

Untersuchungen zum tatsächlichen Erfordernis frostbeständiger Straßenbaustoffe in Innerortsstraßen

FA AiF 13763 N

Forschungsstelle: Ruhr-Universität Bochum, Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau (Prof. Dr.-Ing. K. Krass)

Bearbeiter: Krass, K. / Brüggemann, M.

Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) / Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF), Köln

Abschluss: Oktober 2005

1. Aufgabenstellung

Die langfristige Nutzung der Straße hängt neben der Gewährleistung der Tragfähigkeit auch vom Kriterium der Frostsicherheit ab. Für eine Frostgefährdung des Straßenaufbaus müssen sowohl negative Temperaturen als auch Wasser gleichzeitig auftreten. Während das Auftreten von Wasser im Wesentlichen vom anstehenden Grundwasserstand sowie von der Kapillarität des Untergrundes abhängt, spielt bei der Ermittlung der Temperaturen im Straßenoberbau eine Vielzahl an Faktoren eine Rolle. Neben den Umgebungstemperaturen und den Witterungsbedingungen bzw. dem Klima muss auch der Temperaturhaushalt im Boden berücksichtigt werden. Letzterer wird zum einen durch die Leitfähigkeit und die Wärmekapazität des Baustoffes und zum anderen durch interne Wärmequellen in Form von Ver- und Entsorgungsleitungen beeinflusst.

Wesentliches Element für die Frostsicherheit ist die Frostschutzschicht, die eintretendes Wasser schnell abführen soll und gleichzeitig als Barriere gegen kapillar aufsteigendes Wasser dient. Darüber hinaus unterstützt die Frostschutzschicht die Tragfähigkeit der Straßenkonstruktion. In der Regel ist ein erheblicher Einsatz an hochwertigen Gesteinskörnungen für den frostsicheren Straßenoberbau notwendig, wobei bei den meisten Bauweisen ein beträchtlicher Teil auf die Frostschutzschicht entfällt. Zur Ressourcen- bzw. Umweltschonung muss nach Möglichkeiten gesucht werden, den Straßenaufbau in dieser Hinsicht so wirtschaftlich wie möglich auszuführen. In Deutschland wird die Dicke der Frostschutzschicht gemäß den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) [1] pauschal aufgrund von Erfahrungswerten errechnet. Sie ist abhängig von der Bauklasse und der Frostempfindlichkeitsklasse des Unterbaues/Untergrundes gemäß ZTV E-StB [2], wobei noch zusätzlich ein Zu- oder Abschlag je nach den örtlichen Verhältnissen zu berücksichtigen ist.

Für die Ermittlung der tatsächlichen Temperaturverhältnisse unter einer Straße in geschlossener Ortslage im Winter wurden mit Hilfe einer geeigneten Messmethodik die wahren Temperaturverhältnisse an zwei Straßenaufbauten in Bad Fredeburg (Hochsauerlandkreis) sowie in München für die Winter 2003/04 sowie 2004/05 ermittelt. Diese wurden mit einer Computerberechnung verglichen, um eine simulierte Darstellung mit den vorgefundenen Verhältnissen herzustellen. Mit den Ergebnissen können Empfehlungen für die RStO gegeben werden, um bei der Ermittlung der Dicke des Straßenaufbaus den Pauschalwert für den frostsicheren Straßenaufbau bei Stadtstraßen nach den RStO zu konkretisieren.

Das Vorhaben wurde aus Mitteln des BMWA im Rahmen der AiF-Forschung gefördert.

2. Untersuchungsmethodik

Für die Messung wurden aus der Frosteinwirkungszone III die L 776 in Bad Fredeburg (Hochsauerlandkreis) sowie die Tulbeckstraße in München ausgewählt. Hierbei handelt es sich um Straßen, die wasserundurchlässige Randbereiche und geschlossene seitliche Bebauung sowie Entwässerungseinrichtungen aufweisen. Der Straßenaufbau dieser zwei Straßen hat sich, wie in den Bildern 1 und 2 dargestellt, ergeben.

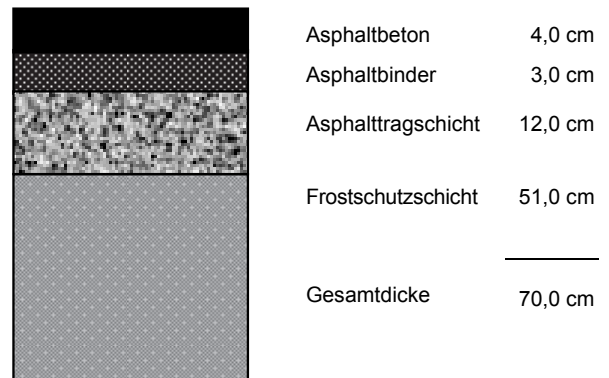


Bild 1: Aufbau des Straßenoberbaus der L 776 in Bad Fredeburg

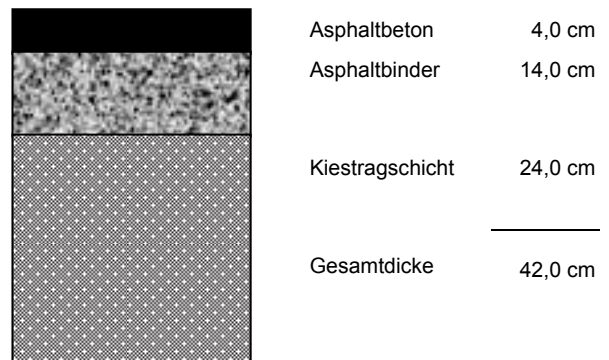


Bild 2: Aufbau des Straßenoberbaus der Tulbeckstraße in München

Der Untergrund in Bad Fredeburg ist felsig, während in München eine ca. 5 m mächtige Auffüllung aus Bauschutt ansteht.

Der Einbau der Temperatursensoren erfolgte anhand einer Bohrung gleichmäßig verteilt in den ungebundenen Schichten bis in den Untergrund jeweils für die Straßenmitte und die beiden Straßenränder. Für Bad Fredeburg wurden die Sensoren in den Tiefen 20, 45 und 70 cm eingebaut, in München betragen die Tiefen 20, 40 und 60 cm. Auf der untersten Ebene wurden zusätzlich Feuchtesensoren eingebaut, um einen eventuellen Feuchtezutritt zu messen. Gleichzeitig wurde an beiden Messstellen die Lufttemperatur aufgenommen. Das Schema der Anordnung der Sensoren ist aus Bild 3 ersichtlich. Die Daten wurden während der Winterperioden Dezember bis Mitte März im 2-Stundenrhythmus von einem Datenaufnahmegerät automatisch aufgezeichnet.

3. Untersuchungsergebnisse

Neben der Auswertung der Temperaturverhältnisse im Straßenaufbau wurden Schwerpunkte auf folgende Kriterien gelegt:

- Vergleich von ländlichen und urbanen Lufttemperaturen,
- Abbildung der Bodentemperaturen mittels Simulation,
- Beurteilung des Einflusses von Ver- und Entsorgungsleitungen,
- Simulation der Bodentemperaturen ausgewählter Städte.

Aufgrund der großen gesammelten Datenmenge werden im Weiteren nur beispielhafte Ergebnisse aufgeführt.

3.1 Auswertung der gemessenen Lufttemperaturen

Um die Temperaturunterschiede inner- und außerörtlicher Straßenquerschnitte abschätzen zu können, sind die eigenen Messwerte mit Lufttemperaturmessdaten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) von anliegenden Stationen verglichen worden. Für die Station München-Tulbeckstraße wurden zum einen Messwerte der Station München-Zentrum und zum anderen der Station München-Flughafen (Erdinger Moos) als Außerortsmessstelle herangezogen [3].

Die Beurteilung der Lufttemperaturen wird mit dem Frostindex FI ermittelt. Er wird über die Addition der mittleren Tageslufttemperaturen [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$] ermittelt, die als Temperatursummenkurve grafisch aufgetragen wird, wobei der FI hierbei jeweils dem Unterschied zwischen Maximum und Minimum der negativen Verlaufsphasen dieser Summenkurve entspricht [4]. In Bild 4 sind exemplarisch die errechneten Frostindizes der drei Münchener Stationen Tulbeckstraße, Zentrum sowie Flughafen für den Winter 2004/05 dargestellt. Danach gab es in diesem Zeitraum zwei stärkere Frostphasen, deren Frostindex, je nach Station, zwischen 50–91 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ bzw. 56–107 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ sehr stark variierte. Der erhebliche Unterschied der Frostindizes der Stationen München-Tulbeckstraße sowie München-Flughafen ist auf den urbanen Einfluss zurückzuführen, der in den nachfolgend genannten veränderten urbanen klimatischen Verhältnissen, aber auch in anthropogenen Wärmequellen zu sehen ist [5, 6, 7, 8, 9]:

- Wind- und Strahlungsbedingungen,
- Oberflächenabfluss,
- Wärmespeicherfähigkeit der Gebäude,
- Anreicherung der Luft mit Schadgasen und Aerosolen,
- Betrieb von Kraftfahrzeugen, Kraftwerken, Industrieanlagen und Gebäudeheizung.

Gerade die extremen Minustemperaturen werden durch die urbanen Bedingungen abgemildert. Die Abschwächung der hohen negativen Temperaturen im urbanen Raum wird bei der Betrachtung der Temperaturwerte über den Zeitraum 1. 12. 2004 bis 15. 3. 2005 aus Bild 5 ersichtlich. Hiernach werden Temperaturunterschiede zwischen der Station München-Tulbeckstraße und München-Flughafen von bis zu 8 K erreicht.

Aus Angaben über frühere Frostindizes und aus historischen monatlichen Temperaturdaten des DWD an der Station München-Flughafen gemäß Bild 6 ist ersichtlich, dass der Winter 2003/04 insgesamt vergleichsweise mild war, während der Winter 2004/05 zu einem der stärksten Winter der letzten zehn Jahre gehörte und somit die gemessenen Bodentemperaturen als repräsentativ angesehen werden können.

3.2 Auswertung der Messdaten der Bodensensoren

Bei der Auswertung der Bodensensoren wurde zum ersten der Einfluss der Lage der Sensoren im Straßenquerschnitt untersucht. Dabei konnte für den Querschnitt der L 776 in Bad Fre-

deburg nach Bild 7 kein signifikanter Unterschied bezüglich der Lage der Sensoren herausgestellt werden, im Gegensatz zum Querschnitt in München, für den die Ergebnisse in Bild 8 dargestellt sind. Hiernach liegt die Straßenmitte im Temperaturniveau insgesamt deutlich niedriger. Gründe hierfür sind zum einen die nachts geparkten Autos in den Seitenbereichen, die ein Abstrahlen der Wärme aus der Straße verhindern, und zum anderen die beidseitig im Gehwegbereich angeordneten Gasleitungen.

Die minimalen Tagestemperaturen in Abhängigkeit von der Tiefe sind exemplarisch für den Winter 2004/05 in Bild 9 für die L 776 und in Bild 10 für die Tulbeckstraße dargestellt. Insgesamt wurde in der Kälteperiode im Frühjahr 2005 bei der L 776 in 70 cm Tiefe kurzfristig die 0 $^{\circ}\text{C}$ -Grenze unterschritten. Der Straßenaufbau der Tulbeckstraße mit einer Dicke von 42 cm wurde in dieser Phase über einen längeren Zeitraum vollständig durchgefroren.

3.3 Auswertung der Simulation

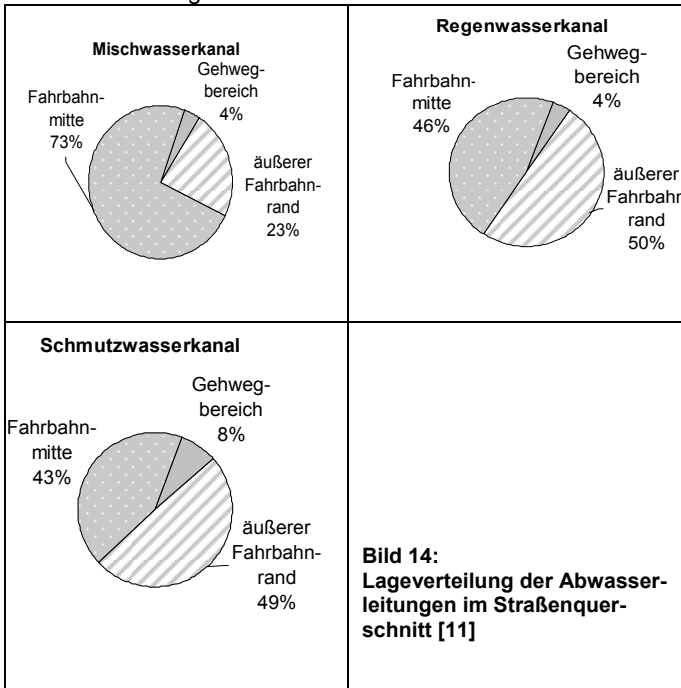
Die gemessenen Daten konnten anhand der Software HEAT2 mit einem Simulationsverfahren gut abgebildet werden [5]. In Bild 11 sind beispielhaft für die L 776 für den Zeitraum vom 1. 12. 2004 bis zum 31. 1. 2005 die 2-Stundenwerte der simulierten und gemessenen Werte in 20 cm Tiefe aufgetragen zusammen mit der gemessenen Lufttemperatur.

Insgesamt konnte mit einem Korrelationskoeffizienten von bis zu 90 % ein sehr guter Zusammenhang zwischen den simulierten und gemessenen Daten hergestellt werden (Bild 12). In München konnte diese Übereinstimmung phasenweise nicht erreicht werden. Die Abweichungen lassen sich auf folgende zwei Gründe zurückführen: Zum einen wurde die Tulbeckstraße im Winter nicht geräumt. Die Schneeschicht bedeutet für die Straße eine Dämmschicht, die die Frosteindringung behinderte. Zum anderen wurde in der Auffüllung ein permanenter hoher Wassergehalt gemessen. Dieser Wassergehalt setzt beim Phasenübergang von Wasser zu Eis Wärme frei. Zusätzlich wird die Wärmekapazität des Mediums verändert, was von der Software HEAT2 nicht berücksichtigt werden kann.

Für die Simulation wurden neben den klimatischen Bedingungen auch die unterirdischen Leitungen berücksichtigt. Um eine gute Übereinstimmung der simulierten Werte mit den gemessenen zu bekommen, muss für die L 776 in Bad Fredeburg die zentral unter der Straße liegende Abwasserleitung berücksichtigt werden. Die Leitung liegt 3 m unter der Oberfläche und weist einen Durchmesser von 1000 mm auf. Bei einer geschätzten Rohrintemperatur von 12 $^{\circ}\text{C}$ kann gemäß Bild 13 ein erheblicher Einfluss der Abwasserleitung in 70 cm Tiefe für den Winter 2003/04 festgestellt werden. Für den Querschnitt in München konnte durch die Abwasserleitung in 5 m Tiefe mit einem Durchmesser DN 300 kein Einfluss auf die Frosteindringung nachgewiesen werden. Die Gasleitungen in ca. 1 m Tiefe in beiden Gehwegbereichen zeigen bei einer angenommenen Temperatur von 7 $^{\circ}\text{C}$ lediglich einen Einfluss auf die Temperaturverteilung in den Seitenbereichen der Straße.

Für eine Abschätzung, in welchem Masse die Leitungen in deutschen Kommunalstraßen positive Auswirkungen auf die Temperaturverteilung im Winter haben, wurden in einer Umfrage Informationen über den innerstädtischen Leitungsbestand erfasst. Hierfür wurden Umfragebögen an 178 Städte mit jeweils über 70 000 Einwohnern in Deutschland bzw. deren Ver- und Entsorgerunternehmen versendet. Insgesamt wurden bei den Antworten zum Bereich Abwasser 40 % der Straßen der angeschriebenen Städte erfasst. Die Daten über die Versorgerleitungen liegen dagegen von durchschnittlich 18 % der angeschriebenen Städte vor.

Laut Umfrage ist bei den Abwasserleitungen das Mischsystem mit 72 % das hauptsächlich genutzte System. Die Leitungen liegen größtenteils unter der Straßenfläche. Die sich aus der Umfrage ergebenden Lagen sind getrennt nach den Leitungsarten in Bild 14 dargestellt.



Dabei sind aus den Umfragedaten nachfolgende mittlere Überdeckungshöhen errechnet worden:

- Mischwasserkanal: 2,97 m,
- Regenwasserkanal: 2,36 m,
- Schmutzwasserkanal: 2,83 m.

Die Wahl der in der Kanalisation verwendeten Baustoffe ist in Bild 15 dargestellt. Steinzeug ist wegen seiner hohen Resistenz gegenüber chemischen Angriffen in Schmutzwasserkanälen stark vertreten (71,7 %). Bei größeren Querschnitten in der Mischkanalisation kommen verstärkt Betonfertigteile zum Einsatz.

Die Nennweitenverteilung für Misch-, Regen-, und Schmutzwasserkanäle zeigt Bild 16. Die Mehrheit der Leitungen mit rd. 75 % bestehen hiernach aus Nennweiten kleiner DN 650.

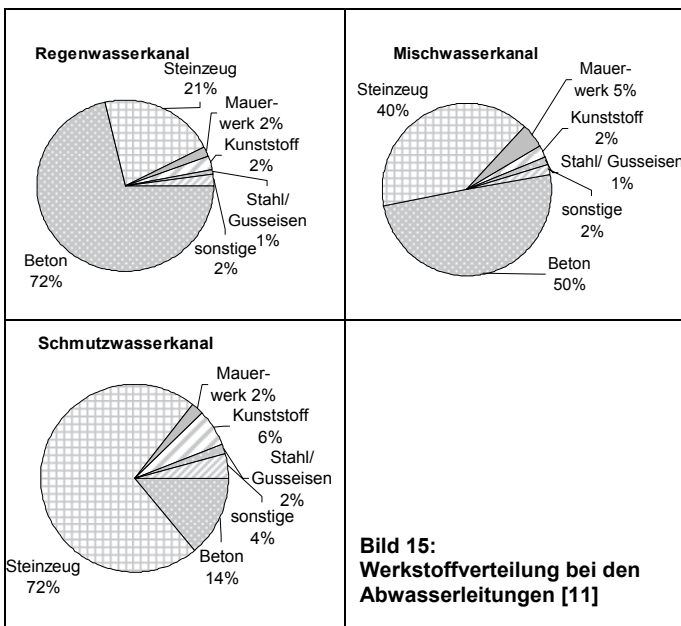


Bild 15: Werkstoffverteilung bei den Abwasserleitungen [11]

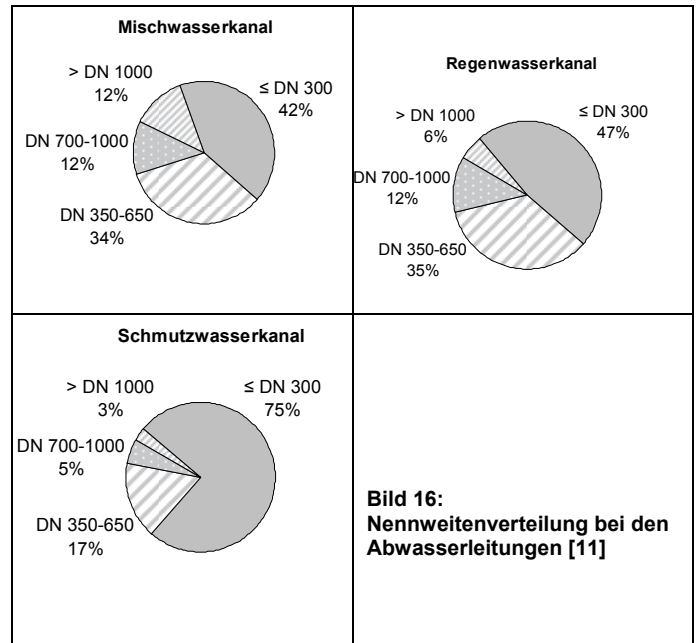


Bild 16: Nennweitenverteilung bei den Abwasserleitungen [11]

Die am häufigsten vertretene Querschnittsform stellt der Kreisquerschnitt mit rd. 80 % bei Mischwasserkanälen, rd. 93 % bei Regenwasserkanälen und rd. 92 % bei Schmutzwasserkanälen dar.

Die Temperaturen innerhalb der Leitungen beruhen überwiegend auf Schätzungen. Laut Umfrage beträgt die Schmutzwassertemperatur im Durchschnitt 13 °C und sinkt durch den abkühlenden Effekt des winterlichen Niederschlagswasser im Mischkanal auf 12 °C ab. Die reine Regenwassertemperatur liegt bei gemittelten 8 °C. Abwassereinleitungen aus Industriebetrieben (Wäscherei, Brauerei, Papierfabrik usw.) lassen die oben ermittelten Werte bis auf das Dreifache ansteigen.

Die Erdgasleitungen liegen zu rd. 45 % im Fahrbahnbereich und weisen zu rd. 50 % Nennweiten mit ≤ DN 125 sowie zu rd. 46 % Nennweiten zwischen DN 150 bis 300 auf. Metallische Rohrleitungen aus Stahl und Gusseisen mit einer Ummantelungsschicht aus Kunststoff (PE oder PVC) sind mit 66 % die hauptsächlich eingesetzten Materialien. Die Temperaturen an technischen Einrichtungen wie den Übergabestationen oder Gasdruckregelanlagen schwanken dort im Winter zwischen 6 und 15 °C. Ansonsten wurde in den einzelnen Umfragebögen hinsichtlich der Gastemperatur oft auf die Bodentemperatur verwiesen.

Die Trinkwasserleitungen liegen mit 66 % größtenteils im Gehwegbereich. Dabei werden rd. 80 % der Leitungen mit Rohrquerschnitten < DN 200 eingesetzt. Die durchschnittliche Tiefe hat sich zu 1,27 m ergeben. Die eingesetzten Werkstoffe für die Trinkwasserleitungen sind neben Gusseisen (62 %) die Kunststoffe (20 %). Der in dieser Umfrage gemittelte Wert von 8 °C ergibt sich aus vereinzelt Messungen in örtlichen Wasserwerken oder Schätzungen.

Die Fernwärmeleitungen werden hauptsächlich nach dem Mantelrohrverfahren (56 %) und dem Kanalrohrverfahren (38 %) verlegt. Mantelrohrsysteme bestehen grundsätzlich aus getrennter Hin- und Rückleitung aus Stahl in einem jeweils gedämmten umhüllenden Stahl- oder Kunststoffmantelrohr, während beim Kanalrohrverfahren die Hin- und Rückleitung zusammen in einem Beton- oder Stahlkanal verlegt werden. Die Rohre werden laut Umfrage zu 98,5 % mit Mineraldämmstoffen isoliert. In der Umfrage wurde sowohl bei den Mantelrohren als auch bei der Verlegung in Kanälen eine durchschnittliche Überdeckungshöhe von ca. 1,10 m ermittelt. Die Lage im Straßenquerschnitt liegt für das Mantelrohr- und das Kanalrohrverfah-

ren zu rd. 75 bzw. 80 % im Fahrbahnbereich. Beim Mantelrohrverfahren werden Nennweiten bis DN 450 verwendet, während im Kanalrohrverfahren auch noch in 12 % der Anwendung Nennweiten größer DN 450 verwendet wurden. Laut Umfrage beträgt das in den Mantelrohren durchflossene Heißwasser im Vorlauf durchschnittlich 103 °C, Temperaturen des zurücklaufenden Wassers liegen bei ca. 64 °C.

Extreme Unterschiede sind für das Transportmedium Wasserdampf in Kanalrohrsystemen zu beobachten. Mit 215 °C strömt der Dampf zum Verbraucher und erkaltet auf ca. 73 °C (Bild 17).

3.4 Messwerte aus anderen Frosteinwirkungszonen

Um einen Vergleich der Frosteindringung mit anderen Orten herzustellen, wurden anhand des Straßenquerschnittes der Tulbeckstraße der Winter 2004/05 mit anderen Städten simuliert. Die hierfür notwendigen Daten der anliegenden Lufttemperatur und der klimatischen Randbedingungen, wie Strahlungs- und Windgeschwindigkeitswerte, wurden wiederum vom DWD bezogen [3]. Vergleichende Daten über den maximal gemessenen Frostindex sowie die minimale Tagestemperatur sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Maximaler Frostindex und minimale Temperaturwerte für verschiedene Standorte im Winter 2004/05

Messstation	Frosteinwirkungszone gem. RStO	Frostindex W04/05	Minimale Tagestemperatur
		[°Cd]	[°C]
Hamburg	I	22	-12
Köln	I	22	-11
Wiesbaden	I	25	-9,5
Berlin	II	35	-11
Nürnberg-Flughafen	II	80	-16
Bad Fredeburg	III	75	-14
München	III	56	-13
München-Flughafen	III	107	-24

Auffällig ist hierbei der höhere Frostindex vom Nürnberger Flughafen gegenüber der Münchener Tulbeckstraße. Der Grad der Urbanität scheint einen erheblichen Einfluss auf die Temperatureinwirkung auszuüben, sodass eine Einteilung in die Frosteinwirkungszonen, wie in den RStO bisher gehandhabt, nicht ausreichend erscheint.

Beispielhaft sind in Bild 18 für den Zeitraum vom 1. 2.–15. 3. 05 die simulierten Temperaturwerte aus Köln-Wahn für die Tiefen 20, 40 und 60 cm in der Straßenmitte dargestellt. Die maximale Frosteindringung in Winter 2004/05 ergibt sich hiernach zu knapp über 40 cm.

4. Folgerungen für die Praxis

Die Fragestellung, inwieweit Innerortsstraßen Maßnahmen zur Frostsicherheit benötigen, lässt sich nicht eindeutig beantworten. Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes gemessenen Daten lassen sich nicht ohne weiteres verallgemeinern. Die Straßen der Messstellen weisen eine individuelle Bebauung sowie Leitungslagen auf, die einen erheblichen Einfluss auf die Frosteindringung ausüben können. Die maximal gemessenen Frosteindringungen für die Messstellen in Bad Fredeburg und München lagen beide in der Winterperiode 2004/05 bei rd. 70 cm. Diese Werte können trotz des begrenzten Messzeitraums als für die Zukunft repräsentativ angesehen werden, da aus historischen Messreihen der Winter 2004/05 als vergleichsweise streng anzusehen ist.

Neben der gegenüber dem Umland verringerten Frosteindringung ist auch das für Frostschäden notwendige Vorhandensein von ausreichendem Wasser in der Frostzone unwahrscheinlicher. Das oberflächlich abgeführte Wasser und die vielfach günstigen Wasserverhältnisse wirken sich dementsprechend positiv auf die Frostgefährdung aus.

Der "Wärmeineleffekt" durch die Urbanisierung muss differenziert betrachtet werden. Die extremen Minustemperaturen werden abgedämpft, und auch der Frostindex ist weitaus geringer, was auf die erhöhten Temperaturen innerorts zurückzuführen ist. Dabei ist das erhöhte Temperaturniveau stark abhängig vom Grad der dichten Bebauung. Bereits eine angrenzende größere Grünanlage kann diesen Effekt abmildern.

Der Einfluss der Leitungen muss auch einzelfallspezifisch untersucht und beurteilt werden. Wasser-, Gasleitungen sowie Stromkabel liegen vielfach im Gehwegbereich und wirken i. d. R. nur bis in die Randbereiche der Straße. Die Fernwärme- und die Abwasserleitungen liegen größtenteils im Fahrbahnbereich und beeinflussen die Frosteindringung der Straße am stärksten.

Die Frosteindringung hängt nicht nur von den äußeren Witterungsverhältnissen ab. Eine – wenn auch – untergeordnete Rolle spielt die Wahl der Baustoffe. Recycling-Baustoffe mit porenhaltigen Bestandteilen weisen aufgrund ihres vielfach höheren Wassergehaltes eine langsamere Frosteindringung auf.

Für eine straßenspezifische Bestimmung der Frosteindringtiefe sind aus diesem Grund simulierte computerunterstützte Berechnungen notwendig. Insgesamt lässt sich über eine rechnerische Ermittlung der Frosteindringtiefe eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Daten erreichen, allerdings ist hierfür ein erhöhter Aufwand notwendig. Das in diesem Forschungsvorhaben angewendete Programm HEAT2 ergab gute Übereinstimmungen mit den realen Messdaten, allerdings muss bezweifelt werden, ob es für eine generelle Anwendung geeignet ist. Die bodenspezifischen Eigenschaften werden von diesem Programm nur bedingt einbezogen. Gerade im Bereich des Phasenüberganges von im Boden befindlichen Wassers treten Effekte auf, die die Frosteindringung hemmen bzw. die Auftauphase verlängern. Auch die durch Temperaturschwankungen veränderten Kennwerte der Leitfähigkeit und Wärmekapazität werden nicht durch dieses Programm beachtet.

Für eine Verbesserung der Übereinstimmung von Simulation mit Messdaten müssen dementsprechend weitere Parameter wie der Wassergehalt der Schicht berücksichtigt werden. Hierzu müsste eine Software entwickelt werden, mit der der Anwender mit einfachen Mitteln eine Prüfung durchführen kann, ob bzw. in welcher Tiefe eine Innerortsstraße im Winter als frostsicher anzusehen ist.

Literaturverzeichnis

- [1] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO), Ausgabe 2001, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2001
- [2] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB), Ausgabe 1994, Fassung 1997, Köln, 1997
- [3] Deutscher Wetterdienst DWD, [http://www.dwd.de], 2005
- [4] Arbeitsausschuss Frost: Entstehung und Verhütung von Frostschäden an Straßen, Schriftenreihe der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Heft 105, Kirschbaum Verlag, Bonn, 1994
- [5] Kuttler, W.: Stadtklima Teil 1: Grundzüge und Ursachen, Beitragsreihe: Klimaänderung und Klimaschutz, Hrsg.: Prof. Dr. Detlev Möller, Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus, [http://www.luft.tu-cottbus.de], 2002

- [6] Friedrich, M.: Die raumzeitliche Differenzierung der thermischen Bedingungen des Menschen im Klima der Stadt, Dissertation an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Universitätsbibliothek Freiburg, [http://www.freidok.uni-freiburg.de], 2000
- [7] Innenministerium Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit dem Amt für Umweltschutz Stuttgart: Städtebauliche Klimafibel Online, [http://www.staedtebauliche-klimafibel.de], 2005
- [8] Hupfer, P; Kuttler, W. (Hrsg.): Witterung und Klima, begründet von E. Heyer, B. G. Teubner Stuttgart/Leipzig, 1998
- [9] Oke, T. R.: Boundary layer climates, University press, Cambridge, 1987
- [10] Blomberg, T.: HEAT2 - PC-Programm für zweidimensionalen Wärmedurchgang - Handbuch mit Einführung in die theoretischen Grundlagen und Beispielen, Version 5.0, Lund University – Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [11] Szybalski, H.: Beschreibung und Beurteilung der Einflüsse von Leitungen unter Innerortsstraßen auf die winterlichen Untergrundtemperaturen, Diplomarbeit am Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum, 2005, unveröffentlicht

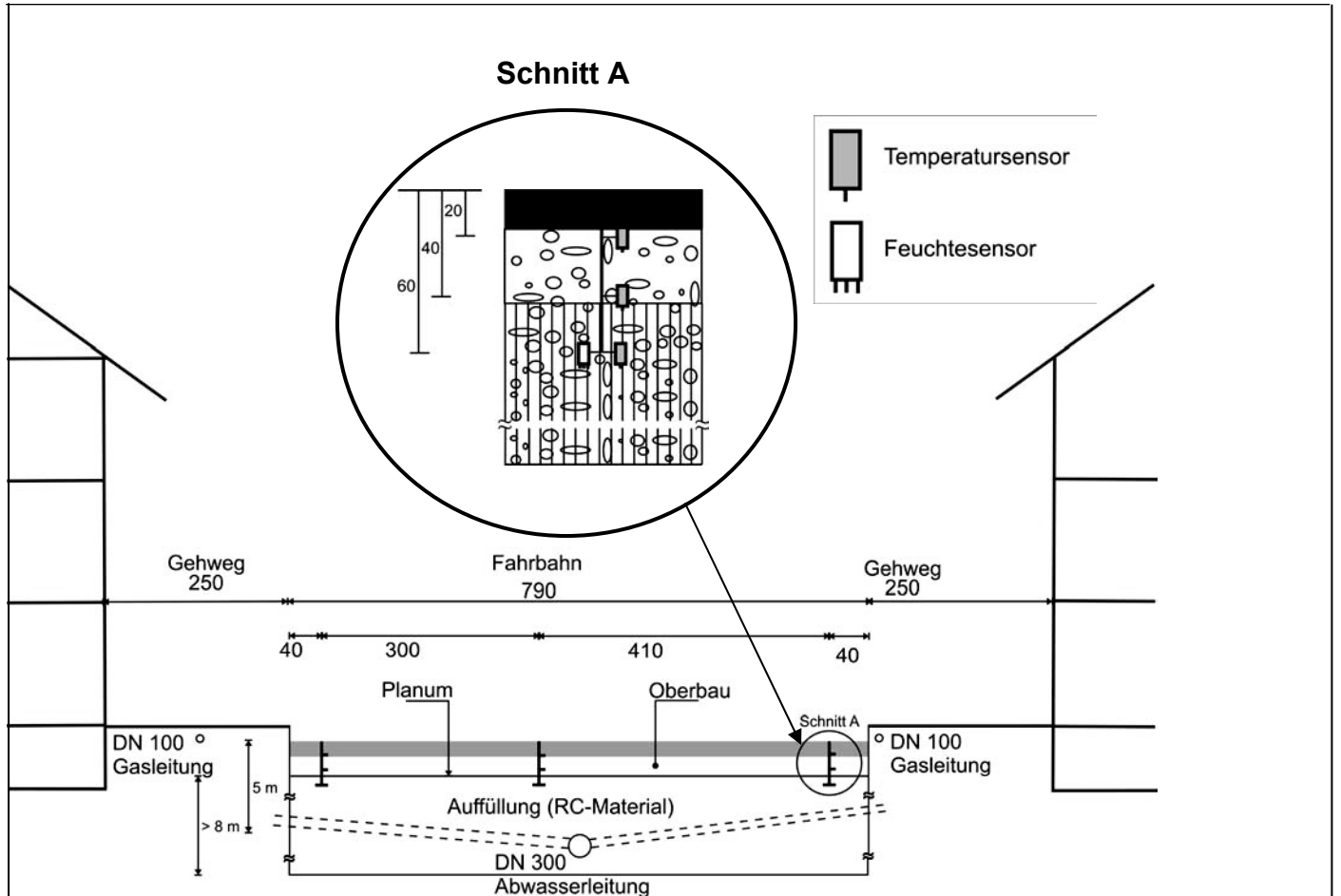


Bild 3: Schematische Verteilung der Sensoren im Straßenquerschnitt am Beispiel der Tulbeckstraße in München

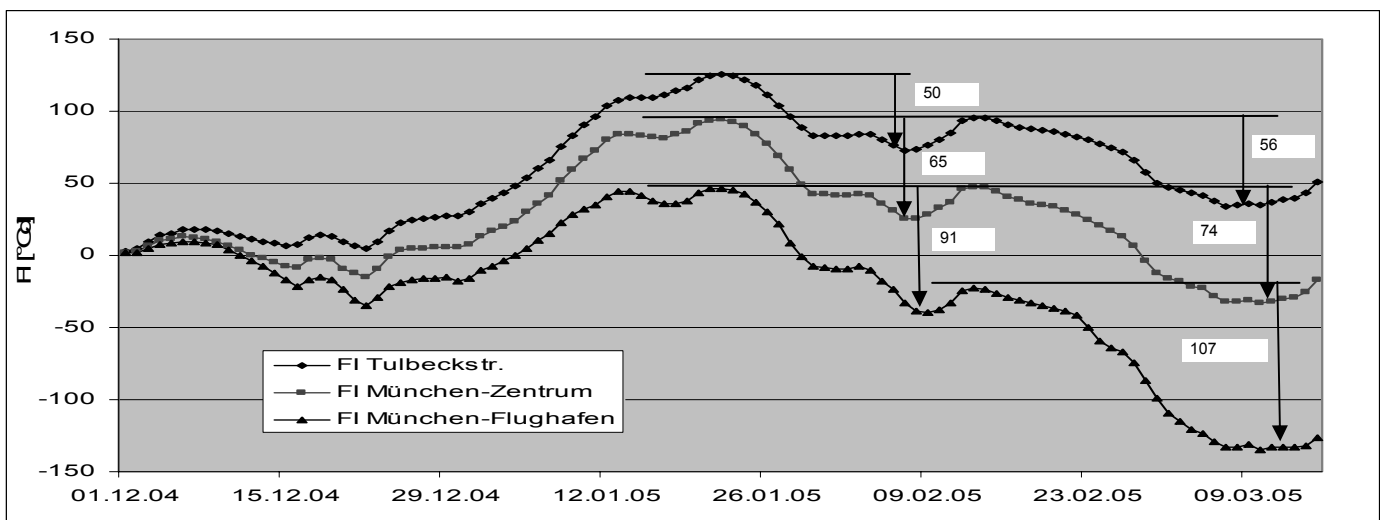


Bild 4: Frostindex (FI) für den Winter 2004/05 vom 01.12.04–15.03.05 in München

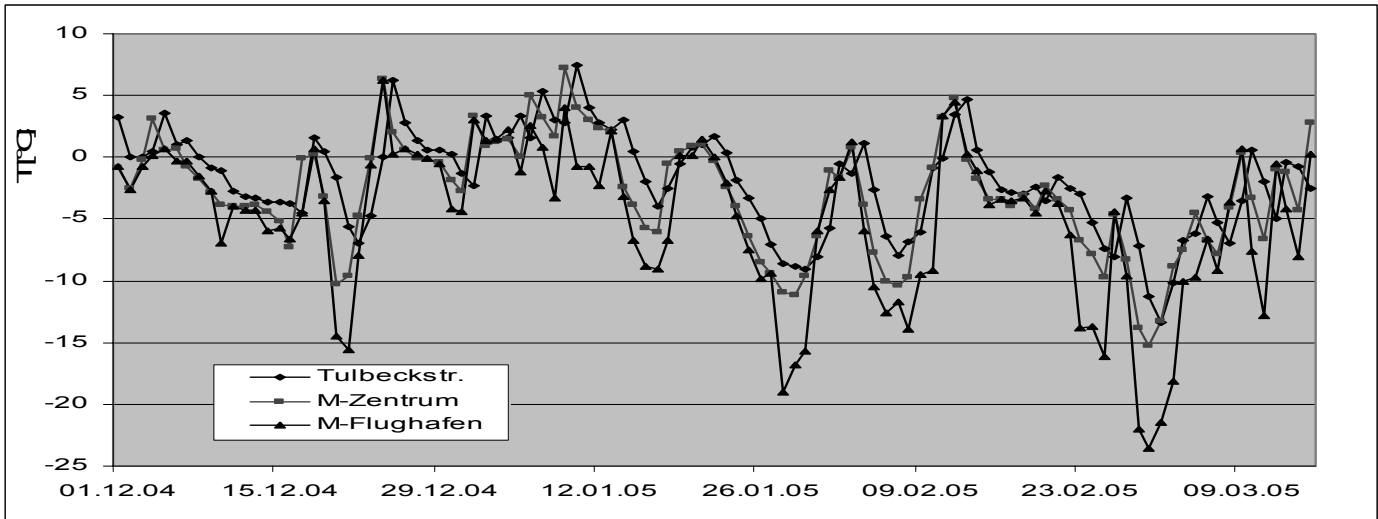


Bild 5: Minimale tägliche Lufttemperatur in München im Winter 2004/05 vom 01.12.04–15.03.05

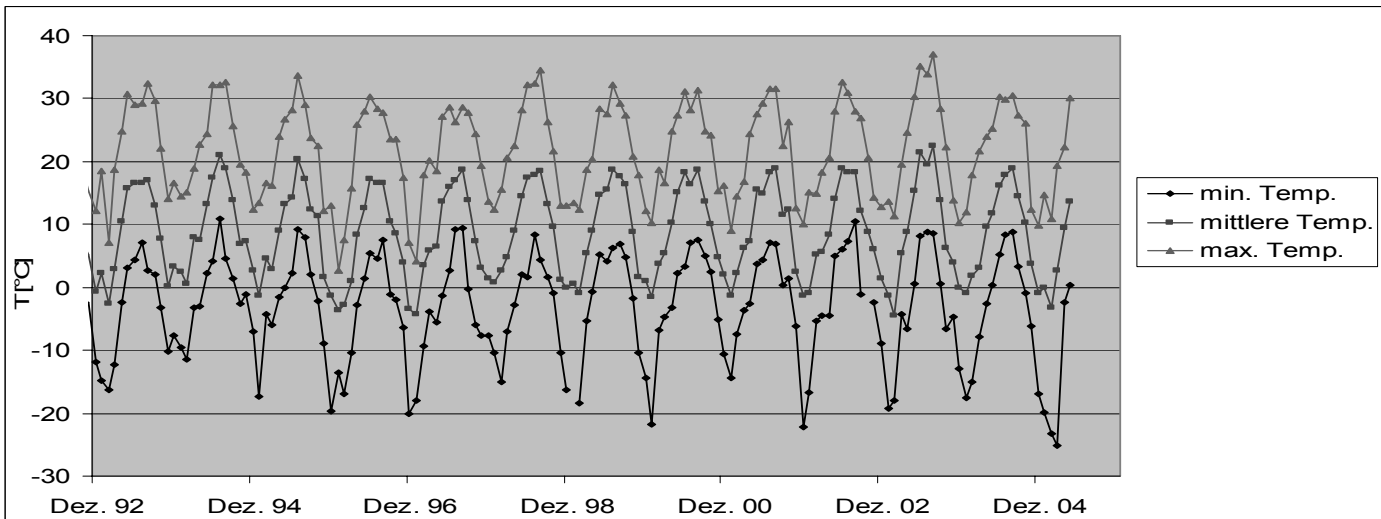


Bild 6: Mittlere, minimale und maximale monatliche Lufttemperatur in München vom Dezember 1992–Mai 2005 [3]

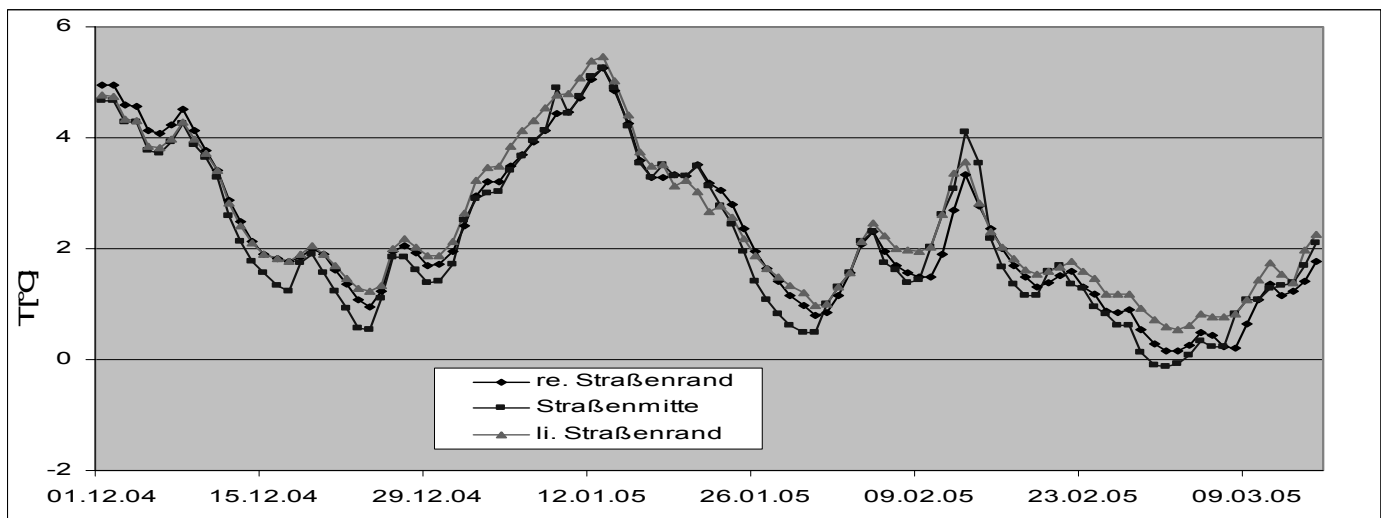


Bild 7: Minimal gemessene tägliche Temperaturen im Straßenoberbauquerschnitt der L 776 in 70 cm Tiefe für den Winter 2004/05 vom 01.12.04–15.03.05

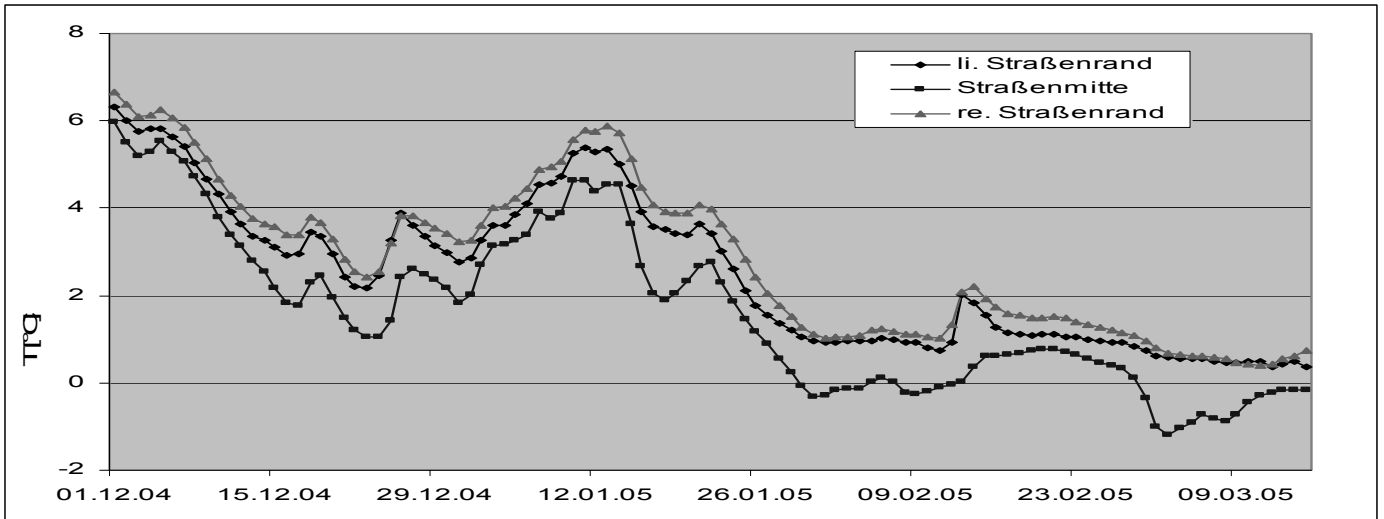


Bild 8: Minimal gemessene tägliche Temperaturen im Straßenoberbauquerschnitt der Tulbeckstraße in 60 cm Tiefe für den Winter 2004/05 vom 01.12.04–15.03.05

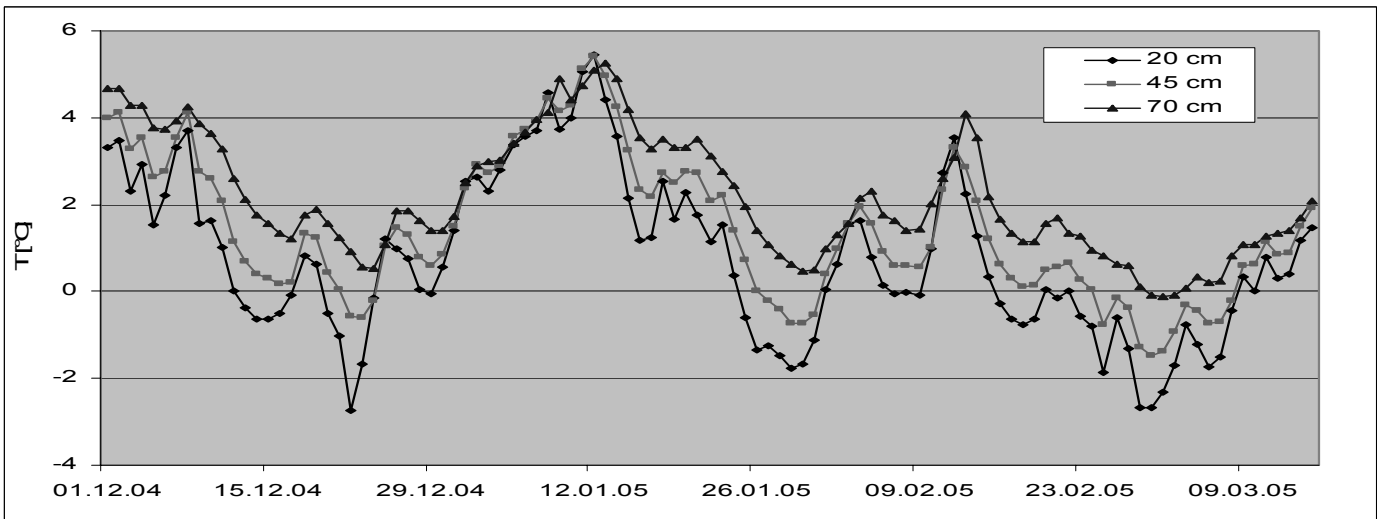


Bild 9: Minimal gemessene tägliche Temperaturen in der Straßenmitte der L 776 in Bad Fredeburg für verschiedene Tiefen für den Winter 2004/05 vom 01.12.04–15.03.05

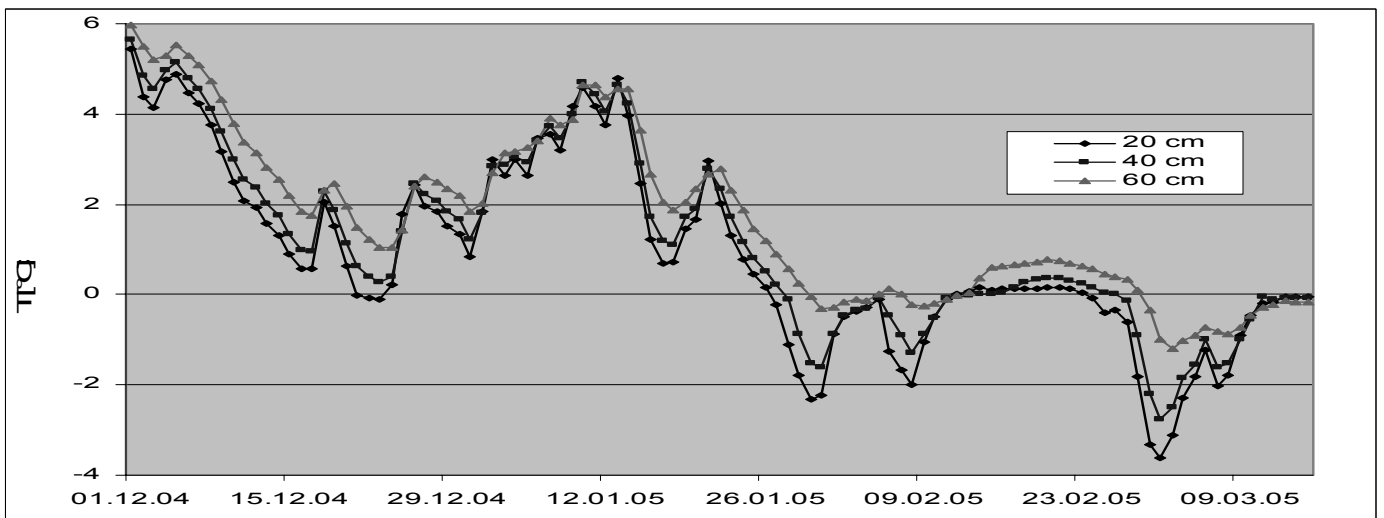


Bild 10: Temperaturverläufe im Straßenoberbau der Tulbeckstraße in München für verschiedene Tiefen in der Straßenmitte für den Winter 2004/05 vom 01.12.04–15.03.05

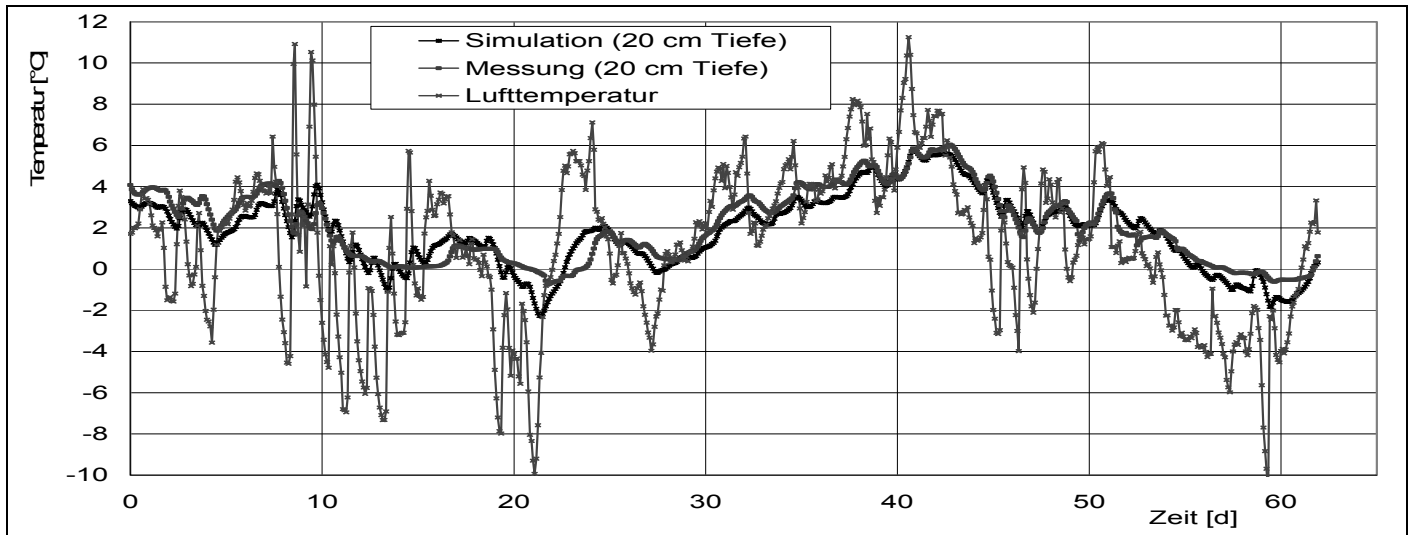


Bild 11: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen zweistündigen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.12.04–31.01.05 in 20 cm Tiefe

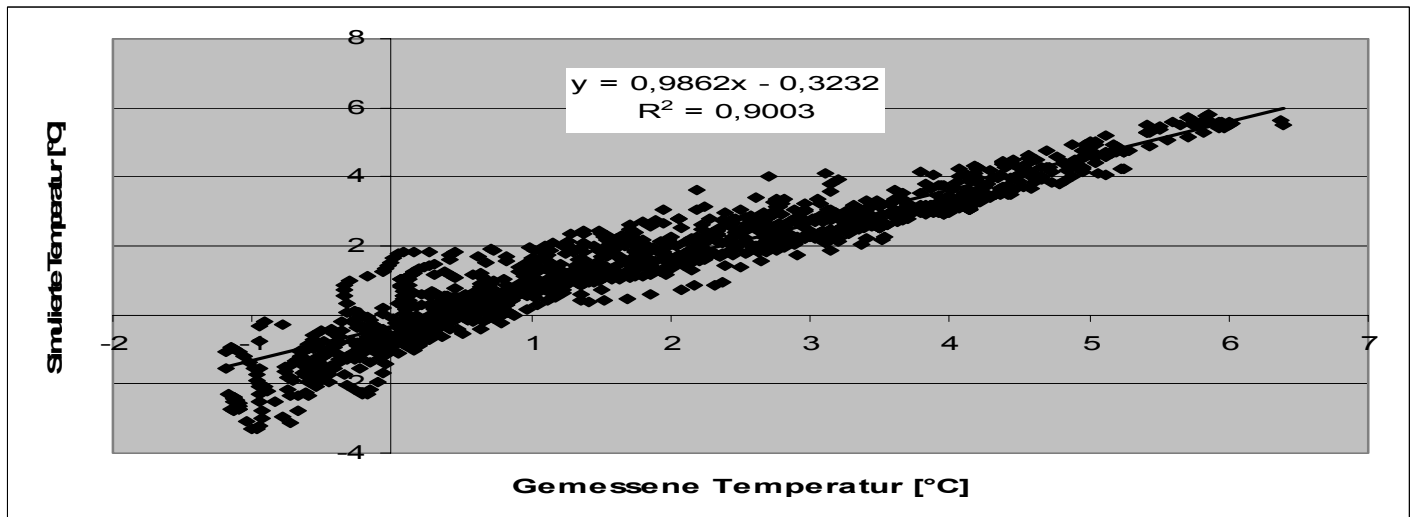


Bild 12: Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2004/05 vom 01.12.04–15.03.05 in der Tiefe von 20 cm

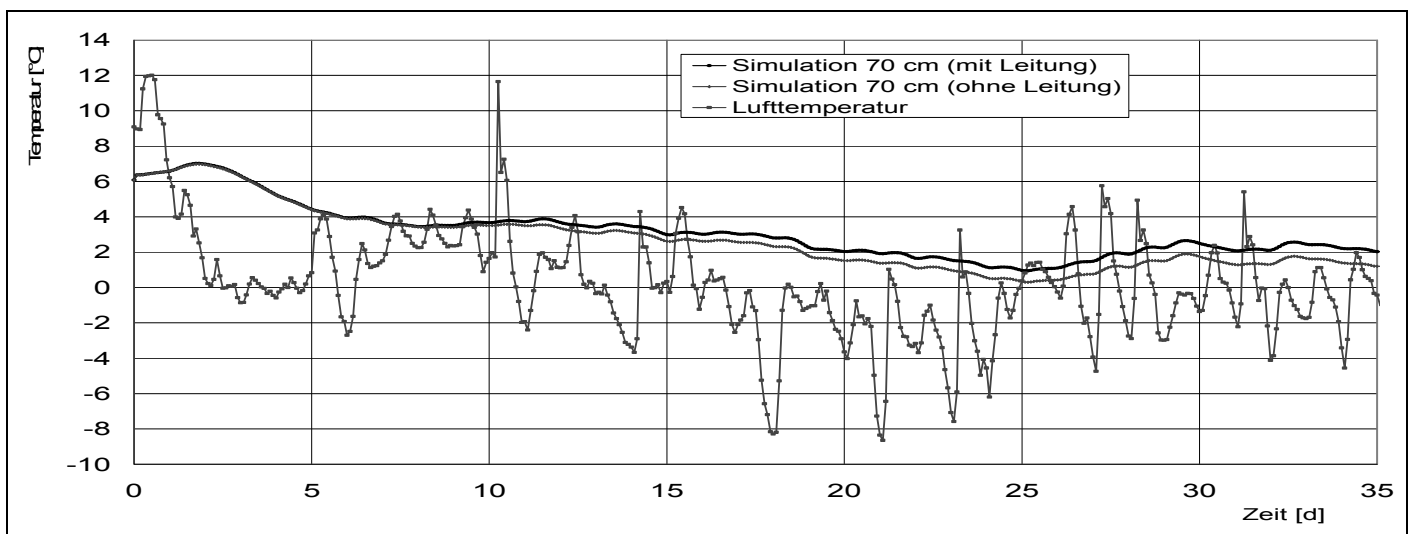


Bild 13: Bad Fredeburg mit bzw. ohne Ansatz der Abwasserleitung im Winter 2003/04 vom 06.02.04–15.03.04 in 70 cm Tiefe

((Bilder 14–16 auf Seite 4-59))

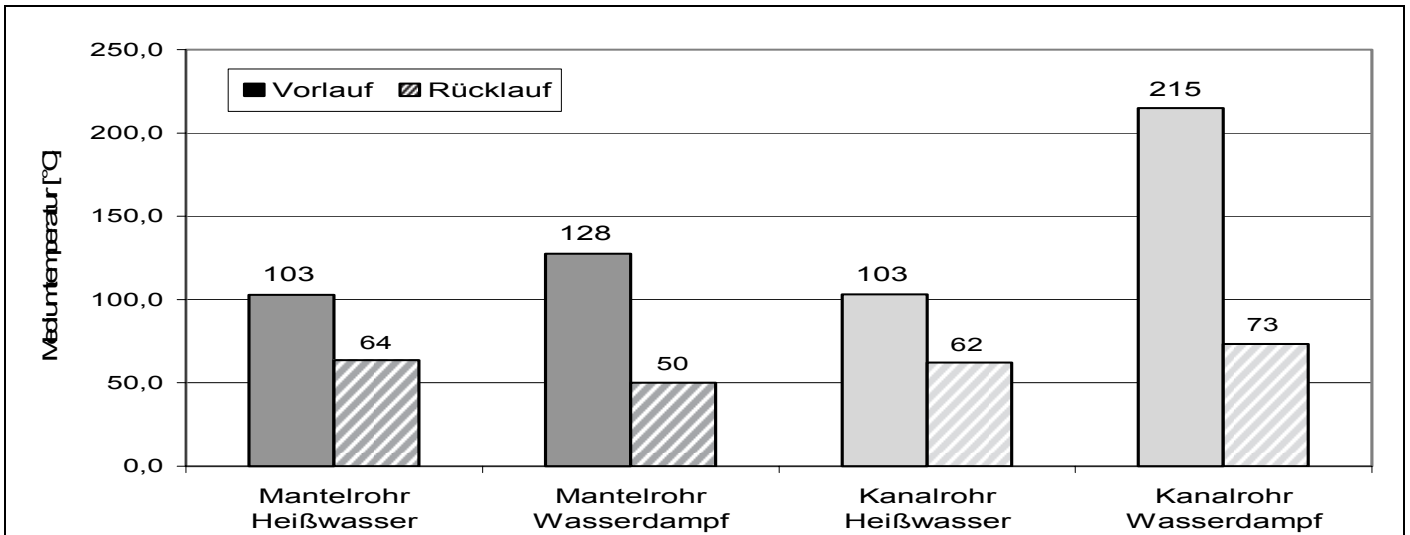


Bild 17: Temperaturen von Fernwärmeleitungen nach Einbauverfahren und Rohrmedium [11]

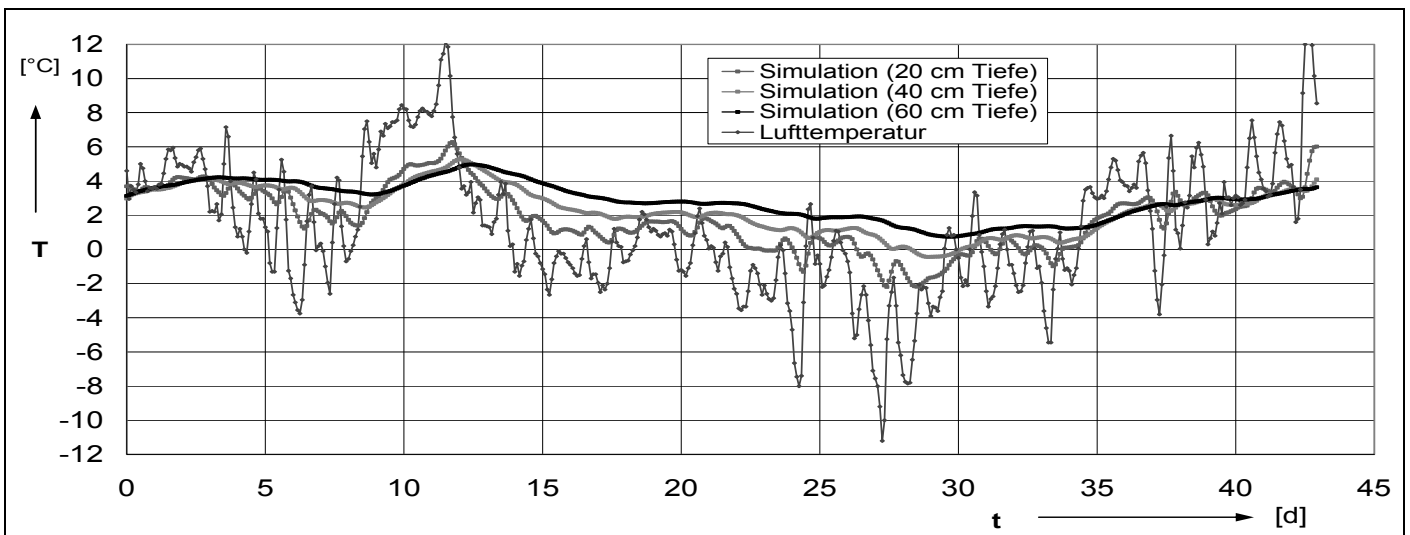


Bild 18: Simulation der Temperaturwerte in 20, 40 und 60 cm Tiefe für Köln-Wahn vom 01.02.05–15.03.05

