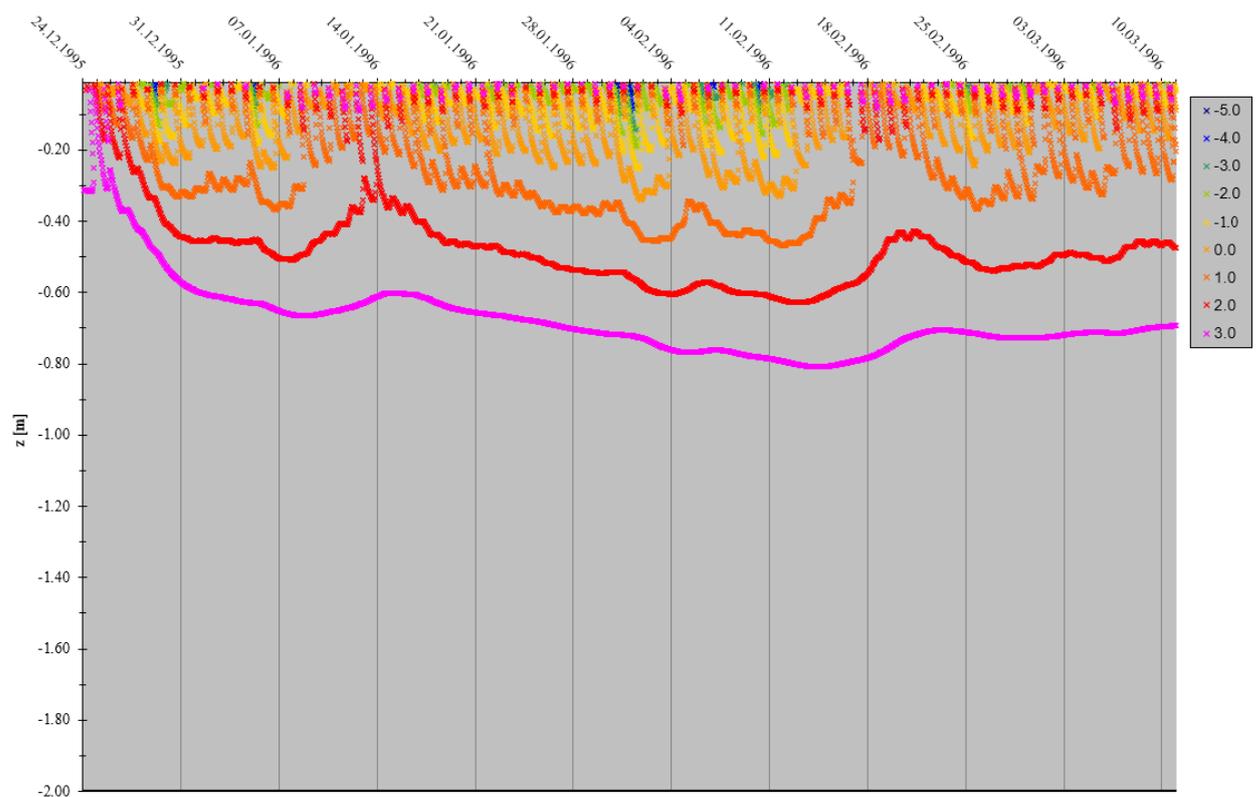
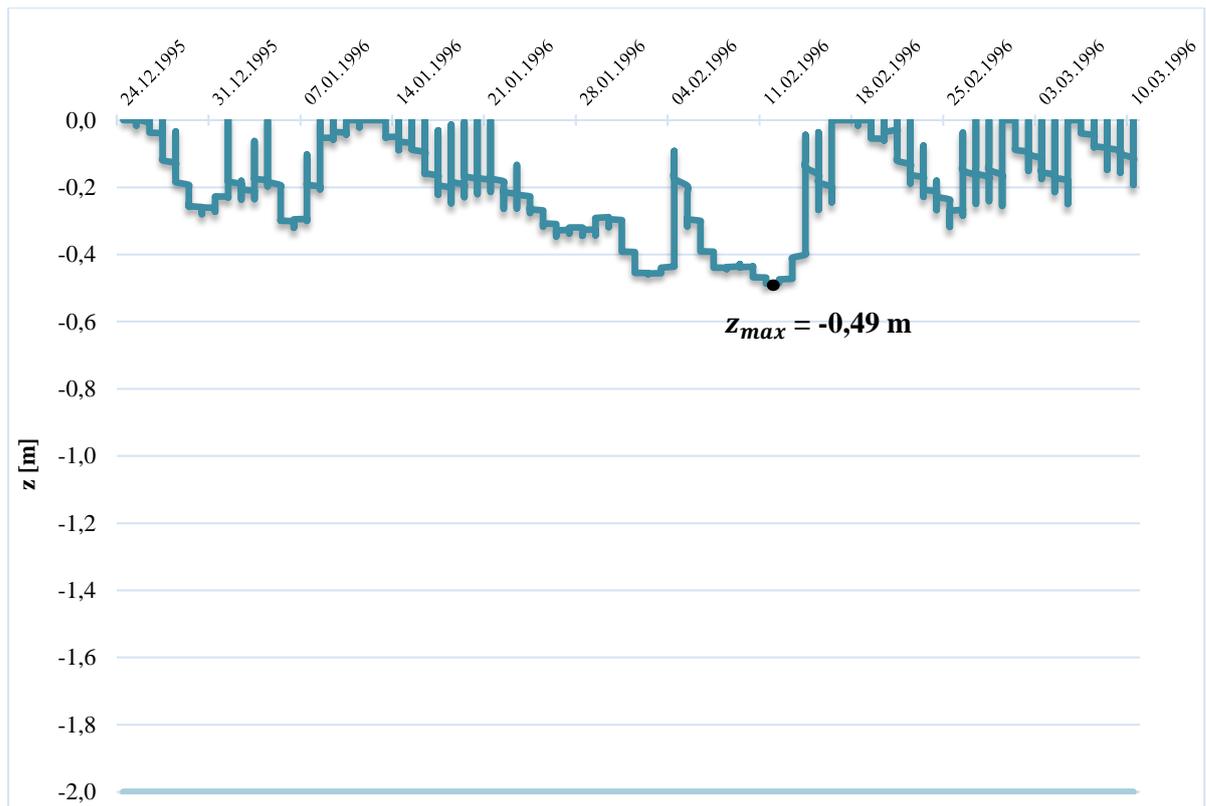
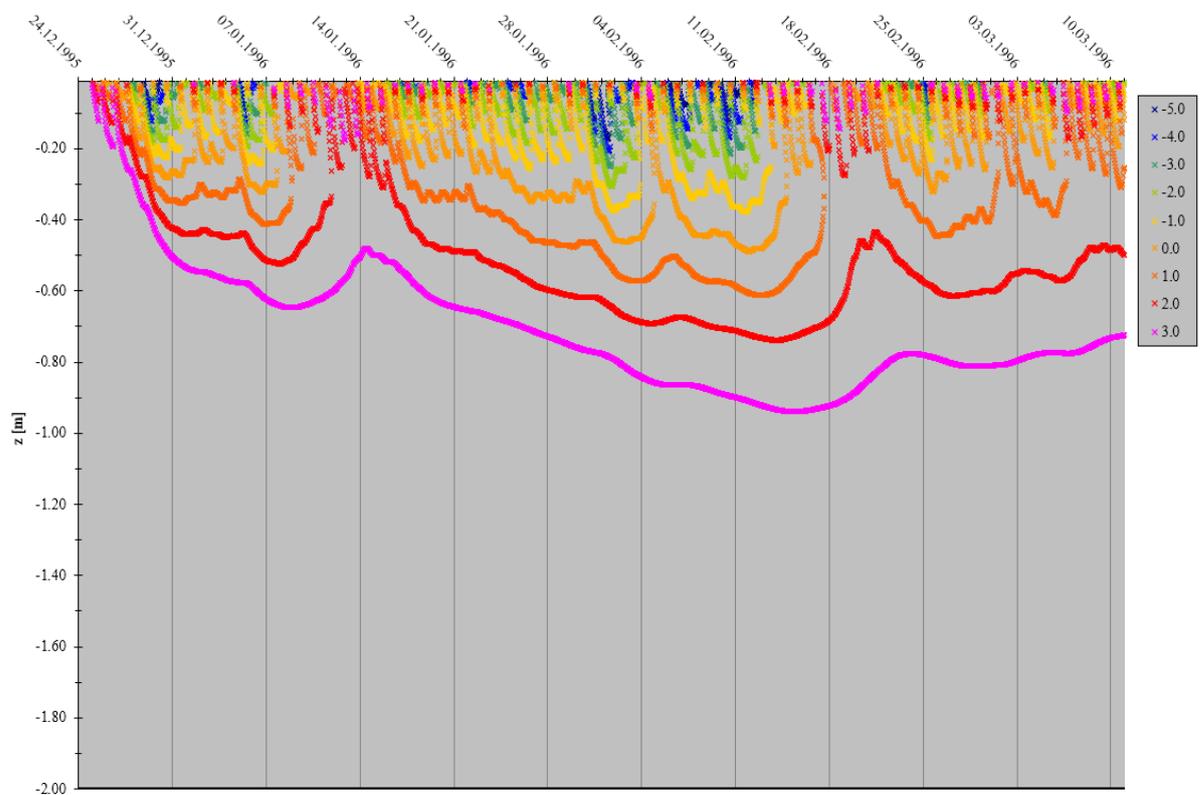
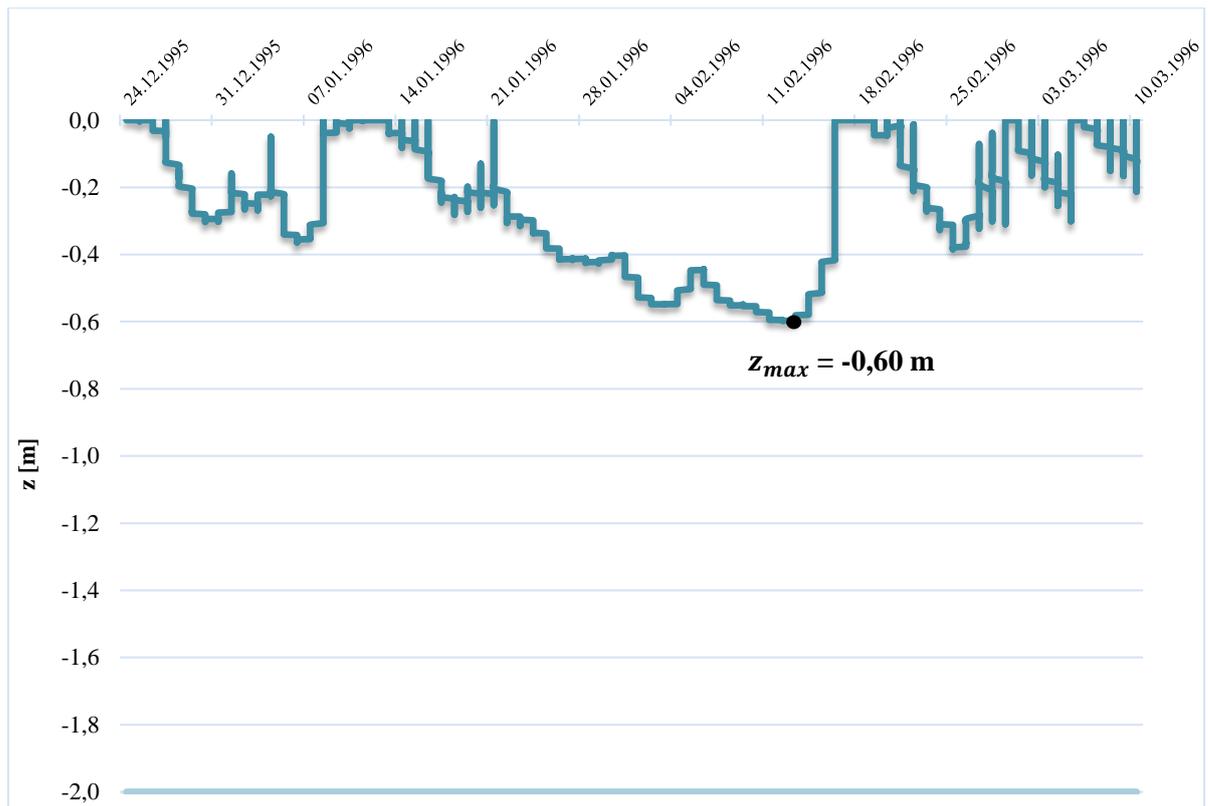
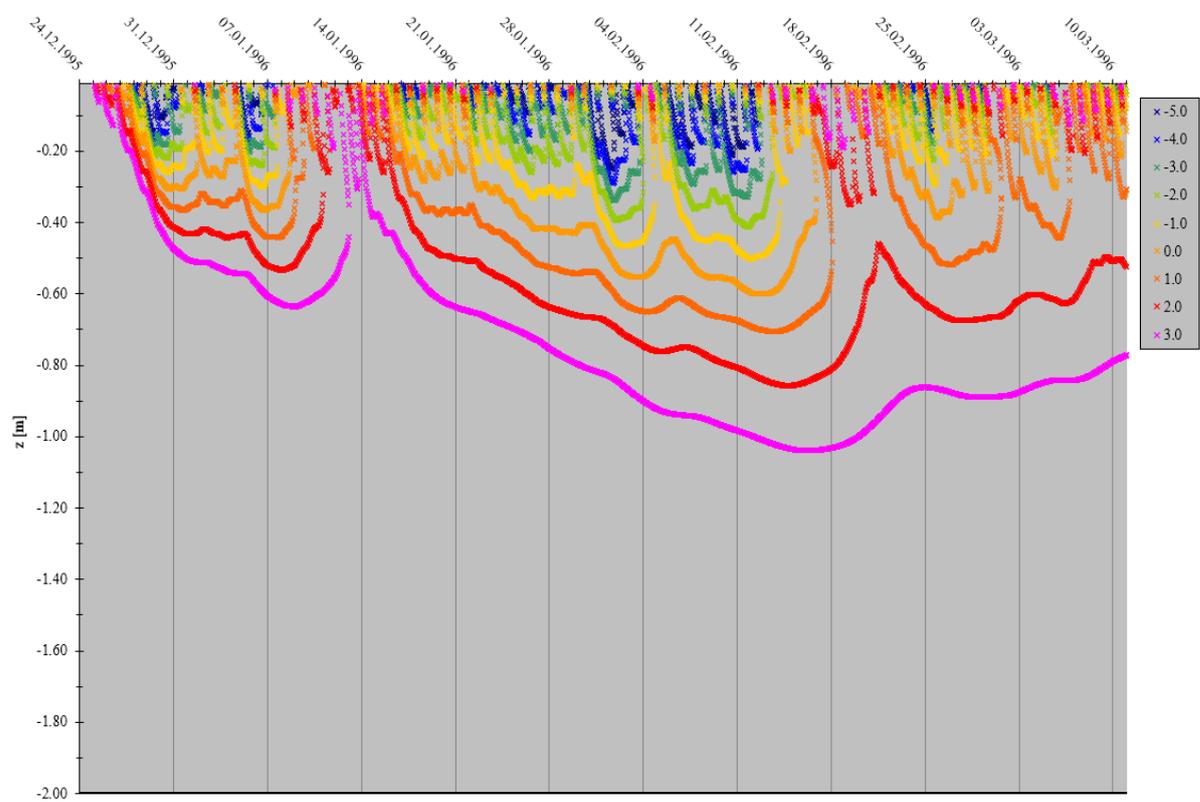


Abb. 43 - Isotherme für  $T_{min} = -5 \text{ °C}$

Abb. 44 - Maximale Frosteindringung für  $T_{min} = -10$  °CAbb. 45 - Isotherme für  $T_{min} = -10$  °C

Abb. 46 - Maximale Frosteindringung für  $T_{min} = -15$  °CAbb. 47 - Isotherme für  $T_{min} = -15$  °C

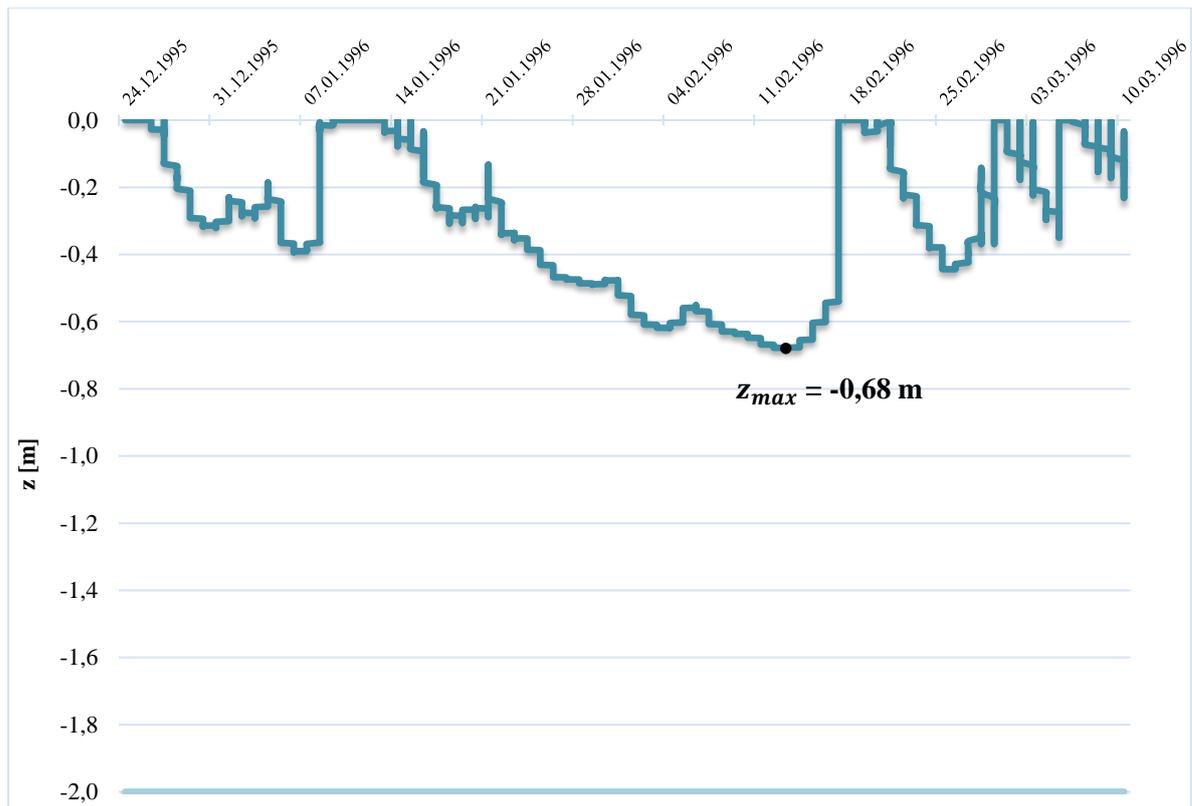


Abb. 48 - Maximale Frosteindringung für  $T_{min} = -20$  °C

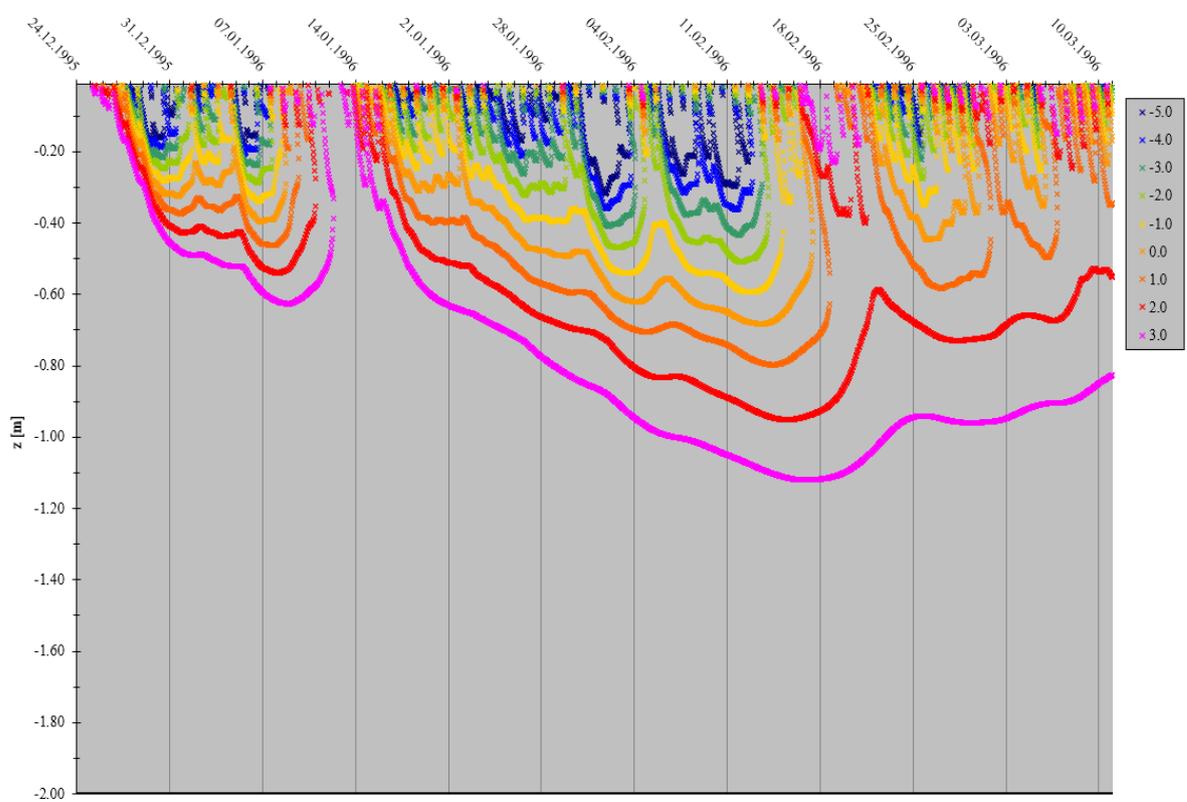


Abb. 49 - Isotherme für  $T_{min} = -20$  °C

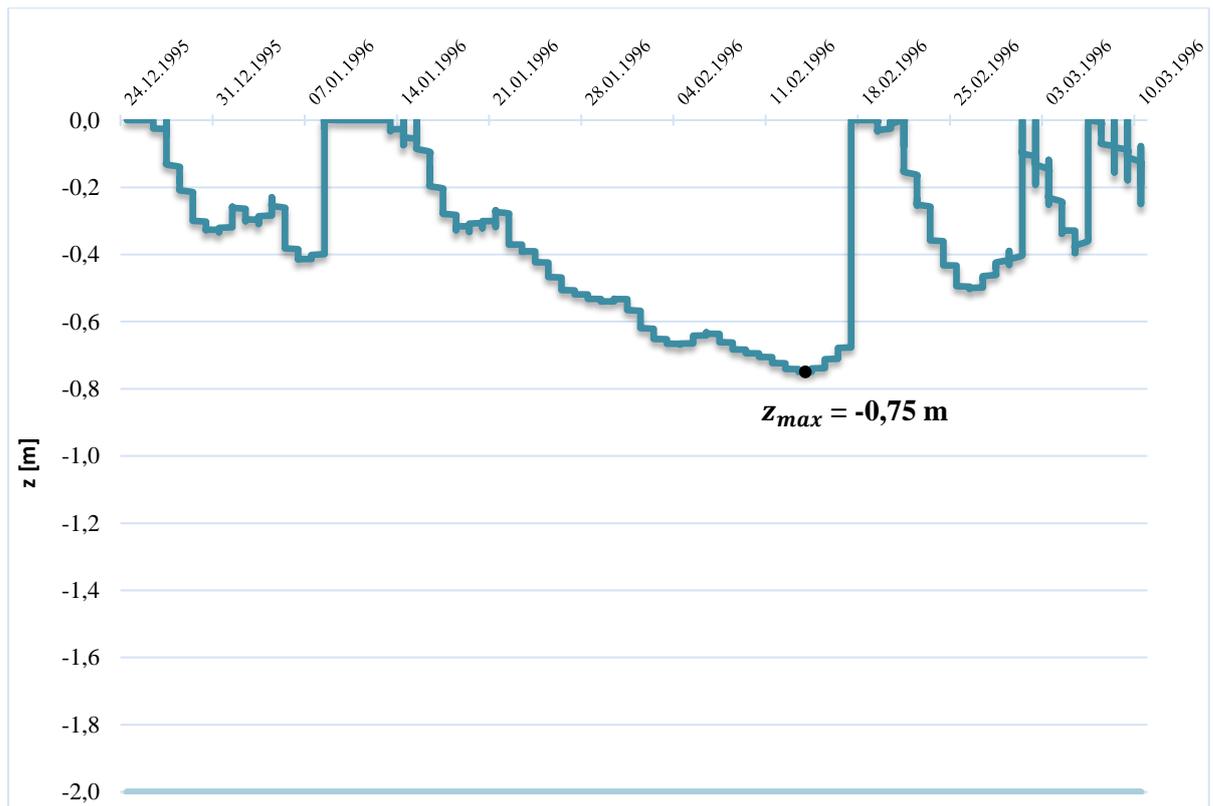


Abb. 50 - Maximale Frosteindringung für  $T_{min} = -25 \text{ °C}$

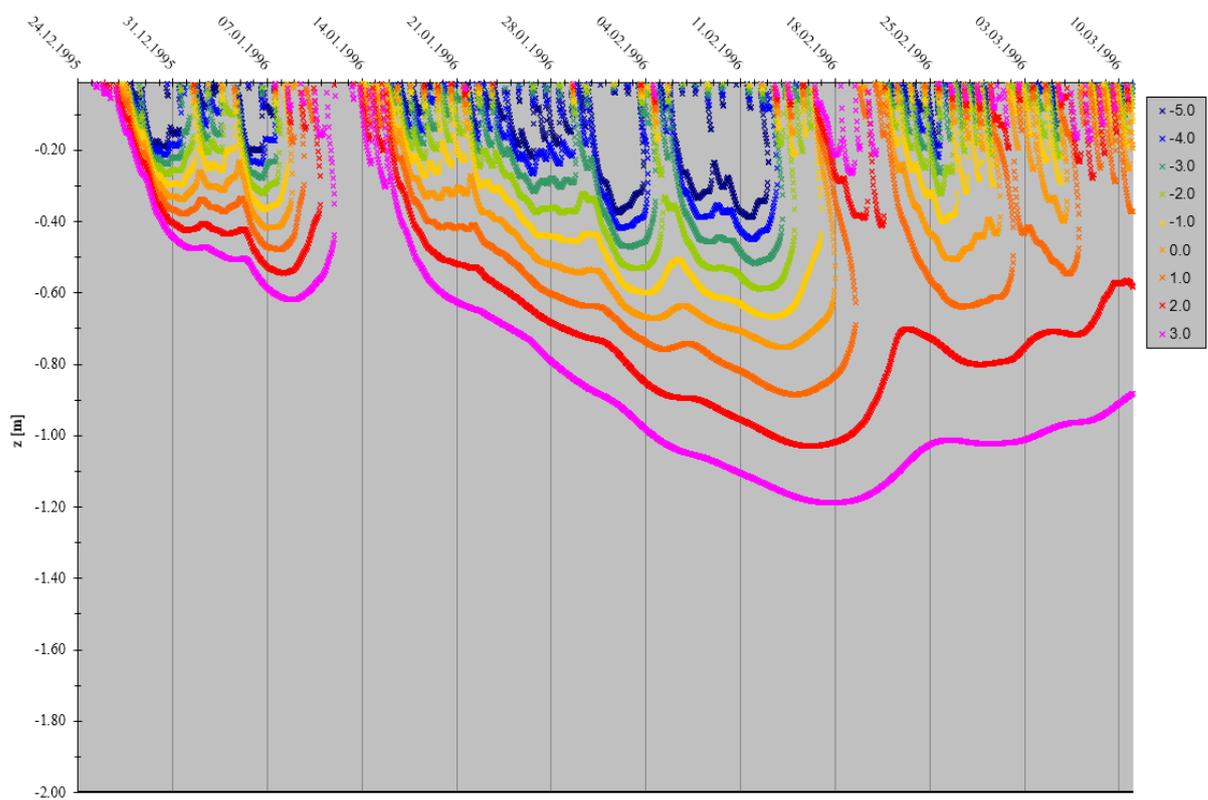


Abb. 51 - Maximale Frosteindringung für  $T_{min} = -25 \text{ °C}$

## **6.5 Interviews**

<b>Teilnehmer 1:</b> <b>Telefonat vom 01.03.2018</b>	
Welche Richtlinien werden verwendet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundlage ist die RVS 03.08.63</li> <li>• Land 1 hat eigene Konstruktionsquerschnittsvorgaben, diese korrelieren mit der Oberbaudimensionierung nach der RVS-Richtlinie. Die Mächtigkeiten der Asphaltsschichten und auch die Mächtigkeit der ungebundene Tragschichten wurden optimiert in Zusammenarbeit mit der TU Wien. Bezieht sich allerdings auf die unteren Lastklassen (ab Lastklasse 0,4), die oberen Lastklassen sind davon nicht betroffen.</li> </ul>
Wie gehen sie vor, wenn verschiedene lokale Verhältnisse anzutreffen sind?	<p><u>Untergrund &amp; ungebundene Tragschichten</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baugrundbegutachtung. Auch bei ungebundene Schichten, Lastplattenversuche d.h. statische und dynamischer Lastplattenversuch. Um festzustellen welchen Zustand das Planum aufweist.</li> <li>• Im Falle von mangelnden Untergrundverhältnissen kommt häufig eine Zementstabilisierung zur Anwendung (weniger Kalkstabilisierung)</li> <li>• Bei Auswechslung ca. 50 cm Abtrag, und danach Einbau von entsprechendem Material zur Tragfähigkeitserhöhung.</li> </ul> <p><u>Altbestand</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sanierungsfälle sind häufiger anzutreffen in Land 1. Die ungebundenen Tragschichten sind häufig in einem guten Zustand und es erfolgt nur ein Austausch der Deckschichten</li> </ul>
Erfolgt eine Abänderung der Schichtdicken (Gesamtdicke)? Wenn ja, auf welcher Grundlage?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abänderung der ungebundene Tragschichtdicken aufgrund der klimatologischen Werte und Bodenkennwerte, die im der Umgebung von Land 1 existieren. Dazugehörige Vordimensionierung ist vorhanden.</li> <li>• Erfahrungswert bzw. Vordimensionierung.</li> </ul>
Werden Bodenuntersuchungen durchgeführt? Welche?	<p>Bestandsdurchführungen bei Sanierungsfall (Feststellung der Teerbelastung)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Laboranalyse (chemische Analyse) zur Feststellung ob das Material kontaminiert ist.</li> <li>• Für ungebundene Tragschichten auch Laboruntersuchung</li> </ul>
Liegen Probleme bei der Bemessung vor?	<p>Nein, grundsätzlich nicht.</p>
Besteht das Interesse an einer neuen Richtlinie?	<p>Einsparungspotential konnte durch Durchdimensionierung bereits gefunden werden, bei den ungebundenen Tragschichten (~ 5 – 10 cm). Zusätzliche Dimensionierungsvorgaben für Land 1 nicht zwingend erforderlich, da eine Ausarbeitung bereits erfolgte.</p>

<b>Teilnehmer 7:</b> <b>Telefonat vom 27.02.2018</b>	
Welche Richtlinien werden verwendet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwendung der Bemessungsstärken der aktuellen RVS 03.08.63 findet keine Verwendung, es erfolgt eine Abänderung der Bemessungsdicken. Diese sind im landesspezifischen Leitfaden erfasst.</li> </ul>
Wie gehen sie vor, wenn verschiedene lokale Verhältnisse anzutreffen sind?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ungebundene untere Tragschichten, es erfolgt eine generelle Festlegung der Dicke der ungebundenen Tragschichten auf 60 cm. In Höheren Regionen in denen eine erhöhte Frosteinwirkung anzutreffen ist wird auf bis zu 80 cm Schichtdicke erhöht (ab ~ 1000 Meter über Null)</li> <li>• Liegen ungünstige lokale Verhältnisse vor, erfolgt im Bedarfsfall ein Bodenaustausch. Auch Geotextilvlies zur Schaffung von homogeneren Bedingungen für die Straße.</li> </ul>
Erfolgt eine Abänderung der Schichtdicken (Gesamtdicke)? Wenn ja, auf welcher Grundlage?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ja, siehe oben. Festgelegt in landesspezifischen Leitfaden</li> <li>• Schichtdickenänderung ist ein Erfahrungswert</li> </ul>
Werden Bodenuntersuchungen durchgeführt? Welche?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfung des Untergrunds mit statischer Lastplatte, bevor die Frostschutzschicht (ungebundene untere) eingebaut wird.</li> <li>• Labortechnische Überprüfung der Korngrößenverteilung etc. der ungebundenen Tragschicht. Auch wird die Wasserdurchlässigkeit der ungebundene Tragschicht geprüft. Hierbei wird ein „Sonderversuch“ verwendet, der eigtl. aus dem Sportanalgenbau kommt. Danach Ermittlung des statischen Verformungsmoduls, des Frostkoffers.</li> </ul>
Liegen Probleme bei der Bemessung vor?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nein mit dem Bemessungsleitfaden nicht.</li> </ul>
Besteht das Interesse an einer neuen Richtlinie?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der landesspezifische Leitfaden ist eine ausreichende Ergänzung mit guten Erfahrungswerten.</li> </ul>

<b>Teilnehmer 5:</b> <b>Telefonat vom 28.02.2018</b>	
Welche Richtlinien werden verwendet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RVS 03.08.63 und die RVS-Richtlinien finden Anwendung mit Anpassung in Bedarfsfall.</li> <li>• Hauptteil der Maßnahmen allerdings reine Sanierungsfälle</li> </ul>
Wie gehen sie vor, wenn verschiedene lokale Verhältnisse anzutreffen sind?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Die Bemessung erfolgt über eine zentrale Stelle die aufgrund von Bohruntersuchungen und unter Einbezug der lokalen Verhältnisse die Oberbaubemessung der RVS-Richtlinie anpasst.</u> Homogene Bauabschnitte werden gleich dimensioniert. Unterschiedliche Anpassung bei unterschiedlichen Verhältnisse innerhalb eines Straßenzuges würde zu unterschiedlichen Verdichtungsgraden etc. führen, daher <u>Anpassung aufgrund lokaler Gegebenheiten für den gesamten Bauabschnitt.</u> Zudem unwirtschaftlich, da ungebundene Tragschichten nicht den größten Kostenanteil ausmachen.</li> </ul>
Erfolgt eine Abänderung der Schichtdicken (Gesamtdicke)? Wenn ja, auf welcher Grundlage?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundsätzlich Schichtdicken gemäß RVS. Aber unter Einbezug der klimatischen Gegebenheiten, werden die Schichtdicken angepasst. Zentrale Bemessungsstelle hat Erfahrungswerte vorliegen, diese werden im Bemessungsfall angewendet.</li> <li>• Die obere ungebunden Tragschicht wird standardmäßig mit einer Dicke von 10 cm ausgeführt und die untere ungebundene Tragschicht zwischen 40 cm bis 50 cm, aus einbautechnischen Gründen. Aber es erfolgt eine regionale Anpassung, welches Material zur Verfügung steht etc., dann wird auch eine andere Dickenfestlegung vorgenommen.</li> </ul>
Werden Bodenuntersuchungen durchgeführt? Welche?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ja. Standardgemäß bei allen Untergrunduntersuchungen Schürfe. Und Bodenentnahme mit Laboruntersuchungen, vorwiegend Korngrößenverteilung, Bestimmung der Feinanteile unter Umständen auch Untersuchung zur Zement- oder Kalkstabilisierung. Darauf basierend ergibt es eine Sanierungs- bzw. Ausbauempfehlung.</li> </ul>
Liegen Probleme bei der Bemessung vor?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die überarbeiteten Äquivalenzfaktoren (1,45 für Landesstraßen) in der Oberbaubemessung werden als zu hoch angesehen (erfahrungsbasierte Beurteilung), „teilweise eine Lastklasse zu hoch“. Zumindest für untergeordnete Landesstraßen.</li> <li>• Bei Schichtdicken grundsätzlich keine Probleme.</li> </ul>
Besteht das Interesse an einer neuen Richtlinie?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regionale Gegebenheiten können am besten durch die Erfahrung vor Ort angepasst werden. Jeder Steinbruch etc. hat seine Eigenheiten für verwendetes Straßenbaumaterial. Daher wird die Möglichkeit der örtlichen Anpassung als gut eingestuft.</li> </ul>

<b>Teilnehmer 4:</b> <b>Telefonat vom 27.02.2018</b>	
Welche Richtlinien werden verwendet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RVS Richtlinie 03.08.63 bzw. rechnerische Dimensionierung bei Neubauten 03.08.68 etc. Landesspezifische Anpassung nach Landesstraßen (1ter 2ter 3ter 4ter Ordnung) ist aber eigtl. eher bezogen auf den DTV.</li> </ul>
Wie gehen sie vor, wenn verschiedene lokale Verhältnisse anzutreffen sind?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Örtliche Anpassung (z.B. Rosaliengebirge) unter Berücksichtigung von Temperaturen, darauf erfolgt Schichtdickenänderung basierend auf Erfahrungswerten.</li> </ul>
Erfolgt eine Abänderung der Schichtdicken (Gesamtdicke)? Wenn ja, auf welcher Grundlage?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassung ja, auch mit gleicher Stärke (50cm) aber dann andere Anforderungen hinsichtlich Lastplattenversuche bzw. eine Erhöhung von z.B. 75 MN/m<sup>2</sup> auf 90 MN/m<sup>2</sup> für die oberen Schichten, da Qualitätskriterium. Ansonsten basiert Schichtdickenänderung auf Erfahrung.</li> </ul>
Werden Bodenuntersuchungen durchgeführt? Welche?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bodenuntersuchungen nur im Neubaubereich, da ansonsten viele Sanierungsfälle vorliegen. Dann übliche Untersuchungen, chemische Untersuchungen, Zusammensetzung (Korngrößenanteil, Feinanteil, etc.). Im Untergrundbereich Schürfe.</li> </ul>
Liegen Probleme bei der Bemessung vor?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Liegen keine Probleme vor. Gutes Regelwerk. Wunsch nach Überarbeitung der RVS 03.08.64 für Sanierungsfälle auch in Hinblick auf die ungebundenen Tragschichten. Mit was kann ich die bestehenden Schichten bemessen? Wieviel muss abgetragen werden?</li> </ul>
Besteht das Interesse an einer neuen Richtlinie?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktuelle Normung wird als gut empfunden in Kombination mit der RVS 08.15.01.</li> </ul>

<b>Teilnehmer 6:</b> <b>Telefonat vom 26.02.2018</b>	
Welche Richtlinien werden verwendet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RVS 03.08.63 – Richtlinien Oberbau etc.</li> </ul>
Wie gehen sie vor, wenn verschiedene lokale Verhältnisse anzutreffen sind?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Festlegung der Maßnahmen erfolgt vor Ort. Welche Maßnahmen noch notwendig sind. (siehe Bodenuntersuchung). Starke Einbezug von materialtechnischen Gegebenheiten.</li> </ul>
Erfolgt eine Abänderung der Schichtdicken (Gesamtdicke)? Wenn ja, auf welcher Grundlage?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ja auf Basis von Erfahrung bzw. der Bodenuntersuchungen. Auch Bodenauswechslung. Weiterer Sanierungsvorschlag, gebundenen Oberbau mit einem Teil des ungebundenen Oberbaus Fräsen (~ 30 – 40 cm), dadurch größerer Körnungsbereich, der sich günstig auswirkt auf die Frostsicherheit. Darauf dann Deckschichtkörper gemäß RVS.</li> </ul>
Werden Bodenuntersuchungen durchgeführt? Welche?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untergrundverhältnisse durch Schürfe und labortechnische Analyse (gemäß Richtlinienvorgaben) bzw. für ungebundene Tragschichten. Sanierungsfälle überwiegen, daher werden Kiesproben (für obere und untere ungebundene Tragschicht) aus dem bestehenden Straßenkörper entnommen, durch Bohrungen. Daran Sieblinienanalysen etc. zur Feststellung der Frostsicherheit, ist dies nicht gewährleistet werden die ungebundenen Tragschichten entnommen.</li> </ul>
Liegen Probleme bei der Bemessung vor?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Probleme teilweise in Bergstraßen und bei schwierigen örtlichen Gegebenheiten (z.B. Hangwasser) treten trotz Berücksichtigung der Richtlinienvorgaben und technischer Anpassung (z.B. Drainage) gelegentlich Probleme auf bezüglich Frost.</li> </ul>
Besteht das Interesse an einer neuen Richtlinie?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Örtliche Anpassung generell ein gutes Instrument.</li> </ul>

<b>Teilnehmer 2:</b> <b>Telefonat vom 26.02.2018</b>	
Welche Richtlinien werden verwendet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RVS 03.08.63. Dazu ergänzend ein landesspezifisches Merkblatt mit Schichtdickenangaben für Oberbautypen basierend auf Lastklassen und Schichtdicken der RVS. Genaue Schichtdickenangaben für die gebundenen Schichten, als auch Angaben bezüglich des Materials in Deck- und Binderschicht. Auch nähere Angaben zur Körnung der ungebundenen Tragschichten.</li> </ul>
Wie gehen sie vor, wenn verschiedene lokale Verhältnisse anzutreffen sind?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (siehe unten) auf der Grundlage von Bodenuntersuchungen, Sondierungen in einem gegebenen Raster, erfolgt die örtliche Anpassung. U.a. Erhöhte Entwässerungsvorkehrungen oder Bodenaustausch. Projektbezogene Anpassung.</li> </ul>
Erfolgt eine Abänderung der Schichtdicken (Gesamtdicke)? Wenn ja, auf welcher Grundlage?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abweichung bei den gebundenen Schichten (Merkblatt). Bei den ungebundenen grundsätzlich keine Abweichung, allerdings projektspezifisch möglich. Höhenlagenmäßige Anpassung der ungebundenen Schichten. (z.B. statt 50 cm ungebundene Dicke, Erhöhung auf 60 cm), basierend auf Erfahrung</li> </ul>
Werden Bodenuntersuchungen durchgeführt? Welche?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sondierungen (siehe lokale Verhältnisse), und alle gängigen bodentechnischen Analysen, durch Bodenprüfstelle in Oberösterreich.</li> </ul>
Liegen Probleme bei der Bemessung vor?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Erfahrung nach Probleme im Sanierungsfall, wenn beispielsweise die Entwässerungssituation „sträflicher Weise“ vernachlässigt wird in Bezug zur Frostsicherheit. Ansonsten als Anmerkung, oftmals weisen Asphaltdeckschichten nicht mehr dieselbe Lebensdauer auf wie früher Deckschichten. Grundsätzlich aber keine größeren Probleme mit der Oberbaubemessung.</li> </ul>
Besteht das Interesse an einer neuen Richtlinie?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ja. Genauere Festlegung gewünscht. Warum erhöht man die ungebundene Tragschichten, z.B. ab welcher Höhe (Frosteinwirkung). Oder bei welchen Bodenverhältnissen?</li> </ul>

<b>Teilnehmer 8: Schriftliche Antwort vom 03.04.18</b>	
Welche Richtlinien werden verwendet?	Die Dimensionierung des Oberbaus wird gemäß RVS 03.08.63 durchgeführt. Die ungebundenen Tragschichten werden gemäß RVS 08.15.01 ausgeführt.
Erfolgt eine Abänderung der Schichtdicken (Gesamtdicke)? Wenn ja, auf welcher Grundlage?	Eine Abänderung der RVS 03.08.63 ist nicht vorgesehen.
Werden Bodenuntersuchungen durchgeführt? Welche?	Die Tragfähigkeit und Korngrößenverteilung und Frostsicherheit der ungebundenen Tragschichten werden im Zuge von Baumaßnahme überprüft.
Wie gehen sie vor, wenn verschiedene lokale Verhältnisse anzutreffen sind?	Die Aufbauten sind gemäß RVS auszuführen. Ein lokaler Bodenaustausch kann erforderlich sein.
Liegen Probleme bei der Bemessung vor?	Bei Einhaltung der Vorgaben der RVS 08.03.63 liegen keine Probleme vor.
Besteht das Interesse an einer neuen Richtlinie?	Aus unserer Sicht ist die Bemessung gemäß RVS 03.08.63 ausreichend beschrieben.

<b>Teilnehmer 3: Schriftliche Antwort vom 02.04.18</b>	
Welche Richtlinien werden verwendet?	→RVS. Oberbaukatalog vorhanden. Vor allem zur Präzisierung der konkreten Asphaltmischgutauswahl und der Mindest-Qualitätsstufen der ungebundenen Tragschichten. Abstufungen der Qualitäten mit den Lastklassen. Angesichts der aktuell günstigen Preise wird die Asphaltmischgutqualität oft höher gewählt, als der landesspezifische Oberbaukatalog vorsieht.
Erfolgt eine Abänderung der Schichtdicken (Gesamtdicke)? Wenn ja, auf welcher Grundlage?	Nein, keine Abänderung der Schichtdicken.
Werden Bodenuntersuchungen durchgeführt? Welche?	Neubau: nur U-Planumswerte, dynamische Lastplatte.
Wie gehen sie vor, wenn verschiedene lokale Verhältnisse anzutreffen sind?	Die üblichen Anwendungsmethoden. Bodenauswechslung, Entwässerung, Stabilisierung, Geotextil, Verdichtung, je nach Erfordernis.
Liegen Probleme bei der Bemessung vor?	Nein.
Besteht das Interesse an einer neuen Richtlinie?	Nein.



