

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bauingenieurwesen
Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau

Untersuchungen zum tatsächlichen Erfordernis frostbeständiger
Straßenbaustoffe in Innerortsstraße
-Schlussbericht –

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Krass

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing (FH) Michael Brüggemann

Auftraggeber:

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V.
(AiF)

AiF-Vorhaben Nr. 13763 N/1

Dieses Vorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
über die AiF gefördert.

Bochum, im Oktober 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	2
2.1	Frosteinwirkung im Straßenkörper	2
2.2	Temperaturverteilung im Straßenaufbau.....	10
2.2.1	Temperaturhaushalt im Boden	10
2.2.2	Klima	12
2.2.2.1	Strahlungseinfluss	13
2.2.2.2	Massenaustausch	16
2.2.3	Überschlägige Berechnungsmöglichkeiten der Frosteindringung	17
2.2.4	Wärmeleitungsgleichung	18
2.2.5	Differenzenverfahren/ Numerische Formulierung.....	20
2.2.6	Unterschied urbanes und ländliches Klima	22
2.2.7	Einsatz von Recycling-Baustoffen	26
2.2.8	Leitungen	30
2.2.9	Leitungslage	31
3	Beschreibung der experimentellen Untersuchungen	33
3.1	Vorbereitung/ Auswahl der Messmethodik	33
3.2	Temperatursensoren	34
3.3	Feuchtemessung.....	34
3.4	Einbau der Messsensoren.....	35
4	Beurteilung der Lufttemperaturen	43
4.1	Definition des Frostindex.....	43
4.2	Lufttemperaturwerte in München.....	44
4.3	Lufttemperaturwerte in Bad Fredeburg.....	47
4.4	Bewertung der Messungen der Lufttemperatur	50
5	Auswertung der Messdaten der Messsensoren in der Straße	51
5.1	L776 in Bad Fredeburg.....	51
5.2	Tulbeckstraße in München	54
6	Auswertung der Simulation	57
6.1	Auswahl der Software	57
6.2	Eingabeparameter für die Simulation	57
6.2.1	Anfangs- und Randbedingungen.....	58
6.2.2	Elementrierung.....	59
6.2.3	Meteorologische Randbedingung.....	59

6.2.4	Einfluss durch Verkehr	62
6.2.5	Materialkennwerte	62
6.3	Sensitivitätsanalyse.....	63
6.4	Vergleich der Messung mit der Simulationsberechnung	68
6.4.1	Bad Fredeburg	68
6.4.2	München	77
7	Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Frosteindringung.....	87
7.1	Leitungen	87
7.1.1	Einfluss der Leitungen auf die Frosteindringung	87
7.1.2	Auswertung der Umfrage über die Leitungssituation in Deutschland ...	88
7.2	Einfluss der Baustoffe	93
7.3	Simulation eines strengen Winters.....	94
8	Messwerte aus anderen Frosteinwirkungszonen.....	97
8.1	Allgemeines.....	97
8.2	Städte Hamburg/Quickborn.....	97
8.3	Städte Köln/Bonn	100
8.4	Städte Berlin/ Potsdam.....	102
8.5	Städte Nürnberg/ Roth	104
8.6	Unterscheidung der urbanen und ländlichen Lage der Straße bezüglich der Frosteindringung	107
9	Ausblick	109
10	Zusammenfassung.....	110
11	Literaturverzeichnis	113

Anhang 1:

Umfragebögen zur bundesweiten Datenerhebung von Ver- und Entsorgungsleitungen

Anhang 2:

Lagepläne der Messstationen Darmstadt, Wiesbaden und Riedstadt [70]

Anlage

CD mit den gemessenen Temperatur- und Feuchtedaten der Messstationen der L776 in Bad Fredeburg und der Tulbeckstraße in München für die Winter 2003/04 sowie 2004/05

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Einteilung der Frostempfindlichkeit der Böden nach DIN 18196	6
Tabelle 2-2:	Ausgangswerte für die Bestimmung der Mindestdicke des frostsicheren Straßenaufbaus gemäß RStO [1]	7
Tabelle 2-3:	Mehr- oder Minderdicken infolge örtlicher Verhältnisse gemäß den RStO [1]	8
Tabelle 2-4:	Einteilung der Frosteinwirkungszonen nach gemessenem Frostindex FI [14]	8
Tabelle 2-5:	Kurz- und langwellige Albedowerte von verschiedenen Oberflächen.	14
Tabelle 2-6:	Abhängigkeit der Albedowerte von Alter und Oberflächenzustand der Straße [21] [22]	14
Tabelle 2-7:	Verändertes Stadtklima einer Großstadt in den mittleren Breiten gegenüber nicht bebautem Umland [36]	23
Tabelle 2-8:	Unterschiede der Strahlungseinflüsse in bebauter und unbebauter Umgebung in Abhängigkeit vom Sonnenstand [40]	24
Tabelle 2-9:	Auflistung von view-factor Werten für verschiedene geometrische Verhältnisse [41]	26
Tabelle 2-10:	Verminderung der langwelligen Abstrahlung durch Bebauung in %...	26
Tabelle 2-11:	Energieströme durch anthropogene Wärmequellen im Vergleich zur natürlichen Strahlungsbilanz in verschiedenen Städten [40]	27
Tabelle 2-12:	Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen [3]	29
Tabelle 2-13:	Rohrwerkstoffe und Durchmesser unterschiedlicher Leitungsarten ...	31
Tabelle 2-14:	Zoneneinteilung nach DIN 1998 [49]	32
Tabelle 3-1:	Kenndaten der beiden Stationen in München und Bad Fredeburg.....	36
Tabelle 3-2:	Kennwerte der Leitungen der L776 in Bad Fredeburg und der Tulbeckstraße in München	41
Tabelle 4-1:	Geographische Daten der Messstationen Tulbeckstraße, München-Zentrum und München-Flughafen (Erdinger Moos).....	44
Tabelle 4-2:	Geographische Daten der Messstationen Lüdenscheid und Schmalleberg-Bödefeld	47
Tabelle 4-3:	Häufigkeit des Auftretens von Kälteperioden pro Jahr in bestimmten Frostindexintervallen von 1933/34 bis 1981/82 [14]	50
Tabelle 6-1:	Verkehrsbelastung der L776 in Bad Fredeburg aus einer Verkehrszählung im Jahr 2000 [66]	62
Tabelle 6-2:	Materialkennwerte für verschiedene Straßenoberbau- und Erdschichten [14, 15, 33, 67, 68].....	63
Tabelle 6-3:	Elementrierung des Untersuchungsausschnittes zur Sensitivitätsanalyse für die drei Untersuchungsfälle Standard, Minimum und Maximum.....	64

Tabelle 6-4:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die einzelnen Parameter.....	66
Tabelle 8-1 :	Kennwerte der Klimamessstationen Hamburg-Fuhlsbüttel und Quickborn.....	97
Tabelle 8-2 :	Kennwerte der Klimamessstationen Köln-Wahn und Bonn-Roleber	100
Tabelle 8-3 :	Kennwerte der Klimamessstationen Berlin-Dahlem und Potsdam ...	102
Tabelle 8-4 :	Kennwerte der Klimamessstationen Nürnberg-Flughafen und Roth	105
Tabelle 8-5 :	Kennwerte der Klimamessstationen Darmstadt, Wiesbaden und Riedstadt.....	107
Tabelle 8-6:	Zusammenstellung des Frostindex und der minimal gemessenen Tagestemperatur für die ausgewählten Messstationen für den Zeitraum vom 01.12.04 – 15.03.05	109

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Beispielhafter Aufbau einer Befestigung - Damm/Einschnitt [1].....	3
Abbildung 2-2:	Lastabtrag im Boden nach Boussinesq [5].....	4
Abbildung 2-3:	Schematische Darstellung der Eislinsenbildung und Wasseranreicherung in einem bindigen Boden während der Frostperiode [7].....	5
Abbildung 2-4:	Tragfähigkeitsverluste eines Straßenaufbaus im Frühjahr in Abhängigkeit vom Untergrund [8].....	6
Abbildung 2-5:	Frosteindringtiefe z_F in Abhängigkeit von der Frostdauer und der Temperatur an der Fahrbahnoberfläche für den dargestellten Fahrbahnaufbau [8].....	7
Abbildung 2-6:	Frosteinwirkungszonen gemäß RStO [1]	9
Abbildung 2-7:	Wärmeleitfähigkeit ungefrorener und gefrorener Böden [14]	11
Abbildung 2-8:	Qualitativer Einfluss der Feuchtigkeit auf die Temperaturleitfähigkeit α [17].....	12
Abbildung 2-9:	Wärmebewegung zwischen Straßenoberfläche und Umgebung [18] [19].....	13
Abbildung 2-10:	Qualitativer Verlauf der einzelnen Strahlungsanteile für einen Sommertag [26]	15
Abbildung 2-11:	Gesamte Tagesstrahlungsbilanz in Abhängigkeit von der Jahreszeit [22, 27].....	16
Abbildung 2-12:	Berechnungsraster mit Zellen und den zugehörigen Knotenpunkten [33]	21
Abbildung 2-13:	Skizze eines Lambertschen Strahlers.....	25
Abbildung 2-14:	Skizze zur Definition des view-factors [41].....	25
Abbildung 2-15:	Verwertung der RC-Baustoffe im Jahr 2000 [43]	28
Abbildung 2-16:	Prozentualer Anteil der Verwendung von RC-Baustoffen, 1991 bis 2001 [44]	29
Abbildung 2-17:	Werkstoffverteilung der Rohrleitungen in ausgewählten deutschen Großstädten, Bayern und als Mittel im Jahr 1983 [48]..	30
Abbildung 2-18:	Unterbringung der Leitungszonen nach DIN 1998 [49]	32
Abbildung 3-1:	Ansicht und Draufsicht des FDR-Feuchtesensors, Typ ThetaSonde ML2x [54].....	35
Abbildung 3-2:	Lageplan der Messstelle auf der L776 in Bad Fredeburg [57]	36
Abbildung 3-3:	L776 in Bad Fredeburg in Höhe des Amtsgerichts am 05.02.04	37
Abbildung 3-4:	Lageplan der Tulbeckstraße in München [58].....	38
Abbildung 3-5:	Tulbeckstraße in München am 15.01.2004	39
Abbildung 3-6:	Aufbau des Straßenoberbaus der L776 in Bad Fredeburg	40

Abbildung 3-7:	Aufbau des Straßenoberbaus der Tulbeckstraße in München.....	40
Abbildung 3-8:	Querschnitt der Tulbeckstraße an der Messstelle mit Lage der Sensoren	41
Abbildung 3-9:	Querschnitt der L776 in Bad Fredeburg an der Messstelle mit Lage der Sensoren.....	42
Abbildung 3-10:	Schematische Darstellung der Sensorenlage im Straßenquerschnitt anhand der Schnitte A und B aus den Abbildungen 3-8 und 3-9.....	43
Abbildung 4-1:	Beispiel zur Ermittlung des Frostindex [60]	44
Abbildung 4-2:	Minimale tägliche Lufttemperaturen in München im Winter 2003/04 vom 16.01. – 15.03.2004	45
Abbildung 4-3:	Minimale tägliche Lufttemperaturen in München im Winter 2004/05 vom 01.12.04 -15.03.05	46
Abbildung 4-4:	Frostindex (FI) für den Winter 2003/04 vom 15.01.04 - 15.03.04 in München	46
Abbildung 4-5:	Frostindex (FI) für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 - 15.03.2005 in München	47
Abbildung 4-6:	Minimale tägliche Lufttemperatur in Bad Fredeburg, Bödefeld und Lüdenscheid im Winter 2003/04 vom 05.02.04 – 15.03.04	48
Abbildung 4-7:	Minimale tägliche Lufttemperatur in Bad Fredeburg und Lüdenscheid im Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005 ...	48
Abbildung 4-8:	Frostindex (FI) für den Winter 2003/04 vom 05.02. – 15.03.04 für Bad Fredeburg, Bödefeld und Lüdenscheid.....	49
Abbildung 4-9:	Frostindex (FI) für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05 für Bad Fredeburg und Lüdenscheid.....	49
Abbildung 4-10:	Durchschnittliche, minimale und maximale Monatswerte der Lufttemperaturen für die Station München-Flughafen von Dezember 1992 – Juni 2005	50
Abbildung 5-1:	Temperaturverläufe im Straßenoberbauquerschnitt der L776 in 70 cm Tiefe für den Winter 2003/04 vom 06.02.04 – 15.03.04...52	52
Abbildung 5-2:	Temperaturverläufe im Straßenoberbauquerschnitt der L776 in 70 cm Tiefe für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 -15.03.05	53
Abbildung 5-3:	Temperaturwerte im Straßenoberbau der L776 in Bad Fredeburg in Straßenmitte für den Winter 2003/04 vom 06.02.04 – 15.03.04 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	53
Abbildung 5-4:	Temperaturwerte im Straßenoberbau der L776 in Bad Fredeburg in Straßenmitte für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05 in Abhängigkeit von der Tiefe.....	54
Abbildung 5-5:	Temperaturverläufe im Straßenquerschnitt der Tulbeckstraße in 60 cm Tiefe für den Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04...55	55

Abbildung 5-6:	Temperaturverläufe im Straßenoberbauquerschnitt der Tulbeckstraße in 60 cm Tiefe für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05	55
Abbildung 5-7:	Temperaturverläufe im Straßenoberbau der Tulbeckstraße in München in verschiedenen Tiefen für den Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04	56
Abbildung 5-8:	Temperaturverläufe im Straßenoberbau der Tulbeckstraße in München in verschiedenen Tiefen für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05	56
Abbildung 6-1:	Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2003/2004 vom 06.02.2004 -15.03.2004 in 20 cm Tiefe	68
Abbildung 6-2:	Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2003/2004 vom 06.02.2004 -15.03.2004 in 45 cm Tiefe	69
Abbildung 6-3:	Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2003/2004 vom 06.02.2004 -15.03.2004 in 70 cm Tiefe	69
Abbildung 6-4:	Differenz des simulierten zum gemessenen Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2003/04 vom 06.02.04 – 15.03.04 für die Tiefen 20, 45 und 70 cm	70
Abbildung 6-5:	Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2003/04 vom 06.02.04 – 15.03.04 in der Tiefe von 20 cm.....	70
Abbildung 6-6:	Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2003/04 vom 06.02.04 – 15.03.04 in der Tiefe von 70 cm.....	71
Abbildung 6-7:	Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 - 31.01.05 in 20 cm Tiefe	72
Abbildung 6-8:	Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.02.04 - 15.03.05 in 20 cm Tiefe	72
Abbildung 6-9:	Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 - 31.01.05 in 45 cm Tiefe	73
Abbildung 6-10:	Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.02.05 - 15.03.05 in 45 cm Tiefe	73
Abbildung 6-11:	Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 - 31.01.05 in 70 cm Tiefe	74

Abbildung 6-12: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.02.05 - 15.03.05 in 70 cm Tiefe	74
Abbildung 6-13: Differenz zwischen simuliertem und gemessenem Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 31.01.05	75
Abbildung 6-14: Differenz zwischen simuliertem mit dem gemessenem Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2004/05 vom 01.02.05 – 15.03.05	76
Abbildung 6-15: 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.....	76
Abbildung 6-16: 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.....	77
Abbildung 6-17: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04 in 20 cm Tiefe	78
Abbildung 6-18: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04 in 40 cm Tiefe	78
Abbildung 6-19: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04 in 60 cm Tiefe	79
Abbildung 6-20: Differenz zwischen simuliertem und gemessenem Temperaturverlauf in München im Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04	79
Abbildung 6-21: Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Temperaturverlauf in München im Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04 in der Tiefe von 20 cm	80
Abbildung 6-22: Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Temperaturverlauf in München im Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04 in der Tiefe von 60 cm	80
Abbildung 6-23: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 31.01.05 in 20 cm Tiefe	81
Abbildung 6-24: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.02.05 – 15.03.05 in 20 cm Tiefe	82
Abbildung 6-25: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 31.01.05 in 40 cm Tiefe	82

Abbildung 6-26: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.02.05 – 15.03.05 in 40 cm Tiefe	83
Abbildung 6-27: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 31.01.05 in 60 cm Tiefe	83
Abbildung 6-28: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.02.05 – 15.03.05 in 60 cm Tiefe	84
Abbildung 6-29: Abweichung der simulierten von der gemessenen Temperatur im Winter 2004/ 2005 vom 01.12.04 – 31.01.05	85
Abbildung 6-30: Abweichung der simulierten von der gemessenen Temperatur im Winter 2004/ 2005 vom 01.02.05 – 15.03.05	85
Abbildung 6-31: Darstellung der simulierten und der gemessenen Temperaturwerte in München in 20 cm Tiefe für den Winter 2004/05.....	86
Abbildung 6-32: Darstellung der simulierten und der gemessenen Temperaturwerte in München in 60 cm Tiefe für den Winter 2004/05.....	86
Abbildung 7-1: Tulbeckstraße mit und ohne Ansatz von Gas- und Abwasserleitung im Winter 2003/04 vom 16.01.2004 bis zum 15.03.2004 in 60 cm Tiefe	87
Abbildung 7-2: Bad Fredeburg mit und ohne Ansatz der Abwasserleitung im Winter 2003/04 vom 06.02.2004 -15.03.2004 in 70 cm Tiefe....	88
Abbildung 7-3: Lageverteilung der Kanalisation im Straßenquerschnitt [71].....	89
Abbildung 7-4: Werkstoffverteilung für die Leitungen in der Kanalisation [71]	89
Abbildung 7-5: Nennweitenverteilung der Leitungen in der Kanalisation [71]	90
Abbildung 7-6: Lage- und Nennweitenverteilung von Trinkwasserleitungen im Straßenquerschnitt [71].....	91
Abbildung 7-7: Lageverteilung von Fernwärmeleitungen für das Mantelrohr- und das Kanalrohrsystem	92
Abbildung 7-8: Nennweitenverteilung von Fernwärmeleitungen [71]	92
Abbildung 7-9: Temperaturen von Fernwärmeleitungen nach Einbauverfahren und Rohrmedium [71]	93
Abbildung 7-10: Frosteindringungsverläufe in Abhängigkeit von der Tiefe und Frostdauer für verschiedene ungebundene Baustoffe [15]	94
Abbildung 7-11: Modifizierter Frostindex (FI) für den Zeitraum vom 01.12.2004 – 31.03.2005 am Münchener Flughafen nach Absenken der Lufttemperaturen um 5 °C.....	95
Abbildung 7-12: Simulierte Bodentemperaturen in 20 cm, 60 cm und 160 cm Tiefe für die dargestellte modifizierte Lufttemperatur vom München-Flughafen für den Zeitraum vom 01.12.04 bis zum 31.01.05.....	95

Abbildung 7-13:	Simulierte Bodentemperaturen in 20 cm, 60 cm und 160 cm Tiefe für die dargestellte modifizierte Lufttemperatur vom München-Flughafen für den Zeitraum vom 01.02.05 bis zum 15.03.05	96
Abbildung 7-14:	Vergleich der simulierten Temperaturdaten aus Abbildung 7-13 in 20 cm, 60 cm und 160 cm Tiefe mit bzw. ohne Berücksichtigung der Leitungen.....	96
Abbildung 8-1:	Minimale Lufttemperaturen für die Stationen Hamburg-Fuhlsbüttel und Quickborn für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005	98
Abbildung 8-2:	Ermittelter Frostindex (FI) für die Stationen Hamburg-Fuhlsbüttel und Quickborn für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005	98
Abbildung 8-3:	Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.12.2004 bis zu 31. 01.2005 für Hamburg-Fuhlsbüttel	99
Abbildung 8-4:	Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.02.2005 bis zu 15. 03.2005 für Hamburg-Fuhlsbüttel	99
Abbildung 8-5:	Minimale Lufttemperaturen für die Stationen Köln-Wahn und Bonn-Roleber für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05 .	100
Abbildung 8-6:	Ermittelter Frostindex (FI) für die Stationen Köln-Wahn und Bonn-Roleber für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05 .	101
Abbildung 8-7:	Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.12.04 bis zu 31.01.05 für Köln-Wahn	101
Abbildung 8-8:	Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.02.05 bis zu 15.03.05 für Köln-Wahn	102
Abbildung 8-9:	Minimale Lufttemperaturen für die Stationen Berlin-Dahlem und Potsdam für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05 ..	103
Abbildung 8-10:	Ermittelter Frostindex (FI) für die Stationen Berlin-Dahlem und Potsdam für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05.....	103
Abbildung 8-11:	Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.12.2004 bis zu 31. 01.2005 für Berlin-Dahlem	104
Abbildung 8-12:	Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.02.2005 bis zu 15. 03.2005 für Berlin-Dahlem	104
Abbildung 8-13:	Minimale Lufttemperaturen für die Stationen Nürnberg-Flughafen und Roth für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05	105
Abbildung 8-14:	Ermittelter Frostindex (FI) für die Stationen Nürnberg-Flughafen und Roth für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05	106

Abbildung 8-15: Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe der Straßenmitte vom 01.12.04 bis zu 31. 01.05 für Nürnberg	106
Abbildung 8-16: Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe der Straßenmitte vom 01.02.05 bis zu 15. 03.05 für Nürnberg	107
Abbildung 8-17: Minimale Lufttemperaturen für die Stationen Darmstadt, Riedstadt und Wiesbaden für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05	108
Abbildung 8-18: Frostindex (FI) für die Stationen Darmstadt, Wiesbaden und Riedstadt für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05	109

1 Einleitung

Die Verkehrsinfrastruktur ist für die wirtschaftliche, kulturelle und organisatorische Entwicklung eines Landes von essentieller Bedeutung. Den wohl wichtigsten Anteil hieran hat der Straßenverkehr, der durch den sicheren, belastbaren und dauerhaften Aufbau der Straßen erst ermöglicht wird. Damit eine Straße langfristig nutzbar ist, muss ein Straßenquerschnitt neben dem Kriterium der Tragfähigkeit auch das Kriterium der Frostsicherheit gewährleisten.

Die Temperaturverteilung im Straßenoberbau sowie das Vorliegen von Wasser sind die entscheidenden Kriterien, um eine Frostgefährdung des Straßenaufbaus zu verursachen. Dabei müssen beide Bedingungen gleichzeitig auftreten. Während das Auftreten von Wasser vom anstehenden Grundwasserstand sowie von der Kapillarität des Untergrundes abhängt, spielen bei der Ermittlung der Temperaturen im Straßenoberbau eine Vielzahl an Faktoren eine Rolle. Die Temperaturverteilung ist abhängig von der Art der Straßenbaustoffe, den Witterungsbedingungen bzw. dem Klima sowie dem Temperaturhaushalt im Boden.

Frostschäden erscheinen zum einen durch die Ausdehnung des gefrierenden Wassers als Risse und Aufbrüche an der Oberfläche und setzen somit die Fahrqualität und –sicherheit sowie die Langlebigkeit der Straße herab. Zum anderen kann in den Auftauphasen im Frühjahr zusätzlich durch Anstauen von bereits aufgetautem versickerndem Wasser auf noch gefrorenem Boden die Tragfähigkeit einer gesamten Straße gefährdet werden.

Die Frostsicherheit soll durch die Frostschutzschicht im Straßenoberbau sichergestellt werden. Sie soll eintretendes Wasser schnell abführen und dient gleichzeitig als Barriere gegen kapillar aufsteigendes Wasser. Darüber hinaus unterstützt die Frostschutzschicht die Tragfähigkeit. Hierfür besteht diese Schicht aus einem groben, gut abgestuften Gesteinskörnungsgemisch. Diese Baustoffe müssen definierten Anforderungen entsprechen.

In Deutschland wird die Dicke der Frostschutzschicht pauschal aufgrund von Erfahrungswerten bestimmt. Sie ist abhängig von Bauklasse und Frostempfindlichkeitsklasse des Unterbaues bzw. Untergrundes, einschließlich eines Zu- oder Abschlages, mit dem örtliche Verhältnisse berücksichtigt werden. Unter Umständen ist ein erheblicher Einsatz an Gesteinskörnungen notwendig. Die Dicke des Straßenaufbaus kann Größenordnungen bis zu 90 cm betragen, wobei bei den meisten Bauweisen ein beträchtlicher Teil auf die Frostschutzschicht entfällt. Zur Ressourcen- bzw. Umweltschonung sollte daher nach Möglichkeiten gesucht werden, den Straßenaufbau so wirtschaftlich wie möglich auszuführen.

Bisher wird davon ausgegangen, dass bei Abführung des Niederschlagwassers auf der dichten Straßenoberfläche eine Abminderung von 10 cm vorgenommen werden darf. Diese Reduzierung ist aber bisher nicht verifiziert worden, sondern basiert auf der Annahme, dass bei Stadtstraßen folgende Grundvoraussetzungen vorhanden sind: Zum einen wird das Oberflächenwasser abgeführt und versickert nicht in den Untergrund, zum anderen liegen höhere anstehende Temperaturen als unter Normalbedingungen vor. Neben der erhöhten Lufttemperatur innerhalb geschlossener Ortschaften ist auch das Wrmpotential unter der Straße in Form von Ver- und Entsorgungsleitungen (Wasser, Abwasser, Fernwärme, Strom) und das Wrmpotential der benachbarten Häuser zu berücksichtigen.

In diesem Forschungsbericht wird dargelegt, wie sich die Temperaturverhältnisse innerhalb einer Straße in geschlossener Ortslage im Winter entwickeln. Mit Hilfe einer geeigneten Messmethodik wurden die wahren Temperaturverhältnisse an zwei Straenaufbauten im Hochsauerlandkreis sowie in München für die Winter 2003/2004 sowie 2004/2005 ermittelt. Diese wurden mit einer Computersimulation verglichen, um einen Zusammenhang zwischen den vorgefundenen Verhältnissen und den simulierten Ergebnissen herzustellen. Anschließend wurden anhand der Simulation mittels Veränderung verschiedener Parameter, wie z. B. der äußeren Einwirkungen, die Einflüsse dieser Parameter beurteilt.

Mit den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes können u. a. Empfehlungen für die Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen [1] gegeben werden, um den Pauschalwert für den frostsicheren Straßenaufbau bei Stadtstraßen zu konkretisieren.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Frosteinwirkung im Straßenkörper

Eine Straße besteht aus dem Straßenoberbau und dem darunter liegenden Erdkörper, dem natürlichen Untergrund bzw. einem Damm als Unterbau.

Der Straßenoberbau setzt sich gemäß RStO [1] aus mehreren Schichten zusammen, deren Bezeichnungen einheitlich festgelegt wurden. **Abbildung 2-1** zeigt beispielhaft Lage und Begrenzung sowie die Bezeichnungen der einzelnen Schichten für den Aufbau einer Straßenbefestigung.

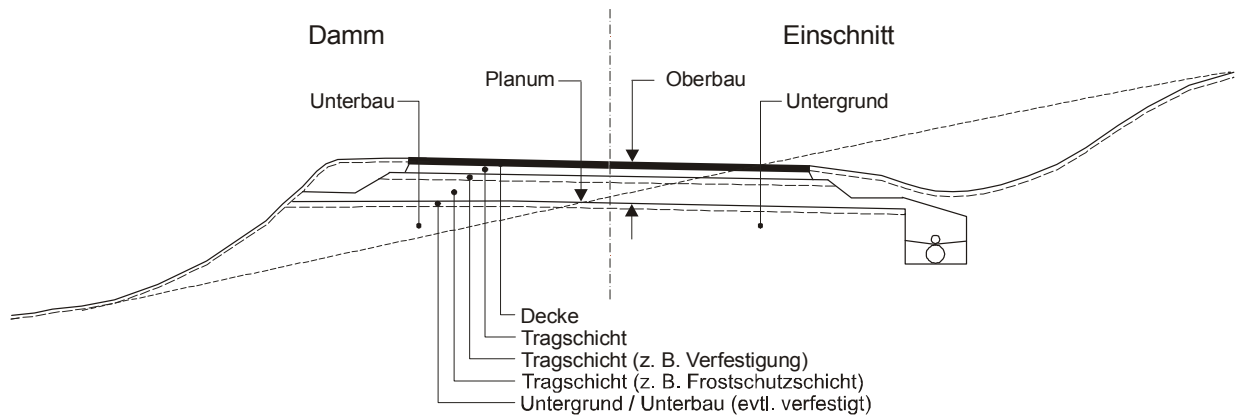


Abbildung 2-1: Beispielhafter Aufbau einer Befestigung - Damm/Einschnitt [1]

Damit die Straße vor Frostschäden geschützt ist, wird als unterste Schicht im Straßenoberbau eine Frostschuttschicht aus frostunempfindlichem Material, z. B. aus Kies, Sand, Kies-Sand-Gemische oder Gemische aus Schotter, Splitt und Brechsand verwendet. Diese Baustoffe müssen den Anforderungen der TL Gestein-StB [2] sowie den TL SoB-StB [3] entsprechen. Zusätzlich hat der Einbau nach den ZTV SoB-StB [4] zu erfolgen.

Die Frostschuttschicht soll als Barriere für aufsteigendes Kapillarwasser dienen und gleichzeitig den Lastabtrag aus den Verkehrslasten bewirken. Dieses wird über ihre Kornzusammensetzung sowie die Einbaueigenschaften gesichert. Sie wirkt als kapillarbrechende Schicht, und gleichzeitig soll sie so durchlässig ausgeführt werden, dass eintretendes Wasser problemlos abgeführt wird. Das Korngerüst unterstützt gleichzeitig die Tragfähigkeit des Straßenaufbaus. Gemäß der Halbraumtheorie nach Boussinesq ist die Spannungsbelastung der Straße an ihrer Oberfläche am größten und wird mit zunehmender Tiefe geringer (**Abbildung 2-2**). Lediglich die Schubkräfte τ weisen in der Tiefe von ca. 8 cm ein Maximum auf. Auf Höhe der Frostschuttschicht sind die Belastungen durch den Verkehr aufgrund der lastverteilenden Wirkung im Boden bereits stark vermindert. Die Tragfähigkeit eines Bodens werden aber durch die Frosteinwirkungen erheblich beeinflusst.

Das Frostphänomen entsteht beim Abfließen der Wärme aus dem Boden bei frostempfindlichen Böden, bei dem Wasser durch den Kapillareffekt von unten zur Frostgrenze nachgesaugt wird. In der gefrorenen Zone befindet sich also wesentlich mehr Wasser als vor dem Gefrieren (**Abbildung 2-3**).

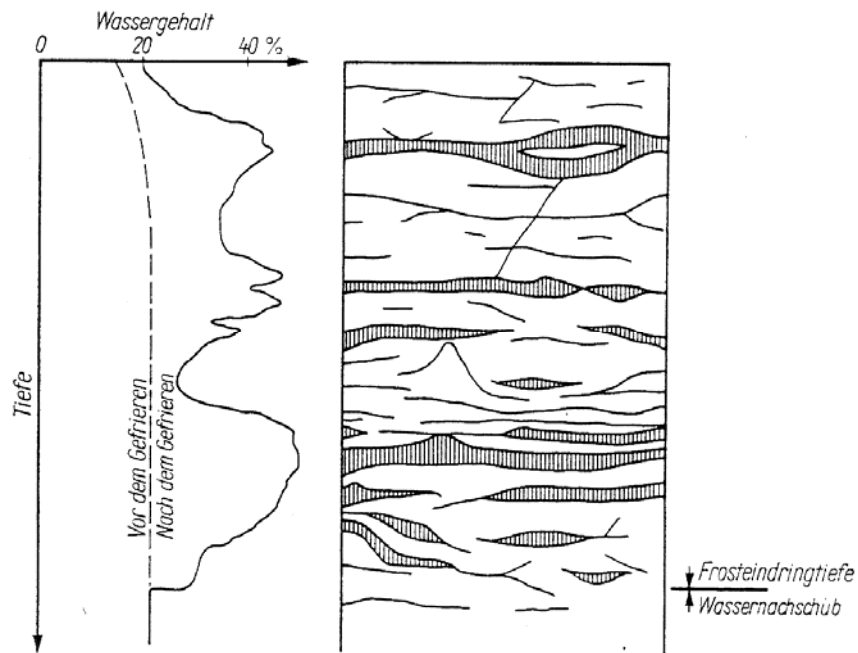


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Eislinsenbildung und Wasseranreicherung in einem bindigen Boden während der Frostperiode [7]

Im Frühjahr sorgen die erhöhten Lufttemperaturen sowie die erhöhte Strahlungsenergie der Sonne für ein Auftauen der oberen Bodenschichten. Mit Eindringen der Wärme kann das angesaugte, sich in der gefrorenen Zone befindliche Wasser nicht schnell genug nach unten abfließen, da die Bodenschichten darunter noch gefroren sind. Der Untergrund weicht auf, und der ganze Straßenaufbau verliert gemäß **Abbildung 2-4** seine Tragfähigkeit um bis zu 70 % gegenüber den Werten im Herbst. Dabei ist für frostgefährdete Böden dieser Effekt verstärkt, da sich eine größere Wassermenge in der Tauzone befindet. Diese Art der Frostschäden hat neben den bereits genannten drei Kriterien noch zusätzlich die Beanspruchung durch den Verkehr als Ursache.

Um dieser unterschiedlichen Anfälligkeit der Böden Rechnung zu tragen, werden die Bodenarten nach DIN 18196 [9] in den ZTV E-StB [10] in drei Frostempfindlichkeitsklassen eingeteilt (**Tabelle 2-1**), wobei als Beurteilungskriterium die Quantität einzelner Korngruppen herangezogen wird. Die Korngrößenverteilung wird vielfach als Frostkriterium eingesetzt [11].

Böden sind aufgrund ihres Aufbaus unterschiedlich frostempfindlich, wobei die Bildung eines kryogenen Frostgefüges die wichtigste Auswirkung ist. Es wird zwischen kohärentem, laminarem und polyedrischem Frostgefüge unterschieden [12]. In einem kohärenten Frostgefüge sind keine Eisstrukturen erkennbar, horizontale Risse werden von einem laminaren Frostgefüge verursacht, und polyedrische Frostgefüge weisen isolierte Aggregate auf. Um eine genaue Vorhersage der Frostempfindlichkeit von Böden treffen zu können, müssen neben der Korngrößenverteilung die spezifi-

sche Oberfläche, die Porengrößenverteilung und die Mineralogie herangezogen werden [13].

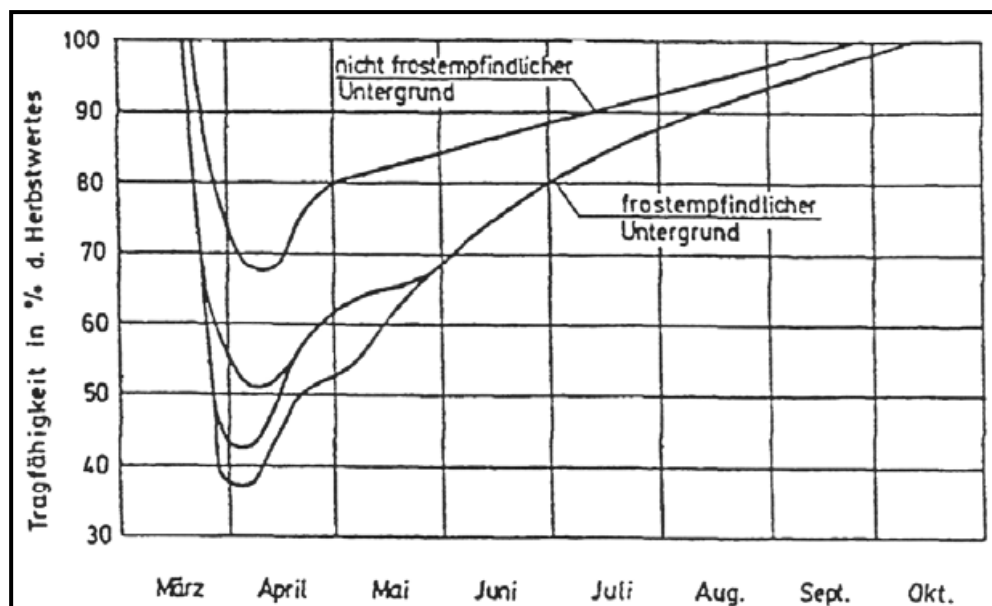


Abbildung 2-4: Tragfähigkeitsverluste eines Straßenaufbaus im Frühjahr in Abhängigkeit vom Untergrund [8]

Tabelle 2-1: Einteilung der Frostempfindlichkeit der Böden nach DIN 18196

Frostempfindlichkeit		Bodenart nach DIN 18196
F 1	nicht frostempfindlich	GW, GI, GE, SW, SI, SE
F 2	gering bis mittel frostempfindlich	TA, OT, OH, OK, TM, ST ¹⁾ , GT ¹⁾ , SU ¹⁾ , GU ¹⁾
F 3	sehr frostempfindlich	TL, UL, UM, OU, ST*, GT*, SU*, GU*

¹⁾ zu F1 gehörig bei einem Anteil an Korn unter 0,063 mm von 5,0 M.-% bei $U \geq 15,0$ oder 15,0 M.-% bei $U \leq 6,0$

Bei den frostempfindlichen Böden ist demzufolge ein Eindringen von Frost zu vermeiden. Messungen an verschiedenen Stellen in Deutschland haben ergeben, dass die Frosteindringtiefe in längeren Frostperioden bis deutlich unter das Planum reichen kann. Erfahrungen haben aber gezeigt, dass es ausreicht, den Straßenaufbau bei Böden der Frostempfindlichkeitsklasse F2 bis etwa 60 % der bekannten maximalen Frosteindringtiefe frostsicher auszuführen [14]. Für einen wirtschaftlichen Straßenaufbau müssen die äußeren Witterungsfaktoren sowie die Eigenschaften der eingesetzten Baustoffe herangezogen werden. Die äußeren Witterungsfaktoren hängen neben der Frosthärte auch von der Frostdauer ab. In der **Abbildung 2-5** sind

verschiedene Verläufe abhängig von der Frostdauer sowie der Umgebungstemperatur aufgezeigt. Die Frosteindringung ist umso schneller und tiefer, je strenger der Frost ist und je länger die Frosteinwirkung dauert [8].

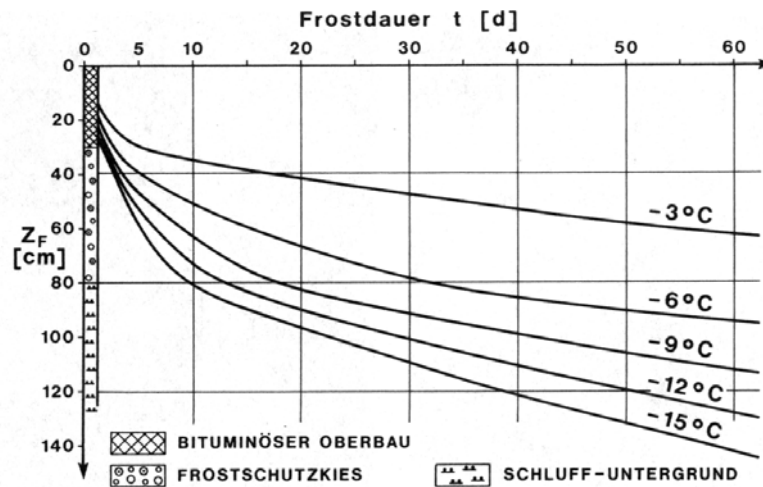


Abbildung 2-5: Frosteindringtiefe z_F in Abhängigkeit von der Frostdauer und der Temperatur an der Fahrhahnoberfläche für den dargestellten Fahrhahnaufbau [8]

Die oberen gebundenen Schichten werden hierbei sehr schnell durchfrozen. Der Frostverlauf in den ungebundenen Schichten verläuft dahingegen bei längeren Frostperioden abhängig von der Umgebungstemperatur wesentlich langsamer. Auffallend ist hierbei der langsamere Anstieg der Frosteindringung im Untergrund. Neben den veränderten Bodenkennwerten übt der höhere Wassergehalt in dieser Schicht einen erheblichen Einfluss auf die Frosteindringung aus.

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse wird in den RStO die Mindestdicke des frostsicheren Straßenoberbaues festgelegt. Die Dicke ist abhängig von Bauklasse und Frostempfindlichkeitsklasse des Unterbaues bzw. Untergrundes (**Tabelle 2-2**) sowie eines Zu- oder Abschlages gemäß **Tabelle 2-3**, mit dem örtliche Verhältnisse berücksichtigt werden.

Tabelle 2-2: Ausgangswerte für die Bestimmung der Mindestdicke des frostsicheren Straßenbaus gemäß RStO [1]

Zeile	Frostempfindlichkeitsklasse	Dicke in cm bei Bauklasse		
		SV / I / II	III / IV	V / VI
1	F2	55	50	40
2	F3	65	60	50

Eine Anordnung der Frostschutzschicht kann hierbei dann entfallen, wenn der Untergrund der Frostempfindlichkeitsklasse F1 entspricht, er in ausreichender Mächtigkeit

anliegt und entsprechende Tragfähigkeit aufweist. In diesem Fall kann der Untergrund die Aufgaben der Frostschutzschicht übernehmen.

Tabelle 2-3: Mehr- oder Minderdicken infolge örtlicher Verhältnisse gemäß den RStO [1]

Zeile	Örtliche Verhältnisse		A	B	C	D
1.1	Frost- einwirkung	Zone I	± 0 cm			
1.2		Zone II	+ 5 cm			
1.3		Zone III	+ 15 cm			
2.1	Lage der Gradiente	Einschnitt, Anschnitt, Damm ≤ 2,0 m (ausgenommen Ziffer 2.2)		+ 5 cm		
2.2		In geschlossener Ortslage etwa in Geländehöhe		± 0 cm		
2.3		Damm > 2,0 m		- 5 cm		
3.1	Wasser- verhältnisse	Günstig			± 0 cm	
3.2		Ungünstig gemäß ZTV E-StB			+ 5 cm	
4.1	Ausführung der Randbereiche (z. B. Seiten- streifen, Radwege, Gehwege)	Außerhalb geschlossener Ortslage sowie in geschlossener Ortslage mit wasserdurchlässigen Randbereichen				± 0 cm
4.2		In geschlossener Ortslage mit teilweise wasserdurchlässigen Randbereichen sowie mit Entwässerungseinrichtungen				- 5 cm
4.3		In geschlossener Ortslage mit wasserundurchlässigen Randbereichen und geschlossener seitlicher Bebauung sowie mit Entwässerungseinrichtungen				- 10 cm

Die unterschiedlichen geographischen Gegebenheiten in Deutschland werden anhand von drei Frosteinwirkungszonen I, II und III berücksichtigt (**Abbildung 2-6**). Die Grenzen ergeben sich aufgrund der ermittelten Frostindizes (s. **Kapitel 4.1**) aus dem Winter 1962/63 (**Tabelle 2-4**).

Für Straßen in geschlossener Ortslage mit wasserundurchlässigen Randbereichen und geschlossener seitlicher Bebauung sowie mit Entwässerungseinrichtungen kann nach Zeile 4.3 eine Reduzierung um pauschal 10 cm vorgenommen werden (**Tabelle 2-3**). Bei dieser Regelung wird davon ausgegangen, dass nur vermindert Frost und Wasser in der Straße auftreten.

Tabelle 2-4: Einteilung der Frosteinwirkungszonen nach gemessenem Frostindex FI [14]

Frosteinwirkungszone	I	II	III
Maßgeblicher Frostindex FI [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$]	< 490	490 - 580	> 580

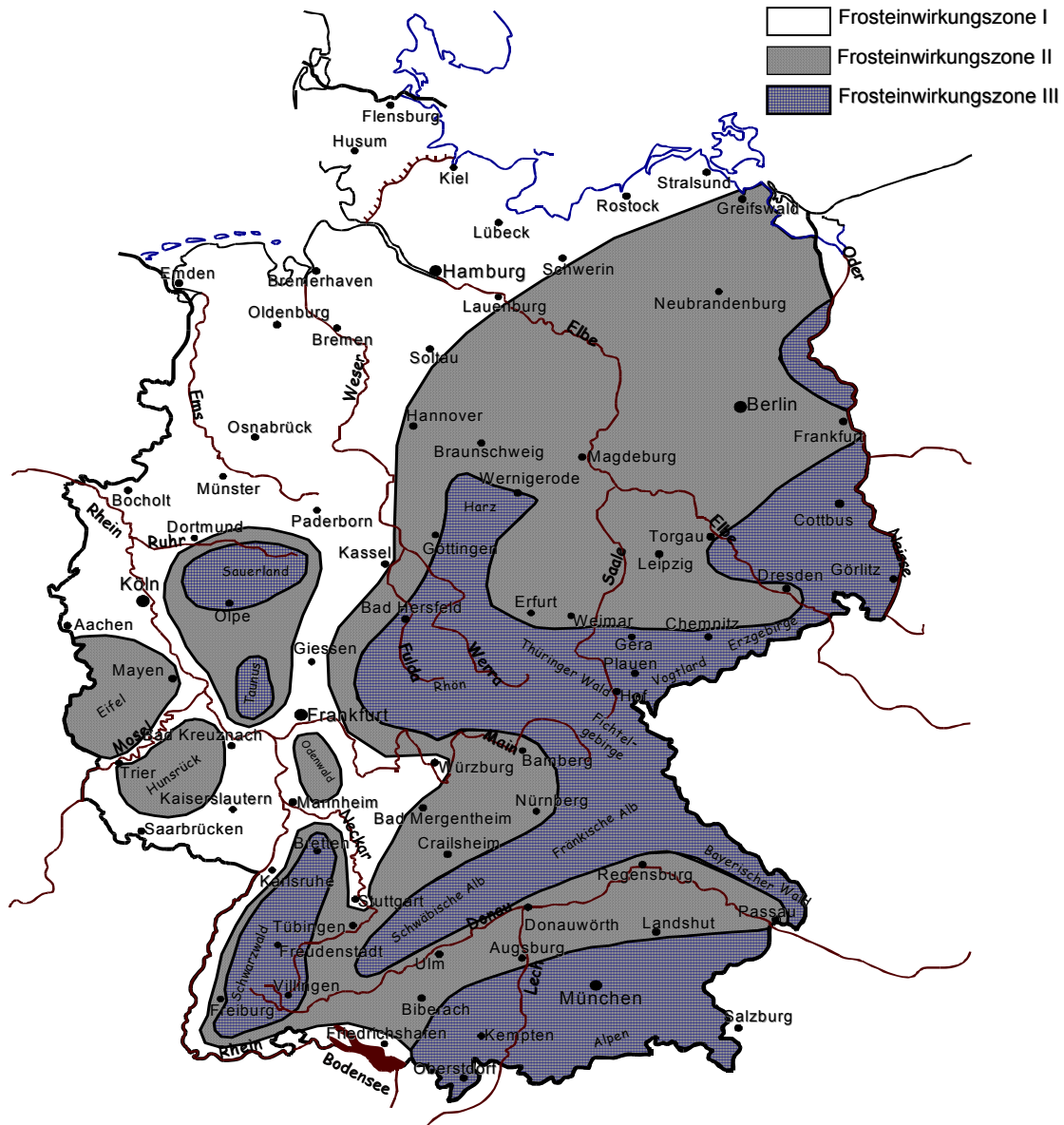


Abbildung 2-6: Frosteinwirkungszone gemäß RStO [1]

Jedes Jahr nach dem Winter auf vielen Straßen in Form von Rissen und Straßenaufbrüchen auftretende Frostschäden lösen zwar immer wieder die Diskussion über den allgemeinen Zustand der Straßen aus. Sie sind aber nur in seltenen Fällen auf eine mangelhafte Frostsicherung zurückzuführen. Nicht geklärt ist daher, ob der erhebliche Einsatz an Rohstoffen aus heutiger Sicht für die Frostsicherung notwendig ist. Unter Umständen können hier Einspareffekte erzielt werden.

Aus diesem Grund ist es unerlässlich, die Wirkungen des Frostes genau zu untersuchen und einzugrenzen, so dass für die Zukunft die Dimensionierung der Innerortsstraße aufgrund des Frostes genauer erfolgen kann.

2.2 Temperaturverteilung im Straßenaufbau

2.2.1 Temperaturhaushalt im Boden

Die Temperaturverteilung im Boden bzw. im Straßenoberbau hängt von den folgenden Bodeneigenschaften ab:

- Art des Bodens
- Porenvolumen
- Wassergehalt
- Dichte
- Aggregatzustand des Wassers

Die Bodeneigenschaften lassen sich durch die beiden Parameter Wärmeleitfähigkeit λ und spezifische Wärmekapazität c_p beschreiben. Nach der Definition ist die **Leitfähigkeit** die Wärmemenge, die in der Zeit t durch einen konstanten Querschnitt fließt, wenn senkrecht dazu ein Temperaturgefälle von 1 °C herrscht. Die Wärmeleitfähigkeit stellt keine Materialkonstante dar, sondern ist abhängig von Temperatur, Dichte, Wassergehalt und mineralischer Zusammensetzung des Materials [15]. Die Einflüsse in Abhängigkeit von Dichte und Wassergehalt auf die Wärmeleitfähigkeit werden in **Abbildung 2-7** dargestellt. Je höher der Wassergehalt und die Dichte sind, desto höher ist auch die Wärmeleitfähigkeit des Bodens. Diese Beziehung trifft sowohl auf sandige als auch auf schluffige und tonige Böden, hier auf einem etwas niedrigeren Niveau, zu. Dabei werden die Funktionen in Abhängigkeit vom Aggregatzustand des Bodenwassers getrennt dargestellt, da ein sprunghafter Anstieg der Wärmeleitung beim Phasenübergang von Wasser zu Eis festzustellen ist. Aufgrund der Kristallverwachsung während der Eisbildung erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit des Wassers von $\lambda = 0,58\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ auf $\lambda = 2,21\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ bei Eis. Zusätzlich kommt es während der Umwandlung zu einem weiteren Effekt, der die Frosteindringung in den Straßenkörper direkt beeinflussen kann. Dieser Effekt wird Umwandlungsenthalpie genannt. Wenn in den durchfeuchteten Schichten das enthaltene Wasser gefriert, wird „latente Wärme“ freigesetzt, die für Wasser 335 kJ/kg beträgt. Diese freigesetzte Wärmemenge führt zu einer Verzögerung der Frosteindringung, die umso ausgeprägter ist, je höher der Wassergehalt der Schicht ist. Aus diesem Grund kann die Berücksichtigung des Wassergehaltes der Schichten für eine Berechnung der Frosteindringung im Falle eines Phasenüberganges von Bedeutung sein [14].

Die spezifische **Wärmekapazität** c [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] gibt an, wie viel Wärmeenergie notwendig ist, um einen 1 kg schweren Körper um 1 °C zu erwärmen bzw. abzukühlen [16].

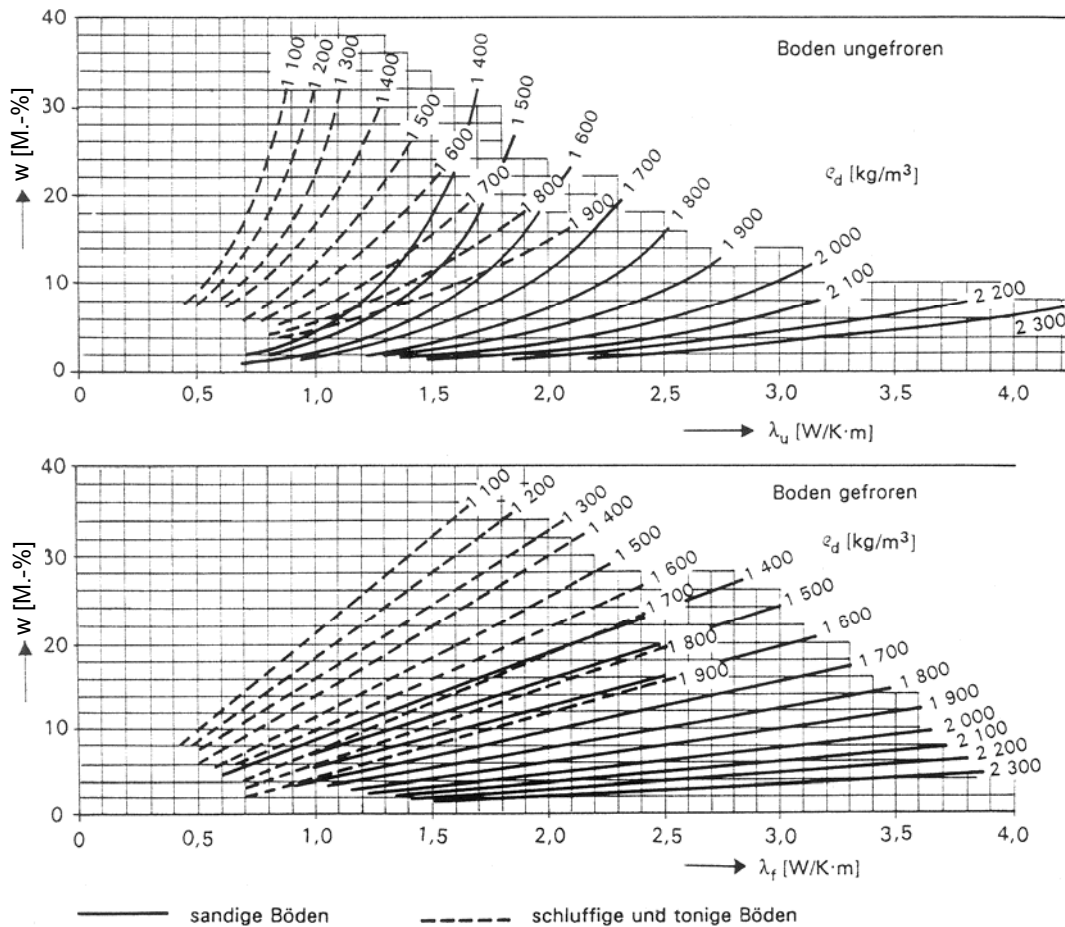


Abbildung 2-7: Wärmeleitfähigkeit ungefrorener und gefrorener Böden [14]

Die wärmephysikalischen Baustoffeigenschaften ändern sich mit variierendem Wassergehalt. Hohe Wassergehalte führen zu höheren Leitfähigkeiten, da die Luftporen teilweise mit dem besser leitenden Medium Wasser gefüllt sind. Feuchte und nasse Böden erwärmen sich aber insgesamt langsamer, weil das Wasser aufgrund der hohen Wärmekapazität eine große Menge der Wärmeenergie binden kann. Trockene Böden dagegen erwärmen sich schneller, können die Wärme aber weniger gut speichern und geben sie schneller wieder ab. Die Schnelligkeit des Eindringens einer Temperaturänderung in die Tiefe hängt somit vom Zusammenspiel der Wärmeleitfähigkeit und der -kapazität des Bodens ab und wird durch die Temperaturleitfähigkeit a beschrieben.

$$\text{Temperaturleitfähigkeit } a = \text{Wärmeleitfähigkeit } \lambda / (\text{Dichte } \rho \cdot \text{spez. Wärmekapazität } c)$$

Gemäß **Abbildung 2-8** werden bis zu einer spezifischen Bodenfeuchte die Luftporen mit Wasser gefüllt und erhöhen somit die Temperaturleitfähigkeit. Darüber hinaus

wirken die höhere Kapazität des Wassers sowie die geringere Leitfähigkeit gegenüber dem Medium Boden hemmend für die Temperaturleitfähigkeit a .

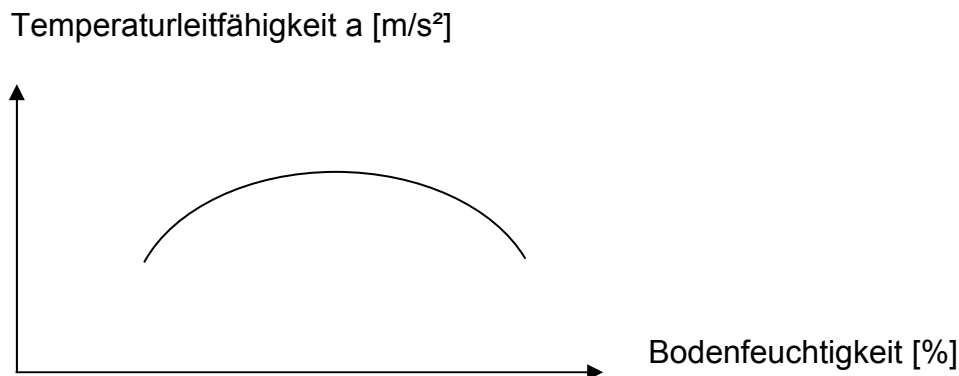


Abbildung 2-8: Qualitativer Einfluss der Feuchtigkeit auf die Temperaturleitfähigkeit a [17]

2.2.2 Klima

Die Straßentemperatur resultiert aus der Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe sowie aus dem Zusammenspiel von Wärmezufuhr und Wärmeverlust. Dieser Wärmeaustausch erfolgt größtenteils durch Strahlungseinflüsse sowie Konvektion. Deren Intensität ist größtenteils vom Klima abhängig. Der Einfluss des Klimas ist von einer Vielzahl an Faktoren abhängig. Eine Rolle spielen hierbei die vorliegende Lufttemperatur, die Sonneneinstrahlung, der Niederschlag sowie der Wind, die insgesamt von mikro- als auch makroskopischen Standortbedingungen abhängen, wie folgende Aufstellung ausweist:

- Geographische Lage
- Jahres- und Tageszeit
- Seehöhe
- Exponiertheit
- Abschattung
- Art des umliegenden Geländes/ Topographie
- Oberflächeneigenschaften des Bodens
- Wellenlänge der Strahlungen
- Bewölkung/ Witterung
- Windgeschwindigkeit
- Wasserdampfdruck

Die Wärmehaushaltsgleichung setzt sich gemäß **Abbildung 2-9** wie folgt zusammen:

$$\text{Strahlungsbilanz } Q + \text{Wärmeaustausch mit der Luft } L + \text{Verdunstungs- und Kondensationswärme } V + \text{Bodenwärmestrom } B = 0$$

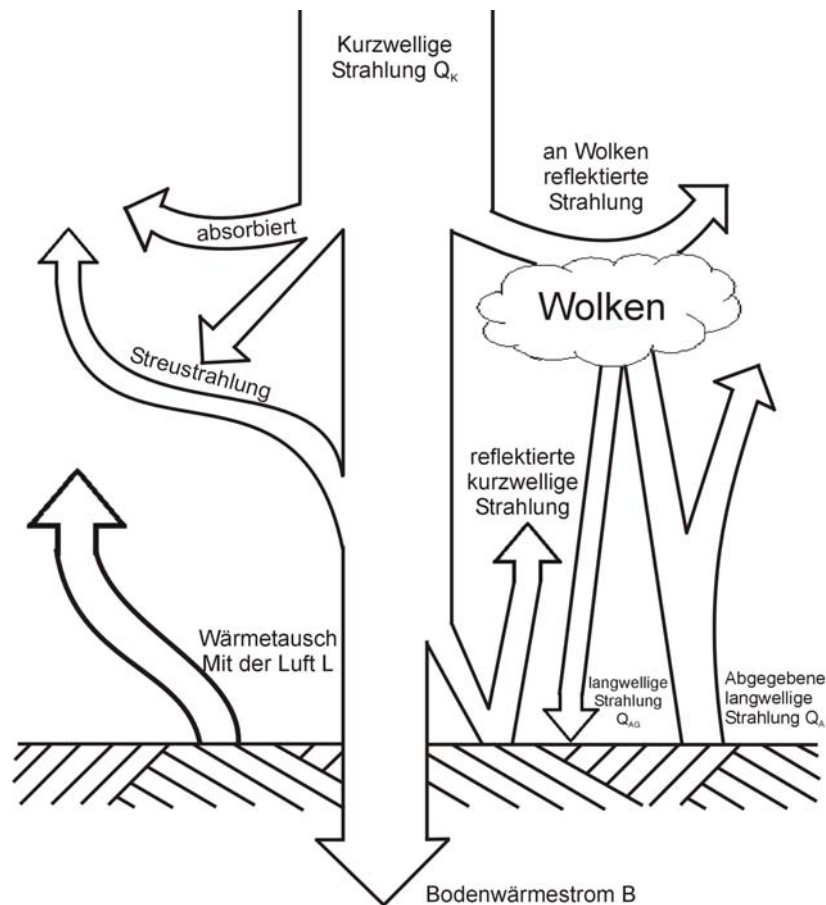


Abbildung 2-9: Wärmebewegung zwischen Straßenoberfläche und Umgebung [18] [19]

2.2.2.1 Strahlungseinfluss

Die Oberflächentemperatur wird erheblich von den Strahlungskomponenten beeinflusst. Insgesamt wird zwischen der kurzwelligen sowie der langwelligen Strahlung unterschieden. Die kurzwellige Strahlung entsteht durch die Sonne, die langwelligen Anteile durch Infrarotstrahlung aus der Atmosphäre, der Umwelt und auch durch die Erdoberfläche selber. Die direkte Sonneneinstrahlung und die diffuse Himmelsstrahlung aus Streueffekten werden auch als Globalstrahlung bezeichnet. Die Wirkung dieser Globalstrahlung ist unterschiedlich je nach der Lage, z. B. ob Nord- oder Südhang, dem Einstrahlwinkel, der von der Tages- und der Jahreszeit abhängt, dem Atmosphärenzustand sowie der geographischen Breite des Betrachtungspunktes [18]. Die Gesamtstrahlungsbilanz stellt sich wie folgt dar:

$$Q = Q_K + Q_L = Q_K (1 - \alpha) + \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_L + 273,16)^4 - \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_S + 273,16)^4$$

mit $Q_K = D + H - \alpha \cdot (D + H) = \text{Globalstrahlung} = \text{direkte Sonneneinstrahlung} + \text{diffuse Himmelsstrahlung} - \text{kurzwellige Reflexionsstrahlung [W/m}^2\text{]}$

$$Q_L = Q_{AG} - Q_A \quad = \text{atmosphärische Gegenstrahlung} - \text{langwellige Ausstrahlung von der Erdoberfläche [W/m}^2\text{]}$$

α : Reflexionsanteil der Straßenoberfläche (Albedo) [%]

T_L : Lufttemperatur [°C]

T_S : Oberflächentemperatur [°C]

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante [W/m²K⁴]

ϵ_a : absorbierter Anteil der Oberfläche

ϵ : Emissionskoeffizient

Für die Albedowerte und Emissionskoeffizienten liegen eine Vielzahl an Literaturwerten vor (**Tabelle 2-5**). Die Bandbreite des kurzwelligen Albedowertes bei Asphalt entsteht durch die Unterscheidung, ob die Straßenoberfläche nass/ trocken und alt/neu ist (**Tabelle 2-6**).

Tabelle 2-5: Kurz- und langwellige Albedowerte von verschiedenen Oberflächen [20]

Oberfläche	Albedo α [%]	Langwelliger Albedo ϵ_a [%]
Asphalt	5 - 20	4
Mittelwert für Straßen	18	
Städte	10 - 30	5 - 15
Mittelwert für Städte	15	
Ziegelwand	20 - 40	8 - 10
Wiese	15 - 25	6
Altschnee	40 - 70	3
Neuschnee	75 - 95	2

Tabelle 2-6: Abhängigkeit der Albedowerte von Alter und Oberflächenzustand der Straße [21] [22]

Asphaltstraße	Mittel trocken [%]	Mittel nass [%]
Neubelag	10,1	6,8
Altbelag	19,4	13,1

Während bei der langwelligen Strahlungsform der reflektierte Anteil an der Oberfläche weit unter 10 % und somit vernachlässigbar ist, ist der reflektierte Anteil der kurzwelligen Strahlung von der Art der Oberfläche abhängig und variiert zwischen 0 und 100 %. Der absorbierende Anteil ist hierbei abhängig von den chemisch-physikalischen Eigenschaften des Körpers sowie dessen Oberflächenstruktur [23]. Der in Stadtstraßen vorherrschende Asphalt weist aufgrund seiner dunklen Oberfläche nur

einen geringen Reflektionsanteil auf. Dabei ist die Tageszeit zu unterscheiden. Die **kurzwellige solare Strahlung** tritt nur tagsüber auf und ist abhängig von dem Einfallswinkel der Sonne. Die kürzeren Tage im Winter sowie die enge Bebauung in Städten, die die niedrig stehende Sonne größtenteils abschirmt, werden den Einfluss auf die Temperaturverteilung stark abschwächen. Die **langwellige terrestrische Strahlung** geht von allen Körpern aus, die eine Temperatur höher als $-273,15\text{ °C}$ besitzen. Sie entsteht durch thermische Molekularbewegung bzw. Schwingungen. Die Höhe der Abstrahlung ist auch in diesem Fall baustoffspezifisch. Nach Versuchsmessungen ist bei einer Asphaltoberfläche ein ϵ_a - Wert von rd. 0,91 ermittelt worden [24, 25]. Die atmosphärische Gegenstrahlung schwankt in der Quantität je nach Wetterlage. Der Emissionskoeffizient ϵ_{AG} liegt im Schnitt zwischen 0,75 in einer klaren Nacht und 0,85 bei stärkerer Bewölkung. Eine typische Tagesganglinie der verschiedenen Strahlungsarten ist in der **Abbildung 2-10** dargestellt.

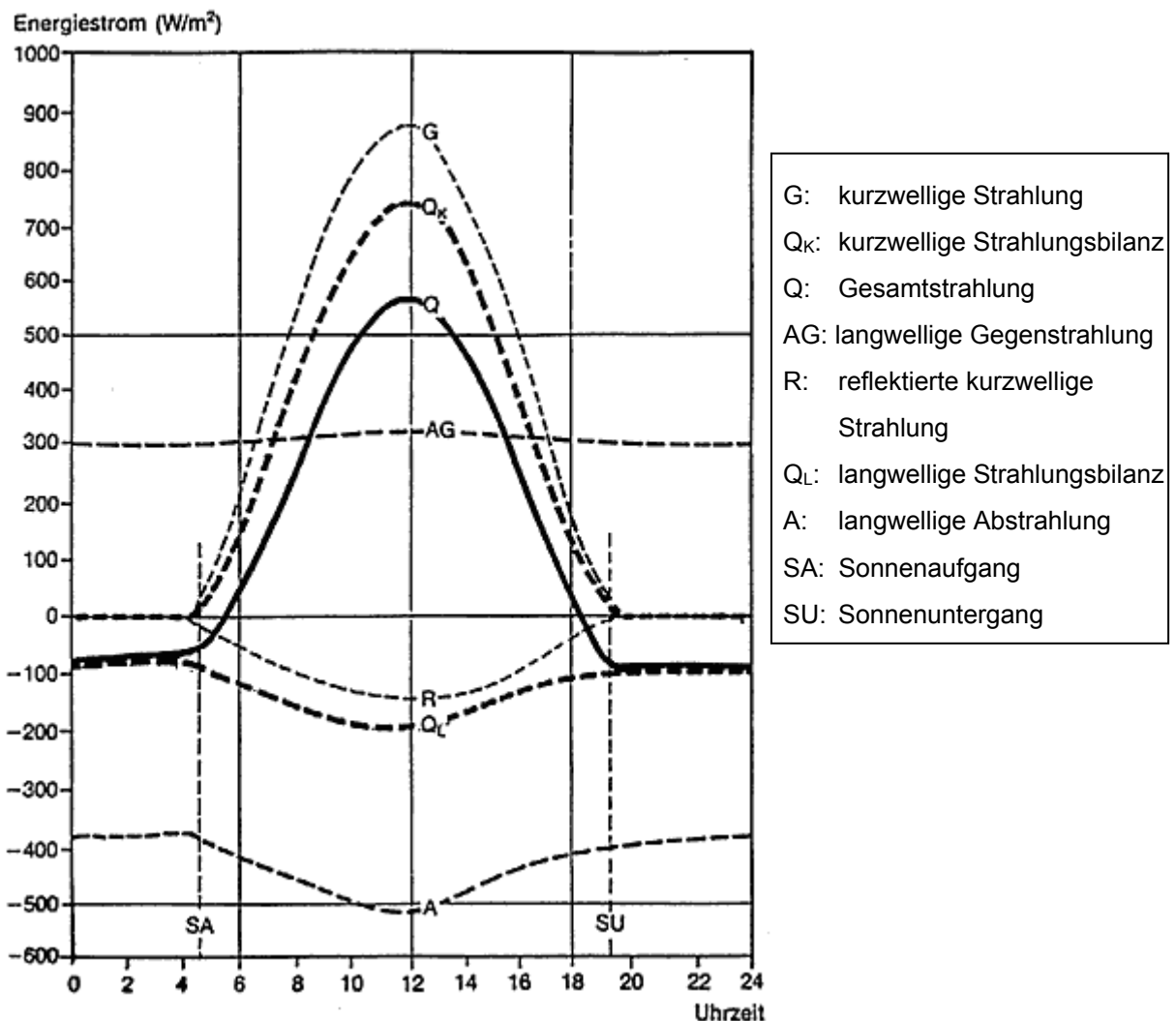


Abbildung 2-10: Qualitativer Verlauf der einzelnen Strahlungsanteile für einen Sommertag [26]

Dabei ist die Tagesganglinie der Strahlungsbilanz stark abhängig von der Jahreszeit. Im Winter ist der Einfluss der Strahlung für die Straße erheblich geringer. Der Ein-

fluss der Jahreszeit auf die Strahlungsbedingung wird aus der **Abbildung 2-11** deutlich.

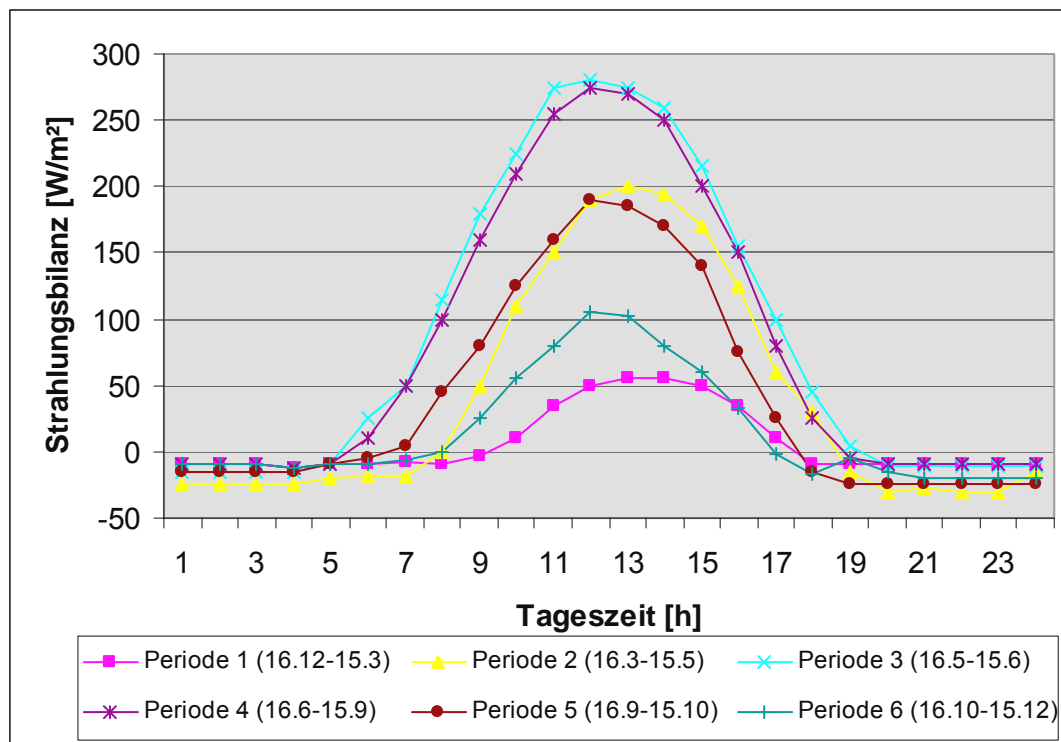


Abbildung 2-11: Gesamte Tagesstrahlungsbilanz in Abhängigkeit von der Jahreszeit [22, 27]

2.2.2.2 Massenaustausch

Zusätzlich tritt an der Oberfläche aufgrund von Turbulenzbewegungen der Luft durch Reibung sowie durch Konvektion ein Massenaustausch auf. Die Konvektion wird durch vertikale Strömungen aufgrund unterschiedlicher Erwärmung der Luftschichten verursacht. Der Konvektionsaustausch ist durch die labilen Wetterlagen besonders im Sommer tagsüber festzustellen und wird in der weiteren Beurteilung nicht weiter getrennt betrachtet. Der Massenaustausch durch Reibung ist abhängig von der Luftgeschwindigkeit und kommt beim Übergang von fühlbarer als auch latenter Wärme zustande. Er wird mit der Wärme- bzw. der Feuchteübergangszahl berücksichtigt. In dieser Arbeit wird die Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Wetterlagen nicht getroffen, da nur geringe Differenzen zwischen Wärme- und Feuchteübergangszahlen festzustellen sind [24].

Der von der Straßenoberfläche absorbierte Strahlungsanteil, der durch den Energietransport von der Wärmeleitung sowie der –konvektion entsteht, wird als Wärme–

übergang bezeichnet. Der Wärmeübergangskoeffizient α wird über die allgemeine Formel

$$\alpha = c_1 + c_2 \cdot u^{c_3} \quad [W/(m^2 \cdot K)]$$

mit u : Windgeschwindigkeit an der Oberfläche [m/s]

c_1, c_2, c_3 : Konstanten

beschrieben. Für die Bestimmung der Parameter c_1 bis c_3 sind verschiedene analytische, empirische und messtechnische Untersuchungen durchgeführt worden. Nach Krebs/ Böllinger hat sich aus Messreihen an Straßen folgender Zusammenhang ergeben, der für die weitere Betrachtung herangezogen wird [24]:

$$\alpha = 10 \cdot (0,174 + 0,941 \cdot u^{0,366}) .$$

2.2.3 Überschlägige Berechnungsmöglichkeiten der Frosteindringung

Die Berechnung der Frosteindringung geht bis auf das 17. Jahrhundert von Lamé und Clapeyron (1831) zurück. In einer Veröffentlichung nach Stefan (1881) wird die Wärmeleitung mit Berücksichtigung des Phasenübergangs für einen einseitig unendlich ausgedehnten Raum behandelt. Neumann (1912) verallgemeinerte und erweiterte die Theorie und legte eine Lösung für die Frosteindringung in den homogenen Halbraum unter Anwendung eindimensionaler Wärmeleitung vor, wonach sich die Frosteindringtiefe z_F ergibt zu

$$z_F = k_0 \cdot \sqrt{t}.$$

Nach Stefan enthält die Konstante k_0 die Quadratwurzel der Temperatur an der Oberfläche. Dadurch kann die Stefan'sche Formel mit einer Konstanten k_1 vereinfacht geschrieben werden:

$$z_F = k_1 \cdot \sqrt{FI}$$

mit FI : Frostindex [$^{\circ}C \cdot d$]

Es wurden auch Verfahren zur Bestimmung der Frosteindringtiefe entwickelt, die anderen analytischen Ansätzen folgen. Insgesamt gibt es für die Berechnung der Frosteindringtiefen eine Vielzahl an theoretischen Modellen. Bereits im Jahr 1969 wurden in einer Literaturrecherche 150 verschiedene Berechnungsansätze gefunden [28, 29, 30].

Dabei variieren diese verschiedenen Ansätze in der Berücksichtigung der einzelnen Eingangsparameter, so dass die Berechnungszeit verkürzt, das Ergebnis aber unter Umständen stark abweicht. Die meisten basieren auf

- Frostindex
- Wärmeleitfähigkeit
- Wärmekapazität
- Strahlung
- Wassergehalt
- Phasenübergang, latente Wärme
- Beschreibung der thermodynamischen und anderen Eigenschaften

Eine Verifizierung verschiedener Modelle zur Berechnung der Frosteindringtiefe wurde in einer Diplomarbeit an der TU Wien vorgenommen, in der ein Vergleich der berechneten mit einer gemessenen Frosteindringtiefe von einer Messstation in Nasereith (Österreich) zusammengefasst dargestellt wurde. Die Frosteindringtiefen aus den einzelnen Modellrechnungen variieren dabei erheblich. Bei einer gemessenen Frosteindringtiefe von 80 cm schwanken die Modelle von 45 bis 115 cm [31].

2.2.4 Wärmeleitungsgleichung

Für eine genaue analytische Ermittlung der Frosteindringung wird die Wärmeleitungsgleichung herangezogen. Die Betrachtung des räumlichen und zeitlichen Verlaufes der Temperatur im Straßenkörper kann durch die Energiebilanz in Kombination mit der allgemeinen Fourier-Gleichung beschrieben werden. Die Energiebilanz setzt sich aus drei Teilen zusammen. Zum ersten aus der Wärmeabfuhr aus dem Element, dargestellt durch die Wärmestromdichte q , zum zweiten aus der zeitlichen Temperaturänderung, die zu einer Veränderung der im Volumenelement gespeicherten Wärmeenergie führt, zum dritten über lokal verteilte innere Wärmequellen I .

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz dt + \left(\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \right) dx dy dz dt = I dx dy dz dt$$

Das Fouriersche Gesetz der Wärmegleichung besagt, dass die Wärme in entgegengesetzter Richtung des Temperaturgradienten fließt. Bei der Annahme eines isotropen Baustoffes ergeben sich folgende Gleichungen:

$$q_x = \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_z = \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}$$

Zusammen ergeben sie die instationäre (zeitabhängige) Wärmeleitungsgleichung. Die Wärmeleitungsgleichung ist vom Typ der partiellen Differentialgleichungen und lautet ohne Berücksichtigung der internen Wärmequellen im dreidimensionalen Fall [32]:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right).$$

Die Variablen λ_x , λ_y und λ_z bezeichnen die Wärmeleitfähigkeiten jeweils in x-, y- und z-Richtung [W/(m·K)]. C ist die volumenbezogene Wärmekapazität [J/(m³·K)]. Sie ergibt sich aus dem Produkt der Dichte ρ [kg/m³] und der spezifischen Wärmekapazität c [J/(kg·K)].

Voraussetzung für die Berechnung der Temperaturverteilung $T(x,y,z,t)$ ist die Angabe der Anfangs- und Randbedingungen aller Grenzen des Untersuchungsraumes. Die Randbedingungen sind entweder durch anliegende Temperatur- oder durch bekannte Wärmeflusswerte anzugeben. Bei dieser Betrachtung liegen neben den anliegenden Randbedingungen interne Wärmequellen in Form von Ver- und Entsorgungsleitungen vor. Da es sich bei der Betrachtung des Wärmehaushaltes im Straßenaufbau einer Innerortsstraße bei allen Elementen um Linienobjekte handelt, kann dieses Problem auf eine zweidimensionale Betrachtung des Straßenquerschnittes reduziert werden. Seitlich zugeführte Leitungen, z. B. Hausanschlüsse, werden bewusst nicht in dieser Berechnung berücksichtigt, um die punktuellen Wärmequellen nicht in die Temperaturbetrachtung einfließen zu lassen. Für die zweidimensionale Wärmeleitung in x- und y-Richtung unter Berücksichtigung externer Wärmequellen lässt sich die Gleichung folgendermaßen aufstellen [33]:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + I(x,y,t)$$

Die neu eingeführte Variable I [W/m³] gibt den Anteil der internen Wärmequelle an. Die Lösung dieser partiellen Differentialgleichung ist nicht eindeutig, so dass auf eine numerische diskrete Näherungslösung zurückgegriffen wird. Aufgrund der vielen Parameter der unterschiedlichen Materialschichten im Straßenquerschnitt, bei denen Einflussparameter wie Oberflächentemperatur, Wassergehalt, Schichtdicken und thermophysikalische Stoffeigenschaften variieren, wird die Lösung mit einem computerunterstützten, numerischen Rechenverfahren bewältigt.

2.2.5 Differenzenverfahren/ Numerische Formulierung

Für die Darstellung der Temperaturverteilung im Boden sind als analytische Modelle numerische Diskretisierungsverfahren, wie das Finite Elemente-, die Randelement- sowie die Finite-Differenzenmethode zu nennen. Alle diese Verfahren haben gemeinsam, dass sie zu einem Gleichungssystem der Form $A \cdot x = b$ hingeführt werden müssen.

Hier wird auf das mathematische Modell des Differenzenverfahrens zurückgegriffen. Es berücksichtigt die Haupteinflussgrößen auf die Temperaturverteilung und ist auf eine derartige Eignung geprüft worden [24]. Das Differenzenverfahren basiert auf einem iterativen Vorgehen, mit dem die instationären thermischen Vorgänge beschrieben werden. Es beruht auf der Fourierschen Differentialgleichung für die Wärmeleitung (thermische Diffusionsgleichung).

Die partielle Differentialgleichung wird durch eine diskrete Näherung in Form von Differenzenquotienten angenähert. Ausgangspunkt für das Differenzenverfahren ist eine Annäherung der Lösung der Wärmeleitungsdifferentialgleichung anhand einer Taylorreihe. Die Taylorreihe lässt sich auf folgende zwei Arten darstellen:

$$u(x+h) = u(x) + h \times u'(x) + \frac{h^2}{2} \times u''(x) + \frac{h^3}{6} \times u'''(x) + \dots$$

$$u(x-h) = u(x) - h \times u'(x) + \frac{h^2}{2} \times u''(x) - \frac{h^3}{6} \times u'''(x) + \dots$$

mit $u(x+h)$: Temperaturwert an der Stelle $(x+h)$

Durch Abbruch nach dem ersten Glied sowie durch Umformen wird näherungsweise die erste Ableitung ermittelt:

$$u'(x) \approx \frac{u(x+h) - u(x)}{h}$$

Im Falle der Wärmegleichung wird die zweite Ableitung gesucht. Hierfür müssen die ersten beiden Glieder der Taylorreihe herangezogen werden. Zusätzlich werden die beiden Taylordarstellungen $u(x+h)$ und $u(x-h)$ miteinander addiert:

$$u''(x) \approx \frac{u(x+h) - 2u(x) + u(x-h)}{h^2}$$

Voraussetzung für die Anwendung ist zum einen, dass alle Werte am Rand bekannt sind (Dirichlet-Randbedingung). Zum zweiten muss der Untersuchungsraum in ein Gitternetz diskretisiert und durchnummeriert werden. Von einer guten Gitterwahl hängt die Genauigkeit der Ergebnisse entscheidend ab. Die zu untersuchende Fläche wird

durch die Beschreibung von Knotentemperaturen eines möglichst dichten Netzes angeglichen. Ein mögliches Berechnungsnetz ist in **Abbildung 2-12** dargestellt.

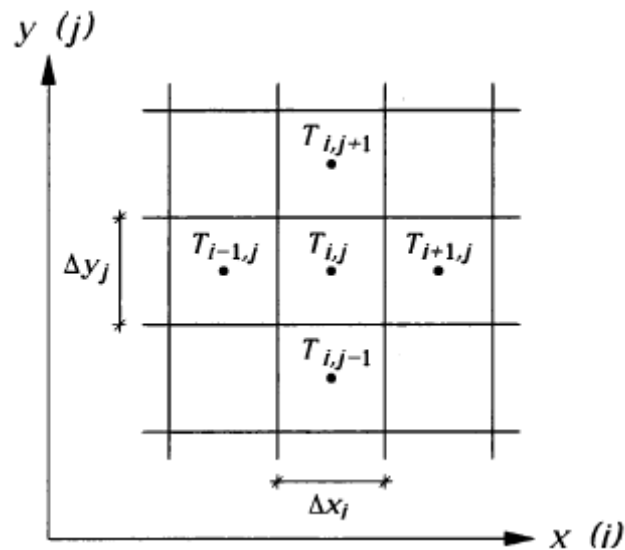


Abbildung 2-12: Berechnungsrastrer mit Zellen und den zugehörigen Knotenpunkten [33]

Die zweidimensionale Betrachtung der Wärmeleitung ist in der folgenden Gleichung zusammengefasst:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + l(x, y, t)$$

Die Differentialquotienten müssen durch Differenzenquotienten in der obigen Laplace-Gleichung ersetzt werden:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{ir} - 2T_i + T_{il}}{\Delta x^2} \quad \text{bzw.}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_{io} - 2T_i + T_{iu}}{\Delta y^2}$$

mit o, u, l, r : Element, oben/unten/links/rechts anliegend

i : Laufparameter 1...i_{max}

Für kurze und endliche Zeitintervalle t und mit $\lambda_x = \lambda_y$ ergibt sich:

$$\Delta T_{i,t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \times \frac{\Delta t}{\Delta x^2 \Delta y^2} \times (T_{ir} - 4T_i + T_{il} + T_{io} + T_{iu})$$

Für die Gesamtheit aller Gitterpunkte ergibt sich somit ein lineares Gleichungssystem über alle Felder mit der neuen Temperatur:

$$T_{i,neu} = T_{i,alt} + \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \times \frac{\Delta t}{\Delta x^2 \Delta y^2} \times (T_{ir} - 4T_i + T_{il} + T_{io} + T_{iu})$$

Dabei sind die Richtungen der jeweiligen Wärmeströme zu beachten. Dies wird über das Vorzeichen der jeweiligen Temperaturwerte berücksichtigt. Vereinfacht wurde bei dieser Herleitung angenommen, dass die Materialkennwerte über die Felder in x- und y-Richtung konstant bleiben. Für den Fall eines Wechsels sind die Änderungen von λ , c und ρ zu beachten. Die obige Formel verlängert sich auf diese Weise dementsprechend. Das Differenzenverfahren ist dabei numerisch stabil, wenn die Abweichungen mit zunehmenden Iterationsschritten abnehmen.

2.2.6 Unterschied urbanes und ländliches Klima

Das Klima in städtischen Bereichen weist gegenüber dem Umland große Unterschiede auf, die in den bisherigen Betrachtungen für die Dimensionierung für den Straßenaufbau nur unzureichend berücksichtigt wurden.

Einerseits wird in städtischen Bereichen das Oberflächenwasser fast vollständig abgeführt, andererseits werden durch die hohe Einwohnerdichte mit ihren Folgeerscheinungen, wie z. B. Bebauung, anthropogene Wärmequellen, die klimatischen Einflüsse stark verändert.

Die hydrologischen Eigenschaften urbaner Oberflächen, wie Abfluss, Infiltration, kapillarer Aufstieg von Wasser, Verdunstung sowie Versickerung von Niederschlagswasser, werden u. a. von der Versiegelung, dem Porenvolumen sowie der Porosität bestimmt. Das Eindringen des Wassers in den Untergrund wird durch einen fast vollständigen Oberflächenabfluss verhindert. Dieser Effekt hängt außer vom Gefälle sowie von Grad und Art der Versiegelung auch von der Witterung ab. Aufgrund der schnellen Erwärmung der Straßenoberfläche wird ein Teil der fallenden Niederschläge sofort verdunstet. Hierbei können Verdunstungswerte von bis zu 0,6 mm – im Vergleich zu kühlerer Witterung – erreicht werden [34]. Asphaltflächen weisen mit einem 72 %igen Abfluss des Niederschlags einen hohen Anteil auf. In den Straßenaufbau versickern nur max. 8 %, und nur 20 % des Jahresniederschlags verdunstet [35]. Die Abflussbeiwerte zur Ermittlung des Regenwasserabflusses gemäß DIN 1986 Teil 2 liegen bei Asphaltdecken sogar bei 0,9, d. h., 90 % des Niederschlagswassers fließt in die Kanalisation ab. Die Verdunstung ist mit einem erheblichen Energieverlust verbunden. Somit stellt die gegenüber dem Umland verringerte Verdunstungsrate eine stadtklimatisch außerordentlich wichtige Größe dar, da für die Asphaltfläche nur knapp 20 % der Jahressumme der Strahlungsbilanz für die Ver-

dunstung aufgewendet wird und rd. 80 bis 90 % der Strahlungsbilanz für die Erwärmung der Umgebung sorgt [36].

Der Temperatenausgleich im Boden wird über den Bodenwärmestrom gewährleistet, der im Tagesgang die Richtung ändert. Tagsüber wird die Wärmeenergie mit einer Größenordnung von rd. 45 W/m² von der Oberfläche in den Boden geleitet. Nachts hingegen bewirken die höheren Untergrundtemperaturen, dass der Bodenwärmestrom mit einem Betrag von rd. 5 bis 20 W/m² in Richtung der Oberfläche fließt [37]. Dabei ist die Energiebilanz in städtischen Regionen gegenüber der unbebauten Fläche durch die unterschiedlichen Verhältnisse, wie Bebauung und Infrastruktur, stark verändert (**Tabelle 2-7**).

Die städtischen Lufttemperaturen sind im Vergleich zum Umland im Jahresmittel um 1 bis 2 K erhöht. Gerade bei starken Minustemperaturen im Winter treten durch die abmildernden urbanen Einflüsse große Temperaturunterschiede auf, die im Einzelfall und über kurze Zeit nachts durchaus 10 bis 15 K betragen können [36]. Ursache hierfür ist u. a. auch die tagsüber gespeicherte Wärme in Gebäuden, Straßen und Plätzen, die wichtige Emittenten an langwelliger Strahlung darstellen.

Tabelle 2-7: Verändertes Stadtklima einer Großstadt in den mittleren Breiten gegenüber nicht bebautem Umland [36]

Einflussgrößen	Veränderungen gegenüber dem nicht bebauten Umland	Einflussgrößen	Veränderungen gegenüber dem nicht bebauten Umland
Globalstrahlung (horizontale Fläche)	bis -10%	Wind – Geschwindigkeit – Richtungsböigkeit – Geschwindigkeitsböigkeit	bis -20% stark variierend erhöht
Albedo	±	Luftfeuchtigkeit	±
Gegenstrahlung	bis +10%		
UV-Strahlung im Sommer im Winter	bis -5% bis -30%	Nebel – Großstadt – Kleinstadt	weniger mehr
Sonnenscheindauer im Sommer im Winter	bis -8% bis -10%	Niederschlag – Regen – Schnee – Tauabsatz	mehr (leeseitig) weniger weniger
Sensibler Wärmestrom	bis +50%	Luftverunreinigungen – CO, NO _x , AVOC ¹⁾ , PAN ²⁾ – O ₃	mehr weniger (Spitzen höher)
Wärmespeicherung im Untergrund und Bauwerken	bis +40%	Bioklima Vegetationsperiode	bis zu zehn Tage länger
Lufttemperatur – Jahresmittel – Winterminima – in Einzelfällen	~ + 2 K bis + 10 K bis + 15 K	Dauer der Frostperiode	bis -30%

¹⁾ = anthropogene Kohlenwasserstoffe

²⁾ = Peroxiacetylnitrat

Durch Anreicherung der Luft mit Schadgasen und Aerosolen innerhalb einer Stadt wird die Sonnenstrahlung (Streuung und Absorption) abgeschwächt. Die direkte Sonneneinstrahlung wird verringert, während sich der diffuse Anteil sowie der Anteil

der atmosphärischen Gegenstrahlung erhöhen [36]. Die Globalstrahlung (direkte Sonnenstrahlung und diffuse Himmelsstrahlung) kann in Städten im Sommer um ca. 5 %, im Winter um bis zu 30 % geringer sein. Die Sonnenscheindauer verringert sich um bis zu 15 % [38, 39]. Dieser verstärkte Effekt in den Wintermonaten kommt durch einen erhöhten Trübungsfaktors T zustande (**Tabelle 2-8**).

Tabelle 2-8: Unterschiede der Strahlungseinflüsse in bebauter und unbebauter Umgebung in Abhängigkeit vom Sonnenstand [40]

Sonnenstand	Q_k [W/m ²]		[%]
	Umland ($T = 1$)	Stadt ($T = 4$)	
90°	1258	995	79
15°	1003	403	40
5°	555	38	7

Die kurzwellige Reflexion an den städtischen Oberflächen ist von deren Farbe, Struktur und Geometrie abhängig. In der Tabelle 2-5 sind einige Reflexionsanteile in Form der Albedowerte für mehrere Oberflächen dargestellt. Über reflektierte Strahlung der vielfach hellen Häuserwände kann durchaus ein Teil für die Erwärmung der Straße angesetzt werden.

Auch die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung ist im urbanen Raum erhöht, was neben der höheren Luftverschmutzung der Stadtluft auf die insgesamt wärmere Stadtatmosphäre (lokaler Treibhauseffekt) zurückzuführen ist [36].

Zusätzlich sind die Strahlungsbedingungen aufgrund der Bebauung verändert. Zum einen wird die kurz- und langwellige Strahlung aus der Umgebung teilweise abgeschirmt, zum anderen kann die langwellige Abstrahlung der Erde nicht ungehindert abstrahlen. Diese Veränderung wird durch den view-factor berücksichtigt. Hierbei wird das Verhältnis von der Bebauungshöhe zur Straßenbreite berechnet, die einer prozentualen Abschirmungsfläche gleichzusetzen ist. Für die Ansetzung dieses view-factors liegt zugrunde, dass es sich bei der lang- und kurzwelligen Strahlung um eine elektromagnetische Welle unterschiedlicher Wellenlänge handelt. Diese transversalen Wellen können sich ohne Materie ausbreiten. Die Ausbreitungsrichtung kann je nach Art der Strahlung erheblich variieren, z. B. Laser mit stark polarisiertem Licht sowie Sonne mit unpolarisiertem Licht. Aufgrund der Oberflächenstruktur der Straße und Häuserwände wird angenommen, dass es sich bei den hier anfallenden Strahlungsarten um einen Lambert'schen Strahler handelt, d. h., die Strahlungsintensität I ist abhängig vom Richtungswinkel θ (**Abbildung 2-13**). Die Ausstrahlung und Aufnahme der Wellen werden mit dem Dipolmodell betrachtet, welches auch der Wel-

lentheorie des Lichtes folgt. Hiernach sind neben Ausstrahlung auch Brechung, Reflexion und Polarisation zu berücksichtigen.

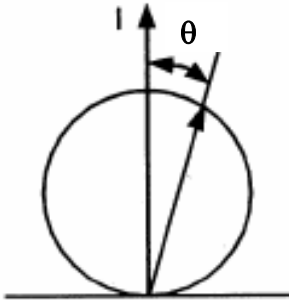


Abbildung 2-13: Skizze eines Lambert'schen Strahlers

Unter der Annahme, dass die meisten natürlichen Materialien in alle Richtungen, d. h. diffus, ausstrahlen, lässt sich die Strahlung folgendermaßen berechnen:

$$\text{Strahlung } N = \text{Intensität/senkrechte Fläche} = I/(\Delta A \cdot \cos\theta) \quad [\text{W}/(\text{m}^2)]$$

$$\text{mit Intensität } I = F/\omega$$

$$\omega = A/r^2$$

Die Strahlung N bedeutet hierbei die radiale ausgestrahlte Intensität einer Quelle in einer gegebenen Richtung. Die emittierte Strahlungsintensität ist neben dem betrachteten Winkel abhängig vom Abstand:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (\text{Lambertsches-Beersches Gesetz})$$

mit x : zurückgelegte Strecke in m

α : Absorptionskonstante in m^{-1} .

Die abschirmende Bebauung durch Geometriebetrachtung wird nach **Abbildung 2-14** über den view-factor berücksichtigt:

- sky view-factor ψ_{sky}
- terrain view-factor $\psi_{\text{terrain}} = (1 - \psi_{\text{sky}})$

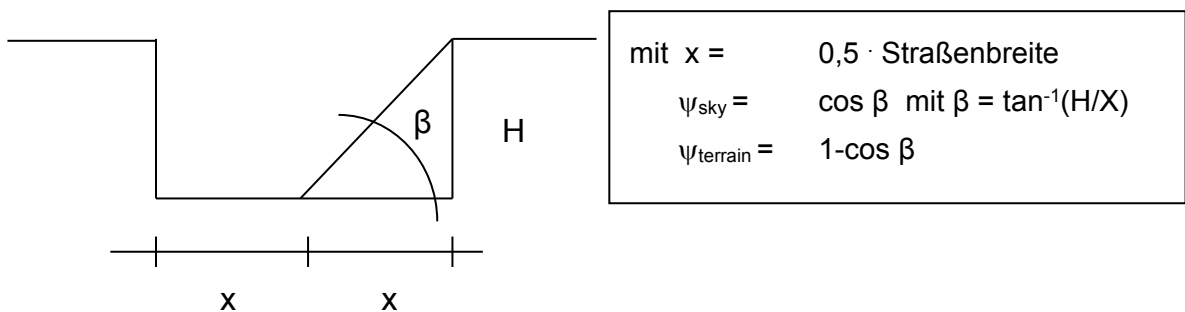


Abbildung 2-14: Skizze zur Definition des view-factors [41]

In der **Tabelle 2-9** sind Werte für verschiedene geometrische Konstellationen dargestellt, die allerdings in der Praxis aufgrund von Anisotropiezuständen teilweise nicht erreicht werden.

Tabelle 2-9: Auflistung von view-factor Werten für verschiedene geometrische Verhältnisse [41]

H/X	0,1	0,3	0,5	0,75	1	1,5	2	3	5	10
Ψ_{sky}	0,98	0,95	0,87	0,75	0,67	0,5	0,4	0,28	0,14	0,08
Ψ_{terrain}	0,02	0,05	0,13	0,25	0,33	0,5	0,6	0,72	0,86	0,92

In der **Tabelle 2-10** ist die Abminderung der langwelligen Abstrahlung nach Geiger (1961) aufgrund verschiedener Messungen dargestellt. Sie kommt zu vergleichbaren Werten.

Tabelle 2-10: Verminderung der langwelligen Abstrahlung durch Bebauung in % [40]

Straßenbreite/ Haushöhe		12	5	2	1,2	0,5
Horizontüberhöhung α	[°]	10	30	45	60	75
Verminderung von Q_A	[%]	2	10	25	46	72

Die Windgeschwindigkeit ist in den Städten gegenüber dem Umland im Durchschnitt geringer. Durch die Bebauung erhöhte Bodenrauigkeit behindert die freie Strömung der Luft. Sie kann im Jahresmittel bis zu 30 % niedriger sein. Insbesondere nimmt die Häufigkeit von Windstillen um bis zu 20 % zu [39].

Neben den veränderten klimatischen Einflüssen kommen in städtischen Bereichen auch zusätzlich noch Wärmequellen hinzu. Die **anthropogene Wärmeproduktion** (Q_{anthr}) ist die aus dem Betrieb von Kraftfahrzeugen, Kraftwerken, Industrieanlagen und Gebäudeheizung freigesetzte Wärme.

Die Höhe dieser Wärmestromdichte ist nach **Tabelle 2-11** abhängig vom Charakter der Stadt, wie z. B. einer hohen Einwohnerdichte und einem hohen Pro-Kopf-Energieverbrauch, der geografischen Breite und der topografischen Lage der Stadt. Gerade im Winter sind hierbei durch einen hohen Energieeinsatz große menschlich erzeugte Wärmeströme messbar [39].

2.2.7 Einsatz von Recycling-Baustoffen

Für den Einsatz in den Frostschutzschichten ist laut den Regelwerken neben den Primärrohstoffen bei Vorliegen der technischen und wasserwirtschaftlichen Eignung auch der Einsatz von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen (RC-Baustoffen) erlaubt. Ein vermehrter Einsatz von Recycling-Baustoffen ist durch das

KrW-/AbfG vorgeschrieben, das eine Verwertung vor einer Beseitigung vorschreibt. Durch das gewachsene Umweltbewusstsein zur Schonung natürlicher Ressourcen und durch die steigenden Kosten für die Deponielagerung ist die deutsche Recycling-Industrie zu einem wichtigen Industriezweig gewachsen [42].

Tabelle 2-11: Energieströme durch anthropogene Wärmequellen im Vergleich zur natürlichen Strahlungsbilanz in verschiedenen Städten [40]

Stadt (geogr. Breite)	Jahr	Jahres- zeit	Fläche km ²	Bevölkerung 10 ⁶ Einw.	Einwoh- nerdichte Einw./km ²	Pro-Kopf- Verbrauch GJ/Einw.	Q _{anthr} W m ⁻²	Q* W m ⁻²	$\frac{Q_{anthr}}{Q^*} \cdot 100 \%$
Fairbanks (64° N)	1965–70	Jahr	37	0,03	810	740	19	18	106
Reykjavík (64° N)	1992	Jahr	38	0,1	2.680	1.100	35	90	39
Sheffield (53° N)	1952	Jahr	48	0,5	10.420	58	19	56	34
Berlin (West) (52° N)	1967	Jahr	234	2,3	9.830	67	21	57	37
Vancouver (49° N)	1970	Jahr	112	0,6	5.360	112	19	57	33
Budapest (47° N)	1970	Jahr Sommer Winter	113	1,3	11.500	118	43 32 51	46 100 –	93 – –
Montreal (40° N)	1961	Jahr Sommer Winter	78	1,1	14.102	221	99 57 153	52 92 13	190 62 1.177
Manhattan (40° N)	1967	Jahr Sommer Winter	59	1,7	28.810	128	117 40 198	93 – –	126 – –
Tokyo (35° N)	1989	Jahr Sommer Winter	612	8,1	13.235	70	31 25 40	59 100 17	53 25 235
Los Angeles (34° N)	1965–70	Jahr	3.500	7,0	2.000	331	21	108	19
Hongkong (22° N)	1971	Jahr	1.046	3,9	3.730	34	4	~ 110	4
Singapur (1° N)	1972	Jahr	568	2,1	3.700	25	3	~ 110	3

Die RC-Baustoffe stellen bei der Produktion von Gesteinsbaustoffen mit rund 60 Mio. t einen Anteil von knapp 10 %. Dies entspricht einer momentanen Recycling-Quote von ca. 70 %. Nach dem Stand der Technik können die Baustoffe größtenteils nicht wieder in ihrem ursprünglichen Einsatzgebiet eingesetzt werden, sondern häufig nur in qualitativ niedrigeren Verwertungsgebieten. Hohe Aufbereitungskosten, aber auch mangelnde Aufbereitungsverfahren führen zu diesem Down-Cycling.

Der Straßenbau bildet das Haupteinsatzgebiet für die RC-Baustoffe. In **Abbildung 2-15** sind die Anteile der Verwertungsarten im Jahr 2000 aufgegliedert [43]. Ein Großteil aller anfallenden 61,4 Mio. t RC-Baustoffe wird im Straßenbau eingesetzt.

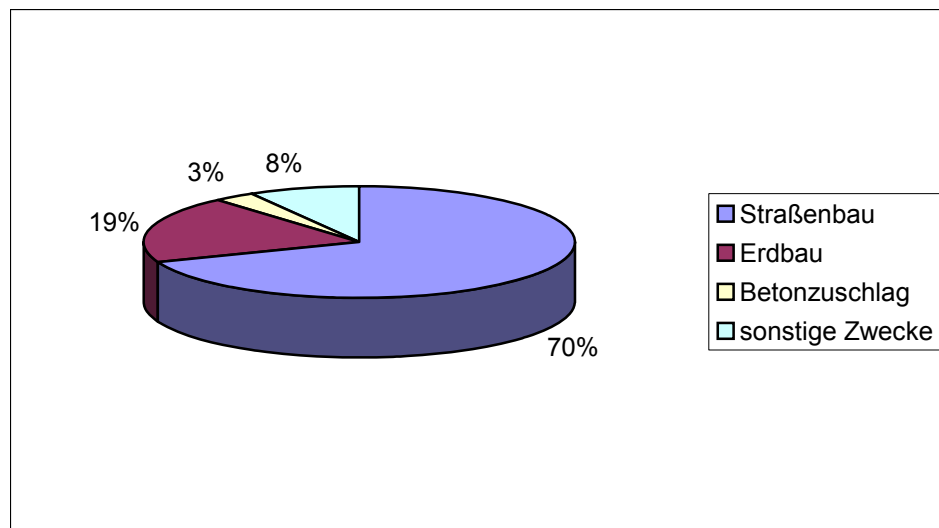


Abbildung 2-15: Verwertung der RC-Baustoffe im Jahr 2000 [43]

Vom Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau, Bochum, wurden im zweijährigen Rhythmus Umfragen bei den Recycling-Betrieben durchgeführt, in der der Anfall und die Verwertung von industriellen Nebenprodukten und RC-Baustoffen abgefragt wurden [44]. Die Einsatzgebiete der aufbereiteten RC-Baustoffe sind in der **Abbildung 2-16** wiedergegeben. Danach liegen die Haupteinsatzgebiete mit durchschnittlich 31 % aller aufbereiteten RC-Baustoffe in den ungebundenen Schichten im höherwertigen Straßenbau, der Frostschutz- und der Schottertragschicht. Ein hoher Anteil geht demnach in den minderwertigen Straßenbau, wie z. B. Unterbau, Bankettbefestigung.

Wenn bei Eignung die Recycling-Baustoffe im Straßenoberbau eingesetzt werden, könnten einerseits natürliche Ressourcen ersetzt und andererseits die Recycling-Branche in der wirtschaftlichen angespannten Situation gestärkt werden.

Für die technische und wasserwirtschaftliche Eignung müssen die Anforderungen aus den TL Gestein-StB [2] und den TL SoB-StB [3] eingehalten werden. Für die Recycling-Baustoffe in den ungebundenen Tragschichten gelten dabei besondere stoffliche Anforderungen für einzelne Stoffgruppen. So darf gemäß **Tabelle 2-12** z. B. der Gehalt an Klinker, Ziegel und Steinzeug im Anteil > 4 mm nicht mehr als 30 M.-% betragen. Der Kalksandstein- und Putzanteil im Anteil > 4 mm darf 5 M.-% nicht übersteigen, was auf die höhere Anfälligkeit gegen Frost zurückzuführen ist. Im Labor wurden Tragfähigkeitsverluste sowie höhere Frosthebungen nach Frost-Tauwechselversuchen nachgewiesen. Allerdings wurden keine Schädigungen unter realen Bedingungen an der Oberfläche festgestellt [15].

Insgesamt führt die Diskrepanz zwischen Labor- und Praxismessungen zu weiterem Untersuchungsbedarf, um die Eignung von Recycling-Baustoffen praxisnäher zu prognostizieren. Die Frostempfindlichkeit von Recycling-Baustoffen sollte am ge-

samten Korngemisch für den durchfeuchteten und verdichteten Zustand vorgenommen werden, da ansonsten die realen Bedingungen nicht wiedergegeben werden [45]. Frosthebungsversuche haben sich als geeignetes Verfahren für die Bestimmung der Frostempfindlichkeit herausgestellt. Dabei sollen das Maß der Frosthebung und der Tragfähigkeitsverlust nach dem Auftauen mittels eines CBR-Wertes bestimmt werden. Des Weiteren ist die Bestimmung des Segretationspotenzials ein geeignetes Frostkriterium. Hiernach wird die Wassereinströmgeschwindigkeit und der Temperaturgradient an der Frostgrenze bestimmt [46].

Tabelle 2-12: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen [3]

Stoffgruppe	M.-%
Asphaltgranulat im Anteil > 4mm	≤ 30
Klinker, Ziegel und Steinzeug im Anteil > 4mm	≤ 30
Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe im Anteil > 4mm	≤ 5
Mineralische Leicht- und Dämmstoffe, wie Poren- und Bimsstein im Anteil > 4mm	≤ 1
Fremdstoffe wie Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien im Gemisch	≤ 0,2

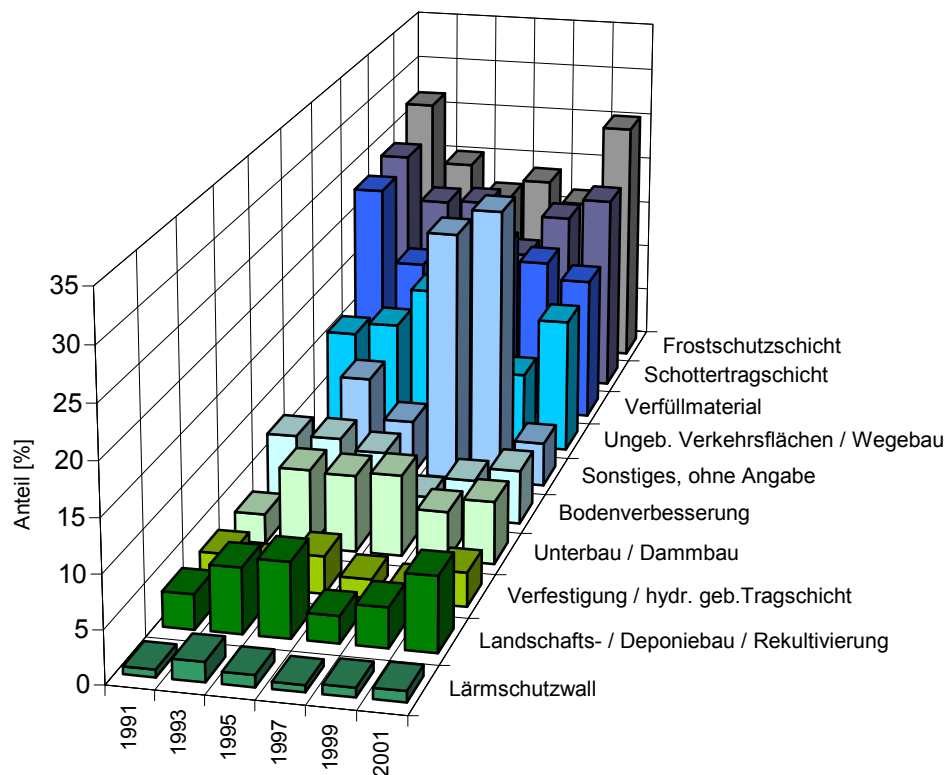


Abbildung 2-16: Prozentualer Anteil der Verwendung von RC-Baustoffen, 1991 bis 2001 [44]

2.2.8 Leitungen

Im innerörtlichen Straßenraum liegt eine Vielzahl von Leitungen, die sich in die zwei Hauptgruppen Rohrleitungen und Kabel unterscheiden lassen. Die Rohrleitungen umfassen folgende Leitungsarten:

- Abwasserkanal (Schmutzwasser-, Regenwasser- bzw. Mischwasserkanal)
- Gasleitung
- Wasserleitung
- Fernwärme-/kälteleitung
- Rohrpostleitung
- Pipeline
- Müllentsorgungsleitung

Die Kabel lassen sich in Starkstrom- sowie Schwachstromkabel einteilen [47].

Die Rohrwerkstoffe in der Kanalisation variieren zwischen den nichtmetallischen sowie den metallischen wie Gusseisen oder Stahl. Die nichtmetallischen können unterschieden werden zwischen anorganischen, z.B. Beton, Klinker, Steinzeug, organischen, z. B. PVC, PE-HD, GFK sowie Verbundwerkstoffen.

Bisher lagen nur ungenaue Informationen über Rohr- und Leitungsdaten vor. Aus einer Umfrage aus dem Jahr 1983 konnte nur eine geringe Datenmenge gesammelt werden. Hiernach besitzen 80 % aller öffentlichen Entwässerungskanäle eine Nennweite < DN 800. Nur 20 % weisen eine Nennweite > DN 800 auf. Die Werkstoffart der Leitungen ist in **Abbildung 2-17** wiedergegeben [49]. Beton und Steinzeug sind die am häufigsten eingesetzten Werkstoffe.

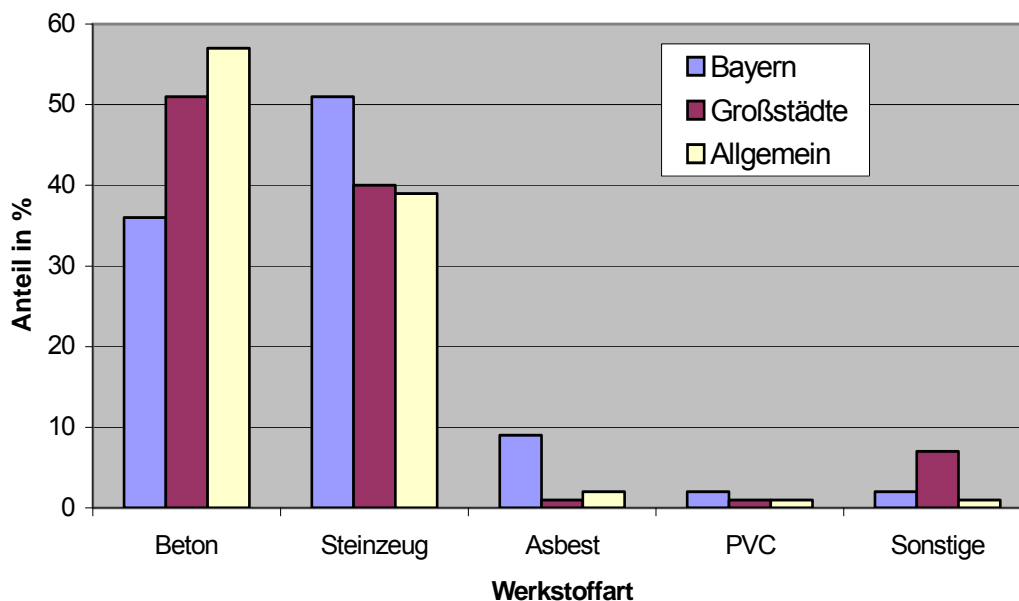


Abbildung 2-17: Werkstoffverteilung der Rohrleitungen in ausgewählten deutschen Großstädten, Bayern und als Mittel im Jahr 1983 [48]

Allgemein lassen sich die Materialien der einzelnen Leitungsarten und die üblichen Nennweiten nach **Tabelle 2-13** einordnen.

Tabelle 2-13: Rohrwerkstoffe und Durchmesser unterschiedlicher Leitungsarten [48]

Leitungsart	Werkstoff	Übliche Durchmesser [mm]
Telefon	Kabel – freiliegend – in PVC-Rohren – in Betonformsteinen	≥ 10 ≤ 100
Elektro	Kabel mit – Blechmantel – Kunststoff, schwarz	≥ 50
Gas	Stahlrohr PVC-Rohr Gußrohr	≥ 40 ≤ 200
Wasser	PE-Rohr (Hausanschlüsse) Stahlrohr Gußrohr	≥ 38
Fernwärme	Stahlrohre mit Isolierung	≥ 125
Signalkabel (für Verkehrsanlagen)	Kabel, diverse Ausführungen	≥ 30
Rohrpost	Stahlrohr, PVC-Rohr	≥ 150

2.2.9 Leitungslage

Die Anordnung bzw. Lage der Leitungen im Straßenquerschnitt unterliegen festen Vorgaben. So wird nach DIN 1998 der Bereich des Bürgersteiges in verschiedene Zonen gemäß **Abbildung 2-18** aufgeteilt. In der **Tabelle 2-14** sind verschiedene Materialien und Verlegetiefen für die einzelnen Zonen angegeben. Die Tiefe der Abwasserleitungen variieren je nach Standort.

Grundsätzlich sind folgende Überdeckungshöhen von Abwässerkanälen bei Mischwasserkanälen (KM) gebräuchlich: Die Normaltiefe von Abwässerkanälen liegt in Geschäftsstraßen bei 3,0 m, in Wohnstraßen 2,5 m, jeweils 0,5 m über der Mindesttiefe. In kleineren Städten und Vororten liegt die Normaltiefe bei 2,0 m, wobei die Mindesttiefe 1,75 m beträgt. Bei einem Trennsystem liegen die Regenwasserkanäle (KR) in einer Tiefe von 1,3 bis 1,7 m über den Schmutzwasserkanälen (KS). Die Verlegetiefe von Wasserrohrleitungen richtet sich nach der DIN 19630 u. a. in Abhängigkeit von der Frosteindringtiefe in kalten schneearmen Wintern. Die Überdeckungshöhe liegt zwischen 1,0 bis 1,8 m [50].

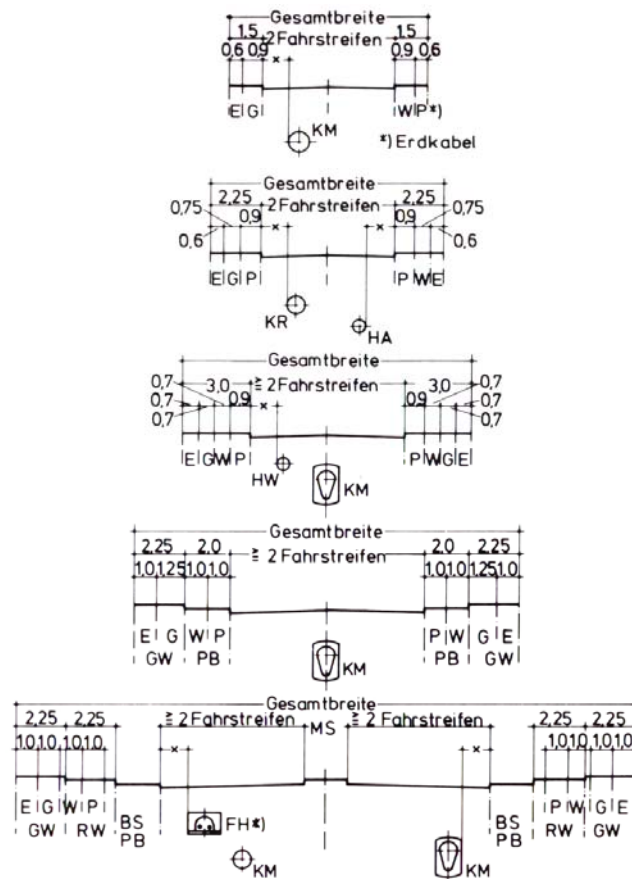


Abbildung 2-18: Unterbringung der Leitungszonen nach DIN 1998 [49]

Tabelle 2-14: Zoneneinteilung nach DIN 1998 [49]

Leistungsarten	Zonenbezeichnung	Lage im Straßenquerschnitt	Zonen-Regelbreite [m]	Zonen-Überdeckung [m]
Leitungen für Elektrizitätsversorgung	E-Zone	1. Zone von der Grundstücksgrenze aus gesehen	0,7	0,6 - 1,6
Gasleitungen	G-Zone	2. Zone von der Grundstücksgrenze aus gesehen	0,7	0,6 - 1,0
Wasserleitungen	W-Zone	3. Zone von der Grundstücksgrenze aus gesehen	0,7	1,0 - 1,8
Leitungen der Deutschen Bundespost (auch Fernmelde- und Signalkabel des Straßenbausträgers sowie Nachrichten-kabel für Polizei und Feuerwehr)	P-Zone	4. Zone von der Grundstücksgrenze aus gesehen (Gehwegbereich zum Fahrbahnrand hin)	0,7	0,5 - 0,6 oder ≥ 1,4
Abwasserleitungen: Mischwasserkanäle (KM) Schmutzwasserkanäle (KS) Regenwasserkanäle (KR) Abwasserdruckleitungen (HA)	-	Fahrbahnbereich (bei Verlegung im Gehweg ist hierfür eine eigene Zone vorzusehen)	-	-
Fernwärmeleitungen (FW)	-	Außerhalb der Fahrbahn. Bei Verlegung in der Fahrbahn sollen Fernwärmeleitungen nicht in der Fahrbahnmitte angeordnet werden.	2,0	1,2

3 Beschreibung der experimentellen Untersuchungen

3.1 Vorbereitung/ Auswahl der Messmethodik

In der ersten Phase wurde eine geeignete Untersuchungstechnologie erarbeitet, die es ermöglichen sollte, einen Temperaturverlauf bzw. Feuchtevorkommen im Straßenaufbau quantitativ zu erfassen. Der Aufbau einer Messmethodik erfolgte derart, dass in verschiedenen Tiefen des Straßenaufbaus Temperatursensoren angebracht wurden. Zusätzlich waren auf Höhe des Planums Feuchtesensoren vorgesehen, um einen eventuellen Wassereintritt in den Straßenoberbau zu erfassen.

Der Messaufbau musste über einen längeren Zeitraum selbständig und regelmäßig Messdaten aufnehmen können. Darüber hinaus war eine möglichst zerstörungsfreie Messung anzustreben. Für die automatische Messung wurden die aufgenommenen Daten über eine Kabelschnittstelle an einem Datensammel-/Datenspeichergerät, dem Datenlogger, weitergegeben und zu bestimmten Zeitpunkten automatisch abgelesen. Insgesamt mussten folgende Kriterien beim Messaufbau berücksichtigt werden:

- Messbereich
- Genauigkeit
- Wiederholbarkeit
- Eigenständigkeit
- Beständigkeit/ Robustheit/ Frostsicherheit
- Antwortzeit
- Zuverlässigkeit
- Temperaturunabhängigkeit
- Lebensdauer

Der Datenlogger führte in zweistündigen Zeitabständen Sensormessungen durch und speicherte die Messergebnisse im internen Speicher. Hierbei mussten für alle Messfühler insgesamt 14 Sensoranschlüsse (Kanäle) je Einsatzort zur Verfügung stehen. Die batteriebetriebene Stromversorgung wurde in Form von Akkus durch regelmäßigen Austausch gesichert. Der Datenlogger und die Stromversorgung wurden in einem spritzwasserdichten und verschließbaren Gehäuse untergebracht. Für das unregelmäßige Auslesen der Daten wurde eine einfache serielle Schnittstelle zwischen Datenlogger und Computer per Kabel genutzt.

3.2 Temperatursensoren

Die Temperatur ist eine physikalische Eigenschaft und gibt den Wärmezustand eines Körpers wieder. Es wird zwischen zwei unterschiedlichen Temperaturarten unterschieden:

- Kinematische Temperatur und
- Strahlungstemperatur.

Zur Umsetzung von Temperaturwerten in elektrische Signale stehen eine Vielzahl von Sensorelementen zur Verfügung [51]. Jedes Element besitzt unterschiedliche Eigenschaften, die maßgebend für den praktischen Einsatz sind. Entsprechend dem jeweils ausgenutzten physikalischen Effekt lassen sich die technischen Temperaturmessverfahren folgendermaßen unterteilen:

- Mechanische Messverfahren (z. B. Ausdehnungsthermometer)
- Elektrische Messverfahren (Temperaturabhängigkeit des Widerstandes bzw. der elektrischen Spannung)
- Berührungslose Verfahren (Messung der Wärmestrahlung mittels optisch-pyrometrischer Messungen)
- Indikatorverfahren (Feststellen einer Grenztemperatur durch das Zusammenschmelzen von metallischen oder keramischen Körpern oder durch den Farbumschlag einer Indikatorflüssigkeit)

Für diese Messung wurde auf das elektrische Messverfahren zurückgegriffen. Hierbei sind zwei Grundprinzipien zu unterscheiden. Zum einen beruht die Technik auf der Temperaturabhängigkeit des Ohmschen Widerstandes eines elektrischen Leiters oder Halbleiters (Widerstandsthermometer). Zum anderen kann die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Spannung, die an der Verbindungsstelle zweier elektrischer Leiter aus verschiedenen Metallen entsteht, erfasst werden (Thermoelement). In diesem Messaufbau wurden Widerstandsthermometer, Typ Pt 100, eingesetzt.

3.3 Feuchtemessung

Übliche Straßenbaustoffe weisen aufgrund ihrer Struktur verschiedene Arten von Wasser auf. Dabei handelt es sich einerseits um chemisch im Baustoff gebundenes Wasser (z. B. Hydrate) mit der höchsten Bindungsenergie, andererseits um monomolekular an den Porenoberflächen adsorbiertes Wasser mit hoher Bindungsenergie (physikalisch-chemische Bindung). Letzteres lässt sich überwiegend nur bei Trocknung mit hoher Temperatur vom Baustoff trennen. Mit ansteigender Stofffeuchte nimmt die Bindungsenergie des aufgenommenen Wassers ab. Neben polymolekular adsorbiertem Wasser und kapillar gebundenem Wasser (physikalisch-kapillare Bindung) liegt in den Poren auch freies Wasser an. Die Bindungsenergie des Wassers

im Baustoff hängt nicht nur von der Art der Bindung, sondern auch von der Temperatur ab.

Für die Feuchtemessung stehen zahlreiche Messmethoden zur Verfügung, zerstörende bzw. zerstörungsfreie Verfahren. Zur ersten Gruppe zählen die gravimetrischen und chemischen Methoden, zur zweiten die thermometrischen, hygrometrischen, akustischen, elektrischen, kernphysikalischen und Infrarotverfahren [52, 53]. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine zuverlässige Feuchtemessung von Baustoffen nicht möglich ist. Neben Einflüssen gelöster Salze, die die Feuchte überlagern, entstehen Störungen durch elektrochemische Vorgänge [53]. Zum Einsatz kam in diesem Fall eine Frequency Domain Reflectometry (FDR)-Sonde, Typ ThetaSonde ML2x. Die Genauigkeit der Feuchtemessung liegt in der Größenordnung ± 5 Vol.-% (**Abbildung 3-1**). Dieses Gerät ist eine Weiterentwicklung der Time Domain Reflectometry (TDR)-Technik mit ähnlicher Genauigkeit bei deutlich geringerem Aufwand und kürzerer Messzeit. Das Verfahren beruht auf einer Geschwindigkeits- bzw. Laufzeitmessung einer elektromagnetischen Welle im Bodenkörper, wobei drei parallele Leiterstäbe gleicher Länge in den Bodenkörper eingebracht werden, durch die dann ein hochfrequenter elektromagnetischer Impuls geführt wird. Aus dem Spannungsverlauf kann schließlich der Wassergehalt in Abhängigkeit von der Dieletrizitätszahl der Bodenmatrix bestimmt werden [55].

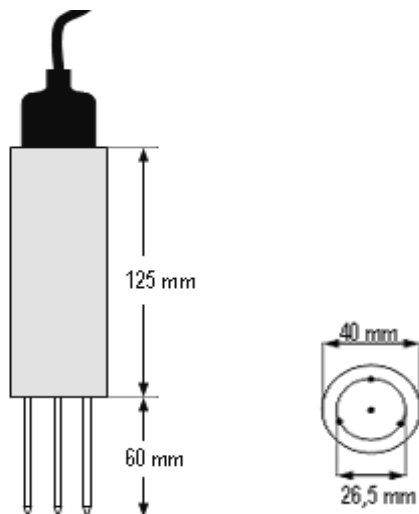


Abbildung 3-1: Ansicht und Draufsicht des FDR-Feuchtesensors, Typ ThetaSonde ML2x [54]

3.4 Einbau der Messsensoren

Für dieses Forschungsprojekt wurden zwei Messstellen ausgesucht, an denen die Temperatur- und Feuchtemessungen durchgeführt werden sollten. Hierbei wurden verstärkt nach Regionen mit niedrigen Temperaturen im Winter gesucht. Ein Messaufbau sollte dabei gut erreichbar sein, damit kurzfristig auf Besonderheiten bzw.

Probleme reagiert werden konnte. Aus diesem Grund wurde jeweils ein Straßenquerschnitt im Hochsauerlandkreis und in der Stadt München gesucht, die beide der Frosteinwirkungszone III gemäß RStO zugeordnet werden können. Nach einer örtlichen Besichtigung wurde die L776 in Bad Fredeburg sowie die Tulbeckstraße in München ausgewählt. Hierbei handelt es sich um Straßen, die wasserundurchlässige Randbereiche und geschlossene seitliche Bebauung sowie Entwässerungseinrichtungen aufweisen. Weitere Kenndaten, ein Lageplan sowie Fotos sind in **Tabelle 3-1** und **Abbildung 3-2** bis **Abbildung 3-5** dargestellt.

Tabelle 3-1: Kenndaten der beiden Messstationen in München und Bad Fredeburg

Kennwert	München-Zentrum	Bad Fredeburg (Schmallenberg)
Straße	Tulbeckstraße	L776
Ort	Haus-Nr. 6/7	Höhe Amtsgericht
Höhe üNN	515 m	450 m
Untergrund	Schüttgut/ RC-Material	Fels
Grundwasserstand	> 8 m	nicht bekannt
Einwohnerzahl	1.256.316 (Stand 2001)	4.113 (Stand 2004)
Bebauungsart	vierstöckig	zweistöckig
Straßenkategorie nach RAS-N [56]	Anliegerstraße	Hauptverkehrsstraße

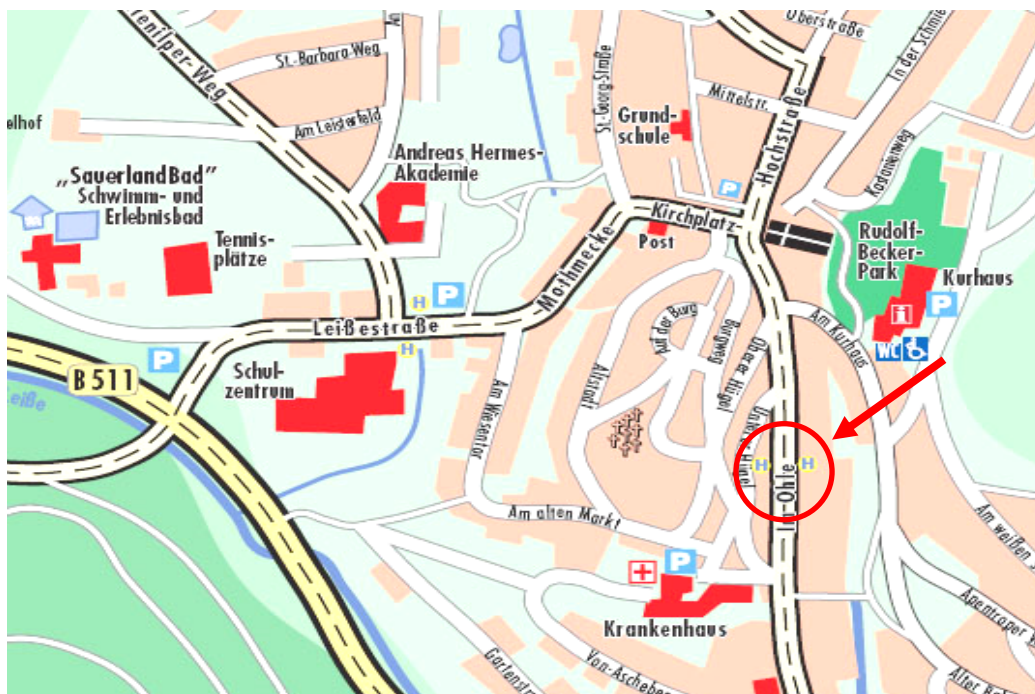


Abbildung 3-2: Lageplan der Messstelle auf der L776 in Bad Fredeburg [57]



Abbildung 3-3: L776 in Bad Fredeburg in Höhe des Amtsgerichts am 05.02.2004



Abbildung 3-4: Lageplan der Tulbeckstraße in München [58]



Abbildung 3-5: Tulbeckstraße in München am 15.01.2004

Der Straßenaufbau dieser zwei Straßen hat sich wie in den **Abbildungen 3-6** und **3-7** dargestellt ergeben:

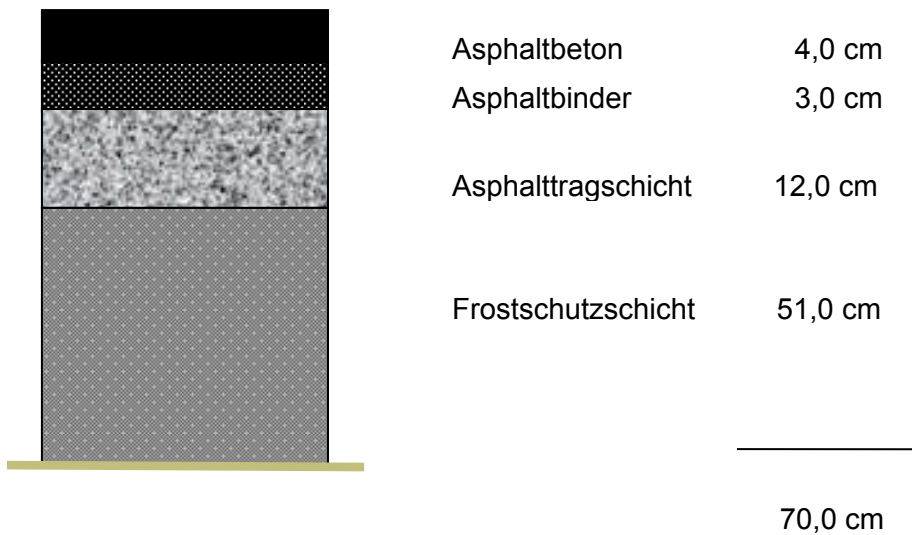


Abbildung 3-6: Aufbau des Straßenoberbaus der L776 in Bad Fredeburg

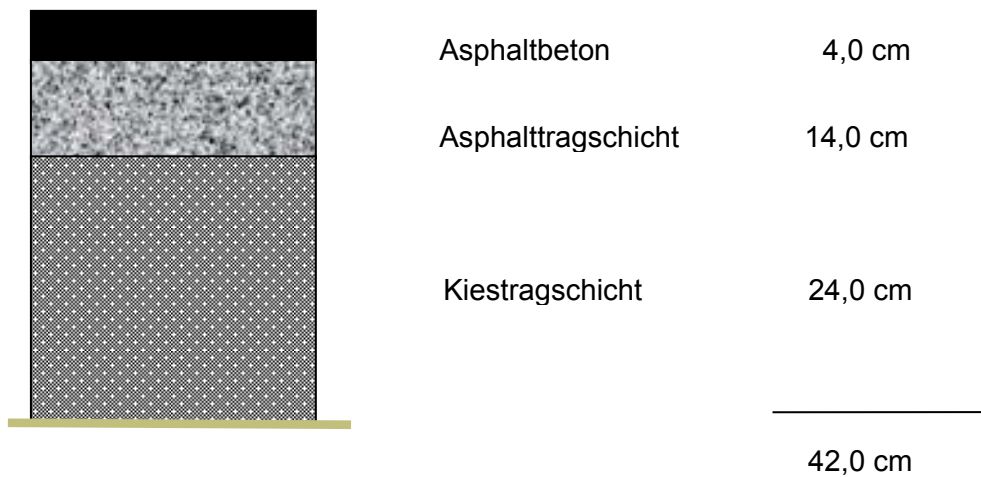


Abbildung 3-7: Aufbau des Straßenoberbaus der Tulbeckstraße in München

Für die Simulation wurden folgende Ver- und Entsorgungsleitungen berücksichtigt:

- Abwasserleitung

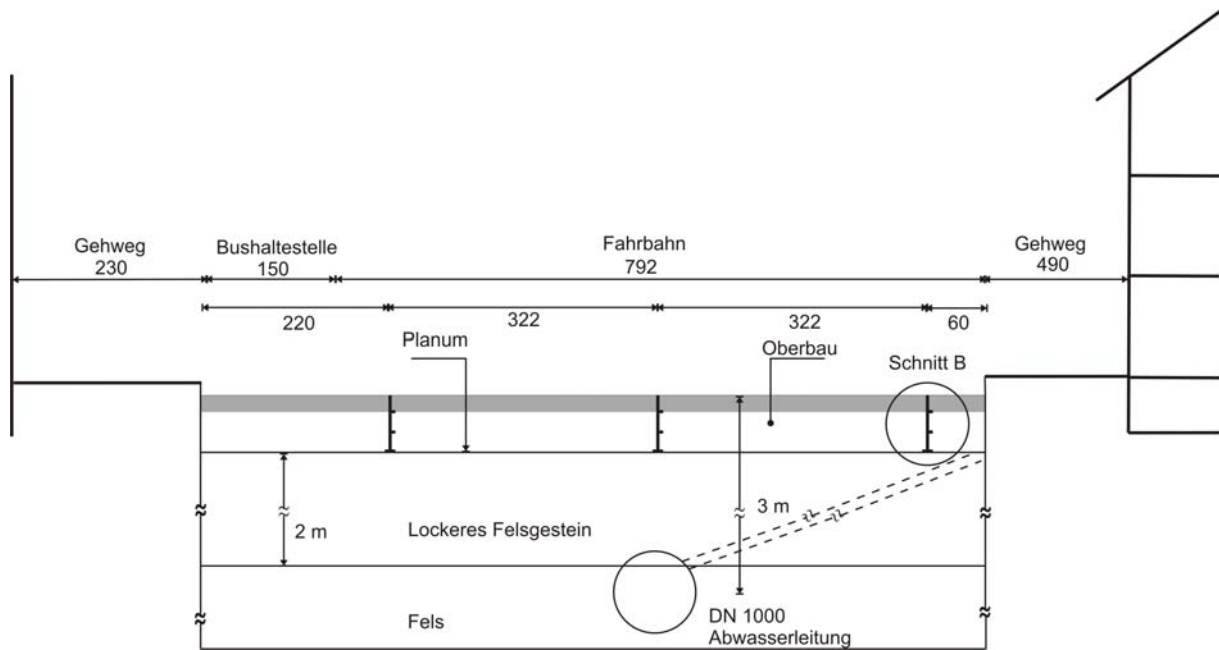


Abbildung 3-9: Querschnitt der L776 in Bad Fredeburg an der Messstelle mit Lage der Sensoren

Da auch der Einfluss der Ver- und Entsorgungsleitungen auf die Bodentemperaturen geprüft werden sollte, wurde über den gesamten Querschnitt der Straße die Temperaturverteilung gemessen. Die Temperatursensoren wurden im rechten bzw. linken Fahrbahnrand sowie in Fahrbahnmitte in drei Tiefenlagen der ungebundenen Schichten des Straßenaufbaus angeordnet. Die genaue Verteilung der Sensoren an beiden Messstellen ist anhand der Detailskizzen Schnitt A für die Tulbeckstraße sowie Schnitt B für die L776 in Bad Fredeburg in **Abbildung 3-10** schematisch dargestellt. Der Einbau der Messsensoren erfolgte mit Hilfe eines Bohrloches in der Asphaltbefestigung. Die Bohrung sollte zum einen so klein wie möglich ausgeführt werden, um die Schädigung der Straße und somit auch den Einfluss auf die Messung so gering wie möglich zu halten. Zum anderen musste das Bohrloch aber auch so dimensioniert werden, dass ein problemloses Arbeiten und Einsetzen der Sensoren gewährleistet werden konnte. In die gebundenen Schichten wurde dazu mit einem Bohrkerngerät ein Bohrloch von 150 mm Durchmesser gebohrt. Nach Ausheben der ungebundenen Schichten wurden die Sensoren lagenweise eingesetzt und mit einem Korngemisch 0/5 lagenweise verfüllt. Die Leitungen der Sensoren wurden nach oben abgeführt. Im Bereich der gebundenen Schichten wurde in München mit Kaltasphalt und in Bad Fredeburg mit Schnellbeton aufgefüllt. Die Leitungen der jeweiligen Sensoren wurden über eine quer zur Straße angelegte Nut in 5 bis 8 cm Tiefe gesammelt an einen Straßenrand geführt, wo sie an den Datenlogger angeschlossen wurden. Abschließend wurden die Nut und die Bohrlöcher mit Bitumen vergossen. Ne-

ben den eingebauten Temperatur- und Feuchtesensoren wurde jeweils ein Lufttemperatursensor angebracht.

Die Messungen wurden während der zwei Winter 2003/2004 sowie 2004/2005 durchgeführt. Aufgrund von Verzögerungen bei der Lieferung wurden die Sensoren erst am 15.01.2004 in München sowie am 05.02.2004 in Bad Fredeburg eingebaut.

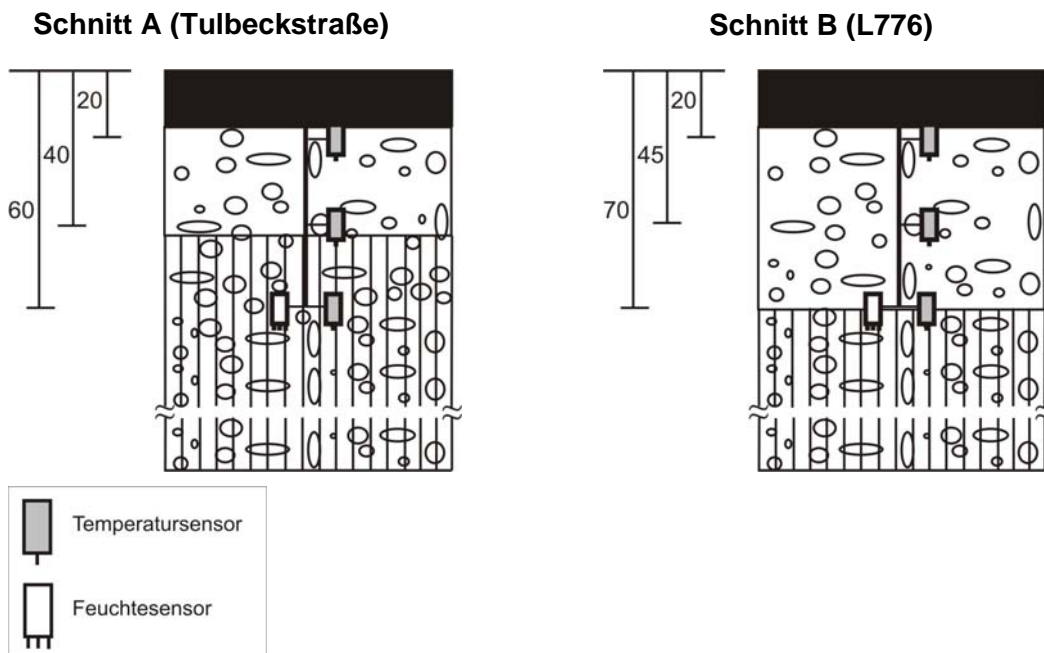


Abbildung 3-10: Schematische Darstellung der Sensorenlage im Straßenquerschnitt anhand der Schnitte A und B aus den Abbildungen 3-8 und 3-9

4 Beurteilung der Lufttemperaturen

Für die Auswertung der gemessenen Lufttemperaturwerte sind Messwerten von umliegenden Messstellen herangezogen worden, um die eigenen Messwerte zu verifizieren. Des Weiteren soll anhand der Werte einer Außerortsmessstelle der Einfluss der höheren urbanen Umgebungstemperaturen durch Bebauung usw. untersucht werden. Um die Überschaubarkeit der Diagramme zu gewährleisten, werden jeweils nur die täglichen gemessenen minimalen Temperaturen jeweils bis zum 15. März herangezogen. Dieser Zeitpunkt wird nach Mais als Wechsel zur nächsten von sechs gleichartigen Klimaperioden im Jahr beurteilt [59].

4.1 Definition des Frostindex

Inwieweit die gemessenen Temperaturen im Straßenoberbau repräsentativ sind, lässt sich aus der Strenge des Winters 2003/04 bzw. 2004/05 im Vergleich zu den vergangenen Jahren herleiten. Die Strenge des Winters wird anhand des Frostindex gemessen und bewertet [14]. Unter dem Frostindex wird gemäß **Abbildung 4-1** die

Summe der mittleren täglichen Lufttemperaturen über die Zeitdauer der Einwirkung in der Einheit Gradtage [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$] verstanden.

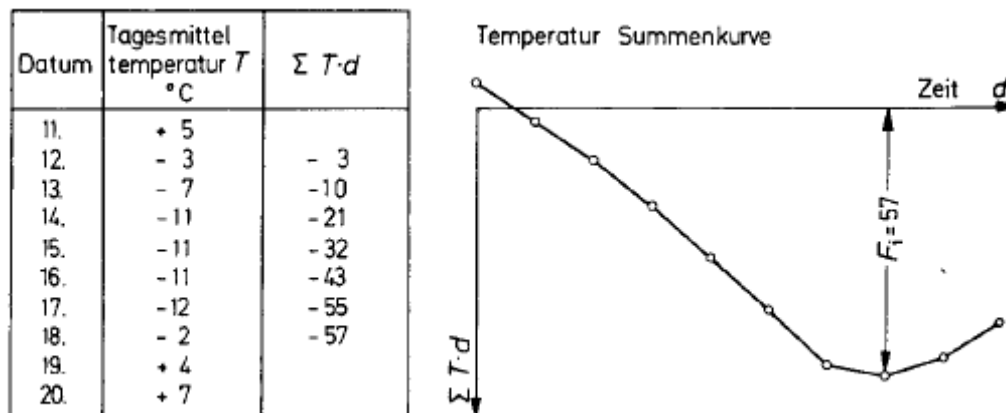


Abbildung 4-1: Beispiel zur Ermittlung des Frostindex [60]

Die mittlere tägliche Temperatur der Luft T_L wird im Allgemeinen stationär gemessen. Dabei sollen die jeweiligen Messstationen nicht durch Sonneneinstrahlung, Gebäude oder andere Wärmestrahlungsquellen beeinflusst werden. Aus den Bestimmungen des Deutschen Wetterdienstes setzt sich T_L aus den Temperaturablesungen T_7 um 7 Uhr, T_{14} um 14 Uhr sowie T_{21} um 21 Uhr folgendermaßen zusammen:

$$T_L = \frac{1}{4} \cdot (T_7 + T_{14} + 2 \cdot T_{21})$$

Die Temperaturen werden in einer Höhe von 2 Metern über dem Boden gemessen, um den Einfluss der Straßendecke bzw. einer Schneedecke auszuschließen. Die Abgrenzung aufgrund kurzer zwischenzeitlicher Auftauphasen wird unterschiedlich gehandhabt. In Deutschland werden Frostperioden dann als zusammenhängend angesehen, wenn sie nicht durch mehr als zwei aufeinander folgende Tage im positiven Temperaturbereich von weniger als 1°C unterbrochen werden [61].

4.2 Lufttemperaturwerte in München

Für die Bestimmung des Frostindex in München wurden neben den eigenen Messwerten vom Deutschen Wetterdienst die Stationen im Münchener Zentrum sowie im Außenbezirk am Münchener Flughafen herangezogen. Die geographischen Daten der Messstationen sind in **Tabelle 4-1** dargestellt.

Tabelle 4-1: Geographische Daten der Messstationen Tulbeckstraße, München-Zentrum und München-Flughafen (Erdinger Moos)

Station	Tulbeckstraße	München-Zentrum	München-Flughafen
Geographische Lage	Breite 48°08' Länge 11°30'	Breite 48°10' Länge 11°30'	Breite 48°22' Länge 11°48'
Höhe üNN	515 m	515 m	446 m

Die eigenen Lufttemperaturmesswerte in der Tulbeckstraße lassen sich hierbei nach **Abbildung 4-2** und **Abbildung 4-3** sehr gut mit den Messwerten von München-Zentrum vereinbaren. Auffallend sind die in den starken Frostnächten erheblich tieferen Temperaturen am Münchener Flughafen gegenüber den Innerortsmessstellen. Für eine normale Wetterlage wird mit einer Lufttemperaturverminderung von im Mittel 0,7 °C pro 100 Meter Höhe gerechnet, so dass für den Münchener-Flughafen aufgrund seiner niedrigeren Höhenlage zunächst höhere Temperaturen zu erwarten wären.

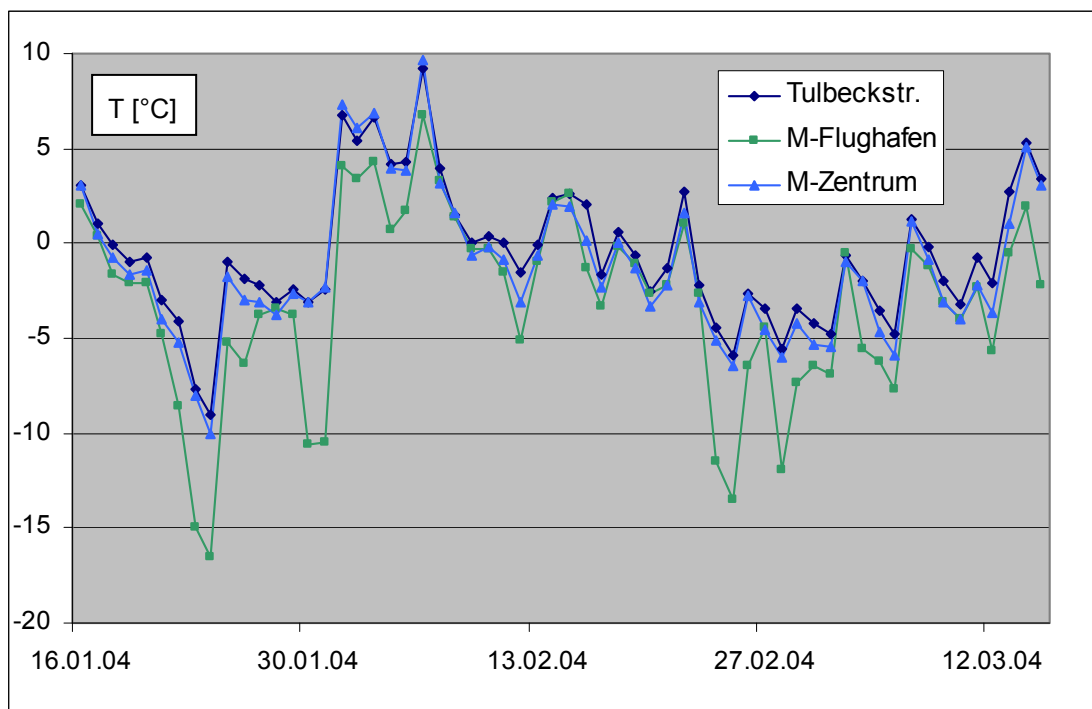


Abbildung 4-2: Minimale tägliche Lufttemperaturen in München im Winter 2003/04 vom 16.01. – 15.03.2004

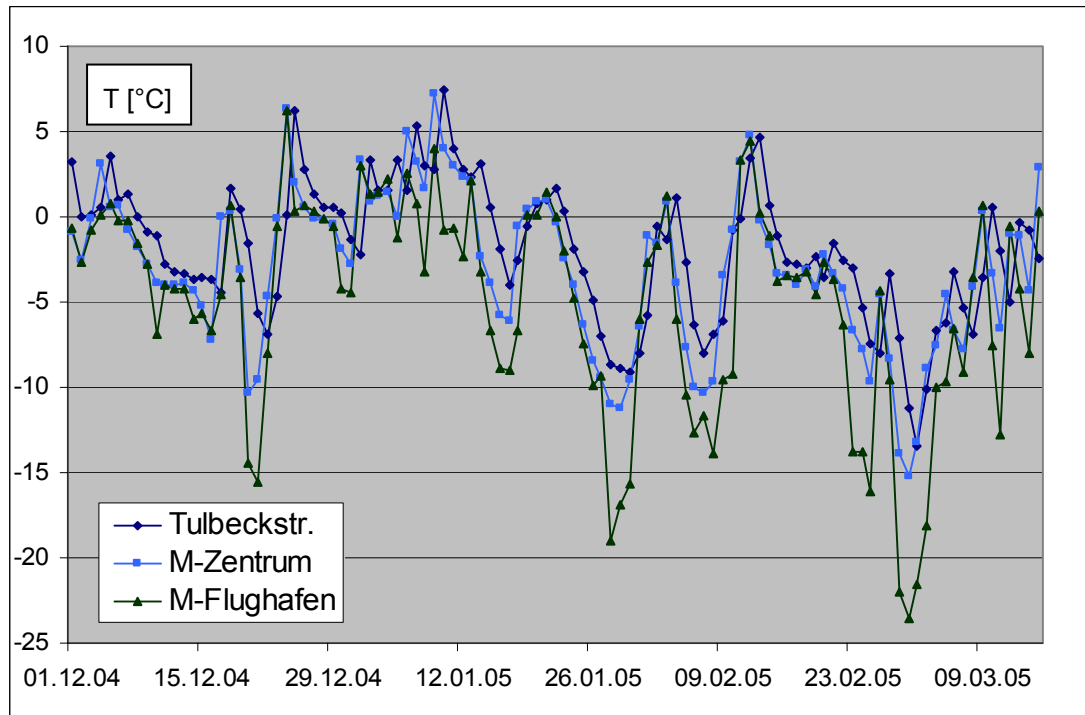


Abbildung 4-3: Minimale tägliche Lufttemperaturen in München im Winter 2004/05 vom 01.12.04 -15.03.05

Im Winter 2003/04 sind keine größeren Frostperioden aufgetreten. Aus der **Abbildung 4-4** sind anhand des ermittelten Frostindex ab dem Messbeginn am 15.01.04 zwei festzustellende längere Frostperioden mit einem Frostindex FI von maximal 45 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ erkennbar.

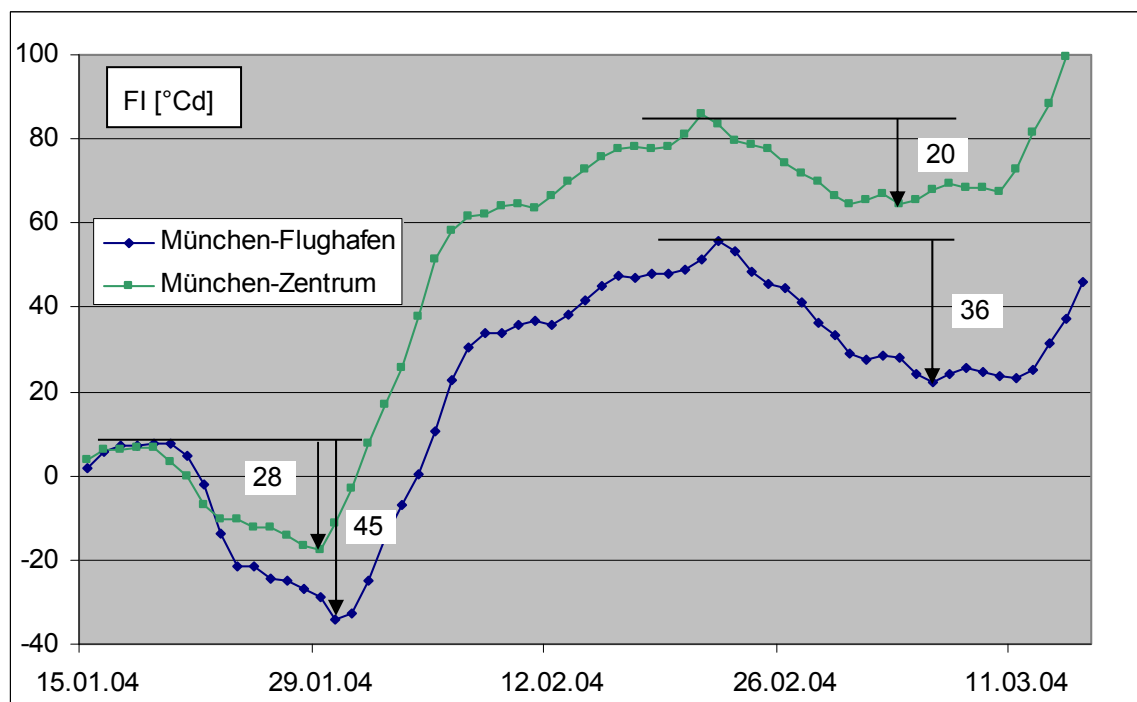


Abbildung 4-4: Frostindex (FI) für den Winter 2003/04 vom 15.01.04 - 15.03.04 in München

Im Winter 2004/05 wurden nach **Abbildung 4-5** im Februar/März 2005 eine längere Frostperiode mit einem FI von über 100 °C·d ermittelt.

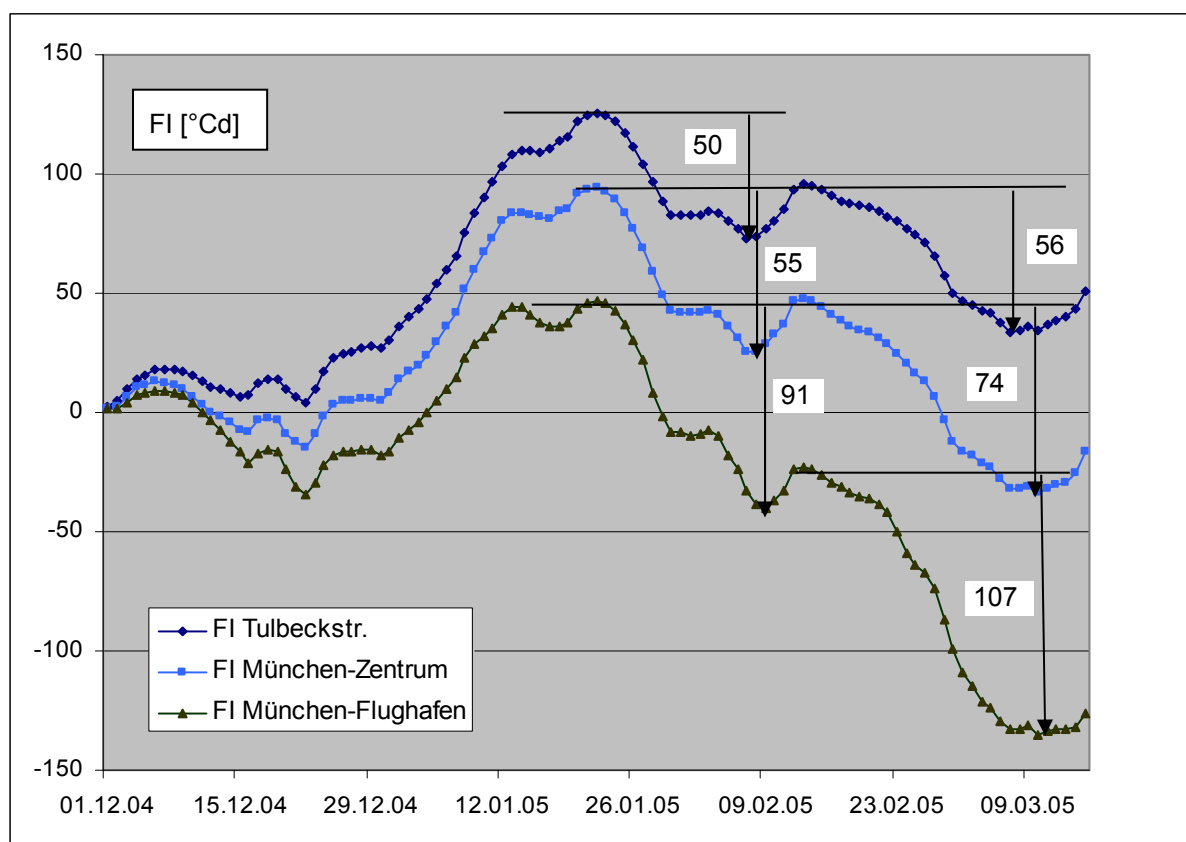


Abbildung 4-5: Frostindex (FI) für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 - 15.03.2005 in München

4.3 Lufttemperaturwerte in Bad Fredeburg

Die eigenen Lufttemperaturmesswerte an der L776 in Bad Fredeburg konnten mit einer benachbarten Messstelle am Skiort Schmallenberg-Bödefeld sowie der Station Lüdenscheid vom Deutschen Wetterdienst (DWD) gemäß **Tabelle 4-2** verglichen werden. Für den Winter 2004/05 konnte wegen Stilllegung nicht mehr auf die Daten der Messstation Schmallenberg-Bödefeld zurückgegriffen werden.

Tabelle 4-2: Geographische Daten der Messstationen Lüdenscheid und Schmallenberg-Bödefeld

Station	Bad Fredeburg	Lüdenscheid	Schmallenberg-Bödefeld
Geographische Lage	Breite 51°13' Länge 08°24'	Breite 51°13' Länge 07°38'	Breite 51°15' Länge 08°22'
Höhe üNN	450 m	444 m	440 m

Die Messwerte lassen sich gemäß **Abbildung 4-6** und **Abbildung 4-7** sehr gut vergleichen. Auch hier sind außerorts in den starken Frostnächten erheblich tiefere Temperaturen von bis zu 4 - 5 K aufgetreten.

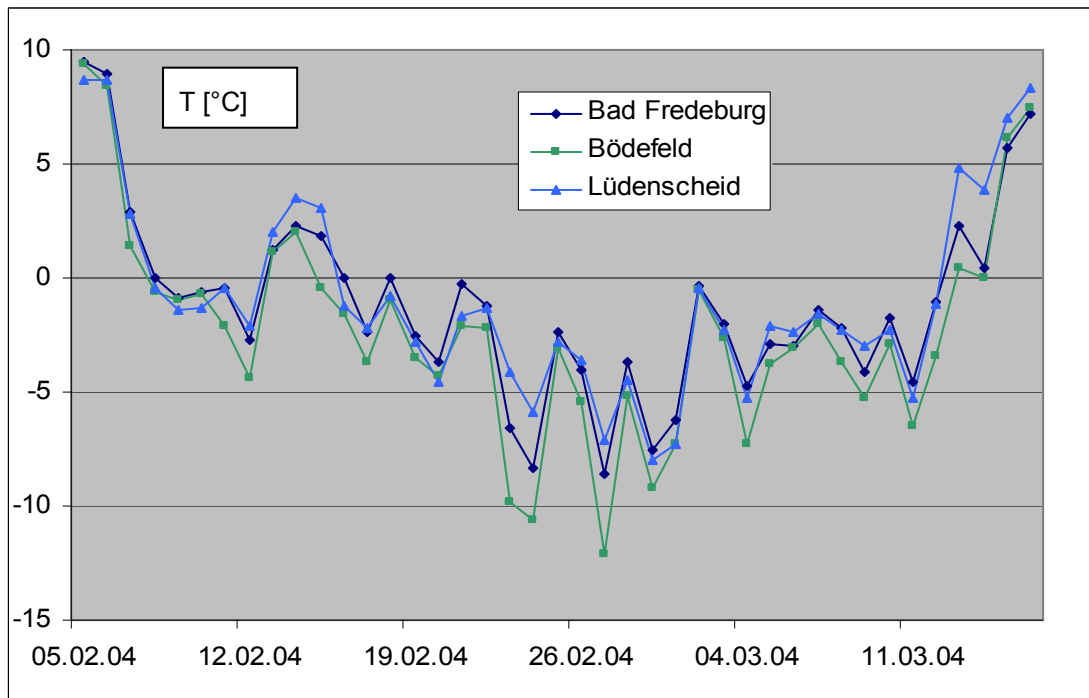


Abbildung 4-6: Minimale tägliche Lufttemperatur in Bad Fredeburg, Bödefeld und Lüdenscheid im Winter 2003/04 vom 05.02.04 – 15.03.04

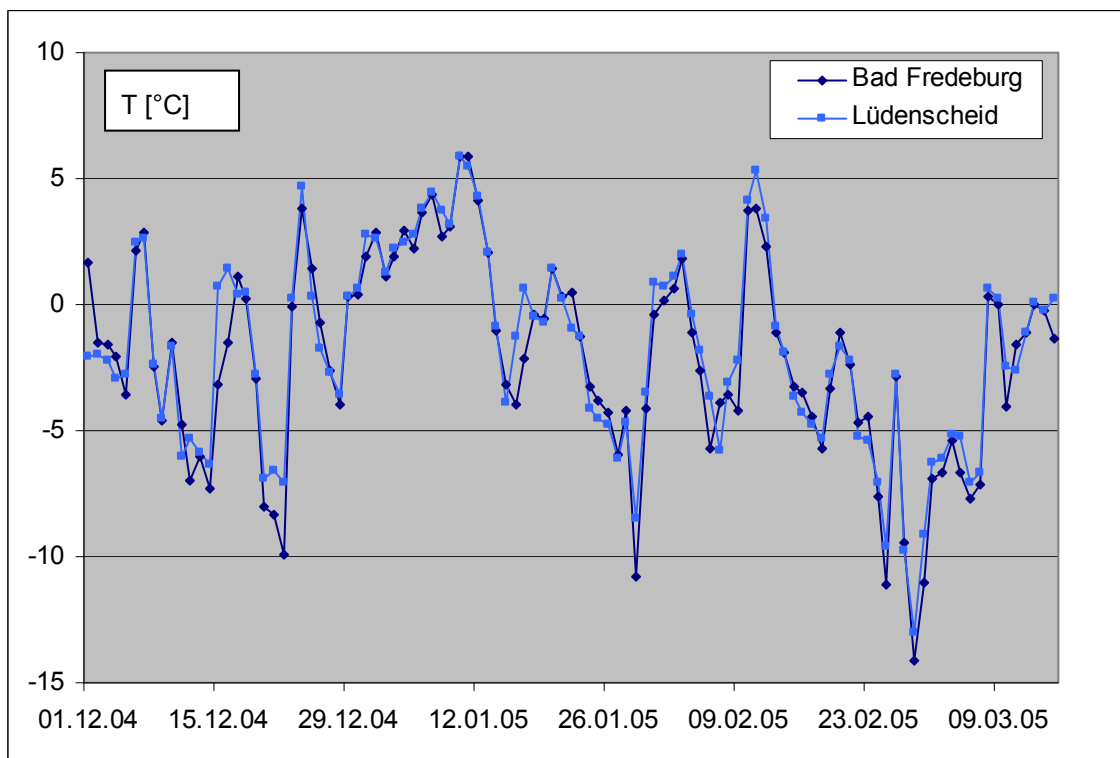


Abbildung 4-7: Minimale tägliche Lufttemperatur in Bad Fredeburg und Lüdenscheid im Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005

Im Winter 2003/04 sind keine größeren Frostperioden aufgetreten. Für die Zeitspanne von Beginn der Messung am 05.02. bis 15.03.04 ist in Bad Fredeburg gemäß **Abbildung 3-8** einmal eine Frostperiode mit einem Frostindex FI von rd. 20 °C·d aufgetreten. Im Winter 2004/05 wurden gemäß **Abbildung 3-9** rd. 75 °C·d ermittelt.

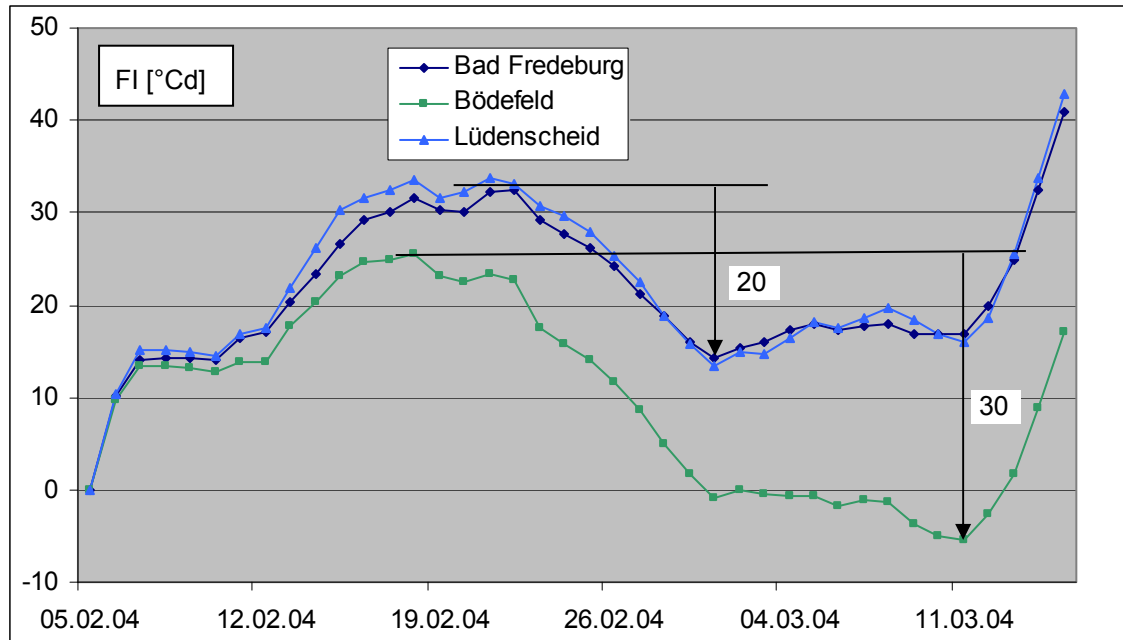


Abbildung 4-8: Frostindex (FI) für den Winter 2003/04 vom 05.02.04 - 15.03.04 für Bad Fredeburg, Bödefeld und Lüdenscheid

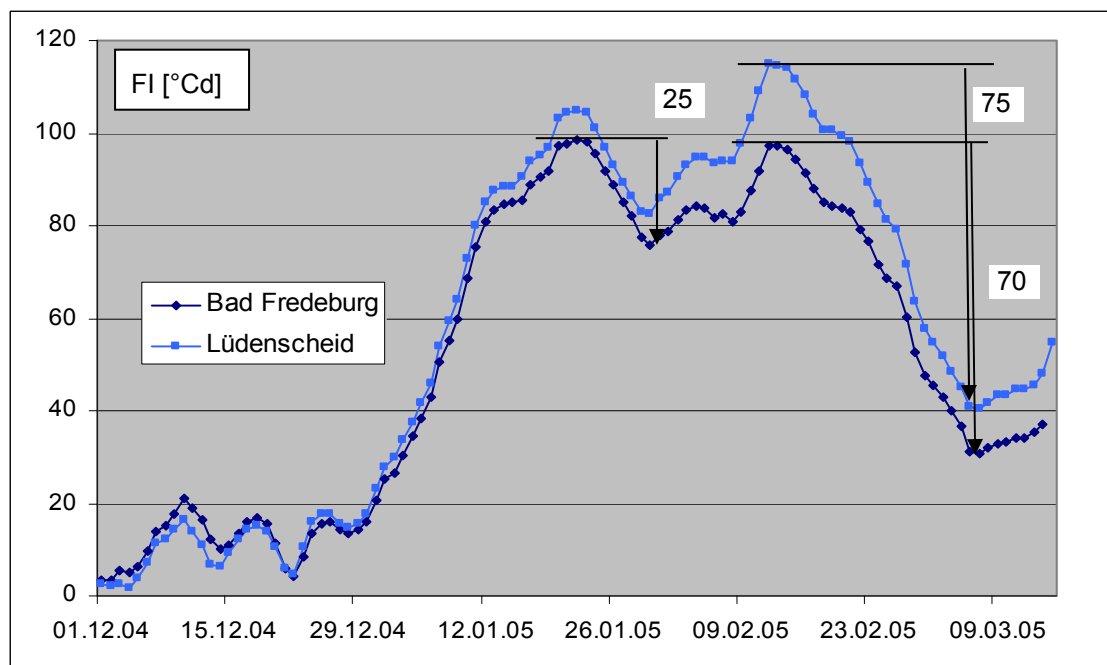


Abbildung 4-9: Frostindex (FI) für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 - 15.03.05 für Bad Fredeburg und Lüdenscheid

4.4 Bewertung der Messungen der Lufttemperatur

Die Aufnahme von historischen Wetterdaten an der Station München-Flughafen ergeben gemäß **Abbildung 4-10**, dass es in den letzten 13 Jahren kaum Unterschiede bei den Durchschnittstemperaturen während der untersuchten Winter gab. Der Winter 2004/05 gehörte zu den im Vergleich strengeren Wintern, während der Winter 2003/04 tendenziell milder war.

Insgesamt lassen sich mit den Messdaten aus den Wintern 2003/04 und 2004/05 repräsentative Auswertungen durchführen. Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Frosteindringtiefen sind in Abhängigkeit von den einzelnen Frostphasen zu bewerten.

In der **Tabelle 4-3** sind die Häufigkeiten der erreichten Frostindizes für verschiedene Regionen für den Zeitraum von 1933/34 bis 1981/82 dargestellt. Danach führen die Frostindizes bis max. 50 °C·d im untersuchten Winter 2003/04 zu Frosteindringtiefen, die mehrmals im Jahr in München und dem Hochsauerland (Kahler Asten) erreicht werden, während der Winter 2004/05 mit seinem maximalen Frostindex von über 100 °C·d in München im Schnitt nur rd. alle 5 Jahre erreicht wird.

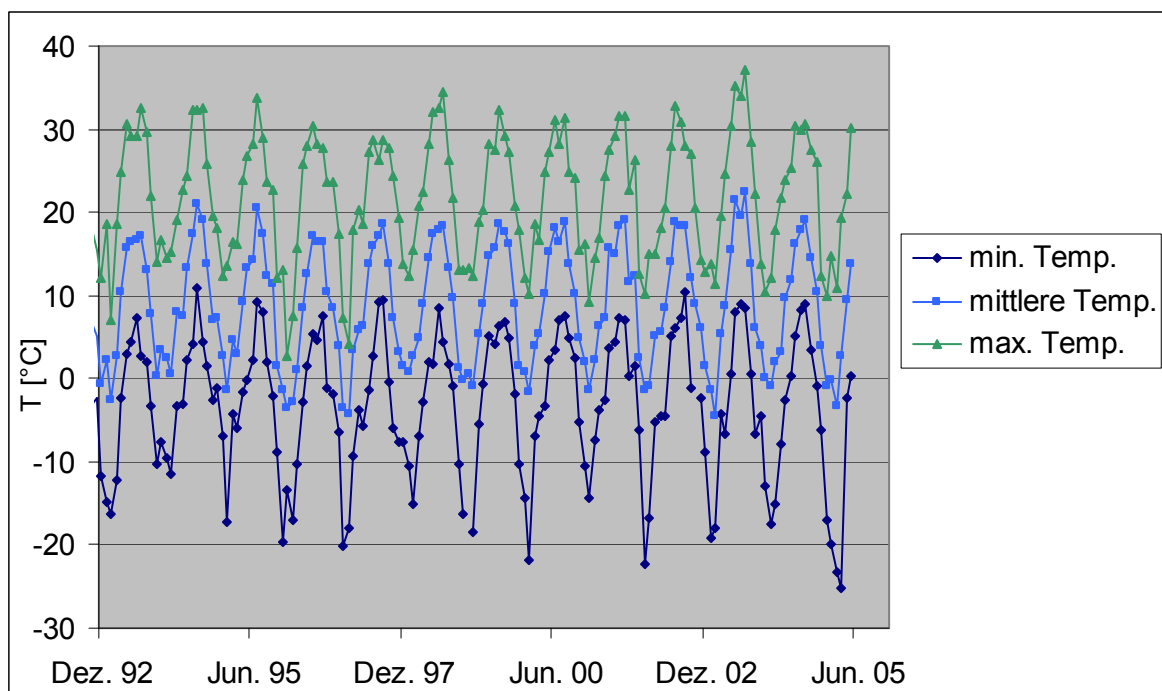


Abbildung 4-10: Durchschnittliche, minimale und maximale Monatswerte der Lufttemperaturen für die Station München-Flughafen von Dezember 1992 – Juni 2005

Tabelle 4-3: Häufigkeit des Auftretens von Kälteperioden pro Jahr in bestimmten Frostindexintervallen von 1933/34 bis 1981/82 [14]

Frostindexintervall	München	Kahler	Bamberg/	Hamburg	Münster
---------------------	---------	--------	----------	---------	---------

		Asten	Nürnberg		
1 - 50	4,702	6,148	4,275	3,872	3,591
51 - 100	0,915	1,111	0,775	0,489	0,273
101 - 150	0,234	0,556	0,300	0,106	0,023
151 - 200	0,191	0,296	0,025	0,043	0
201 - 250	0,064	0,111	0,050	0,043	0,023
251 - 300	0,043	0,148	0	0,021	0,023
301 - 340	0,021	0,074	0,025	0,021	0,045
401 - 500	0,043	0,074	0,050	0,043	0
> 500	0,021	0,037	0,025	0,021	0
Anzahl der untersuchten Jahre	47	27	40	47	44
Anzahl der Kälteperioden	293	231	221	219	175

5 Auswertung der Messdaten der Messsensoren in der Straße

Im Folgenden werden die gemessenen Temperaturen der im Straßenoberbau eingebauten Sensoren für die Winter 2003/04 sowie 2004/05 dargestellt. Für eine geeignete Darstellung der Messwerte werden nicht alle gemessenen Werte herangezogen. Neben den minimalen Tagestemperaturen der untersten Sensorlage in Abhängigkeit von der Lage im Straßenquerschnitt werden im Weiteren nur die Messwerte in der Straßenmitte, die bei beiden Messstellen das niedrigste Temperaturniveau aufweist, ausgewertet. Für eine vollständige Betrachtung aller Messwerte wird auf die beiliegende CD verwiesen.

5.1 L776 in Bad Fredeburg

Die L776 in Bad Fredeburg weist über den gesamten gemessenen Straßenquerschnitt ähnliche Temperaturwerte auf. In der **Abbildung 5-1** und **Abbildung 5-2** sind die jeweiligen Temperaturen in der Tiefe von 70 cm für jeweils eine Winterperiode aufgezeigt. Gründe für das leicht erhöhte Temperaturniveau in den Randbereichen könnten die geringeren Windgeschwindigkeiten in Hausnähe sein, die den Temperaturengleich verlangsamen.

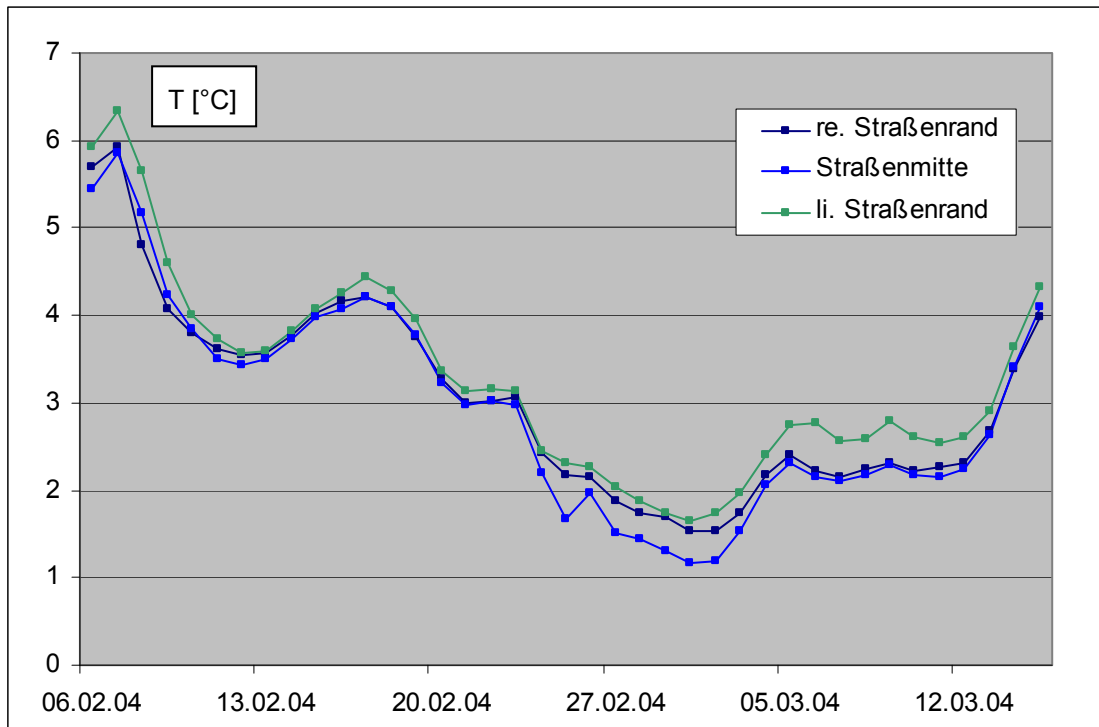


Abbildung 5-1: Temperaturverläufe im Straßenoberbauquerschnitt der L776 in 70 cm Tiefe für den Winter 2003/04 vom 06.02.04 – 15.03.04

Bei der Darstellung der Temperatur in Abhängigkeit von der Tiefe wird in **Abbildung 5-3** und **Abbildung 5-4** repräsentativ die Position in der Straßenmitte dargestellt. Für die oberste Sensorlage in 20 cm Tiefe schwanken die Temperaturwerte erheblich, da durch die gut leitenden gebundenen Schichten noch beträchtliche Einflüsse der Lufttemperatur und Strahlung bis in diese Tiefe reichen. In den tieferen Lagen des Straßenoberbaus herrschen aufgrund des steigenden Einflusses der gleichförmigen Erdwärme gleichmäßigere Temperaturverläufe. In der Kälteperiode Ende Februar 2003 waren die Bereiche in 45 cm Tiefe bereits frostfrei. Während der stärkeren Frostperiode im Frühjahr 2005 wurde für eine kurze Phase der vollständige Straßen-
aufbau von 70 cm durchgefroren.

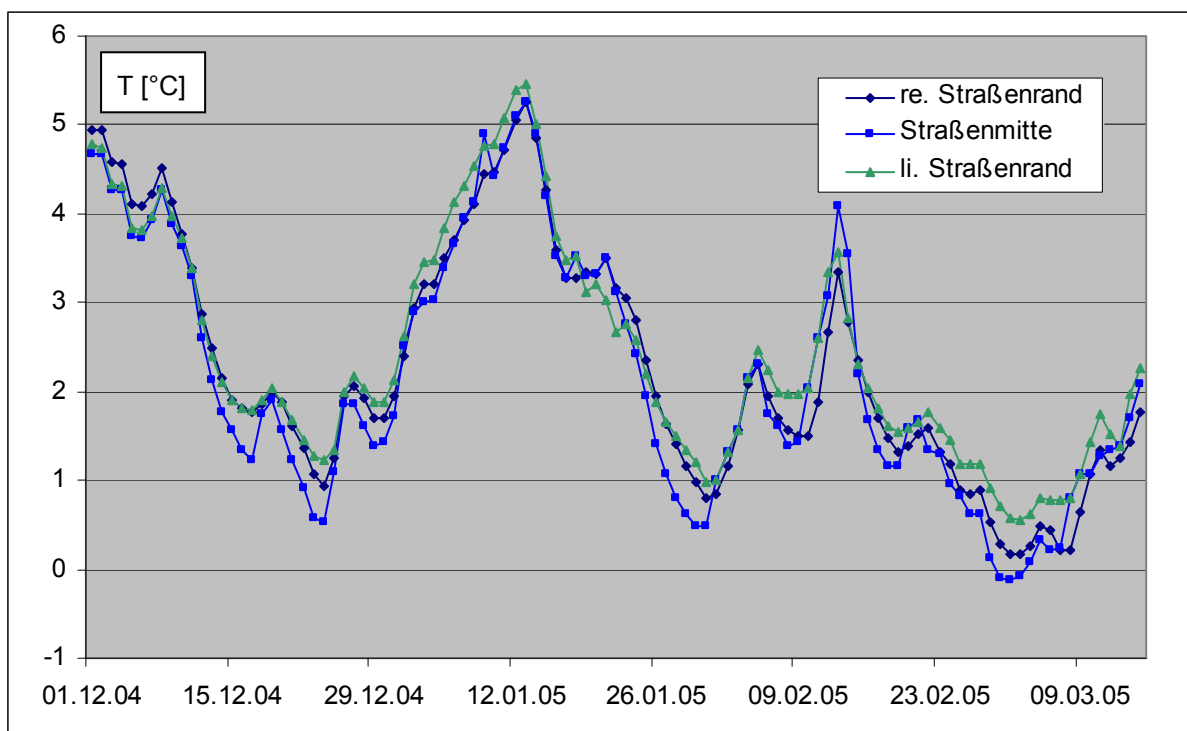


Abbildung 5-2: Temperaturverläufe im Straßenoberbauquerschnitt der L776 in 70 cm Tiefe für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 -15.03.05

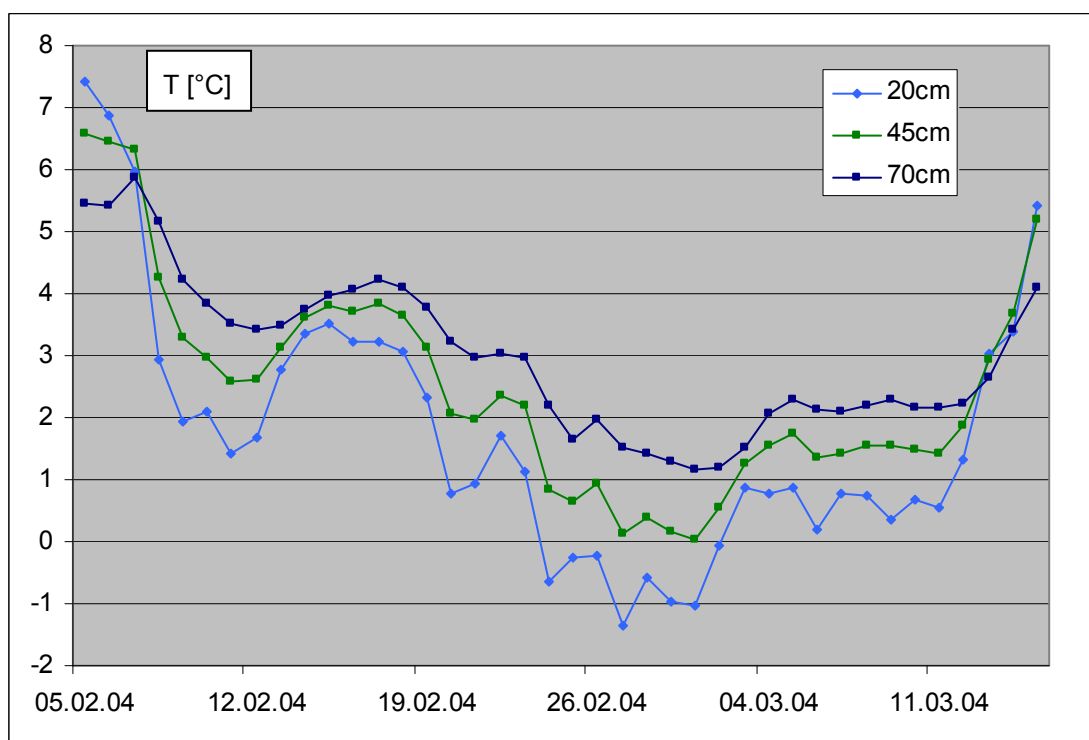


Abbildung 5-3: Temperaturwerte im Straßenoberbau der L776 in Bad Fredeburg in Straßenmitte für den Winter 2003/04 vom 06.02.04 – 15.03.04 in Abhängigkeit von der Tiefe

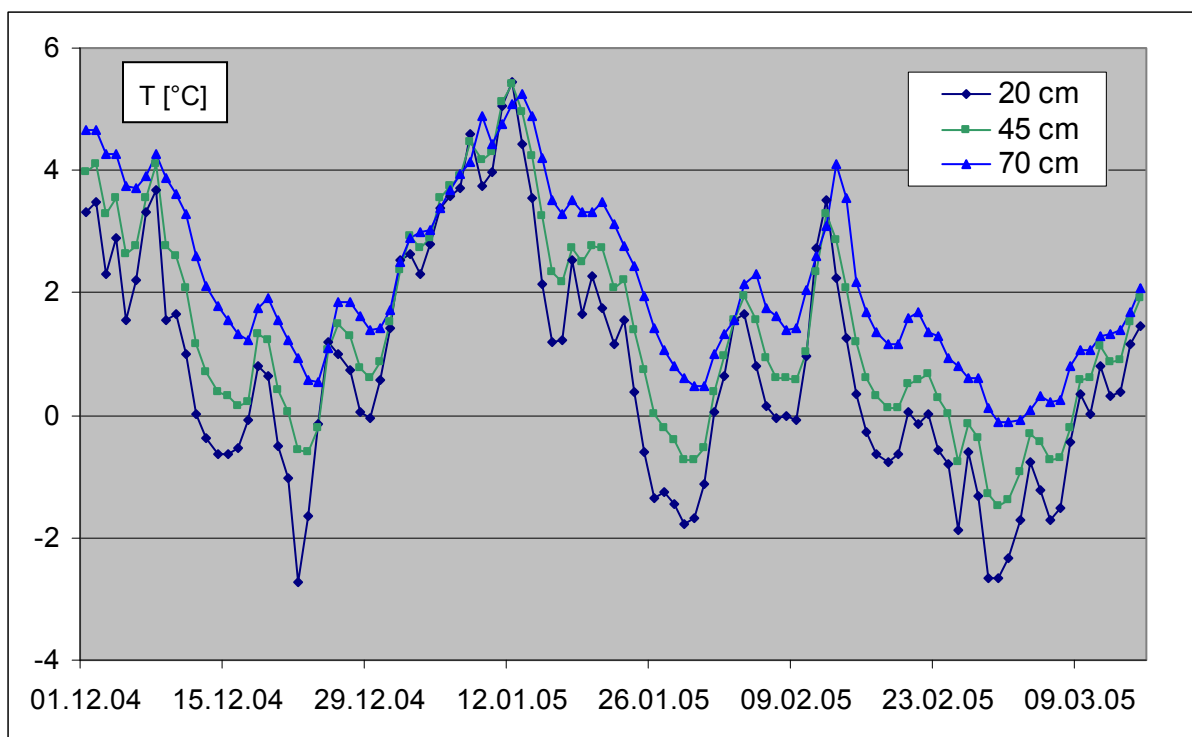


Abbildung 5-4: Temperaturwerte im Straßenoberbau der L776 in Bad Fredeburg in Straßenmitte für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05 in Abhängigkeit von der Tiefe

5.2 Tulbeckstraße in München

In München ist das Temperaturniveau der äußeren Sensorlagen in der Tulbeckstraße im Winter höher als in der Straßenmitte. Gründe hierfür scheinen die eng anliegenden Häuserwände und die beidseitig liegenden Gasleitungen sowie die parkenden Autos, die ein nächtliches Abstrahlen der Wärme aus der Straße verhindern, zu sein. In der **Abbildung 5-5** und **Abbildung 5-6** werden die Sensoren der untersten Lage in 60 cm Tiefe miteinander über die Zeit verglichen. Die Temperaturen in Straßenmitte liegen gegenüber den Straßenrändern in beiden Wintern gerade in den Frostphasen deutlich niedriger.

Bei Betrachtung der Messungen in der Straßenmitte in Abhängigkeit von der Tiefe fallen gemäß **Abbildung 5-7** nur die Messwerte direkt unterhalb der gebundenen Schichten in 20 cm Tiefe zeitweise unter die 0 °C-Grenze. Die Tiefen ab 40 cm bleiben im Winter 2003/04 dauerhaft frostfrei.

Auffällig für die Winterperiode 2004/05 ist gemäß **Abbildung 5-8** die stärkere Frostphase im Frühjahr 2005. Die Temperatur in der Straßenmitte in 60 cm Tiefe fällt über einen längeren Zeitraum unter die 0 °C-Grenze. Dagegen sind die Straßenränder in dieser Tiefe frostfrei. Der Kälteeinbruch ist hier - im Gegensatz zur Straßenmitte - in

der Temperaturkurve nicht erkennbar. Die Frosteindringung wird in diesen Teilen der Straße stark abgemindert.

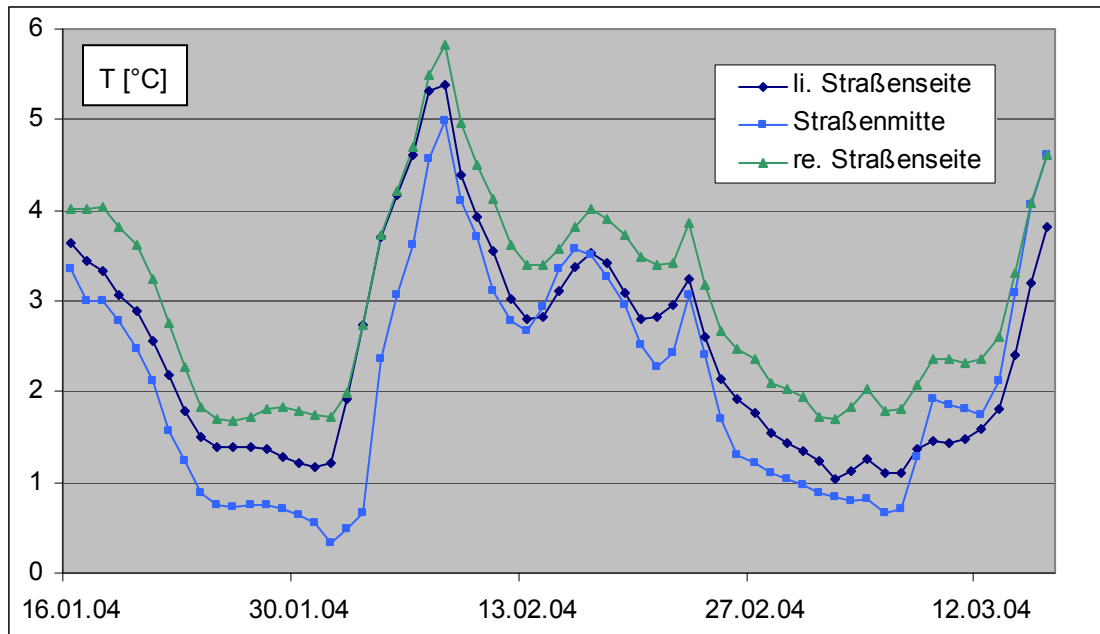


Abbildung 5-5: Temperaturverläufe im Straßenquerschnitt der Tulbeckstraße in 60 cm Tiefe für den Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04

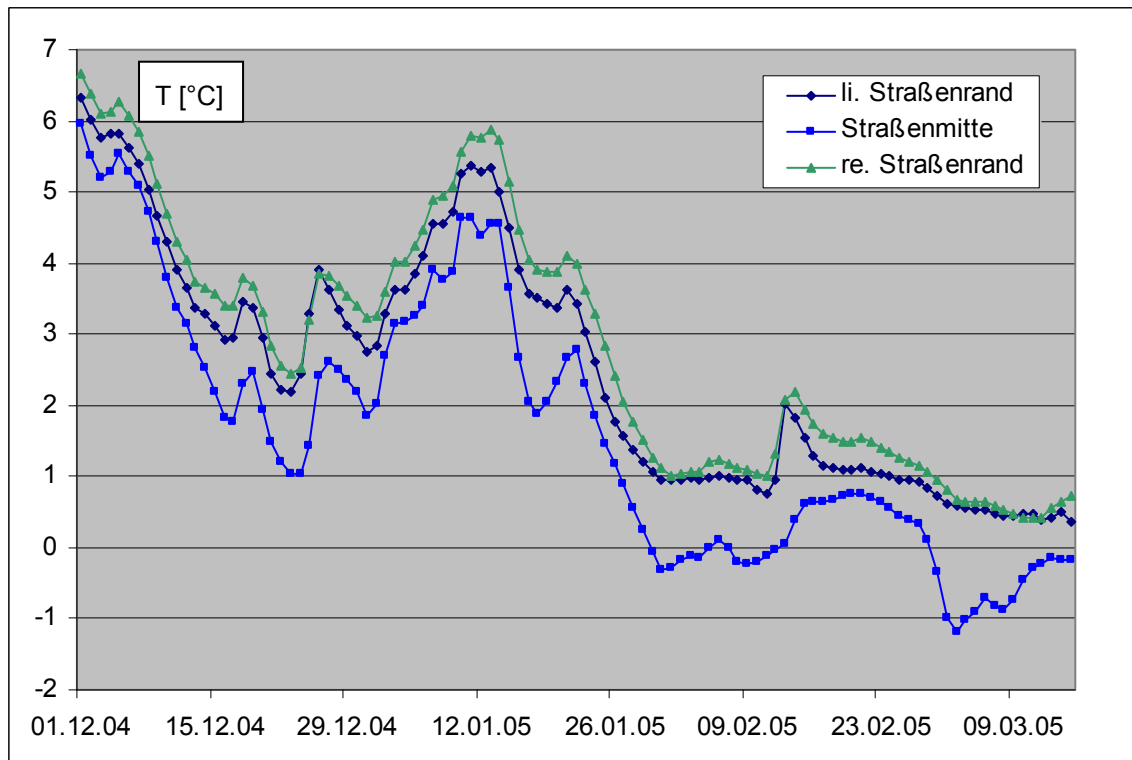


Abbildung 5-6: Temperaturverläufe im Straßenoberbauquerschnitt der Tulbeckstraße in 60 cm Tiefe für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05

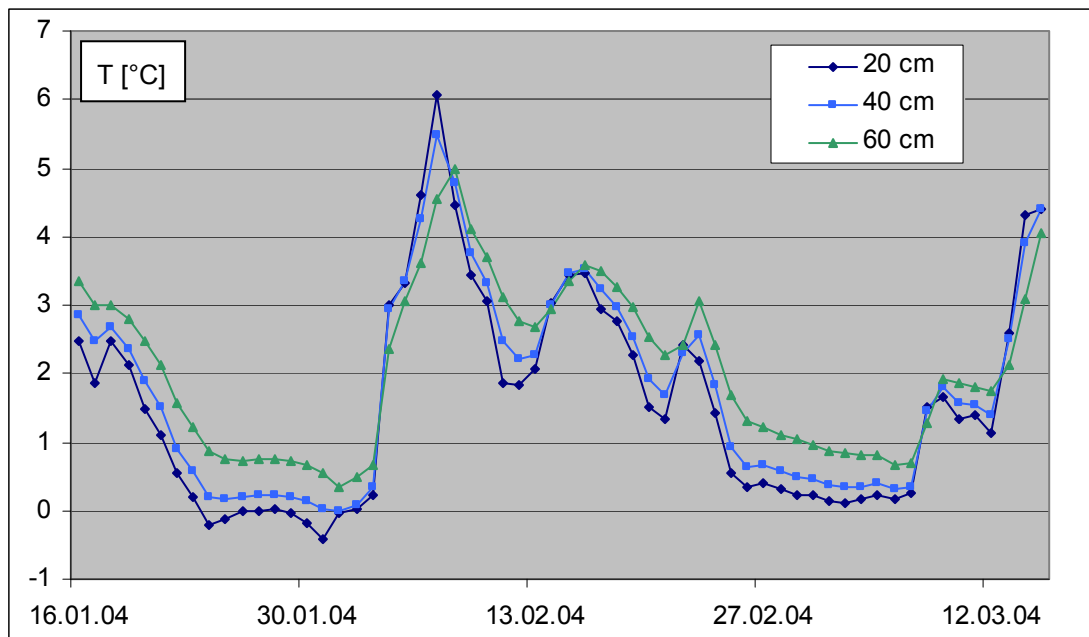


Abbildung 5-7: Temperaturverläufe im Straßenoberbau der Tulbeckstraße in München in verschiedenen Tiefen für den Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04

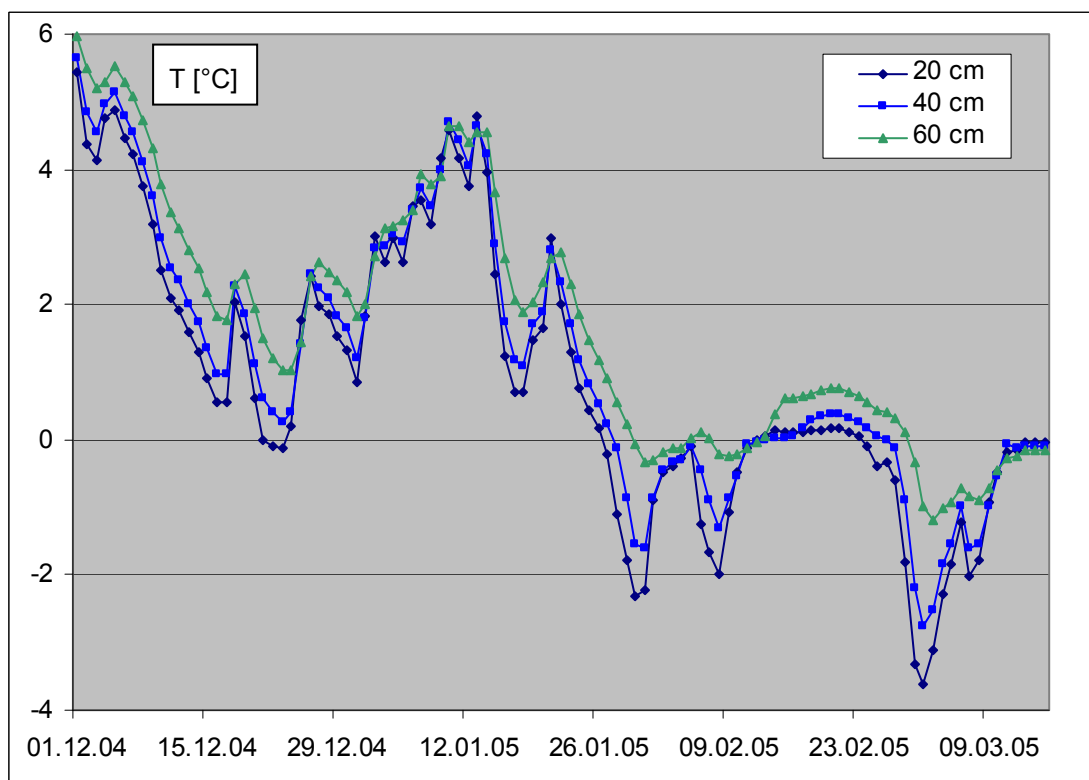


Abbildung 5-8: Temperaturverläufe im Straßenoberbau der Tulbeckstraße in München in verschiedenen Tiefen für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05

6 Auswertung der Simulation

Die gemessenen Daten lassen sich nicht ohne weiteres auf andere Straßenquerschnitte übertragen. Außerdem liegen nur Daten von zwei Winterperioden vor. Die Straßen der zwei Messstellen weisen eine individuelle Bebauung sowie Leitungslagen auf, die einen erheblichen Einfluss auf die Frosteindringung ausüben können. Die gemessenen Daten werden im Folgenden mit einer Simulationssoftware verglichen und verifiziert. Um den Einfluss der verschiedenen Leitungen im Straßenquerschnitt zu berücksichtigen, muss die Simulation einen zweidimensionalen Raum abdecken können. Mit dieser Software werden danach verschiedene Simulationen unter geänderten Randbedingungen gestartet.

6.1 Auswahl der Software

In diesem Fall wird das Programm HEAT2 genutzt, welches auf Basis eines Differenzenverfahrens rechnet und dem die allgemeine Fourier-Gleichung zu Grunde liegt. HEAT2 ist ein PC-Programm zur Berechnung zweidimensionaler Wärmeleitung in einem Mehrschichtensystem. HEAT2 wurde von Blomberg/M.I.T Cambridge und Claesson/Chalmers Institute of Technology zur numerischen Lösung der Wärmeleitungsgleichung unter Anwendung von expliziten finiten Differenzen entwickelt. Die angewendete Programmversion 5.01 läuft unter den Betriebssystemen Windows® 95/98 und NT sowie dazu kompatiblen Systemen [33]. In HEAT2 können zusätzlich auch interne Wärmequellen, wie z. B. Rohrleitungen, im System berücksichtigt werden. Die Fourier-Gleichung für die zweidimensionale Wärmeleitung mit Berücksichtigung interner Wärmequellen wird entsprechend modifiziert. Der Phasenübergang und die damit verbundenen Effekte, wie z. B. der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit und die Umwandlungsenthalpie, bleiben bei der mathematischen Formulierung allerdings unberücksichtigt.

Das Programm wurde zu Beginn auf seine Eignung für diesen Anwendungsfall getestet, in dem es mit einem Programm von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), welches bereits für die Temperaturermittlung im Straßenaufbau eingesetzt wurde, anhand von Vergleichsrechnungen verifiziert [62]. Es wurden bei Ansatz der gleichen Randbedingungen und Kennwerte nahezu gleiche Ergebnisse erzielt.

6.2 Eingabeparameter für die Simulation

Notwendige Eingangsgrößen zur rechnerischen Ermittlung des Temperaturverlaufes im Boden sind:

- Anfangstemperaturprofil
- Untergrundtemperatur
- seitliche Randbedingungen
- Lufttemperatur
- Sonneneinstrahlung
- Konvektion
- Materialkennwerte
- Temperaturwerte der Leitungen/ Häuserwände

6.2.1 Anfangs- und Randbedingungen

Als Anfangsbedingung muss eine entsprechende Anfangstemperatur bzw. Temperaturverteilung gegeben sein. Für beide Straßenquerschnitte werden sinnvolle einheitliche Anfangsbedingungen gewählt, indem dem Straßenoberbau und dem Untergrund eine konstante Temperatur vorgegeben wird. Dabei werden für den Oberbau die Temperaturen aus den Sensormessungen gemittelt, für den Untergrund wird eine sinnvolle gemittelte Temperatur gewählt. Diese Anfangsbedingung entspricht zwar nicht den realen Bedingungen, aber bereits nach ein paar Iterationsschritten nähern sich die simulierten Werte den „wahren“ Werten an [24].

Die räumlichen Randbedingungen an den Grenzflächen des Modells können entweder eine Temperatur T [°C] mit einem zugehörigen Wärmeübergangswiderstand R [m²·K/W] oder ein vorgegebener Wärmestrom q [W/m²] sein. In diesem Fall wird für die untere sowie die seitliche Begrenzung mit einer konstanten Temperatur gerechnet.

Die **Untergrundtemperatur** geht als eine Randbedingung in die Berechnung mit ein, da sie das Energiepotential des Bodens darstellt. Es liegen für diese Forschungsarbeit keine konkreten Zahlenwerte vor, so dass auf Erfahrungswerte zurückgegriffen wird. Bereits in einer Tiefe von 2 m variieren die Temperaturwerte in der Jahresganglinie nur noch sehr schwach. Dabei sind diese Werte unabhängig von der geographischen Lage und Höhe [22]. Über die Wintermonate wird diese Schwankung noch geringer. In dieser Simulation wird in einer Tiefe von 7,5 m mit einer konstanten Temperatur von 8 °C gerechnet [24].

Die **seitlichen Randbedingungen** ergaben sich aufgrund der anstehenden Bebauung und wurden vereinfacht mit einer 18 cm dicken Kellerwand aus Beton und einer Innenraumtemperatur von 8 °C angenommen.

6.2.2 Elementrierung

Die Elementrierung des Straßenquerschnittes ist von erheblicher Bedeutung für die Genauigkeit der Ergebnisse. Das Knotennetz ist so zu gestalten, dass möglichst viele Zellen das geometrische Modell unterteilen, damit die Entfernungen der Knotenpunkte zueinander sehr klein werden. Für die Berechnung mit HEAT2 ist die maximal mögliche Netzgenerierung auf 62.500 (250 x 250) Knoten begrenzt. Aus Gründen einer erhöhten Simulationsgeschwindigkeit wurde die Netzgenerierung auf rd. 100 x 100 begrenzt. In Tiefenrichtung wurde im Bereich des Straßenoberbaus für eine genaue Berechnung mit einer Elementhöhe von rd. 1 cm gearbeitet, während in den unteren Schichten die Generierung grobmaschiger durchgeführt wurde. In Straßenbreitenrichtung wurde eine homogene Elementlänge von rd. 20 cm als ausreichend erachtet.

6.2.3 Meteorologische Randbedingung

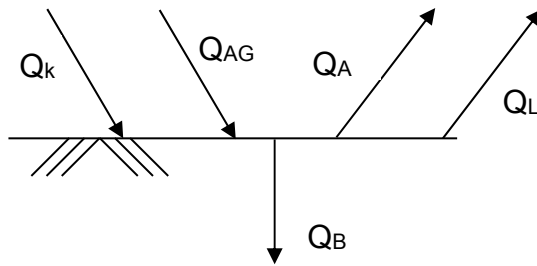
Die Lufttemperatur T_L und die Temperatur T_O an der schneefreien Oberfläche, die in etwa 1 cm Tiefe gemessen werden, unterscheiden sich. Das Verhältnis $T_L : T_O$ variiert bei Frost zwischen 0,6 und 1,0. Beeinflusst wird der Verhältniswert von den Wind- und Strahlungsbedingungen sowie den Schneeverhältnissen neben der Straße. Aus Messungen an acht deutschen Wetterstationen lässt sich bei länger anhaltenden Kälteperioden ein Verhältniswert $T_L : T_O$ von 0,8 annehmen [63, 64]. An der **Oberfläche** herrscht eine Grenzfläche zur Atmosphäre. Neben der Lufttemperatur sind trotz vermindertem Einfluss in den Wintermonaten die Strahlungseinflüsse zu berücksichtigen. Aus diesem Grund muss für einen genauen Ansatz der Randbedingung an der Oberfläche eine modifizierte Lufttemperatur angesetzt werden. Der Ansatz nach Krebs mit einer fiktiven Lufttemperatur modifiziert die Lufttemperatur um die aktuell vorkommende Strahlungsbilanz:

$$T_{\text{fiktiv}} = T + Q/\alpha \text{ [}^\circ\text{C]}$$

mit Q: Strahlungsbilanz [W/m²]

α : Wärmeübergangswiderstand [W/m²·K].

Da in diesem Fall für beide Straßenquerschnitte die Strahlungsbilanz nicht ermittelbar ist, wird eine analytische Ermittlung der Oberflächentemperatur durchgeführt. In dieser Simulation wird die Temperatur der Bodenoberfläche über die Energiegleichung der Oberfläche berechnet. Hiernach wirken auf die Oberfläche folgende Energiearten ein:



mit

Q_k : kurzwellige Strahlung

Q_{AG} : atmosphärische Gegenstrahlung

Q_A : langwellige Abstrahlung

Q_L : Konvektion

Q_B : Bodenwärmestrom

Die Komponenten Verdunstung und Kondensation werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Diese Ermittlung ist einerseits sehr schwierig, andererseits sind die Werte in innerstädtischen Bereich gering [24]. In dieser Betrachtung wird von einer mathematischen Fläche ausgegangen. Der Bodenkenwert der Wärmekapazität wird somit vernachlässigt. Aus Gründen der Energieerhaltung ergibt sich folgende Energiehaushaltsbetrachtung:

$$Q_k \cdot (1 - \alpha_R) + Q_{AG} \cdot (1 - \epsilon_R) - Q_A - Q_L - Q_B = 0$$

mit α_R : Reflexionskoeffizient der kurzwelligen Strahlung [-]

ϵ_R : Reflexionskoeffizient der atmosphärischen Gegenstrahlung [-]

Dabei kann aufgrund der Abschirmung der Bebauung der zwei Straßenquerschnitte in Bad Fredeburg und München die Strahlungsbilanz nicht immer vollständig angesetzt werden. Teilweise müssen die einzelnen Strahlungsarten getrennt betrachtet werden. In München ist der direkte kurzwellige Strahlungsanteil aufgrund des Ost-West-Verlaufes und der engen hohen Bebauung der Tulbeckstraße nicht anzusetzen, während in Bad Fredeburg bis ca. 13 Uhr ein direkter Sonneneinfall auf die Straße möglich ist. Danach ist auch hier die Straße verschattet. In diesem Fall wird für beide Querschnitte der vollständige diffuse kurzwellige Strahlungsanteil mit 40 % der Globalstrahlung angesetzt [62].

Die langwelligen Strahlungsanteile werden aufgrund der abschirmenden Bebauung in München mit einem view-factor von 0,6 angesetzt, d. h., nur 40 % der ankommenden bzw. emittierten Strahlung wird nicht abgeschirmt. Die lockere Bebauung in Bad Fredeburg führt zu einem view-factor von 0,2.

Für die Ermittlung der Strahlungsanteile wird die Globalstrahlung von einer benachbarten externen Messstelle besorgt. Für Bad Fredeburg und München werden die Daten von der Messstelle Lüdenscheid bzw. Weihestephan jeweils vom DWD herangezogen [65]. Der Albedowert der Asphaltstraße für die kurzwellige Strahlung wird gemäß **Tabelle 2-4** mit 0,082 angesetzt.

Die langwelligigen Strahlungsanteile werden über die analytische Beziehung

$$Q_{AG} = \varepsilon_R \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{AG} \cdot T_L^4$$

$$Q_A = \sigma \cdot \varepsilon_A \cdot T_0^4$$

mit T_0 : Temperatur an der Straßenoberfläche [K]

T_L : Lufttemperatur [K]

σ : Stephan-Boltzmann-Konstante: $5,68 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$

ε_A : Emissionskoeffizient Straßenoberfläche [-]

ε_{AG} : Emissionskoeffizient Atmosphäre [-]

ε_R : Reflexionskoeffizient der atmosphärischen Gegenstrahlung [-]

berechnet. Der Reflexionskoeffizient der langwelligigen Strahlung an der Straßenoberfläche wird nach **Tabelle 2-4** mit $\varepsilon_R = 0,09$ angesetzt. Die Werte für den Emissionskoeffizienten der Gegenstrahlung werden aufgrund der unbekanntem Bewölkungsgrade konstant auf $\varepsilon_{AG} = 0,7$ belassen. Der Emissionskoeffizient der Asphaltoberfläche wird auf $\varepsilon_A = 0,91$ gesetzt [24]. Der Bodenwärmestrom ergibt sich zu

$$Q_B = \lambda \cdot \frac{(T_{20} - T_0)}{l}$$

mit λ : Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]

l : Dicke der betrachteten Schicht [m]

T_{20} : Temperatur in 20 cm Tiefe [K]

T_0 : Temperatur an der Straßenoberfläche [K].

Der Konvektionsanteil wird über die folgende Beziehung berechnet:

$$Q_L = \alpha \cdot (T_0 - T_L)$$

mit α : Wärmeübergangswiderstand [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$].

Der Wärmeübergangswiderstand wird in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit an der Oberfläche ermittelt werden. Die Werte für die Windgeschwindigkeit sind für Bad Fredeburg von der Messstelle Lüdenscheid, für München von der Messstelle München-Zentrum jeweils vom DWD herangezogen worden [65]. Insgesamt ergibt sich somit folgende Energiegleichung, in der die Oberflächentemperatur T_0 gesucht ist:

$$Q_K \cdot (1 - \alpha_R) + T_L^4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{AG} \cdot (1 - \varepsilon_R) - T_0^4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon_A + \lambda \frac{(T_{20} - T_0)}{l} - \alpha(T_0 - T_L) = 0$$

Da es sich um eine Gleichung 4. Ordnung handelt, wird für die Lösung auf das Verfahren der Newton-Iteration zurückgegriffen, bei der die Lösung bereits nach weni-

gen Iterationsschritten angenähert wird. Die im zweistündigen Rhythmus ermittelten Oberflächentemperaturwerte, die als obere Randbedingung in die Simulation eingehen, sind auf der beiliegenden CD aufgelistet.

6.2.4 Einfluss durch Verkehr

Frühere Untersuchungen haben ergeben, dass für den Wärmeübergangskoeffizienten α der Verkehr eine Rolle spielen kann, weil die oberflächennahe Windgeschwindigkeit beeinflusst wird [24]. Die L776 in Bad Fredeburg wies tagsüber einen starken Durchgangsverkehr auf. Aus Zählungen im Jahr 2000 haben sich folgende Verkehrsbelastungen in Bad Fredeburg wie in **Tabelle 6-1** aufgeführt ergeben.

Tabelle 6-1: Verkehrsbelastung der L776 in Bad Fredeburg aus einer Verkehrszählung im Jahr 2000 [66]

Verkehrsart	Verkehrsbelastung [Fz/24]
DTV Fahrräder	47
DTV Pkw	6.915
DTV motorisierte Zweiräder	163
DTV Busse	207
DTV Sattelkraftfahrzeuge	379

6.2.5 Materialkennwerte

Die Frosteindringung in den Straßenoberbau ist abhängig von den wärmephysikalischen Eigenschaften der einzelnen Schichten. Die einzugebenden thermischen Baustoffkenndaten sind:

- Wärmeleitfähigkeiten λ_x und λ_y in x- bzw. y-Richtung [W/(m·K)]
- volumenbezogene Wärmekapazität C [MJ/(m³·K)]
- Wärmeübergangszahl α [W/(m²·K)]

Das in dieser Schicht vorkommende Wasser übt einen erheblichen Einfluss auf die Kennwerte aus. Für die Berücksichtigung des Wassergehaltes ist die volumenbezogene Wärmekapazität um den Anteil der spezifischen Wärme des Wassers zu erweitern:

$$C = \rho (c + w \cdot c_w)$$

mit w : Wassergehalt [M.-%]

c_w : spezifische Wärme des Wassers [J/(kg·K)].

Die darüber hinaus auftretende Umwandlungsenthalpie sowie die geänderten Kennwerte nach dem Überschreiten der Frostgrenze müssen bei HEAT2 vernachlässigt werden.

Die für die Simulation genutzten Materialkennwerte Wärmeleitfähigkeit, Trockendichte, Wassergehalt und spezifische Wärmekapazität werden aus Literaturangaben in **Tabelle 6-2** sinnvoll gewählt.

Tabelle 6-2: Materialkennwerte für verschiedene Straßenoberbau- und Erdschichten [14, 15, 33, 67, 68]

Material	Wärmeleitfähigkeit λ	Gewählt λ	Trockendichte ρ_d	Wassergehalt w	Wärmekapazität C	Gewählt C
	[W/m·K]	[W/m·K]	[g/cm ³]	[M.-%]	[MJ/m ³ ·K]	[MJ/m ³ ·K]
Asphaltbeton	1,30 - 1,40	1,31	2,63	0	2,31 - 2,34	2,31
Asphaltbinder	1,05 - 1,40	1,10	2,50	0	2,20 - 2,34	2,20
Asphalttragschicht	0,9 - 1,40	0,9	2,55	0	2,25 - 2,34	2,25
Frostschuttschicht	2,0 - 2,4	2,4	2,0	4	1,72 - 1,94	1,72
Lockergestein	0,8 - 2,4	1,4	1,8	4	1,30 - 1,72	1,56
Lockergestein (wassergesättigt)	1,5 - 3	2,2	1,7	18	2,2 - 2,9	2,6
RC-Baustoff	1,0	1,0	1,60	0	1,0 - 1,5	1,35
RC-Baustoff (wassergesättigt)	1,2	1,2	1,57	18	2,2 - 2,9	2,5
Festgestein	1,5 - > 3				2,30 - 2,39	
Kalkstein (massiv)		1,68	3,0	0		2,3

6.3 Sensitivitätsanalyse

Aufgrund der vielen anzunehmenden Parameter wird vorab eine Sensitivitätsanalyse mit den Eingangsgrößen für den Winter 2003/04 vom 05.02.2004 – 15.03.2004 durchgeführt. An einem 1 m breiten Ausschnitt des Straßenquerschnittes der L776 in Bad Fredeburg werden die einzelnen Parameter in ihrer Bandbreite mittels der Simulation auf ihren Einfluss auf das Ergebnis getestet. In der Sensitivitätsanalyse wurden die folgenden Parameter untersucht:

- Elementrierung
- Dicke der Deckschicht
- Anfangsbedingung
- Sensorlage
- Bodenkennwerte
- Strahlungsbedingungen

- Wärmeübergangszahl
- Untergrundtemperatur
- Verkehrsstärke

Für die Standardbedingungen wird angenommen, dass es sich bei den Baustoffen um isotrope Materialien mit richtungsunabhängigen Wärmeleitfähigkeiten ($\lambda_x = \lambda_y$) handelt. Die Wärmeübergangszahl wird über den untersuchten Zeitraum mit konstant $\alpha = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und die Untergrundtemperatur in 8 m Tiefe mit 8 °C angenommen. Für die Variation werden zum einen konstanter starker Wind mit einer Geschwindigkeit von 6 m/s und zum anderen Windstille angesetzt. Die Untergrundtemperatur wird in der Tiefe von 8 m von 4 bis 9 °C variiert.

Die Variation der Elementierung in Tiefenrichtung der Fläche wird nach **Tabelle 6-3** vorgenommen. In Breitenrichtung wird für diese Betrachtung keine Unterteilung vorgenommen.

Tabelle 6-3: Elementierung des Untersuchungsausschnittes zur Sensitivitätsanalyse für die drei Untersuchungsfälle Standard, Minimum und Maximum

Material	Mächtigkeit [cm]	Anzahl der Elementierungselemente		
		Standard	Minimum	Maximum
Asphaltdeckschicht	4	1	1	4
Asphaltbinderschicht	3	1	1	3
Asphalttragschicht	12	2	1	12
Frostschuttschicht	51	7	1	51
Lockerer Felsmaterial	180	26	1	90
Fels	550	78	1	63

Für die Betrachtung des Strahlungseinflusses werden im Standardfall für den Ansatz der fiktiven Lufttemperatur T_{fiktiv} die gemittelten Stundenwerte der Strahlungsbilanz nach **Abbildung 2-12** für die Periode 1 (16.12. -15.03.) angesetzt. Die Sensitivitätsanalyse untersucht einerseits den Nichtansatz der Strahlung, indem die Oberflächentemperatur mit der Lufttemperatur gleichgesetzt wird ($T_0 = T_L$). Andererseits werden die Globalstrahlungswerte von den drei benachbarten Messstellen Lüdenscheid, Unna und Bad Arolsen herangezogen [65, 69, 70].

Die Anfangsbedingung wird im Standardfall für das gesamte Element auf 0 °C gesetzt. Mit Ansatz der Anfangsbedingung ist das Anfangstemperaturprofil bereits zu Beginn angepasst worden. Die gebundenen Schichten werden auf 9 °C , die ungebundenen Schichten auf 8 °C und der Untergrund auf 7 °C festgelegt.

Die Bodenkennwerte werden im Standardfall gemäß **Tabelle 6-2** angenommen. Für die Variation der Bodenkennwerte sind die minimalen und maximalen Vorgaben aus dieser Tabelle herangezogen worden.

Einen möglichen Fehler aufgrund eines ungenauen Einbaus wird anhand der Variation der Sensorlage überprüft, indem die Temperaturwerte für ± 1 cm der jeweiligen Tiefe von 20 und 70 cm ermittelt werden.

Die Auswertung der Analyse in **Tabelle 6-4** zeigt in den ersten Spalten die maximale Abweichung der Temperaturen in 20 und 70 cm Tiefe unter den genannten Bedingungen. Des Weiteren werden jeweils die maximalen Differenzen zwischen den simulierten und gemessenen Werten auf 20 und 70 cm Tiefe aufgezeigt. Zusätzlich wird die aus den Werten der Simulation und der Messung ermittelten Korrelationsfunktion bzw. der Korrelationskoeffizient R^2 berechnet.

Für die Standarduntersuchung sind erhebliche Abweichungen besonders an Sonnentagen bei starken Temperaturschwankungen feststellbar. Die tatsächliche Strahlung weist auch im Winter einen nicht zu vernachlässigbaren Anteil auf, so dass der Ansatz einer pauschalen Strahlungsbilanz für diesen Fall nicht ausreicht. Eine Nichtberücksichtigung der Strahlung führt nach dem Ansatz $T_0 = T_L$ zu einem zu niedrigen Temperaturniveau. Für die weitere Strahlungsbetrachtung wird die Station Lüdenscheid herangezogen, da sie gegenüber den anderen beiden Stationen die beste Korrelation zu den gemessenen Werten aufweist.

Tabelle 6-4: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die einzelnen Parameter

Untersuchungen	Simulation/ gemessene Werte					
	ΔT_{\max} [20 cm]	ΔT_{\max} [70 cm]	ΔT_{\max} [20 cm]	Korrelationsfunktion/ -koeffizient [20 cm]	ΔT_{\max} [70 cm]	Korrelationsfunktion/ -koeffizient [70 cm]
	[K]	[K]	[K]		[K]	
Standard			1,90	$y = 0,5993x + 0,6347$ $R^2 = 0,8989$	2,37	$y = 0,5289x + 0,0475$ $R^2 = 0,8378$
Variation der Knotennumerierung						
max. Anzahl Knoten in y-Richtung	0,83	0,88	1,90	$y = 0,6005x + 0,6322$ $R^2 = 0,8991$	2,37	$y = 0,5287x + 0,0474$ $R^2 = 0,8373$
min. Anzahl Knoten in y-Richtung			2,00	$y = 0,6762x + 0,531$ $R^2 = 0,8842$	2,08	$y = 0,7113x - 0,4104$ $R^2 = 0,8587$
Variation der Anfangstemperatur						
Anfangsbedingung			1,49	$y = 1,0571x - 0,248$ $R^2 = 0,9012$	1,74	$y = 1,3896x - 1,3848$ $R^2 = 0,8656$
Variation der Sensorlage						
X = 19/69 cm	0,21	0,09	1,82	$y = 0,6108x + 0,6191$ $R^2 = 0,9043$	2,36	$y = 0,5337x + 0,0379$ $R^2 = 0,8397$
X = 21/71 cm			1,98	$y = 0,5882x + 0,6498$ $R^2 = 0,893$	2,39	$y = 0,5155x + 0,0746$ $R^2 = 0,8314$
Variation der Bodenkennwerte						
λ_{\max}, C_{\min}	0,52	0,37	1,68	$y = 0,6543x + 0,4528$ $R^2 = 0,9159$	2,79	$y = 0,382x + 0,252$ $R^2 = 0,7339$
λ_{\min}, C_{\max}			1,89	$y = 0,5997x + 0,6353$ $R^2 = 0,901$	2,51	$y = 0,4577x + 0,2044$ $R^2 = 0,7988$
λ, C_{\min}	0,54	0,31	2,74	$y = 0,7517x - 0,5889$ $R^2 = 0,915$	2,59	$y = 0,8205x - 1,5477$ $R^2 = 0,9501$
λ, C_{\max}			3,11	$y = 0,7037x - 0,5094$ $R^2 = 0,8953$	2,83	$y = 0,7495x - 1,3568$ $R^2 = 0,915$
λ_{\max}, C	0,47	0,21	2,40	$y = 0,8085x - 0,7232$ $R^2 = 0,9562$	2,72	$y = 0,6947x - 1,2494$ $R^2 = 0,962$
λ_{\min}, C			2,64	$y = 0,769x - 0,6207$ $R^2 = 0,9254$	2,74	$y = 0,7696x - 1,4139$ $R^2 = 0,9334$
Ansatz der Strahlungsbedingungen						
$T_o = T_L$			2,47	$y = 0,9574x - 1,5212$ $R^2 = 0,9445$	2,77	$y = 1,0119x - 2,563$ $R^2 = 0,9841$
Unna			2,39	$y = 0,7866x - 0,527$ $R^2 = 0,8252$	2,76	$y = 0,684x - 1,1088$ $R^2 = 0,858$
Bad Arolsen			2,06	$y = 0,6963x - 0,0702$ $R^2 = 0,7691$	2,74	$y = 0,4902x - 0,3174$ $R^2 = 0,7166$
Lüdenscheid			2,61	$y = 0,8418x - 0,9961$ $R^2 = 0,8938$	3,05	$y = 0,7326x - 1,5596$ $R^2 = 0,8949$
Variation der Untergrundtemperatur						
$T_{\max} = 9 \text{ °C}$	0,0017	0,0035	1,90	$y = 0,5994x + 0,6347$ $R^2 = 0,8989$	2,37	$y = 0,5289x + 0,0476$ $R^2 = 0,8376$
$T_{\min} = 4 \text{ °C}$			1,90	$y = 0,5993x + 0,6347$ $R^2 = 0,8989$	2,37	$y = 0,5288x + 0,0473$ $R^2 = 0,8379$
Variation der Wärmeübergangszahl						
$\alpha_{\max} = 20 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ($v_{\text{Wind}} = 6 \text{ m/s}$)	6,51	2,81	1,89	$y = 0,5995x + 0,6379$ $R^2 = 0,899$	2,37	$y = 0,5264x + 0,0608$ $R^2 = 0,8348$
$\alpha_{\min} = 1,74 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ($v_{\text{Wind}} = 0 \text{ m/s}$)			5,72	$y = 1,11x + 1,5323$ $R^2 = 0,4906$	1,05	$y = 0,7904x + 0,9312$ $R^2 = 0,8167$
Verkehrsstärke						
$DTV_{\max} = 633 \text{ Fz/h}$	5,29	2,72	2,37	$y = 0,9805x - 1,6763$ $R^2 = 0,9574$	2,86	$y = 1,0178x - 2,6761$ $R^2 = 0,9848$
$DTV_{\min} = 0$			1,90	$y = 0,5993x + 0,6347$ $R^2 = 0,8989$	2,37	$y = 0,5289x + 0,0475$ $R^2 = 0,8378$

Aus der Sensitivitätsanalyse konnten folgende Ergebnisse herausgearbeitet werden:

- Die Anfangsbedingung sollte auf jeden Fall sinnvoll gewählt werden, da in diesem Fall die Korrelationsfunktion der gemessenen und simulierten Werte für 20 cm annähernd die ideale Winkelhalbierende einnimmt.
- Die Wahl des Knotennetzes sollte gezielt eingesetzt werden, um unnötige Ungenauigkeiten zu vermeiden. Allerdings treten zwischen einer sehr groben und einer sehr genauen Elementierung nur Temperaturdifferenzen von rd. 0,85 °C auf.
- Eine in der Tiefenlage ungenau eingebaute Sensorlage kann vernachlässigt werden, da die Auswirkungen relativ gering sind. Bei einer Toleranz von ± 1 cm treten in 20 cm Tiefe maximal Differenzen von 0,21 und in 70 cm von 0,09 K auf.
- Die Bodenkennwerte spielen für die weitere Betrachtung nur eine untergeordnete Rolle. Bei Ausnutzen der Bandbreiten werden nur maximale Temperaturunterschiede von bis zu 0,54 K festgestellt.
- Die Annahme der unteren Randbedingung ist vernachlässigbar, da kaum Unterschiede bis in den Straßenaufbau festzustellen sind.
- Die Wärmeübergangszahl spielt eine erhebliche Rolle für die Temperaturverteilung, so dass die Werte für Windgeschwindigkeit und stärkeren Verkehr zu berücksichtigen sind. Temperaturunterschiede von bis zu 6 K werden bei den Variationen erreicht.
- Insgesamt auffallend ist bei der Sensitivitätsanalyse das allgemein zu niedrige Temperaturniveau in 70 cm Tiefe. Interne Wärmequellen, wie die Abwasserleitung, scheinen hiernach eine nicht vernachlässigbare Bedeutung zu haben.

6.4 Vergleich der Messung mit der Simulationsberechnung

Für die Auswertung der gemessenen mit den simulierten Temperaturen sind zwei-stündige Werte herangezogen worden, um auch Aussagen über eine Übertragbarkeit auf die Tagesgangtemperaturwerte zu treffen. Aus Übersichtlichkeitsgründen ist die Darstellung der Messperiode im Winter 2004/2005 in zwei Diagramme aufgeteilt worden, vom 01.12.2004 – 31.01.2005 sowie vom 01.02.2005 – 15.03.2005. Zur besseren Orientierung sind in die Diagramme die gemessenen Lufttemperaturwerte mit eingetragen.

6.4.1 Bad Fredeburg

In den **Abbildung 6-1 bis 6-3** sind die gemessenen und simulierten zweistündigen Temperaturen in den Tiefen 20 cm, 45 cm sowie 70 cm für die L776 im Winter 2003/04 dargestellt. Wie zu erwarten, sind die Ausschläge der Bodentemperaturen über einen Tag in der Tiefe von 70 cm wesentlich geringer, da hier der Einfluss durch die kurzweilige Strahlung tagsüber wesentlich geringer ist. Insgesamt sind die Kurven der simulierten und gemessenen Messwerte bis auf wenige Abweichungen weitgehend identisch.

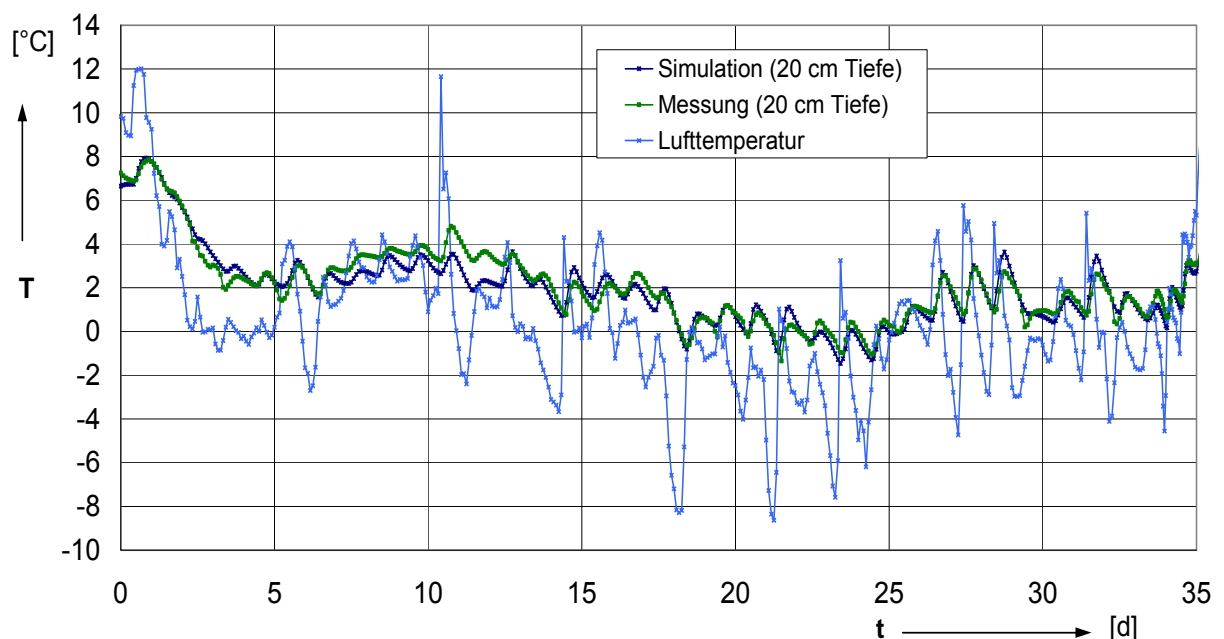


Abbildung 6-1: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2003/2004 vom 06.02.2004 -15.03.2004 in 20 cm Tiefe

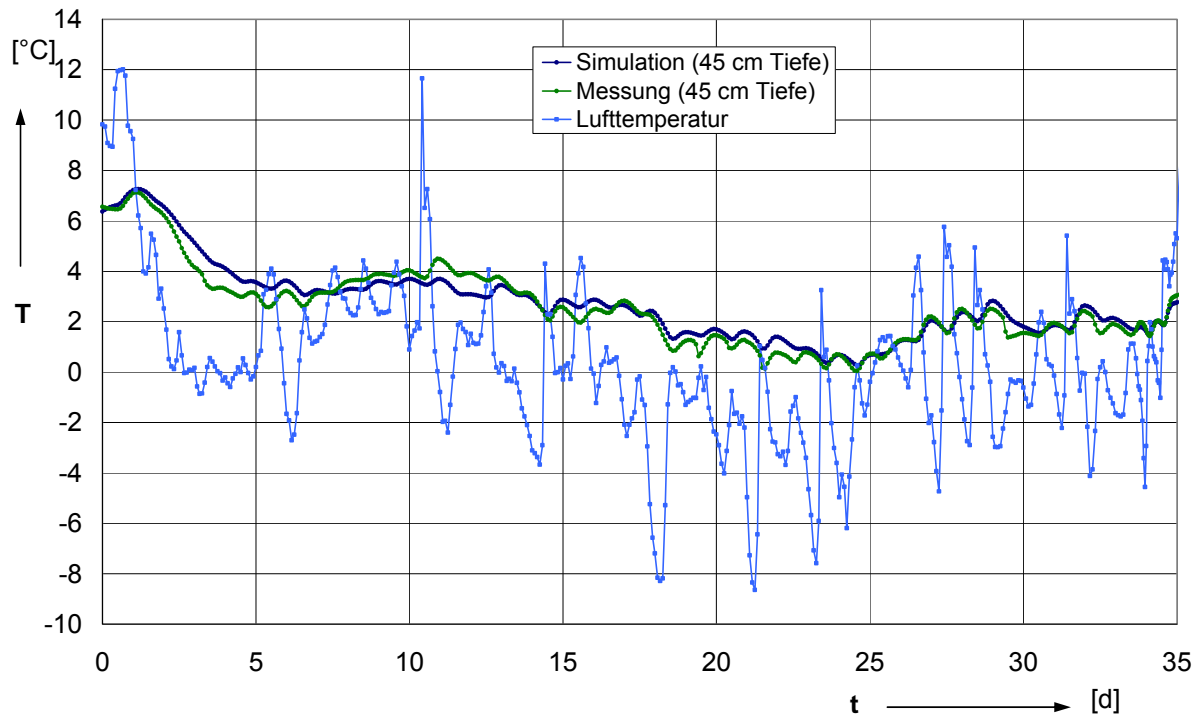


Abbildung 6-2: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2003/2004 vom 06.02.2004 -15.03.2004 in 45 cm Tiefe

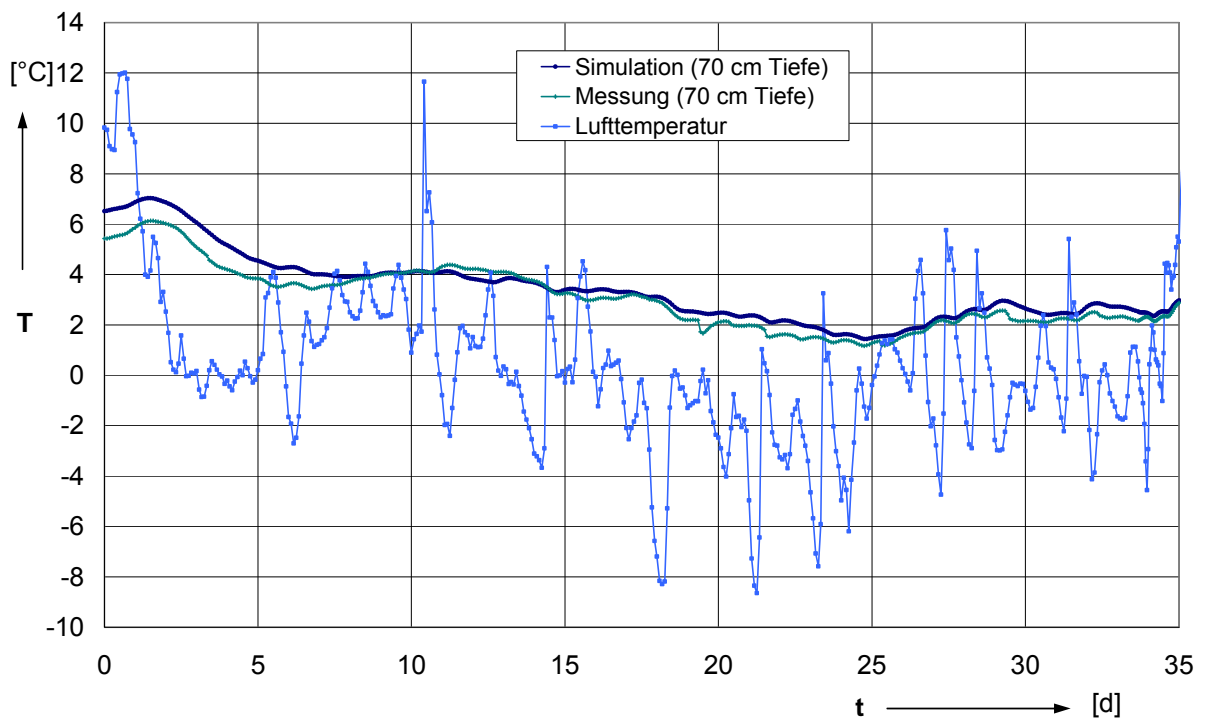


Abbildung 6-3: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2003/2004 vom 06.02.2004 -15.03.2004 in 70 cm Tiefe

Die maximale Abweichung zwischen der simulierten und der gemessenen Temperaturkurve liegt aufgrund der größeren Schwankungsbreite in der Tiefe von 20 cm bei unter $1,5^{\circ}\text{C}$, wie **Abbildung 6-4** für den Winter 2003/04 zeigt.

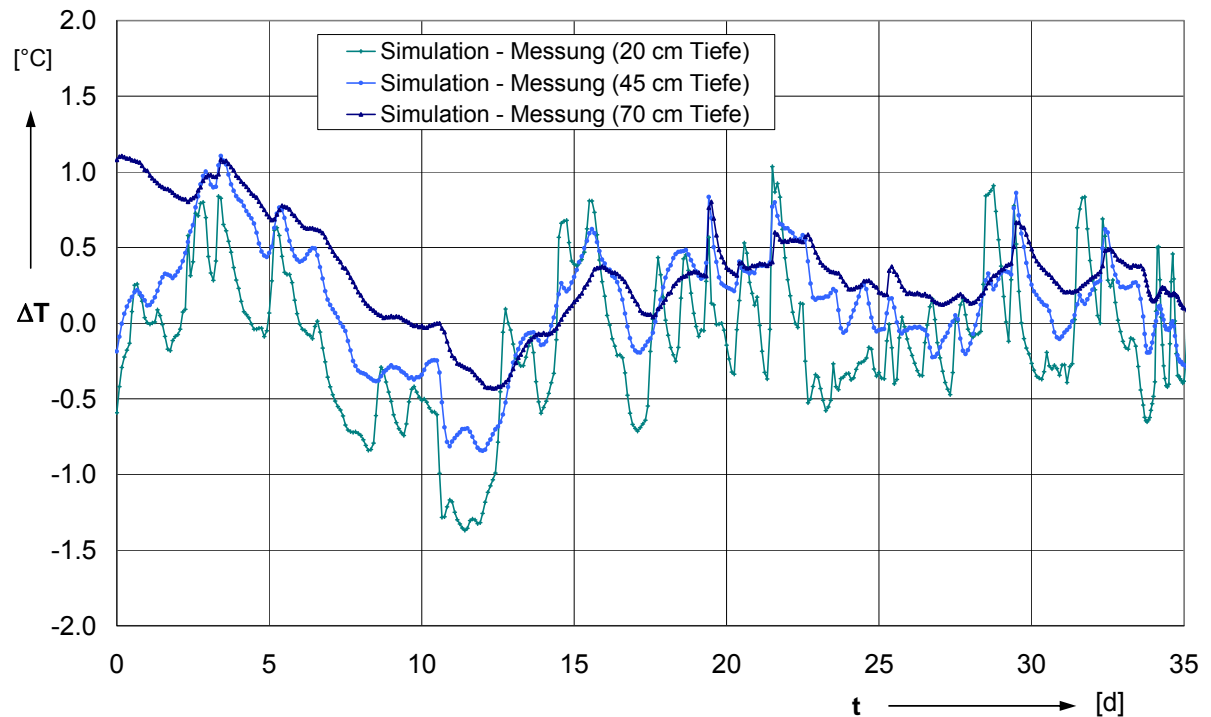


Abbildung 6-4: Differenz des simulierten zum gemessenen Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2003/04 vom 06.02.04 – 15.03.04 für die Tiefen 20, 45 und 70 cm

Die gute Übereinstimmung der Kurven spiegelt sich auch in der Regressionsgerade für die simulierten und gemessenen Werte (**Abbildung 6-5** und **Abbildung 6-6**). Sie stellt mit einem Regressionskoeffizienten R^2 von rd. 90 % nahezu eine optimale Winkelhalbierende durch den Ursprung dar.

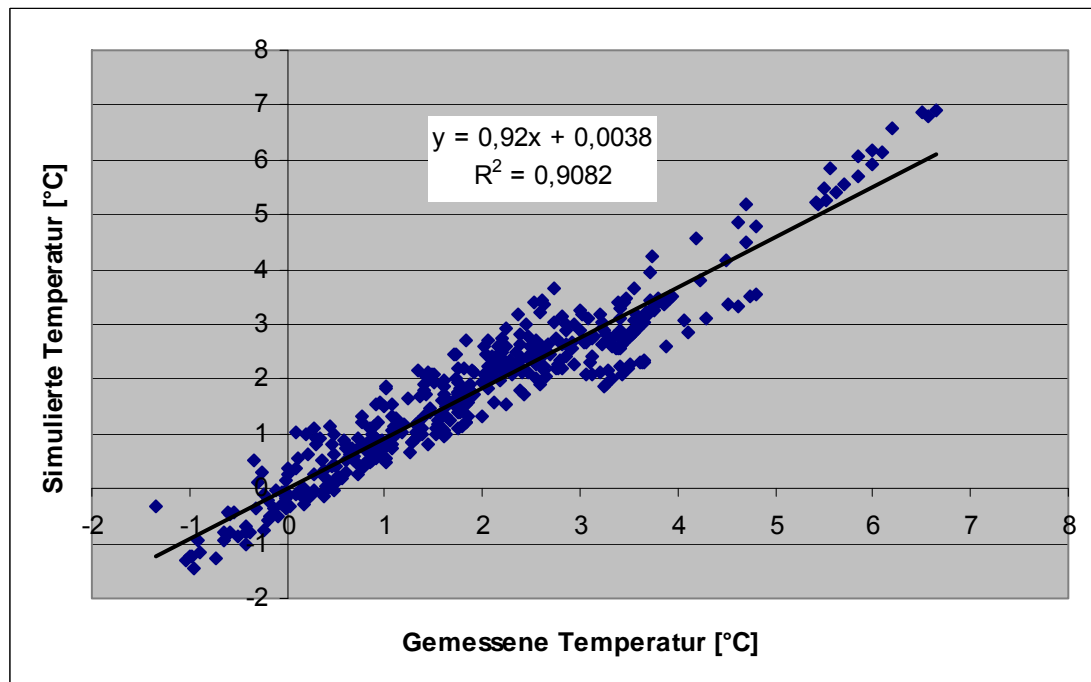


Abbildung 6-5: Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2003/04 vom 06.02.04 – 15.03.04 in der Tiefe von 20 cm

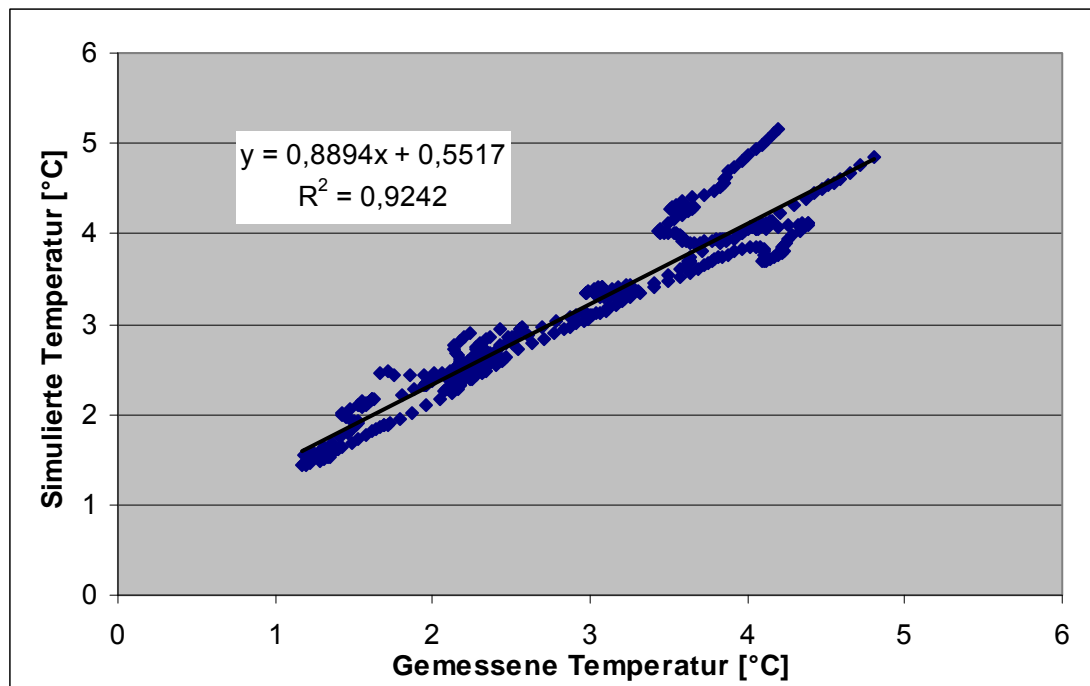


Abbildung 6-6: Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2003/04 vom 06.02.04 – 15.03.04 in der Tiefe von 70 cm

Die gute Übereinstimmung wird in den **Abbildungen 6-7 bis 6-12** bestätigt, wo die gemessenen und simulierten zweistündigen Temperaturen in den Tiefen 20 cm, 45 cm sowie 70 cm für die L776 im Winter 2004/05 dargestellt werden. Hierbei werden Daten über eine vollständige Winterperiode vom 01.12.2004 – 15.03.2005 mit extremen Wetterdaten ausreichend gut wiedergegeben. Da in der Straßenmitte ein Sensor nicht mehr regelmäßig Daten lieferte, wird für die weitere Darstellung der vergleichbare rechte Straßenrand herangezogen. Das Temperaturniveau gegenüber der Straßenmitte ist lediglich leicht erhöht, so dass die Frosteindringung bis 70 cm nicht erreicht wird. Auffällig ist aber das insgesamt trägere Verhalten der gemessenen Temperaturen nach Phasensprüngen. Besonders in den unteren Schichten werden die nach der Simulation erwarteten Temperaturschwankungen nicht erreicht, sie werden vielmehr stark gedämpft. Zusätzlich liegen hierbei die simulierten Temperaturen unter den gemessenen. Ursache hierfür kann die Nichtberücksichtigung des Wassergehaltes in den ungebundenen Schichten sein. Beim Phasensprung dieses Wassers zu Eis wird bei der Simulation die freigesetzte latente Wärme, die die Frosteindringung hemmt, nicht angesetzt.

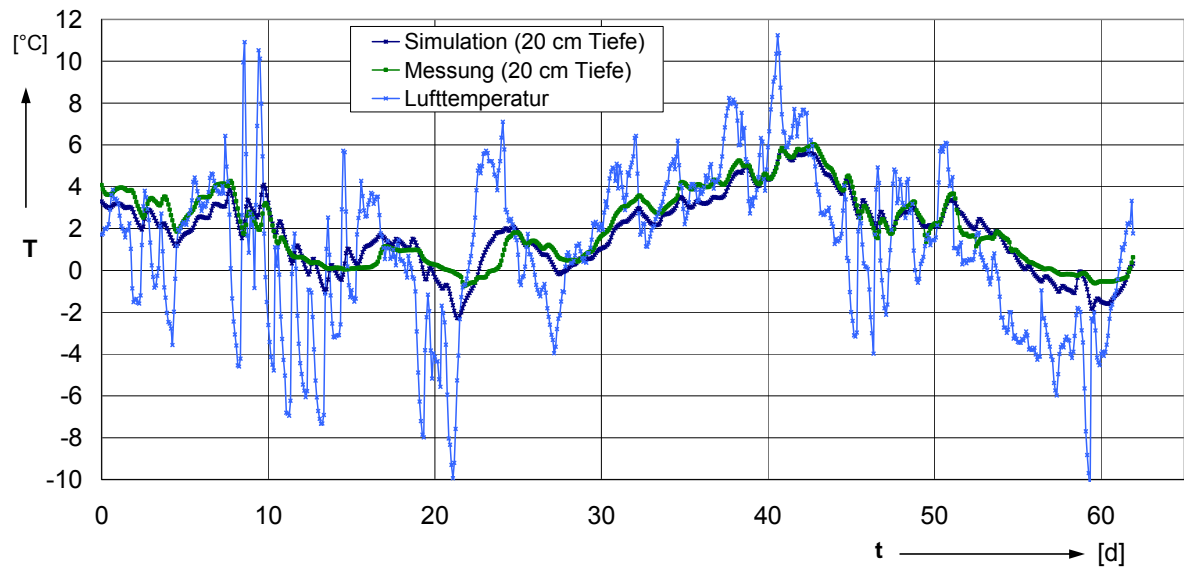


Abbildung 6-7: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.12.04-31.01.05 in 20 cm Tiefe

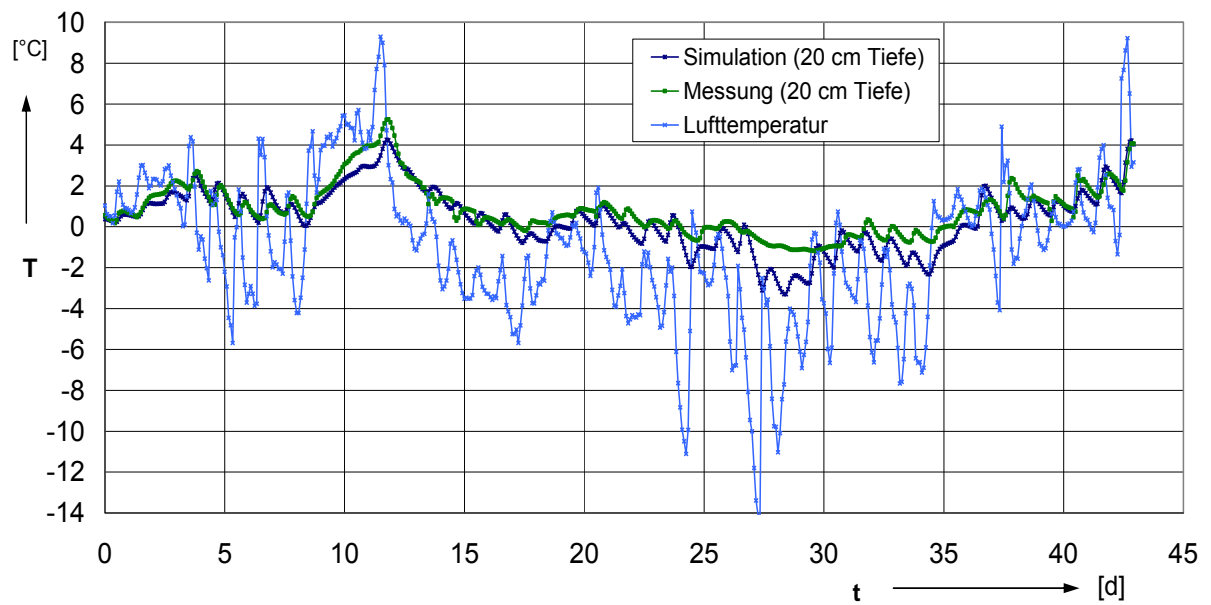


Abbildung 6-8: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.02.04-15.03.05 in 20 cm Tiefe

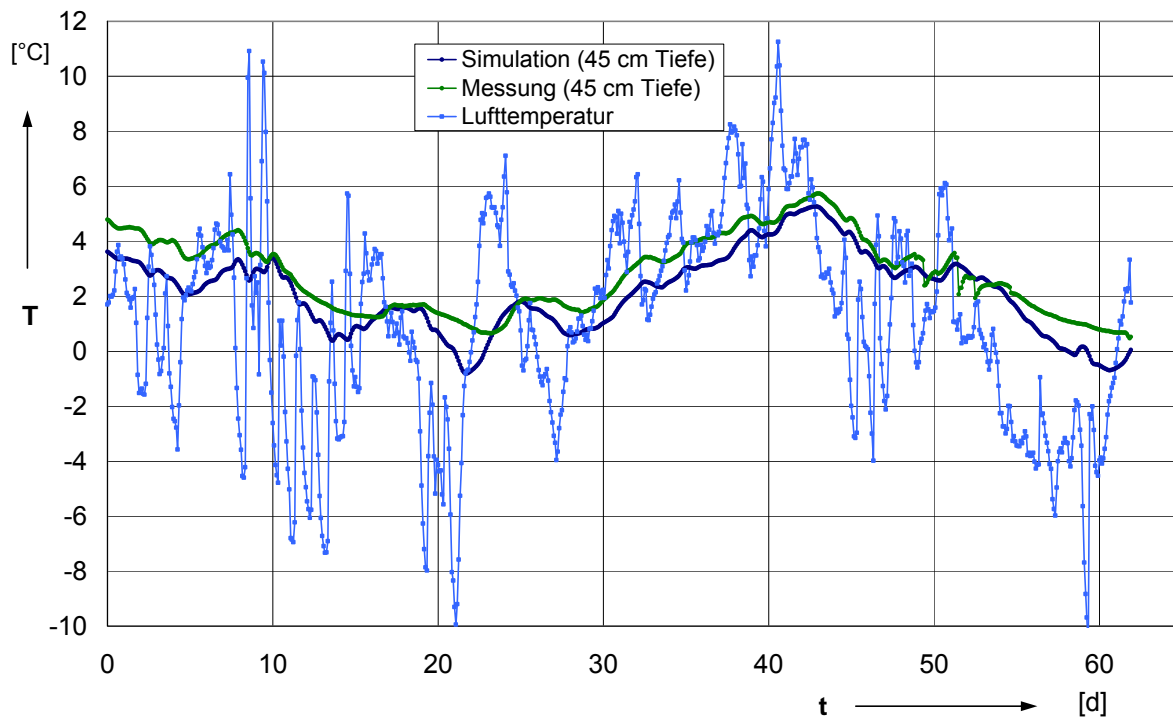


Abbildung 6-9: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.12.04-31.01.05 in 45 cm Tiefe

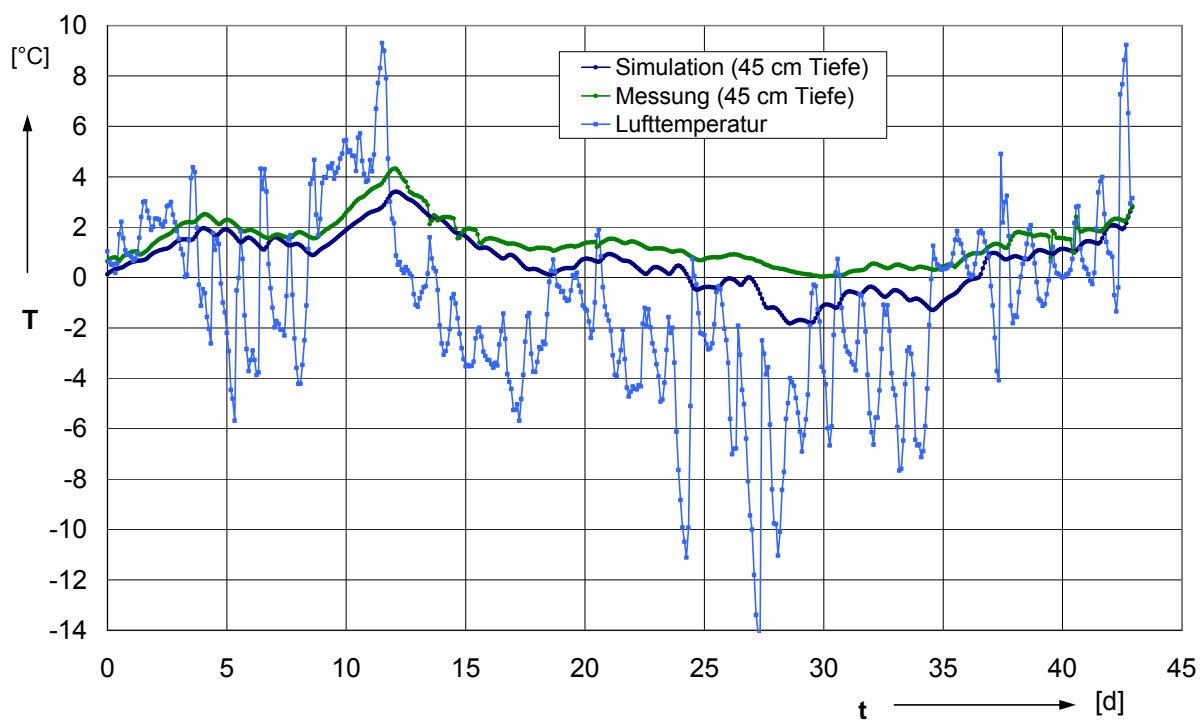


Abbildung 6-10: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.02.05-15.03.05 in 45 cm Tiefe

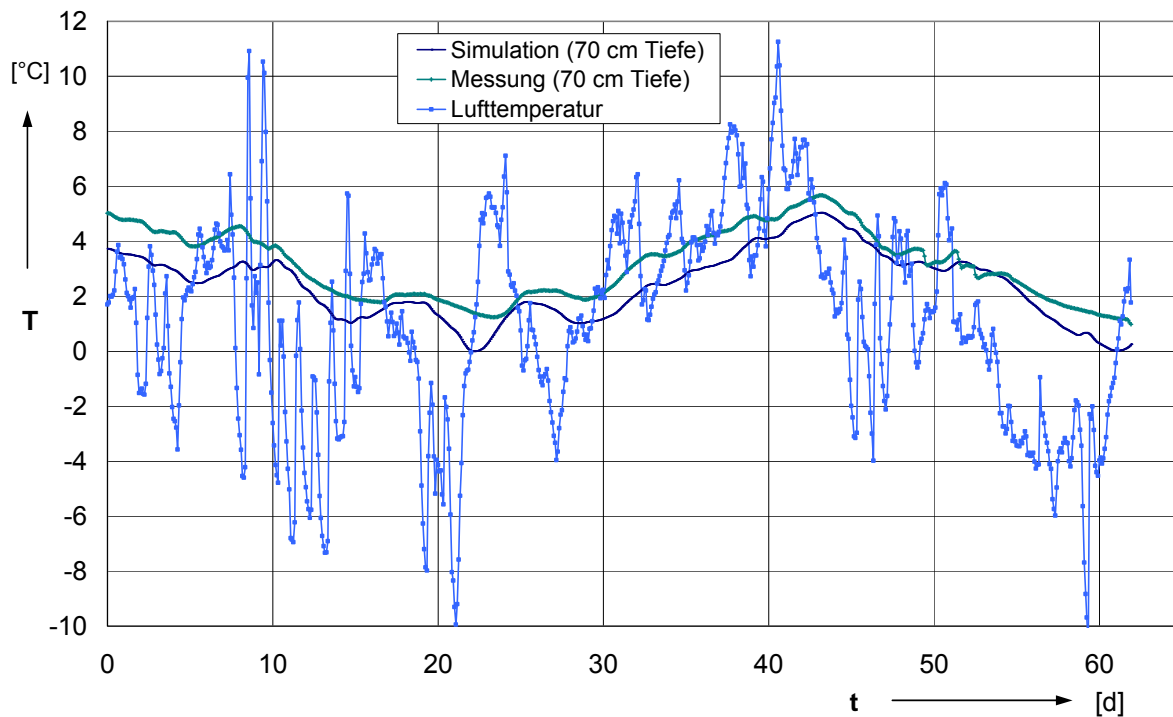


Abbildung 6-11: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.12.04-31.01.05 in 70 cm Tiefe

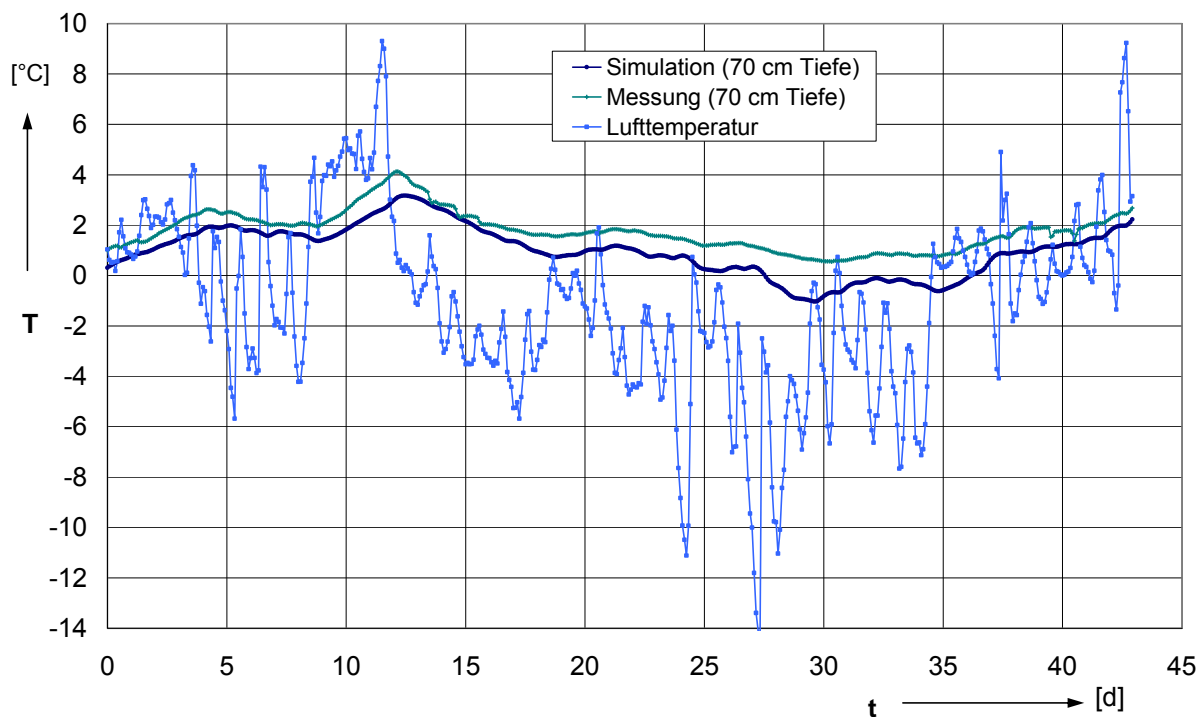


Abbildung 6-12: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Bad Fredeburg für den Winter 2004/05 vom 01.02.05-15.03.05 in 70 cm Tiefe

Die maximalen Temperaturschwankungen sind im Vergleich zum Winter 2003/04 größer und liegen gemäß **Abbildung 6-13** und **6-14** bei rd. 2 °C. Die größten Schwankungsunterschiede sind wiederum an der oberflächennahen Messstelle in 20 cm Tiefe zu verzeichnen. Dies liegt größtenteils an der rechnerischen Ermittlung der langwelligen Gegenstrahlung sowie an der Ansetzung der kurzwelligen Strahlung der Messstation Lüdenscheid, die sich von der tatsächlichen Strahlungsintensität unterscheiden kann. In den unteren Schichten verringert sich dieser Einfluss und die Tagestemperaturschwankungen werden somit geringer.

Die Abweichungen bei 20 cm Tiefe liegen in ihrer Schwankungsbreite um die 0 °C-Grenze, während in 70 cm Tiefe durchgehend zu niedrige Temperaturen simuliert werden. Zum einen kann der Wassergehalt in den ungebundenen Schichten in der Simulation nicht berücksichtigt werden, zum anderen ist zu untersuchen, inwieweit die Intensität der internen Wärmequellen in Form der Leitungen im Boden zu niedrig angesetzt wurde.

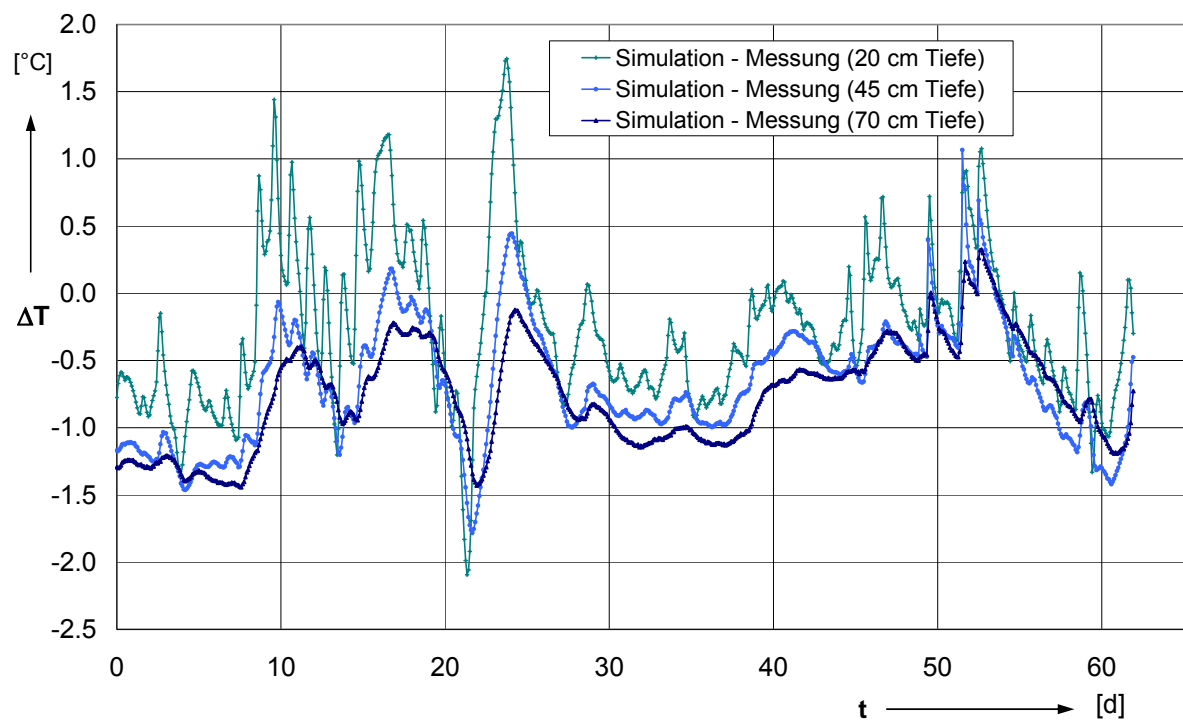


Abbildung 6-13: Differenz zwischen simuliertem und gemessenem Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 31.01.05

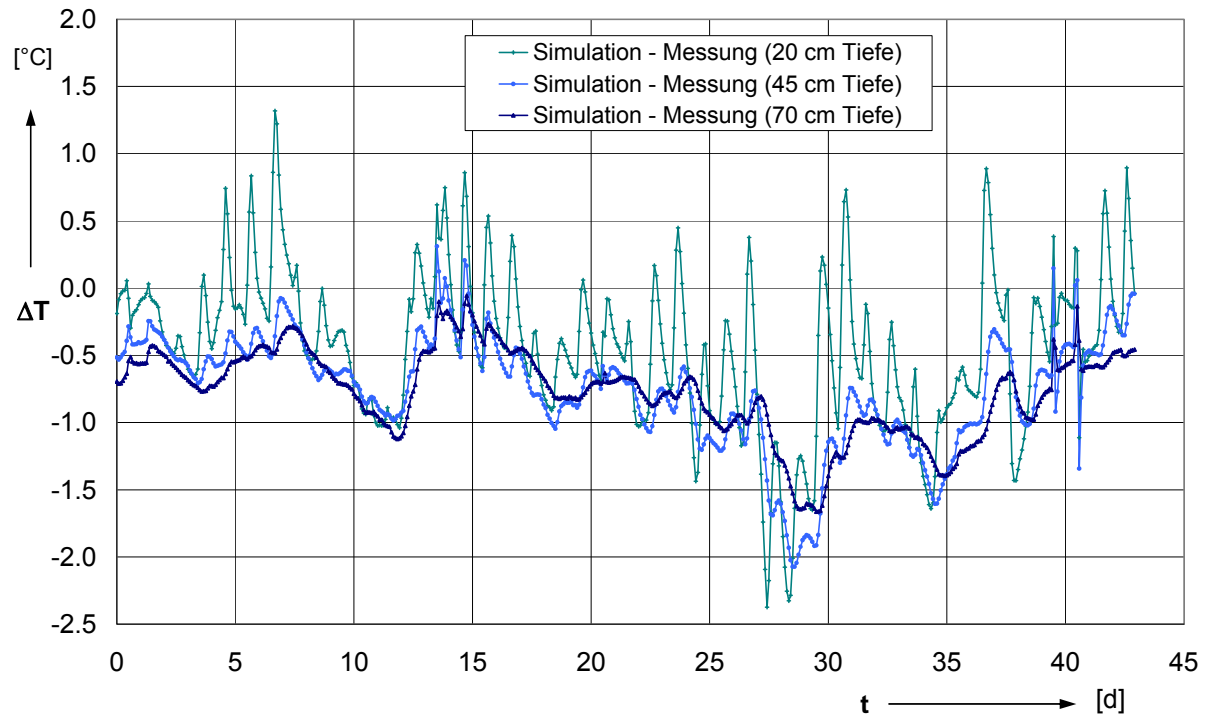


Abbildung 6-14: Differenz zwischen simuliertem mit dem gemessenem Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2004/05 vom 01.02.05 – 15.03.05

Die gemessenen Daten für Bad Fredeburg lassen sich unter Annahme der Randbedingungen sehr gut abbilden. Die Korrelationsfunktion der simulierten mit den gemessenen Daten ist gemäß **Abbildung 6-15** und **6-16** auch für den Winter 2004/05 nahezu eine gewünschte Ursprungsgerade unter 45° mit $R^2 > 90\%$.

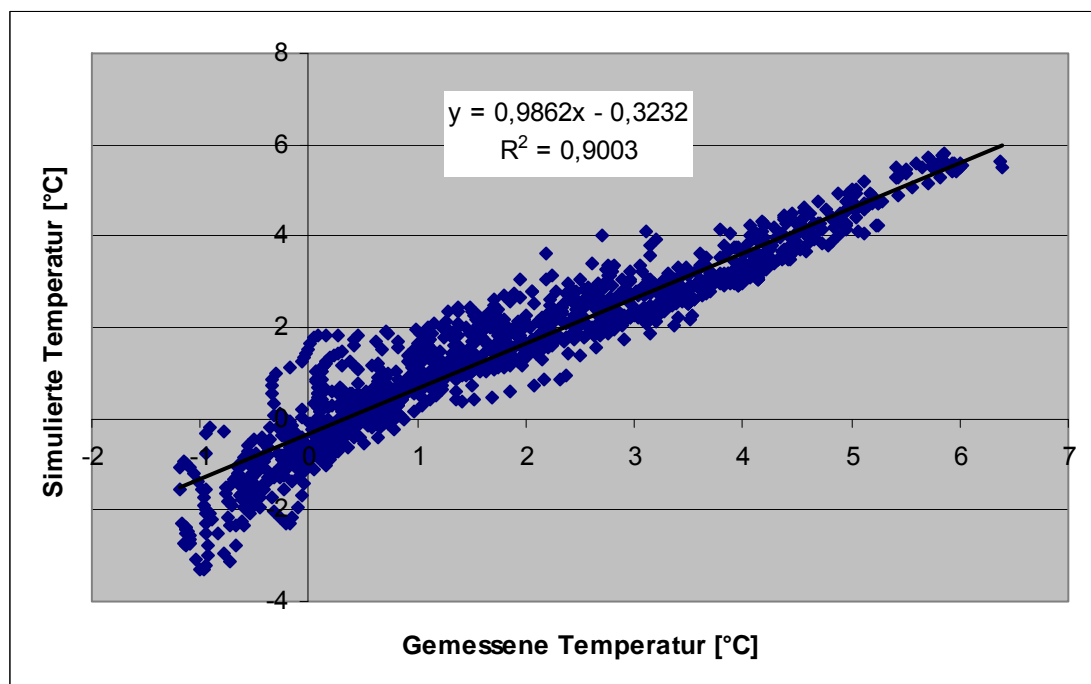


Abbildung 6-15: Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05 in der Tiefe von 20 cm

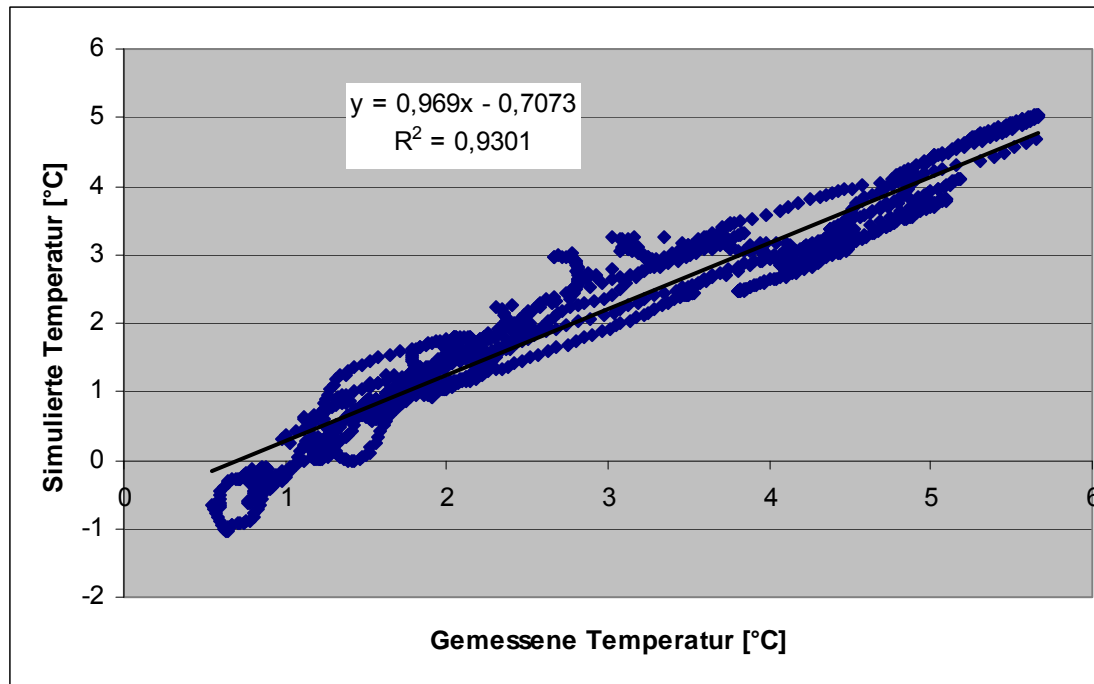


Abbildung 6-16: Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Temperaturverlauf in Bad Fredeburg im Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 15.03.05 in der Tiefe von 20 cm

6.4.2 München

In den **Abbildung 6-17** bis **6-19** sind die Vergleiche der gemessenen und simulierten zweistündigen Temperaturen in den Tiefen 20 cm, 40 cm sowie 60 cm für die Tulbeckstraße in der Straßenmitte im Winter 2003/04 dargestellt.

Die gemessenen Daten für München lassen sich unter Annahme der Randbedingungen gut abbilden. Allerdings gibt es phasenweise stärkere Abweichungen, die mit der unberücksichtigten Schneelage in München begründet werden kann. In München lag in der Messphase vom 18.01. bis zum 01.02.04 und vom 24.02. bis zum 09.03.04 eine geschlossene Schneedecke [71]. Die Tulbeckstraße wird nicht geräumt, sondern lediglich abgestreut. Aus diesem Grund entsteht für die Fahrbahn eine geänderte thermophysikalische Situation. Der Schneebelag besitzt – trotz seiner Verdichtung – eine immer noch sehr geringe Wärmeleitfähigkeit. Zum weiteren wird durch einen sehr hohen Albedowert fast die vollständige kurzwellige Strahlung reflektiert. Die Schneeschicht wirkt somit stark ausgleichend auf den darunter liegenden Temperaturhaushalt. Dieser Effekt wird durch die Simulation nicht erfasst, so dass es zu erheblichen Abweichungen kommt. Gleichzeitig hat sich herausgestellt, dass die Bohrlöcher nicht wasserdicht vergossen wurden. Dabei hat sich der Untergrund als sehr wasserundurchlässig herausgestellt, so dass Stauwasser in den ungebundenen Schichten über eine längere Zeit verbleiben konnte. Das im Straßenauf-

bau befindliche Wasser beeinflusst beim Phasenübergang zusätzlich die Frostein-
dringung.

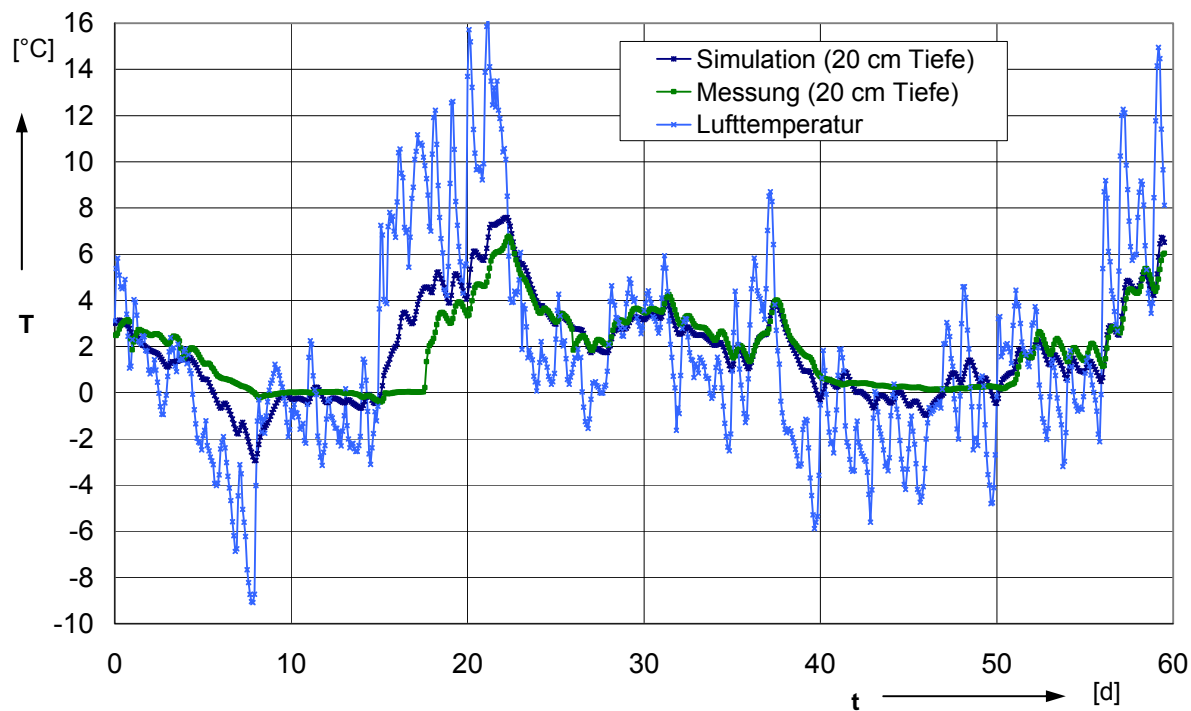


Abbildung 6-17: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04 in 20 cm Tiefe

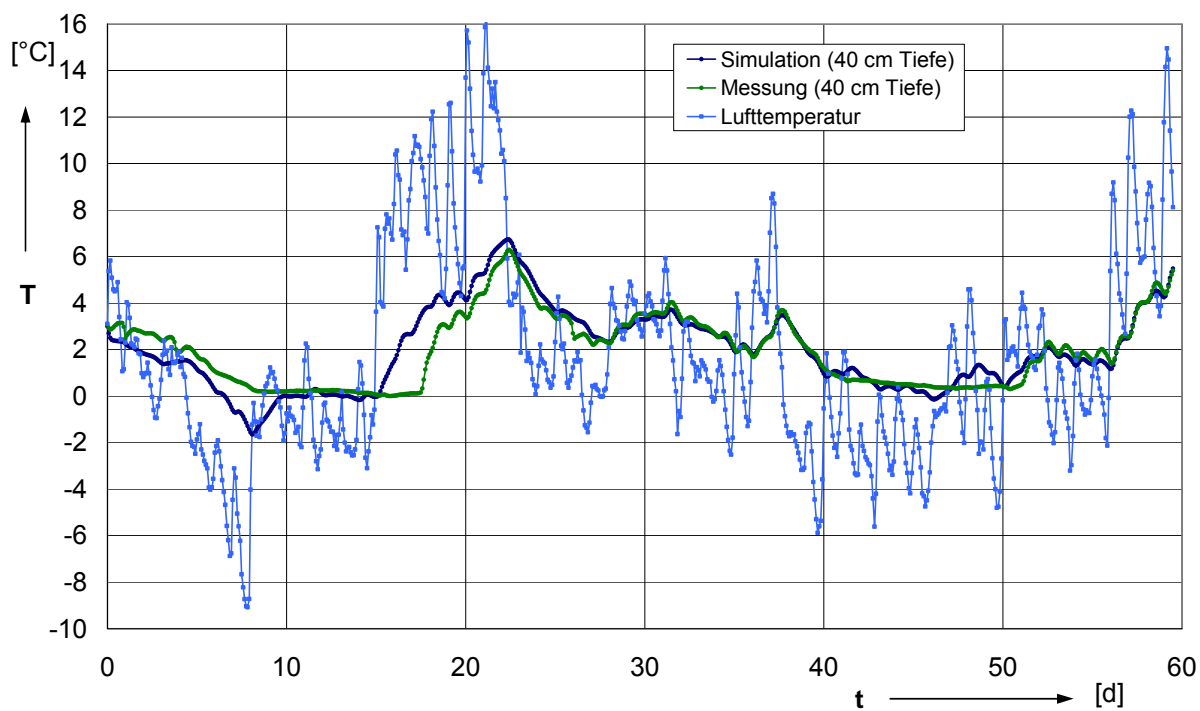


Abbildung 6-18: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04 in 40 cm Tiefe

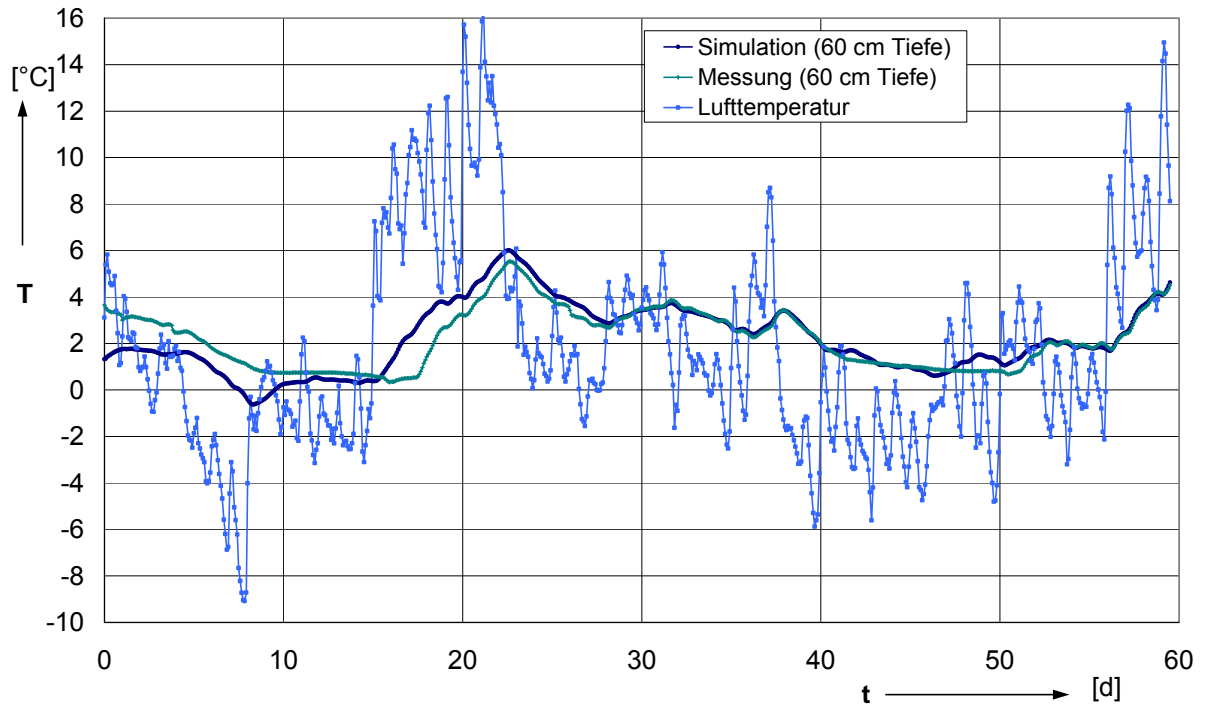


Abbildung 6-19: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04 in 60 cm Tiefe

Die maximalen Abweichungen lassen sich für den Winter 2003/04 bis max. 4 °C in 20 cm Tiefe ausmachen (**Abbildung 6-20**), wobei diese in Phasen erreicht werden, in denen eine Schneeschicht auf der Tulbeckstraße die Frosteindringung beeinflusst.

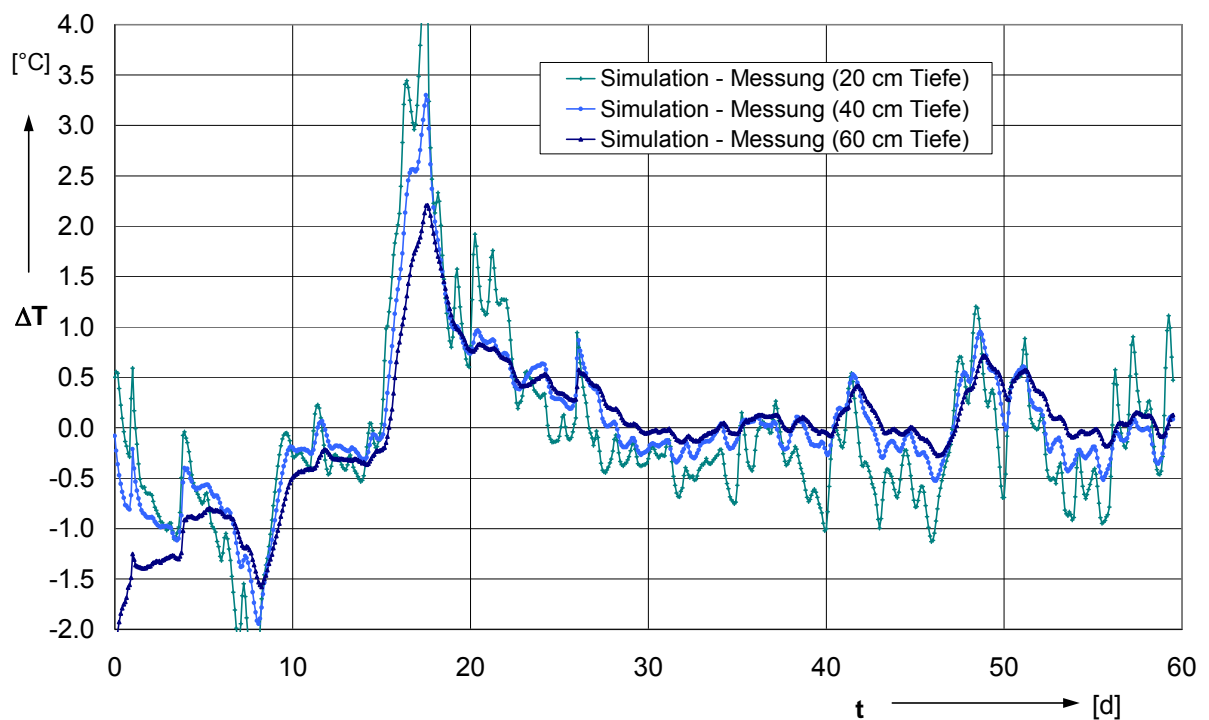


Abbildung 6-20: Differenz zwischen simuliertem und gemessenem Temperaturverlauf in München im Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04

Diese stärkeren Abweichungen werden auch aus der **Abbildung 6-21** und **6-22** deutlich. Die Wertepaare weichen besonders bei gemessener 0 °C Temperatur stärker von der Regressionsgerade ab, und der Korrelationskoeffizient beträgt nur rd. 80 %.

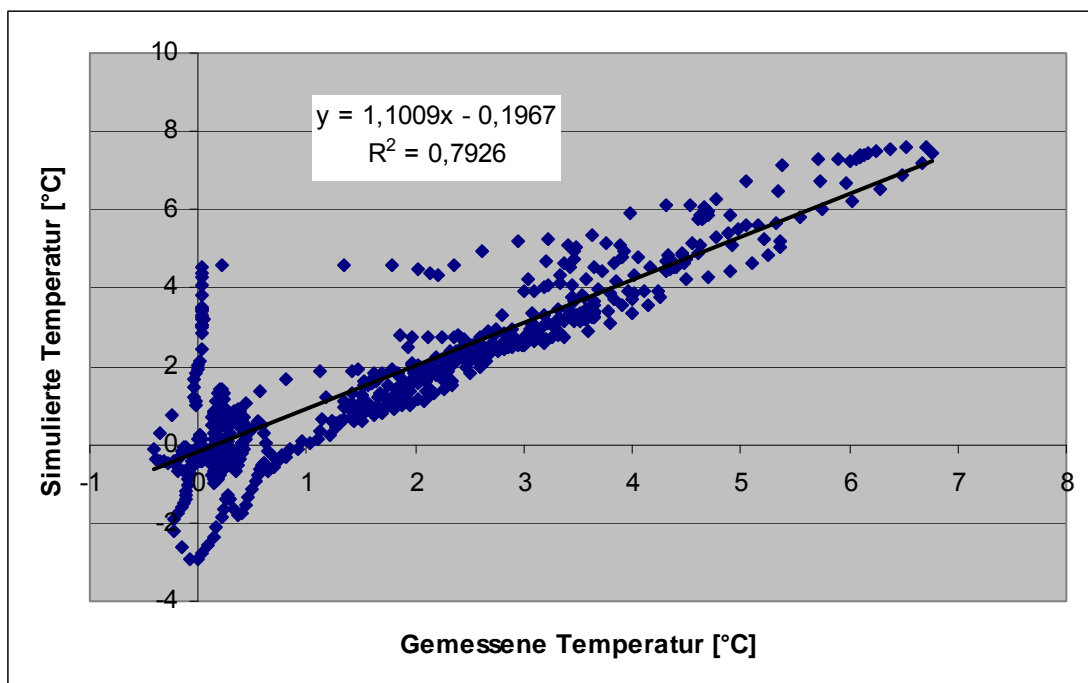


Abbildung 6-21: Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Temperaturverlauf in München im Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04 in der Tiefe von 20 cm

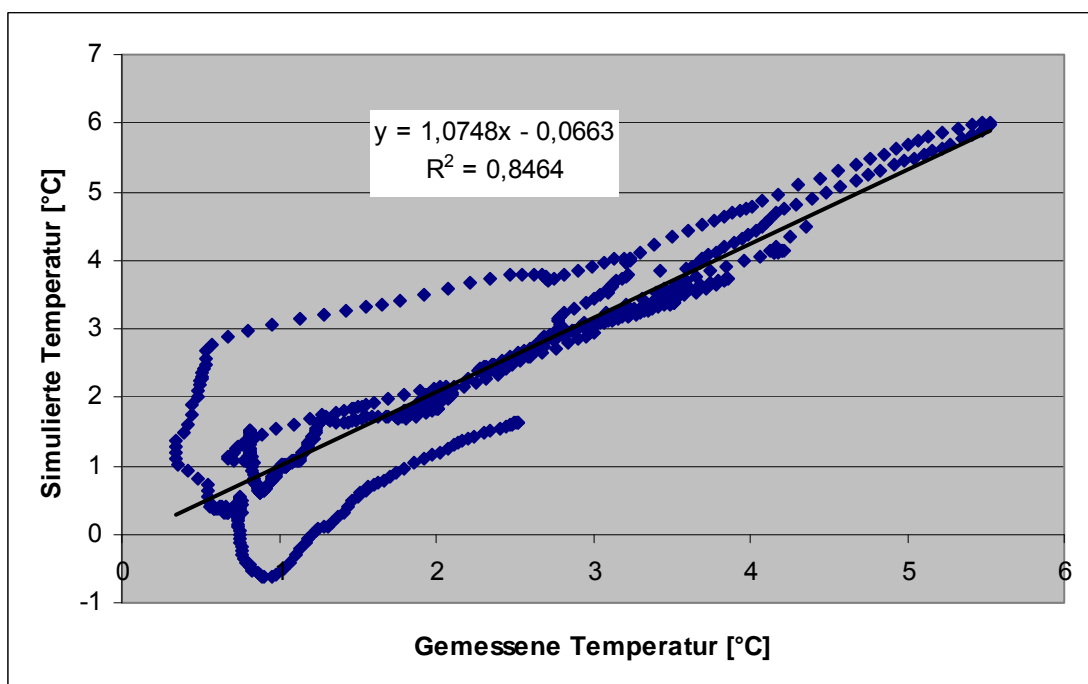


Abbildung 6-22: Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Temperaturverlauf in München im Winter 2003/04 vom 16.01.04 – 15.03.04 in der Tiefe von 60 cm

Die Tendenz aus dem Winter 2003/04 wird auch in den **Abbildungen 6-23 bis 6-28** bestätigt, wo die gemessenen und simulierten zweistündigen Temperaturen in den Tiefen 20 cm, 40 cm sowie 60 cm für die Tulbeckstraße im Winter 2004/05 aufgetragen sind. In der Winterperiode vom 01.12.04 – 15.03.2005 konnten in Phasen von Schneelagen vom 19.12. – 31.12.04 sowie 23.01. – 15.03.05 keine so gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen erreicht werden. Im Februar 2005 sind zwei Auftauphasen, in denen die Werte extrem differieren. Die trägeren gemessenen Werte lassen sich mit dem im Straßenaufbau befindlichen gefrorenen Wasser erklären, das erst mit der Aufnahme zusätzlicher Energie auftaut. Diese Energie geht dem Straßenaufbau für die eigentliche Erwärmung verloren.

Zusätzlich versickert der geschmolzene Schnee und verhindert durch die höhere Wärmekapazität von Wasser gegenüber trockenem Material ein schnelles Ansteigen des Temperaturniveaus. Aus diesem Grund reagiert das reale System träger als die Software simuliert. Ein weiterer Grund könnte in der Störung der Fläche durch die Bohrung liegen. Die gebundenen Schichten wurden durch einen Kaltasphalt ersetzt, der aufgrund der Handverdichtung einen größeren Hohlraumgehalt und somit eine geringere Leitfähigkeit aufweist.

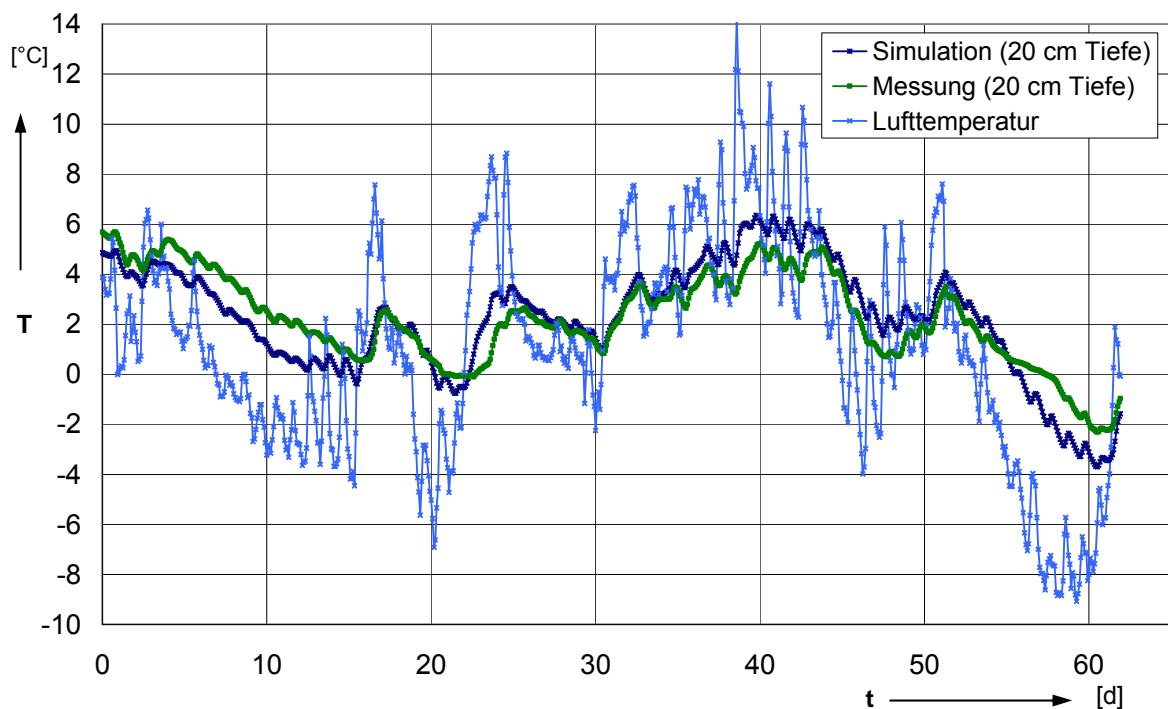


Abbildung 6-23: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 31.01.05 in 20 cm Tiefe

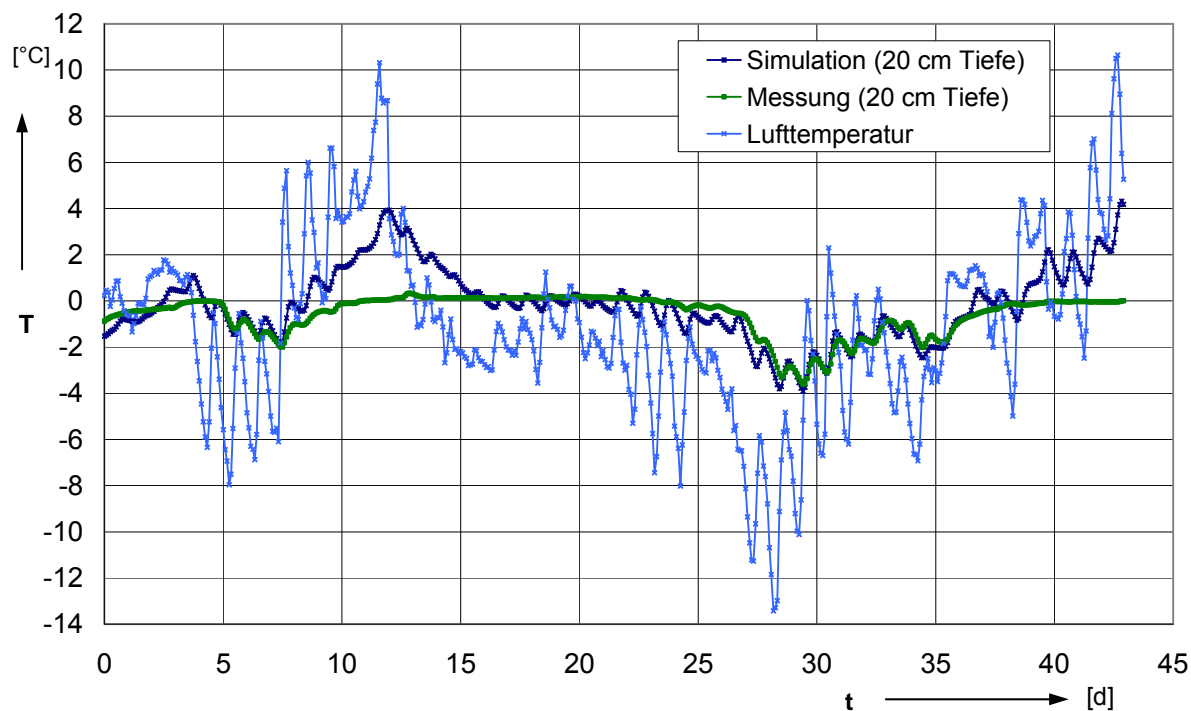


Abbildung 6-24: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.02.05 – 15.03.05 in 20 cm Tiefe

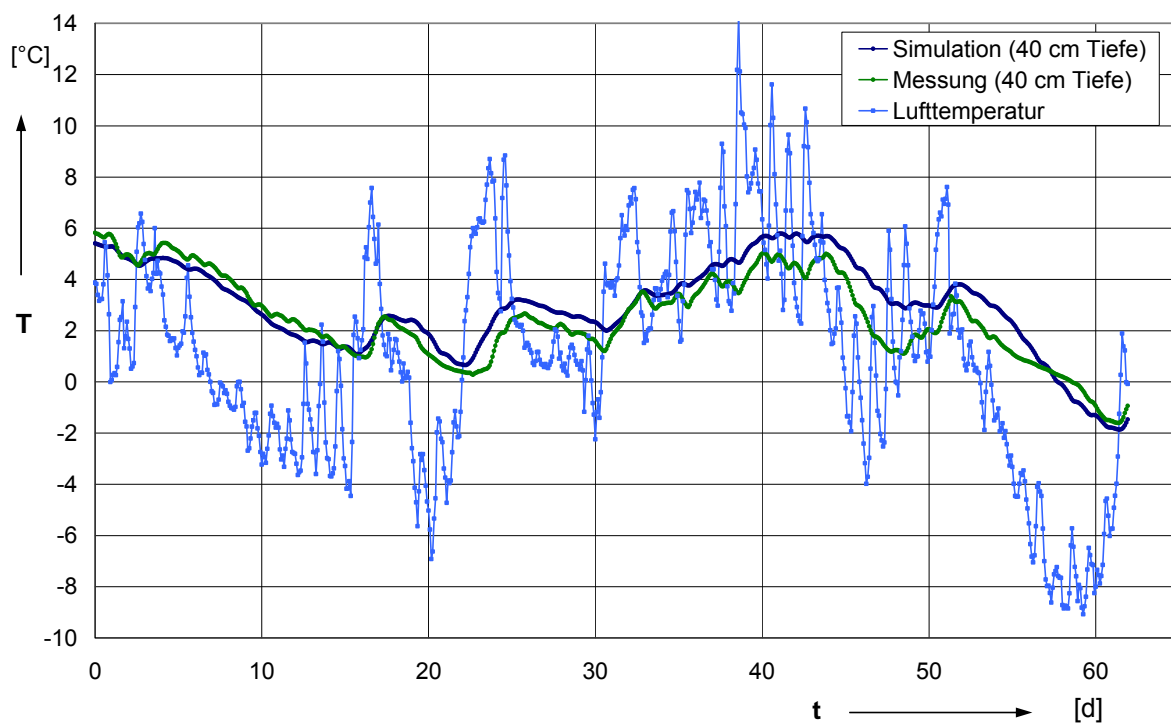


Abbildung 6-25: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 31.01.05 in 40 cm Tiefe

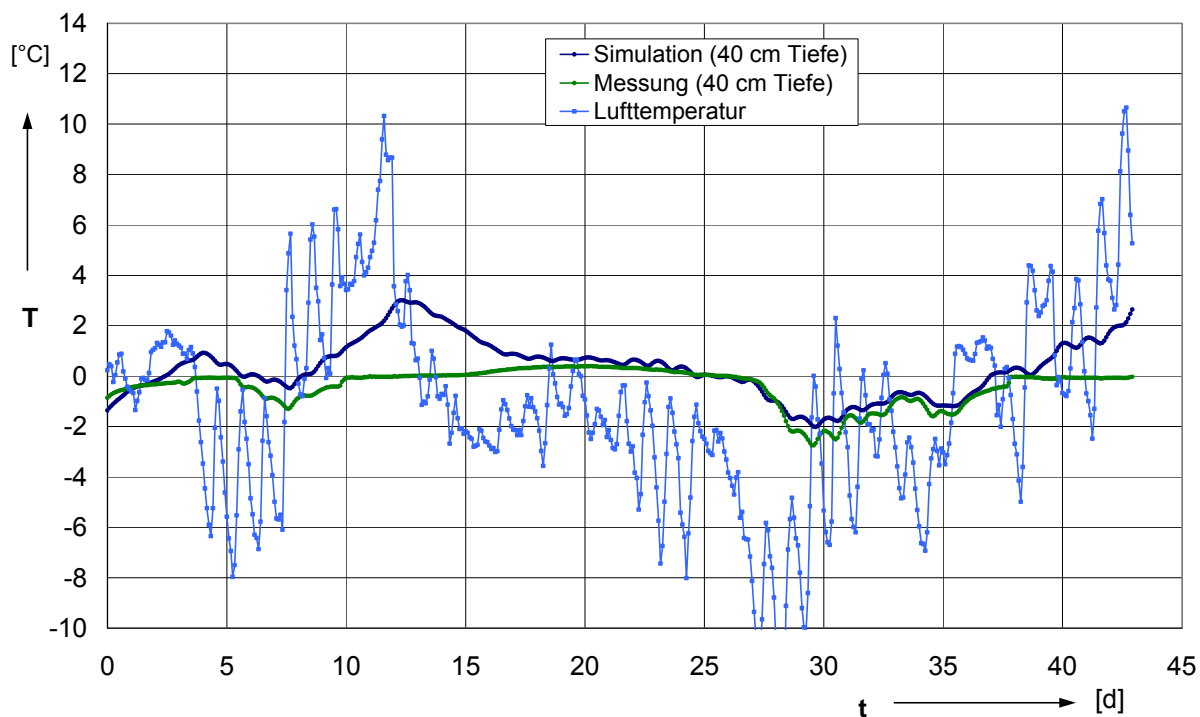


Abbildung 6-26: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.02.05 – 15.03.05 in 40 cm Tiefe

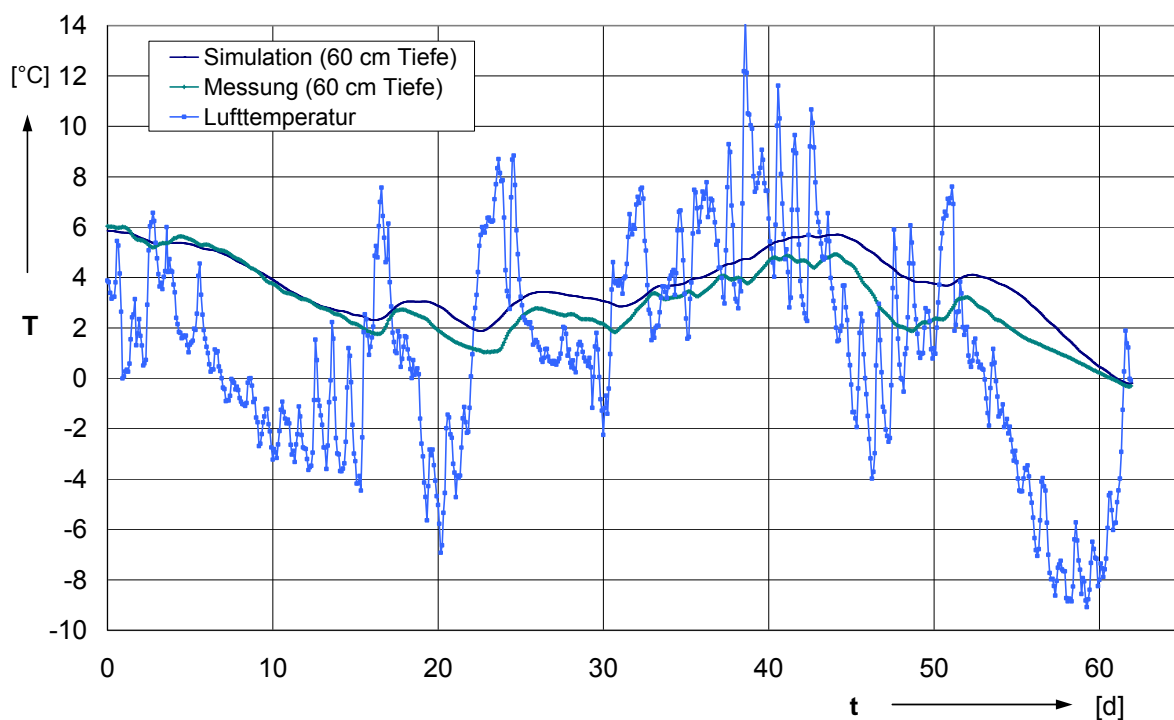


Abbildung 6-27: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.12.04 – 31.01.05 in 60 cm Tiefe

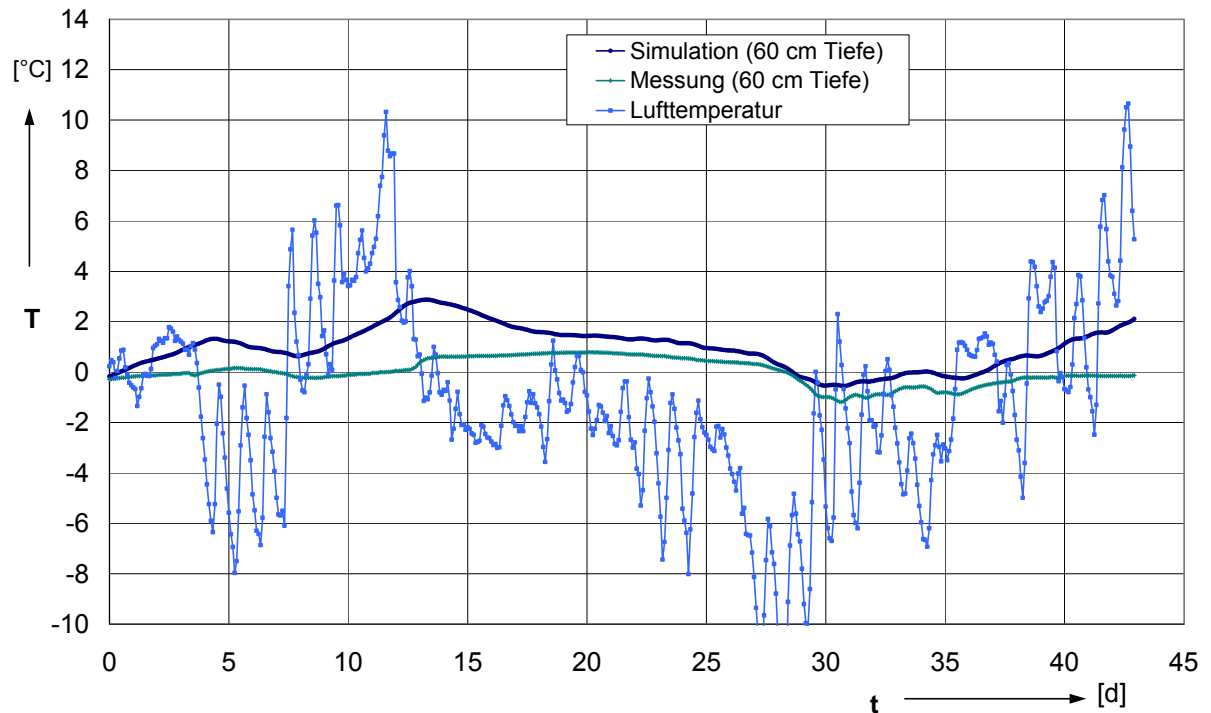


Abbildung 6-28: Vergleich der simulierten mit den tatsächlich gemessenen Werten in München für den Winter 2004/05 vom 01.02.05 – 15.03.05 in 60 cm Tiefe

Die Abweichungen zwischen den simulierten und gemessenen Daten liegen gemäß **Abbildung 6-29** und **6-30** wie im Winter 2003/04 wiederum in einer Größenordnung von 4 °C, die in den Auftauphasen im Frühjahr 2005 erreicht wurden.

Die Schwankungsunterschiede an der oberflächennahen Messstelle in 20 cm Tiefe sind gegenüber der Messstelle in Bad Fredeburg eher gering, da hier durch die sehr dichte Bebauung keine direkte Sonneneinstrahlung auf die Straßenoberfläche fällt und somit eine wesentlich geringere einfallende Energiemenge angesetzt wird.

Die Genauigkeit der Simulation ist gegenüber dem Winter 2003/04 etwas höher. Der Korrelationskoeffizient ergibt sich gemäß **Abbildung 6-31** und **6-32** zu über 85 %. Auffällig ist die Abweichung der simulierten Werte bei gemessenen 0 °C, bei der die Umwandelungsenthalpie zum Tragen kommt.

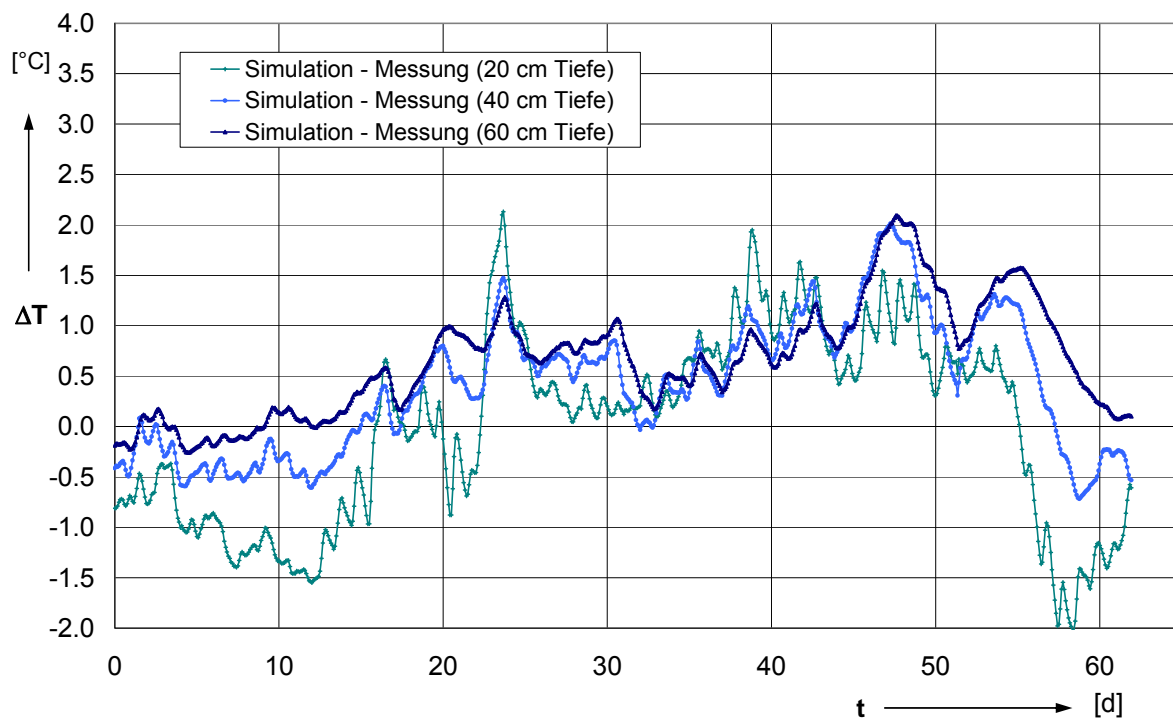


Abbildung 6-29: Abweichung der simulierten von der gemessenen Temperatur im Winter 2004/2005 vom 01.12.04 – 31.01.05

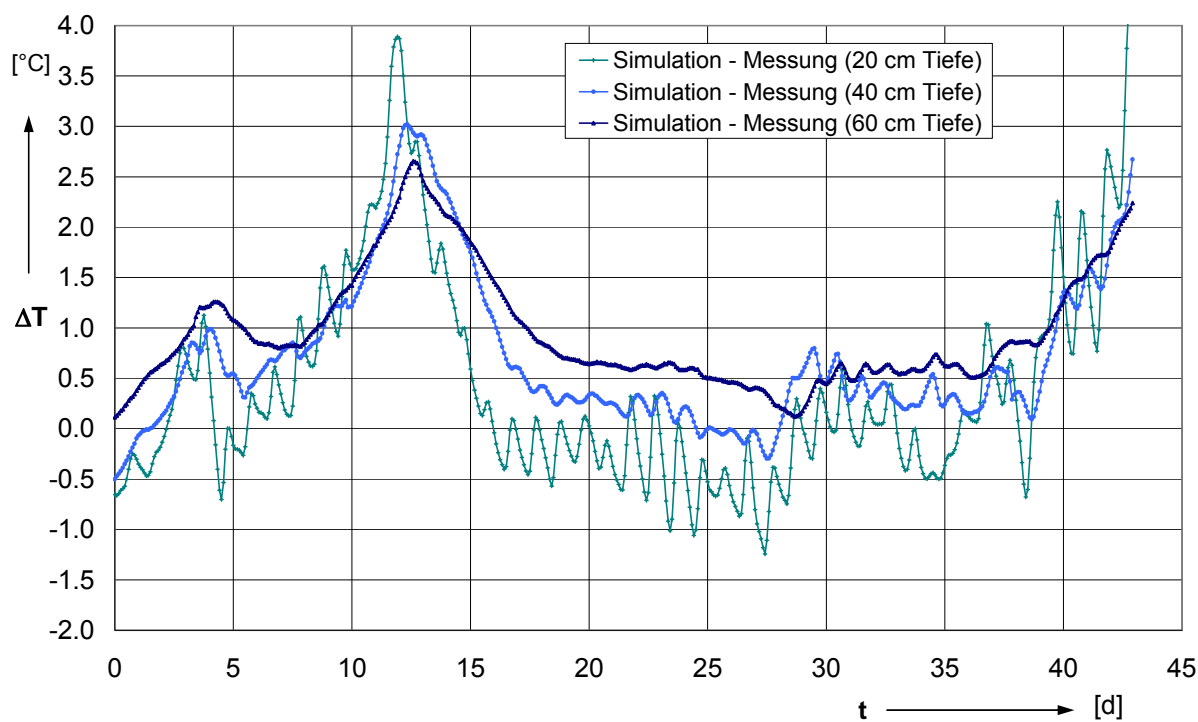


Abbildung 6-30: Abweichung der simulierten von der gemessenen Temperatur im Winter 2004/2005 vom 01.02.05 – 15.03.05

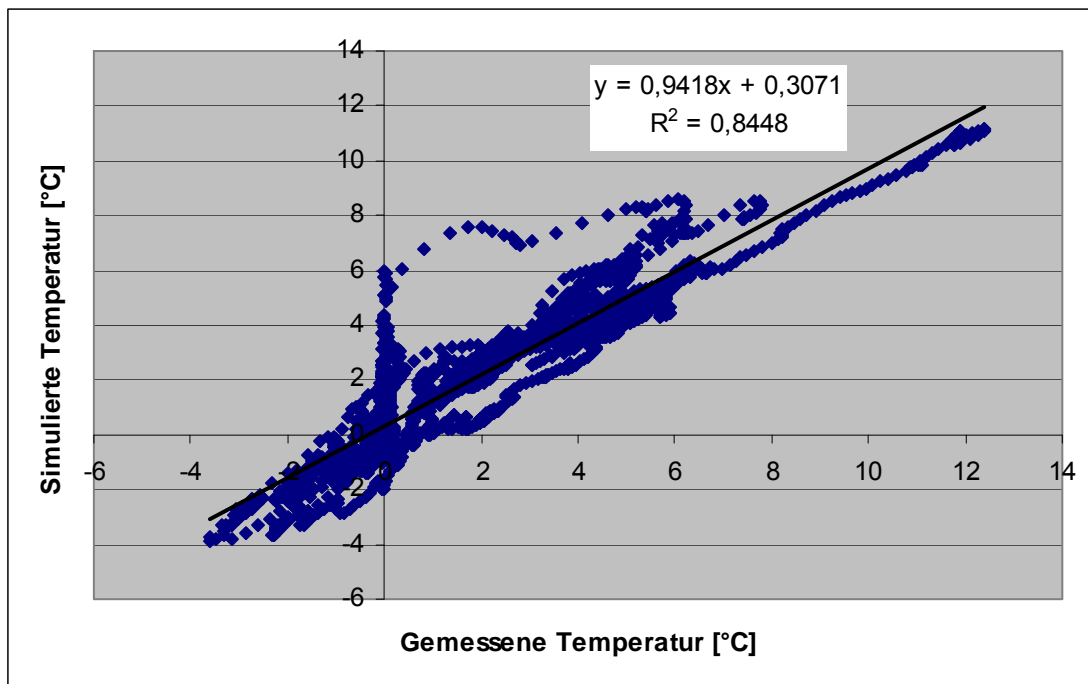


Abbildung 6-31: Darstellung der simulierten und der gemessenen Temperaturwerte in München in 20 cm Tiefe für den Winter 2004/05

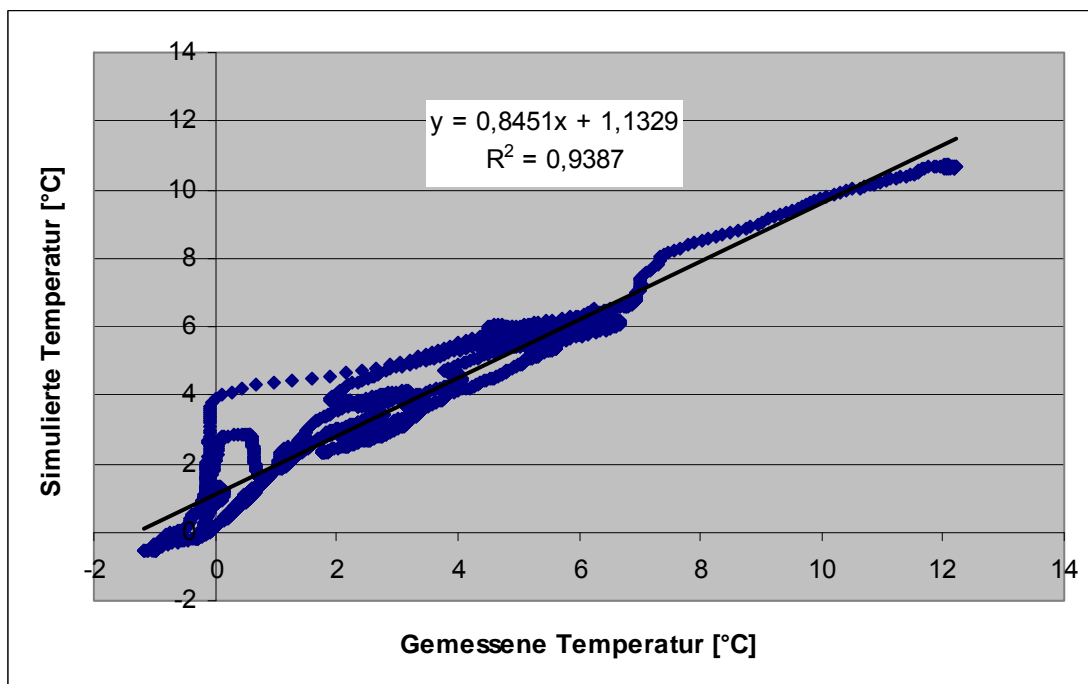


Abbildung 6-32: Darstellung der simulierten und der gemessenen Temperaturwerte in München in 60 cm Tiefe für den Winter 2004/05

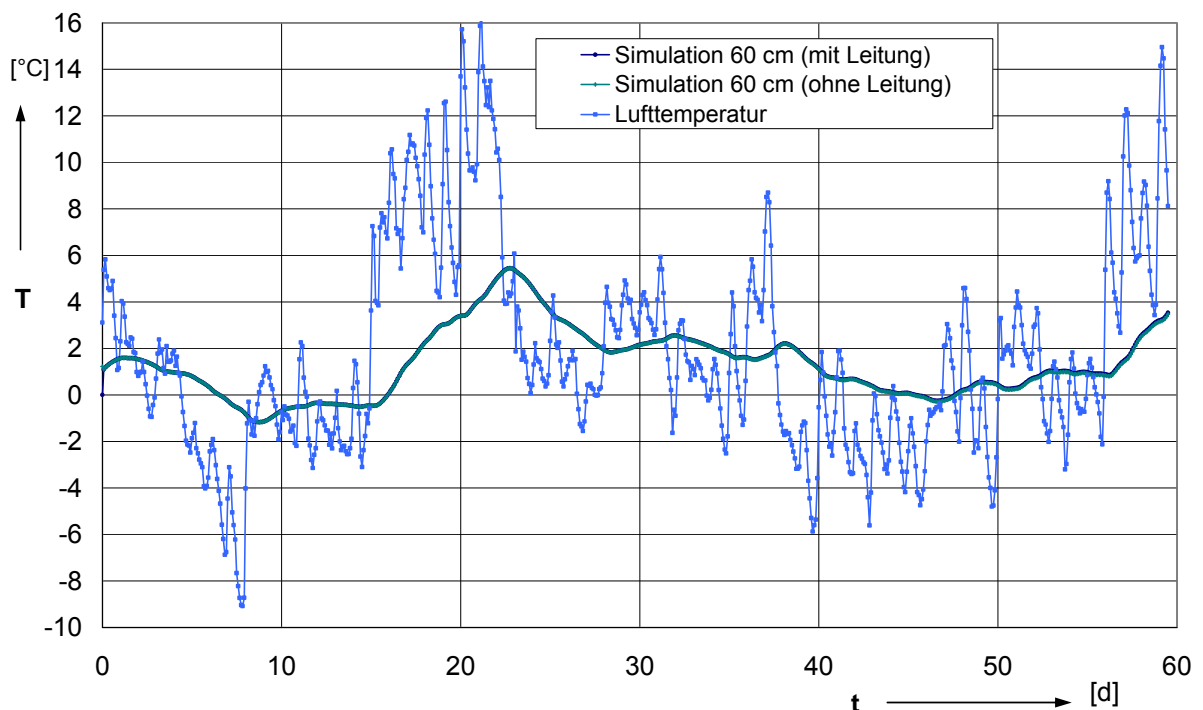
7 Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Frostein- dringung

Die Ergebnisse für die gemessenen Frostein-
dringungen lassen keine Verallgemei-
nerungen für andere Straßenquerschnitte und für andere Frostperioden zu. Aus die-
sem Grund werden im Folgenden anhand durchgeführter Simulationsberechnungen
speziell die Parameter Leitungen und Baustoffe untersucht, um eine detaillierte Aus-
sage über deren Einflussnahme zu treffen.

7.1 Leitungen

7.1.1 Einfluss der Leitungen auf die Frostein- dringung

Um den Einfluss der Leitungen beurteilen zu können, sind in den **Abbildungen 7-1**
und **7-2** die Simulationsergebnisse für die Straßenmitte des Querschnittes der Tul-
beckstraße und der L776 für den Winter 2003/04 mit sowie ohne Berücksichtigung
der Leitungen dargestellt.



**Abbildung 7-1: Tulbeckstraße mit und ohne Ansatz von Gas- und Abwasserleitung im Winter
2003/04 vom 16.01.2004 bis zum 15.03.2004 in 60 cm Tiefe**

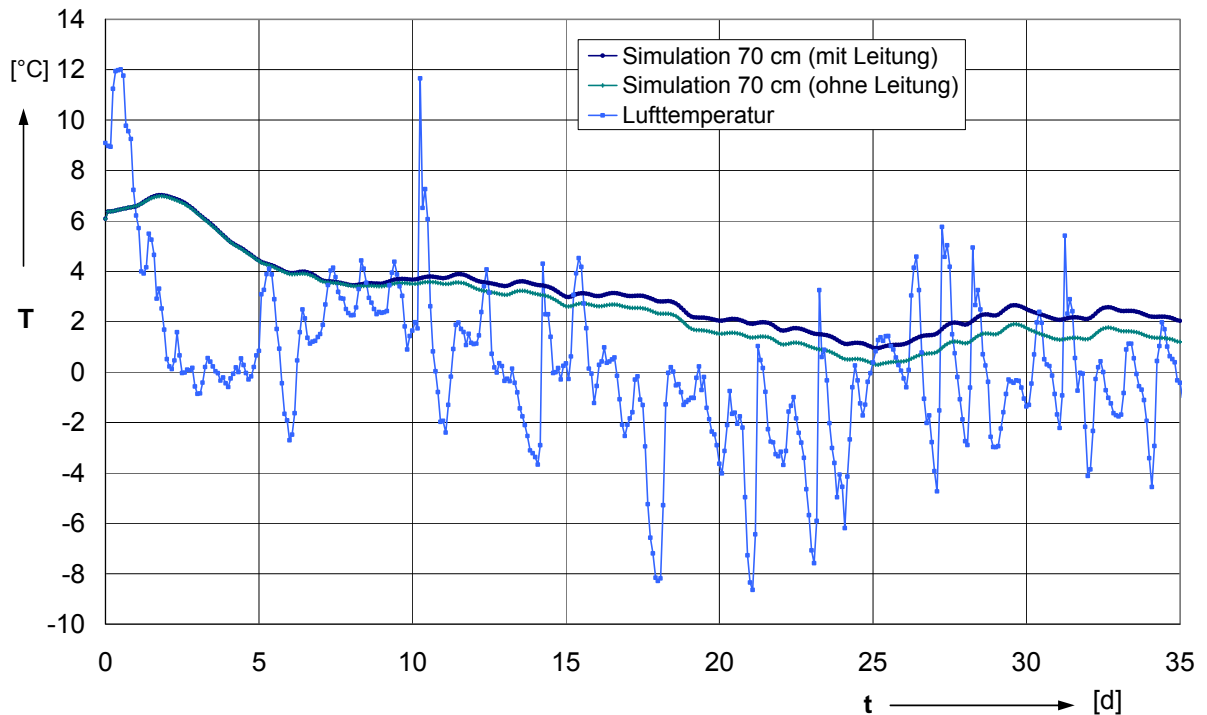


Abbildung 7-2: Bad Fredeburg mit und ohne Ansatz der Abwasserleitung im Winter 2003/04 vom 06.02.2004 - 15.03.2004 in 70 cm Tiefe

Während sich für den Querschnitt in der Tulbeckstraße bei den vorhandenen Leitungslagen kein Unterschied für die Temperaturen in 60 cm Tiefe der Straßenmitte feststellen lässt, kann in Bad Fredeburg bei Ansatz der Abwasserleitung ein Einfluss ausgemacht werden. Der Unterschied liegt in einer Tiefe von 70 cm für die Winterperiode 2003/04 bei bis zu 1 °C. Der Einfluss der Leitungen im Straßenquerschnitt kann demnach nicht pauschal beurteilt und muss einzelfallspezifisch untersucht werden.

7.1.2 Auswertung der Umfrage über die Leitungssituation in Deutschland

Für eine Abschätzung, in welchem Masse die Leitungen in deutschen Kommunalstraßen positive Auswirkungen auf die Temperaturverteilung im Winter haben, wurden in einer Umfrage möglichst repräsentative Informationen über den innerstädtischen Leitungsbestand erfasst. Hierfür wurden Umfragebögen an 178 Städte mit jeweils über 70.000 Einwohnern in Deutschland bzw. an deren Ver- und Entsorgerunternehmen versendet. Die Umfragebögen sind im **Anhang 1** dargestellt. Insgesamt erfolgten zum Bereich Abwasser 55 verwertbare Rückmeldungen (31 %). Bezogen auf die Straßenlänge der angeschriebenen Städte entspricht das einer Quote von 40 %. Die Daten über die Versorgerleitungen liegen dagegen von durchschnittlich 18 % der angeschriebenen Städte vor.

Abwasser

Die Abwässersysteme der Städte lassen sich in zwei verschiedene Kanalisationsarten einteilen, die Misch- und die Trennkanalisation. Der Mischkanal sammelt alle anfallenden Abwässer in einer Leitung und führt diese der Kläranlage zu, während das Trennsystem das Schmutzwasser in einem Schmutzwasserkanal und den Niederschlagsabfluss in einem eigenen Regenwasserkanal abführt. Der Regenwasserabfluss gelangt i. d. R. anschließend in einen Vorfluter, während das Schmutzwasser zur Aufbereitung in eine Kläranlage fließt. In der Umfrage stellt das Mischsystem mit 72 % das hauptsächlich angewendete System dar. Die Leitungen liegen größtenteils unter der Straßenfläche. Die sich aus der Umfrage ergebenden Lagen sind getrennt nach den Leitungsarten in **Abbildung 7-3** dargestellt.

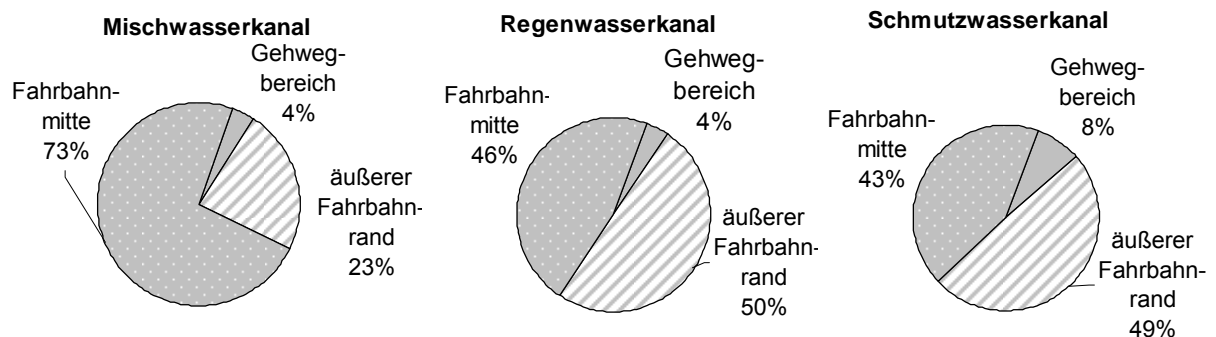


Abbildung 7-3: Lageverteilung der Kanalisation im Straßenquerschnitt [71]

Dabei sind nachfolgende mittlere Überdeckungshöhen errechnet worden:

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

Die Wahl der für die Kanalisation verwendeten Baustoffe ist in **Abbildung 7-4** dargestellt. Steinzeug ist wegen seiner hohen Resistenz gegenüber chemischen Angriffen in Schmutzwasserkanäle stark vertreten (71,7 %). Bei größeren Querschnitten in der Mischkanalisation kommen verstärkt Betonfertigteile zum Einsatz.

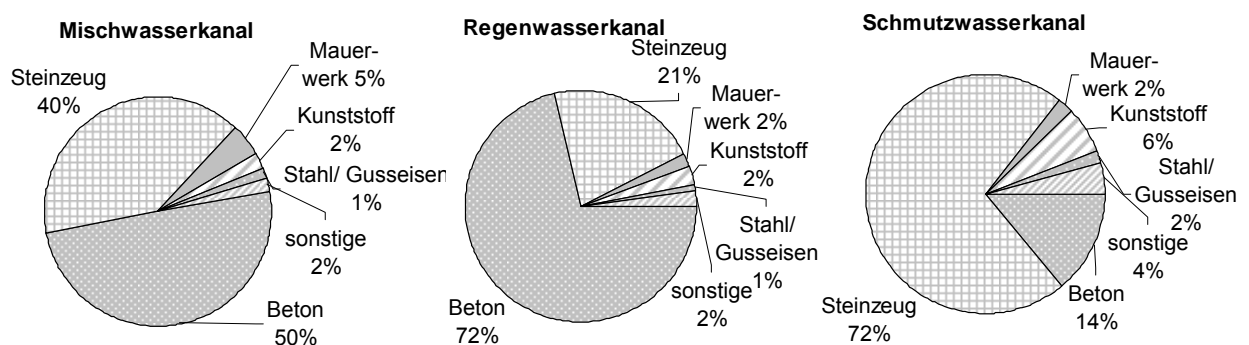


Abbildung 7-4: Werkstoffverteilung für die Leitungen in der Kanalisation [71]

Die Nennweitenverteilung für Misch-, Regen-, und Schmutzwasserkanäle zeigt **Abbildung 7-5**. Die Mehrheit der Leitungen mit rd. 75 % besteht hiernach aus Nennweiten unter DN 650.

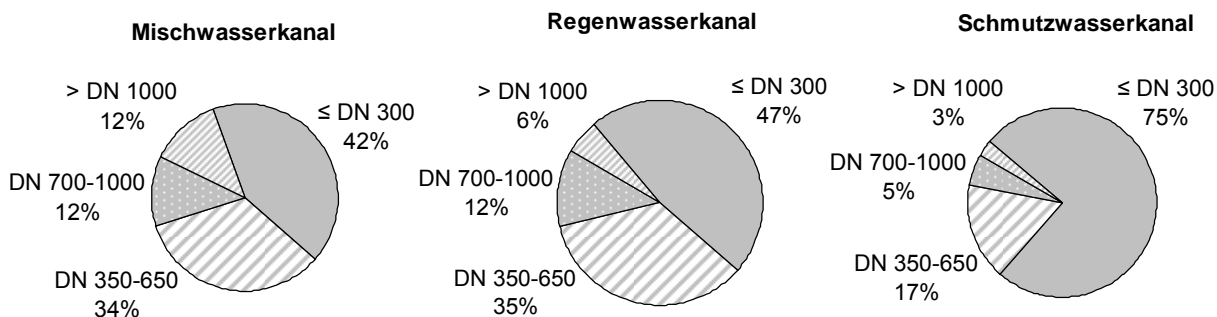


Abbildung 7-5: Nennweitenverteilung der Leitungen in der Kanalisation [71]

Die am häufigsten vertretenen Querschnittsformen stellen das Kreis-, Ei-, und Maulprofil dar. Das Kreisprofil lässt sich am einfachsten herstellen und kann Belastungen gleichmäßig gut bewältigen. Dementsprechend hoch ist sein Verbreitungsgrad bei Mischwasserkanälen (80,2 %), Regenwasserkanälen (92,7 %) und Schmutzwasserkanälen (91,5 %). Eiprofile werden vorwiegend in der Mischkanalisation verwendet. Die relativ hohe Fließgeschwindigkeit im Trockenwetterabfluss vermindert Ablagerungen am Profilboden, während der sich nach oben aufweitende Querschnitt genug Reserven für anfallendes Niederschlagswasser bietet.

Die genannten 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 durchschnittlichen 8 °C. Da die Temperaturen nicht nur vom Klima und Geologie, sondern auch von der Art und Größe des Einzugsgebietes abhängen, sind allgemein gültige Aussagen kaum zu treffen. Abwassereinleitungen aus Industrien (Wäscherei, Brauerei, Papierfabrik usw.) lassen die oben ermittelten Werte leicht auf das dreifache ansteigen. In dünn besiedelten Gebieten herrschen im Kanal auf Grund der geringeren Schmutzwassereinleitung niedrigere Temperaturen.

Erdgas

Die Nennweiten der Gasleitungen im städtischen Bereich lassen sich zu rd. 50 % mit ≤ DN 125 sowie mit rd. 46 % zu DN 150 bis 300 einteilen. 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.

Trinkwasser

Die Trinkwasserleitungen liegen gemäß **Abbildung 7-6** größtenteils im Gehwegbereich. Ein beträchtlicher Anteil von rd. 34 % ist aber im Straßenbereich angeordnet. Dabei sind rd. 80 % der Leitungen mit Rohrquerschnitten < DN 200 eingebaut. Die durchschnittliche Tiefe hat sich zu 1,27 m ergeben.

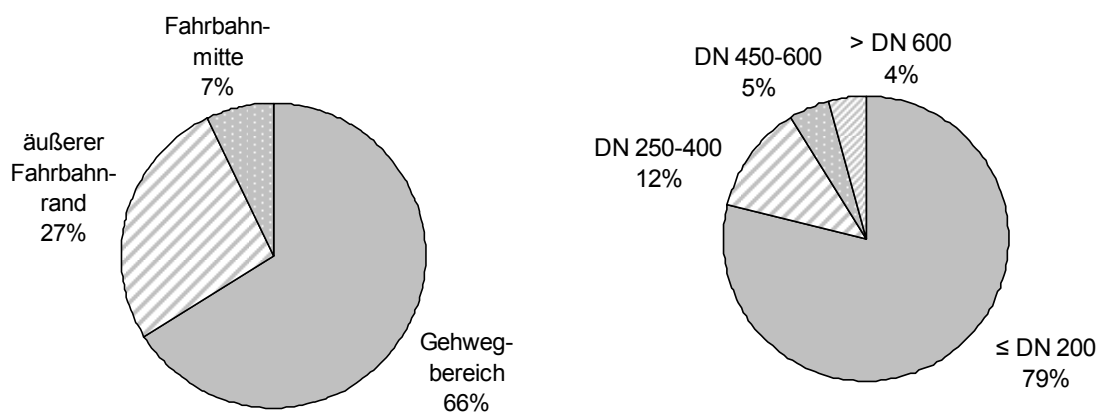


Abbildung 7-6: Lage- und Nennweitenverteilung von Trinkwasserleitungen im Straßenquerschnitt [71]

Die eingesetzten Werkstoffe für die Trinkwasserleitungen sind neben Gusseisen (62 %) die Kunststoffe (20 %). Der in dieser Umfrage durchschnittlich ermittelte Wert von 8 °C ergibt sich aus vereinzelt Messungen von örtlichen Wasserwerken oder Schätzungen.

Fernwärme

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.

Um die Abwärme und damit eine Kondensatbildung möglichst zu verhindern, werden die Rohre in den Kanälen laut Umfrage zu 98,5 % mit Mineraldämmstoffen, und hier

aus Polyurethan-Hartschaum (88 %), 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 auch aufgrund der Mindestabständen zur Trinkwasserleitung gemäß der DIN 1998 [72] zu rd. 75 bzw. 80 % im Fahrbahnbereich (**Abbildung 7-7**).

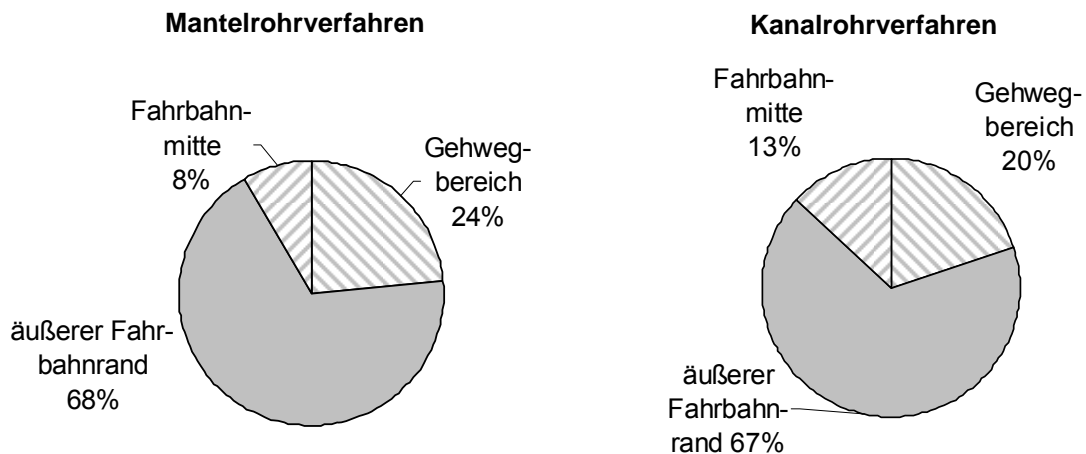


Abbildung 7-7: Lageverteilung von Fernwärmeleitungen für das Mantelrohr- und das Kanalrohrsystem

Beim Mantelrohrverfahren werden Nennweiten bis DN 450 verwendet, während im Kanalrohrverfahren auch noch in 12 % der Fälle Leitungen mit Nennweiten über DN 450 verwendet wurden (**Abbildung 7-8**).

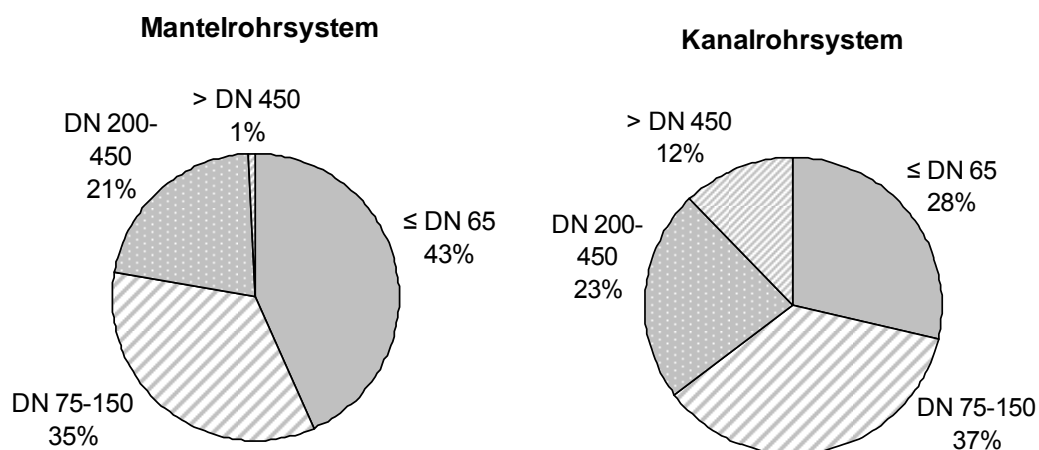


Abbildung 7-8: Nennweitenverteilung von Fernwärmeleitungen [71]

Laut Umfrage beträgt die Temperatur des in den Mantelrohren durchfließenden Heißwassers 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. Der dortige Energieentzug lässt den Wärmeträger auf ca. 73 °C erkalten (**Abbildung 7-9**).

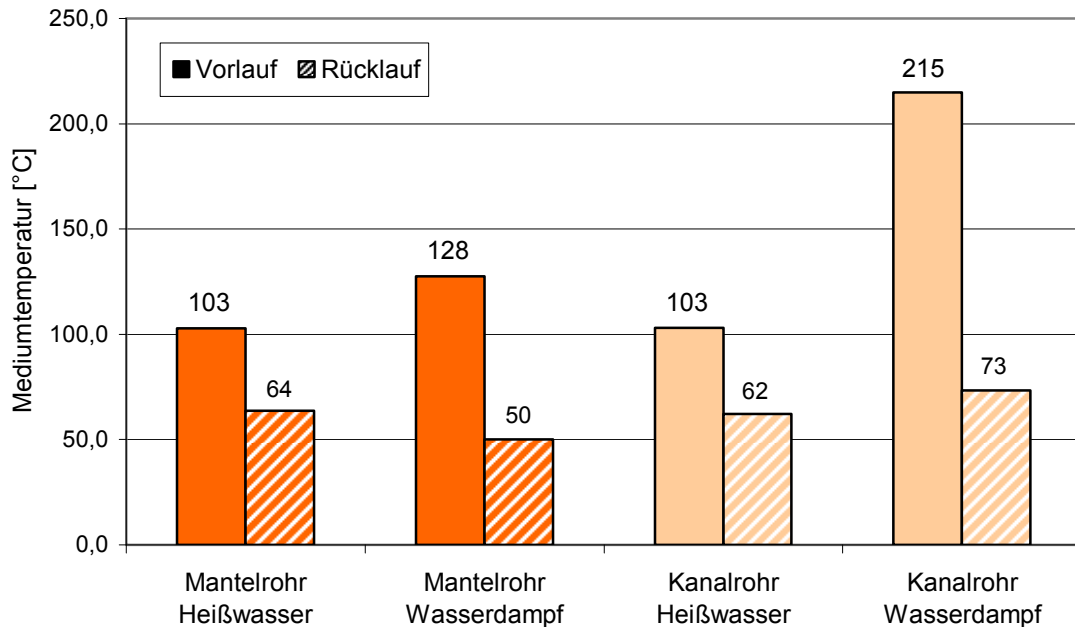


Abbildung 7-9: Temperaturen von Fernwärmeleitungen nach Einbauverfahren und Rohrmedium [71]

7.2 Einfluss der Baustoffe

Die gebundenen Schichten frieren bei Frostphasen sehr schnell durch. Es wäre zu untersuchen, inwieweit die wärmephysikalischen Eigenschaften dieser Schichten verändert werden können, um eine isolierende Schicht zu erhalten.

In den ungebundenen Schichten kann durch den Einsatz von RC-Baustoffen die Frosteindringung erheblich beeinflusst werden. Besonders durch porenhaltige Bestandteile haben die RC-Baustoffe veränderte wärmephysikalische Kennwerte, die eine Frosteindringung hemmen können. In **Abbildung 7-10** sind beispielhaft an einem Straßenaufbau von 85 cm Dicke unterschiedliche Frosteindringungsverläufe dargestellt, bei der die 51 cm dicke Frostschutzschicht mit unterschiedlichen Baustoffen unter gleichen Randbedingungen gebaut wurde. Grauwacke, Basalt, Asphaltgranulat, Betonaufbruch sowie Hochbauschutt wurden für eine Frostperiode mit konstanter Oberflächentemperatur von -9 °C bei 60 Tagen Dauer beobachtet. Danach weisen Hochbauschutte zu Beginn der Frostperiode eine geringere Frosteindringeschwindigkeit auf. Die geringeren Frosteindringtiefen gegenüber den Primärbaustoffen liegen bei bis zu 20 cm.

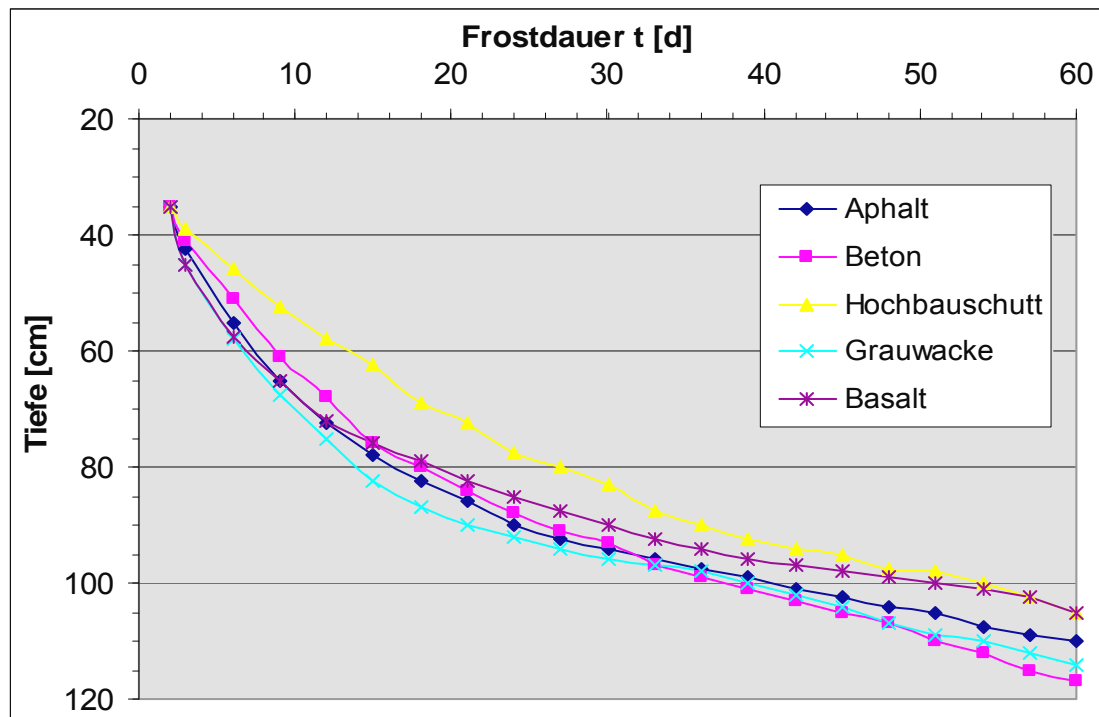


Abbildung 7-10: Frosteindringungsverläufe in Abhängigkeit von der Tiefe und Frostdauer für verschiedene ungebundene Baustoffe [15]

Erst wenn der gesamte Oberbau durchgefroren ist, erhöht sich die Frosteindringgeschwindigkeit. Grund hierfür ist der höhere Wassergehalt dieser Schicht, der nach dem Durchfrieren eine höhere Leitfähigkeit besitzt als die meisten übrigen Baustoffe.

Die Betrachtung von Recycling-Materialien im Straßenaufbau lässt sich nur theoretisch ansprechen, da eine zweckmäßige Simulation mit HEAT2 nicht möglich ist. Weder die Änderung der Wärmeleitfähigkeiten bzw. der Wärmekapazitäten noch die Umwandlungsenthalpie können bei der Berechnung berücksichtigt werden.

7.3 Simulation eines strengen Winters

Um die Frosteindringung für einen starken Winter darzustellen, wurde die Lufttemperaturwerte des Winters 2004/05 von der Station München-Flughafen vom DWD um 5 °C abgemindert, so dass gemäß **Abbildung 7-11** der Frostindex mit 650 °Cd vergleichbar mit der Winterhärte des Jahres 1962/63 ist.

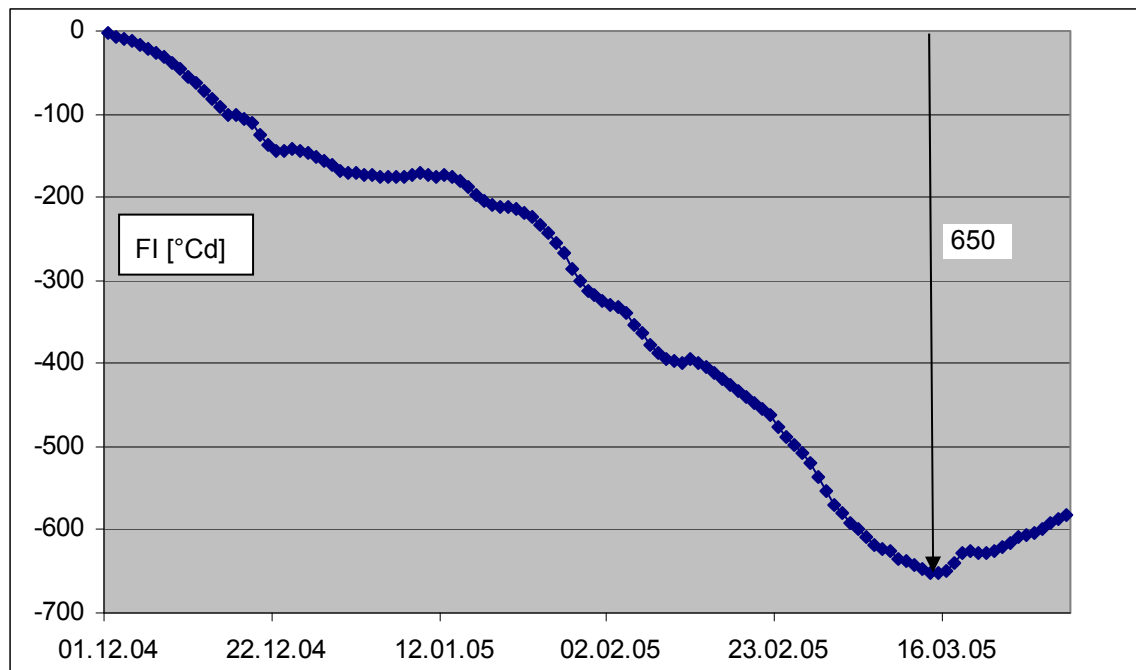


Abbildung 7-11: Modifizierter Frostindex (FI) für den Zeitraum vom 01.12.2004 – 31.03.2005 am Münchener Flughafen nach Absenken der Lufttemperaturen um 5 °C

Für den Zeitraum vom 01.11.2004 bis zum 15.03.2005 werden mit diesen abgesenkten Lufttemperaturwerten in den **Abbildung 7-12** und **7-13** die Temperaturwerte für die Tiefen 20, 60 und 160 cm am Querschnitt der Tulbeckstraße jeweils mit und ohne Berücksichtigung der Gas- und Abwasserleitungen simuliert. Die Ergebnisse sind unter der Voraussetzung zu sehen, dass im Straßenaufbau kein Wasser vorhanden ist.

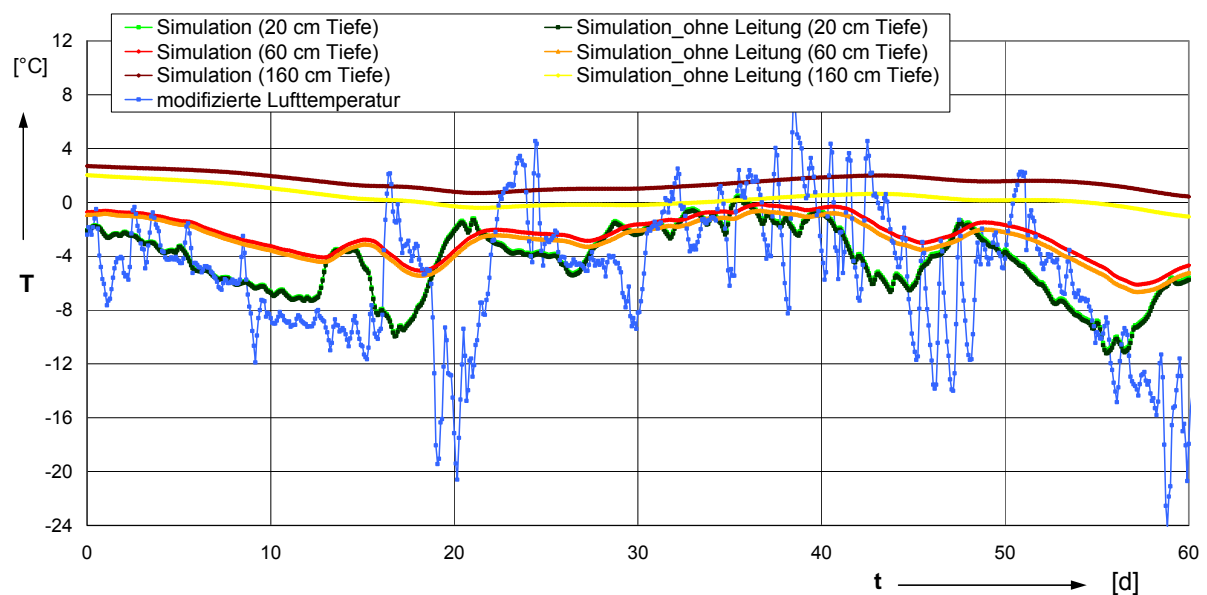


Abbildung 7-12: Simulierte Bodentemperaturen in 20 cm, 60 cm und 160 cm Tiefe für die dargestellte modifizierte Lufttemperatur vom München-Flughafen für den Zeitraum vom 01.12.2004 bis zum 31.01.2005

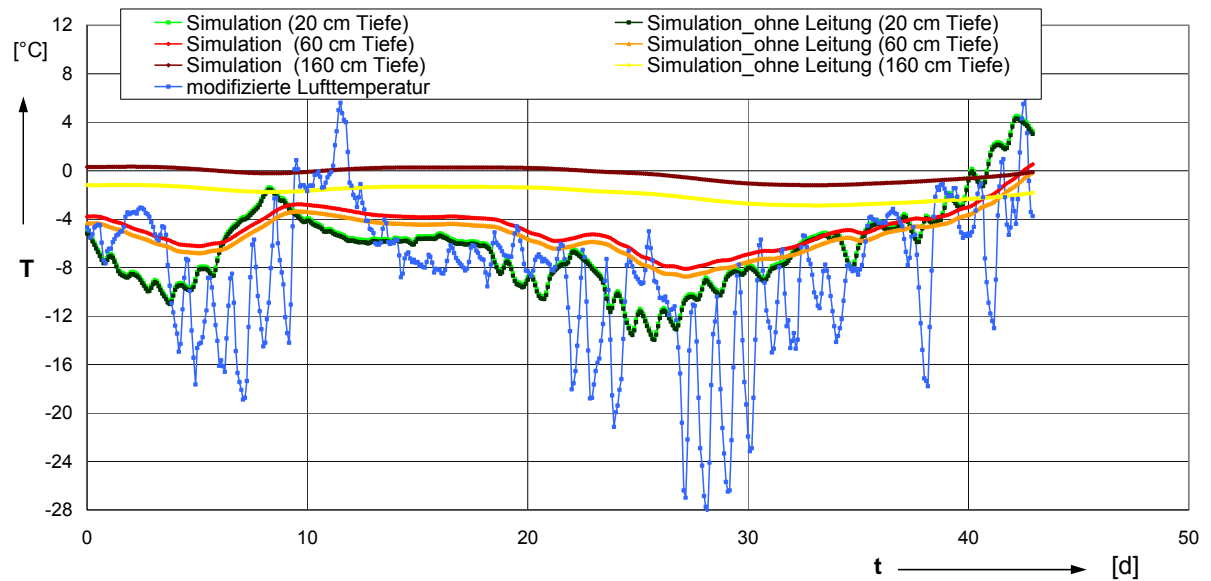


Abbildung 7-13: Simulierte Bodentemperaturen in 20 cm, 60 cm und 160 cm Tiefe für die dargestellte modifizierte Lufttemperatur vom München-Flughafen für den Zeitraum vom 01.02.2005 bis zum 15.03.2005

Danach werden für diese Verhältnisse Frosteindringtiefen von bis zu 160 cm erreicht, wobei in Tiefen von 60 cm noch Temperaturen von bis zu -8 °C auftreten. Bei diesen extremen Bedingungen würden sich auch die berücksichtigten Gas- und Abwasserleitungen mit ihrem erhöhten Temperaturniveau im Boden bemerkbar machen. In **Abbildung 7-14** sind die Differenzen der Simulationsergebnisse mit und ohne Berücksichtigung der Leitungen aufgetragen, die in 160 cm Tiefe auf über $1,5\text{ °C}$ anwachsen. Neben der Leitungslage spielt bei der Frage eines Einflusses durch die Leitungen zusätzlich auch die Härte des Winters eine Rolle.

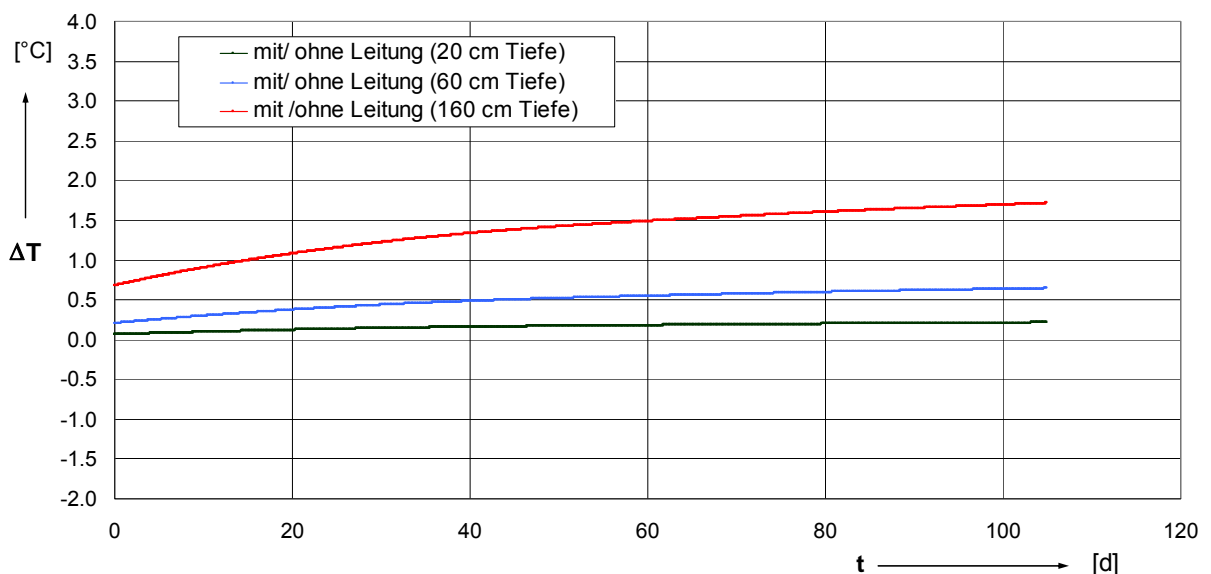


Abbildung 7-14: Vergleich der simulierten Temperaturdaten aus Abbildung 7-13 in 20 cm, 60 cm und 160 cm Tiefe mit bzw. ohne Berücksichtigung der Leitungen

8 Messwerte aus anderen Frosteinwirkungszonen

8.1 Allgemeines

Die Frosteindringung konnte anhand einer Simulationsberechnung gut abgebildet werden. Um Aussagen über das ganze Bundesgebiet treffen zu können, werden im Folgenden die veränderten Frostindizes aus den anderen Frosteinwirkungszonen und die simulierte Frosteindringung herausgearbeitet. Für die Beurteilung ausgewählter Städte der Frosteinwirkungszonen I und II sind die Lufttemperatur-, Wind und Globalstrahlungswerte für Hamburg, Köln/Bonn sowie Berlin und Nürnberg jeweils von einer urbanen sowie von einer umliegenden Messstation vom DWD herangezogen worden. Diese sind unter der Annahme eines geeigneten Bodenwärmestroms zu einer „berechneten Oberflächentemperatur“ berechnet worden (vgl. Kap. 6.2.4). Anhand des Querschnittes der Tulbeckstraße in München unter Beibehaltung der restlichen Randbedingungen sind im Weiteren die Temperaturen im Straßenaufbau wiedergegeben.

Als Ergebnisse der einzelnen Städte sind für den Zeitraum vom 01.12.2004 – 15.03.2005 zum ersten die minimalen Lufttemperaturwerte, zum zweiten die Frostindizes und schließlich die simulierten Bodentemperaturen aufgetragen.

8.2 Städte Hamburg/Quickborn

Für die Frosteinwirkungszone I werden Messdaten aus Hamburg-Fuhlsbüttel und Quickborn herangezogen. Die Stationsdaten sind in der **Tabelle 8-1** aufgelistet.

Tabelle 8-1 : Kennwerte der Klimamessstationen Hamburg-Fuhlsbüttel und Quickborn

Station	Hamburg-Fuhlsbüttel (Flughafen)	Quickborn
Geographische Lage	Breite 53°38' Länge 09°59'	Breite 53°44' Länge 09°53'
H üNN	11 m	13 m
Einwohnerzahl	1.730.000 (Stand 2005)	20.391 (Stand 2005)
Kennzeichen	Randgebiet	Randgebiet

Die Messstationen liegen nicht innerhalb eines dicht bebauten Gebietes, so dass nur ein verminderter Einfluss durch die Stadt vorliegt. Die minimalen Temperaturdaten vom 01.12.04 – 15.03.05 sind in der **Abbildung 8-1** dargestellt. Danach weisen beide Stationen die gleichen Verhältnisse auf. Lediglich in stark ausgeprägten Frostnächten kann eine leichte Abminderung für den Einflussbereich Hamburg nachgewiesen werden. Insgesamt sind in dieser Region für den Winter 2004/05 nur kurze

Frostphasen mit einem maximalen Frostindex von $FI = 30 \text{ }^\circ\text{Cd}$ aufgetreten (**Abbildung 8-2**).

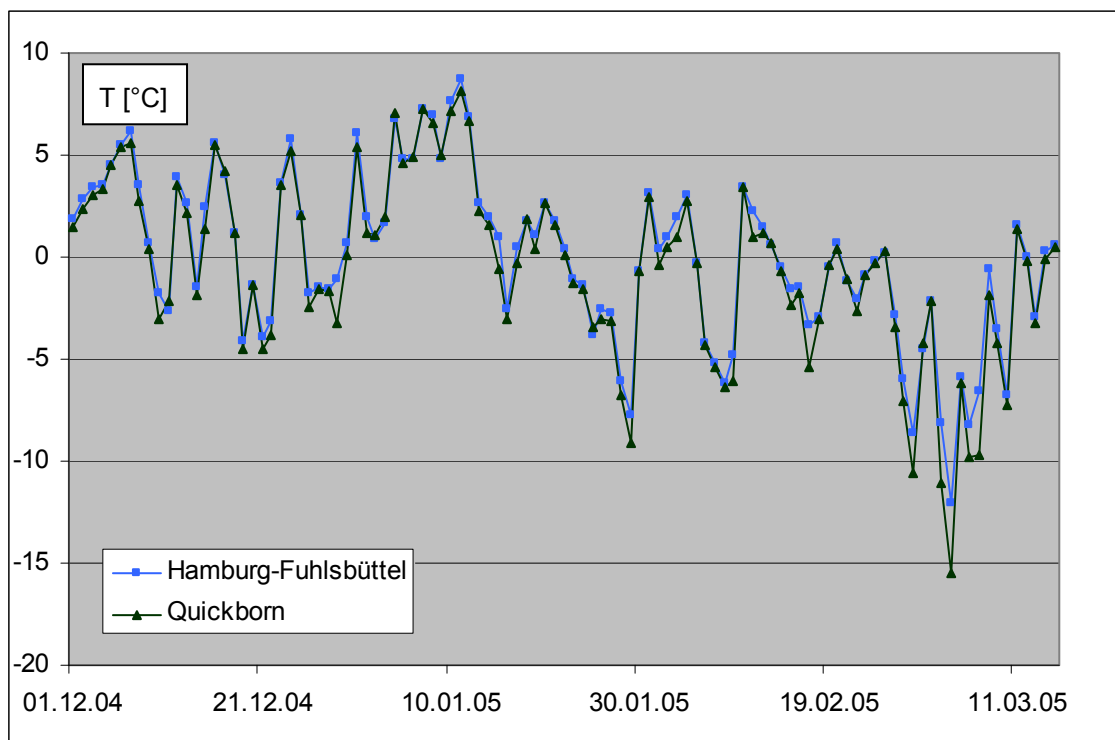


Abbildung 8-1: Minimale Lufttemperaturen für die Stationen Hamburg-Fuhlsbüttel und Quickborn für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005

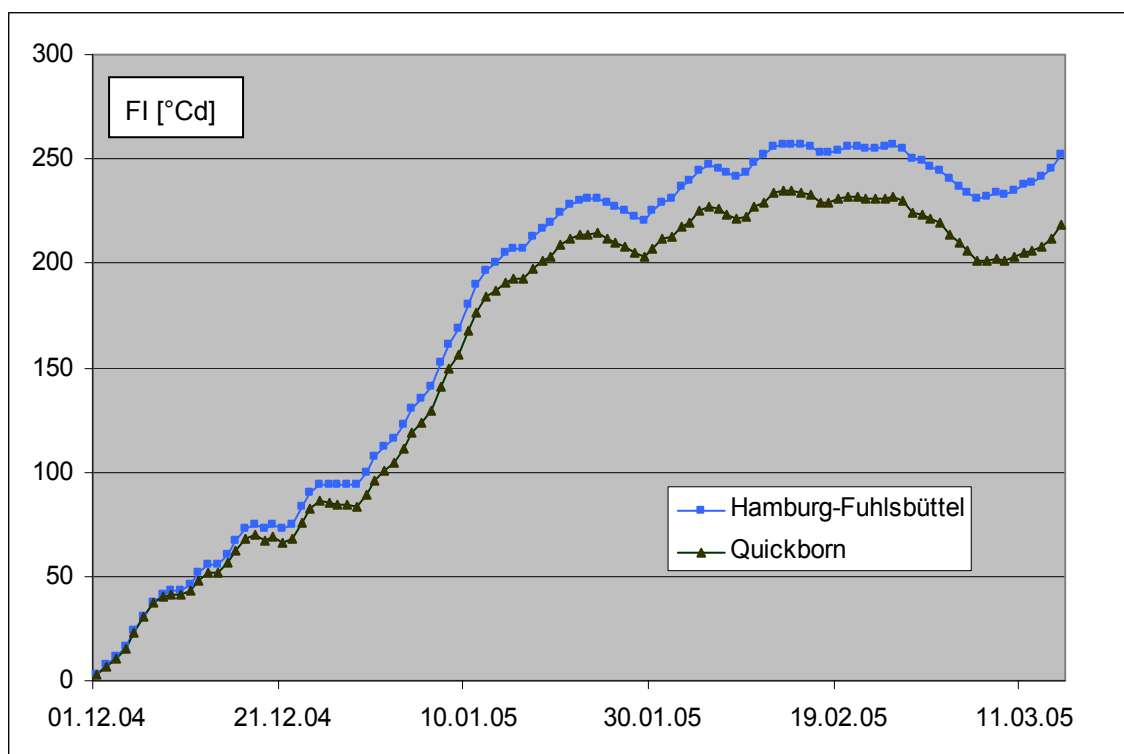


Abbildung 8-2: Ermittelter Frostindex (FI) für die Stationen Hamburg-Fuhlsbüttel und Quickborn für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005

Für die Messdaten Hamburg-Fuhlsbüttel ergeben sich für die Straßenmitte in den **Abbildungen 8-3** und **8-4** die simulierten Temperaturdaten für einen Querschnitt entsprechend der Tulbeckstraße für die Tiefen 20, 40 und 60 cm. Danach wurden im Frühjahr 2005 kurzzeitig Frosteindringungen von bis zu 60 cm erreicht.

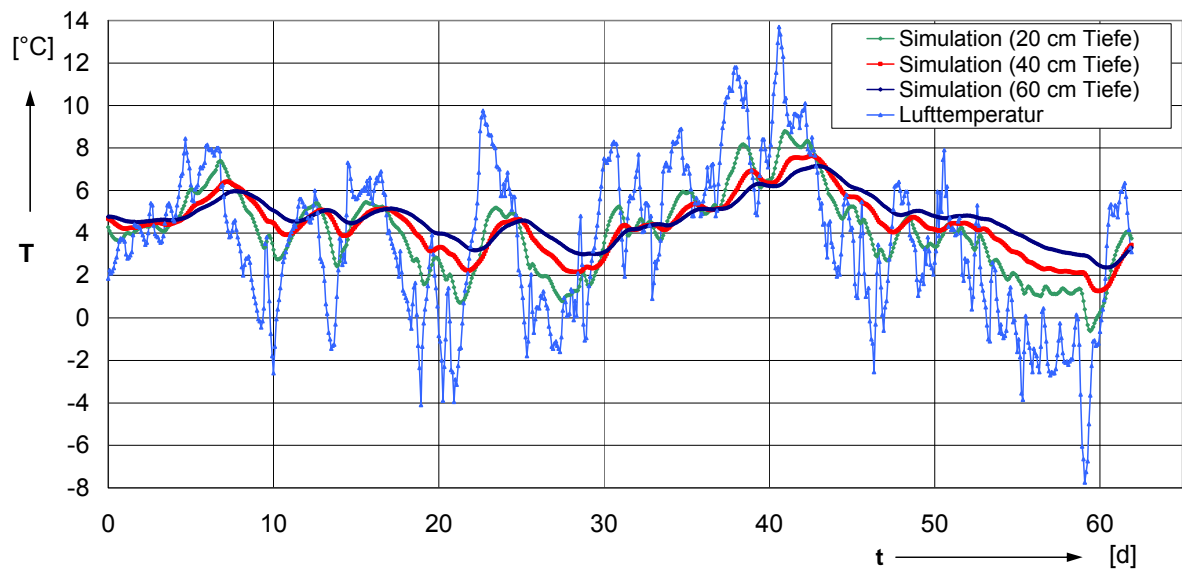


Abbildung 8-3: Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.12.2004 bis zu 31. 01.2005 für Hamburg-Fuhlsbüttel

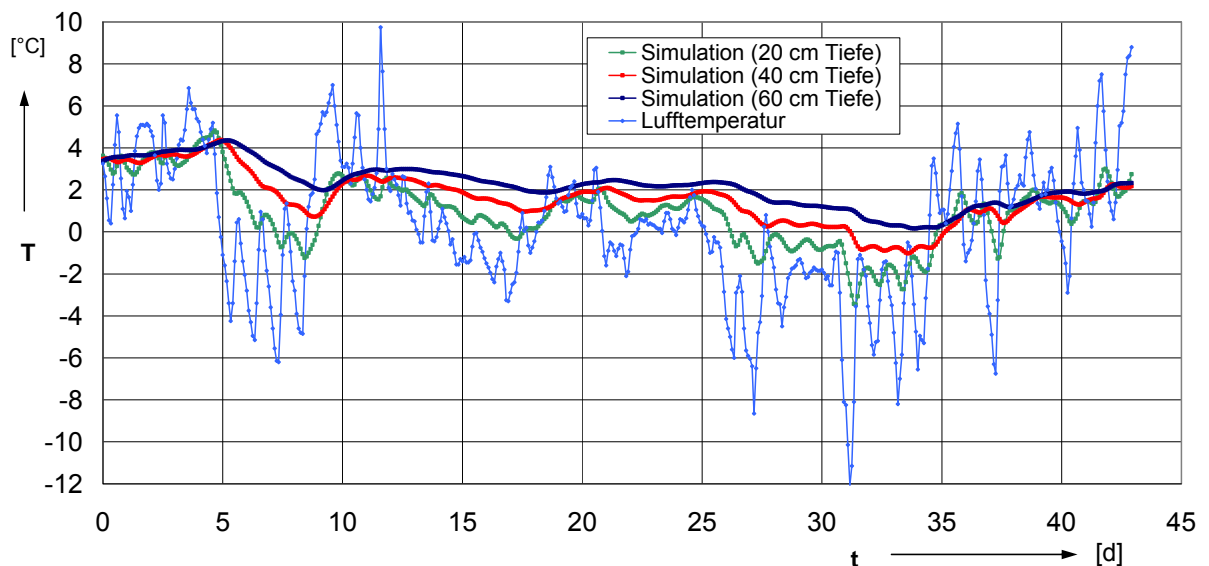


Abbildung 8-4: Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.02.2005 bis zu 15. 03.2005 für Hamburg-Fuhlsbüttel

8.3 Städte Köln/Bonn

Des Weiteren werden für die Frosteinwirkungszone I Messdaten aus dem Raum Köln/Bonn herangezogen. Hierbei sind die Stationen Köln-Wahn am Flughafen mit der Station Bonn-Roleber östlich des Bonner Zentrums für die Untersuchung verglichen worden. Die genauen geographischen Daten sind in der **Tabelle 8-2** aufgelistet.

Tabelle 8-2: Kennwerte der Klimamessstationen Köln-Wahn und Bonn-Roleber

Station	Köln-Wahn (Flughafen)	Bonn-Roleber
Geographische Lage	Breite 50°52' Länge 07°10'	Breite 50°47' Länge 07°12'
H üNN	92 m	159 m
Einwohnerzahl	1.022.700 (Stand 2004)	313.605 (Stand 2004)
Kennzeichen	Randgebiet	Randgebiet

Die Messstationen liegen ebenfalls in Randgebieten, so dass wiederum nur ein verminderter Einfluss durch die Stadt vorliegt. Die minimalen Temperaturdaten vom 01.12.2004 – 15.03.2005 sind in der **Abbildung 8-5** dargestellt. Danach weisen beide Stationen die gleichen Bedingungen und nahezu gleiche Temperaturverhältnisse auf. Insgesamt sind in dieser Region für den Winter 2004/05 gemäß **Abbildung 8-6** nur kurze Frostphasen mit einem maximalen Frostindex von 25 °Cd aufgetreten.

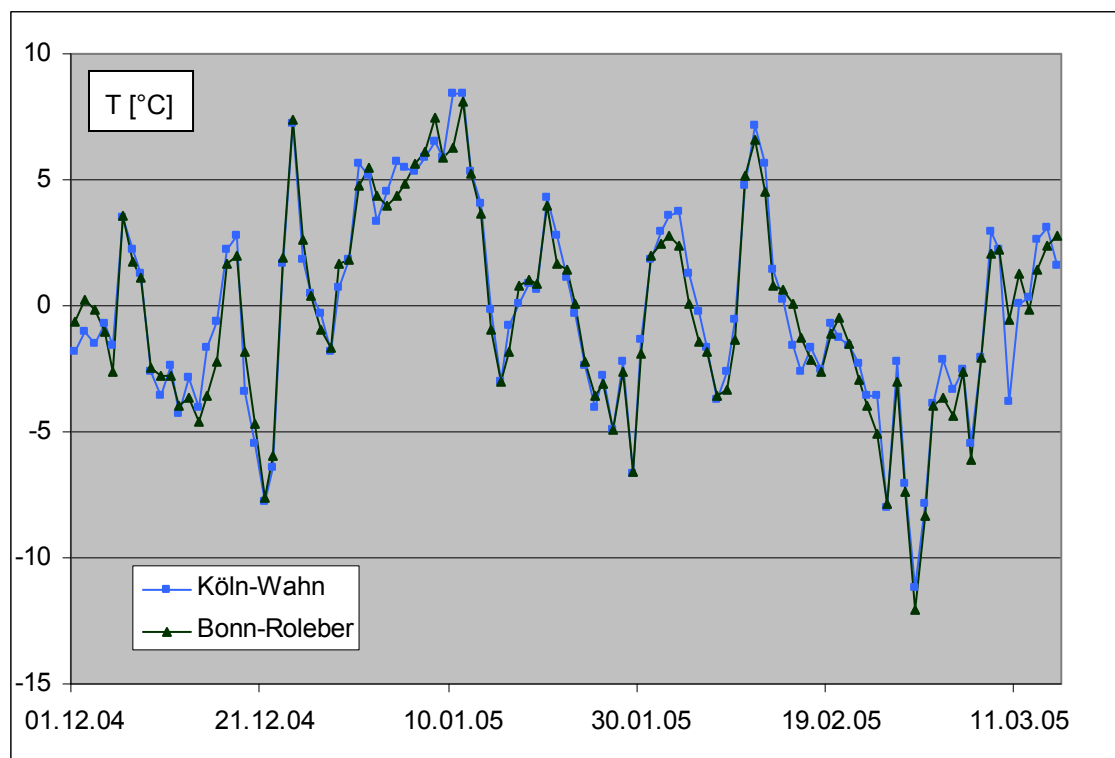


Abbildung 8-5: Minimale Lufttemperaturen für die Stationen Köln-Wahn und Bonn-Roleber für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005

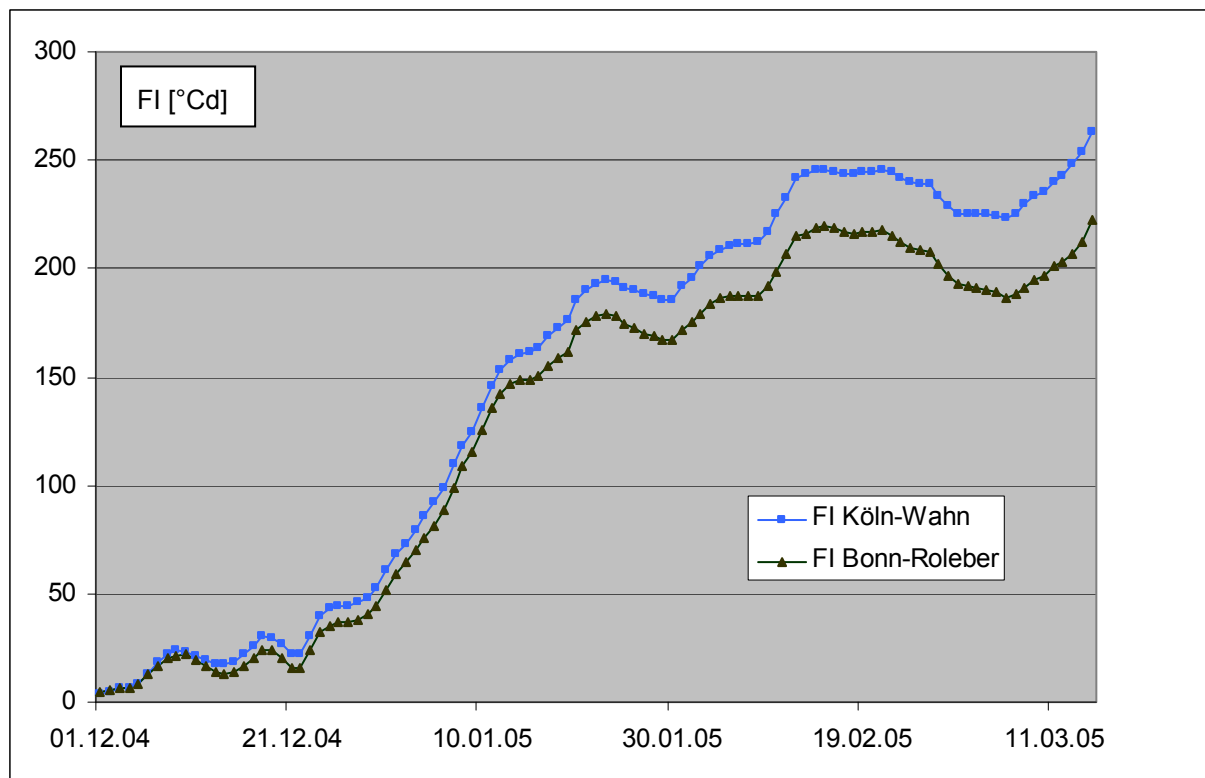


Abbildung 8-6: Ermittelter Frostindex (FI) für die Stationen Köln-Wahn und Bonn-Roleber für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005

Für die Messdaten Köln-Wahn liegen für die Straßenmitte in **Abbildung 8-6** und **8-7** die simulierten Temperaturdaten für die Tiefen 20, 40 und 60 cm vor. Danach wurde in der Frostphase im Frühjahr 2005 in 40 cm Tiefe nur kurzzeitig die 0 °C-Grenze unterschritten.

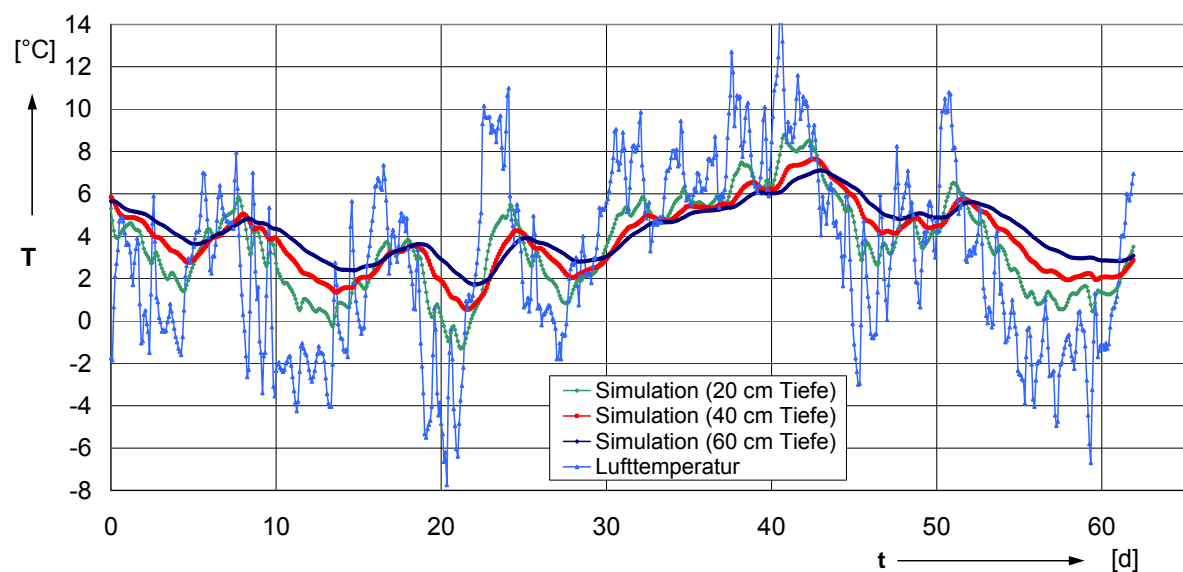


Abbildung 8-7: Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.12.2004 bis zu 31. 01.2005 für Köln-Wahn

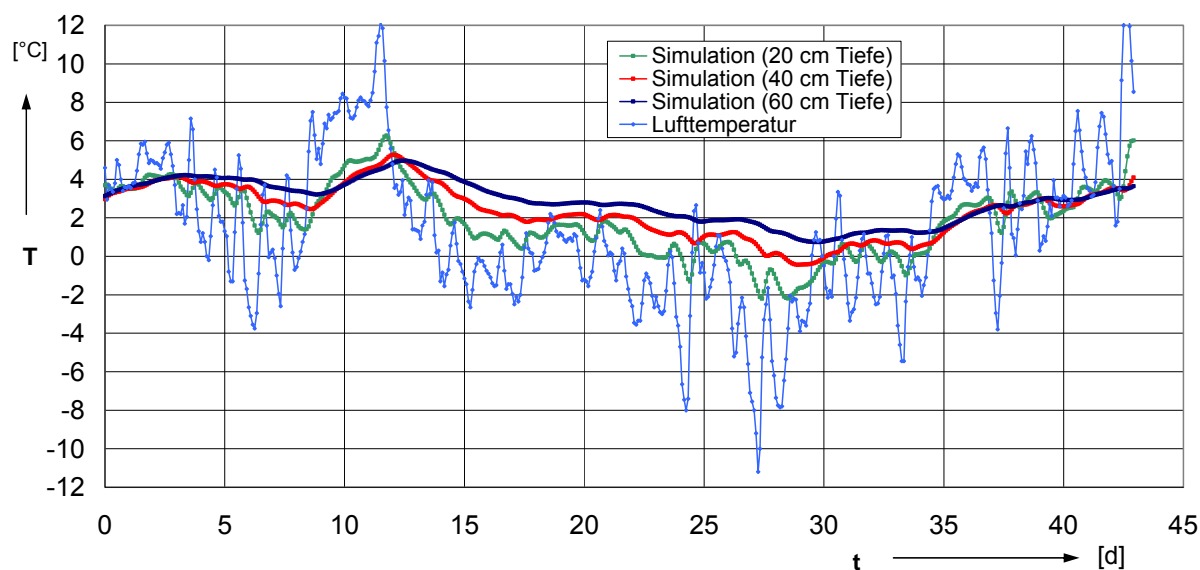


Abbildung 8-8: Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.02.2005 bis zu 15. 03.2005 für Köln-Wahn

8.4 Städte Berlin/ Potsdam

Für die Frosteinwirkungszone II wurden zwei Stationen in Berlin untersucht. Die Station Berlin-Dahlem liegt südwestlich des Zentrums in eng bebautem Gebiet. Allerdings ist anliegend eine größere Grünfläche vorhanden. Über die Umgebung der Station Potsdam liegen keine Daten vor. Weitere Lagedaten über die Stationen liefert die **Tabelle 8-3**.

Tabelle 8-3: Kennwerte der Klimamessstationen Berlin-Dahlem und Potsdam

Station	Berlin-Dahlem (Met.-Inst.)	Potsdam
Geographische Lage	Breite 52°28' Länge 13°18'	Breite 52°23' Länge 13°04'
H üNN	58 m	81 m
Einwohnerzahl	3.388.000 (Stand 2004)	144.544 (Stand 2004)
Kennzeichen	Stadtmitte-Parknähe	-

Gemäß **Abbildung 8-9** werden an beiden Stationen ähnliche minimale Tageslufttemperaturen gemessen, was auf vergleichbare urbane Randbedingungen schließen lässt. Insgesamt sind die minimal gemessenen Temperaturen vergleichbar mit dem Raum Köln/ Bonn und Hamburg/ Quickborn aus der Frosteinwirkungszone I und auch der Frostindex ist mit rd. 35 °Cd nur leicht erhöht gegenüber den Stationen der Frosteinwirkungszone I (**Abbildung 8-10**).

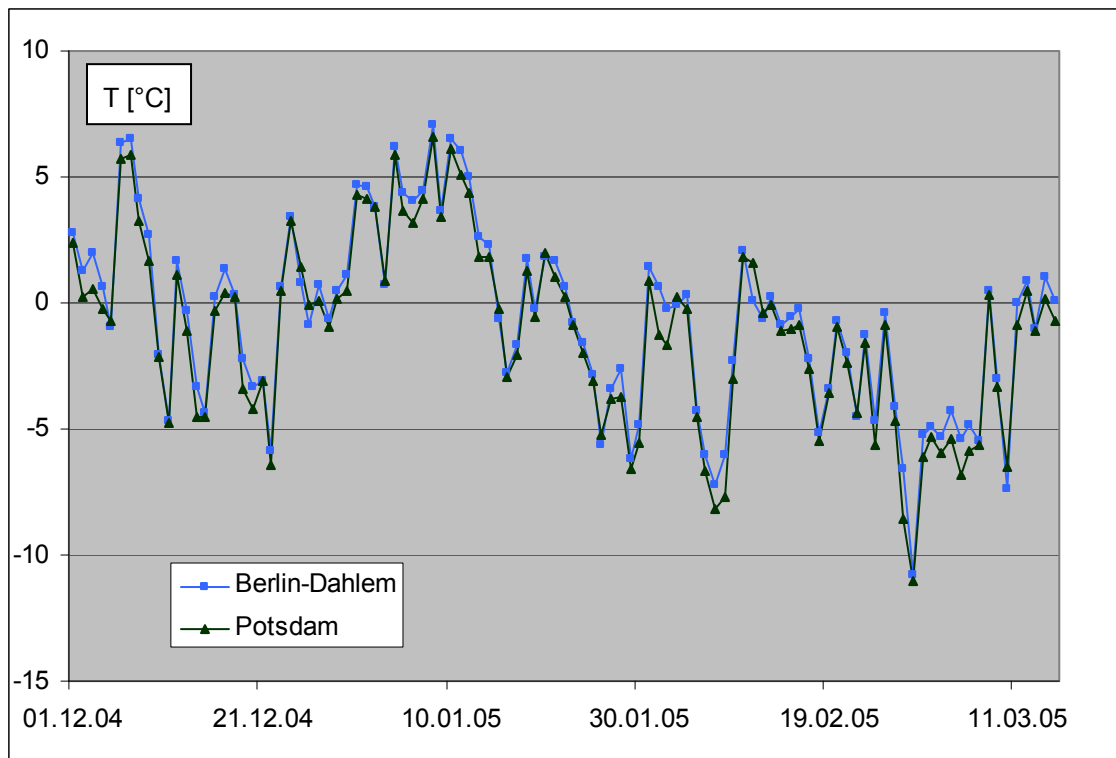


Abbildung 8-9: Minimale Lufttemperaturen für die Stationen Berlin-Dahlem und Potsdam für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005

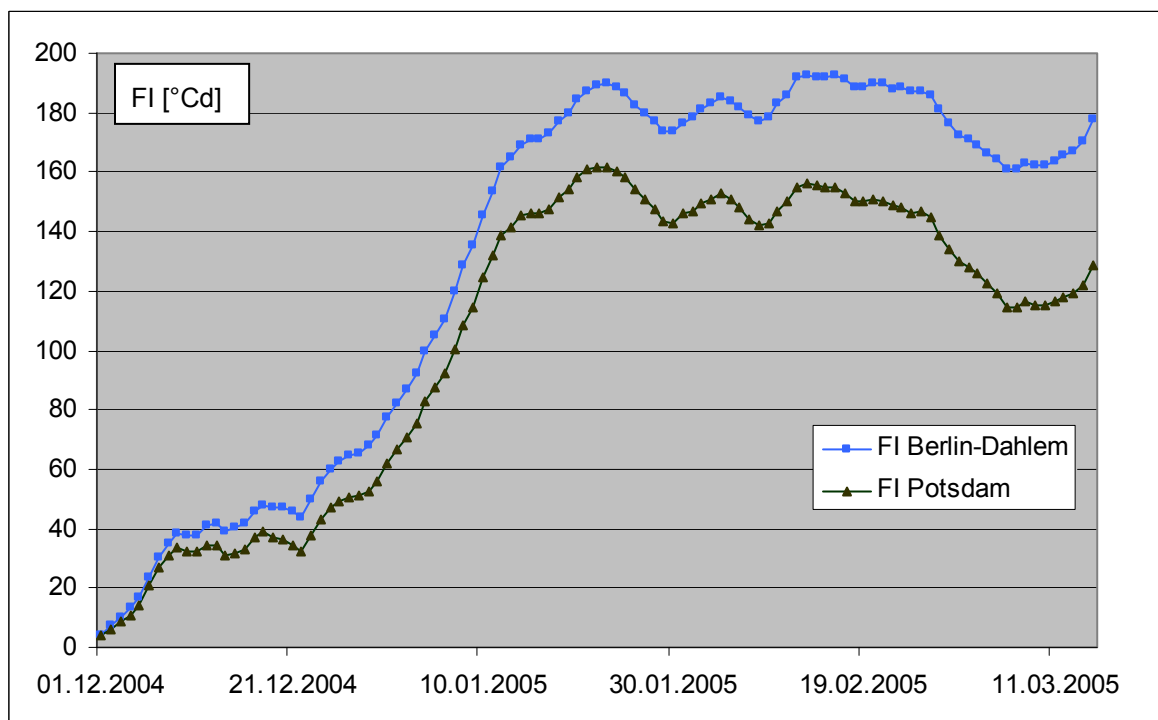


Abbildung 8-10: Ermittelter Frostindex (FI) für die Stationen Berlin-Dahlem und Potsdam für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005

In **Abbildung 8-11** und **8-12** sind die simulierten Bodentemperaturwerte für die Tiefen 20, 40 und 60 cm dargestellt. Aufgrund der Frostphase im Februar/ März 2005 liegt die Frosteindringtiefe bei rd. 50 cm.

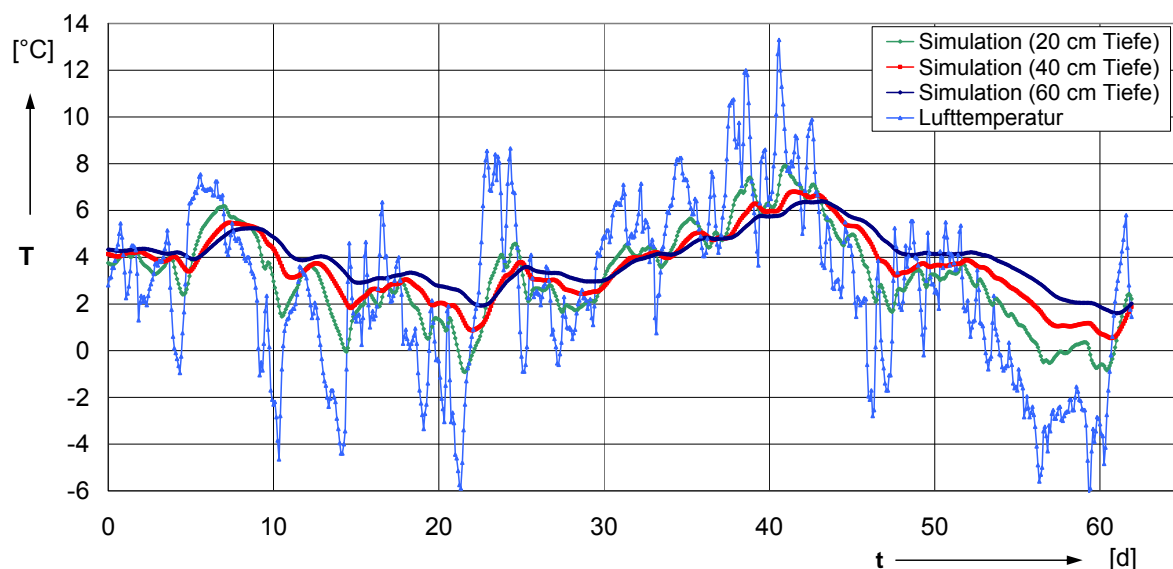


Abbildung 8-11: Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.12.2004 bis zu 31. 01.2005 für Berlin-Dahlem

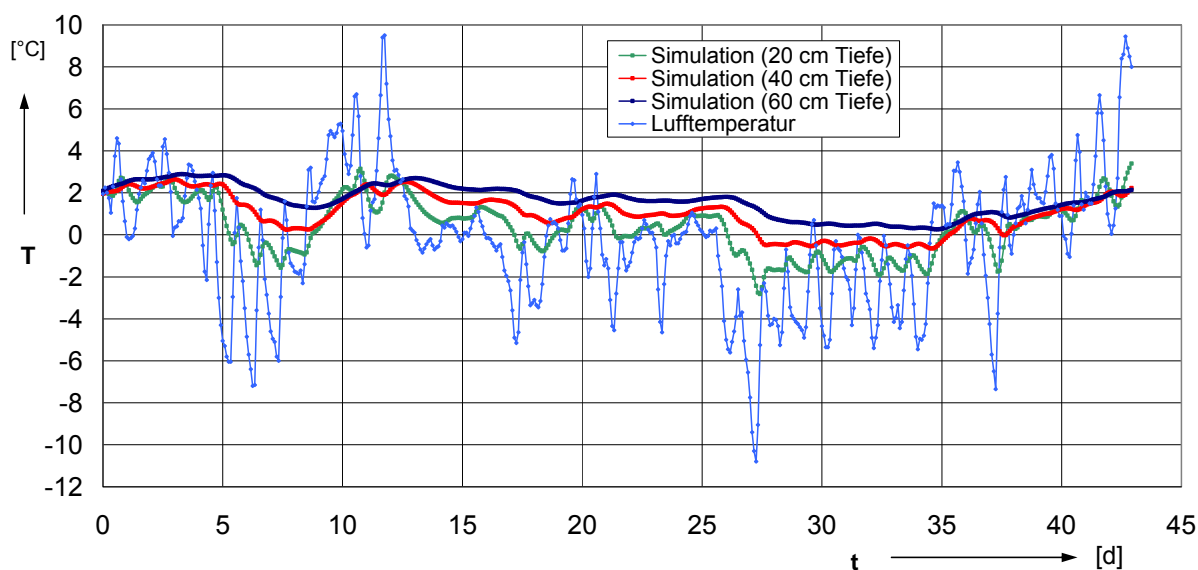


Abbildung 8-12: Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe für die Straßenmitte vom 01.02.2005 bis zu 15. 03.2005 für Berlin-Dahlem

8.5 Städte Nürnberg/ Roth

Als zweite Messstation der Frosteinwirkungszone II ist der Nürnberger Flughafen der Stadt Roth südwestlich von Nürnberg gegenübergestellt. Die Daten über die beiden Stationen sind in der **Tabelle 8-4** zusammengestellt. Die Station Nürnberg-Flughafen

liegt in den Randbereichen der Stadt, während über die Station in Roth keine weiteren Daten vorliegen.

Tabelle 8-4: Kennwerte der Klimamessstationen Nürnberg-Flughafen und Roth

Station	Nürnberg-Flughafen	Roth b. Nürnberg
Geographische Lage	Breite 49°30' Länge 11°03'	Breite 49°13' Länge 11°06'
H üNN	314 m	385 m
Einwohnerzahl	493.553 (Stand 1993)	> 25.000 (Stand 2005)
Kennzeichen	Randgebiet	-

Die Messstelle von Roth weist gemäß **Abbildung 8-13** bei kalten Wintertemperaturen erheblich niedrigere Tagestemperaturwerte auf. Im Vergleich mit den Werten aus Berlin wurden erheblich niedrigere Lufttemperaturen gemessen. Die Ermittlung des Frostindex führt zu Werten von rd. 80 °Cd für Nürnberg-Flughafen und knapp 100 °Cd für die Station in Roth (**Abbildung 8-14**). Damit werden die Frostindizes von München innerorts weit übertroffen. Wie in den RStO bereits festgestellt, ist die Einteilung in die drei Frosteinwirkungszonen zu grob und kann nur als Anhalt dienen.

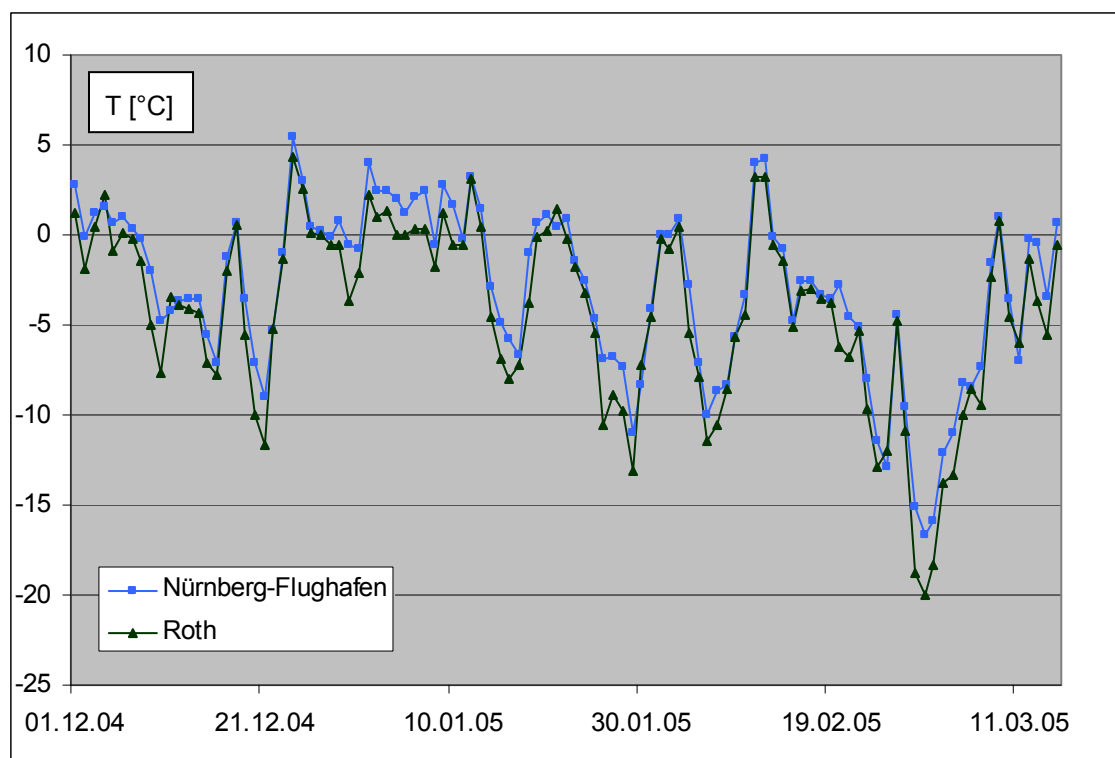


Abbildung 8-13: Minimale Lufttemperaturen für die Stationen Nürnberg-Flughafen und Roth für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005

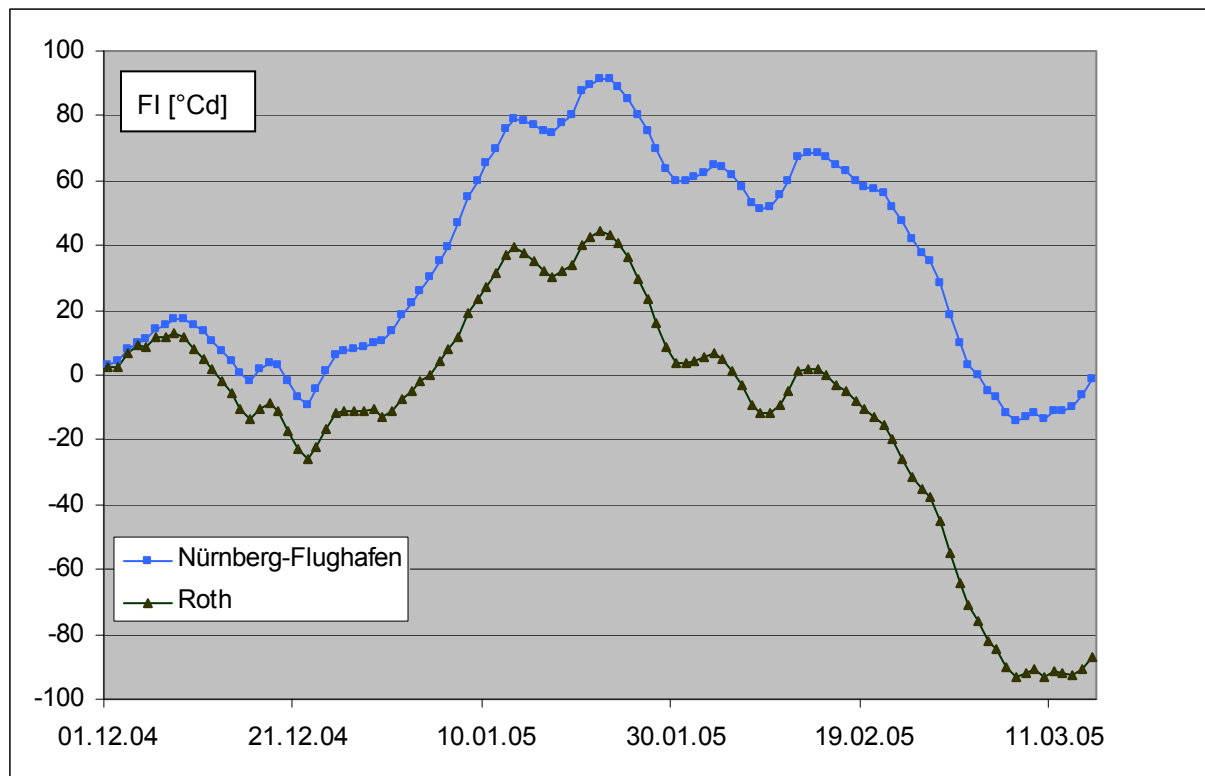


Abbildung 8-14: Ermittelter Frostindex (FI) für die Stationen Nürnberg-Flughafen und Roth für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005

In **Abbildung 8-15** und **8-16** sind die simulierten Bodentemperaturwerte für die Tiefen 20, 40 und 60 cm dargestellt. Aufgrund der starken Frostphase Ende Februar 2005 liegen die Temperaturen in 60 cm Tiefe bei bis zu -2 °C und somit die Frosteindringtiefe für eine längere Phase bei weit über 60 cm. Insgesamt überschreitet die Frosteindringung im Winter 2004/05 die 60 cm mehrmals.

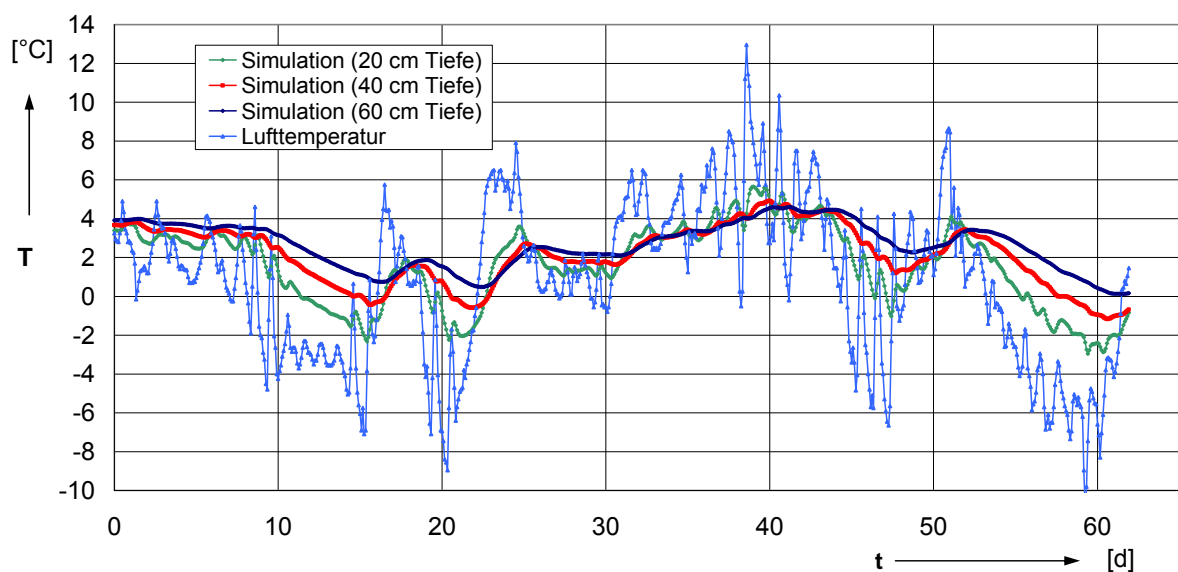


Abbildung 8-15: Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe der Straßenmitte vom 01.12.2004 bis zu 31. 01.2005 für Nürnberg

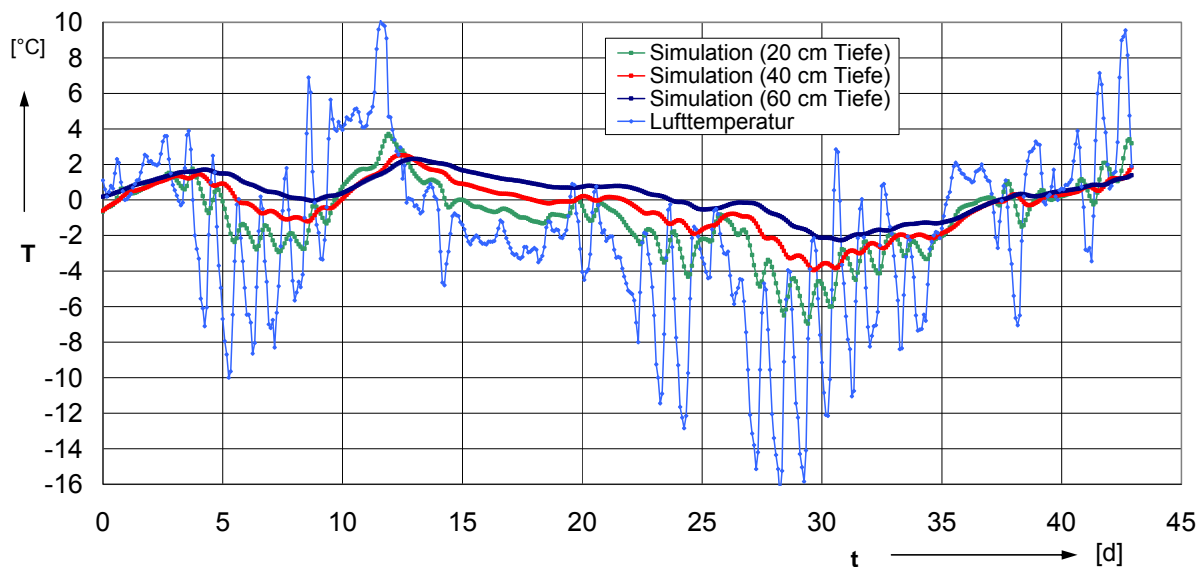


Abbildung 8-16: Simulation der Bodentemperaturen in 20, 40 und 60 cm Tiefe der Straßenmitte vom 01.02.2005 bis zu 15. 03.2005 für Nürnberg

8.6 Unterscheidung der urbanen und ländlichen Lage der Straße bezüglich der Frosteindringung

Die Lage der Straße in Abhängigkeit vom Bebauungsgrad spielt für die Frosteindringung eine große Rolle. Für den Winter 2004/05 wurden in der Tulbeckstraße gegenüber dem Flughafen in München erheblich mildere Frostphasen ermittelt, wobei der Frostindex am Flughafen um rd. 1,6 bis 1,9 höher lag.

Aus diesem Grund soll der Einfluss der urbanen Bebauung auf die Temperatur anhand der Region Darmstadt/Wiesbaden herausgearbeitet werden. Mit Hilfe von genauen Beschreibungen der Stationen des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie lässt sich die Charakteristik der Messstationen genau angeben (**Tabelle 8-5**). Im **Anhang 2** sind Kartenausschnitte der gewählten Stationen Darmstadt, Wiesbaden und Riedstadt abgebildet.

Tabelle 8-5: Kennwerte der Klimamessstationen Darmstadt, Wiesbaden und Riedstadt

Station	Darmstadt	Wiesbaden	Riedstadt
Geographische Lage	Breite 49°52'	Breite 50°03'	Breite 49°49'
	Länge 08°39'	Länge 08°14'	Länge 08°31'
H üNN	140 m	130 m	90 m
Einwohnerzahl	138.625 (Stand 05)	273.068 (Stand 05)	21.723 (Stand 05)
Kennzeichen	Innenstadt-Park	Innenstadt	Ländlich – Feld

In **Abbildung 8-17** sind die minimalen Tageslufttemperaturen der drei untersuchten Stationen aufgetragen. Danach weist die ländliche Station in Riedstadt gegenüber Wiesbaden bei kalten Frostnächten um bis zu 3 K niedrigere Temperaturen auf. Allerdings werden diese Temperaturen von der Innerortsstation in Darmstadt teilweise noch unterschritten. Die angrenzende Parkfläche scheint in Bezug auf die minimalen Temperaturen einen erheblichen Einfluss auszuüben. Dieser Eindruck wird durch die Ermittlung des Frostindex in **Abbildung 8-18** bestätigt. Hiernach liegen die maximalen Frostindizes der Stationen Darmstadt und Riedstadt in gleicher Größenordnung von knapp über 40 °Cd. Die Station Wiesbaden hingegen weist nur einen Frostindex von 25 °Cd auf. Die anliegende Grünanlage in Darmstadt reicht bereits aus, um den Wärmeeffekt der Bebauung aufzuheben. Das Verhältnis der Frostindizes zwischen urbaner und ländlicher Umgebung in Form der Daten aus Wiesbaden und Riedstadt beträgt in diesem Fall 1,6.

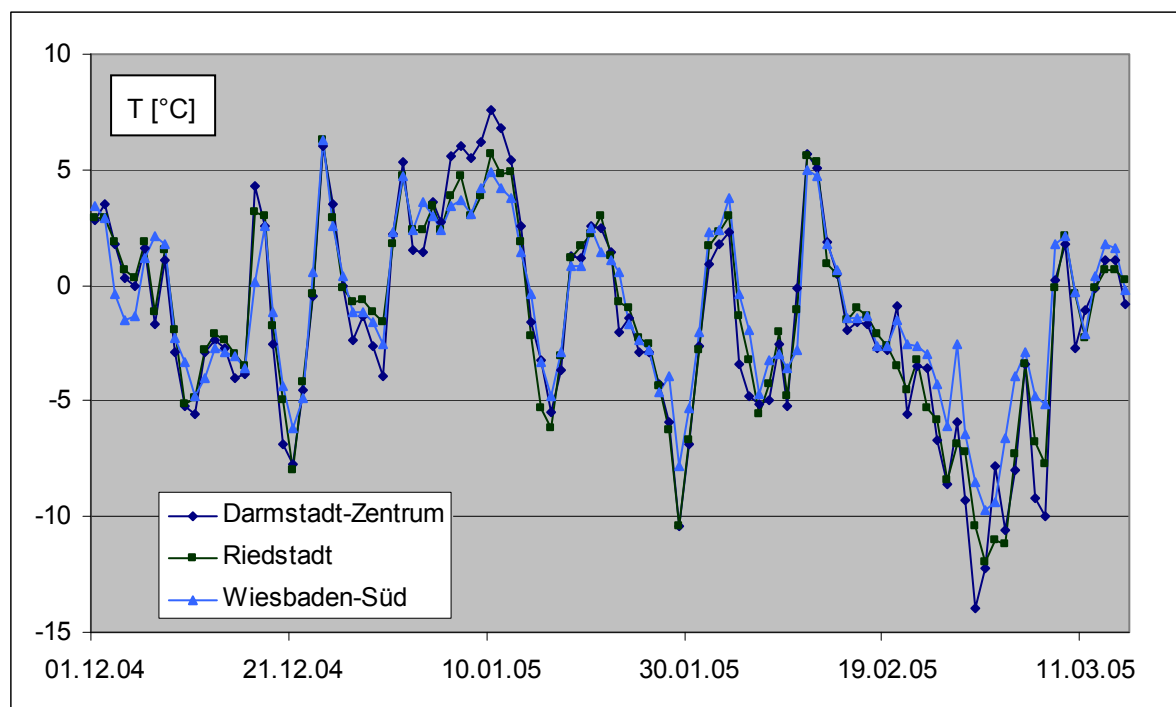


Abbildung 8-17: Minimale Lufttemperaturen für die Stationen Darmstadt, Riedstadt und Wiesbaden für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005

In der **Tabelle 8-6** sind die Daten aus dem Winter 2004/2005 von den einzelnen Städten zusammengestellt. Es wird ersichtlich, dass für eine eindeutige klimatische Einteilung die Frage des Urbanisierungsgrades des Umfeldes der Straße eine erhebliche Rolle einnimmt, die von den RStO nicht berücksichtigt werden kann.

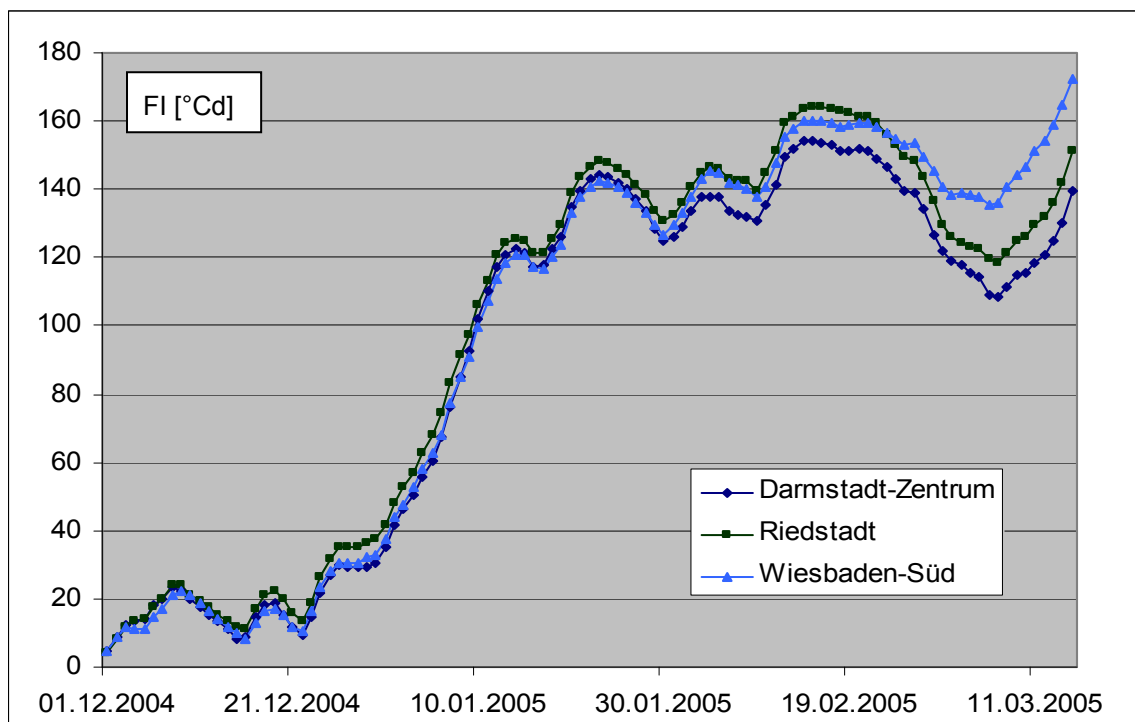


Abbildung 8-18: Frostindex (FI) für die Stationen Darmstadt, Wiesbaden und Riedstadt für den Winter 2004/05 vom 01.12.2004 – 15.03.2005

Tabelle 8-6: Zusammenstellung des Frostindex und der minimal gemessenen Tagestemperatur für die ausgewählten Messstationen für den Zeitraum vom 01.12.04 – 15.03.05

Messstation	Frosteinwirkungszone gem. RStO	Frostindex W 04/05	Minimale Tages- temperatur
		[°Cd]	[°C]
Hamburg	I	22	-12
Köln	I	22	-11
Wiesbaden	I	25	-9,5
Berlin	II	35	-11
Nürnberg	II	80	-16
Bad Fredeburg	III	75	-14
München	III	56	-13
München-Flughafen	III	107	-24

9 Ausblick

Bei einer genauen Vorhersage der Frostgefährdung von Innerortsstraßen können erhebliche Einsparpotentiale erreicht werden. Für eine derartige Beurteilung müssen für die Zukunft die abgemilderten Umgebungstemperaturen durch die Urbanisierung

sowie das individuelle Wärmepotential im Boden in Form der Leitungen genauer untersucht werden. Durch die Kombination dämmender Schichten im Straßenaufbau könnte das Wärmepotential der Leitungen sehr gut für die Abschirmung von negativen Temperaturen genutzt werden. Aus diesem Grund sollten Überlegungen angestellt werden, inwieweit Zusätze in den gebundenen Schichten deren Wärmeleitfähigkeit herabsetzen können bzw. die Wärmekapazität erhöhen können. Mit einer Erhöhung der Wärmekapazität könnte gleichzeitig einem schnellen Aufheizen der Oberfläche im Sommer entgegengewirkt werden.

Das unterschiedliche Leitungsvorkommen und deren Lage lassen keine generelle Aussage über deren Einfluss auf die Frosteindringung zu. Für eine genauere Betrachtung wäre es wünschenswert, wenn eine einfach handhabbare Simulationsberechnung den Einfluss der Leitungen im Einzelfall beurteilen könnte. Die Problematik der von Leitungen zugeführten Wärmenutzung im Straßenoberbau ist aktuell zur Minimierung der Kosten für den Winterdienst im In- und Ausland verstärkt in den Vordergrund gerückt worden. Durch ein im Straßenoberbau angebrachtes Rohrnetz sollen im Sommer die maximalen Temperaturen in den oberen Schichten abgemildert werden, damit könnten Spurrinnen entgegengewirkt werden. Diese Energie wird in tieferen Bodenlagen gespeichert, um im Winter diese Energie an den Straßenaufbau wieder abzugeben.

Die durch den Wärmeinseleffekt der Stadt abgemilderten anliegenden Temperaturen müssen näher untersucht werden. In diesem Forschungsprojekt wurde für ausgewählte Messstationen ein Verhältniswert des Frostindex zwischen urbanem und ländlichem Umfeld von 1,6 – 1,9 ermittelt. Dieser Wert muss für die Zukunft weiter differenziert werden, indem weitere Messdaten von Lufttemperaturen ausgewählter Stationen ausgewertet werden.

10 Zusammenfassung

Die Fragestellung, inwieweit Innerortsstraßen eine Frostsicherung benötigen, lässt sich nicht generell beantworten. Für die Beurteilung spielen verschiedene Parameter eine Rolle. Neben den klimatischen Einwirkungen auf die Straßenoberfläche müssen auch die Wasserverhältnisse der Straße sowie die internen Wärmequellen im Boden betrachtet werden.

Die Winterqualitäten der vergangenen Jahrzehnte sind in den letzten Jahren nicht mehr erreicht worden, möglicherweise kann zukünftig nicht mehr mit dem starken Winter wie im Jahr 1962/63 gerechnet werden, der die Grundlage für die Bemessung

der Frostsicherheit in den RStO bildet. Aus diesem Grund sollten auch aufgrund der Ressourcenschonung neue Überlegungen in Bezug auf die Frostsicherheit angestellt werden.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes gemessenen Daten lassen sich nicht verallgemeinern. Neben der zeitlichen Begrenztheit von zwei Winterperioden wurden lediglich zwei konkrete Messstellen aus der Frosteinwirkungszone III gewählt. 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 bei rd. 70 cm. Diese Werte können trotz des begrenzten Messzeitraums als repräsentativ angesehen werden, da der Winter 2004/05 eine der strengsten Frostperioden der letzten aufgezeichneten zehn Jahre aufwies. Für eine Erweiterung der Datenmenge sollen die Messstationen in München und Bad Fredeburg auch über das Forschungsvorhaben hinaus weitere Messdaten vom Winter 2005/2006 liefern.

Neben der gegenüber dem Umland verringerten Frosteindringung ist zum weiteren das für Frostschäden notwendige Vorhandensein von ausreichendem Wasser in der Frostzone unwahrscheinlicher, da das oberflächlich abgeführte Wasser nicht in den Straßenaufbau versickert.

Eine generelle Einteilung in die drei Frosteinwirkungszone gemäß den RStO ist nicht hinreichend genau möglich, da auch innerhalb dieser Zonen teilweise stark unterschiedliche Lufttemperaturwerte erreicht werden. Der Einfluss der Urbanisierung spielt hierbei eine erhebliche Rolle. Die extremen Minustemperaturen werden abgedämpft, und auch der Frostindex ist weitaus geringer, was auf den Wärmeinseleffekt der Städte zurückzuführen ist. Neben den geänderten Strahlungs- und Windbedingungen beeinflussen die menschlich verursachten Wärmequellen den Temperaturhaushalt der Straße. Eine innerörtliche Straße kann durchaus Temperaturwerten ausgesetzt sein, die vergleichbar mit einem außerörtlichen Straßenquerschnitt aus einer niedrigeren Frosteinwirkungszone entsprechen. Dabei ist das erhöhte Temperaturniveau stark abhängig vom Grad der dichten und hohen Bebauung. Bereits eine angrenzende größere Grünanlage kann diesen Effekt abmildern.

Der Einfluss der Leitungen muss auch einzelfallspezifisch untersucht und beurteilt werden. Einen Einfluss auf die Frosteindringung haben generell nur die Leitungen, die auch im Straßenraum liegen. Wasser-, Gasleitungen sowie Stromkabel liegen fast ausschließlich im Gehwegbereich und wirken, auch aufgrund ihrer geringen Durchmesser, i. d. R. nur bis in die Randbereiche der Straße. Generell kann gesagt

werden, dass die Fernwärme- und die Abwasserleitungen die stärkste Beeinflussung auf die Frosteindringung darstellen.

Die Frosteindringung hängt nicht nur von den äußeren Witterungsverhältnissen ab. Eine - wenn auch - untergeordnete Rolle spielt die Wahl der Baustoffe. Recycling-Baustoffe mit porenhaltigem Hochbauschutt zeigen aufgrund ihres vielfach höheren Wassergehaltes eine hemmende Wirkung für die Frosteindringung.

Für eine genaue straßenspezifische Bestimmung der Frosteindringtiefe sind 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 im Bereich des Bodens geeignet ist. Die bodenspezifischen Eigenschaften werden von diesem Programm nur bedingt einbezogen. Gerade im Bereich des Phasenüberganges vom im Boden befindlichen Wasser treten Effekte auf, die die Frosteindringung hemmen bzw. die Auftauphase verlängern. Auch die durch Temperaturschwankungen veränderten Leitfähigkeiten werden durch dieses Programm nicht beachtet. Für eine Verbesserung der Übereinstimmung von Simulation mit Messdaten müssen dementsprechend weitere Parameter, wie der Wassergehalt der Schicht berücksichtigt werden.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO), Ausgabe 2001, FGSV, Köln
- [2] Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB), Ausgabe 2004, FGSV, Köln
- [3] Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB), Ausgabe 2004, Köln
- [4] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (ZTV SoB-StB), Ausgabe 2004, FGSV, Köln
- [5] Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau: Umdruck zur Vorlesung Straßenbautechnik, Ausgabe 2004, Bochum
- [6] Scholz, C.; Schulz, T.: Frosteinwirkung auf Dichtwandmassen, tis, Ausgabe 3.2002
- [7] Klengel, K.J.: Frost und Baugrund, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1968
- [8] Litzka, J.: Oberbaubemessung von Asphaltstraßen, Gestrata Asphalt Handbuch - Gesellschaft zur Pflege der Straßenbautechnik mit Asphalt, 2. Auflage, Wien, 1996
- [9] DIN 18196: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.], 1988
- [10] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB), Ausgabe 1994, Fassung 1997, Köln
- [11] Siedeck, P.: Frostschäden und Frostschutzmaßnahmen, Handbuch des Straßenbaus, 1977
- [12] Ludwig, S.: Frostgefährdung toniger Deponiebarrieren, Schriftenreihe Angewandte Geologie, Heft 26, Karlsruhe 1993
- [13] Lottmann, A.; Haltenorth, G.; Richter, F.: Bemessungsgrundlagen für den frostsicheren Oberbau von Verkehrsflächen, Brandenburgische Technische Universität, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau/Geotechnik, Cottbus, 1999
- [14] Arbeitsausschuss Frost: Entstehung und Verhütung von Frostschäden an Straßen, Schriftenreihe der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Heft 105, Kirschbaum Verlag, Bonn 1994
- [15] Motzke, R.: Bestimmung von Frosteindringverläufen an einer Modellstraße (M1:1) mit unterschiedlichen Materialien (konventionelle - Recyclingbaustoffe) in der ungebundenen Tragschicht, Bericht zum Projekt Nr. 97 340, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 2001

- [16] Lutz, P.: Lehrbuch der Bauphysik Teil 1, B. G. Teubner, Stuttgart 1989
- [17] Oke, T.R.: Boundary layer climates, Halsted press, New York, 1978
- [18] Schulte, W.: „Analyse des Temperaturgeschehens im Straßenoberbau und dessen Einfluss auf Ergebnisse von Einsenkmessungen nach Benkelman“. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 423, 1984, Bonn
- [19] Research Group Climatologie: Einführung in die Klimatologie, 2005, [<http://www.geographie.ruhr-uni-bochum.de/agklima/vorlesung/index.html>]
- [20] Meteorologisches Institut der Universität Freiburg: Materialsammlung zum Vertiefungsblock „Ergänzungen zu Meteorologie und Klimatologie, [www.mif.uni-freiburg.de/berichte/252a_erg.pdf], 2005
- [21] Nefzger, H.; Kapriot, A.: Einfluss von Strahlung und Mikroklima auf Straßenwetterprognosen, Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 466, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien 1997
- [22] Wistuba, M.: Klimaeinflüsse auf Asphaltstraßen- Maßgebende Temperatur für die analytische Oberbaubemessung in Österreich, Institut f. Straßenbau und Straßenerhaltung, Mitteilungen 15, Technische Universität Wien, Wien, 2003
- [23] Müller, U.; Kuttler, W.; Tetzlaff, D. (Hrsg.): Workshop Stadtklima, Leipzig 1999
- [24] Krebs, H.G.; Böllinger, G.: Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 347, Bonn-Bad Godesberg, 1981
- [25] Hermansson, A.: Frost Modelling and Pavement Temperatures, Summer pavement temperatures and frost modelling, VTI särtryck 344, Swedish national road and transport research institute, 2001
- [26] Häckel, H.: Meteorologie, Verlag Ulmer, 3. Auflage, Stuttgart, 1993
- [27] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG): Klimatographie der österreichischen Bundesländer, unveröffentlichtes Manuskript, Wien, 2000
- [28] Apostolopoulos, C., Hafner, F., Schneider, W. : Näherungsverfahren zur Errechnung der Frosttiefe in Straßenkonstruktionen, Cold Regions Science and Technology 4, 1981
- [29] Jessberger, H. L.: Bodenfrost, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 125, Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn, 1971
- [30] Moulton, L.K.: Prediction of the depth of frost penetration. A review of the literature, Engineering Experiment Station, West Virginia, Report 5, 1969
- [31] Spiegl, M.: Untersuchung zur Frosteindringung in den Straßenaufbau, Diplomarbeit an der TU Wien, 2001
- [32] Grigull, U., Sandner, H.: Wärmeleitung, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1990

- [33] 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
- [34] Wessolek, G., Facklam, M.: Standorteigenschaften und Wasserhaushalt von versiegelten Flächen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1997
- [35] Wessolek, G.: Wasserhaushaltskomponenten versiegelter Flächen in Berlin (Messperiode: April 1985 bis März 1986, 2001
- [36] Kuttner, W.: Stadtklima Teil 1: Grundzüge und Ursachen, Beitragsserie: Klimaänderung und Klimaschutz, Hrsg.: Prof. Dr. Detlev Möller, Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus, Lehrstuhl für Luftchemie und Luftreinhaltung, [<http://www.luft.tu-cottbus.de>], 2005
- [37] Friedrich, M.: Die raumzeitliche Differenzierung der thermischen Bedingungen des Menschen im Klima der Stadt, Dissertation an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., 2000
- [38] Landsberg, H. E.: The Urban Climate, Academic Press New York, 1981
- [39] Innenministerium Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit dem Amt für Umweltschutz in Stuttgart: Städtebauliche Klimafibel Online, [http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/kap_2/kap_2-2.htm], 2005
- [40] Hupfer, P; Kuttler, W. (Hrsg.): Witterung und Klima, begründet von E. Heyer, B.G.Teubner Stuttgart/Leipzig, 1998
- [41] Oke, T.R.: Boundary layer climates, 2nd edition, University press, Cambridge, 1987
- [42] Bundesverband der deutschen Recycling-Baustoff-Industrie e.V. (BRB): Geschäftsbericht 1999- Bericht der Geschäftsführung über das Geschäftsjahr 1999, Duisburg, 2000
- [43] Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB) (Hrsg.): 3. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2000), Berlin/Düsseldorf/Duisburg, 2003
- [44] Krass, K.; Brüggemann, M.; Görener, E.: Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 2001, Straße & Autobahn, Ausgabe 04/05.2004
- [45] Toussaint, A.: Zur Verwitterungsbeständigkeit von RC-Baustoffen. Mineralstoffe im Straßenbau, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 1998
- [46] Konrad, J. M., Morgenstern, N. R.: Frost Susceptibility of Soils in Terms of their Segregation Potential, National Research Council, Washington D.C., 1983

- [47] Stein, D.: Instandhaltung von Kanalisationen, Arbeitsgruppe Leitungsbau und Leitungsinstandhaltung, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1998
- [48] Keding, M.; Stein, D.; Witte, H.: Ergebnisse einer Umfrage zur Erfassung des Istzustandes der Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland, Korrespondenz Abwasser 30, Heft 12, 1983
- [49] Stein, D.; Möllers, K.; Bielecki, R.: Leitungstunnelbau – Neuverlegung und Erneuerung nichtbegehrbarer Ver- und Entsorgungsleitungen in geschlossener Bauweise, Berlin, 1988
- [50] Wichmann, K.; Thore, A.: Erstellung eines Gutachtens zur Verlegetiefe von Wasserrohrleitungen im Versorgungsgebiet der Stadtwerke Kiel AG, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der notwendigen Frostfreiheit
- [51] Chisholm, R.A.; Phany, W.A.: Measurement and prediction of frost penetration in highways, Frost action on Transportation facilities, Transportation Research Record, Nr. 918, Washington D.C., 1983
- [52] Leschnik, W.: Feuchtemessung an Baustoffen, Feuchtetag '99 in Berlin, Berichtsband DGZfP BB69-CD, 1999
[http://www.dgzfp.de/pages/tagungen/berichtsbaende/bb_69-CD/bb69-h2.pdf]
- [53] Setzer, M.J.: Messung und Berechnung der Feuchteverteilung in hydraulisch gebundenen Tragschichten bei Frostangriff, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 721, 1996
- [54] ecoTech Umwelt-Meßsysteme GmbH, [<http://www.ecotech-bonn.de>], 2005
- [55] Soil Water Content Sensor discussion group (Sowacs), 2005,
[<http://www.sowacs.com>]
- [56] Richtlinien für die Anlage von Straßen Teil: Leitfaden für die funktionale Gliederung des Straßennetzes, (RAS-N), Ausgabe 1988, FGSV, Köln
- [57] Stadt Bad Fredeburg, [<http://www.bad-fredeburg.de>], 2005
- [58] Stadt München, [<http://www.muenchen.de>], 2005
- [59] Mais, R.: Zur Beanspruchung von bituminösen Fahrbahnbefestigungen. Ein Beitrag zur Ermittlung standardisierter Fahrbahnbefestigungen mit Hilfe der Mehrschichtentheorie, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 138, Bonn, 1973
- [60] Velske, S; Mentlein, H.; Eymann, P.: Straßenbautechnik, Werner Verlag Düsseldorf, 1998
- [61] Sherwood, P.T.; Roe, P.G.: Winter air temperature in relation to frost damage in roads, Transport and Road Research Laboratory (TRRL), Research Report 45, 1986
- [62] Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), [www.bam.de], Berlin, 2005

- [63] Leonards, G.A., Harr, M.E., DA-MINHO: „Vorhersage von momentanen Temperaturverteilungen in Straßen mit Wärmedämmschichten“, Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 74, Straße und Untergrund, Kirschbaum-Verlag, Bonn - Bad Godesberg, 1969
- [64] Abschlussbericht zum F.A. 6.204 des Bundesministers für Verkehr: „Untersuchungen über die Verwendbarkeit von Wärmedämmschichten im Straßenbau“, Bundesanstalt für Straßenwesen, 1978
- [65] Deutscher Wetterdienst (DWD), [www.dwd.de], 2005
- [66] Straßen.NRW: Verkehrszählung im Jahr 2000 in Bad Fredeburg vor dem Knotenpunkt B511 / L776, [<http://www.straessen.nrw.de>], 2000
- [67] Schweizerische Vereinigung für Geothermie, [www.geothermal-energy.ch], 2005
- [68] Dusch K.: Wärmeaustausch im mehrschichtigen Straßenkörper, Bitumen, Heft 1/2000, Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V. (ARBIT) (Hrsg.), Hamburg, 2000
- [69] Landesumweltamt NRW, [<http://www.lua.nrw.de>], 2005
- [70] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, [<http://www.hlug.de>], 2005
- [71] 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
- [72] DIN 1998: Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen, Richtlinien für die Planung, Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), 1987
- [73] WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH, [<http://www.wetteronline.de>], 2005