

Entwicklungen für eine streckenbezogene Glättevorhersage

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 329

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page, partially overlapping a vertical white line that runs down the right side of the cover.

Entwicklungen für eine streckenbezogene Glättevorhersage

von

Karl E. Schedler

KS-Consulting Ingenieurbüro
Oberstdorf

Karl G. Gutbrod
Mathias Müller

meteoblue AG, Basel

Olav Schröder

mickS MSR GmbH/LUFFT MSR GmbH
Fellbach

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 329

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt: FE 04.0279/2014/LRB
Streckenbezogene Glättevorhersage

Fachbetreuung
Horst Badelt

Referat
Verkehrsbeeinflussung und Straßenbetrieb

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-509-5

Bergisch Gladbach, Mai 2020



Kurzfassung – Abstract

Entwicklungen für eine streckenbezogene Glättevorhersage

Durch den immer mehr zunehmenden Bedarf an Automatisierung und Optimierung des Winterdienstes und neuerdings auch im Hinblick auf autonomes Fahren steigen auch die Anforderungen an kleinräumige Vorhersagen des Straßenwetters, welche die streckenspezifischen Eigenschaften abbilden können. Im Projekt FE FE040279 „Streckenbezogene Glättevorhersage“ war die Aufgabe zu lösen, den derzeitigen Stand der Technik bezüglich Straßenwettervorhersagen darzustellen und die Frage zu klären, inwieweit Straßenzustandserfassung durch mobile Sensoren, zusammen mit stationären Straßenwetterstationen geeignet sind, die unterschiedlichen Streckeneigenschaften abzubilden und die Prognosen zu verbessern. Zu diesem Zweck wurden über zwei Winter (2015/16 und 2016/17) auf drei ausgesuchten Teststrecken (BAB A 4, BAB A 9, St2139) Methoden zur genaueren Vorhersage der winterbedingten Glätte für die einzelnen Abschnitte innerhalb eines zu bearbeitenden Straßennetzes untersucht. Dabei kam es hauptsächlich auf die Größen Fahrbahntemperatur, Wasserfilmdicke und Taupunkttemperatur an. Dafür wurden in einem 5-Schritte-Prozess (1) Wettermodelle, (2) Punktprognosen, (3) Fahrbahnzustandsprognosen, (4) Streckenprognosen und (5) zeitliche Variabilität (Verläufe) verglichen und neue Konzepte getestet.

Die Strecken A 9 (ca. 50 km, 380-520 m ü. NN) und St2139 (ca. 15 km, 480-901 m ü. NN) haben für meteorologischen Verhältnisse, abwechslungsreiche Topografie- und Geländeeigenschaften. Zur Charakterisierung sind sie mit drei bzw. einer Wetterstation ausgestattet und es wurden von den Lkw der AM Greding und der SM Viechtach, welche mit mobiler Sensorik (MARWIS v. Fa. Lufft) bestückt worden sind, in den beiden Winterhalbjahren fast täglich und insgesamt mehrere hundertmal im normalen Betriebsablauf befahren. Erfasst wurden dabei Taupunkt- und Fahrbahntemperatur, Wasserfilmdicke und Eisprozent, sowie Straßenzustand. Mit speziell ausgerüsteten Fahrzeugen des Auftragnehmers und der BASt (IceCar) wurde auf allen drei Teststrecken eine sogenannte erweiterte Thermalkartierung (Thermal mapping) mit zusätzlich Taupunkt- und Bilanzstrahlungsmessung zur Charakterisierung der Strahlungsbedingungen der Strecke bei standardisierten Wetterbedingungen aufgenommen. Die Messungen zeigten eine hohe Variabilität auf den Strecken, die innerhalb einer Fahrt bei Temperatur bis zu 17 °C und bei Wasserfilmdicke bis über 2.000 µm erreicht. Diese Variabilität korreliert wenig mit den Messungen an den Sta-

tionen und wird von keinem Prognose-Anbieter sehr gut erfasst.

Die bei den Recherchen zum Stand der Technik gefundenen Dienste-Anbietern, speziell von Straßenwettervorhersagen haben sich, neben den projektbeteiligten Wetterdiensten DWD und meteoblue, drei weitere private Wetterdienstleister bereit erklärt, über die gesamte Projektlaufzeit online Vorhersagedaten für die Teststrecken zu liefern, welche ausgewertet und validiert worden sind.

Die Prognosen erreichten für Stationen im besten Falle einen MAE (mittl. abs. Fehler – siehe Glossar) von ± 2.3 °C und verglichen mit mobilen Messungen auf der Strecke einen MAE von ± 2.1 °C. Für die Wasserfilmdicke werden im Schnitt bestenfalls ± 180 µm erreicht.

Die stationären und mobilen Messdaten wurden ausführlich zur Plausibilisierung und Beurteilung der Messunsicherheiten ausgewertet. Außerdem wurde untersucht, wie anhand der zahlreich erfassten Daten sich statistische Modelle finden lassen, welche die spezifischen Streckeneigenschaften mit möglichst geringen Fehlern wiedergeben können. Dabei kann gezeigt werden, dass durch die im normalen betrieblichen Ablauf zu unterschiedlichsten Wetterbedingungen erfassten mobilen Messdaten eine deutlich bessere Bild der Streckeneigenschaften erreichen lässt, als dies beispielsweise durch eine einfache Thermalkartierungen möglich ist.

Anhand der mobilen Streckenmessungen wurden durch Klassifizierung nach Wetterlagen Standardprofile der Temperatur erstellt, die es erlauben, den Prognose-Fehler für Temperatur von ± 2.1 °C auf ± 1.9 °C, und mithilfe von Nowcasting auf ± 0.6 °C zu senken. Eine Prognose für die nächsten 12 Stunden dürfte mithilfe dieser Methoden einen Fehler (MAE) von ± 1.2 °C erreichen können.

Bei den Wasserfilmdicken werden mit mobilen Streckenmessungen und Klassifizierung nach Niederschlagsmenge Standardprofile der Wasserfilmdicke erstellt, die es erlauben, den Prognose-Fehler für Wasserfilmdicke von ± 190 µm auf ± 90 µm und mithilfe von Nowcasting auf unter ± 50 µm zu senken. Eine Prognose für die nächsten 12 Stunden dürfte mithilfe dieser Methoden einen Fehler von unter ± 100 µm erreichen können.

Die Methoden wurden mithilfe der Daten von 2015/16 entwickelt und anhand der Fahrten von 2016/17 geprüft, sodass eine Anwendung auf unabhängige Fahrten und andere Strecken gesichert ist. Sie erfordert die Erstellung von regelmäßigen mobilen Messprofilen, die zu Standard-Profilen klassifiziert werden. Anhand der Erfahrungen von zwei Wintern dürfte ein Training des

Modells innerhalb von einer Wintersaison machbar sein, während der es schon zu Verbesserungen der Streckenvorhersagen kommen könnte.

Die neuen Methoden stellen eine signifikante Verbesserung des Stands der Technik dar und können mit geeigneten Maßnahmen binnen weniger Monate in die Praxis eingeführt werden.

Route based icy condition forecast

Due to the increasing demand for automation and optimization of the winter service and, more recently, also with regard to autonomous driving, the requirements for small-scale predictions of the road weather, which can represent the route-specific properties, also increase. In project FE FE040279 "Route-related sleet prediction", the task was to determine the current state of the art regarding road weather forecasting and to clarify the extent to which road condition detection by mobile sensors, together with stationary road weather stations, are suitable to map the different route properties and to improve the predictions. For this purpose, methods for the more precise prediction of the winter-conditioned sleet for the individual sections within a road network to be treated were investigated on three selected test routes (A4, A9, St2139) over two winters (2015/16 and 2016/17). The main factors were the road temperature, the water film height and the dew point temperature.

For this, (1) weather models, (2) point forecasts, (3) roadway forecasts, (4) route forecasts and (5) temporal variability (gradients) were compared and new concepts were tested in a 5-step process.

The roads A 9 (length 50 km, 380-520 m above sea level) and St2139 (about 15 km, 480-901 m above sea level) have diverse topography and terrain characteristics relative to their meteorological conditions. For characterization, they are equipped with three or one weather station. In addition, 2 trucks of the AM Greding and the SM Viechtach, were equipped with mobile sensors (MARWIS by Lufft) and measured road conditions almost daily in the 2 winter half-years, during normal operation, totaling several 100x, and recording dew point and road temperature, water film height and ice percent, as well as road conditions. With specially equipped vehicles, the contractor and the BAST (IceCar) conducted a so-called extended thermal mapping with additional dew point and balancing radiation measurements for the characterization of the radiation conditions of the track on standardized weather conditions on all three test sections.

The measurements showed a high variability over the distances, which reached within a ride at temperature

up to 17 ° C and at water film height to over 2,000 µm. This variability correlates little with the measurements at the stations and is not detected by any prognosis provider very well.

In addition to the project partners DWD and meteoblue, 3 private meteorological service providers agreed to supply online forecast data for the test routes during at least one winter. The forecasts were evaluated and validated, and reached an MAE of ± 2.3 °C for stations and a MAE of ± 2.1 °C compared to mobile measurements on the road. For water film height, a mean absolute error of ± 180 µm was reached.

Stationary and mobile measurement data were evaluated in detail for their plausibility and measurement uncertainties. Possibilities to define statistical functions on the basis of the data collected, which reflect the specific road properties with least possible errors, were also investigated. It could be shown that by means of mobile measurement data acquired under a wide range of weather conditions, a significantly better picture of the road properties can be achieved than is possible, for example, by thermal mapping.

On the basis of the mobile measurements, standard profiles of the temperature were made by classification according to weather conditions, which allow to reduce the forecast error for temperature from ± 2.1 °C to ± 1.9 °C, and further to ± 0.6 °C with the help of nowcasting. A forecast for the next 12 hours should thus be able to achieve an error (MAE) of ± 1.2 °C using these methods.

For the water film heights, standard road profiles of the water film height were created with mobile measurements and classification according to the amount of precipitation, which allowed to reduce the forecast error for water film height from ± 180 µm to ± 90 µm and to below ± 50 µm with nowcasting. A forecast for the next 12 hours should be able to achieve an error of less than ± 100 µm using these methods.

The methods were developed using data from 2015/16 and tested on the road profiles in 2016/17, so that the application is scientifically underpinned to independent journeys and other routes. It requires the creation of regular mobile measurement profiles, which are classified as standard profiles. On the basis of the experiences of two winters, a training of the model is likely to be possible within a winter season, during which gradual improvements could be made to the route predictions.

The new methods represent a significant improvement in the state of the art and can be introduced into practice within a few months using appropriate measures.

Summary

Route based icy condition forecast

1 Definition of project

Due to the increasing demand for automation and optimization of the winter service and more recently also with regard to autonomous driving, the requirements for small-scale forecasts of the road weather, which can describe the route-specific properties increase. In the project FE 04.0279 "Route based road condition forecast" commissioned by the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute, the task was to present the current state of the art in terms of route based road weather forecasts and to clarify the extent to which road condition recording by mobile sensors, together with stationary road weather stations are suitable to reflect the different route characteristics and to improve the forecasts. Furthermore, solutions for a network-wide introduction of a system for road based road weather forecasting were to be shown.

2 Methods

Over two winters (2015/16 and 2016/17) on three selected trial routes in Germany, methods for more accurate prediction of weather-related road condition were investigated for the individual route segments with spatial resolution of 20 m, in particular for the parameters road surface temperature, water film height and dew point temperature.

The routes A9 (about 50 km, 380-520 m above sea level – digital test field highway of the federal ministry of transportation) and St2139 (about 15 km, 480-901 m above sea level) have varied topography and terrain characteristics for meteorological conditions. As a stationary reference, they are equipped with three or one road weather station. They were used by the trucks of the AM Greiding and the SM Viechtach, which were equipped with mobile sensor technology (type MARWIS from the company Lufft), in the two winter months almost daily, a total of several hundred

times in normal operation. Dew point and road surface temperature, water film thickness and ice percentage as well as road conditions were recorded. With specially equipped vehicles from BAST and the contractor (IceCar), a so-called extended thermal mapping with additional dew point and radiation measurements was recorded on all three test sections to characterize the radiation conditions of the route under standardized weather conditions. The BAST used the test track A4 (about 35 km, 50-450 m above sea level).

The service providers found in the state-of-the-art research, especially of road weather forecasts, have agreed, in addition to the project-involved weather services DWD and meteoblue, three other private weather service providers (DTN, Global Weather Corporation and FORECA) to provide online forecast data for the entire duration of the project that have been evaluated and validated. The forecasts were compared with the stationary measured road weather data and, as far as route based forecasts were provided, with the mobile measurement data.

The stationary and mobile measurement data were evaluated for plausibility and assessment of the measurement uncertainties.

In addition, first of all, independent of the road weather forecast, it was examined how the numerous data collected can be used to find easily implementable models that can reproduce the specific route characteristics with the lowest possible errors. The relevant road weather data on a route segment are shown as a linear transformation function from the continuously measured data or a road weather station, serving as a reference point for a whole section. The parameters of the transformation function for each 20 m segment is determined using the regression analysis from the mobile sample data and the reference station stationary data measured at the same time.

In a further phase, weather models, point forecasts, road condition forecasts, route forecasts and temporal variability (gradients) were compared in a 5-step process and the new concepts tested. The methods were developed using the 2015/16 data and assessed on the basis of the 2016/17 drives, thus ensuring application to independent drives and other routes.

3 Results

The measurements, in particular the thermal mapping campaign at standard conditions (clear calm night), showed a high variability on the tracks, which reached differences of up to 17 °C at road surface temperature within a drive and up to more than 2,000 µm at water film thickness. This variability can not be mapped solely by measurements at the stations and is not very well captured by any forecast provider. The mobile measurements have shown that route-specific properties, in particular at the temperature of the road surface, can be mapped very well and also small-scale features can be identified by position and effect, as the example on the St2139 in the following figure shows.

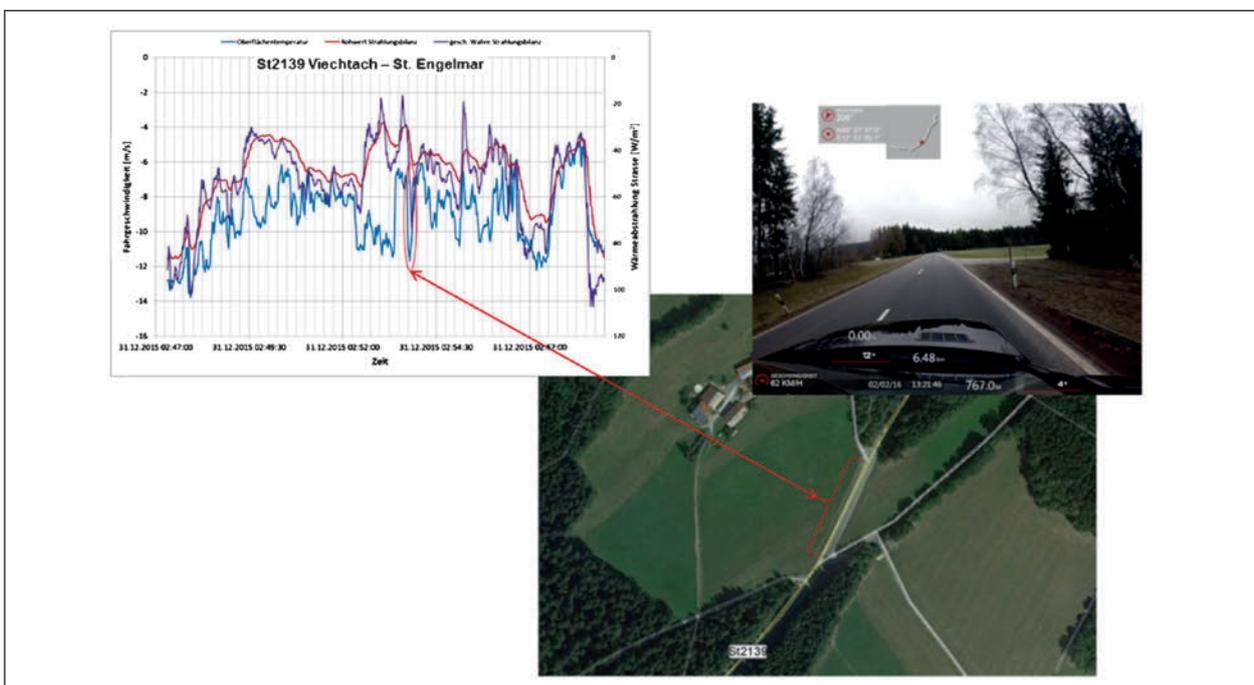
The water film thickness as a measure of the amount of contamination of the road surface as wet, ice or snow or combinations thereof shows considerable variability – even compared to the stationary measured values on the same segment and in the same period. Average absolute deviations in the range of ± 200 µm are to be expected. Ice and snow cover is expected to produce the highest scatter.

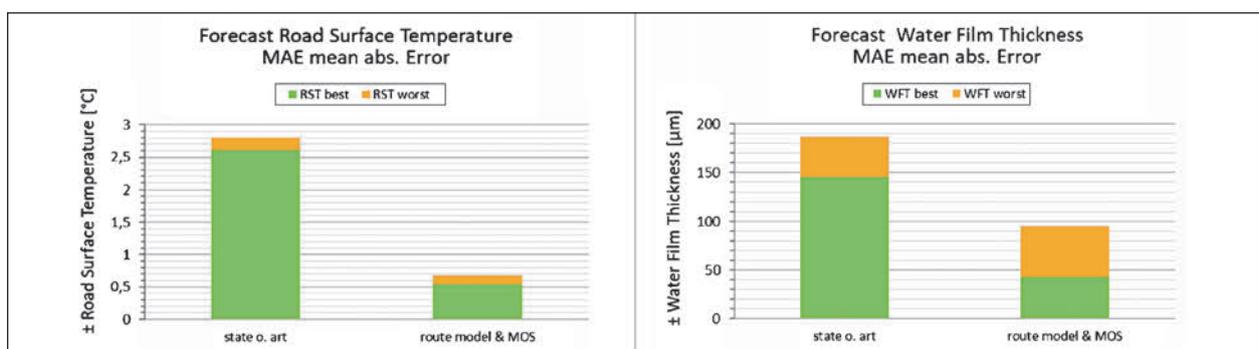
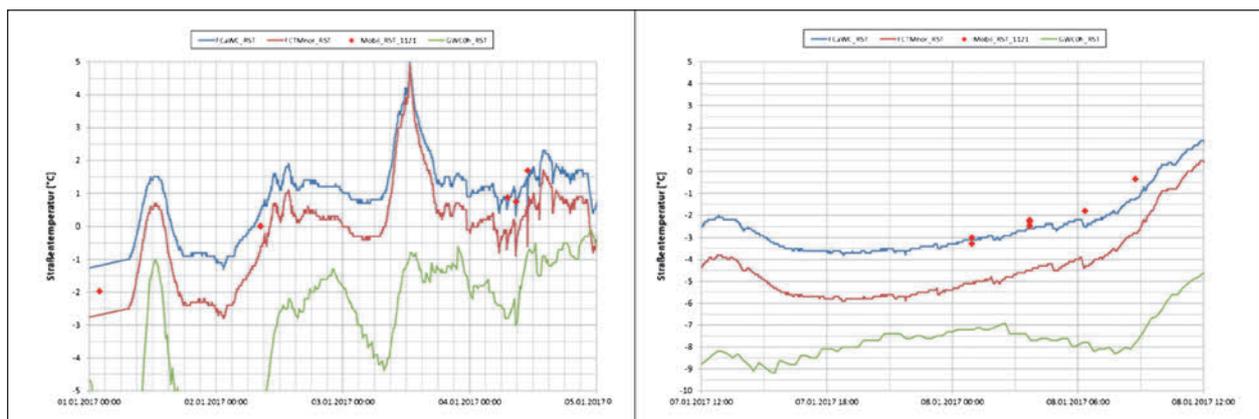
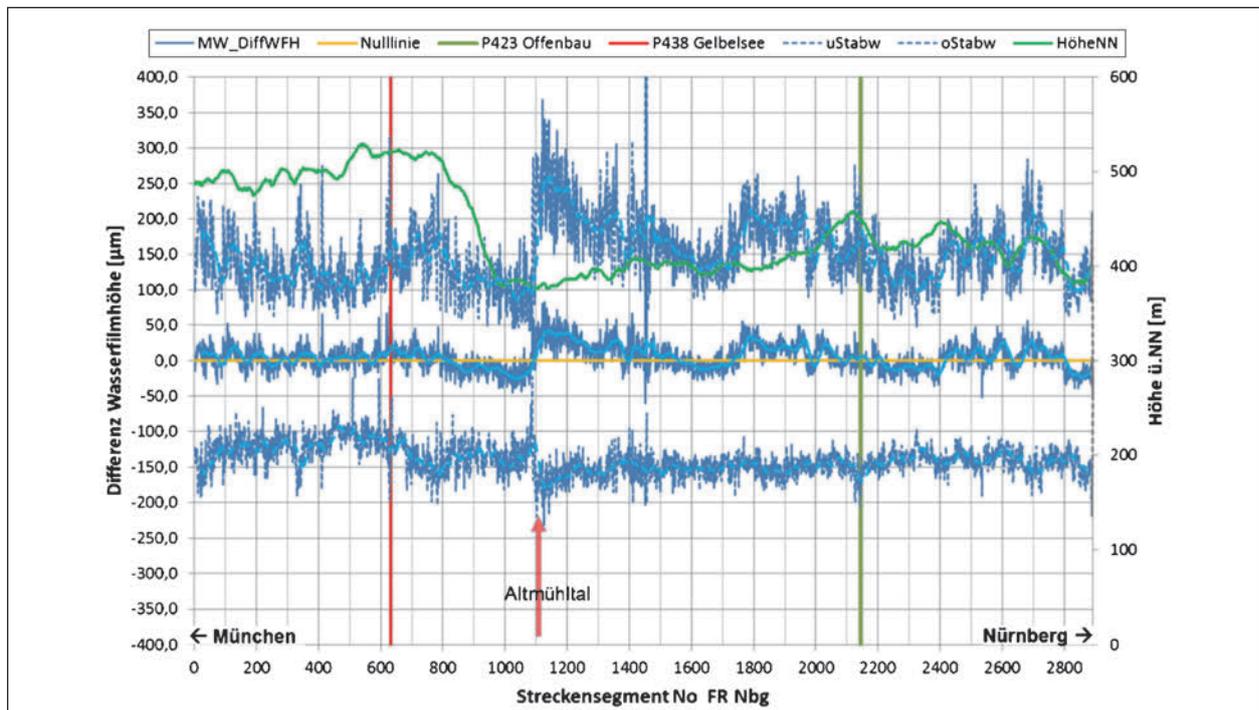
Nevertheless, specific route properties can be identified in a large number of mobile samples. An example of this is shown in the figure above from the trial route A9. The curves show the difference of the water film height to the reference station and the

standard deviation up and down from all measurements with truck of the AM Greding in the period winter 2016/17 and under different weather situations. Particularly striking, a significant change in wet conditions in the area of the Altmühltal.

By examining the mapping of the route properties by linear transformation functions with and without weather classification, it can be shown that the mobile measurement data acquired in the normal operational sequence for a wide variety of weather conditions allows a much better mapping of the route properties than is possible, for example, by a single thermal mapping campaign. Road temperature has mean absolute deviations (MAE) in the range of ± 0.7 to ± 1.2 °C. In contrast, absolute temperature errors (MAE) of ± 1.2 to ± 2.7 °C can be achieved with a one-time thermal mapping method.

A comparative example of a selected weather situation (January 2017) shows the following two diagrams. The red dots mark the mobile sample measurements, the blue curve is the road surface temperature derived for the 20 m segment (A9, Altmühltal) from the stationary reference. In comparison, the temperature derived from a single thermal mapping (red curve). In addition, as comparison of the straight numerical (free-running) weather model (without taking into account measurement data) NowCasting data from GWC (green curve).





The next step is to combine the weather forecasting models with the route characteristics. First of all, the predictions of the providers had to be validated.

The forecasts for stations reached a MAE of ± 2.3 °C at best and compared to mobile measurements on

the route a MAE of ± 2.1 °C. For water film thickness, on average ± 180 µm is achieved at best.

By means of the mobile route measurements, standard weather profiles were created by weather classification, which allow to reduce the forecast

road surface temperature error from ± 2.1 °C to ± 1.9 °C, and nowcasting to ± 0.6 °C. A prognosis for the next 12 hours should be able to reach an error (MAE) of ± 1.2 °C with the help of these methods.

At the water film thicknesses, mobile route measurements and rainfall classification are used to produce standard water film thickness profiles that allow the water film thickness prediction error to be reduced from ± 190 μm to ± 90 μm and now ± 50 μm using nowcasting. A prognosis for the next 12 hours should be able to reach an error of less than ± 100 μm with the help of these methods. The following diagrams give a rough overview of the summary of the comparison results across all route segments (with best and worst case) of the tested methods for road surface temperature prediction and regarding the water film height (all types of contamination). Dew point prediction gives even better results than road surface temperature.

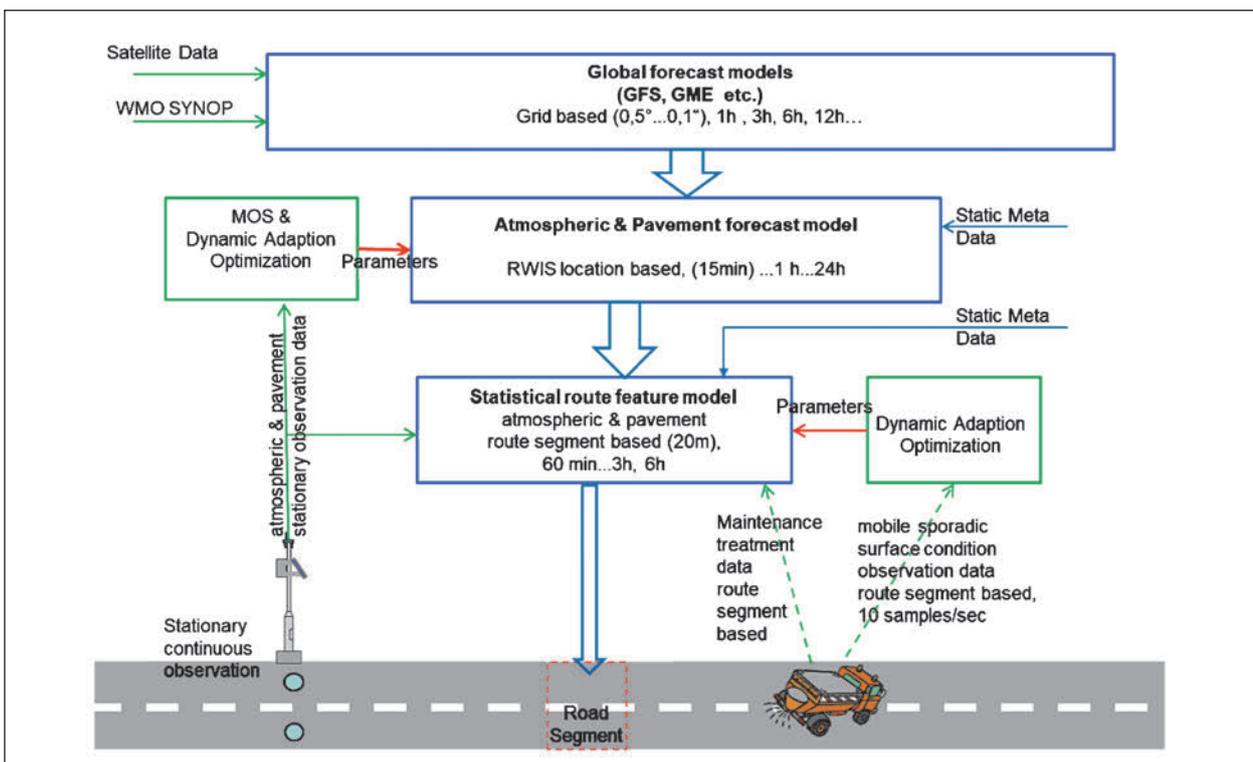
Many classification patterns were tested for road surface temperature (temperature, latent heat flow, precipitation) and water film thickness (cloudiness). Six simple weather classes, concerning cloud cover and day and night differentiation brought so far the best results. Nevertheless, with increasing mobile measurement drives and data availability, further

optimization possibilities due to data clustering can be expected.

Conclusion and outlook

The figure below shows the process chain as it was tested in the project and how it could be used in a network-wide introduction of a system for route based road weather forecasts.

It requires the regular collection of mobile measurement data, from which the route properties of the segments can be modeled in the form of weather-classified transformation functions in relation to the simultaneously measured stationary road weather data of the reference locations. Particularly in the case of routes where there is a lack of sufficiently dense stationary road weather stations, weather-classified standard profiles can also be created from the mobile measurement data, which can then be related to a area forecast. The latter method, however, usually gives higher deviations. On the basis of the experiences of two winters a training of the model within a winter season should be feasible, during which it could already come to improvements of the route forecasts.



The new methods represent a significant improvement in the state of the art and can be put into practice with suitable measures for a few months.

The methods continue to offer approaches for self-optimization and adaptation of the route property models or route profiles.

Need for further research and development could be identified in the field of non-contact and mobile measurement technology to improve the uncertainties and especially the disturbance influences. Likewise, in the area of road meteorology, improvements can be expected both in the general temperature and precipitation forecast and, above all, in the small-scale prediction of the temperature and moisture distribution through route profiles.

Not least, a network-wide introduction of such a system requires the development of suitable interfaces, transmission standards and output formats, possibly also integration in the vehicle-side systems when using mobile data collection and mobile control of winter maintenance measures

Inhalt

Glossar/Abkürzungen	15	5	Teststrecken	31
1 Einführung	19	5.1	Teststrecke 1 A 9 Greding	32
1.1 Zielvorgabe des gesamten Projektes	19	5.1.1	Streckenmodell Teststrecke 1 A 9 Greding FR Nbg (Nord)	32
1.2 Methodik des Vorgehens	20	5.1.2	Streckenmodell Teststrecke 1 A 9 Greding FR Mnch (Süd)	34
1.2.1 AP 1 Stand der Technik und Anforderungen	20	5.2	Teststrecke 2 St2139 Viechtach	34
1.2.2 AP 2 Datenerfassung und Auswertung Phase 1	20	5.2.1	Streckenmodell Teststrecke 2 St2139 Viechtach – Grün (beide FR)	34
1.2.3 AP 3 Entwicklung weiterführender Konzepte und Methoden.	20	5.3	Teststrecke 3 BAST A 4 AS Bensberg – AK Olpe	36
1.2.4 AP 4 Praktische Erprobung, Datener- fassung u. Auswertung Phase 2	20	5.3.1	Streckenmodell Teststrecke 3 A 4 BAST FR Olpe	36
1.2.5 AP 5 Empfehlungen für Einführungs- konzepte	20	5.3.2	Streckenmodell Teststrecke 3 A 4 BAST FR Köln	37
2 Stand der Methoden zur Prognose von Straßenglätte	21	6	Datenerfassung	37
2.1 Allgemeines zur Methodik	21	6.1	Stationäre Straßenwetterdaten	38
2.2 Numerische Wettervorhersage	21	6.1.1	Lage der stationären Messstellen auf der A 9 Greding	38
2.3 Stationsbezogene Prognosen	21	6.1.2	Neubau SWS an Offenbau und Gelbelsee A 9 Greding	38
2.4 Wetter- und Fahrbahnzustands- messungen	22	6.1.3	Daten der bestehenden stationären Messstellen auf der A 9 Greding	41
2.5 Stationsbasierte Prognosen der Fahrbahnoberflächentemperatur.	22	6.1.4	Daten der neuen stationären Mess- stellen auf der A 9 Greding	43
2.6 Streckenbezogene Glätteprognose. .	23	6.1.5	Lage der stationären Messstelle auf der St2139 Viechtach	45
3 Anforderungen an die Straßen- wetterprognosen	23	6.1.6	Verbesserung an der SWS Predigtstuhl	46
3.1 Prognoseparameter	23	6.1.7	Daten der stationären Messstelle auf der St2139 Viechtach	46
3.2 Übermittlung und Archivierung der Vorhersagedaten.	25	6.1.8	Lage der stationären Messstellen auf der A 4 BAST	47
3.3 Geografisches Streckenmodell	25	6.1.9	Daten der stationären Messstellen auf der A 4 BAST	50
3.3.1 Straßensegment-Nummerierung (RSEG_ID)	29	6.1.10	Daten des Testfeldes der BAST auf der A 4	51
4 Anbieter von Straßenwetterprognosen (Recherche)	29			

6.2	Mobile Datenerfassung	53	7.3	Mobile Taupunkttemperatur	82
6.2.1	Mobiler Straßenzustands-Sensor MARWIS	54	7.4	Mobile Wasserfilmdicken	85
6.2.2	Ausstattung Einsatzfahrzeuge der AM Greding	58	7.4.1	Betrachtungen zu Einflüssen der mobilen Wasserfilm-Messung	89
6.2.3	Ausstattung Streuerfahrzeug Lkw der SM Viechtach	59	7.4.2	Dämpfungsfilter für die mobilen Wasserfilmdicken	90
6.2.4	Ausstattung Dienstfahrzeug der BAST	59	7.5	Referenzverfahren zur in situ Bestimmung der Wasserfilmdicke	92
6.2.5	Datentabellen der archivierten mobilen Daten zur Auswertung	60	7.6	Mobile Strahlungsmessung	93
6.3	Erweiterte Thermalkartierung	61	7.6.1	Dynamische Kalibrierung der Strahlungsmessung	94
6.3.1	Technische Ausstattung IceCar4	61	7.6.2	Kompensation Windeinfluss beim Bilanzstrahlungsgeber NR Lite2 (Kipp&Zonen)	96
6.3.2	Technische Ausstattung IceCar5	64	7.7	Mobile Windmessung (IceCar5)	96
6.3.3	Videomitschnitt der IceCar4 Messfahrten	64	7.8	Schätzung der Taustoff-Konzentration und -Dichte anhand mobiler Mess- daten	97
6.3.4	Durchführung der erweiterten Thermalkartierung für Fahrzeuge des Forschungsnehmers	66			
6.4	Erfassung der Straßenwetter- Vorhersagen	67	8	Untersuchungen zur Modellierung von Streckeneigenschaften mittels stationärer und mobiler Mess- daten	99
6.4.1	DWD Deutscher Wetterdienst	67	8.1	Problemstellung und Ansätze	99
6.4.2	MB meteoblue AG	68	8.2	Methoden der Auswertung der Messfahrten zur Thermalkartierung	101
6.4.3	GWC/INRIX Global Weather Corporation	68	8.2.1	Temperaturprofil der Strecke	101
6.4.4	(Telvent) DTN (ehem. Schneider Electric)	70	8.2.2	Himmelsapertur (sky-view-factor)	103
6.4.5	FORECA	71	8.2.3	Thermalkartierung an der Test- strecke 1 (A 9 Greding)	103
6.5	Archivierung der Daten und Projekt Server	72	8.2.4	Thermalkartierung an der Test- strecke 2 St2139 Viechtach	106
7	Plausibilisierung und Validierung der Messdaten	73	8.2.5	Thermalkartierung der Teststrecke 3 A 4 BAST	110
7.1	Unsicherheiten der geografischen Referenzierung mobiler Daten	73	8.3	Statistisches Transformations-Modell der Streckeneigenschaften	112
7.2	Berührungslose Temperatur- messung	74	8.3.1	Auswertung der mobilen Daten der Winterdienstfahrzeuge	112
7.2.1	Vergleich berührungslose Pyrometer mit eingebauten Bodensonden	75	8.3.2	Transformationsfunktion von Referenzstelle zu Streckensegment	120
7.2.2	Vergleich mobile Temperatur zu stationären Bodensonden	76	8.3.3	Wasserfilmdicken-Modell	136

<p>9 Validierung der Straßenwetterprognosen 137</p> <p>9.1 Validierungsmethoden 137</p> <p>9.1.1 Datenquellen 137</p> <p>9.1.2 Parameter 137</p> <p>9.1.3 Validierungskoeffizienten 137</p> <p>9.1.4 Ort & Zeit 139</p> <p>9.2 Messdaten 139</p> <p>9.2.1 Übersicht der Messdaten 139</p> <p>9.2.2 Verfügbarkeit der Daten 2015/16 ... 139</p> <p>9.2.3 Verfügbarkeit der Daten 2016/17 ... 142</p> <p>9.2.4 Verfügbarkeit der Daten: Schlussfolgerungen 142</p> <p>9.3 Validierungsergebnisse 143</p> <p>9.3.1 Wetterprognose (Modelle): Vergleich mit Stationsmessungen 2015/16: 143</p> <p>9.3.2 Wetterprognose (Modelle): Vergleich mit Stationsmessungen 2016/17 146</p> <p>9.3.3 Downscaling Prognose (auf Messstelle bezogen) 148</p> <p>9.3.4 Straßenwetter-Prognose 150</p> <p>9.3.5 Streckenbezogene Glätteprognose 150</p> <p>9.3.6 Schlussfolgerungen: Vergleich von Prognosen mit Stationsmessungen 150</p> <p>9.4 Streckenvalidierung verschiedener Anbieter 151</p> <p>9.4.1 Methoden der Streckenvalidierung 151</p> <p>9.4.2 Validierung der Straßentemperaturvorhersagen 151</p> <p>9.4.3 Validierung der Taupunkttemperatur 153</p> <p>9.4.4 Validierung der Prognosen für Wasserdicke 154</p>	<p>10 Entwicklung von Ansätzen für die Anwendung stationärer und mobiler Daten zur Optimierung der Streckenvorhersage 156</p> <p>10.1 Vergleich verschiedener Methoden zur Verbesserung der Prognose der Straßentemperatur 156</p> <p>10.1.1 Methoden 156</p> <p>10.1.2 Prognosemodell mit typischen Streckenprofilen 157</p> <p>10.1.3 Erprobung verschiedener Prognosemodelle 158</p> <p>10.1.4 Prognose der Temperatur aus Wettermodell 158</p> <p>10.1.5 Downscaling auf Straßensegmente (Modelliert oder Adiabatisch) 159</p> <p>10.1.6 Klassifizierte Standardstreckenprofile 160</p> <p>10.1.7 Klassifizierte Standardstreckenprofile anhand Bewölkung 160</p> <p>10.1.8 Nowcasting mit klassifizierten Standardstreckenprofilen 163</p> <p>10.1.9 Andere klassifizierte Standardstreckenprofile 164</p> <p>10.1.10 Fazit 166</p> <p>10.2 Vergleich verschiedener Methoden zur Verbesserung der Prognose der Wasserfilmdicke 166</p> <p>10.2.1 Wasserfilmdicke anhand Niederschlag 166</p> <p>10.2.2 Klassifizierte Standardstreckenprofile anhand Niederschlag 168</p> <p>10.2.3 Klassifizierte Standardstreckenprofile anhand Bewölkung 169</p> <p>10.2.4 Fazit zu klassifizierten Standardstreckenprofilen 169</p> <p>10.2.5 Berechnung der Wasserfilmdicke für jedes Straßensegment mit Nässekoeffizienten 170</p> <p>10.2.6 Berechnung der Wasserfilmdicke für jedes Straßensegment mit aktuellen Messungen 171</p>
--	--

10.2.7	Fazit	171
10.2.8	Fazit für Wasserfilmdicke	172
11	Empfehlungen	173
11.1	Konzeptvorschlag für die netz- weite Einführung eines Systems zur Streckenvorhersage	173
11.1.1	Numerische Straßenwetter- vorhersagen	173
11.1.2	Stationäre Straßenwettermess- stellen	174
11.1.3	Mobile Straßenzustandssensoren. . .	175
11.1.4	Streckeneigenschaftsmodelle	176
11.2	Weiterer Bedarf an Forschung und Entwicklung	178
11.2.1	Messtechnische F&E	178
11.2.2	Straßenmeteorologische F&E	178
11.2.3	Systemtechnische Entwicklung.	178
	Literatur	179
	Bilder	181
	Tabellen	190

Glossar/Abkürzungen

Absorbtionsgrad	Faktor der beschreibt, wieviel eine Oberfläche (z. B. Fahrbahnelag) an Strahlung einer bestimmten Welllänge aufnimmt (absorbiert)		ratur der Straßenoberfläche die TPT der umgebenden Luft, dann kondensiert Wasser auf dem Belag. Ist die Temperatur unter dem Gefrierpunkt, dann bildet sich Raureif auf der Oberfläche
AM	Autobahnmeisterei	DWD	Kurzform für Deutscher Wetterdienst, amtlicher Wetterdienst des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
AS	Anschlussstelle an einer Autobahn	Emissionsgrad	Faktor der angibt mit welchem Grad die Oberfläche eine Körpers Wärmestrahlung abgibt. Spielt eine Rolle bei der berührungslosen Messung von Oberflächentemperaturen. Siehe auch Kapitel 6.2.1. Englisch: Emissivity
AT	Air Temperature. Entspricht der Lufttemperatur (LT) in °C	Evapo-Transpiration	Evapotranspiration bezeichnet in der Meteorologie die Summe aus Transpiration und Evaporation, also der Verdunstung von Wasser aus Tier- und Pflanzenwelt sowie von Boden- und Wasseroberflächen. Spielt eine Rolle bei der Entwicklung der Kontamination an der Fahrbahnoberfläche, sowie der Veränderung von Schneebedeckung
BIAS	Mittelwert über alle Stichproben der einfachen Differenzen zweier zu vergleichender Größen. Der BIAS kann negativ oder positiv werden. Ein BIAS = 0 bedeutet, dass die verglichenen Größen im Durchschnitt keine systematische Abweichung besitzen. Einzelne Stichproben können aber mehr oder weniger nach oben oder unten abweichen (negative und positive Differenzen gleichen sich im Mittel aus). Siehe auch Kapitel 9.1.3	Friction	Englischer Begriff und steht synonym für Kraftschlussbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche. Ist eine dimensionslose Verhältniszahl zwischen 0 und 1
Downscaling	Das „Downscaling“ (= Herunterskalieren) ist eine Prozedur zum Ableiten von Informationen mit hoher Auflösung von Variablen mit niedriger Auflösung. Diese Technik basiert auf dynamischen oder statistischen Methoden, insbesondere in der Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, verwendet werden. Der Begriff Downscaling bezieht sich normalerweise auf eine Erhöhung der räumlichen Auflösung, wird aber oft auch für die zeitliche Auflösung verwendet. Je nach Methode spricht man auch von dynamischen, statistischen oder adiabatischem (thermodynamische Zustandsänderungen) Downscaling	FRN	Im Projekt gebrauchte Abkürzung für Friction (siehe →)
		GDS DWD	FTP-Server des Deutschen Wetterdienstes (DWD) über den frei verfügbare Grunddaten bereitgestellt werden. Im Projekt wurden die SWS-Daten und Punktprognosen über ftp://ftp-outgoing.dwd.de bereitgestellt. Aus rechtlichen Gründen wird der DWD diesen Dienst einstellen und frei verfügbare Grunddaten in Zukunft über https://opendata.dwd.de bereitstellen
DPT	Dew Point Temperatur. Deutsch: Taupunkttemperatur (TPT) in °C. Temperatur, bei der die Wasserdampfsättigung der Luft erreicht ist. Unterschreitet z. B. die Tempe-	GFS	Global Forecast System ist das globale Wettervorhersagemodell des US-Wetterdienstes (NWS/NOAA). Es bietet eine Vielzahl von

	Parametern auf Basis von 0,5° Rasterpunkten weltweit für die nächsten 15 Tage. Diese werden in Form von Datendateien auf FTP-Server bereitgestellt		Absolutwert der Differenz). Siehe auch Kapitel 9.1
GMA	Glättemeldeanlage. Siehe auch SWS	MOS	Modell Output Statistics. Ist ein statistisches Verfahren in der modernen Wettervorhersage. Oftmals handelt es sich dabei um multilineare Regressionsgleichungen, die auf numerische Wettermodelle angewandt werden und den Zusammenhang zwischen den regelmäßigen Gitterpunkten des globalen numerischen Modells und einem beliebigen Standort einer Wetterstation beschreiben. Das MOS stützt sich auf langfristige Messreihen
GME	GME ist ein globales Wettervorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes (DWD)	NEMS	NEMS ist ein von meteoblu verwendetes numerisches Wettermodell. NEMS ist ein Multi-Skalen-Modell (verwendbar für globale, regionale und lokalen Domänen) und verbessert die Wolken-Entwicklung und Niederschlagsvorhersage deutlich
GPS	Global Positioning System. Deutsch: Globales Positionsbestimmungssystem, offiziell NAVSTAR GPS, ist ein globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung. Es wurde seit den 1970er-Jahren vom US-Verteidigungsministerium entwickelt. GPS ist seit Mitte der 1990er-Jahre voll funktionsfähig und ermöglicht seit der Abschaltung der künstlichen Signalverschlechterung (Selective Availability) am 2. Mai 2000 auch zivilen Nutzern eine Genauigkeit von oft besser als 10 Metern. Im Projekt wurden für die mobilen Sensordaten einfache Geräte (IPAD) mit GPS-Modulen verwendet. Siehe auch Kapitel 7.1	NI	Niederschlagsintensität. Siehe auch IOP
GWC	Global Weather Corporation, ein amerikanischer Anbieter für Straßenwetterinformationen und -vorhersagen	Now Casting	Nowcasting ist ein Begriff der häufig in der Meteorologie verwendet wird. Unter Nowcasting in der Meteorologie versteht man heutzutage Wettervorhersagen für die nächsten 1...6 Stunden. Die Vorhersagen werden direkt aus Satellitenbildern und Stationsmeldungen abgelesen. Aufgrund der Kürze des prognostizierten Zeitraums ist das Nowcasting die sicherste und zuverlässigste Form der Wettervorhersage
HSS	Heidke-Skill-Score. Statistische Kenngröße. Mithilfe von Skill Scores werden Vorhersagen mit Referenzprognosen, die auf Zufall, Persistenz oder klimatologischen Mitteln aufbauen, verglichen. Skill Scores entfernen die auf Zufall aufbauenden Elemente der Vorhersagen. Der am häufigsten verwendete Skill Scores ist der Heidke-Skill-Score. Der Heidke-Skill-Score ist definiert im Intervall von -1 bis 1. Es bedeutet 1 eine perfekte Vorhersage, 0 eine Vorhersage die gleich der Referenzprognose und negative Werte bedeuten, dass die Vorhersage schlechter als die Referenzprognose sind. Siehe auch Kapitel 9.1.3	NR	Net Radiation. Deutsch: Strahlungsbilanz (SB). Wird in Watt/m ² angegeben. Kann negative oder positive Werte annehmen, je nachdem ob Abstrahlung oder Einstrahlung vorherrscht
IOP	Intensity of Precipitation. Deutsch: Niederschlagsintensität (NI). Wird in mm/h angegeben. Siehe auch Kapitel 6	RMSE	Root Mean Square Error. Statistische Kenngröße um die Abweichungen von zwei zu vergleichenden Größen (z. B. Vorhersage und Messung) zu beschreiben. Der Mittelwert aller Stichproben der Differenz der Vergleichswerte zum Quadrat und die Wurzel aus dem Mittelwert. Dadurch werden starke Abweichungen höher gewertet. Ähnlich der Standardabweichung, die davon ausgeht, dass alle Werte normalverteilt sind
LT	Lufttemperatur. Siehe auch AT	RSC	Road Surface Condition. Entspricht Fahrbahnoberflächenzustand (FBZ). Trockener Zustand oder Art des die Belagsober-
MAE	(Mean Absolut Error) Statistische Kenngröße und bedeutet durchschnittlicher absoluter Fehler. Mittelwert aller Stichproben der Abweichung zweier zu vergleichender Größen (z. B. Vorhersage und Beobachtung) ohne Berücksichtigung des Vorzeichens		

	fläche bedeckende Schicht aus Wasser in seinen verschiedenen Aggregatzuständen (feucht, nass, Eis, Schnee, Schneematsch und Raureif). Siehe auch Kapitel 6.2.1		info.de. Die VIB ist aufgelöst, das Portal wird von der Zentralstelle für Verkehrsmanagement bei der Autobahndirektion Südbayern betrieben
RSEG	Road Segment. Im Projekt gebrauchte Abkürzung für Streckensegment. Jedes Streckensegment ist durch eine ID (RSEG_ID) eindeutig zu identifizieren. Die Lage jedes Streckensegments ist durch die geografischen Koordinaten, Ausrichtung und Straßename definiert	WFD	Wasserfilmdicke. Die Größe wird in mm (oder μm) angegeben und ist ein Maß für die Menge an Wasser (Liter/m^2 oder $\text{Milliliter}/\text{m}^2$) auf der Fahrbahnoberfläche. In diesem Projekt wird darunter alle Aggregatzustände (flüssig, Eis, Schnee oder gemischt) von Wasser verstanden (Wasseräquivalent). Siehe auch Kapitel 6.2.1
RST	Road Surface Temperatur – englisch für Fahrbahnoberflächentemperatur (FBT)	WFH	Wasserfilmhöhe, siehe auch Wasserfilmdicke (WFD). Wird in der Praxis häufig gleichbedeutend verwendet
RT	Auch alternativ gebrauchte Abkürzung für „Road Temperature“ = Straßentemperatur oder auch Fahrbahnoberflächentemperatur (FBT)	WFT	Waterfilm Thickness – englisch für Wasserfilmdicke (WFD) – siehe WFD
SM	Straßenmeisterei		
Std.Dev.	Abkürzung für „Standard Deviation“ = Standard Abweichung. Statistische Größe, welche angibt, wie weit die einzelnen Messwerte (Stichproben) im Durchschnitt von dem Erwartungswert (Mittelwert) entfernt sind		
SWIS	Straßenwetter-Informationssystem. In der BRD von den Straßenbauverwaltungen der Länder in Auftragsverwaltung des Bundes betriebenes Informationssystem unter Federführung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Winterdienste auf Bundesautobahnen (BAB) und Bundesstraßen		
SWS	Straßenwetter-Station. Messstelle, welche die Wetter- und Belagszustandsdaten an einer Straße erfasst		
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen. Standardwerk herausgegeben von der BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen). Siehe [28]		
TOP	Type of Precipitation. Deutsch: Niederschlagsart (NA). Klassifizierung der verschiedenen Arten von Niederschlag. Siehe auch TLS [28]		
TPT	Taupunkttemperatur. Siehe auch DPT		
VIB	Kurzform für Verkehrsinformations-Agentur Bayern. Betrieb des bayerischen Verkehrsinformations-Portals www.bayern		

1 Einführung

1.1 Zielvorgabe des gesamten Projektes

Die genaue Vorhersage der winterbedingten Glätte für die einzelnen Abschnitte innerhalb eines zu bearbeitenden Straßennetzes stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Durchführung eines effektiven Winterdienstes dar. Mit dem derzeitigen Straßenzustands- und Wettersystem SWIS werden nur durchschnittliche Vorhersagen für Regionen oder genaue Punktvorhersagen für vorhandene Glättemeldeanlagen-Standorte angeboten. Diese sind aufgrund oft sehr unterschiedlicher Netztopografie und verschiedener Umgebungen der Straßen durch Bebauungen und Bewuchs innerhalb einer Vorhersage-region für die effektive Durchführung des Winterdienstes nicht immer ausreichend detailliert. Die Folge sind kostspielige Kontrollfahrten oder unnötiges Streuen aufgrund fehlender Aussagen auf als gefährdet angesehenen Straßenabschnitten für die Erfüllung der Verkehrssicherungspflicht oder der Erhaltung der Kapazität.

Streckenbezogene Glätte-Vorhersagen bedürfen sehr genauer Kenntnisse des mikroklimatischen Zustandes kurzer Straßenabschnitte bei verschiedenen Wetterlagen. Verschiedene Dienstleister bieten heute bereits streckenbezogene Vorhersagen an. Dabei werden verschiedene Methoden genutzt zur Beschreibung der topografischen Gegebenheiten oder verschiedenen Umgebungen (z. B. Thermalkartierung und Skyview) und mit Wettervorhersagemodellen verknüpft. Die Verfahren können im unterschiedlichen Umfang ausgeführt werden. Eine genaue Kenntnis des erforderlichen Verfahrens für eine gewünschte Vorhersagequalität liegt bisher bei den Straßenbauverwaltungen nicht ausreichend vor.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen heute bekannte Verfahren für eine streckenbezogenen Glätte-Vorhersage beschrieben, bewertet und gegebenenfalls weiterentwickelt werden. Dabei sind die für alle Glättearten relevanten Straßenzustandsgrößen Straßentemperatur, Taupunkttemperatur und Wasserfilmdicke einzubeziehen. Ziel ist die richtige Entscheidung, wie viel Taustoff für die tatsächlich entstehende Glätte erforderlich ist. Genaue Kenntnisse über die notwendigen Grundlagen sollen die Straßenbauverwaltungen zukünftig in die Lage versetzen, entsprechende Produkte mit der notwendigen Qualität anzufordern bzw. Angebote

bewerten zu können. Durch genaue streckenbezogene Vorhersagen der für die Winterglätte relevanten Größen wird im Vergleich zu heute eine zielgerichtete Auslösung und Durchführung des Winterdienstes erwartet. Mit ihnen soll ein effektiverer Winterdienst möglich werden, der zum einem einer höheren Verkehrssicherheit und Kapazität der Straßen unter winterlichen Bedingungen dient. Des Weiteren sollen Personal- und Tausalzskosten durch Vermeidung von Kontroll- und unnötigen Streufahrten aufgrund fehlender streckenbezogener Vorhersagen gespart werden.

Zielvorgaben

- Zusammenstellung bisheriger Erkenntnisse für eine streckenbezogenen Glätte-Vorhersage anhand von Literaturstudien sowie Erkundung in- und ausländischen Erfahrungen.
- Bewertung der Qualität von angebotenen streckenbezogenen Vorhersagen in Deutschland durch entsprechende Datenauswertungen oder Beobachtungen vor Ort und Bewertung der genutzten Grundlagen (z. B. in Berlin, Baden-Württemberg, Bewertung von ausländischen Anwendungen sind auch möglich).
- Erarbeitung von realisierbaren allgemeingültigen Voraussetzungen für streckenbezogene Glätte-Vorhersage für möglichst alle Glätte-Arten mit der erforderlichen Qualität auch mit dem Ziel für eine vorgesehene Normung dieser Voraussetzungen.
- Erprobung unter Nutzung von DWD-Vorhersagen und der anderer Anbieter aus dem Straßenzustand- und Wetter-System SWIS im Netz einer bayrischen Autobahnmeisterei BAB A 9 in einer Winterperiode.
- Darstellung von Möglichkeiten und Grenzen einer streckenbezogenen Glätte-Vorhersage mit den derzeitigen Möglichkeiten.
- Abschätzung des notwendigen Aufwandes zur Einführung einer anforderungsgerechten streckenbezogenen Glätte-Vorhersage.
- Darstellung von weiteren Forschungsbedarf.
- Berichterstellung.

Aus Gründen der fachlichen Darstellung weicht die Gliederung dieses Berichtes von der Gliederung des Arbeitsplanes ab.

1.2 Methodik des Vorgehens

Das Vorhaben beinhaltet gemäß den Anforderungen der Ausschreibung folgende Schritte, welche auch der Gliederung der Arbeitspakete entsprechen, die wie folgt aufeinander aufbauen:

1.2.1 AP1 Stand der Technik und Anforderungen

- Recherche über existierende Methoden (Literatur),
- Recherche über Anbieter von Straßen-Glätte-Vorhersagen,
- Definition/Identifikation der infrage kommenden Vorhersage-Informationen,
- Definition der zur Validierung und Bewertung der existierenden Glätte-Vorhersage erforderlichen stationären und mobilen Messdaten,
- Erarbeitung und Spezifizierung der Methoden zur Validierung und Bewertung vorhandenen Vorhersagemethoden.

1.2.2 AP 2 Datenerfassung und Auswertung Phase 1

- Erfassung der Glätte-Vorhersagen DWD, MeteoGroup, GlobalWeather, meteoblue und aus der Wetterplattform der VIB für den Winter 2015/2016,
- Erfassung stationärer Daten (SWIS GMA),
- Erfassung mobiler Daten mit Unterstützung Autobahndirektion Nordbayern (ABDN) und der Autobahnmeisterei (AM),
- Durchführung von Thermalkartierung (Thermal mapping) und Himmelsapertur (Sky aperture oder SkyView),
- Auswertung der erfassten Daten nach den in AP1 erarbeiteten Methoden,
- Bewertung der Qualität des bisherigen Standes der Glätte-Vorhersagen,
- Meilenstein I/Zwischenbericht I.

1.2.3 AP 3 Entwicklung weiterführender Konzepte und Methoden

- Erarbeitung von realisierbaren allgemeingültigen Voraussetzungen für streckenbezogene

Glätte-Vorhersage für möglichst alle Glättearten mit der erforderlichen Qualität auch mit dem Ziel für eine vorgesehene Normung dieser Voraussetzungen.

- Entwicklung von Methoden zur Verwendung von routinemäßig vom Betriebsdienst erfasster mobiler Daten zur Verbesserung der streckenbezogenen Glättevorhersage.
- Ausarbeitung einer Methode zur Erfassung von möglichst aussagefähigen personellen Beobachtungen und Erfahrung des Betriebsdienstes der AM an der Teststrecke. Mit der Prämisse, dass dies das Betriebsdienstpersonal dabei möglichst wenig belastet wird und einfach zu handhaben ist.
- Aufbau einer Testumgebung, der die in AP3 erarbeiteten weiterführenden Methoden zur Verbesserung der streckenbezogenen Glätte-Vorhersage unter Verwendung der in AP2 als beste bewerteten Quellen, insbesondere der GMA Prognosen, verwendet und streckenbezogene Prognosen in Echtzeit bzw. durch Simulation anhand erfassten Daten, erzeugt zur Erprobung.

1.2.4 AP 4 Praktische Erprobung, Datenerfassung u. Auswertung Phase 2

- Ausführliche Darstellung der erarbeiteten Verfahren zur Nutzung von stationären und mobilen Daten zur Gewinnung von Grundlagen über die kleinräumige Beschaffenheit der Strecke.
- Darstellung der Verfahren zur kontinuierlichen Verbesserung und Optimierung der streckenbezogenen Glättevorhersage unter Verwendung von stationären und mobilen Messdaten.
- Darlegung der detaillierten Planung für die Erprobungsphase 2.
- Vorstellung der Kriterien und der Art der Erfassung von Erfahrungen der teilnehmenden Meistereien während der Erprobungsphase 2.

1.2.5 AP 5 Empfehlungen für Einführungs-konzepte

- Erfassung der Prognosen der Teststrecken, sowie der stationärer GMA und mobiler Daten aus dem Betriebsdienst.
- Erfassung von Beobachtungen und Erfahrungen der Winterdienstverantwortlichen.

- Ausführliche und detaillierte Auswertung der Daten und Testerfahrungen. Dokumentation und Darstellung der Ergebnisse grafisch, qualitativ und quantitativ.

2 Stand der Methoden zur Prognose von Straßenglätte

2.1 Allgemeines zur Methodik

Das gesamte Projekt ist aufgebaut auf einem Prozessdiagramm, in dem alle Schritte, welche die Vorhersagegüte beeinflussen, sequentiell aufgeführt und bearbeitet werden. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass eine Prozesskette nur so gut sein kann wie ihr schlechtestes Glied, oder – anders gesagt – dass die Optimierung des Endergebnis nur durch eine abgestimmte Optimierung aller Prozess-Schritte gelingen kann. Die Prozesskette und wesentliche Strategien für die Optimierung werden dargestellt in Bild 1.

2.2 Numerische Wettervorhersage

Numerische Wettermodelle bilden die Grundlage jeder modernen Wetterprognose. Manuelle Verfahren reichen heute nicht mehr an die Präzision von Modellen und sind diesen zudem bzgl. Kosten weit un-

terlegen. Messungen sind zwar kostengünstiger geworden, taugen aber nur begrenzt als Vorhersagen, da sie keine Informationen über Veränderungen liefern.

Die Qualität der Wetterprognose-Daten ist entscheidend für den Erfolg einer lokalen und streckenbezogenen Straßenglätte-Prognose. Für eine möglichst genaue Straßenglätte-Prognose müssen also die bestmöglichen Numerischen Wettermodelle verwendet werden, da die synoptischen und situativen Fehler der Modelle auch mit lokalen Methoden nicht mehr korrigiert werden können.

Die Methoden der numerischen Wettervorhersagen werden eingehender beschrieben im Bericht „Prognose von Straßenglätte – Methoden- und Marktüberblick zu Verkehrswarnungen bei Straßenglätte auf Basis von Wettermodellen“ [37]. Aus diesem Projekt finden sich Ergebnisse dazu in Kapitel 9.3.2.

2.3 Stationsbezogene Prognosen

Stationsbezogene Prognosen sind eine Möglichkeit, Modelldaten mit Messungen zu verknüpfen und somit den systemischen Fehler für einen Standort zu reduzieren, besonders wenn der Standort eine geringe Repräsentativität für das umliegende Gelände aufweist. Durch nachträgliches Prozessieren können die Modelldaten so auf eine Punktmes-

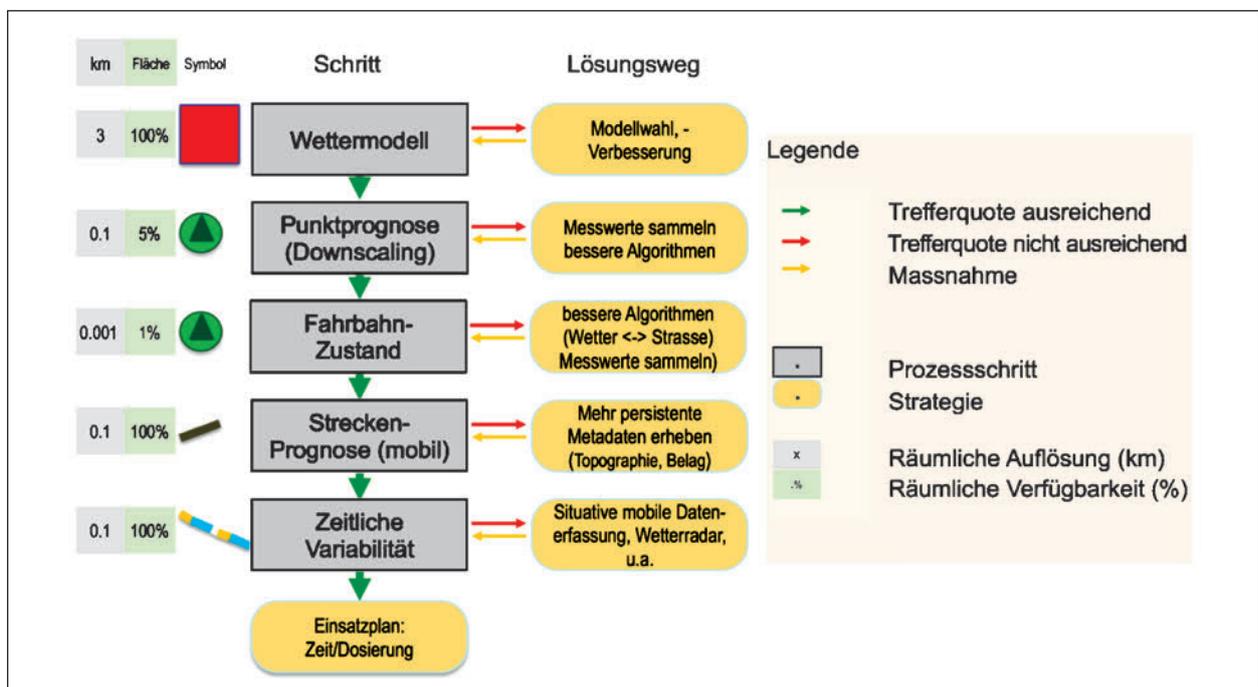


Bild 1: Prozessdiagramm für Straßenglätte-Vorhersage und wesentliche Strategien für die Optimierung

sung optimiert werden. Entsprechende Methoden sind Bias-Korrektur, Model Output Statistics (MOS), Kalman Filter und Downscaling. Sie sind jeweils für verschiedene Prognosehorizonte geeignet und greifen dabei auf verschiedene Zeiträume an Messdaten zu.

Die Methoden werden eingehender beschrieben im Bericht „Prognose von Straßenglätte – Methoden- und Marktüberblick zu Verkehrswarnungen bei Straßenglätte auf Basis von Wettermodellen“ [37], und gehören zum Standardrepertoire der Dienstleistungen von Vorhersageanbietern. Die meisten Methoden stützen sich auf Messdaten, was jedoch in unwegsamem Gelände bzw. auf längeren und (bzgl. Topografie, Gelände, Vegetation u. a.) abwechslungsreichen Strecken rasch an Grenze stößt, da Messwerte einzelner Standorte nur bedingt auf andere übertragbar sind.

Die Ergebnisse in Kapitel 9.3.2. sowie die Untersuchungen in Kapitel 10.1.5 und 10.2.1 zeigen verschiedene Methoden von Downscaling auf sowie Empfehlungen zu deren Anwendung.

2.4 Wetter- und Fahrbahnzustandsmessungen

Der Zustand des Fahrbahnbelages (insbesondere, Temperatur, Belagszustand und -dicke) ist von zahlreichen meteorologischen und geografischen Parametern abhängig, welche enorme Unterschiede innerhalb eines Straßenabschnittes hervorrufen können. Der wichtigste Parameter (unter mittel-europäischen Bedingungen) ist die Temperatur, welche auch den Zustand der Feuchtigkeit auf der Fahrbahn bestimmt.

Der Fahrbahnzustand kann i. W. gemessen werden:

1. Stationär, mit Stationen. Dies ist die seit Jahrzehnten etablierte Methode.
2. Mobil, mithilfe von Sensoren, die an Fahrzeugen angebracht werden. Diese Methode wird schwerpunktmäßig im Projekt getestet als Ergänzung zu 1.
3. Fernerkennung, also durch Satelliten oder Flugkörper: diese Techniken sind zu ungenau und spielen für dieses Projekt daher keine Rolle.

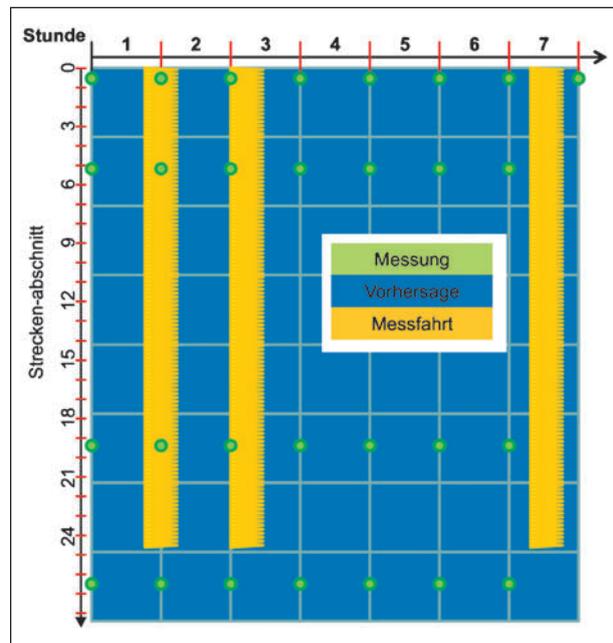


Bild 2: Prozessdiagramm für Straßenglätte-Vorhersage und wesentliche Strategien für die Optimierung

Die methodischen Unterschiede bzgl. zeitlicher und räumlicher Dichte der Messungen zeigt Bild 2. Die stationäre Messung findet dauerhaft statt, lässt jedoch große Zwischenräume frei; die mobile Messung schließt diese Zwischenräume weitgehend, findet jedoch nicht dauerhaft statt. Eine Kombination der Methoden verspricht eine genauere Kenntnis der Streckenbedingungen.

2.5 Stationsbasierte Prognosen der Fahrbahnoberflächentemperatur

Fest montierte Mess-Stationen an der Strecke, sogenannte Glättemeldeanlagen (GMA), sind seit Jahren der wichtigste Bestandteil der Straßenzustandsbestimmung und somit auch für die Prognose von winterlicher Glätte und die Planung des Winterdienstes. Mit den Sensoren an und in der Fahrbahn liefern die GMA die wichtigsten Messwerte für die Vorhersage von Straßenglätte.

Die Vorhersage wird für dieselben Parameter erstellt, welche an den GMA gemessen werden. Die Methoden sind i. W. anerkannter Stand der Technik und werden eingehender beschrieben im Bericht „Prognose von Straßenglätte – Methoden- und

Marktüberblick zu Verkehrswarnungen bei Straßenglätte auf Basis von Wettermodellen“ [37].

2.6 Streckenbezogene Glätteprognose

An Fahrzeugen montierte, berührungslose Sensoren ermöglichen mobile Messungen des Fahrbahnzustands. Dank ihrer inzwischen hohen Präzision und sinkenden Kosten stellen solche mobilen Messungen eine wichtige Ergänzung zu den Stationsmessungen dar.

Die Prognosemethoden für die Messpunkte der Glättemeldeanlagen sind bereits meist ausreichend genau. Anhand der Zeitreihen verschiedener Wetter- und Straßenzustandparameter können statistische und physikalische Methoden für die Prognose angewendet werden. Zudem besteht die Möglichkeit, anhand der Messdaten die Vorhersage für die nächsten Stunden zu optimieren. Allerdings treten verschiedene Glättearten in unterschiedlichen Streckenabschnitten mehr oder weniger häufig auf. Um aus den punktuellen Prognosen der Glättemeldeanlagen Rückschlüsse auf dazwischen liegende Strecken-Abschnitte ziehen zu können, sind Kenntnisse über statische und dynamische Parameter entlang des entsprechenden Straßenabschnittes notwendig. Mithilfe der beschriebenen mobilen Messdaten und geografischen Parametern ist es möglich, die stationsbasierten Prognosen auf die Abschnitte zwischen den Straßenmessstationen zu extrapolieren.

Die Vorhersage werden für die Parameter erstellt, welche an den GMA und mobil gemessen werden. Die Methoden werden eingehender beschrieben im Bericht „Prognose von Straßenglätte – Methoden- und Marktüberblick zu Verkehrswarnungen bei Straßenglätte auf Basis von Wettermodellen“ (siehe Literatur, [37]).

3 Anforderungen an die Straßenwetterprognosen

Im Folgenden sind die Anforderungen beschrieben, die den infrage kommenden Anbietern von Straßenwetter-Vorhersagen gestellt wurden. Da sehr viele der angefragten Anbieter ihren Sitz im Ausland haben, sind die Tabellen und Spezifikationen teilweise in englischer Sprache verfasst.

Grundsätzlich war klar, dass die verschiedenen Anbieter nicht alle Anforderungen erfüllen können. Die Voraussetzung war auch, dass die Beteiligung der Anbieter am Projekt keine Vergütung ihrer Leistungen beinhalten kann.

3.1 Prognoseparameter

Tabelle 1 zeigt die angeforderten Vorhersage-Parameter. Dabei wurden die für das Projekt wichtigsten als obligatorisch (M = mandatory) oder alternativ obligatorisch (A = alternative mandatory), in Bezug

Prio	Parameter	Description	Unit and resolution
M	POS_LAT	Latitude of the Reference Position	°, 0,00001°, Decimal Degree
M	POS_LAN	Longitude of the Reference Position	°, 0,00001°, Decimal Degree
A	RSEC	ID of Road segment	Long Integer
M	AT	Air Temperature, (2 m above surface)	°C; 0,1 °C
M	DPT	Dew Point Temperature, (2 m above surface)	°C; 0,1 °C
O	RH	Relative Humidity, (2 m above surface)	%, 1%
M	TOP	Type of Precipitation	Enum (see table)
M	IOP	Intensity of Precipitation	mm/h, 0,1 mm/h
O	POP	Probability of Precipitation	%/100
O	ECLLOUD	Effective cloudiness (cloud cover)	1/8; 0...8, integer
O	GRAD	Global radiation at road segment	W/m ² : 1 W/m ²

Tab. 1: Aufstellung der für die streckenbezogene Straßenwetter-Vorhersage wünschenswerten Parameter. Mit „O“ sind optionale und mit „M“ (mandatory) oder „A“ (alternative mandatory) sind obligatorische Parameter gekennzeichnet.

Prio	Parameter	Description	Unit and resolution
O	WD	Wind Direction	Degree, 1°; 0...359°
O	WS	Wind Speed, (average 10 min)	m/s; 0,1 m/s
O	WSG	Wind Speed, Gust	m/s; 0,1 m/s
O	VIS	Visibility (at 2 m above surface)	m; 1 m
M	RST	Road Surface Temperature	°C; 0,1 m/s
M	RSC	Road Surface Condition	Enum (see table)
M	WFT	Waterfilm thickness (water equivalent) amount of contaminant (l/m ² or ml/m ²) if no Icefilm thickness is provided, than WFT means liquid and frozen contaminant otherwise only liquid contaminant	mm; 0,001 mm or µm; 1 µm
O	IFT	Icefilm thickness (water equivalent) amount of frozen contaminant on surface	mm; 0,001 mm or µm; 1 µm
O	SH	Snow Height on Surface (visual snow height)	mm or cm; 1 mm
O	FRN	Friction (Slipperiness of Road Surface)	0...1,0

Tab. 1: Fortsetzung

Enumeration for TOP Type of Precipitation			
Prio	Enum	Description of Enum	Remarks
M	0	No Precipitation	
O	40	Precipitation unknown Type	
O	50	Drizzle	
M	60	Rainfall	Liquid precip.
M	70	Snowfall	Frozen precip.
O	90	Hail	
O	255	No information possible	Due to condition there is no classification possible

Tab. 2: Aufstellung der Ausprägungen (Enumerations) der Niederschlagsart (TOP = Type of Precipitation)

Enumeration for RSC Road Surface Condition			
Prio	Enum	Description of Enum	Remarks
M	0	Dry	WFT < 0,010 mm
M	1	Damp	0,01 < WFT < 0,030 mm
M	2	Wet	WFT > 0,03 mm and no frozen contaminant
O	3	Hoarfrost	Frozen dew on surface
O	4	Sleet	Snow and liquid fraction
M	5	Snow	Snow covered
M	6	Freezing rain	WFT > 0,01 and rain and freezing conditions
M	7	Ice	WFT > 0,01 mm and frozen contaminant
O	255	No information possible	Due to condition there is no classification possible

Tab. 3: Aufstellung der Ausprägungen (Enumerations) des Fahrbahnoberflächenzustands (RSC = Road Surface Condition)

auf die geogr. Referenzierung und die übrigen als optional gekennzeichnet.

Die Ausprägungen der diskreten Zustandsparameter (Enumerations) sind in den Tabellen 2 und 3 wiedergegeben. Auch hier wurde zwischen optionalen und obligatorischen Ausprägungen unterschieden.

Im Laufe des Projekts wurde für die Validierung ein Prognosehorizont von 6 h zunächst festgelegt.

Zeitliche Anforderungen

Aktualisierungsintervall: 1 Stunde,

zeitliche Auflösung: 1 Stunde,

Prognosehorizonte: 1, 3...24... (72) Stunden.

3.2 Übermittlung und Archivierung der Vorhersagedaten

Grundsätzlich wurde bevorzugt eine Übermittlung der Vorhersagedaten online und zeitnah zur Berechnung in Form einer Datendatei (Textformat, ASCII, CSV mit Trennzeichen: „;“,“) auf den FTP Server des Projektes gewünscht. Aus der Datei sollten der Zeitpunkt der Erzeugung der Prognose und der Vorhersagezeitpunkt des Datensatzes hervorgehen.

Zeitformat bevorzugt:

„DD.MM.YYYY hh:mm:ss“ in UTC (= Universal Time Coordinated) koordinierte Weltzeit.

Hier noch mal in der Zusammenstellung die Anforderungen an die Daten-Übermittlung und -Archivierung.

Datenprotokolle

Bevorzugtes Protokoll:

File transfer FTP

“Push” auf den Projekt FTP Server,

Alternative: WFS Web feature service HTTP

“Get” Dateien vom FTP or WFS/HTTP Server des Anbieters.

Dataformate

Bevorzugtes Format: Text-Dateien CSV Komma (or Semikolon) getrennte ASCII Daten,

Alternative Formate: XML/HTTP XML schema.

Vorhersagedaten beziehen sich immer auf die Fahrbahnoberfläche und die darüber liegende Atmosphäre bezogen auf bestimmte geogr. Referenzpunkte und gelten für einen bestimmten Vorhersagezeitpunkt (Datum/Uhrzeit) und sind ausgegeben zu einem bestimmten Ausgabezeitpunkt (Datum/Uhrzeit).

Vorhersage Datendateien, ausgegeben zu einem bestimmten Ausgabezeitpunkt und gültig für einen bestimmten Vorhersagezeitpunkt sollen alle Datensätze enthalten für alle in den Teststrecken liegenden geogr. Referenzpunkten bzw. die sie repräsentierenden Streckensegmente.

Anforderungen an die Informationen in Kopfzeile (Header) bzw. im Dateinamen

- Datum/Uhrzeit der Ausgabe der Vorhersage-Datendatei (Format: YYYY-MM-DD hh:mm),
- Datum/Uhrzeit des Vorhersagezeitpunktes, für den die Vorhersagedaten gültig sind (Format wie oben),
- Kennzeichen oder Name des Anbieters.

3.3 Geografisches Streckenmodell

Eine streckenbezogene Vorhersage von Straßenwetter-Prognose-Daten erfordert ein digitales Streckenmodell, welches die Strecke in ausreichend kurze Segmente einteilt, auf die nachher alle Prognose- und Messdaten bezogen werden können. Es ist dabei selbstverständlich, dass nicht eine beliebig geringe Auflösung – quasi analog – sinnvoll erreicht werden kann. Deshalb wurde im Projekt aus verschiedenen Überlegungen die Auflösung in Längsrichtung auf minimal 20 m festgelegt. V. a. kann bei der mobilen Datenerfassung derzeit mit 1 Sekunde Erfassungsintervall und einer praktisch anwendbaren Fahrgeschwindigkeit im Bereich von 60... 80 km/h kein kürzerer Abstand der Messorte erreicht werden. Die Auflösung erscheint aber ausreichend fein, um auch weniger ausgedehnte Unterschiede des Streckenverlaufs, wie z. B. Brücken, Unterführungen usw. noch erfassen zu können. Auf der anderen Seite geben viele Wetterdienstleister an, eine so hohe Auflösung nicht sinnvoll erreichen zu können.

Die Streckensegmente sind dadurch definiert, dass im Zentrum des Streckenabschnitts ein geogr. Re-

ferenzpunkt mit Breiten- und Längengrad angegeben wird. Anfangs wurde überlegt, das Streckenmodell aus digitalen Karten von Navtech oder auch TomTom (früher TeleAtlas) abzuleiten. Die andere Alternative waren Streckendaten der Straßenbauverwaltungen. Es stellte sich aber heraus, dass die Erfassung der Strecke mit eigenen Messfahrzeugen sinnvoller ist. Die GPS Daten wurden dabei mit der gleichen Ausstattung erfasst, mit der später auch die mobilen Messfahrten der Einsatzfahrzeuge der Meistereien und auch die eigenen Fahrzeuge für die erweiterte thermale Kartierung ausgestattet sind (Apple, minIPAD, Mobilfunk).

Die Teststrecken wurden dabei im Rahmen einer Messfahrt abgefahren und aus den dabei erfassten GPS Daten wurde das Streckenmodell abgeleitet. Die Fahrspur in Form eines Polygonzuges von GPS Positionen im zeitlichen Abstand von 1 Sekunde wurde dann unter Berücksichtigung der Fahrtrichtung in Referenzpunkte im konstanten Abstand von 20 m entlang der Strecke umgewandelt. Siehe dazu die Prinzipdarstellung in Bild 3. Der Schwerpunkt des Polygonzuges im Querschnitt liegt in der rechten Hälfte des rechten Fahrstreifens (Hauptfahrstreifen).

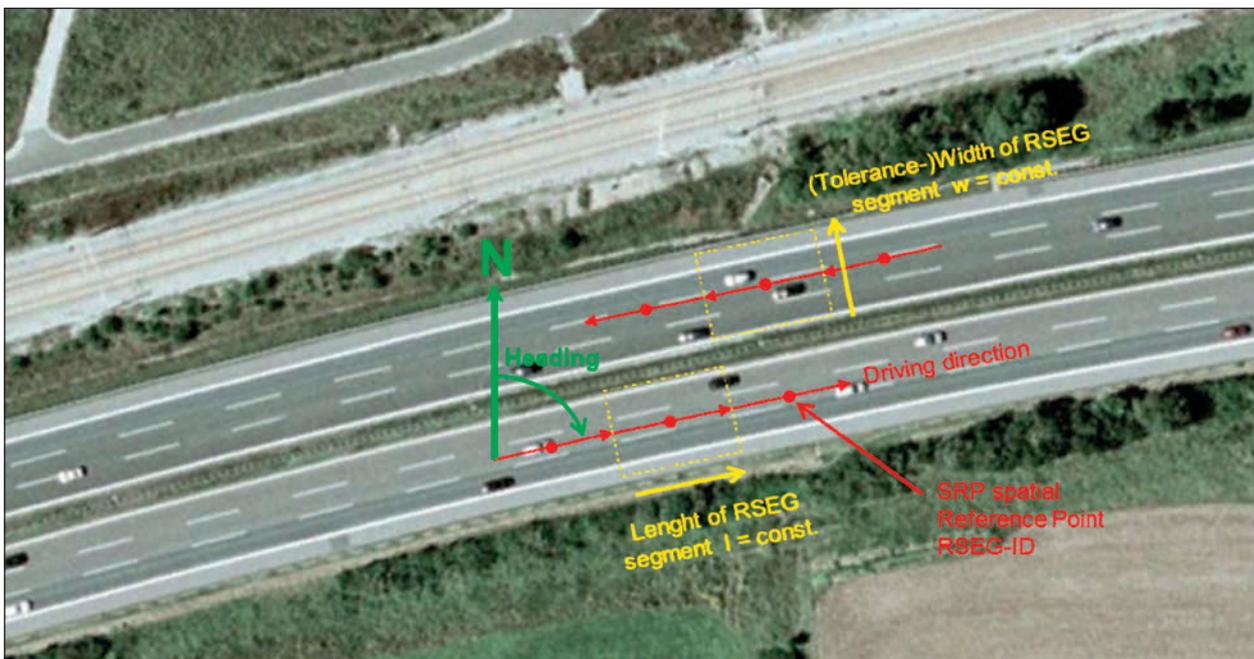


Bild 3: Darstellung des Prinzips der Einteilung der Strecke in Segmente konstanten Abstands. Das Segment ist definiert durch die geogr. Position eines Referenzpunktes der in der Mitte des Segmentes liegt. Der Abstand zum nächsten Referenzpunkt ist konstant und beträgt hier 20 m. Bei der BAB werden die beiden Richtungsfahrbahnen mit einem getrennten Streckenmodell beschrieben. Die Fahrtrichtung durch die geogr. Ausrichtung des Polygonzuges am Referenzpunkt ist der rechtweisende Kurs in Grad. Jeder Referenzpunkt und damit das Straßensegment (RSEG) wird mit einer ID (RSEG_ID) gekennzeichnet. In der Darstellung ist der Polygonzug in der Mitte der Richtungsfahrbahn gezeichnet. In Wirklichkeit liegen die Referenzpunkte eher in der rechten Hälfte des rechten Hauptfahrstreifens

Bei den Bundesautobahnen wird davon ausgegangen, dass es sinnvoll ist, alle Betrachtungen differenziert nach den Richtungsfahrbahnen vorzunehmen. Bei den Bundes-, Staats- bzw. Landes- und Gemeindestraßen kommt man mit einer von der Fahrtrichtung unabhängigen Betrachtung aus.

Die digitalen Streckenmodelle sind daher für die BAB Teststrecken getrennt nach Fahrtrichtung aufgebaut und für die übrigen Teststrecken, die keine verkehrliche Richtungstrennung aufweisen, ist das Modell für beide Richtungsfahrbahnen einmalig aufgestellt.

In der Datenbank für das digitale Streckenmodell sind bereits vorsorglich Eintragungen angelegt, die aber zum derzeitigen Stand des Projektes noch nicht bekannt sind. Es wurde aber dazu bereits ein Tabelleneintrag angelegt.

Die Struktur der Datentabelle für das Streckenmodell ist in Tabelle 4 wiedergegeben. Die wichtigsten Parameter sind die RSEG_ID und die geogr. Position (RP_LAT, RP_LON) des jeweiligen Referenz-

punktes für das Streckensegment, sowie die Ausrichtung (HEADNG) in Fahrtrichtung. Ebenso ist die geogr. Höhe ü. NN (RP_ALT) in Meter angegeben.

Die Kilometrierung (KILOMTR) ist nur zur Orientierung über die Streckendistanzen und stimmt nicht mit den Betriebskilometern überein. Ebenso hat das in der Gegenrichtung gegenüberliegende Segment nicht zwingend die gleiche Kilometerangabe im Modell. Die Segmentlänge (RSEG_LNG) ist per Definition konstant bei 20 m. Sollten später Modellen mit größeren Segmentlängen oder gar unterschiedlich Segmentlängen notwendig werden, kann dies durch die flexible Modellstruktur auch dargestellt werden.

Der Parameter Emissionsgrad (EMISSTY = emissivity) wurde vorsorglich angelegt und wurde im Laufe des Projektes durch thermische Kartierung und mobile Strahlungsmessung abgeleitet. Der Parameter ist ein Maß für die Abstrahlungseigenschaften der Belagsoberfläche. Ebenso der Parameter Absorptionsgrad (ABSORTY = absorptivity) wurde vorsorglich angelegt und ist im Laufe des Projektes

Data Field	Description	Unit and resolution
RSEC_ID	ID of Road segment	Long Integer
RSEC_FROM	ID of previous Road segment of route (NULL: beginning of route)	Long Integer
RSEC_TO	ID of following Road segment of route (NULL: end of route)	Long Integer
RP_LAT	Latitude of the Reference Position	°, 0,00001°, Decimal Degree
RP_LON	Longitude of the Reference Position	°, 0,00001°, Decimal Degree
RP_ALT	Altitude of the Reference Position on pavement surface	m, 1 m (above sea level)
HEADNG	Geogr. Heading of Road Segment in driving direction	°, 1°, Degree
DDIR	Driving direction	Enum: 1 = one way, 2 = two way traffic
NUMLANE	Number of lanes in driving direction (if two-way: all lanes in both dir.)	Integer;
STREETNAME	Name or Identifier of the street	e.g. "A9" or "St2139"
KILOMTR	Kilometrage of route at the reference Position	km, 0,001 km
RSEG_LNG	Length of Road Segment	m, 1 m
WIDTHR	Width of road pavement surface cross section (over all lanes per Dir.)	m; 0,1 m
CURVR	Curve Radius of road at Reference Position	m, 1 m
LT_GRAD	Longitudinal Gradient	%/100, 0,01%/100
TR_GRAD	Transversal Gradient	%/100, 0,01%/100
TYPPAV	Type of Pavement surface	Enum (see table)
TYPROAD	Type of Road construction	Enum (see table)
TYPENVIR	Type of Street environment	Enum (see table)
EMISSTY	Emissivity of the pavement surface	%/100; 0...1%/100
ABSORTY	Absorptivity of the pavement surface	%/100; 0...1%/100

Tab. 4: Struktur der Datentabelle des digitalen Streckenmodells für die Teststrecken. Die Kilometrierung (KILOMTR) ist nur zur Abschätzung der Distanzen gedacht und entspricht nicht der offiziellen Betriebskilometrierung

durch thermische Kartierung und mobile Strahlungsmessung abgeleitet worden. Das ist ein Parameter, der den Grad der Absorptionseigenschaft der Belagsoberfläche angeben kann.

Kurvenradius, Längs- und Querneigung wurden vorsorglich angelegt, waren aber nur unzureichend bekannt (für die A 9 standen einige Daten zur Verfügung). Im Laufe des Projekts stellte sich heraus, dass die Parameter nicht mit der erforderlichen Ge-

naugigkeit und Auflösung zur Verfügung stehen. Durch die mobilen Daten und thermale Kartierung erübrigt sich die Kenntnis der genauen konstruktiven Merkmale der Strecke.

Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7 geben die vordefinierten Ausprägungen für die Art des Belages, der Straßenkonstruktion und der Umgebung wieder. Bild 4 beschreibt die Definition für die Längs- und Querneigung, sowie den Kurvenradius.

Enumeration for TYPPAV Type of Pavement		
Enum	Description of Enum	Remarks
1	Asphalt (normal porous)	
2	OPA Asphalt (open porous)	Drain asphalt
3	Concrete	
...	More to be defined	
255	Other than above classes	The type is known, but non of the defined classes apply!

Tab. 5: Liste der Ausprägungen (Enum = Enumerations) für die Art des Belages (TYPPAV)

Enumeration for TYPROAD Type of road construction		
Enum	Description of Enum	Remarks
0...49	Reserved for further extension	
50	Bridge	General bridge segment without further information
51	Bridge with concrete	Bridge with concrete subconstruction
52	Bridge	Bridge with metal subconstruction
53...99	Reserved for further extension	Classes referring to subconstruction of road
100...149	Reserved for further extension	Classes referring to subconstruction of road
150...199	Reserved for further extension	Classes referring to subconstruction of road
200...249	Reserved for further extension	Classes referring to subconstruction of road
255	Other than above classes	The type is known, but none of the defined classes apply

Tab. 6: Liste der vordefinierten Ausprägungen (Enum = Enumerations) für Art der Straßenkonstruktion (TYPROAD)

Enumeration for TYPENVIR Type of street environment		
Enum	Description of Enum	Remarks
1	Standard road	Free surrounding, minor shadowing, normal traffic
2	Standard road, low traffic	Free surrounding, minor shadowing, low traffic
3	Highway, high traffic	Free surrounding, minor shadowing, high traffic
4	Urban street	Urban street, partly shadowing because of buildings
5	Shaded road segment	Shaded due to wood or buildings etc.
6	Bridge road segment	Free surrounding, windy path
7...254	Reserved for further extension	
255	Other than above classes	The type is known, but none of the defined classes apply

Tab. 7: Liste der vordefinierten Ausprägungen (Enum = Enumerations) für Art der Umgebung (TYPENVIR)

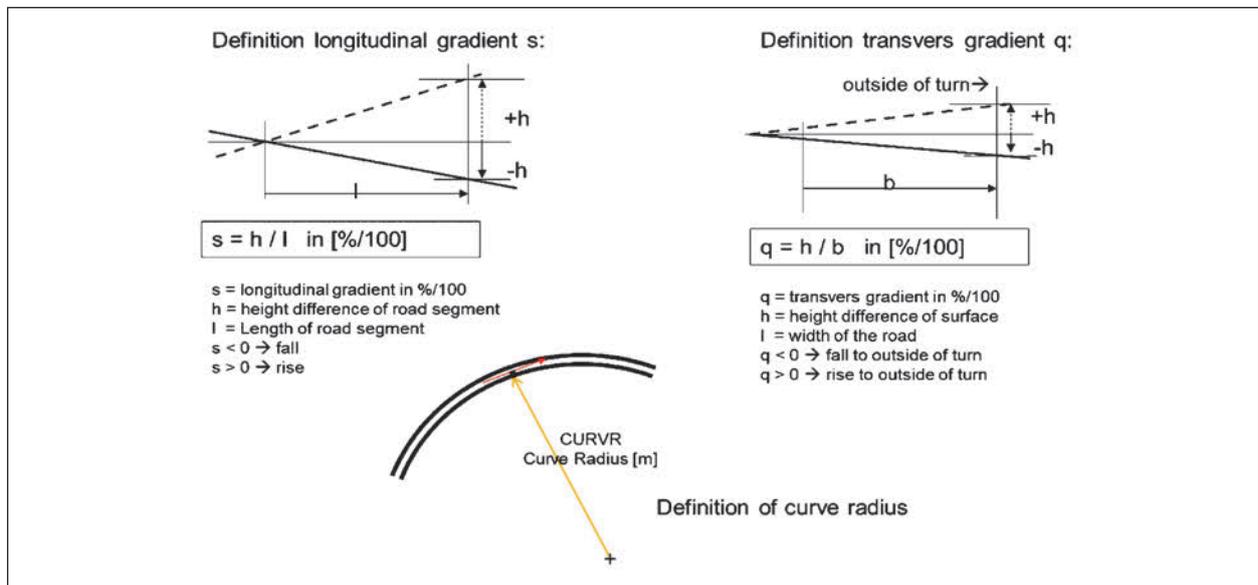


Bild 4: Skizzen zur Definition der Parameter Längsneigung (Longitudinal Gradient LT_GRAD) und Querneigung (Transversal Gradient TR_GRAD), sowie Kurvenradius (CURVR)

Die Angaben in den Daten des Streckenmodell über die Straßenbeschaffenheit und der Umgebung sind relativ ungenau und vorläufig. Es stellte sich im Projektverlauf heraus, dass diese Angaben nicht wirklich für die streckenbezogene Prognose benötigt werden. Außerdem stehen keine praktisch verwendbaren Modellansätze zur Verfügung, welche auch ausreichend parametrisierbar gewesen wären.

Die für die Teststrecken erstellten Modelldaten wurden den Anbietern im o. g. Format bereit gestellt.

3.3.1 Straßensegment-Nummerierung (RSEG_ID)

Das Streckenmodell sieht für jedes Segment auf der Straße eine eindeutige Nummerierung (ID) vor. RSEG_ID hat 8 Stellen und setzt sich wie folgt zusammen:

SFxxxxxx

- S = Nummer der Teststrecke;
- F = Fahrtrichtung 0: keine Trennung,
- 1 = Fahrtrichtung 1,
- 2 = Fahrtrichtung 2;

xxxxxx = 6-stellige fortlaufende Nummerierung aufsteigend in Fahrtrichtung.

4 Anbieter von Straßenwetterprognosen (Recherche)

Zunächst wurde eine ausführliche Recherche bei infrage kommenden Anbietern vorgenommen. Diese sollten bereits Erfahrung besitzen auf dem Gebiet Straßenwetter, entweder im Winterdienst oder für die Verkehrstechnik und -information. Daraufhin wurde an alle, in die engere Wahl kommenden Anbieter, die in Kapitel 3 näher beschriebenen Anforderungen an die Straßenwetterprognosen übermittelt, sowie einfragebogen zu näheren Details, die Anbieter und deren Vorhersageprodukte betreffend. Eine Übersicht der sich am Projekt beteiligenden Anbieter von Straßenwetterprognosen enthält Tabelle 8.

Vaisala und MeteoGroup wurden angefragt und haben erklärt, sich nicht beteiligen zu wollen.

Vaisala wurde kontaktiert, weil im anfangs als Testgebiet vorgesehenen Landkreis Ravensburg Vaisala ein System mit Prognosen betreibt. Die Vorhersagen werden jedoch von einem anderen Wetterdienstleister erstellt und stützen sich auf Messstellendaten ab, sind somit nicht für Streckenprognose geeignet.

MeteoGroup bietet teilweise streckenbezogene Glättevorhersagen in Schweden und auch in Deutschland an, im Prinzip europaweit. Meteo-

Kurz	Anbieter	Verbreitung, Produkte, Erläuterungen
DWD	Deutscher Wetterdienst SWIS Offenbach, Deutschland	SWIS Prognosen auf GMA Standorte bezogen für alle BAB GMA im SWIS Auflösung 1h bis 24h Horizont Daten stehen über GDS FTP zur Verfügung.
GWC	Global Weather Corp. Boulder, Colorado, USA	Planen über Verkehrsinformations-Anbieter INRIX deutschland- und europaweit Straßenwetter-Information auf kleinräumigen Streckenabschnitten anzubieten. Haben ab 1. März 2016 begonnen die Vorhersagedaten auf dem Projekt-FTP-Server abzulegen!
MBA	meteoblue AG Basel, Schweiz	Streckenbezogene Wettervorhersage inkl. Fahrbahn-Parameter in räumlicher Auflösung von 3 bis 0,1 km , Datensätze per API. Abdeckung der Teststrecke in Schritten. Werden regelmäßig per Task-scheduler abgeholt und auf dem Projekt-FTP-Server archiviert.
FOR	FORECA LTD Espoo, Finnland	Liefere Straßenwetterprognosen auch in Deutschland, kleinräumige Belagsvorhersagen auf Landebahnen für Flughäfen.
DTN	DTN (ehem. Telvent DTN, Schneider Electric), Burnsville, MN 55337, USA	Liefert Belagsprognosen auf Position der Glättemeldeanlagen bezogen in der Schweiz und bietet für ganz Europa an.

Tab. 8: Übersicht der Anbieter von Straßenwettervorhersagen, die sich am Projekt beteiligen

Anbieter	Bemerkung
Boschung Mechatronic AG, Fribourg, CH	Kein eigener Wetterservice
The Weather Company, Atlanta, USA	(IBM Tochter), über Tochterfirmen im Straßenbereich tätig
MeteoService, Berlin, DE	Meteorologische Forschung, statistische Vorhersagemethoden, erstellen für andere Wetterdienste MOS Modelle. → Wettermanufaktur Berlin ist deren Vermarkter (Beteiligung)
WM Wettermanufaktur, Berlin, DE	Neugründung aus ehem. MeteoGroup Mitarbeitern
Vaisala OYj, Vanda, FI	Kein eigener Wetterservice, Lösungen für Winterdienste und Verkehr. Kein Vorhersage-Datenstrom lieferbar
MeteoStar (Sutron), Englewood, USA CO	Leading Environmental Analysis & Display System, Wetterdienstleistungen. Derzeit kein Angebot für Straßenwetter
MG MeteoGroup, London, GB, (Berlin, DE, Appenzell, CH)	Wetterdienstleister, Bietet Streckenvorhersage
DWD Deutscher Wetterdienst, Offenbach, DE	Nationaler Wetterdienst, SWIS Vorhersagen für StB-Verwaltungen am Projekt beteiligt, s. o.
MBA meteoblue, Basel, CH	Privater Wetterdienstleister, als AN am Projekt beteiligt
DTN, Minneapolis, USA MN	Privater Wetterdienstleister, RWIS Maintenance Decision Support Systeme → liefert Vorhersagen für das Projekt
GWC Global Weather Corp., Boulder, USA CO	Privat. Wetterdienstleister, Wetterwarnungen für Straßenverkehrsinfo (INRIX) → Liefert streckenbezogene Vorhersagen für das Projekt
FORECA, Espoo, FI	Privater Wetterdienstleister, RWIS Maintenance Decision Support Systeme → Liefert streckenbezogene Vorhersagen für das Projekt

Tab. 9: Liste der Straßenwetter Anbieter, die im Rahmen der Recherche betrachtet worden sind

Group nutzt Thermal Mapping bzw. Thermalkartierung und Sky-View für die Vorhersagen und führt auch solche Messfahrten durch. Sky-View (oder auch Himmelsapertur) wird auch zunehmend – soweit möglich – aus Google StreetView abgeleitet. Außerdem optimiert MeteoGroup auch Vorhersagen auf Straßenwetterstationen bezogen durch MOS Verfahren (MOS = Model Output Statistic). Berlin als Nutzer der Vorhersagen wurde zunächst auch ins Auge gefasst. Leider war auch hier keine

Möglichkeit die Vorhersagen in einer auswertbaren Form zu erfassen und zu archivieren.

Im Laufe des Projektes wurden weitere Anbieter bekannt, die über Know-How in dem Bereich verfügen und im Folgenden aufgeführt sind (Tabelle 9). Eine Validierung der Vorhersagen war hier leider nicht mehr möglich.

MeteoService liefert selbst keine Vorhersagedienste, sondern versteht sich als Forschungsinstitution

Merkmal	DWD	MG	DTN	GWC	FOR	WM
Bietet SWIS/MDSS-Service für Winterdienste	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
Unterhält eigenes Messnetz an Wetterstationen	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Bietet SWS-Datenerfassung an	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
Nutzt SWS für die Vorhersage (MOS)	Ja	Ja	Ja	Plan	Ja	Ja
Vorhersage von Belagsparametern	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Vorhersage von Wasserfilm	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Bietet streckenbezog. Straßenzustandprognosen	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Plan
Kann mobile Straßenzustandsdaten Online nutzen	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Plan
Nutzt regionale Niederschlagsradar-Daten	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
Nutzt connected Vehicle-Data (od. XFCD)	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein
Kann selbst Thermal Mapping durchführen	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
Nutzt Thermal Mapping-Daten	Ja	Ja	Nein	Plan	Ja	Ja
Kann selbst SkyView bestimmen	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Plan
Nutzt SkyView-Daten	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Plan
Geogr. Abdeckung der Vorhersagen	BRD	EU	Welt	Welt	Welt	EU?

Tab. 10: Vergleichstabelle der Merkmale der verschiedenen Anbieter von Straßenwetter-Vorhersagen

für meteorologisch Vorhersage, vor allem statistische Methoden und Dienstleister für Wetterdienste (Erstellung von MOS Modellen). Ist an Wettermanufaktur beteiligt.

Wettermanufaktur in Berlin ist eine Neugründung Januar 2017 und besteht aus ehemaligen Mitarbeitern von MeteoGroup, welche Know-How-Träger im Bereich Straßenwetter waren. Wettermanufaktur will ein ähnliches Angebotsspektrum aufbauen im Bereich Winterdienstservice, wie es MeteoGroup anbietet, in Zukunft also auch eine streckenbezogene Glättevorhersage. Allerdings wird nicht vor 2018 damit zu rechnen sein, da sich die Firma erst im Aufbau befindet.

Die für Streckenvorhersage relevanten Merkmale der Anbieter und ihr Erfüllungsgrad (soweit bekannt) sind aufgeführt in Tabelle 10. meteoblue als Auftragnehmer (AN) im Projekt ist dabei nicht aufgeführt.

5 Teststrecken

Im Interesse aussagefähiger Ergebnisse war es wichtig, einige wenige überschaubare Teststrecken zu finden, welche folgende Kriterien erfüllen:

1. Volle Unterstützung durch die zuständigen obersten Straßenbauverwaltungen.

2. Engagement durch die Straßen- bzw. Autobahnmeistereien.
3. Voraussetzungen für möglichst umfassende laufende Erfassung von mobilen Daten aus den Strecken und eine schnelle Umsetzung der Ergebnisse.
4. Verfügbarkeit von Straßenwetterdaten (stationäre Messstellen bzw. GMA's auf der Strecke) in Form von digital verarbeit- und archivierbaren Online- bzw. Offline-Daten.
5. Verfügbarkeit von Straßenwetter-Vorhersagen streckenbezogen oder zumindest Orte entlang der Strecke in digital verarbeit- und archivierbarer Form (Online).
6. Überschaubare Strecke mit klaren Straßen- und Umgebungsbedingungen bei ausreichender topografischer Variation und möglichst vielen zu erwartenden winterlichen Zuständen.

Unter Berücksichtigung der ursprünglichen Vorschläge der BAST wurden die folgenden Teststrecken näher untersucht (siehe Tabelle 11).

Es wurden Gespräche mit den Verantwortlichen Straßenbauverwaltungen und den Meistereien geführt und auf die Erfüllung der Kriterien hin geprüft.

Die Teststrecke in Wangen, Landkreis Ravensburg wurde vorgeschlagen, weil dort ein System der

No	Gebiet	Meisterei	Anbieter Glättevorhersage	Streckenlängen
1	BAB A 9, Bayern	AM Greding	DWD, GWC, FOR, DTN	ca. 50 km
2	Viechtach St2139, Bayern	SM Viechtach	DWD, GWC, FOR, DTN	ca. 14 km
3	BAB A 4, Bergisch Gladbach	BASt	DWD, GWC, FOR, DTN	ca. 55 km
4	LKr Ravensburg B 32, Baden Württemberg	SM Wangen	Vaisala IceCast ?	?
5	Stadt Berlin, Berlin	BSR Berliner Stadtreinigung	MeteoGroup GLAET-TE24	?

Tab. 11: Liste der ursprünglich vorgeschlagenen und untersuchten Teststrecken (Erklärung: DWD = Deutscher Wetterdienst; GWC = Global Weather Corporation; FOR = FORECA; DTN = Telvent DTN)

Firma Vaisala existiert, welches Glätteprognosen liefert. Allerdings stellte sich heraus, trotz Nachfrage direkt bei Vaisala, dass kein direkter Zugang zu den Vorhersagedaten besteht, der eine Archivierung ermöglicht und dass auch keine Bereitschaft zu erkennen war, diese zu liefern. Die Verantwortlichen beim Landkreis haben ebenfalls keine Möglichkeit, die Daten zu archivieren, was allenfalls der Hersteller kann. Zudem war die Vorhersage nicht im Sinne des Projektes streckenbezogen, sondern auf eine stationäre Glättemeldeanlage bezogen. Außerdem waren die Voraussetzungen für eine ständige mobile Datenerfassung durch die Meisterei Wangen nicht innerhalb der vorgegeben Zeit zu klären.

Bei der Teststrecke Stadt Berlin, welche eine streckenbezogene Glättevorhersage des Wetterdienstleisters MeteoGroup nutzt, gestaltete sich die Erfassung und Archivierung in elektronischer Form ebenfalls schwierig, da diese nur unter Beteiligung der MeteoGroup möglich gewesen wäre. Diese Bereitschaft war, trotz mehrerer Nachfragen, nicht vorhanden gewesen. Obwohl sicherlich ein Stadtgebiet ein sehr interessantes Testfeld gewesen wäre, wäre aber durch die sehr komplexen Umgebungsbedingungen innerhalb der Stadt und der ohnehin großen Herausforderung einer hochauflösenden streckenbezogenen Glätteprognose der Rahmen des Projektes vermutlich gesprengt worden. Außerdem waren die Voraussetzungen für eine ständige mobile Datenerfassung durch die Stadtreinigung wesentlich schwieriger. Es war zudem unklar, welche Strecken innerhalb der Stadt gewählt werden sollten.

Schließlich blieben die Teststrecken 1-3 übrig, welche im Wesentlichen die Voraussetzungen erfüllten.

Bei der Teststrecke 3 übernimmt die BASt die mobile Datenerfassung, wobei eine ständige umfassende mobile Datenerfassung nicht erfüllt werden kann. Dafür befinden sich relative viele Straßenwettersta-

tionen auf der Teststrecke, sowie das Umfelddaten-Testfeld der BASt.

Bei den beiden Teststrecken in Bayern war von vorne herein die volle Unterstützung der Zentralstelle für den Betriebsdienst bei der Autobahndirektion Nordbayern vorhanden. Die Autobahnmeisterei Greding hat sich dankenswerterweise bereit erklärt, zwei ihrer Einsatzfahrzeuge mit mobiler Datenerfassung auszurüsten und die Messfahrten auch täglich durchzuführen. Auch hat sie bei der Installation tatkräftig – trotz anfänglicher zeitaufwendiger Probleme – durch eigene Leistungen unterstützt. Das gleiche gilt für die Straßenmeisterei Viechtach. Auch hier war das Engagement groß und die Datenerfassung wurde ohne Probleme den ganzen Winter durchgeführt.

Im Folgenden werden die einzelnen Teststrecken näher beschrieben.

5.1 Teststrecke 1 A 9 Greding

Die Teststrecke ist der Betreuungsabschnitt der Autobahnmeisterei Greding von Stammham bis Allersberg in Fahrtrichtung Nürnberg (Nord) und umgekehrt in der Fahrtrichtung München (Süd) – siehe Bild 6. Die Teststrecke quert das Altmühltal und reicht von 380 m (Altmühltal) bis 520 m (Stammham) also Unterschiede im Bereich von 200 m. Das Höhenprofil der A 9 ist in Bild 5 wiedergegeben.

Auf der Teststrecke befinden sich drei Glättemeldeanlagen (GMA) im SWIS BAB. Die Anlagen sind in Kapitel 6.1 näher beschrieben.

5.1.1 Streckenmodell Teststrecke 1 A 9 Greding FR Nbg (Nord)

Anzahl der Streckensegmente: 2.892

RSEG_ID's: 11'000001 ... 11'002892

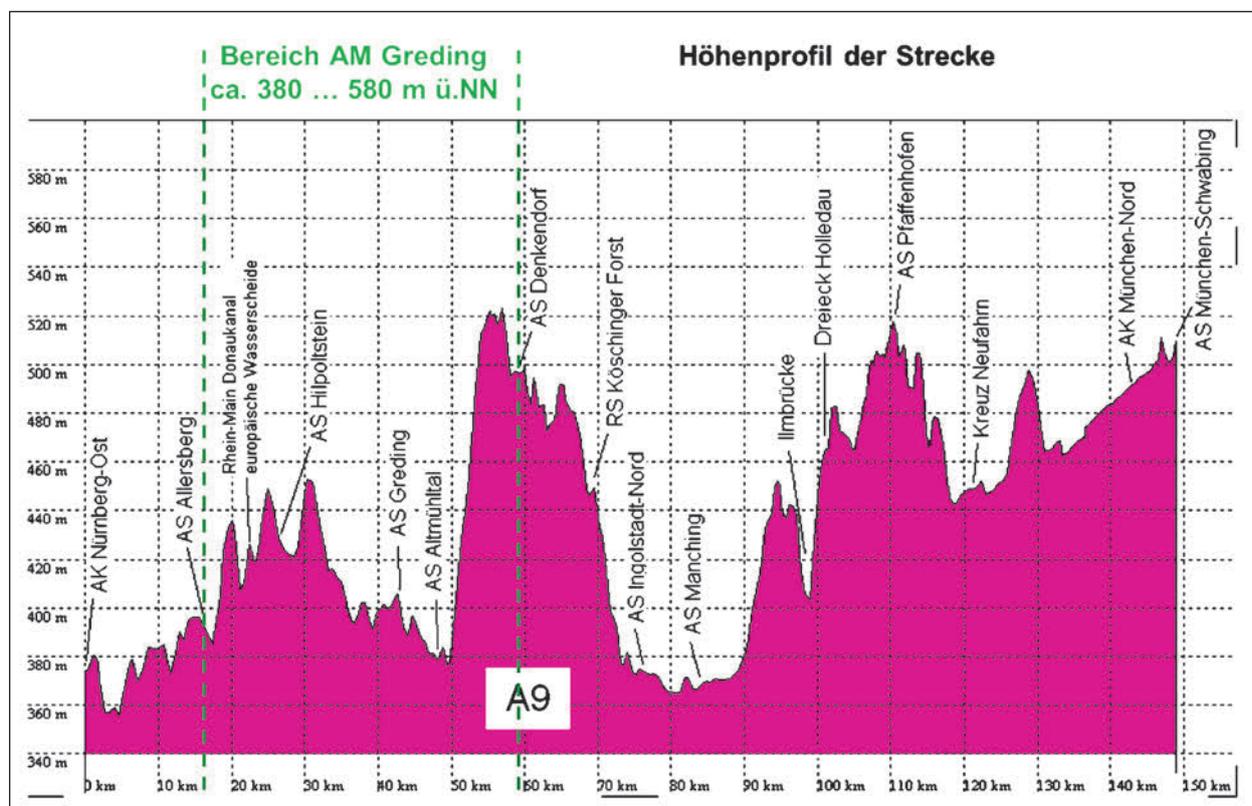


Bild :5 Höhenprofil der A 9 zwischen AK Nürnberg-Ost und AS München-Schwabing mit Markierung der Teststrecke zwischen Stammham und Allersberg. Die Teststrecke führt durch das Altmühltal (Quelle: Autobahnatlas)

Teststrecke ID: 11'xxxxxx (Fahrtrichtung Nord/
Nürnberg Nbg)

KILOMTR: 455,220 ... 397,400 km

Segmentlänge: const. 20 m

Positionen der GMA SWIS BAB im Streckenmodell

RWIS Gelbsee P438 an RSEG_ID:
11000634, 442,560 km

RWIS Offenbau P423 an RSEG_ID:
11002145, 412,340 km

RWIS Allersberg P338 an RSEG_ID:
11002888 397,480 km

Bild 7 zeigt einen Ausschnitt aus dem Streckenmodell mit den Referenzpunkten im Bereich Gelbsee.

Das digitale Streckenmodell „Digmodel_Route_A9_Stammham-Allersberg“ ist in Dateiformat CSV auf dem FTP Projektserver hinterlegt. Die reinen geogr. Daten mit RSEG_ID's und KILOMTR steht auch im Dateiformat GPX zur Verfügung.



Bild 6: Streckenverlauf Teststrecke A 9 Länge jeweils in eine Richtung ca. 50 km (Quelle: Website ABDN)



Bild 7: (Zoom-)Auszug aus dem Streckenmodell im Bereich der Station Gelbelsee mit Markierung der Referenzpunkte für die Streckensegmente. RSEG_ID und KILOMTR. (Bitte beachten die Kilometerangabe im Modell stimmt nicht mit den offiziellen Betriebskilometer überein). (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020))

5.1.2 Streckenmodell Teststrecke 1 A 9 Greding FR Mnch (Süd)

Anzahl der Streckensegmente: 2.898

RSEG_ID's: 12'000001 ... 11'002898

Teststrecke ID: 12'xxxxxx

(Fahrtrichtung Süd/München Mnch)

KILOMTR: 397,420 ... 455,340 km

Segmentlänge: const. 20 m

Bild 7 zeigt einen 2. Auszug der Referenzpunkte auf der Satellitenkarte im Bereich Raststätte Gelbelsee.

5.2 Teststrecke 2 St2139 Viechtach

Die Teststrecke liegt im Betreuungsbereich der SM Viechtach und reicht von der Straßenkreuzung Prof.-Hermann-Staudinger-Str. bis Ortsanfang Grün – siehe Übersichtskarte (Bild 8).

Die Strecke ist ca. 14 km lang, mit einer für meteorologische Verhältnisse abwechslungsreichen Topografie. Der Höhenunterschied beträgt insgesamt ca. 400 m, mit höchster Stelle auf 901 m ü. NN. Bei der Teststrecke wird nur ein Streckenmodell erzeugt, welches für beide Fahrrichtungen gilt. Die Strecke ist eine Bayerische Staatsstraße mit je einem Fahrstreifen pro Fahrtrichtung, ohne bauliche Fahrtrichtungstrennung.



Bild 8: Übersichtskarte Teststrecke 2 Viechtach-Grün im Bereich der SM Viechtach (Tool: MS MapInfo)

Auf der Strecke befindet sich ungefähr an der höchsten Stelle eine Straßenwetter-Station (Name: Predigtstuhl, DWD Kennung: P471). Die Anlage ist mit einer Höhe von 901 m ü. NN angegeben. Näheres über die stationäre Messstelle ist in Kapitel 6.1 näher beschrieben.

5.2.1 Streckenmodell Teststrecke 2 St2139 Viechtach – Grün (beide FR)

Anzahl der Streckensegmente: 723

RSEG_ID's: 20'000001 ... 20'000723

Teststrecke ID: 20'xxxxxx

(Fahrtrichtung Nord/Nürnberg Nbg)

KILOMTR: 00,000 ... 14,420 km

Segmentlänge: const. 20 m.

Positionen der GMA SWIS Bayern im Streckenmodell

RWIS Predigtstuhl P471 an RSEG_ID: 20'000482, 9,610 km.

Die Spur der Referenzpunkte verläuft überwiegend auf dem Fahrstreifen in Fahrtrichtung Grün und dort eher in der rechten Hälfte (siehe Bild 10 und Bild 11).

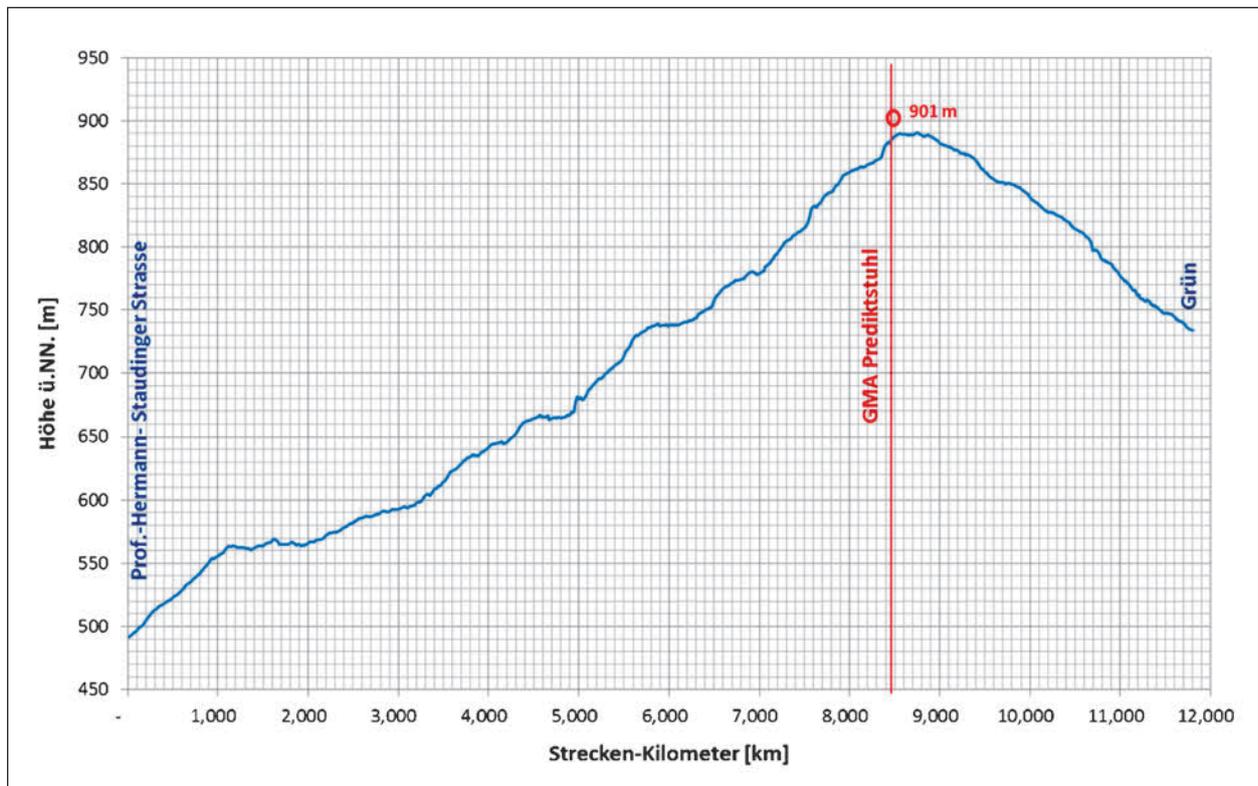


Bild 9: Höhenprofil der Teststrecke 2 St2139 Viechtach-Grün. Gemessen mit IceCar4 (GPS miniIPAD)

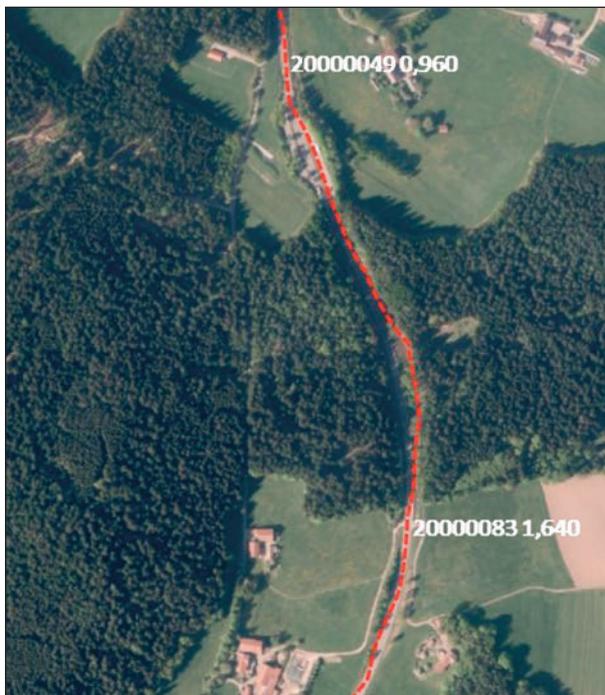


Bild 10: (Zoom) Auszug aus den Referenzpunkten der Teststrecke 2 St2139 auf der Satelliten-Karte (Tool: GeoBasis DE/BKG(2020)). Mit RSEG_ID und KILOMTR



Bild 11: (Zoom) Weiterer Auszug aus den Referenzpunkten des Streckenmodells St2139 auf der Satelliten-Karte (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020)). Die Punkte liegen in der rechten Hälfte des Fahrstreifens Richtung Grün. Angaben mit RSEG_ID und KILOMTR

5.3 Teststrecke 3 BAST A 4 AS Bensberg – AK Olpe

Die Teststrecke ist ca. 55 km lang, befindet sich auf der BAB A 4 (Bild 12) und reicht von der AS Bensberg bis zum AK Olpe. Außerdem befindet sich das Testfeld für Straßenwetter-Sensoren auf der Teststrecke. Es handelt sich um eine BAB und hat deshalb eine bauliche Trennung der Richtungsfahrbahnen und wird im Streckenmodell und im Rahmen des Projekts getrennt nach Fahrtrichtung betrachtet.

Das Höhenprofil der Strecke reicht von 100 – 470 m ü. NN, ein Höhenunterschied von 370 m (Bild 13). Auf der Strecke befinden sich neben dem BAST

Testfeld fünf weitere stationäre Straßenwetter-Messstellen (SWIS BAB GMA). Nähere Erläuterungen zu den stationären Messstellen finden sich im Kapitel 6.1.

5.3.1 Streckenmodell Teststrecke 3 A 4 BAST FR Olpe

Anzahl der Streckensegmente: 4086

RSEG_ID's: 31'000001 ... 31'004086

Teststrecke ID: 31'xxxxxx (Fahrtrichtung Ost/Olpe)

KILOMTR: 91,500 ... 173,200 km

Segmentlänge: const. 20 m



Bild 12: Übersicht Verlauf der Teststrecke 3 BAST (Tool: GeoBasisDE/BKG(2020))

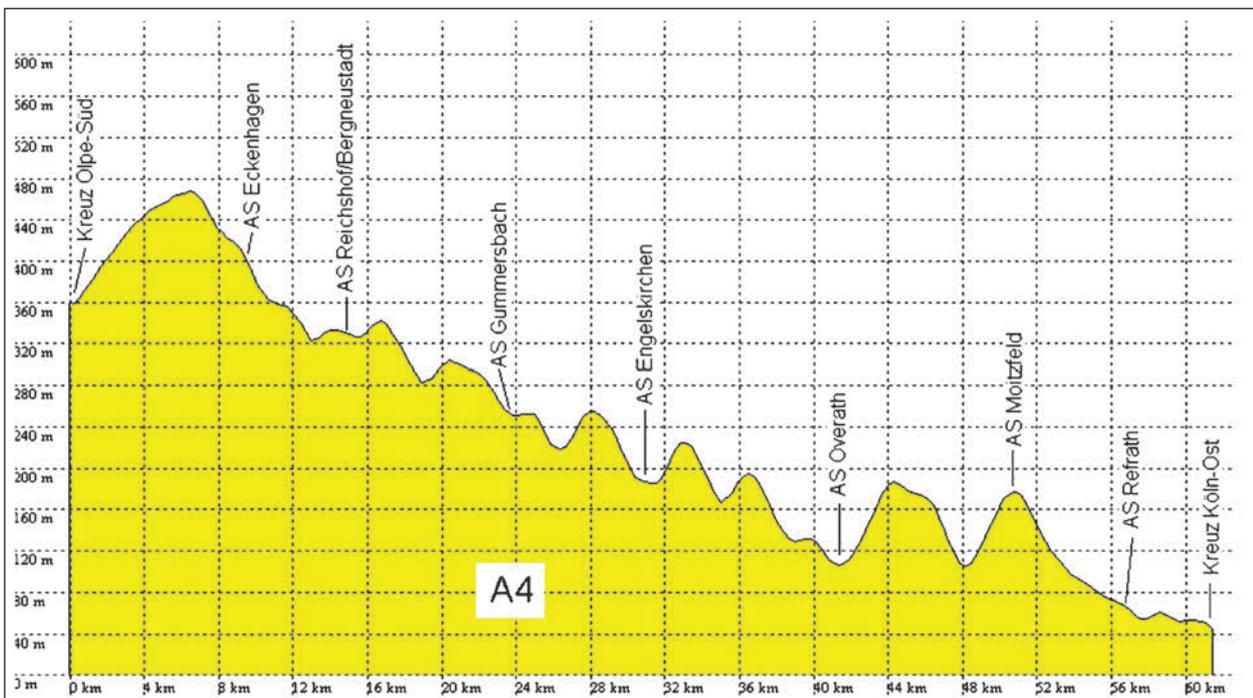


Bild 13: Höhenprofil der Teststrecke 3 BAST (Quelle: Autobahnatlas)



Bild 14: (Zoom) Ausschnitt als Beispiel aus den Referenzpunkten der Straßensegmente der Teststrecke 3 A 4 BAST in FR Olpe mit Angabe der RSEG_ID und KILOMTR (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020))



Bild 15: (Zoom) Ausschnitt als Beispiel aus den Referenzpunkten der Straßensegmente der Teststrecke 3 A 4 BAST in FR Köln mit Angabe der RSEG_ID und KILOMTR (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020))

Positionen der GMA SWIS BAB im Streckenmodell

RWIS Moitzfeld H746 an RSEG_ID: 31000226, 96,000 km,

RWIS Engelskirchen H754 an RSEG_ID: 31001586, 123,200 km,

RWIS Eckenhagen H775 an RSEG_ID: 31003415, 159,780 km.

Die Spur der Referenzpunkte befindet sich auf dem rechten Fahrstreifen (Hauptfahrstreifen) und dort in der rechten Hälfte. Bild 14 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus dem Streckenmodell in der Satelliten-Karte.

5.3.2 Streckenmodell Teststrecke 3 A 4 BAST FR Köln

Anzahl der Streckensegmente: 4118

RSEG_ID's: 32'000001 ... 32'004118

Teststrecke ID: 32'xxxxxx (Fahrtrichtung West/ Köln)

KILOMTR: 146,300 ... 63,960 km

Segmentlänge: const. 20 m

Positionen der GMA SWIS BAB im Streckenmodell

RWIS Moitzfeld H746 an RSEG_ID: 32003868, 68,960 km

RWIS Engelskirchen H754 an RSEG_ID: 32002507, 96,180 km

RWIS Wiehthalbrücke H765 an RSEG_ID: 32002026, 105,800 km

RWIS Reichshof H774 an RSEG_ID: 32000519, 135,940 km

RWIS Eckenhagen H775 an RSEG_ID: 32000680, 132,72 km

RWIS Testfeld BAST an RSEG_ID: 32004045, 65,420 km

6 Datenerfassung

Eine Übersicht der für das Projekt vorgesehenen Datenerfassungen ist in Tabelle 12 zusammengefasst.

Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass Stammdaten, welche die konstruktiven Eigenschaften der Straße (Längs-, Querneigung, Belagsart etc.) und deren Umgebung (Bebauung, Bewuchs etc.) beschreiben, für die Optimierung und kleinräumige Prognose wichtig sind. Abgesehen von der Tatsache, dass diese Daten nur sehr schwer und unvollständig in verwertbarer Form verfügbar sind, scheint mittlerweile erwiesen, dass die für die Glättevorsage relevanten Auswirkungen dieser Eigenschaften auch durch die mobilen Messungen, einschließlich der thermischen Kartierung und Strahlungsmessung, ausreichend identifiziert und beschrieben werden können.

Höhenprofile konnten ohne weiteres im Rahmen der mobilen Messfahrten aus GPS Daten mit aufgenommen werden. Die Genauigkeiten sind für diese meteorologische Fragestellung ausreichend. Was die digitale Streckenkarte angeht, wurde ein eigenes Streckenmodell mit Streckensegmenten konstanter Länge, abgeleitet aus den GPS Daten der Messfahrten erstellt. Mehr Details sind in Kapitel 3.3 und unter Kapitel 5 beschrieben.

Statische Stammdaten	
Höhenprofil auf Knoten bezogen Höhe ü. NN.	Eigene GPS Messungen und Daten der Straßenbauverwaltung
Stammdaten der stationären Messstellen (Höhe, Lage, Ausstattung)	Von Straßenbauverwaltungen, DWD
Konstruktive Merkmale der Strecke wie Belagsart, Längs- und Querneigung etc.	Von der Straßenbauverwaltung
Thermale Kartierung und Beschattung (Aperture) der Teststrecken	Im Rahmen des Projektes durch gezielte Messfahrten mit eigenen Fahrzeugen erfasst
Dynamische Messdaten	
Daten von stationären Glättemeldeanlagen auf den Teststrecken Min. 15 Min. Erfassungsintervall	Im SWIS BAB von DWD online 15min ggf. direkt aus den Systemen der Anwender per Datenexport online oder offline, Intervall 2 ... 15 Min.
Daten von mobilen Sensoren auf Einsatzfahrzeugen während aller Einsatzfahrten auf den Teststrecken. Erfassungsintervall 1 sec.	Datenerfassung über Cloud-Server via Mobilfunknetz von allen ausgerüsteten Einsatzfahrzeugen
Dynamische Glättevorhersagen	
Auf GMA-Standorte bezogen Glättevorhersagedaten. Aktualisierungsintervall ca. 1h ... 3h, Horizont min. 90 Min. u. mehr	Verschiedene Anbieter, DWD online oder offline und Archivierung
Auf kleinräumige Streckenabschnitte bezogene Glättevorhersagen alle 1h mit Horizont 90 Min. und mehr	Verschiedene Anbieter, online oder offline und Archivierung

Tab. 12: Übersicht über die vorgesehene Erfassung der Daten im Projekt

Die Niederschlagsradardaten wurden im Projekt nicht archiviert, da es keine Hinweise gab, dass die Radarbilder von hinreichendem Nutzen sind, zumindest nicht für mittel- bis langfristige Vorhersagen.

6.1 Stationäre Straßenwetterdaten

Die geografischen Positionen der Messstellen für Straßenwetter (statische Stammdaten) stammen vom DWD und von den Straßenbauverwaltungen Autobahndirektion Nordbayern, Zentralstelle für den Betriebsdienst. Dabei hat sich gezeigt, dass die geogr. Koordinaten teilweise erheblich von der tatsächlichen Lage abweichen, teilweise bis zu 1 km. Insbesondere an der A 4 hat die BAST bei einem Ortstermin die Daten noch einmal überprüft und korrigiert. Eine Übersicht der im Bereich der Teststrecken befindlichen Messstellen zeigt die Tabelle 13.

Im Folgenden ist jeweils die Lage der auf den Teststrecken befindlichen Messstationen genauer beschrieben. Eine ausführliche Diskussion über die Bedeutung, Unsicherheit und Zuverlässigkeit der wichtigsten im Rahmen von SWIS- und Umfeldaten-Stationen erfassten Messgrößen findet sich in [29] und in [27], weshalb in diesem Bericht darauf verzichtet wird.

6.1.1 Lage der stationären Messstellen auf der A 9 Greding

Bild 16 bis Bild 18 zeigen die drei Glättemeldeanlagen in Fahrtrichtung Nord bzw. Nürnberg. Es werden pro GMA aus dem SWIS über DWD jeweils die Daten einer Bodensonde archiviert. Bei einer genaueren Untersuchung vor Ort im Juli 2016 wurde festgestellt, dass die Zuordnung der Fahrbahnsonden zu den Fahrstreifen und Richtungsfahrbahnen, insbesondere an der Station Gelbensee nicht dem entspricht, was beim Betriebsdienst angenommen wurde. Da ohnehin geplant war, neue SWS zu errichten an den Standorten Offenbau und Gelbensee, wurden die weiteren Auswertungen auf die neuen Sensoren konzentriert.

Zu Kontrollzwecken wurden von der ABDN/ZSB die Daten direkt aus dem System zu Verfügung gestellt, sodass die Daten aller Sensoren verfügbar waren.

6.1.2 Neubau SWS an Offenbau und Gelbensee A 9 Greding

Die alten SWIS GMA liefern an der Teststrecke A9 Greding generell keine Wasserfilmdicken und auch keine Niederschlagsintensitäten. Diese Daten sind allerdings als Referenz für die Auswertung streckenbezogenen Eigenschaften von großer Wichtigkeit. Auf Initiative des Forschungsnehmers wurden

Kennung	GMA-Name	Land	Einrichter Gesamtanlage Hersteller/Bodensonde	Straße/Fahrtrichtung	Streckenkilometer 100 m	Breite (Dezimalangabe)	Länge (Dezimalangabe)	Höhe in m über NN	F&E Teststrecke
--	Testfeld BAST	NW	MickS/Lufft	A004W	?	50,950169	7,142667	99	A4_BAST
H746	Moitzfeld AS	NW	MickS	A004x	949	50,955556	7,173333	161	A4_BAST
H754	Engelskirchen EM	NW	MickS	A004x	1.135	50,982222	7,400278	222	A4_BAST
H765	Wiehlalbruecke	NW	MickS	A004x	1.198	50,974444	7,484444	210	A4_BAST
H774	Reichshof	NW	Boschung	A004W	1.394	50,973889	7,747778	445	A4_BAST
H775	Eckenhagen	NW	MickS	A004x	1.373	50,968611	7,720556	422	A4_BAST
P338	Allersberg	BY	Boschung	A009N	3.974	49,252220	11,230000	390	A9_Greding
P423	Offenbau	BY	Boschung	A009N	4.113	49,129170	11,274440	455	A9_Greding
P438	Gelbelsee	BY	Boschung	A009S	4.365	48,953330	11,432220	521	A9_Greding
P471	Predigtstuhl	BY	MickS/Lufft	St2139	?	49,005895	12,834133	901	Viechtach

Tab. 13: Liste der SWIS BAB GMA bzw. Straßenwetterstationen im Bereich der im Projekt bearbeiteten Teststrecken. Grün markierte Felder sind gegenüber den offiziellen Angaben korrigierte Positionen

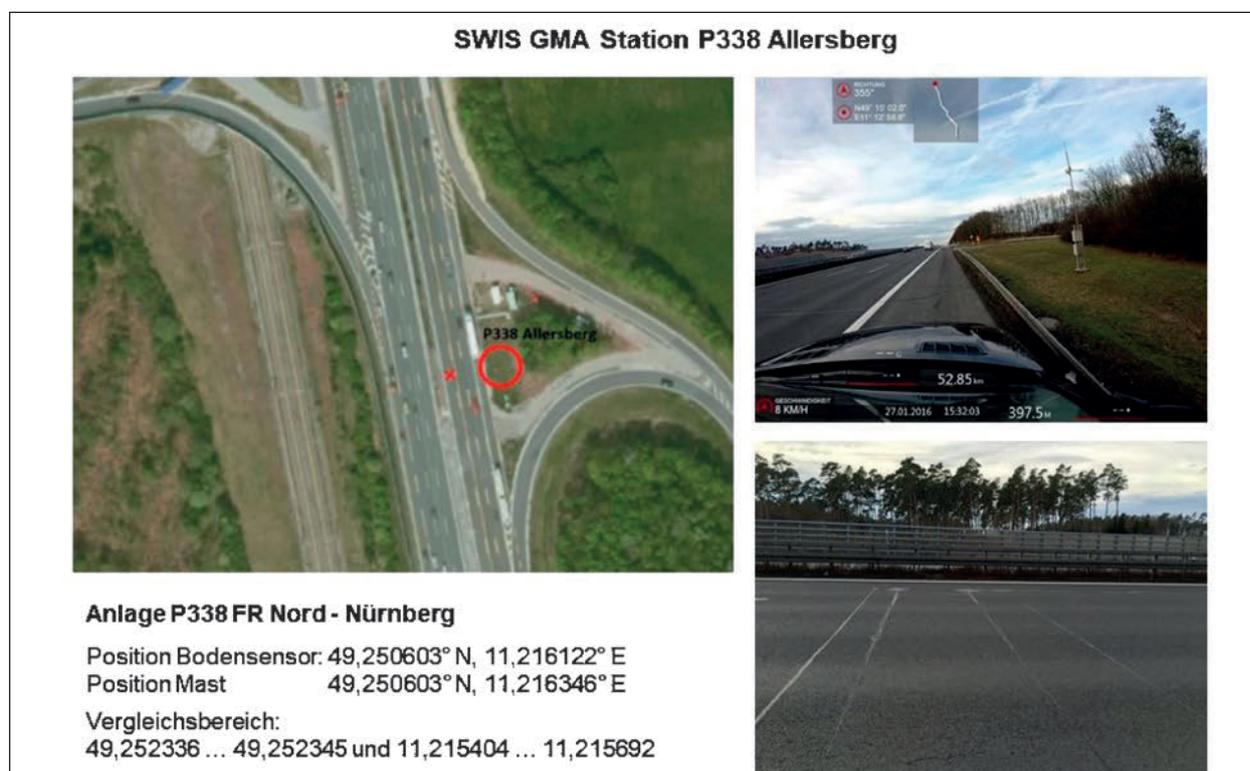


Bild 16: Lage der SWIS Station P338 AS Allersberg in Fahrtrichtung Nord/Nürnberg. Ungefähre Lage von Mast und Bodensonde anhand der Satelliten-Karte (GeoBasis-DE/BKG(2020)). Die Fotos zeigen die Anlage aus Sicht der Kamera bei einer Messfahrt, sowie ein Foto der Bodensonden in der Mitte des äußersten linken Fahrstreifens (Fotos: Karl Schedle)

SWIS GMA Station P423 Offenbau



Anlage P423 FR Nord - Nürnberg

Position Bodensensor: 49,131898° N, 11,271016° E

Position Mast 49,131939° N, 11,271229° E

Vergleichsbereich:

49,131805 ... 49,131988 und 11,270895 ... 11,271246

Bild 17: Lage der SWIS Station P423 Offenbau in Fahrtrichtung Nord/Nürnberg. Ungefähre Lage von Mast und Bodensonde anhand der Satelliten-Karte (GeoBasis-DE/BKG(2020)). Die Fotos zeigen die Anlage aus Sicht der Kamera bei einer Messfahrt, sowie ein Foto der Bodensonden in der Mitte des äußersten linken Fahrstreifens (Fotos: Karl Schedler)

SWIS GMA Station P438 Gelbelsee



Anlage P438 FR Nord - Nürnberg

Position Bodensensor: 48,952694° N, 11,429827° E

Position Mast 48,952771° N, 11,430024° E

Vergleichsbereich:

48,952600 ... 49,952832 und 11,429612 ... 11,430108

Bild 18: Lage der SWIS Station P438 Gelbelsee in Fahrtrichtung Nord/Nürnberg. Ungefähre Lage von Mast und Bodensonde anhand der Satelliten-Karte (GeoBasis-DE/BKG(2020)). Die Fotos zeigen die Anlage aus Sicht der Kamera bei einer Messfahrt, sowie ein Foto der Bodensonden in der Mitte des äußersten linken Fahrstreifens (Fotos: Karl Schedler)

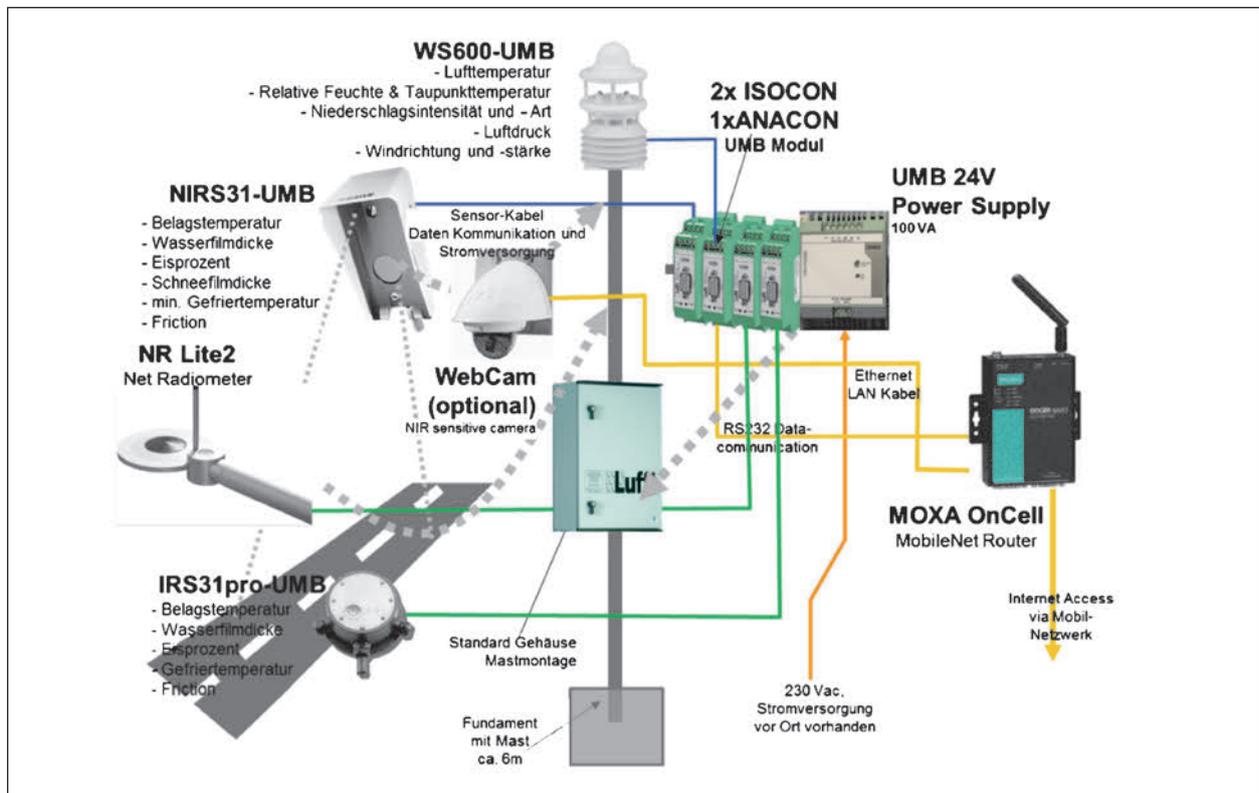


Bild 19: Konzept für die Erweiterungs-Messstellen Offenbau II und Gelbelsee II auf der A 9 Greding



Bild 20: Ansicht der Stationen in Offenbau II (links) und Gelbelsee II (rechts). (Fotos: Karl Schedler)

zwei neue Messstellen in Offenbau II und Gelbelsee II aufgestellt (siehe Bild 19, Bild 20).

6.1.3 Daten der bestehenden stationären Messstellen auf der A 9 Greding

Die Daten aller Bayerischen SWIS BAB Glättemeldeanlagen werden durch einen Script auf dem Projekt-Server des AN aus dem GDS Server des DWD jeweils einmal pro Tag abgeholt, zusätzlich mit einem eindeutigen Dateinamen versehen und im Bereich \DWD\GMA\... abgelegt.

Die Daten der drei GMA im Bereich der Teststrecke 1 A 9 Greding sind in den Dateien des DWD enthalten. Die Nomenklatur und Formate sind folgendermaßen:

GDS\FTP-Bereich:
GDS\OBS\GMA\...

Filename:
YSH_FN<DDhhmm> (keine Extension),

Aktualisierungsintervall: 15 min,

Archivierungsbereich: ..\DWD\GMA\...

Filename bei Archivierung:
YSH_FN_<YYYYMMDDhhmm> (keine Extension),

Zeitzone: UTC,

Datenformat:
ASCII Textdatei im SH10-Schlüssel.

Im Dateinamen wird generell zur Kennzeichnung der SH10-Schlüssel „YSH“ verwendet, gefolgt vom Kürzel für die Datenquelle: „FN“ steht für Bayern, Zentrale Freimann. Danach ist lediglich der Tag im Monat „DD“ und die Uhrzeit in „hh:mm“ Stunden und Minuten angegeben. Vor der Archivierung wird der Name auf dem Projektserver des AN so geändert, dass er eindeutig wird. Es wird daraus ein vollständiger Datums- und Zeit-Stempel erzeugt in der

Form „YYYYMMDDhhmm“ ohne Trennzeichen. „YYYY“ steht für Jahreszahl, „MM“ für Monat. Die Archivierung erfolgt im Originalen SH10-Schlüssel (Definition siehe [31]).

Die Originaldateien von einem bestimmten Zeitraum im SH10 Schlüssel werden dann beim AN über eine Konvertierungs-Software im Batchbetrieb (SH10csvDecoder) zu einer ASCII-Text-Datei im CSV Format migriert. Danach werden die betreffenden Messstellen nach DWD-Kennung herausgefiltert und in jeweils eine Datei über den entsprechenden Zeitraum zur weiteren Auswertung gespeichert.

Benennung der Dateien:

GMA_<SWIS_ID>_A9_Greding_<AnfangsDatum>_<Enddatum>.csv

„<SWIS_ID>“ steht für P338, P423 und P438 und „<AnfangsDatum>“ im Format JJMMDD ist das Anfangsdatum des konvertierten Zeitraums und „<Enddatum>“ bezeichnet das Enddatum des Zeitraums. Die Datums-Angaben sind mit zweistelligen Jahreszahlen belegt. Tabelle 14 zeigt die Struktur der Datentabelle in der CSV Datei.

Leider werden in allen drei Messstellen die Wasserfilm-Daten nicht in verwertbarer Weise gemessen. Der Hersteller ist in allen drei Messstellen derselbe (manufacturer = 2 = Boschung).

Grundsätzlich sind zeitliche Auflösung und vor allem der Umfang der zum DWD gemeldeten Daten erheblich eingeschränkt. Daher wäre es von Vorteil, die Daten direkt aus dem Archiv der SWIS-Rechnerzentrale zu erhalten. Das gestaltet sich aber schwierig, weil der Nutzer der Anlage nicht in der Lage ist, ohne kostspielige Unterstützung des Herstellers der Zentrale, einen Datenbankauszug in einem gängigen Datenformat zu erstellen. Die ABDN/ZSB hat es schließlich dankenswerter Weise noch vor der Winterperiode 16/17 möglich gemacht, die Daten direkt aus dem System in monatlichen Rhythmus zu exportieren, die zu Kontrollzwecken hilfreich waren. Die Ausprägungen (Enumerations) der Zustandsgrößen sind in Tabelle 15 bis Tabelle 17 aufgeführt.

Datenfeld Legende	Abk.	Einheit	Allersberg	Offenbau	Gelbensee
swisUnitId	SWIS ID	XXXXX	DWFN	DWFN	DWFN
stationId	DWD_Kenn	X999	P338	P423	P438
dateTime	DateTime	TT.MM.JJJJ hh:mm	X	X	X
airTemperature	AT	°C	X	X	X
dewpointTemperature	DPT	°C	X	X	X
visibility	VIS	m	--	--	--
windDirection	WD	Decagrad	--	X	X
windSpeed	WS	m/s	--	X	X
precipitationType	TOP(SH10)	enum	X	X	X
precipitationHeight	AOP(SH10)	mm/15min	--	--	--
precipitationIntensity	ICOP(SH10)	enum	X	X	X
surfaceTemperatureA	RST.A	°C	X	X	X
surfaceTemperatureB	RST.B	°C	--	--	--
undergroundTemperatureA	SST.A	°C	X	X	--
undergroundTemperatureB	SST.B	°C	--	--	--
waterfilmThickness	WFD	mm	--	--	--
waterfilmThicknessClass	WFD_Class	enum	--	--	--
manufacturer	Manu	enum	2	2	2
status	status	enum	X	X	X
roadCondition	RSC(SH10)	enum	X	X	X

Tab. 14: Datentabelle der aus dem SH10-Schlüssel konvertierten CSV Dateien. Außerdem ist für jede GMA gekennzeichnet, welche Datentypen jeweils unterstützt werden

enum TOP(SH10)		
Niederschlagsart		
Bezeichnung	Code	Description
kein Niederschlag	0	no Precip.
Niederschlag/Regen	1	rain
Schneeregen	2	rain/snow
Schnee	3	snow

Tab. 15: Liste der verwendeten Codierung der Ausprägungen für die Zustandsgröße (TOP) „Niederschlagsart“

enum RSC(SH10)		
Fahrbahnoberflächenzustand		
Bezeichnung	Code	Description
Trocken	0	dry
Feucht	1	damp
Nass	2	wet
Reif	3	Horrfrost
Schnee	4	snow
Eis	5	ice

Tab. 16: Liste der verwendeten Codierung der Ausprägungen für die Zustandsgröße (RSC) „Fahrbahnoberflächenzustand“

enum ICOP(SH10)		
Niederschlagsintensitätsklasse		
Bezeichnung	Code	Description
kein	0	no precip.
leicht	1	light
mäßig	2	moderate
stark	3	strong

Tab. 17: Liste der verwendeten Codierung der Ausprägungen für die Zustandsgröße (ICOP) „Niederschlagsintensitätsklasse“

6.1.4 Daten der neuen stationären Messstellen auf der A 9 Greding

Die Stationen bieten erheblich mehr an Messgrößen als dies bei bestehenden Anlagen der Fall war. Die Position der Sensorik auf den Fahrstreifen für den Straßenzustand ist auch genau bekannt. Sowohl der eingebaute Sensor (passiver Straßensensor) als auch der berührungslos messen in etwa in der Mitte des rechten Fahrstreifens (Lastfahrstreifen).

Die Liste der erfassten Daten ist in Tabelle 19 wiedergegeben. Sie zeigt Erläuterung zur Kodierung

enum NS (TLS)		
Bezeichnung	Code	Description
kein Niederschlag	0	no Precip.
Niederschlag aller Art	40	unspec. precip
Regen (flüssiger Niederschlag)	60	rain
Schnee (gefrorener Niederschl.)	70	snow

enum FBZ(IRS) – Fahrbahnzustand (eingebaut) Road Surface Condition (embedded)

Bezeichnung	Code	Description
Trocken	10	dry
Feucht	15	damp
Nass	20	wet
Feucht mit Salz	25	chemical damp
Nass mit Salz	30	chemical wet
Eis	35	Ice
Schnee	40	snow
Frost/Reif	45	hoarfrost

enum FBZ(NIRS) – Fahrbahnzustand (opt. berührungslos) Road Surface Condition (optical remote)

Bezeichnung	Code	Description
Trocken	0	dry
Feucht	1	damp
Nass	2	wet
Eis	3	Ice
Schnee/Eis	4	snow/ice
Nass mit Salz	5	chemical wet
Kritisch Nass	6	critically wet
Schnee	8	Snow
Undefiniert	99	undefined

Tab. 18: Erläuterung zu den Ausprägungen der Kodierung (enum = Enumerations) von Niederschlagsart, Straßenzustand (RSC = Road Surface Condition) des eingebauten Sensors und des optischen berührungslosen Sensors (optical remote)

der Ausprägungen zu den Zustandsgrößen Niederschlagsart und Straßenzustand.

Die Anlagen gingen ab 13. Dezember 2016 in Betrieb und werden im Rhythmus von 1 Minute abgefragt. Kamerabilder werden alle 10 Minuten erfasst. Die Daten werden täglich an den Projektserver per FTP übertragen und dort archiviert.

Die Datendateien sind in CSV-Format (Textdatei ASCII) und die Kamerabilder in JPG-Bildformat.

Gerät	Messwert Beschreibung	Einheit	FBS	DE
WS600	Lufttemperatur	°C	WS	LT
WS600	Taupunkttemperatur	°C	WS	TPT
WS600	Niederschlagsintensität	mm/h	WS	NI
WS600	Niederschlagsart	enum	WS	NS
WS600	Luftdruck	hPa	WS	LD
WS600	Relative Luftfeuchte	%	WS	RLF
WS600	Windrichtung	°	WS	WR
WS600	Windgeschwindigkeit Mittel	m/s	WS	WGM
WS600	Windgeschwindigkeit Spitze	m/s	WS	WGS
WS600	Feuchtkugeltemperatur	°C	WS	FKT
WS600	Luftdruck abs.	hPa	WS	LD(abs)
WS600	Windrichtung (vektoriell)	°C	WS	WR(vect)
WS600	Kompassrichtung	°	WS	KOMP
WS600	Niederschlagsmenge abs.	mm	WS	NI(abs)
WS600	Niederschlagsmenge diff.	mm	WS	NI(diff)
IRS31p	Fahrhahnoberflächentemperatur (IRS31p)	°C	1	FBT
IRS31p	Gefriertemperatur [NaCl] (IRS31p)	°C	1	GT
IRS31p	Tiefentemperatur 1	°C	1	TT1
IRS31p	Tiefentemperatur 3	°C	1	TT3
IRS31p	FB-Zustand für Winterdienst (IRS31p-TLS)	°C	1	FZW
IRS31p	Restsalz (IRS31p-TLS)	%	1	RS
IRS31p	Wasserfilmdicke (IRS31p-TLS)	mm	1	WFD
IRS31p	Taustoffmenge pro Quadratmeter (IRS31p)	g/m ²	1	TSQ
IRS31p	Schneefilmdicke (IRS31p-TLS)	mm	1	SFD
IRS31p	Wasserfilmdicke (IRS31p)	µm	1	WFDµ
IRS31p	SalzMassenkonzentration [NaCl]	%	1	TSK(mass)
IRS31p	Eisprozent (IRS31p)	%	1	EP
IRS31p	Friction (IRS31p)	--	1	FRIC
IRS31p	Straßenzustand (IRS31p)	enum	1	FBZ(IRS)
NIRS31	Fahrhahnoberflächentemperatur (NIRS)	°C	2	FBT
NIRS31	Mindest-Gefriertemperatur	°C	2	mGFT
NIRS31	Wasserfilmdicke (NIRS)	µm	2	WFDµ
NIRS31	Eisfilmdicke (NIRS)	µm	2	EFDµ
NIRS31	Schneehöhe (NIRS)	mm	2	SFDµ
NIRS31	Eisprozent (NIRS)	%	2	EP
NIRS31	Mindest-Taustoffkonzentration [NaCl]	%	2	mTSK
NIRS31	Friction (NIRS)	--	2	FRIC
NIRS31	Fahrhahnoberflächenzustand (NIRS)	enum	2	FBZ(NIRS)
NIRS31	Lampenstatus	enum	2	LAMPS
NIRS31	Messstatus (NIRS)	enum	2	MESSS
ANACON	Bilanzstrahlung positiv	W/m ²	NR 2L	NR_Ein
ANACON	Bilanzstrahlung negativ	W/m ²	NR 2L	NR_Ab

Tab. 19: Liste der archivierten Daten an den Stationen Offenbau II und Gelbensee II an der Teststrecke A9 Greding. Gelb hinterlegte Felder sind Datentypen, welche nur speziell für das Projekt erfasst worden sind – normalerweise werden im SWIS diese Datentypen nicht verwendet

Die Kameradateien sind folgendermaßen benannt: Kamera_<NameSWS>JJJMMTThhmmss.jpg!

Die Datendatei:

<NameSWS>_(MSSI)JJJMMTThhmmss.csv!

NameSWS ist entweder „Offenbau“ oder „Gelbelsee“ und JJJMMTThhmmss ist der Zeitstempel in UTC, zu dem die Datei erzeugt worden ist.

6.1.5 Lage der stationären Messstelle auf der St2139 Viechtach

Auf der Teststrecke 2 St2139 von Viechtach nach Grün befindet sich eine Straßenwetterstation (P471) in etwa auf der höchsten Stelle am Predigtstuhl (Bild 21). Die Anlage besitzt einen Bodensensor (IRS31 von LUFFT) in etwa in der Mitte des Fahr-

streifens in Fahrtrichtung Grün (Bild 22). An einem ca. 4 m hohen Mast befindet sich ein kompakter Wettersensor (WS600 von LUFFT), außerdem eine IP-Kamera (MOBOTIX) mit IR Empfindlichkeit und IR Scheinwerfer für Nachtbilder.

Weitere Messstellen im Bereich der SM Viechtach befinden sich außerhalb der festgelegten Teststrecke. Die Daten von einigen Messstellen, als da sind „Am Pfahl“, „Rissmansdorf“, „Mais“, „Denkzell“, „Kalteck“ und „Zinzenzell“, wurden vorsorglich mit erfasst und archiviert, da sporadisch das mit einem mobilen Sensor ausgerüstete Fahrzeug auch die übrigen Strecken befahren kann. Die Daten der IP Kamera werden ebenfalls erfasst von der Station Predigtstuhl und auch vorsorglich von der Station Am Pfahl.



Bild 21: Lage der GMA Predigtstuhl P471 auf der St2139 (Bild: SM Viechtach). Ansicht der atmosphärischen Sensoren mit Kamera auf einem Mast am Straßenrand (Foto: Karl Schedler)



Bild 22: Foto der Bodenmessstelle P471 auf der St2139 bei Predigtstuhl. Rechts ein Beispiel für das Kamerabild (Foto: Karl Schedler)

Anlage P471 FR Grün

Position Bodensensor:

49,005789° N, 12,834046° E

Position Mast:

49,005858° N, 12,833986° E

Vergleichsbereich:

49,005687 ... 49,005807 und 12,834009 ...

12,834162

Lage zum digitalen Streckenmodell:

RSEG_ID: 20000482, 9,610 km

6.1.6 Verbesserungen an der SWS Predigtstuhl

An der Teststrecke Viechtach, Station Predigtstuhl waren zwar die Daten relativ plausibel, aber die Verfügbarkeit der Daten lag 2016 leider nur in der Größenordnung 60 %. Grund war eindeutig die Mobilfunkanbindung. Die Messstelle selbst arbeitet zuverlässig. Aus diesem Grund wurde bei der Wartung Anfang September 2016 eine Lang-Yagi Antenne, mit einem Gewinn der ungefähr das 20-fache der bisherigen Antenne besitzt, auf dem Mast installiert und auf die nächste Basisstation



Bild 23: Installierte Antenne für Mobilfunk an der Station Predigtstuhl (Foto: Jimmy Latimer, micKS)

ausgerichtet (Bild 23). Die Verfügbarkeit ist im Winter 2016/17 auf nahezu 100 % angestiegen.

Die eingebaute Fahrbahnsonde wurde im September 2016 gegen eine neue IRS31pro ersetzt, die aber im Kompatibilitätsmodus zur alten IRS31 arbeitet.

6.1.7 Daten der stationären Messstelle auf der St2139 Viechtach

Die Daten werden von dem SV3-Server, der im Auftrag der ABDN/ZSB betrieben wird, über das GPRS eines Mobilfunk-Netzes abgefragt. Das Erfassungsintervall beträgt 10 min. Das gleiche gilt auch für die Kamera-Bilder. Im Auftrag der ABDN/ZSB werden regelmäßig im Erfassungsintervall die Daten der GMA im Bereich SM Viechtach, sowie die Kamera-Bilder von „Predigtstuhl“ und „Am Pfahl“, auf den FTP Projektserver des AN gepusht. Die Daten-dateien enthalten bereits die bearbeitbaren Daten in ASCII Textformat CSV.

Die erfassten Messgrößen und die Struktur der Datentabelle gibt Tabelle 20 wieder. Dazu die Kodie-

Datenfeld_Legende	Abk	Einheit
datum_zeit	DateTime	TT.MM.JJJJ hh:mm
Lufttemperatur	AT	°C
Relative Feuchte	RH	%
Taupunkt	DPT	°C
Niederschlagstyp (TLS)	TOP	enum
Niederschlagsintensität	IOP	mm/h
Luftdruck	AP	hPa
Windrichtung	WD	°
Windgeschwindigkeit m/s	WS	m/s
Windgeschwindigkeit (Spitze) m/s	WSM	m/s
Strassentemperatur	RST	°C
Salzkonzentration	MCoS	%
Gefrierpunkt	FT	°C
Tiefentemperatur -5 cm	SST5	°C
Tiefentemperatur -5...-30 cm	SST30	°C
Strassenzustand (TLS)	RSC	enum
Wasserfilm	WFD	um

Tab. 20: Datentabelle der CSV Dateien der Messstellen aus dem Bereich SM Viechtach

rung der Ausprägungen (Enumerations) zu den Zustandsgrößen Fahrbahnoberflächenzustand (Tabelle 21) und Niederschlagsart (Tabelle 22). Ausge-

enum RSC (TLS)		
Bezeichnung	Code	Description
Trocken	0	dry
alles nicht Trocken (unspezifisch)	1	not dry (unspec.)
Nass	32	wet
Eis/Schnee	64	ice/snow
Schnee	65	snow
Eis	66	ice

Tab. 21: Codierung der Ausprägungen für die Zustandsgröße (RSC) „Fahrbahnoberflächenzustand“

enum TOP (TLS)		
Bezeichnung	Code	Description
kein Niederschlag	0	no Precip.
Niederschlag aller Art	40	unspec. precip
Regen (flüssiger Niederschlag)	60	rain
Schnee (gefrorener Niederschl.)	70	snow

Tab. 22: Codierung der Ausprägungen für die Zustandsgröße „Niederschlagsart“

rechnet diese Messstelle hat im Winter 2015/16 erhebliche Probleme mit der Abdeckung des verwendeten Mobilfunknetzes, sodass nicht unerhebliche Datenverluste aufgetreten sind. Durch die vorbezeichneten Maßnahmen konnte die Verfügbarkeit im Winter 2016/17 erheblich gesteigert werden.

6.1.8 Lage der stationären Messstellen auf der A 4 BAST

Auf der Teststrecke 3 A 4 BAST befinden sich insgesamt 5 Messstellen, die am SWIS BAB angeschlossen sind, welche von dem Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen „Straßen.NRW“ betrieben wird. Außerdem befindet sich das Testfeld für Straßenwetter-Sensorik der BAST ebenfalls im Bereich der Teststrecke. Die folgenden Kartenausschnitte und Fotos zeigen die Standorte der jeweiligen Anlagen (Bild 24 bis Bild 29).

Das Testfeld besteht aus mehreren Anlagen und Sensoren verschiedener Hersteller, die nebeneinander in dem Richtungsfahrtstreifen FR West/Köln eingebaut sind. Im Projekt werden die Daten der Sensoren der Firma mickS/Lufft verwendet.

Die Verortung der Sensoren auf der Teststrecke 3 A 4 BAST im Streckenmodell des Projektes ist in der folgenden Liste aufgeführt (Tabelle 23).

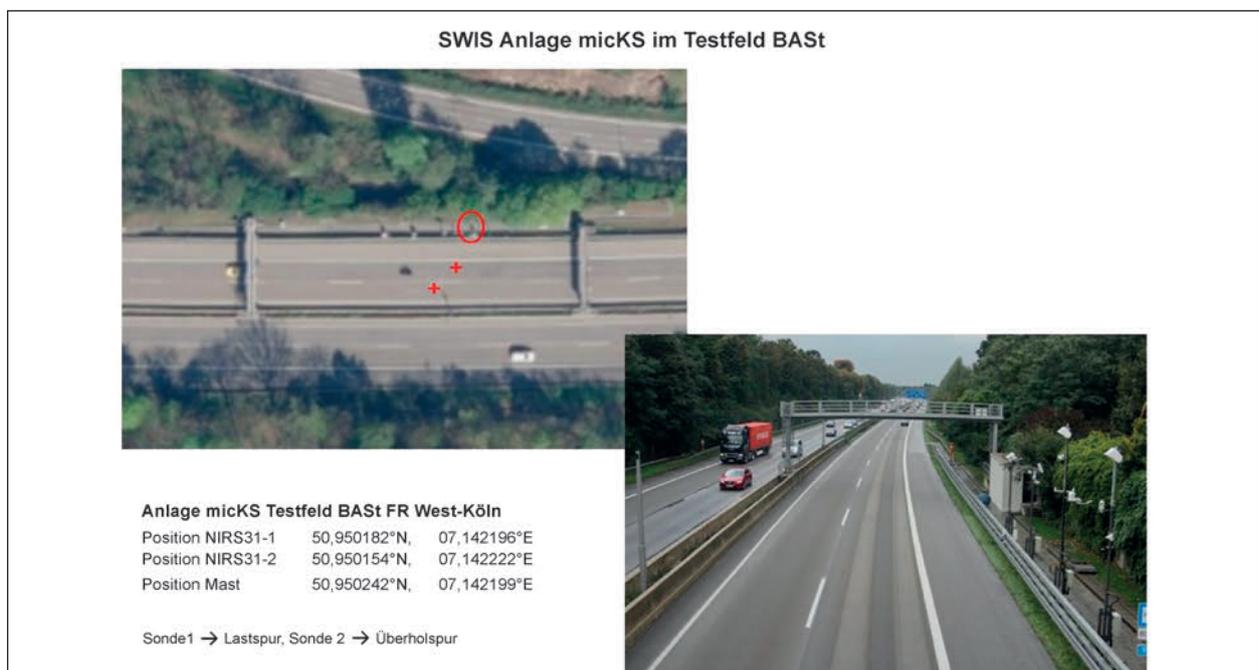


Bild 24: Lage des Testfeldes BAST in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-De/BKG(2020)). Es sind zwei berührungslose Straßenzustands-Sensoren NIRS31 der Firma LUFFT installiert, die auf zwei Fahrstreifen in FR Köln ausgerichtet sind (Foto: BAST)

DWD_ID	Name	FR Ost/Olpe		FR West/Köln	
		RSEG_ID	KILOMTR	RSEG_ID	KILOMTR
--	Testfeld BAST	--	--	32004045	65,420
H746	Moitzfeld AS	31000226	96,000	32003868	68,960
H754	Engelskirchen EM	31001586	123,200	32002507	96,180
H765	Wiehltalbruecke	--	--	32002026	105,800
H774	Reichshof	--	--	32000519	135,940
H775	Eckenhagen	31003415	159,780	32000680	132,720

Tab. 23: Liste der Positionen der GMA im Bereich der Teststrecke 3 A 4 BAST im Streckenmodell mit Angabe der Streckensegment ID (RSEG_ID) und der Modell-Kilometrierung (KILOMTR). Die Segment-Kilometrierung stimmt nicht mit den offiziellen Betriebskilometern überein!

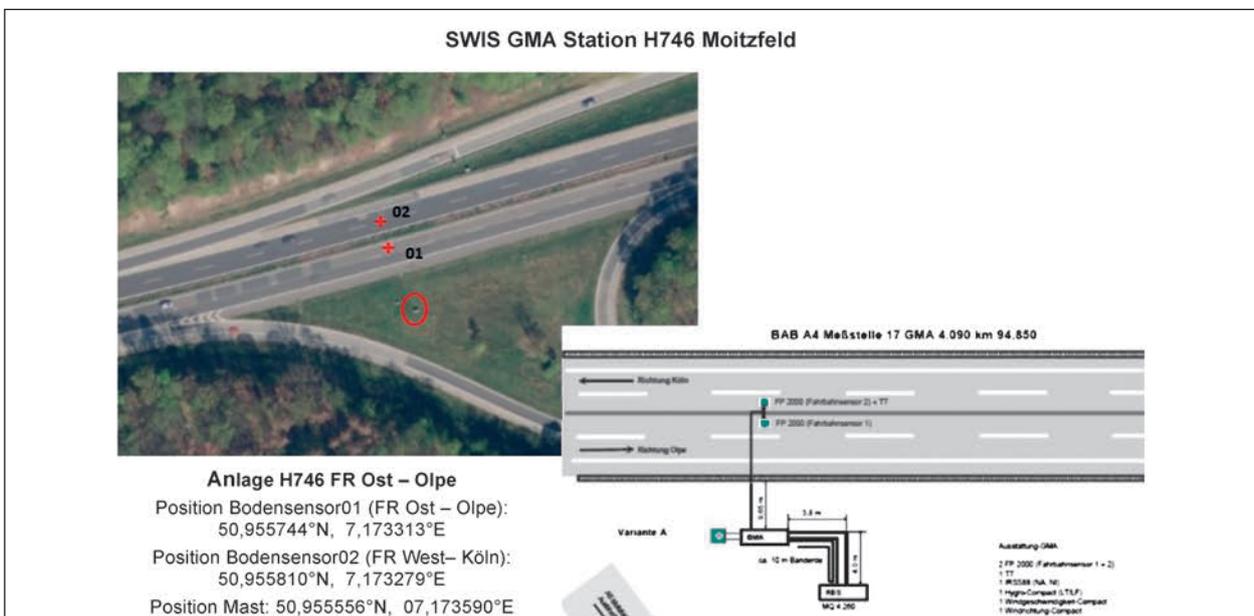


Bild 25: Lage der GMA Moitzfeld H746 in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-De/BKG(2020)). Anlage in FR Ost/Olpe. Je eine Bodensonde in beiden FR jeweils in dem linken äußeren Fahrstreifen



Bild 26: Lage der GMA Wiehltalbrücke H765 in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-De/BKG(2020)). Anlage in FR West/Köln. Eine Bodensonde in FR West/Köln in der Mitte des linken äußeren Fahrstreifens (Foto: BAST)



Bild 27: Lage der GMA Engelskirchen H754 in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-De/BKG(2020)). Anlage in FR West/Köln. Je eine Bodensonde in beiden FR jeweils in dem linken äußeren Fahrstreifen (Fotos: BAST)



Bild 28: Lage der GMA Reichshof H774 in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-De/BKG(2020)). Anlage in FR West/Köln. Eine Bodensonde in FR West/Köln in der Mitte des linken äußeren Fahrstreifens (Foto: BAST)

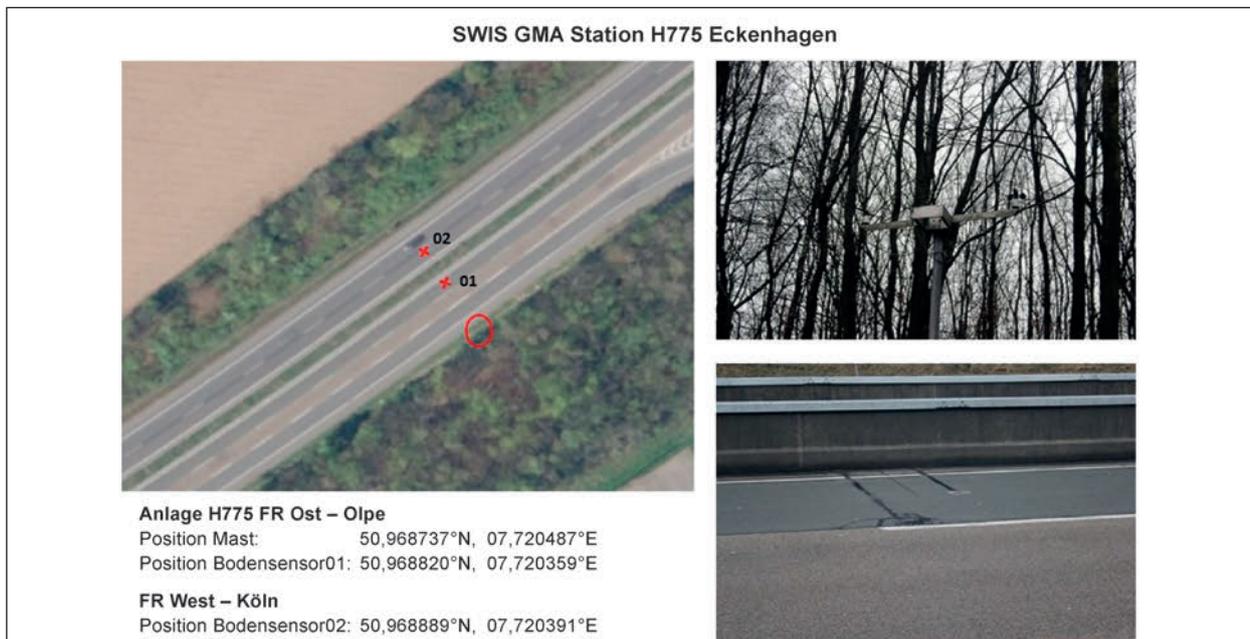


Bild 29: Lage der GMA Eckenhagen H775 in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-De/BKG(2020)). Anlage in FR Ost/Olpe. Je eine Bodensonde in beiden FR jeweils in der Mitte des linken äußeren Fahrstreifens (Foto: BAST)

6.1.9 Daten der stationären Messstellen auf der A 4 BAST

Die Daten der SWIS GMA werden aus dem Bereich der SWIS Zentrale Kamen über den GDS Server des DWD bereitgestellt. Diese Datendateien werden täglich über einen Script vom Projekt-Server des AN über FTP abgeholt und auf dem Projekt-Server archiviert. Die Datendateien der Zentrale Kamen werden in binärer Form gemäß BUFR kodiert. Eine Spezifikation des Formats findet sich in [32].

Da die Dekodierung des komplexen Formats mit erheblichem Aufwand verbunden gewesen wäre und zudem die zeitliche Auflösung und vor allem der Datenumfang auf dem GDS erheblich eingeschränkt ist, konnte auf Anforderung der BAST von Straßenbetrieb.NRW ein Export der Daten direkt aus der SWIS Rechnerzentrale Offline zur Verfügung gestellt werden – allerdings nur für den Zeitraum Nov. 2015 – März 2016.

Auf dem AN-Projektserver archivierte Dateien aus dem GDS Server (DWD) haben folgende Benennung:

swis2-ISXD70_DWKM_<DDhhmm>-<YYMMDDhhmm>-NW---bin

wobei <DDhhmm> das Tagesdatum (2-stellig) und Stunde:Minute bedeutet, danach eindeutiges Datum und Uhrzeit <YYMMDDhhmm> mit 2-stelliger

Pos	Datenfile_Legende	Erläuterung
1	long_time_slot	Unix Zeitstempel Slot
2	time_slot	Datum & Uhrzeit DD.MM.YYYY hh:mm
3	long_time	Unix Zeitstempel
4	time_stamp	Datum & Uhrzeit DD.MM.YYYY hh:mm
5	val_<Sensor_ID>	Ursprünglicher Messwert Sensor_ID
6	plaus_<Sensor_ID>	Plausibilität des Messwerts Sensor_ID
7	err_<Sensor_ID>	Sensor Fehler Sensor_ID
8	pl_val_<Sensor_ID>	Plausibilisierter Messwert Sensor_ID
...		
4+n*4		

Tab. 24: Aufbau der Datendateien aus der SWIS Rechnerzentrale Kamen (KM)

Jahreszahl und Monat zusätzlich, und Zeitstempel in UTC.

Die bereitgestellten Export-Dateien der SWIS Rechnerzentrale haben folgende Struktur (s. Tabelle 24):

Jeder Messwert enthält einen Plausibilitätswert, der im Prinzip zwischen 0 und 100 % liegen kann: 100 % bedeutet einen plausiblen Messwert, 0 % entsprechend unplausibel. Die Plausibilisierung

Sensor ID	Abk.	Langbezeichnung	Einheit	Moitzfeld-01		Moitzfeld-02		Engelskirchen-01		Engelskirchen-02		Wiehthalbruecke		Reichshof		Eckenhagen-01		Eckenhagen-02		
				H746	H746	H754	H754	H765	H774	H775	H775									
1	TL	Temperatur Luft	°C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	TB	Temperatur Boden (FBT)	°C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	GT	Temperatur Gefrierpunkt	°C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4	RF	Relative Feuchte (Luft)	%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5	WGM	Windgeschwindigkeit (Mittelwert)	m/s	X	--	--	--	--	--	--	--	X	--	--	--	--	X	--	--	--
6	WGP	Windgeschwindigkeit (Spitzenwert)	m/s	X	--	--	--	--	--	--	--	X	--	--	--	--	X	--	--	--
7	WR	Windrichtung	°	X	--	--	--	--	--	--	--	X	--	--	--	X	--	--	--	--
8	UT1	Temperatur Boden Tiefe 1	°C	--	--	--	--	--	--	--	X	--	--	--	X	--	--	--	--	--
9	SHM	Schneehöhe	m	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
10	LD	Luftdruck	hPa	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
11	NM	Niederschlagsmenge	mm/15 min	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
12	TP	Taupunkt-Temperatur	°C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
13	UT2	Temperatur Boden Tiefe 2	°C	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
14	UT3	Temperatur Boden Tiefe 3	°C	X	X	X	--	--	--	--	--	X	--	--	--	X	--	--	--	--
...																				
35	SW	Sichtweite	m	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
...																				
44	TR	Niederschlagsstufe	enum	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
...																				
70	RST	Strassenzustand	enum	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
...																				
120	SWHN	Wasserfilm Dicke	mm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
121	PFNACL	NaCl Gehalt	%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
122	PFCACL2	CaCl2 Gehalt	%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
...																				
124	SWHR	Wasserfilm Stufe	enum	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tab. 25: Datenstruktur der Dateien der GMA'n im Bereich A 4 BAST

scheint sich aber nur auf die Überwachung der Messbereichsgrenzen zu beschränken. Ein Fehlerwert (err_) wird ebenfalls ausgegeben, der allerdings keine nachvollziehbare Bedeutung hat. Deshalb wird er im Projekt nicht verwendet.

Die grundsätzliche Datenstruktur der Datendateien für die GMA im Bereich der Teststrecke 3 A 4 BAST ist in der Tabelle 25 aufgeführt.

6.1.10 Daten des Testfeldes der BAST auf der A 4

Die Daten der Station von mickS/LUFFT werden von der BAST über FTP Server in wöchentlichen Abständen bereitgestellt. Die Datenfiles in csv Format wurden heruntergeladen und auf dem Projektserver des AN archiviert. Die Datenstruktur ist in Tabelle 29 zusammengestellt.

enum TR Niederschlagsstufe	
Code	Bedeutung
0	kein Niederschlag
1	Niederschlag Stufe 1 (leicht)
2	Niederschlag Stufe 2 (mäßig)
3	Niederschlag Stufe 3 (stark)

Tab. 26: Kodierung der Ausprägungen (Enumerations) für die Zustandsgröße (TR) „Niederschlagsstufe“

enum SWHR (Wasserfilmstufe)	
Code	Bedeutung
0	trocken
1	nass
2	nass 1
3	nass 2
4	nass 3

Tab. 27: Kodierung der Ausprägungen (Enumerations) der Zustandsgröße (SWHR) „Wasserfilmstufe“

enum RST (Straßenzustand)	
Code	Bedeutung
0	undefinierter Zustand
1	schmelzender Schnee
2	Schneedecke
3	Eisschicht
4	Raureif
5	Glatteis
6	glatt
7	nass
101	schneebedeckte Straße
102	gefrorener Schnee
103	Eis
104	Frost
105	gefrierender Regen

Tab. 28: Kodierung der Ausprägungen (Enumerations) der Zustandsgröße (RST) „Straßenzustand“

Dat.Feld	Legende	Erläuterung	Fahrspur	Einheit
1	DateTime(UTC)	Datum Uhrzeit (CE(S)T)		
2	FBT-1(ARS31)	Fahrbahntemperatur ARS31 aktive Sonde	1	°C
3	FBT-1(IRS31)	Fahrbahntemperatur IRS31 passive Sonde	1	°C
4	FBT-1(NIRS31)	Fahrbahntemperatur NIRS31 optisch/remote	1	°C
5	FTB-2(NIRS31)	Fahrbahntemperatur NIRS31 optisch/remote	2	°C
6	GT-1(ARS31)	Gefriertemperatur ARS31 aktive Sonde	1	°C
7	GT-1(IRS31)	Gefriertemperatur ARS31 passive Sonde	1	°C
8	GT-1(NIRS31)	Mindest.Gefriertemperatur NIRS31 optisch	1	°C
9	GT-2(NIRS31)	Mindest.Gefriertemperatur NIRS31 optisch	2	°C
10	FZW-1(IRS31)	FahrbahnzustandsWarnung IRS31 passiv	1	enum
11	FZW-1(NIRS31)	FahrbahnzustandsWarnung NIRS31 optisch	1	enum
12	FZW-2(NIRS31)	FahrbahnzustandsWarnung NIRS31 optisch	2	enum
13	NS	Niederschlagsart WS600		enum
14	NI	Niederschlagsintensität WS600		
15	WFD-1(IRS31)	Wasserfilmdicke IRS31 passiv	1	mm
16	WFD-1(NIRS31)	Wasserfilmdicke NIRS31 optisch	1	mm
17	WFD-2(NIRS31)	Wasserfilmdicke NIRS31 optisch	2	mm
18	RLF	Relative Luftfeuchte WS600		%
19	TPT	Taupunkttemperatur WS600		°C
20	LT	Lufttemperatur WS600		°C
21	GR-1(IRS31)	Griffigkeit IRS31 passiv	1	
22	GR-1(NIRS31)	Griffigkeit NIRS31 optisch	1	

Tab. 29: Liste der Datenfelder der archivierten Dateien. Die Abkürzungen der Messgrößen sind gemäß TLS. Die Ausprägungen der Zustandsgrößen FBZ, NS, FZW sind gemäß TLS. Fahrspur 1 = Lastfahrstreifen, 2 = Überholspur

Dat.Feld	Legende	Erläuterung	Fahrspur	Einheit
23	GR-2(NIRS31)	Griffigkeit NIRS31 optisch	2	
24	RS-1(ARS31)	Restsalz ARS31 aktiv	1	%
25	RS-1(IRS31)	Restsalz IRS31 passiv	1	%
26	RS-1(NIRS31)	Mindest.Restsalz NIRS31 optisch	1	%
27	RS-2(NIRS31)	Mindest.Restsalz NIRS31 optisch	2	%
28	TSK-1(IRS31)	Taustoffkonzentration IRS31 passiv	1	%
29	TSQ-1(IRS31)	Taustoffdichte IRS31 passiv	1	g/m ²
30	EP-1(IRS31)	Eisprozent IRS31 passiv	1	%
31	EP-1(NIRS31)	Eisprozent NIRS31 optisch	1	%
32	EP-2(NIRS31)	Eisprozent NIRS31 optisch	2	%
33	FBZ-1(IRS31)	Fahrbahnzustand IRS31 passiv	1	enum
34	FBZ-1(NIRS31)	Fahrbahnzustand NIRS31 optisch	1	enum
35	FBZ-2(NIRS31)	Fahrbahnzustand NIRS31 optisch	2	enum
36	SFD-1(IRS31)	Schneefilmdicke IRS31 passiv	1	mm
37	SFD-1(NIRS31)	Schneefilmdicke NIRS31 optisch	1	mm
38	SFD-2(NIRS31)	Schneefilmdicke NIRS31 optisch	2	mm
39	EFD-1(IRS31)	Eisfilmdicke IRS31 passiv	1	mm
40	EFD-1(NIRS31)	Eisfilmdicke NIRS31 optisch	1	mm
41	EFD-2(NIRS31)	Eisfilmdicke NIRS31 optisch	2	mm

Tab. 29: Fortsetzung

6.2 Mobile Datenerfassung

Stationäre Messstellen liefern prinzipiell kontinuierlich in zeitlich regelmäßigen Abständen von einem festen Ort Messdaten. Alleine schon wegen der Kosten können diese Messstellen nicht mit der örtlichen räumlichen Dichte installiert werden, wie dies für die streckenbezogene Glättevorhersage wünschenswert wäre. Die einzige Möglichkeit, Daten von der Strecke mit hoher örtlicher Dichte zu erhalten, sind mobile Messstellen bzw. -fahrten. Dabei muss wiederum in Kauf genommen werden, dass die Daten sporadisch, zeitlich unregelmäßig auftreten.

Um möglichst zu vielen Tages- und Nacht-Zeiten Straßenwetterdaten von der Strecke zu erhalten, bietet es sich an, Einsatzfahrzeuge der Autobahn- bzw. Straßen-Meistereien mit mobilen Sensoren auszurüsten. Die Einsatzfahrzeuge fahren fast täglich auf den Teststrecken, die in ihrem Betreuungsgebiet liegen.

Mit Unterstützung der ABDN/ZSB haben sich die Autobahnmeisterei (AM) Greding (A9) und die Straßenmeisterei (SM) Viechtach (St2139) bereit

erklärt, sich an der Datenerfassung engagiert zu beteiligen. Nach anfänglichen Problemen technischer Art mit der Ausstattung am Lkw bei der AM Greding wurden dann ab Mitte Januar 2015 auch zuverlässig bei jeder Fahrt Daten mitgeschnitten. Bei der SM Viechtach hat die Erfassung fast von Anfang an problemlos funktioniert und hier sind Daten seit Dezember 2015 bis Ende März 2016 und dann wieder von Oktober 2016 bis April 2017 verfügbar.

Für die mobile Datenerfassung an der Teststrecke 3 BAB A 4 hat sich die BAST selbst verantwortlich erklärt. Allerdings sind dort aus Gründen der begrenzten personellen Ressourcen im Winter 15/16 nur wenig Messfahrten, in der Winterperiode 2016/17 sind 29 durchgeführt worden.

Die Tabelle 30 führt alle während des Projektes im Einsatz befindlichen Fahrzeuge mit mobiler Datenerfassung auf.

Mobil-ID	HW-Vers.	SW-Vers.	APP	Standort/Fahrzeug
20215 2 m Vers. (IceCar5)	0.5	2.3...3.7	1.13.0 Apple iPad	BASSt Bergisch Gladbach
20815 2 m Vers.	0.5	2.3...3.7	1.13.0 Apple iPad	SM Viechtach, Streu-Lkw
71215 2 m Vers.	0.5	2.3...3.7	1.13.0 Apple iPad	AM Greding „Greding 2“ Streu-Lkw
260715 2 m Vers.	0.5	2.3...3.7	1.13.0 Apple iPad	AM Greding „Greding 1“ Kolonnenführer-Fahrzeug
141215 (IceCar4)	0.5	2.3...3.7	1.13.0 Apple iPad	KS-Consulting, ML350 PKW Magnethalterung Dach MARWIS SN 89.1114 2 m Version, ANACON NR Lite2 WS301 Spezial Firmware V156
891114 (IceCar3)	0.5	2.3	1.9.0 Apple iPad	mickKS Caddy NR Lite2 & WS301 spez. Firmware V156

Tab. 30: Aufstellung aller bisher im Einsatz befindlichen Fahrzeuge für die mobile Datenerfassung. Einschließlich Fahrzeuge des AN für die thermische Kartierung

6.2.1 Mobiler Straßenzustands-Sensor MARWIS

MARWIS steht für „Mobile Advanced Road Weather Information Sensor“ und wurde von der Firma LUFFT Meß- und Regeltechnik GmbH in Fellbach, speziell für den robusten mobilen Einsatz entwickelt (siehe Bild 30). Die für den Straßenzustand relevanten Größen, wie Wasserfilm, Schnee- und Eisfilm werden mit einem optischen Messverfahren detektiert. Dabei wird, ähnlich einem Laser, Licht mit verschiedenen Welllängen im nahen Infrarot-Bereich auf die Oberfläche gesendet und das reflektierte Licht gemessen. Da flüssiges und gefrorenes Wasser deutlich unterschiedliche Lichtabsorptionseigenschaften aufweisen, kann mithilfe der Phasenverschiebung (Laufzeit) und der zurückgestrahlten Intensität die Menge und Art der Bedeckung auf der Oberfläche bestimmt werden. Es leuchtet ein, dass die Durchdringung des von oben auftreffenden

Lichtes durch die Bedeckungsschichten nicht beliebig tief sein kann. Das ist auch der Grund, weshalb die Schichtdicken, die noch einigermaßen zuverlässig bestimmt werden können, begrenzt sein müssen, je nach Art max. 6 mm. Eine Schneedecke von einigen Zentimetern Dicke, noch dazu kompakter Schnee, kann zwar als solches erkannt werden, aber die Dicke kann selbstverständlich nicht mehr richtig gemessen werden. Prinzipiell kann der Sensor im optischen Bereich bis zu 100 Messungen pro Sekunde durchführen. Ferner enthält das Gerät einen eingebauten Pyrometer, der berührungslos die Temperatur auf der Straßenoberfläche misst. Die Messung basiert auf der Detektion der von der Oberfläche ausgehenden Wärmestrahlung im Infrarot-Bereich.

Der Sensor benötigt eine Gleichstrom-Versorgung zwischen 10...28 V und hat selbst einen geringen Energieverbrauch von ca. 3 VA. Allerdings ist auch

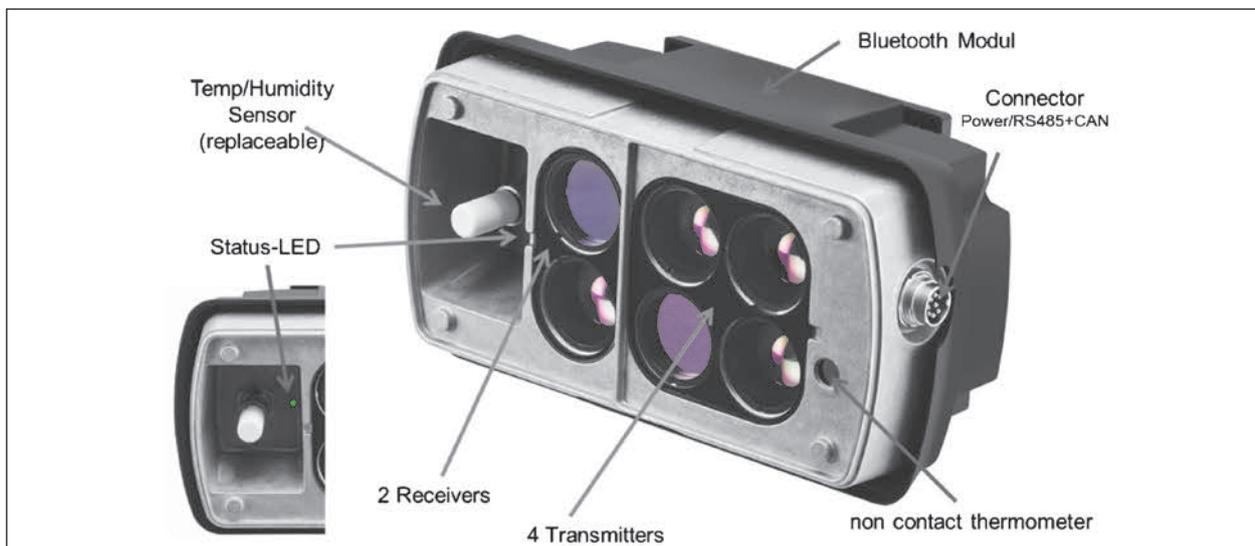


Bild 30: Darstellung des MARWIS Sensors mit den verschiedenen Messeinrichtungen (Quelle: LUFFT)

zur Vermeidung von Kondensationsproblemen eine Heizung eingebaut mit einem Verbrauch im Bereich von 17 VA bei 12 V. Die im Projekt verwendete Ausstattung arbeitet durchwegs mit einer drahtlosen Datenübertragung zwischen Sensor und Erfassungsgerät über den Bluetooth Verbindungsstandard. Zusätzlich ist der Sensor mit einer drahtgebundenen RS485 Schnittstelle, welche das Datenprotokoll UMB von LUFFT unterstützt, ausgerüstet. Ebenso kann optional der CAN Bus Standard unterstützt werden.

Der MARWIS-Sensor wird vorzugsweise auf ein Schutzgehäuse (lange oder kurze Ausführung) montiert, damit die Optik von Verschmutzung ge-

schützt ist. Es gibt zwei grundlegende MARWIS-Versionen, die auf zwei verschiedene Messabstände (1 m und 2 m) zur Oberfläche optimiert sind (siehe auch Bild 31). Der Messfleck für die optische Messeinrichtung an der Belagsoberfläche hat eine Ausdehnung im Bereich von ca. 10 cm. Die Ausdehnung des Empfindlichkeitsbereichs der Temperaturmessung ist dabei deutlich größer.

Das Prinzip der gesamten mobilen Messdatenerfassung ist in Bild 32 dargestellt. Als lokales Erfassungsgerät dient ein Apple mini-iPAD mit einer MARWIS-App, das von LUFFT kostenfrei über den Apple Store heruntergeladen werden kann.

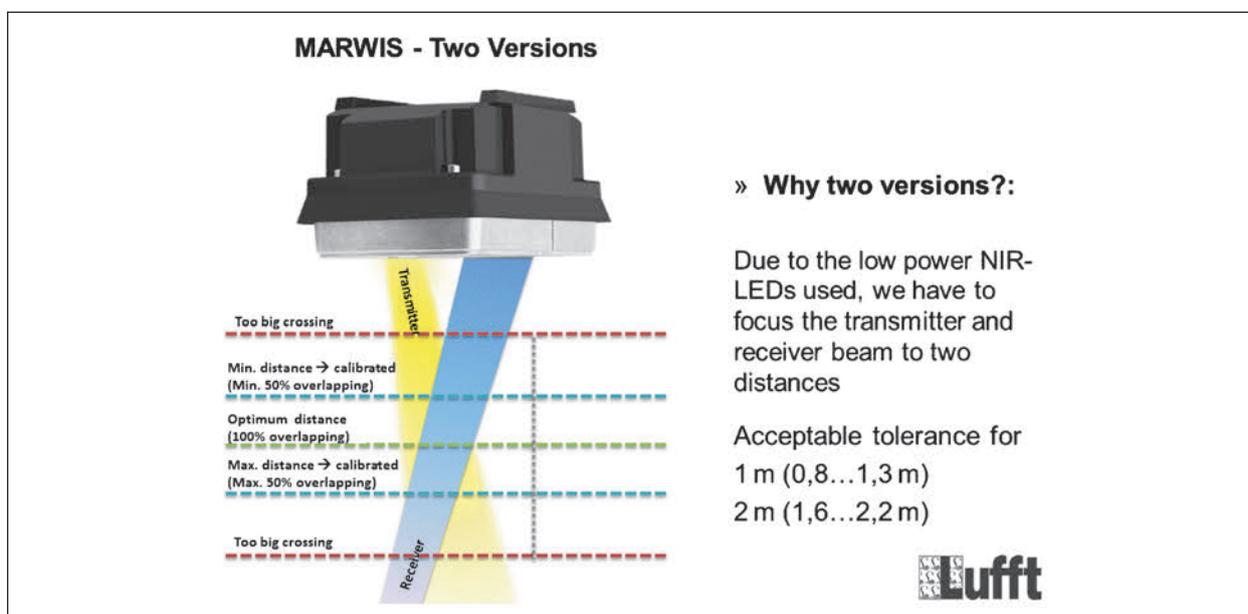


Bild 31: Prinzip der zwei MARWIS Versionen, optimiert auf 1 m und 2 m Messabstand zur Belagoberflächen (Quelle: LUFFT)



Bild 32: Prinzip der mobilen Datenerfassung an Einsatzfahrzeugen der Meistereien

In der MARWIS-App lassen sich die gewünschten Messkanäle einstellen, welche abgefragt werden sollen, sowie Abfrageintervalle etc. Das mini-iPAD ist mit einem Mobilfunk-Anschluss für mobiles Internet ausgestattet. In regelmäßigen Abständen werden die erfassten Daten an einen Server im Internet (Cloud) abgeliefert. Der AN stellt einen entsprechenden Server auf Basis Smartview3 zur Verfügung.

Die Daten werden mit der für diese Lösung höchst möglichen Erfassungsintervall von 1 Sekunde abgefragt und weiterverarbeitet.

Im Folgenden wird noch kurz auf die wesentlichen mobilen Messgrößen eingegangen.

Oberflächentemperatur (RST)

Die Oberflächentemperatur des Belags (RST = Road Surface Temperature) wird, wie bereits erwähnt, berührungslos über die Wärmestrahlung an der Oberfläche bestimmt. Dabei muss man naturgemäß einige Randbedingungen beachten. Grundsätzlich ist die Wärmestrahlung einer Materialoberfläche stark von der Beschaffenheit und der Art des Materials abhängig. Dies wird mit dem sogenannten Emissionsgrad (engl.: emissivity) ausgedrückt. Das ist im Wesentlichen das Verhältnis der Wärmestrahlung des Messobjekts zu einem idealen sog. „schwarzen Strahler“. Der Emissionsgrad von Asphaltflächen beträgt typischerweise ca. 0,97. Das ist aber zudem noch abhängig von der Beschaffenheit des Belags, der durchaus selbst innerhalb einer Strecke unterschiedlich sein kann. Erschwerend kommt hinzu, dass die Bedeckung der Oberfläche mit Schmutz, Wasser, Eis und Schnee zusätzlich den Emissionsgrad beeinflusst. Und nicht zuletzt wird die Himmels- und Umgebungsstrahlung zusätzlich auf der Oberfläche reflektiert und kommt zu der eigentlichen zu messenden Wärmestrahlung des Belags hinzu, ohne dass dies vom Sensor unterschieden werden kann. Hier muss man Kompromisse eingehen. Die MARWIS-App bietet die Möglichkeit die Temperaturwerte, die vom Sensor gemessen werden nach einer Vergleichsmessung mit einem genauen und geeichten Instrument anzupassen. Dazu wird ein Offset generiert. Das ist aber mit äußerster Vorsicht zu genießen, da eine solche Vergleichsmessung immer eine Momentaufnahme an einer bestimmten Stelle darstellt und nicht repräsentativ für die Strecke sein muss.

Die nominelle Genauigkeit für die berührungslose Temperatur-Messung ist $\pm 0,8$ °C. Dies gilt streng

genommen nur unter stabilen Laborbedingungen und in einem engen Temperaturbereich um 0 °C. In der Praxis muss mit deutlich höheren Toleranzen gerechnet werden. Der Messbereich ist nominell zwischen -40° bis $+70$ °C mit einer Auflösung von $0,1$ °C angegeben.

Obwohl der Sensor bei der optischen Messeinrichtung für den Straßenzustand Reaktionszeiten von $1/100$ sec aufweisen kann, ist die Messung der Temperatur mit Pyrometer mit einer Reaktionszeit von zwei Sekunden deutlich träger. Davon betroffen sind auch alle abgeleiteten Größen, wie Fahrbahnzustand und Friction, sowie Eisprozent. Dies wird bei der Auswertung berücksichtigt und ausgeglichen. Der Hersteller hat dies aber, nach dem die ersten Auswertungen bekannt wurden, bereits verbessert, sodass im weiteren Verlauf des Projektes und nach Umstellung auf die neue Firmware-Version mit einer Reaktionszeit des Temperatursensor deutlich unter 1 Sekunde gerechnet werden kann.

Wasserfilmdicke (WFT)

Die Wasserfilmdicke (WFT = Waterfilm thickness) wird lt. Datenblatt mit einer Auflösung von $0,1$ μm gemessen. Das entspricht $0,1$ ml/m^2 . Allerdings gibt es über die absolute Genauigkeit keine verbindliche Aussage. Die optische Bestimmung der WFT ist zudem etwas abhängig von der Belagsbeschaffenheit. Voraussetzung für eine zuverlässige Messung der WFT ist, dass der Sensor auf einer absolut trockenen Oberfläche eingestellt (Kalibrierung) wird, welche möglichst dem Straßenbelag entspricht, auf dem nachher gemessen werden soll. Im Sensor können auch unterschiedliche Profile abgespeichert werden.

Die WFT ist grundsätzlich die Menge des Wasseranteils (Wasseräquivalent) in der Bedeckung unabhängig davon, in welchem Aggregatzustand (Wasser, Eis oder Schnee). Allerdings ist, wie bereits erwähnt der Messbereich begrenzt. Höhere Schneee Auflagen können naturgemäß nicht mehr richtig detektiert werden.

Die Wasserfilmdicke kann mit einer Abtastrate von $1/100$ Sekunde gemessen werden. Es wird jedoch im Projekt grundsätzlich mit 1 Sekunde Erfassungsintervall gearbeitet.

Der Messbereich reicht von $0,0$ bis $6000,0$ μm bzw. $0,0000$ bis $6,0000$ mm.

Eisprozent (IP)

Eisprozent (IP = Ice Percentage) ist der Anteil an gefrorenem Wasser in der gesamten Bedeckung der Belagsoberfläche und wird in % angegeben. Ein IP von 0 % bedeutet flüssiges Wasser, 100 % dagegen bedeutet vollkommen gefrorenes Wasser. Die Auflösung beträgt 1 %. Eis kann auch in Form von Schnee vorliegen, kommt dort kaum flüssiges Wasser vor, wird ebenfalls 100 % ausgegeben. Mit dem optischen spektrometrischen Messverfahren ist IP die am zuverlässigsten zu bestimmende Größe, da sie sich direkt aus dem Verhältnis der Absorption der Spektralanteile ergibt.

Zusammen mit der Belagstemperatur im negativen Bereich und dem Eisanteil kann auch auf die Konzentration des Taumittels geschlossen werden.

Kraftschlussbeiwert (FRI)

Der Kraftschlussbeiwert (FRI = Friction) ist eine Maßzahl für die Glätte bzw. den Kraftschluss zwischen Reifen und der Fahrbahnoberfläche. Dieser Wert ist ein empirischer Modellwert, der aus den gemessenen Parametern Wasserfilm, Temperatur und Eisprozent ermittelt wird. Er entspricht dem durchschnittlich für die Art und Menge der Bedeckung zu erwartenden Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche.

Der Wert reicht von 0,1 bis 0,82. Der obere Messbereich von 0,82 gilt als durchschnittlicher Kraftschlussbeiwert auf trockenen Belägen. Jeder individuelle Bremsvorgang mit bestimmten Reifen kann unterschiedliche Kraftschlussbeiwerte aufweisen. Außerdem ist grundsätzlich zu beachten, dass mit dieser Art berührungsloser Sensorik, der Kraftschlussbeiwert nur Sinn macht, wenn eine signifikante Menge an Wasser in irgendeiner Form auf der Oberfläche vorhanden ist. Die tatsächliche Griffigkeit eines trockenen Belages kann damit nicht bestimmt werden. Mit zunehmender Bedeckung mit flüssigem und/oder gefrorenem Wasser wird der Kraftschluss davon dominiert und diese Zustände sind es, die im Winterdienst interessieren.

Friction wird in Skandinavischen Ländern häufig als Kennzahl für die Wirksamkeit des Winterdienstes verwendet. Grundsätzlich kann dieser Wert generell den Einfluss der winterlichen Verhältnisse auf der Fahrbahnoberfläche auf die Fahrdynamik beschreiben. Einfluss auf Bremswege und Schleuderneigung in den Kurven etc. können damit berechnet werden. Im Projekt war zu diskutieren, ob diese

Größe für die Glätteprognose auch herangezogen werden kann. Es hat sich dann herausgestellt, dass diese Größe für Streckenvorhersage-Modelle nicht hilfreich verwendet werden kann, die mobilen Messwerte nicht lokal überprüft werden und die Ergebnisse nicht ohne weitere Entwicklung in Streuempfehlungen umgesetzt werden können.

Kraftschlussbeiwert bzw. Friction kann auch folgendermaßen definiert werden:

$$FRI = \frac{a_B}{g} \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei a_B die maximale Bremsverzögerung in m/s^2 und g die Erdbeschleunigung, ebenfalls in m/s^2 darstellt. Das Verhältnis ist der Kraftschlussbeiwert bzw. Friction. Die Friction ist bei dieser Art von Sensorik allein aus der Anwesenheit von Wasser in allen seinen Aggregatzuständen auf der Fahrbahnoberfläche über ein empirisches Modell abgeleitet. Je mehr die Oberfläche mit Wasser, Eis und/oder Schnee kontaminiert ist, umso mehr wird der Kraftschluss von dieser Kontamination bestimmt. Bei sehr geringen Wasserfilmen und im trockenen Zustand wird der tatsächliche Kraftschluss zunehmend von der Beschaffenheit und Textur der Belagsoberfläche dominiert und Messwert geht gegen einen voreingestellten gleichbleibenden Trockenwert, der einer durchschnittliche Belagsoberfläche einer befahrenen Straße entspricht. Weicht der tatsächliche Kraftschlussbeiwert durch Belagsbeschaffenheit, nicht wässrige Kontamination (Öl, Reifenabrieb etc.) von dem empirischen Trockenwert ab, kann das von dieser Sensortechnologie nicht erkannt werden.

Fahrbahnoberflächenzustand (RSC)

Der Fahrbahnoberflächenzustand (RSC = Road Surface Condition) ist eine Klassierung (Enumeration) und wird aus den Messwerten abgeleitet. Tabelle 31 gibt die unterstützten Ausprägungen für RSC wieder.

Taupunkttemperatur (DPT)

Die Taupunkttemperatur (DPT = Dewpoint temperature) wird durch einen an der Front des Sensors angebrachten Lufttemperatur- und Luftfeuchte-Fühler (siehe Bild 30) bestimmt.

Durch die Lage innerhalb der Schutzverkleidung des Sensors ist naturgemäß ein gewisser Unterschied zur Umgebungsluft, insbesondere während der

Enum	Zustand	Bemerkung/Bedeutung
0	Trocken	Keine wesentliche Bedeckung auf der Oberfläche. Wasserfilm unter dem Feuchte-Grenzwert.
1	Feucht	Flüssiges Wasser auf der Oberfläche. Wasserfilmdicke aber noch unter dem Nässe-Grenzwert.
2	Nass	Flüssiges Wasser auf der Oberfläche. Wasserfilmdicke über dem Nässe-Grenzwert.
3	Eis	Gefrorenes Wasser auf der Oberfläche. Überwiegend als Eis.
4	Schnee/Eis	Gefrorenes Wasser auf der Oberfläche entweder in Form von Eis oder als Schnee. Keine sichere Unterscheidung möglich.
5	Chemisch Nass	Die Wasserfilmdicke ist gleich oder über dem Feuchte-Grenzwert und die Straßentemperatur ist unter + 1,5 °C. Die Eisbildung ist vermutlich unterdrückt durch Enteisungsmittel.
6	Kritische Nässe	Die Wasserfilmdicke ist gleich oder über dem Feuchte-Grenzwert und die Straßentemperatur ist unter + 1,5 °C. Die Eisbildung beginnt ...
8	Schneebedeckt	Schnee auf der Oberfläche mit einem Wasseranteil größer oder gleich dem Nässe-Grenzwert
99	unbestimmt	Der Zustand kann aufgrund der Bedingungen nicht bestimmt werden.

Tab. 31: Kodierung (Enumerations) der Ausprägung des Fahrbahnoberflächenzustands mit Erläuterung

Fahrt, zu beachten. Dennoch kann die Taupunkttemperatur sehr gut als Maß für die Kondensations- oder Absorptionseigenschaften der Luftmasse über der Belagsoberfläche verwendet werden.

Der Messbereich reicht von -50,0 °C bis +60,0 °C, die Auflösung beträgt 0,1 °C.

Die Genauigkeit des Messwertes liegt lt. Datenblatt bei $\pm 1,5$ °C (im Lufttemperaturbereich zwischen 0...35 °C). Bei Vergleichen mit stationären Anlagen, welche i. d. R. ähnliche Genauigkeitsklassen aufweisen und abgesehen vom unterschiedlichen Messbedingungen müssen bereits von vorne herein Abweichungen von $\pm 3,0$ °C erwartet werden.

6.2.2 Ausstattung Einsatzfahrzeuge der AM Greding

Die AM Greding hat sich mit Unterstützung des AN sehr engagiert an der Ausrüstung der Fahrzeuge beteiligt und hat die Installation am Fahrzeug in Eigenregie übernommen. Nach anfänglichen Problemen aufgrund einer Verwechslung der verschiedenen MARWIS Versionen (Messabstand), Problemen mit iPad Apps und mit der Bluetooth Datenverbindung vom Führerhaus des Lkw zum Heck des Fahrzeugs, konnte schließlich ab Januar 2016 für beide Fahrzeuge ein stabiler regelmäßiger Betrieb gefahren werden.

Um eine gute Abdeckung der Strecke zu erreichen, wurden ein Kolonnenführer-Fahrzeug und ein Streu-Lkw ausgerüstet. Es wurde zusätzlich eine Webseite von AN eingerichtet, welche die letzten Daten und die Fahrten auf der Karte von den Beteiligten eingesehen werden kann.



Bild 33: Montage des mobilen Straßenzustands-Sensors am Streufahrzeug (Lkw) der AM Greding. Der Abstand zum Führerhaus ermöglicht eine sichere Bluetooth (drahtlose) Datenverbindung (Fotos: Karl Schedler)

Mobiler Straßenzustands-Sensor am Streufahrzeug Lkw der AM Greding

Bild 33 zeigt den mobilen Straßenzustands-Sensor MARWIS, wie er am Streufahrzeug der AM Greding montiert ist. Die Messanordnung ist in Bild 35 dargestellt. Der Messpunkt liegt dabei auf der Fahrerseite etwas außerhalb der Reifenspur des Fahrzeugs, was grundsätzlich als vorteilhaft für die Messung anzusehen ist.

Das Streufahrzeug Lkw von IVECO hat einen Streueraufbau von Küpper-Weisser Typ IMS.

Als lokale Datenerfassung ist ein Apple miniIPAD im Führerhaus angebracht. Das Gerät übernimmt über eine App (MARWIS App von Fa. LUFFT) die zyklische Abfrage gemäß Einstellungen, speichert sie zwischen, zeigt eine Auswahl der Daten zusammen mit der Fahrspur auf der Karte auf dem Bildschirm an und übermittelt regelmäßig die Daten über Mobilfunk-Internet auf den Projektserver des AN (siehe Bild 34). Der Montageort des Sensors im mittleren Bereich, hinter dem Führerhaus,

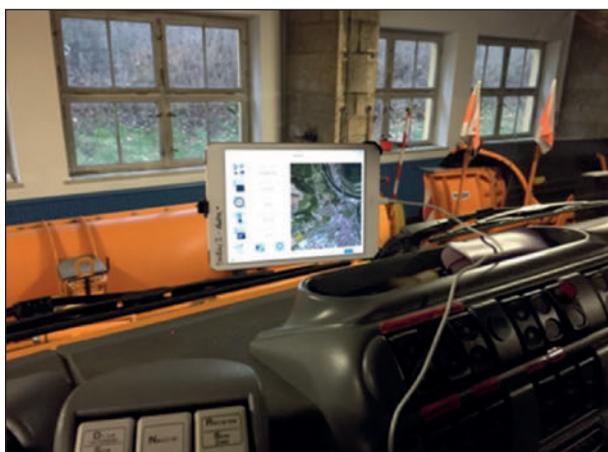


Bild 34: Ansicht minilPAD im Führerhaus (Foto: Karl Schedler)



Bild 37: Montage des Straßenzustands-Sensor MARWIS am Kolonnenführer-Fahrzeug (KoF) der AM Greding. Eine 2m-Version (Messabstand ca. 2 m) mit kurzem Schutzgehäuse (Fotos: Karl Schedler)

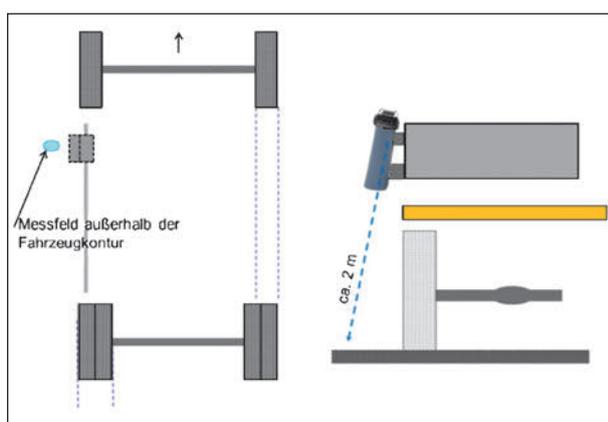


Bild 35: Prinzipdarstellung der Messanordnung am Streufahrzeug. Messabstand ca. 2 m



Bild 36: Montage MARWIS ID 71215 an neuem Fahrzeug Lkw Kennz.: N – AN 1029 Montagehöhe in etwa gleichbleibend (Foto: Karl Schedler)

ermöglicht eine sichere drahtlose Datenverbindung.

Für die Winterperiode 2016/17 musste wegen einem Unfall der Sensor an ein anderes Fahrzeug angebaut werden. MARWIS und Fahrzeug wird auch gleichzeitig für BAST Projekt FE 04.0297 „Automatisches Streuen“ verwendet.

Mobiler Straßenzustands-Sensor am Kolonnenführer-Fahrzeug der AM Greding

Bild 37 zeigt den Straßenzustands-Sensor MARWIS, wie er am Fahrzeug des Kolonnenführers der AM Greding montiert ist. Im Führerhaus wird ebenfalls ein minilPAD, welches vom AN zur Verfügung gestellt wurde, verwendet. Die Datenverbindung zwischen Sensor und Tablet ist ebenfalls drahtlos.

Wie auch beim Streufahrzeug liegt der Messpunkt auf der Fahrerseite etwas außerhalb der linken Reifenspur.

6.2.3 Ausstattung Streufahrzeug Lkw der SM Viachtach

Die Straßenmeisterei (SM) Viachtach hat sich sehr engagiert an dem Projekt beteiligt. Die Montage und Inbetriebnahme lief nahezu problemlos. Ebenso waren die Messfahrten fast durchweg brauchbar.

Bild 38 zeigt den mobilen Straßenzustands-Sensor MARWIS, wie er am Streufahrzeug der SM Viachtach montiert ist. Die Messanordnung ist in Bild 39 dargestellt. Der Messpunkt liegt dabei auf der Fahrerseite etwas außerhalb der linken Reifenspur des Fahrzeugs, was grundsätzlich als vorteilhaft für die Messung anzusehen ist.

Es wurde eine Webseite vom AN eingerichtet, auf der die letzten Daten und die Fahrten auf der Karte zusätzlich eingesehen werden konnten.

6.2.4 Ausstattung Dienstfahrzeug der BAST

Ein Mercedes-Bus, Dienstfahrzeug der BAST, wurde bereits schon vor dem Projekt mit einem mobilen



Bild 38: Ausstattung des MAN Streuerfahrzeugs (Streuer: Küpper-Weisser) der SM Viechtach mit Straßenzustands-Sensor MARWIS 2m-Version mit kurzem Schutzgehäuse. Montiert auf der Rückseite des Führerhauses mit Magnethalterung und mechanischer Sicherung. Im Führerhaus miniIPAD von Apple mit MARWIS-App und Mobilfunkanbindung (Fotos: Karl Schedler)

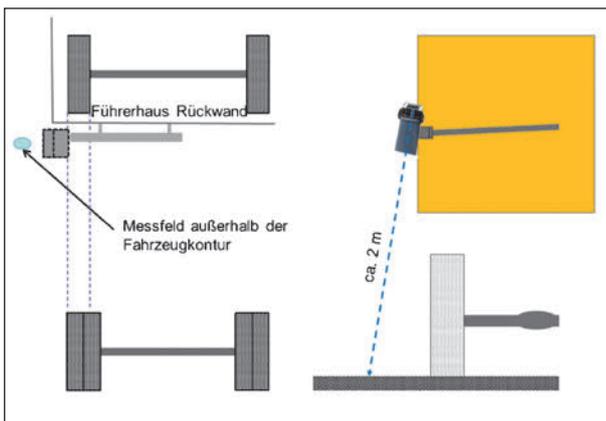


Bild 39: Prinzipdarstellung der Messanordnung

Straßenzustands-Sensor MARWIS ausgestattet. Der MARWIS als 2m-Version mit langem Schutzgehäuse wurde dabei auf der Hecktüre des Fahrzeuges montiert. Im Fahrzeug wird auch ein Apple miniIPAD mit Mobilfunknetz-Anbindung verwendet. Das Gerät ist ebenfalls auf den Projekt-Server des AN eingestellt und liefert dort die Daten ab. Bei neuen Daten werden in bestimmten Abständen Export-Dateien erzeugt, die einerseits auf einen FTP-Server der BAST geladen werden und ebenso auf den FTP-Projektserver des AN.

Der Messfleck ist in diesem Fall etwas hinter der Hecklinie des Fahrzeugs und zwischen der linken und rechten Reifenspur, eher näher der linken (fahrerseitigen) Reifenspur.

Die BAST hat sich im Projekt bereit erklärt, die Messfahrten auf der A 4 durchzuführen (siehe Bild 40).



Bild 40: Dienstfahrzeug der BAST mit montiertem mobilen Sensor MARWIS 2m-Version mit langem Schutzgehäuse. Hier noch zu Beginn des Projektes ohne Strahlungssensoren und ohne atmosphärische Messung

6.2.5 Datentabellen der archivierten mobilen Daten zur Auswertung

Auf den lokalen Geräten (miniIPAD) der Einsatzfahrzeuge werden die zu erfassenden Datenkanäle des Sensors konfiguriert. Die Spezifikation findet sich in der aktualisierten Arbeitsplanung des Projektes. Für Diagnosezwecke werden teilweise auch andere Betriebsdaten des Sensors mit erfasst und in der Datenbank des Projektserver des AN gespeichert. Die für die Auswertungen im Projekt relevanten Daten werden nochmals regelmäßig aus der Datenbank exportiert und auf dem FTP-Server AN bereitgestellt.

Pos	Legende	Datentyp	Bemerkung
1	UTCTimestamp	UTC UNIX Zeitstempel	Long Integer
2	date_time	UTC Zeitstempel	tt-mm-jjjj hh:mm:ss
3	Latitude	Geogr. Breite (WGS87)	Dezimalgrad
4	Longitude	Geogr. Länge (WGS87)	Dezimalgrad
5	Altitude	geogr. Höhe ü.NN	m
6	Course/Heading	Kurs	Grad
7	Speed	Geschwindigkeit	m/s
8	RST	Straßentemperatur	°C
9	DPT	Taupunkttemperatur (Sensor)	°C
10	WFT	Wasserfilmdicke	mm
11	IP	Eisprozent	%
12	FRI	Friction	g
13	RSC	Straßenzustand	enum

Tab. 32: Datentabelle der Exportdatei für die auszuwertenden mobilen Daten

Die Daten werden in Form von Datendateien im ASCII-Textformat (CSV) bereitgestellt. Der Inhalt ist in Tabelle 32 aufgelistet.

Die Dateien haben in der Regel folgende Benennung:

File-Name: MARWIS_<ssssss>_<Teststrecke>__<Fahrzg>_UTC_YYYYMMDDhhmmss.csv,

ssssss = MARWIS S/N erste 2 Teile ohne Vornullen,

YYYYMMDDhhmmss = Zeitstempel der Archivierung,

Delimiter: „;“ (Semikolon),

Decimal: (Komma) „,“,

Archivierungs-Intervall:

1/Tag (kann ggf. geändert konfiguriert werden),

Erfassungs-Intervall: 1 sec.

(Pyrometer). Für das Verfahren ist auch der Begriff Thermal Mapping oder im Deutschen Thermalkartierung gebräuchlich. Ein weiteres aufwendiges Verfahren ist die Aufnahme der Himmels-Apertur oder auch genannt sky view. Ein bekanntes Verfahren ist die Aufnahme mithilfe einer nach oben gerichteten Kamera mit Fischaugen-Optik und die Bildauswertung des freien Himmelsbereichs nach oben.

Im Projekt soll nun versucht werden, durch Messung weiterer Messgrößen auf die Strahlungseigenschaften und die Umgebungsbedingungen zu schließen und somit direkter auf die für die Vorhersage relevanten Eigenschaften zu gelangen, als dies durch die Bildverarbeitung des sky view möglich ist.

Die Ausrüstung für die Thermalkartierung wird erweitert durch weitere Sensoren, welche die Strahlungseigenschaften der Strecke und der Umgebung, sowie die atmosphärischen Parameter, je nach Ausstattung genauer bestimmen sollen, daher der Begriff erweiterte Thermalkartierung.

6.3 Erweiterte Thermalkartierung

Für eine räumlich hochauflösende Straßenwetter- und Belags-Prognose müssen die für die Berechnung der Vorhersage relevanten Streckeneigenschaften bekannt sein. Dazu gehören vor allem die thermischen Eigenschaften, sowie die sich auf die Wärmestrahlung auswirkenden Streckenverhältnisse und Umgebungsbedingungen. Ein gängiges Verfahren ist die Vermessung des Temperaturprofils entlang der Strecke mit berührungslosen Sensoren

6.3.1 Technische Ausstattung IceCar4

Die dafür notwendige technische Ausrüstung wurde bereits schon längere Zeit vor dem Projekt vom AN im Auftrag der Dänischen obersten Straßenbauverwaltung entwickelt. Dort wurde die Bezeichnung IceCar geprägt. Inzwischen sind bereits mehrere weiterentwickelte Versionen auch in anderen Ländern im Einsatz, wie z. B. auch in Asien und USA.

Im Projekt wurde an zwei Fahrzeugen die IceCar4-Lösung eingesetzt. Bild 41 zeigt die verwendeten Komponenten. Der Aufbau am Fahrzeug zeigt Bild 42 und Bild 43. Es stehen derzeit zwei Fahrzeuge mit IceCar4 Ausstattung für eigene gezielte Messfahrten zur Verfügung.

Wie bei den mobilen Messstellen auf Einsatzfahrzeugen, kommt auch bei der IceCar Lösung eine handelsüblicher Tablet (Apple miniPAD) als lokales Erfassungs- und Anzeigegerät zum Einsatz. Die Anwendungssoftware ist das frei über Apple-Store verfügbare MARWIS-App. Ebenso wären Tablets mit Android Betriebssystemen möglich (App ist hier über Google-Play verfügbar). Über Mobilfunknetz (GPRS, LTE, 3G) wird eine Verbindung zum Projekt-Server des AN aufgebaut und die Daten dorthin übermittelt. Das Prinzip ist nochmals in Bild 44 dargestellt.

Das Erfassungsintervall ist immer 1 Sekunde. Der Inhalt der vom SV3-Server auf dem FTP-Projekt-Server des AN abgelegten Datendateien ist in Tabelle 33 aufgeführt.

Für den kompakten Wettersensor WS301-UMB musste eine spezielle Firmware aufgespielt werden (unter V. 152 geführt). Da der Sensor nur Meßzyklen

von 1 Minute unterstützt, musste eine spezielle Firmware dafür entwickelt werden, damit der Sensor mit 1 Sekunde Intervall abgefragt werden kann. Der Messzyklus des Strahlungssensors beträgt damit weniger als 1 Sekunde. Gleichwohl ist die durch das Meßprinzip grundlegende träge Reaktionszeit unverändert und muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Ebenso war zunächst für den MARWIS Sensor eine spezielle Firmware notwendig, um die Funktion zu unterstützen, dass das Gerät als Bluetooth-Gateway auch für den UMB Bus fungiert, an dem die anderen UMB Einheiten hängen. Der ANACON Converter unterstützt ein Abfrageintervall von 1 Sekunde von vorneherein. Der NR Lite2 Strahlungsbilanzgeber hat eine analoge Signalschnittstelle. Auch hier ist die dem Sensor natürlich anhaftende Trägheit zu beachten.

Die Codierung (Enumerations) des Straßenoberflächenzustands (RSC) ist bereits aufgeführt in Tabelle 31. Die Codierung (Enumerations) für die Meldungen Gerätestatus (DevSTATUS) und Status der Messung (MeasSTATUS) sind einfach: 0 bedeutet in Ordnung, > 0 bedeutet, dass ein Problem vorliegt.

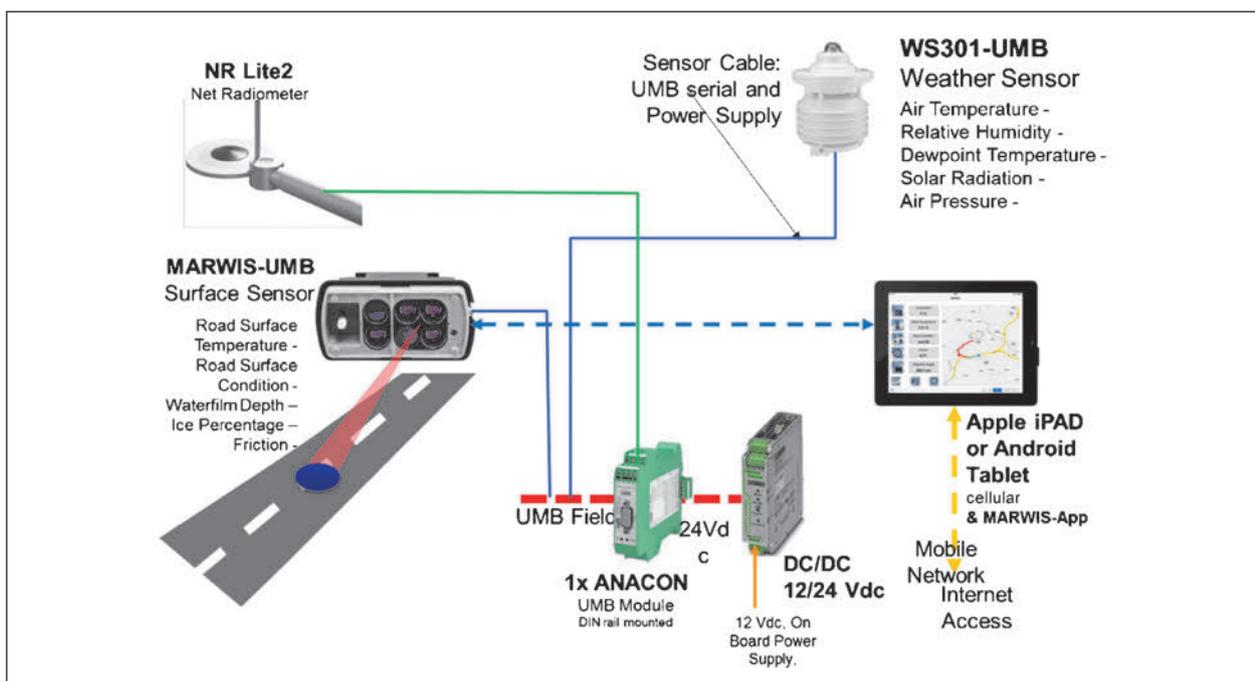


Bild 41: Darstellung der technischen Ausstattung IceCar 4.0



Bild 42: Fahrzeug KS-C mit IceCar Vers. 4.04. (Fotos: Karl Schedler)



Bild 43: Fahrzeug micKS mit IceCar 4.00. (Fotos: Olav Schröder, micKS)

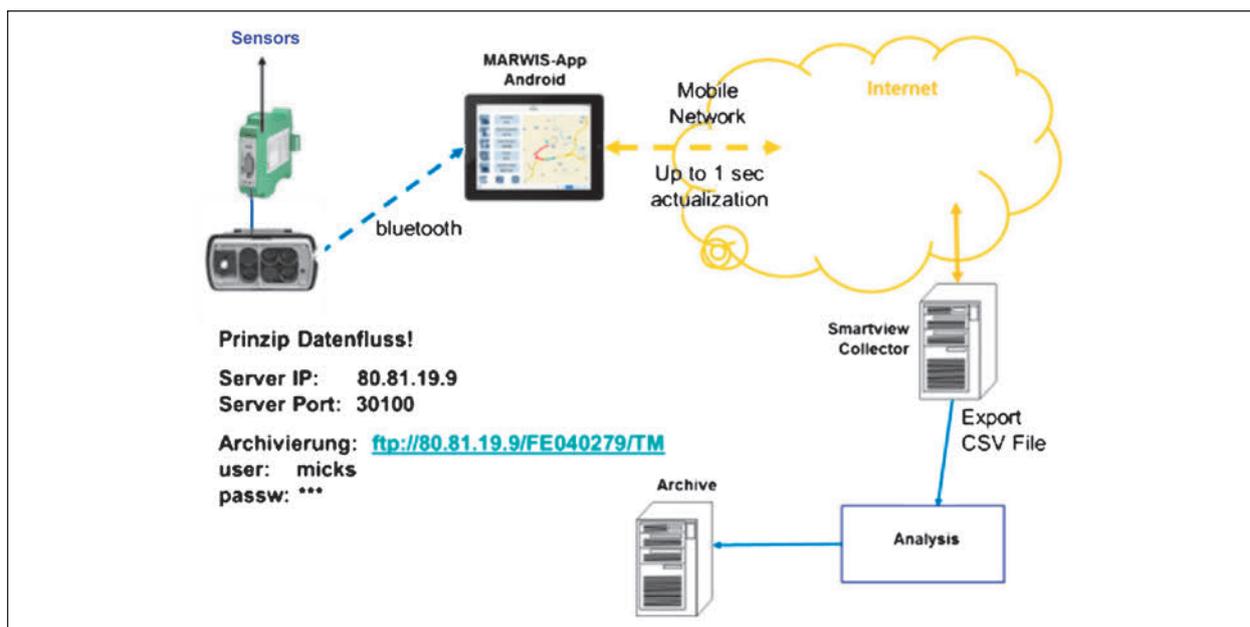


Bild 44: Datenfluss der mobilen Messstelle IceCar4

Pos	DatenTyp	Erläuterung	Remarks
1	date_time	UTC Zeitstempel der Abfrage	yyyy-mm-dd hh:mm:ss
2	Latitude	Geogr. Breitengrad (GPS)	Dezimalgrade 7 Digits
3	Longitude	Geogr. Längengrad (GPS)	Dezimalgrade 7 Digits
4	Altitude [m]	Geogr. Höhe ü.NN (GPS)	m
5	Course [°]	Fahrtrichtung/rechtw. Kurs	Grad
6	Speed	Fahrgeschwindigkeit (GPS)	m/s
7	AT WS [°C]	Lufttemperatur WS ca. 2 m	
8	DPT WS [°C]	Taupunkttemperatur WS ca. 2 m	
9	WBT WS [°C]	Feuchtkugeltemperatur WS	
10	RH WS [%]	Relative Luftfeuchte WS	
11	AP ABS [hPa]	Abs. Luftdruck	
12	GR WS [W/m ²]	Globalstrahlung WS	
13	NR IN [W/m ²]	Bilanzstrahlung Einstrahlung	
14	NR OUT [W/m ²]	Bilanzstrahlung Abstrahlung	
15	Vub WS [V]	Versorgungsspannung WS	
16	RST [°C]	Oberflächentemperatur Belag	
17	RH MARWIS [%]	Rel. Luftfeuchte MARWIS	
18	WFD [um]	Wasserfilmdicke	
19	IP [%]	Eisprozent (Eisanteil)	
20	FRIC [g]	Friction (Kraftschlussbeiwert)	
21	RSC [enum]	Oberflächenzustand Belag	siehe Tabelle.
22	Dev STATUS [enum]	Gerätestatus	siehe Tabelle
23	Meas STATUS [enum]	Status der Messung	siehe Tabelle
24	Housing T [°C]	Gehäusetemperatur	
25	LED T [°C]	LED Temperatur	
26	Boot count [count]	Anzahl Neustarts	
27	Runtime [s]	Laufzeit	

Tab. 33: Datentabelle der Export Dateien für die IceCar4 Messfahrten. Die gelb unterlegten Positionen sind lediglich für evtl. Diagnosezwecke vorgesehen

6.3.2 Technische Ausstattung IceCar5

Die BAST hat vor Beginn der Winterperiode 2016/17 eine weiterführende Version der IceCar Messstelle eingerichtet, Version 5.0. Das Prinzip ist in Bild 45 wiedergegeben. Im Wesentlichen unterscheidet sich diese Lösung von IceCar4 durch den verwendeten 4-Kanal Bilanzstrahlungssensor. Der Vorteil ist, dass die beiden Strahlungsrichtungen (Ein- und Ab-Strahlung) getrennt gemessen werden können und dann jeweils getrennt in zwei Spektralbereichen. Das ermöglicht eine differenzierte Auswertung der Strahlungsbedingungen. Außerdem wird noch zusätzlich der Wind mit gemessen. In Tabelle 34 sind die im Projekt vom Messfahrzeug der BAST archivierten Daten aufgeführt.

6.3.3 Videomitschnitt der IceCar4 Messfahrten

Es wurde testweise ein IceCar4 Fahrzeug mit einer robusten „Action-Kamera“ ausgerüstet. Die Videomitschnitte liefern wertvolle Aufschlüsse über den Straßenzustand und die Umgebungsbedingungen in Zweifelsfällen, bei denen die Messdaten schwer zu interpretieren sind. Wie Bild 46 zeigt, kann die Kamera mittels eines sehr fest haftenden Magnethalters (Eigenbau des AN) entweder am Heck des Fahrzeugs oder auf dem Dach an der Frontseite angebracht werden. Am Heck kann die Kamera so ausgerichtet werden, dass sie auch die Messfläche des mobilen Sensors mit beobachtet. Kommt es mehr auf die Beobachtung der Umgebung der Strecke und die Streckenführung an, kann die Kamera

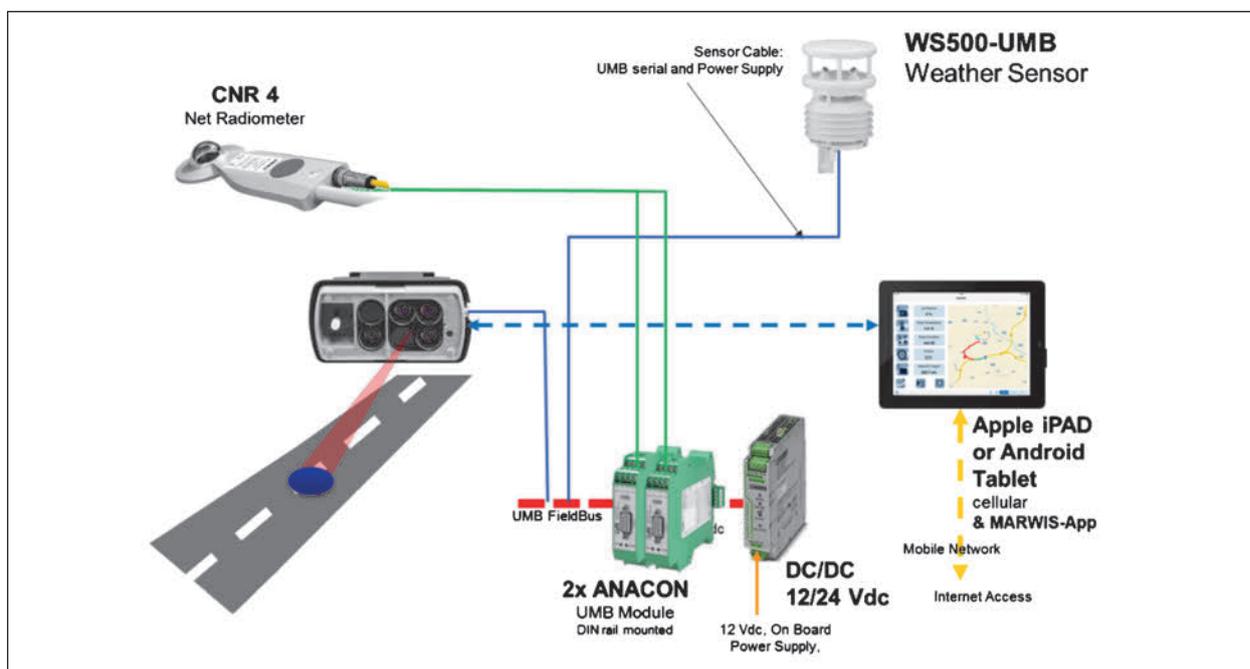


Bild 45: Darstellung der technischen Ausstattung IceCar 5.0 (BAST)

Pos	Data Type	Remark
1	date_time	yyyy-mm-dd hh:mm:ss
2	Latitude	decimal degree
3	Longitude	decimal degree
4	Altitude	m
5	Course/Heading	degree
6	Speed	m/s
7	Oberflächentemperatur °C	
8	Taupunkttemperatur °C	
9	Wasserfilmdicke µm	
10	Eisprozent %	
11	Reibung n/a	
12	Oberflächenzustand logic	see description
13	Einstrahlung LW W/qm	
14	Abstrahlung LW W/qm	
15	Einstrahlung KW W/qm	
16	Abstrahlung KW W/qm	
17	Lufttemperatur °C	
18	Taupunkt °C	
19	Feuchtkugeltemperatur °C	
20	Rel. Feuchte %	
21	Luftdruck abs hPa	
22	Windgeschwindigkeit Spitze m/s	
23	Windrichtung spitze °	

Tab. 34: Liste der archivierten Daten des IceCar5 Messfahrzeugs der BAST

an der Fahrzeugfront angebracht werden. Die Kamera kann vom Fahrzeuginnenraum über WLAN fernbedient, und auch so eingestellt werden, dass sie automatisch aufzeichnet, wenn sich das Fahrzeug bewegt.

Zusätzlich zu den Kamerabildern können aufgezeichnet werden:

- geogr. Koordinaten (GPS),
- Höhe ü. NN (GPS),
- Geschwindigkeit (GPS),
- Rechtweisender Kurs (GPS),
- Längs- und Quer-Neigung,
- Beschleunigung/Verzögerung.

Um während der Fahrt einigermaßen scharfe Bilder zu erhalten, kann die Kamera auch mit höherer Bildrate aufzeichnen (Slow motion). Grundsätzlich sind für die Kamera extrem schnelle Speicherkarten microSD zu verwenden. Beispiele aus aufgezeichneten Videos sind in Bild 47 gezeigt. Zu den Kameras ist ein Video-Editor verfügbar, mit dem Videos aus Aufzeichnungen zusammengestellt werden können. Die von der Kamera erfassten Daten können direkt ins Bild eingeblendet werden. Die im ersten Bild (aus Testgelände Dänemark) eingeblendeten Daten des mobilen Straßenzustand-Sensors sind nachträglich eingezeichnet. Grundsätzlich

scheint aber eine Zusammenführung aller Daten möglich zu sein. Die Kamera kann prinzipiell bei ständig laufender Bildaufzeichnung ca. 2 Stunden autark betrieben werden.



Bild 46: Action-Kamera GARMIN VIRB und Anbringung der Kamera über Magnethalterung am Heck des Fahrzeugs (alternativ auch auf dem Dach an der Front) (Foto: Karl Schedler)



Bild 47: Beispiele für die Heckansicht und Frontansicht. Jeweils snapshot aus Video (Fotos: Karl Schedler)

6.3.4 Durchführung der erweiterten Thermal-kartierung für Fahrzeuge des Forschungsnehmers

Die Planung der TM (= Thermal Mapping) Messfahrten sah folgendermaßen aus: meteoblue gibt ca. 5 Tage Hinweis (per e-mail), wenn bei den Testgebieten obige Wetterkriterien prognostiziert werden können! Danach wurde abgestimmt, wer die Messfahrt durchführen kann. Bis kurz vor Termin waren die örtlichen Prognosen noch mal zu kontrollieren, damit sichergesellt war, dass die Wettersituation auch eintritt.

Die Verfahrensbeschreibung zur Durchführung der TM Messfahrten sieht folgendermaßen aus:

Teststrecke 1: A 9 Greding

Fahrtrichtung München → Nürnberg

Beginn AS (Nr. 60) Lenting über Stammham bis AS (Nr. 55) Allersberg, dann ausfahren und Fahrtrichtung wechseln FR München – AS Allersberg bis AS Lenting – AS Lenting ausfahren und Fahrtrichtung wechseln, wieder FR München → Nürnberg A 9 bis AS Denkendorf – dort ausfahren, Messfahrt beendet.

Teststrecke 2: St2931 Viechtach

Anschlussstelle B 85 FR Predigtstuhl St2139 auffahren über Predigtstuhl bis Ortschaft Grün. Dort wenden und dann Strecke bis Kreuzung Prof.-Hermann-Staudinger-Str. zurück. Dort FR wechseln und zurück FR Predigtstuhl bis Ortschaft Kollnburg – Messfahrt beendet!

Teststrecke 3: A 4 BAST

Auffahren AS Bensberg FR Köln → Olpe über AK (Nr. 19) Olpe-Süd bis AS (Nr. 29) Wenden ausfahren und FR wechseln, FR Olpe → Köln von AS Wenden über AS Bensberg, dort wieder FR wechseln, FR Köln → Olpe wieder gleiche Strecke, wie am Anfang bis AS (Nr. 20) Moitzfeld, dann ausfahren – Messfahrt beendet!

No	Beschreibung der TM Messfahrt	FBZ	NI	Bewölk	Sonne	Tageszeit
1	Standard Thermal Mapping. Finden von kalten Stellen etc., Himmels-Apertur	trocken	kein	klar	keine	nachts
2	Standard Thermal Mapping, Strahlungssituation	trocken	kein	bedeckt	gering	beliebig
3	Thermal Mapping bei Strahlungssituation	trocken	kein	klar	starke GS	beliebig
4	Messung gezielt bei kritischen Situationen	Eis/Schnee	beliebig	bedeckt	gering	beliebig

Tab. 35: Kriterien für die Wetterklassen, die für die einzelnen Thermalkartierungen angesetzt werden müssen

Grundsätzliches

Fahrgeschwindigkeit Durchschnitt möglichst 60 ... 75 km/h. Fahrgeschwindigkeit kann entsprechend der Verkehrssituation auch geringer sein. Überholen nur dann, wenn vorausfahrendes Fahrzeug offensichtlich längere Zeit deutlich 60 km/h fahren wird. Grundsätzlich sich nach StVO verhalten.

Hinweis

Bei vielen Messfahrten (außer Teststrecke 3) ist grundsätzlich zum Ende der Messfahrt-Strecke noch einmal ein Stück (ca. 10 % der Gesamtstrecke) der am Anfang gefahrenen Strecke befahren worden! Damit kann die generelle natürliche Temperaturänderung im Zeitraum der Messfahrt bestimmt werden. Die Fahrten erfolgten grundsätzlich auf dem rechten Fahrstreifen (Lastspur).

6.4 Erfassung der Straßenwetter-Vorhersagen

Tabelle 36 zeigt eine Übersicht der erfassten Straßenwetterprognosen.

6.4.1 DWD Deutscher Wetterdienst

Der Deutsche Wetterdienst stellt auf einem FTP Server im stündlichen Intervall Vorhersagedaten in Form von ASCII CSV Dateien zur Verfügung. Über eine Zeitsteuerung und einem Script wurden diese Dateien heruntergeladen, der Dateiname so abgeändert, dass der Zeitstempel eindeutig wird und auf dem Projektserver archiviert.

Es wurden Vorhersagedaten für die Bundesländer Bayern (P01) und Nordrhein-Westfalen (H01) bereitgestellt.

Pos	Anbieter	Hauptsitz	Datenarchivierung				geogr. Auflösung
			seit	Akt.	Horizont	Zeitl. Auflösung	
1	DWD Deutscher Wetterdienst	Offenbach, Deutschland	24.11.2015	1 h	24 h	1 h	Messstellen
2	MeteoBlue AG	Basel, Schweiz	05.01.2016	6 h	144 h	1 h	ausg. Segmente Raster
3	GWC Global Weather Corporation/INRIX	Bolder, CO, USA	15.03.2016	15 min	12 h	15 min	500 m Segmente A 9, A 4, St2139
4	DTN	Burnsville, MN, USA	21.03.2016	1 h	24 h	1 h	Messstellen
5	FORECA LTD.	Espoo, Finnland	08.09.2016	1 h	24 h	1 h	20 m Segment aller Teststrecken

Tab. 36: Übersicht der archivierten Straßenwetter-Prognosen zur Validierung

Die archivierten Dateien sind von der Struktur FDX<Land>_DWOFF_DDhmm_MMJJJJ.csv

Die Spalten in der Datei sind in Tabelle 39 aufgeführt. Die Codierung der Ausprägungen für den Belagszustand (SZ_...) ist in Tabelle 37 aufgelistet. Dazu die Zuordnung zu der im Projekt einheitlich verwendeten Codierung. Die Ausprägungen für die

SZ enum	FBZ enum	FBZ [enum] – Ausprägung
0	1	Dry – Trocken
1	3	Damp_2 – Feucht
2	4	Wet – Nass
4	5	Snow – Schneeglätte
3	6	Frost – Reifglätte
5, 6	8	Black_Ice – Glatteis/Eisglätte
7	255	Unknown – Unbestimmt

Tab. 37: Codierung der Ausprägungen (Enumerations) für Straßenzustand (SZ), sowie die Zuordnung zu der im Projekt einheitlich zu verwendenden Ausprägungen

WR enum	TOP enum	TOP [enum] – Ausprägung
0	0	Kein Niederschlag – no precipitation
5	24	Gefrierender Regen – freezing rain
1	40	Niederschlag unbestimmt/Schneereggen – precipitation unknown type
2	60	Regen – rain
3	68	Schneereggen – rain and snow
4	70	Schnee – snow
--	89	Hagel – hail

Tab. 38: Liste der Codierung der Ausprägungen (Enumerations) für Niederschlagsart (WR), sowie die Zuordnung zu den im Projekt einheitlich verwendeten Codierungen und Ausprägungen für Niederschlagsart (TOP = Type of Precip.)

Pos	Legende	Bedeutung	Einheit	Auflösung	Bemerkung
1	CCCC	GMA-ID	enum	--	
2	JJJJMMTTHHhh	Vorhersagezeitpunkt	--	--	
3	TT	Lufttemperatur	°C	0,1 °C	2 m über Grund
4	TDTD	Taupunkttemperatur	°C	0,1 °C	2 m über Grund
5	TS_STND	Belagstemperatur Standard Strecke	°C	0,1 °C	
6	SZ_STND	Belagszustand Standard Strecke	enum	--	
7	TS_MINR	Belagstemperatur Strecke geringer Verkehr	°C	0,1 °C	
8	SZ_MINR	Belagszustand Strecke geringer Verkehr	enum	--	
9	TS_SHAD	Belagstemperatur Schatten Strecke	°C	0,1 °C	
10	SZ_SHAD	Belagszustand Schatten Strecke	enum	--	
11	TS_URBA	Belagstemperatur Städtische Strecke	°C	0,1 °C	
12	SZ_URBA	Belagszustand Städtische Strecke	enum	--	
13	TS_BRID	Belagstemperatur Brücke	°C	0,1 °C	
14	SZ_BRID	Belagszustand Brücke	enum	--	
15	NEF	effektive Bewölkung	1/8	1	ganzzahlig Achtel
16	RR	Niederschlagsmenge 1 h	mm/h	0,1 mm/h	
17	WR	Niederschlagsart	enum	--	
18	DD	durchschn. Windrichtung ü. Grund	°	10°	
19	FF	durchschn. Windgeschwindigkeit ü. Grund	km/h	0,1 km/h	
20	FX	max. Windboe	km/h	0,1 km/h	10 m ü. Grund ab

Tab. 39: Dateistruktur Straßenwettervorhersagen des DWD auf SWIS Messstellen bezogen in stündl. Auflösung

Niederschlagsart sind in Tabelle 38 aufgezeigt. Auch hier die Zuordnung für TOP (= Type of Precipitation), mit den im Projekt verwendeten Enumerations.

6.4.2 MB meteoblue AG

Die Firma meteoblue AG stellte ebenfalls auf ihrem FTP Server Vorhersagedaten in Form von ASCII CSV Dateien zur Verfügung. Über eine Zeitsteuerung und einem Script wurden die Dateien auf den Projekt-Server des AN geladen und dort archiviert.

Der Dateiname setzt sich wie folgt zusammen:

<Bereich>_MICKS_clouds-1h_basic-1h_wind-1h_solar-1h_JJMMDDhh.csv

Bereich steht für entweder 01 (St2139) oder 02 (A9) für die Teststrecke. Die geogr. Referenzierung arbeitet bereits mit den RSEG_ID's der Streckenmodelle. Es werden aber nur die Segmente unterstützt an deren Position eine Messstelle sich befindet. Die Vorhersagen sind für alle 6 h, reichen aber bis 144 h in die Zukunft.

Type enum	TOP Code	Code – Ausprägung
0	tbc	Kein Niederschlag – no precipitation
5	tbc	Gefrierender Regen – freezing rain
1	tbc	Niederschlag unbestimmt/Schneereggen – precipitation unknown type
2	tbc	Regen – rain
3	tbc	Schneereggen – rain and snow
4	tbc	Schnee – snow
--		

Tab. 40: Codierung der Ausprägungen (Enum) für Niederschlagsart (precipitation_type) in den Vorhersagen der MeteoBlue

Die Ausprägungen (Enumerations) der Zustandsgröße Niederschlagsart ist in Tabelle 40 gelistet. Der Inhalt der Vorhersagedateien ist in Tabelle 41 gelistet.

6.4.3 GWC/INRIX Global Weather Corporation

Global Weather Corporation bietet nahezu weltweit für den Verkehrsinformationsanbieter INRIX ver-

Pos	Legende	Bedeutung	Einheit	Auflösung	Bemerkung
1	name	RSEG_ID	enum	--	Straßensegment ID
2	time	YYYY-MM-DDThh:mm+hh:mm			Vorhersagezeitpunkt
3	temperature	Lufttemperatur	°C	0,01 °C	
4	relativehumidity	Rel. Luftfeuchte	%	1 %	
5	precipitation_type	Niederschlagsart	enum	--	
6	precipitation	Niederschlag	mm/h	0,01 mm/h	
7	precipitation_probability	Niederschlagswahrscheinlichkeit	%	1 %	
8	pictocode	Pictogramm	enum	--	nicht genutzt
9	totalcloudcover	Gesamte Wolkenbedeckung	%	1 %	
10	lowclouds	Bedeckung niedrige Wolken	%	1 %	
11	midclouds	Bedeckung mittelhohe Wolken	%	1 %	
12	highclouds	Bedeckung hohe Wolken	%	1 %	
13	visibility	Sichtweite	m	1 m	
14	winddirection	Windrichtung	°	1°	
15	windspeed	Windgeschwindigkeit	m/s	0,01 m/s	
16	gust	Windspitzen	m/s	0,01 m/s	
17	ghi_backwards	Sonneneinstrahlung rückwärts	W/m ²	0,01 W/m ²	

Tab. 41: Dateistruktur der Straßenwettervorhersagen der MeteoBlue AG bezogen auf Streckensegmente an Messstellen

Pos	Legende	Bedeutung	Einheit	Auflösung	Bemerkung
1	ID	Ortskennung (INRIX)	enum		
2	Lat	Breitengrad	°	0,0001°	
3	Lon	Längengrad	°	0,0001°	
4	IssueTime	YYYYMMDD/hh(:mm)		--	Ausgabezeitpunkt
5	ValidTime	YYYYMMDD/hh(:mm)		--	Vorhersagezeitpunkt
6	T	Lufttemperatur	°C	0,1 °C	2 m ü. Grund
7	wind_speed	Windgeschwindigkeit	m/s	1 m/s	
8	wind_dir	Windrichtung	°	1°	
9	qpf01	Niederschlagsmenge	mm/h	1 mm/h	letzte Stunde vor gültig
10	precip_type	Niederschlagsart	enum	--	
11	visibility	Sichtweite	km	0,1 km	
12	road_T	Belagstemperatur	°C	0,1 °C	
13	water_depth	Wasserfilmdicke	mm	0,01 mm	
14	snow_depth	Schneefilmdicke	mm	1 mm	
15	road_condition	Belagszustand	enum	--	

Tab. 42: Dateistruktur der Straßenwettervorhersagen der GWC/INRIX bezogen auf ein Strecken-Raster von 500 m Auflösung

kehrrelevante Wetterwarnungen und Prognosen an. GWC pushte Vorhersagedateien direkt auf den Projektserver des AN. Es gibt zwei Arten von Dateien, einmal Vorhersagen für die volle Stunde und Vorhersagen mit 15-min Auflösung zwischen den vollen Stunden. Der Inhalt ist Tabelle 42 zu entnehmen. Die Dateien sind folgendermaßen benannt:

„inrix_bast_points_YYYYMMDDhh.mm.txt“ und „inrix_bast_points_subhour_YYYYMMDDhh.mm.ss.txt“.

GWC/INRIX benutzt eigene Ortskennungen für die 500 m Streckensegmente. Diese stimmen nicht mit dem im Projekt definierten Kennung für die Streckensegmente (RSEG_ID) überein, daher musste eine Zuordnungstabelle mithilfe der ebenfalls angegebenen WGS84 Koordinaten erstellt werden. Ausprägungen für die Zustandsgrößen Niederschlagsart sind in Tabelle 43, für den Belagszustand in Tabelle 44 definiert.

precip_type Niederschlagsart		
code	enum	remarks
0	kein	no
1	Regen	rain
2	Schnee	snow
3	Schneeregen	snow/rain
4	Graupel	sleet
5	Eisregen	freezing rain

Tab. 43: Codierung der Ausprägungen (Enum) für die Niederschlagsart (precip_type) der GWC/INRIX Vorhersagen

road_condition Belagszustand		
code	enum	remarks
1	trocken	dry
2	nass	wet
3	Eis/Schnee	ice/snow
4	Wasser/Schnee	water/snow
5	Tau	dew
6	schmelz. Schnee	melting snow
7	Frost	frost
8	gefrierender Regen	freezing rain

Tab. 44: Codierung der Ausprägungen (Enum) für den Belagszustand (road_condition) der GWC/INRIX Vorhersagen

6.4.4 (Telvent) DTN (ehem. Schneider Electric)

Telvent DTN (wurde während der Projektdauer auf DTN umbenannt und gehört nicht mehr zu Schneider Electric) bietet speziell für den Straßenwinterdienst ein MDSS (Maintenance Decision Support System) in USA und Europa an. Das System wird als Cloud Dienst angeboten unter dem Namen „WeatherSentry Online (WSO)“. Dazu werden Belagsprognosen auf Basis der Straßenwetterstationen erstellt.

Telvent DTN puschte seit Ende März 2016 Vorhersagedateien in ASCII CSV Format regelmäßig auf den Projektserver des AN. Die Vorhersagen werden stündlich aktualisiert und reichen bis 24 h mit 1 h Auflösung. Die Vorhersagen sind direkt auf die SWIS Messstellen der Teststrecken bezogen.

TypeOfPrecip Niederschlagsart		
code	enum	remarks
11	Regenschauer	rain showers
12	Regen	rain
13	Schneeschaer	snow showers
14	Schnee	snow
15	Gewitter	thunderstorms
16	Schneeregen	rain/snow mix
19	gefrierender Regen	freezing rain

Tab. 45: Codierung der Ausprägungen (Enum) für Niederschlagsart (TypeOfPrecip) der Vorhersagen von Telvent DTN

RoadSurfaceCondition Belagszustand		
code	enum	remarks
0	trocken	dry
2	nass	wet
5	Schnee	snow
7	Eis	ice

Tab. 46: Codierung der Ausprägungen (Enum) von Belagszustand (RoadSurfaceCondition) der Vorhersagen von Telvent DTN

Die Dateien werden folgendermaßen gekennzeichnet: MICKSYYYYMMDDhhmm.csv.

Die Ausprägungen für die Zustandsgrößen Niederschlagsart sind in Tabelle 45 und für Belagszustand sind Tabelle 46 definiert. Die Dateistruktur ist in Tabelle 47 aufgeführt.

6.4.5 FORECA

FORECA ist ein privater Wetterdienstleister aus Finnland und bietet für Deutschland und andere europäische Länder Straßenwetterprognosen an. FORECA liefert seit Sept. 2016 auf alle 20-Meter Segmente der Teststrecken Straßenwettervorhersagen, einschließlich Wasserfilm und Schneehöhe auf Belag.

FORECA liefert im Verzeichnis /FORECA/Forecasts/... im stündlichen Abstand gepackte Dateien. Eine Datei beinhaltet alle Zeitstempel im Raster von 1 h bis zu einem Vorhersagehorizont von 24 h

Pos	Legende	Bedeutung	Einheit	Auflösung	Bemerkung
1	StationID	DTN Stations-Kennung	enum	--	DTN eigene Kennung
2	StationPlacename	Name Messstelle	Text	--	Name Station
3	StationLatitude	Breitengrad	°	0,000001°	Dezimalgrad 6 stell.
4	StationLongitude	Längengrad	°	0,000001°	Dezimalgrad 6 stell.
5	ModelRunDateTime	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.000			Modellzeitpunkt
6	ValidDateTime	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.000			Vorhersagezeitpunkt
7	Temperature	Lufttemperatur	°C	0,1 °C	
8	Dewpoint	Taupunkttemperatur	°C	0,1 °C	
9	RelativeHumidity	rel. Luftfeuchte	%	1 %	
10	WindDirection	Windrichtung	°	1°	
11	WindSpeed	Windgeschwindigkeit	m/s	0,1 m/s	
12	TypeOfPrecip	Niederschlagsart	enum	--	
13	ProbabilityOfPrecip	Niederschlagswahrscheinlichk.	%	1 %	
14	IntensityOfPrecip	Niederschlagsintensität	mm/h	0,1 mm/h	
15	RoadSurfaceTemperature	Belagstemperatur	°C	0,1 °C	
16	RoadSnowDepth	Schneefilmdicke	mm	0,1 mm	
17	RoadSurfaceCondition	Belagszustand	enum	--	

Tab. 47: Dateistruktur der Straßenwettervorhersagen von Telvent DTN, bezogen auf Messstellen der Teststrecken

Pos	Legende	Bedeutung	Einheit	Auflösung	Bemerkung
1	FORECASTTIME	Vorhersagezeitpunkt		1 h	YYYYMMDDhhmmss
2	RSEC	Streckensegment-ID	Enum		z. B. 31000001
3	AT	Lufttemperatur	°C	0,1 °C	
4	DPT	Taupunkttemperatur	°C	0,1 °C	
5	TOP	Niederschlagsart	Enum	--	
6	IOP	Niederschlagsintensität	mm/h	0,1 mm/h	
7	ELOUD	Effective Bewölkung	0,1...8	1/8	
8	RST	Belagstemperatur	°C	0,1 °C	
9	RSC	Fahrbahnzustand	enum	--	
10	WFT	Wasserfilmdicke	µm	1 µm	
11	SH	Schneehöhe	mm	0,001 mm	

Tab. 48: Datenstruktur der von FORECA gelieferten Vorhersagedaten

und geogr. Bezogen auf alle in den generellen Anforderungen definierten Streckensegmente und deren Index. Die Datenstruktur kann der Tabelle 48 entnommen werden. In Tabelle 49 sind die für die Ausprägungen verwendete Kodierung für Niederschlagsart und Fahrbahnzustand angegeben.

Die Ausprägungen für die Zustandsgrößen Niederschlagsart und Fahrbahnzustand entsprechen de-

nen in der Anforderungsbeschreibung. Es werden aber nicht alle Ausprägungen unterstützt.

Die Datendateien sind wie folgt benannt:
YYYYMMDDhh0000_foreca_roadcast.csv

YYYYMMDD steht für Jahr, Monat und Tag, hh0000 steht für die volle Stunde.

z. B.: 20160909200000_foreca_roadcast.csv

Enumeration for TOP Type of Precipitation		
Enum	Description of Enum	Remarks
0	No Precipitation	
60	Rainfall	Liquid precip.
70	Snowfall	Frozen precip.
Enumeration for RSC Road Surface Condition		
Enum	Description of Enum	Remarks
0	Dry	WFT < 0,010 mm
1	Damp	0,01 < WFT < 0,030 mm
2	Wet	WFT > 0,03 mm and no frozen contaminant
3	Ice developing	Ice developing on road surface
4	Sleet	Snow and liquid fraction
5	Snow	Snow covered
6	Freezing rain	WFT > 0,01 and rain and freezing conditions
7	Ice	WFT > 0,01 mm and frozen contaminant
255	No information possible	Due to condition there is no classification possible

Tab. 49: Tabelle der Ausprägungen (Enumerations) der Zustandsgrößen Niederschlagsart (TOP = Type of precipitation) und Fahr-
bahnzustand (RSC = Road Surface Condition) der von FORECA gelieferten Vorhersagedaten

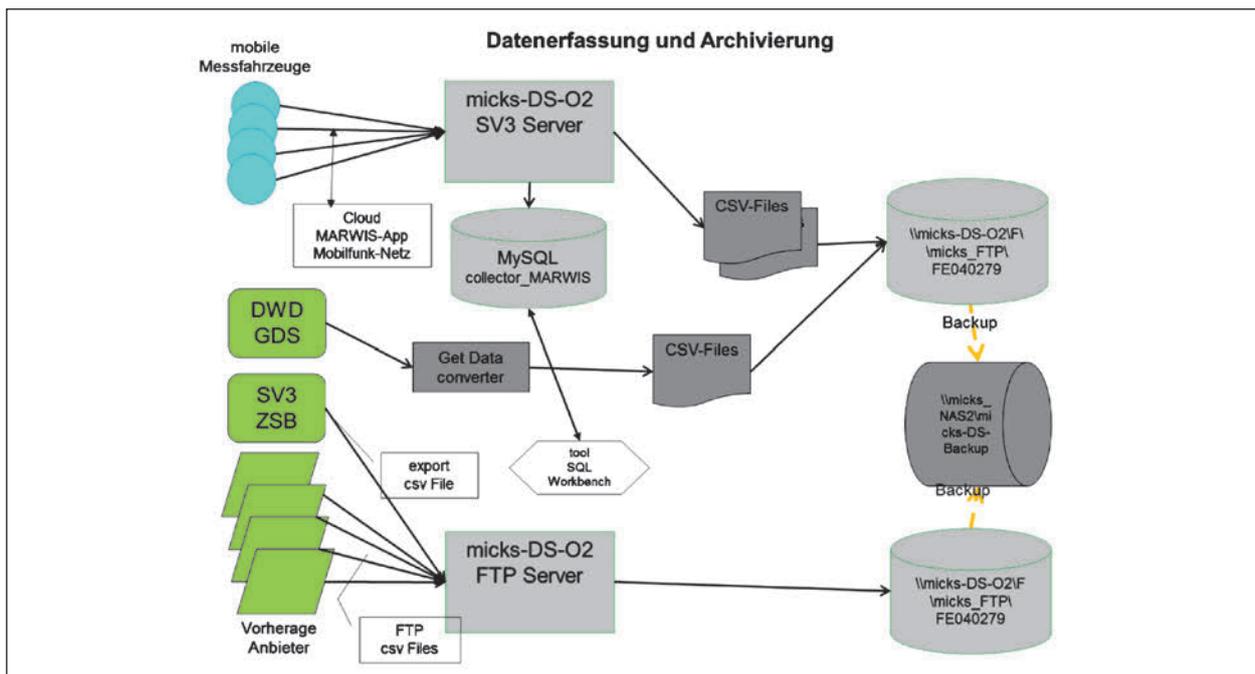


Bild 48: Skizze Architektur und Datenfluss des Projektserver des AN(mickS/LUFFT)

6.5 Archivierung der Daten und Projekt Server

Gleich zu Beginn des Projektes hat der AN auf eigener Infrastruktur einen FTP-Projektserver eingerichtet, der dazu dient die erfassten Daten zu verarbeiten und zu archivieren. Ebenso ein SV3-Server (Smartview3) der für die Erfassung aller im Projekt anfallenden mobilen Daten dient.

Die Bandbreite für Upload zum Server betrug ca. 16 MBs. Damit war die Erfassung der Daten ausreichend gesichert. Die Bandbreite für Download beträgt ca. 1 MBs, was für einen operationellen Einsatz nicht ausreichen würde. Im Bedarfsfall, wenn höhere Download Bandbreiten notwendig waren, konnte auf extern gehostete Server des AN ausgewichen werden.

Subverzeichnisse	user										
	micKS	PMBLue	BASt	MeteoBlue	GWC&INRIX	FORECA	MeteoGroup	DTN	Viechtach	DWD	cam_viechtach
\\Doc\workplan	X	X	X								
\\Doc\reports	X	X	X								
\\TrialRoute_Data	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
\\DWD (eigener Abholprozess aus ftp.outgoing.dwd.de)	X	X	X							X	
\\GWC&INRIX	X	X	X		X						
\\FORECA	X	X	X			X					
\\MeteoBlue	X	X	X	X							
\\MeteoGroup	X	X	X				X				
\\DTN	X	X	X					X			
\\MOBIL_Greding (SV3 Export)	X	X	X								
\\MOBIL_Viechtach (SV3 Export)	X	X	X								
\\MOBIL_BASt (SV3 Export)	X	X	X								
\\GMA_A4_NRW (Offline Export BORMA)	X	X	X								
\\GMA_BASt_Testfeld (Offline download)	X	X	X								
\\GMA_Greding (GDS Converter aus ftp-outgoing2.dwd.de)	X	X	X								
\\GMA_Viechtach (SV3 ABDN Export)	X	X	X						X		
\\CAM_A9_Greding (SV3 ABDN Export)	X	X	X						X		
\\CAM_Viechtach (SV3 ABDN Export)	X	X	X								X
\\CAM_BASt_Testfeld (offline Download)	X	X	X								
\\GMA_BASt (GDS Converter aus ftp-outgoing2.dwd.de)	X	X	X								
\\MOBIL_TM (SV3 Export) (Thermal mapping Data)	X	X	X								
\\MOBIL_CAM Mobile Video/Bild Dateien	X	X	X								

Tab. 50: Ordnerstruktur auf dem FTP Server, sowie die Accounts mit Zugriffsrechten

Die Architektur bzw. Datenfluss ist in Bild 48 skizziert. Die Dateiordnerstruktur auf dem Projekt-FTP-Server ist in Tabelle 50 gezeigt.

7 Plausibilisierung und Validierung der Messdaten

7.1 Unsicherheiten der geografischen Referenzierung mobiler Daten

Für die Ortsbestimmung der mobilen Daten wurde die GPS Funktionalität der Tablets, im Projekt überwiegend das Apple miniIPAD, genutzt. Diese Lösung bietet das vorteilhafteste Kosten/Nutzen-Verhältnis. Allerdings muss man mit Unsicherheiten der

Ortsbestimmung leben, was aber generell bei GPS Geräten mehr oder weniger der Fall ist.

Für die Visualisierung und Überprüfung der geografischen Positionen standen im Projekt eine Reihe Software-Anwendungen (GIS) zur Verfügung. Im Wesentlichen sind das Microsoft Map-Info, Google-Earth, Google-Maps, OpenStreetMap sowie Microsoft Bing-Maps. MS Map-Info wird auch zur Konvertierung von im CSV Format vorliegender Positionsdaten ins GPX Format (für GeoBasis-DE/BKG(2020) etc.) verwendet.

Wenn mobile Messdaten mit geografischen Koordinaten verknüpft werden, muss man auch zeitliche Verzögerungen beachten. Sensoren mit einer Reaktionszeit von 1 Sekunde oder mehr, werden bei einem Erfassungsintervall von 1 Sekunde grund-

sätzlich entsprechend verzögert zugeordnet. Der Messwert erscheint dann unter Umständen erst – je nach Fahrgeschwindigkeit – an einem viel weiter in Fahrtrichtung verschobenen Ort, einige Abtastpunkte später.

Die Genauigkeit der GPS Ortsbestimmung selbst, hängt auch von der Empfangsqualität des Satellitensignals ab, wie es an den Geräten, die meist im Führerhaus befinden und ohne Außenantenne betrieben werden darstellt. Grundsätzlich kann aber davon ausgegangen werden dass die Unsicherheit im Bereich von ± 15 m beträgt. Bei der Verwendung von GIS Anwendungen muss man zudem noch eine Unsicherheit des dortigen Kartenmaterials berücksichtigen, die aber deutlich niedriger liegt.

Die Bestimmung der Ortsunsicherheit wurde im Laufe des Projektes genauer untersucht. Die Bild 49 zeigt die Streuung der geogr. Messorte über eine Vielzahl von Überfahrten innerhalb eines Filterbereichs mit einer Ausdehnung von ca. ± 15 m. Grundsätzlich reicht die Ortungsgenauigkeit erwartungsgemäß natürlich nicht aus, um die genaue Fahrspur des Fahrzeuges innerhalb einer Richtungsfahrbahn zu bestimmen. Aber die Zuordnung innerhalb der vorgegebenen Segmentlänge war dadurch gut möglich. Fehlinterpretationen, z. B. wenn parallel zur Fahrbahn an auf Rastplätzen, Beschleunigungsspuren oder nahegelegene Straßen gefahren wurde, konnte dies durch zusätzliche Filterung (Geschwindigkeit, Kursrichtung etc.) so gut wie möglich eliminiert werden.

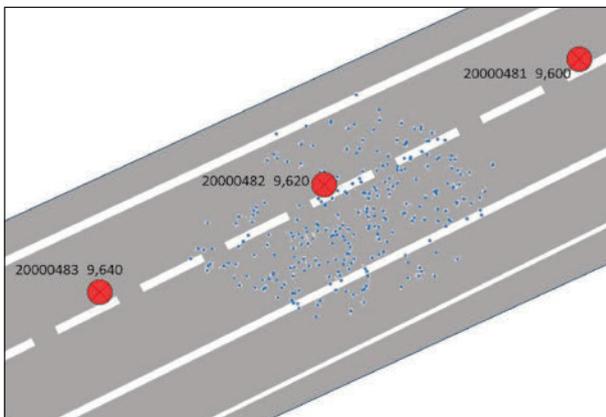


Bild 49: Darstellung der Positionen der Datensätze innerhalb einem ca. 15 m Toleranzbereich. Der Abstand der Punkte lässt die absolute Auflösung der GPS Positionen erkennen. die roten Punkte sind die Referenzkoordinaten der Segmente des Streckenmodells (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020))

7.2 Berührungslose Temperaturmessung

Die berührungslose Temperaturmessung (Pyrometer) basiert auf der Detektion der von der Belagsoberfläche ausgehenden Wärmestrahlung (siehe auch Kapitel 6.2.1). Jeder Körper hat abhängig vom Material und der Beschaffenheit unterschiedliche Abstrahlungseigenschaften. Diese Eigenschaft wird durch den Emissionsgrad quantifiziert. Der Emissionsgrad ist allerdings schwierig im Einzelfall zu bestimmen. Dazu kommt, dass die Bedeckung des Belags mit allen Arten von Wasser und sonstigen Verschmutzungen zusätzlich die Emission verändert. Als weiterer Störeinfluss bei der Messung ist die Strahlung des Himmels und der Umgebung, die von der Oberfläche mehr oder weniger reflektiert wird und zusätzlich zu der Wärmestrahlung des eigentlichen Messobjekts mitgemessen wird, ohne dass der Sensor diese Strahlungsquellen unterscheiden könnte.

Diese Unsicherheiten muss man bei den Auswertungen berücksichtigen.

Als Referenz zur Überprüfung der Pyrometer stehen die an den Straßenwetter-Messstellen in den Straßenbelag eingebauten Sensoren, als Referenz-Pyrometer ein hochgenaues HEITRONIC Labor-Pyrometer und ein „handheld“ Thermodetektor GIS 1000 C von Bosch (siehe Bild 51) zur Verfügung. Bei mehreren Stichproben von Vergleichsmessungen bei unterschiedlichen Bedingungen mit einem kalibrierten HEITRONIC Pyrometer und dem GIS1000C hat sich bestätigt, dass die Messunsicherheit des GIS im Bereich von $\pm 0,8$ °C liegt (siehe u. a. Bild 50). Das Gerät kann daher im praktischen Einsatz vor Ort durchaus für Kontrollmessungen herangezogen werden. Vor allem ermöglicht dieses Gerät auch eine Bildaufnahme des Messobjekts mit Messwerteinblendung, was für Dokumentationszwecke gut geeignet ist.



Bild 50: Vergleichsmessung/Kalibrierung MARWIS am Streufahrzeug SM Viechtach bei bedecktem Himmel (Foto: Karl Schedler)

Bei den Referenzpyrometern wird der für Asphalt übliche Emissionsgrad von 0,97 eingestellt. Bei einem Betonbelag dürfte eher 0,94 richtig sein. Auf den Teststrecken findet sich allerdings nur Asphalt.

Die Einstellung der berührungslosen Temperaturmessung des MARWIS am Messfahrzeug wird vor Ort überprüft mit dem Pyrometer GIS1000C und zusammen mit der Temperatur und Feuchte der Umgebungsluft. Im Beispiel Bild 52 stimmt die gemessene Temperatur $\pm 0,1$ °C, sowie die mit Kontaktthermometer (TESTO geeicht) gemessene mit der am MARWIS angezeigten Temperatur überein.



Bild 51: Handheld Pyrometer GIS 1000 C von Bosch und rechts ein HEITRONIC Labor-Pyrometer als Referenzinstrumente (Foto: Karl Schedler)

Ebenso wurden bei der AM Greding solche Kontrollmessungen durchgeführt, teilweise auch mit hochgenauem Labor-Pyrometer von HEITRONIC.

7.2.1 Vergleich berührungslose Pyrometer mit eingebauten Bodensonden

Es wurden an einigen GMA im Bereich der SM Viechtach die Temperaturen berührungslos gemessen, und zwar direkt auf der Sonde und etwas neben der Sonde im Asphalt. Bei der späteren Auswertung der archivierten Daten der GMA wurden zu dem dokumentierten Zeitpunkt die jeweils gemeldeten Temperaturen verglichen. Bei der GMA Predigtstuhl hat sich nachträglich herausgestellt, dass die Datenübermittlung per Mobilfunk in dem Zeitraum leider gestört war.

Wie in Bild 53 zu sehen ist, weicht die direkt und die daneben gemessene Temperatur ungefähr um 0,5 °C ab. Grundsätzlich scheint die daneben gemessene immer etwas höher zu sein, als die direkt auf der Sonde gemessene. Bei der GMA Pfahl ist der Unterschied noch gravierender – hier sind es 1,3 °C. Wenn man davon ausgeht, dass die auf dem Asphalt daneben herrschende Temperatur eher dem entspricht, was man für den Winterdienst als Belagstemperatur des Streckenabschnitts benötigt, dann sollte die von der GMA gemeldete Temperatur eher dem entsprechen. Das ist auch in etwa



Bild 52: Kontrolle und Kalibrierung der MARWIS Temperaturmessung am IceCar4. Zusätzlich Vergleich mit Kontaktthermometer. MARWIS-Anzeige stimmt exakt mit Pyrometer überein. Kontaktthermometer zeigt um 0,1 °C höhere Temperatur und damit deutlich in der Toleranz (Fotos: Karl Schedler)

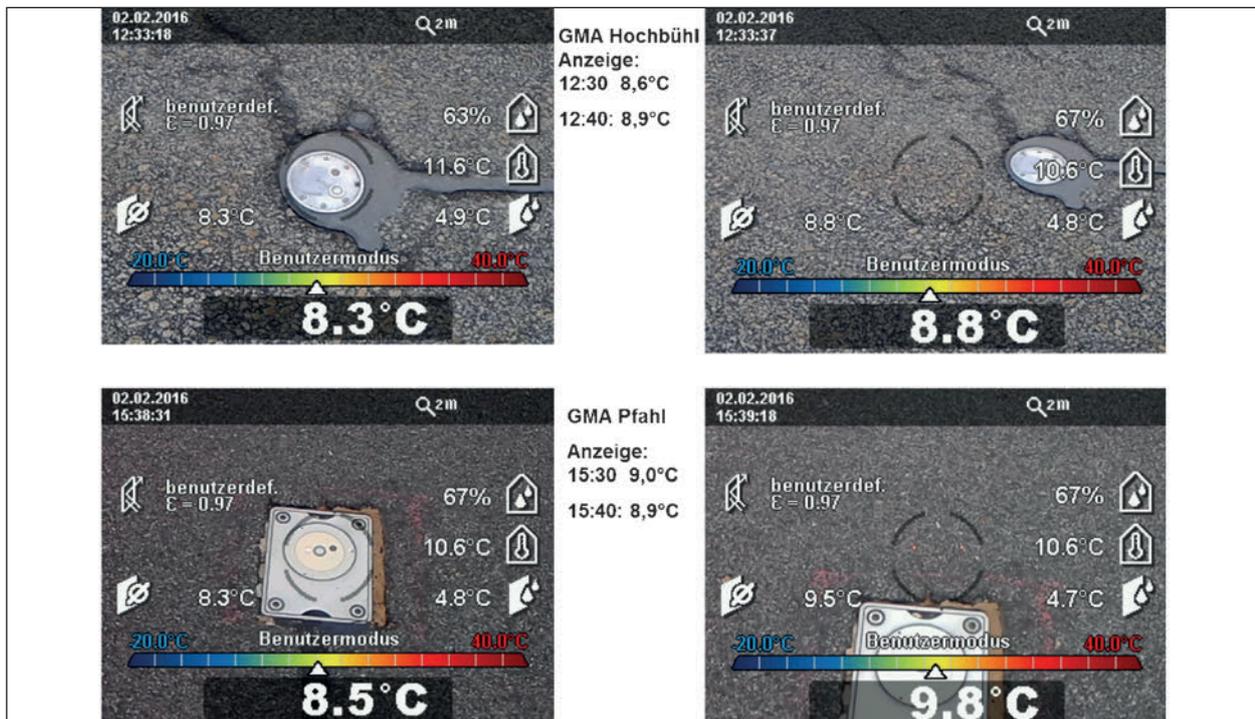


Bild 53: Vergleiche der berührungslos gemessenen Temperaturen direkt auf der Sonde und auf dem Asphalt neben der Sonde. Am Beispiel der GMA Pfahl (ARCTIS, Fa. Boschung) und GMA Hochbühl (IRS31, Fa. LUFFT). Wetterbedingung: Trocken aber bedeckt

der Fall. Bei der GMA Hochbühl entspricht der gemeldete Wert sogar ziemlich genau dem berührungslos gemessenen Wert auf dem Asphalt. Bei der GMA Pfahl weicht der Wert noch um $-0,8\text{ °C}$ ab. Dass die berührungslos, direkt auf dem Sondenkörper, gemessenen Temperaturen tendenziell niedriger sind als auf dem Asphalt daneben kann durchaus zwei Ursachen haben. Zum einen dürfte der Emissionsgrad des Sondenkörpers vermutlich vom Asphalt abweichen; weiterhin könnte auch bauartbedingt die Sonde nicht vollständig die Temperatur des umgebenen Asphalts annehmen. Allerdings sollte der Messfühler so platziert sein, dass gewährleistet ist, dass er repräsentativ für den Belag messen kann. Das ist zumindest für die Station Hochbühl der Fall. Beide Fahrbahnsonden sind passive Sonden.

7.2.2 Vergleich mobile Temperatur zu stationären Bodensonden

Um die Temperaturmessungen des mobilen Sensor mit denen des eingebauten Sensors zu vergleichen, wurden alle Datensätze aus den archivierten mobilen Daten des Streufahrzeuges Lkw (Mobil_ID 20815) im ausgewählten Zeitraum gefiltert nach den Datensätzen, bei denen die geografische Posi-

tion im Toleranzbereich von $\pm 10\text{ m}$ um den Ort der Fahrbahnsonde der GMA Predigtstuhl liegen. Dabei sind 404 Datensätze ausgefiltert worden. Da die GMA leider häufige Datenausfälle durch die Mobilfunkübertragung aufweist, blieben noch 169 Datensätze übrig. Trotzdem eine ausreichende signifikante Zahl von Stichproben. Die Korrelation der vom MARWIS am Einsatzfahrzeug bei der Vorbeifahrt am Standort der GMA angezeigten Oberflächentemperatur zur der von der eingebauten Sonde (IRS31) angezeigten Belagstemperatur im gleichen Zeitraum ist in Bild 54 zu sehen. Selbstverständlich muss dabei sowohl eine gewisse zeitliche als auch geogr. Unschärfe in Kauf genommen werden. Die zeitliche Unschärfe ergibt sich aus der Tatsache, dass das Erfassungsintervall bei der GMA 10 min beträgt.

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wetter- und Straßenzustände und trotz der zusätzlichen örtlichen und zeitlichen Unschärfe der Messungen, liegen die Werte sogar innerhalb der theoretisch für die Sensoren anzusetzenden Toleranzen von min. $\pm 1\text{ °C}$!

Die einfache mittlere Abweichung (Bias) über alle Daten liegt bei $+0,5\text{ °C}$ und der Wert für die mittlere absolute Abweichung liegt bei $\pm 0,8\text{ °C}$. Tabelle 51

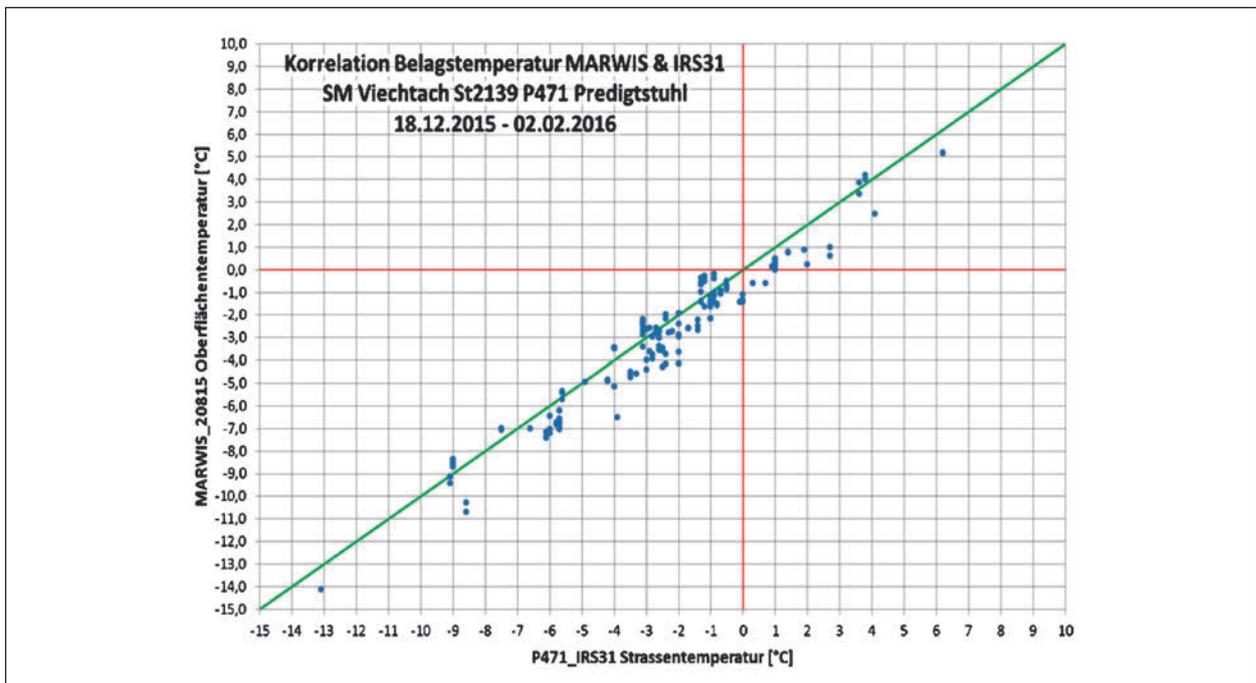


Bild 54: Korrelations-Diagramm der Temperaturmessung des mobilen Sensors bei der Vorbeifahrt an dem eingebauten Belagssensors IRS31. Die 169 Datenpunkte sind unabhängig vom Wetter- und Straßen-Zustand aufgetragen

zeigt die Differenzen getrennt nach den vom MARWIS und vom IRS31 gemeldeten Straßenzustand.

Die durchschnittliche Abweichung (Bias) der Fahrbahnoberflächentemperatur (RST) über n Stichproben wird folgendermaßen berechnet:

$$Bias_{RST} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (RST_i^{GMA} - RST_i^{MARWIS}) \quad (\text{Gl. 2})$$

Die mittlere Abweichung (MAE) der absoluten Differenzen, wie folgt:

$$MAE_{RST} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} ABS(RST_i^{GMA} - RST_i^{MARWIS}) \quad (\text{Gl. 3})$$

Anzumerken ist, dass die geringste Abweichungen beim Straßenzustand „Nass“, zumindest wenn der mobile Sensor dies meldet, zu verzeichnen ist. Die höchsten Abweichungen kommen eigentlich im trockenen Zustand vor (siehe Tabelle 51). Das war auch prinzipiell zu erwarten. Im trockenen Zustand kommt häufig Sonneneinstrahlung vor und dies bewirkt bekannter Weise ein auseinanderdriften der Temperaturen. Außerdem findet im nassen Zustand schneller ein Temperatúrausgleich auf der Fläche statt. Dennoch sind alle Abweichungen sogar weitgehend noch innerhalb der theoretischen Toleranzen, die ja streng genommen nur unter Laborbedingungen gelten.

FBZ MARWIS		BIAS	MAE
0	trocken	- 1,0	1,0
1	feucht	- 0,5	0,7
2	nass	0,3	0,3
3	Eis	- 0,3	0,7
4	Schnee/Eis	- 0,7	0,9
5	chemisch Nass	- 0,6	0,8
6	Kritische Nässe	- 0,5	0,6
FBZ IRS		BIAS	MAE
0	trocken	- 1,1	1,1
1	feucht	- 0,3	0,7
32	nass	- 0,7	0,8
64	Eis/Schnee	--	
65	Schnee	--	
66	Eis	- 0,3	0,7

Tab. 51: Statistische mittlere Abweichung Bias (= Mittelwert der Abweichungen) und MAE (= mittlere absolute Abweichung), differenziert nach dem gemeldeten Fahrbahnzustand (FBZ) nach IRS31 und nach MARWIS

Ganz anders stellt sich die Situation auf der Teststrecke 1 A 9 Greding dar. Hier wurden in den ersten Auswertungen auffällig schlechte Korrelationen gefunden.

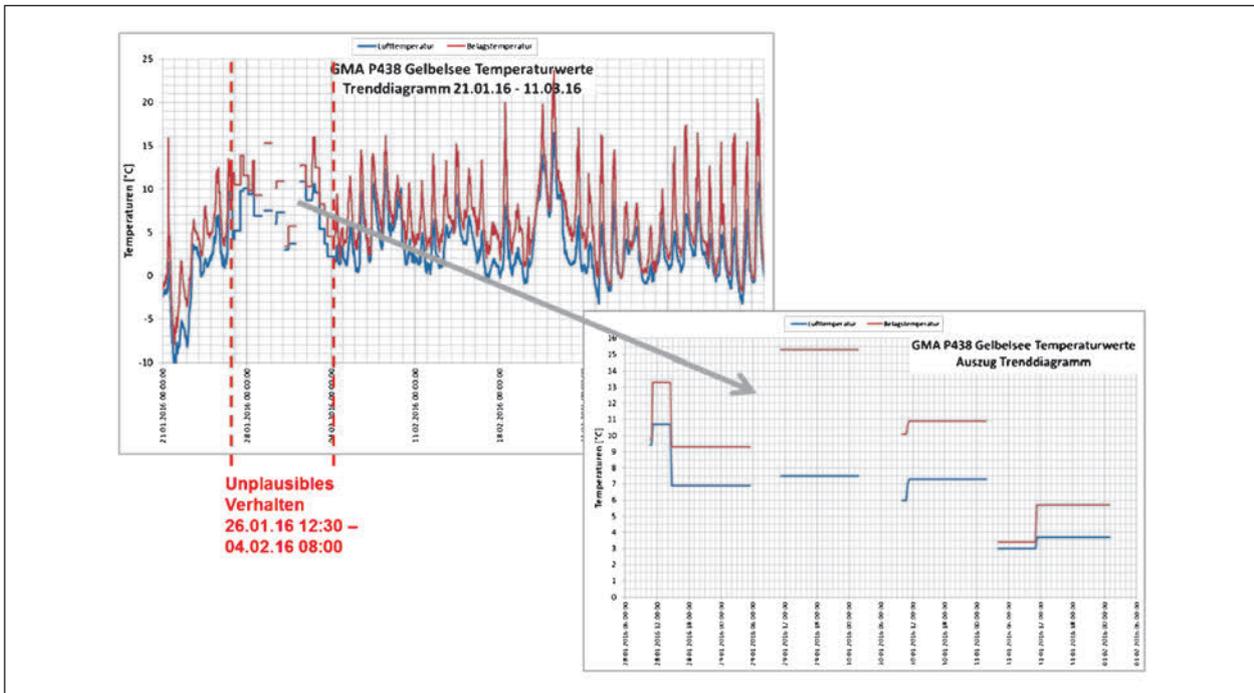


Bild 55: Trenddiagramm der Fahrhahnoberflächen- und der Luft-Temperatur im ausgewählten Zeitraum. In der dargestellten Periode ist das zeitliche Verhalten unplausibel. Dazu kommen Datenausfälle

Zunächst war aufgefallen, dass im betrachteten Zeitraum über mehrere Tage die Daten der stationären Messstellen auf der A 9 Greding im zeitlichen Verhalten sehr unplausibel waren. Beispielsweise für die Messstelle P438 Gelbensee ist dies im Trenddiagramm in Bild 55 deutlich zu erkennen. Das gleiche Bild ergibt sich bei der Messstelle P423 Offenbau. Das deutet auf ein Problem an der SWIS Rechnerzentrale hin.

Die Daten im Zeitraum des nicht plausiblen Verhaltens sind aus dem Vergleich herausgenommen worden. Trotzdem ist die Korrelation nicht besonders gut. Die Bodensonden melden durchweg eine deutlich höhere Temperatur als der mobile Sensor. Bild 56 zeigt die Korrelation grafisch. Neben der Möglichkeit, dass sowohl der mobile Sensor und/oder der stationäre Sensor ungenauer messen, als sie nach der Spezifikation sollten, könnte auch die geografische Zuordnung der Daten im GDS/DWD nicht dem entsprechen, was lt. Auskunft der ZSB/ABDN zugrunde gelegt wurde. Demnach sollten alle Fahrhahn-Daten, die im GDS/DWD bereitgestellt werden, auf der Richtungsfahrhahn Nürnberg liegen. Das entspricht auch den eigenen Beobachtungen (siehe Kapitel 6.1.1). Allerdings wird bei dem Vergleich nicht unterschieden auf welchem Fahrstreifen die Vorbei- oder Überfahrt stattgefunden

den hat. Bei einer mehrstreifigen Autobahn können dadurch womöglich größere Unterschiede auftreten, als dies beispielsweise auf der Staatsstraße St2139 Predigtstuhl der Fall ist.

Die durchschnittliche Abweichung (Bias) der Belagtemperatur im Vergleich bei Gelbensee beträgt $+2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, die mittlere absolute Abweichung beläuft sich auf $\pm 3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Derselbe Vergleich wurde auch für die GMA Offenbau (P423) angestellt. Auch hier ist die Korrelation nicht besonders gut, obgleich leicht besser. Hier beträgt die durchschnittliche Abweichung $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die mittleren absolute Abweichung beträgt $\pm 1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Allerdings deutet der Korrelationskoeffizient auf eine nicht lineare Charakteristik hin. Das Korrelationsdiagramm ist in Bild 57 zu sehen.

Bemerkenswert ist, dass hier die Abweichungen in die andere Richtung gehen, als dies bei der GMA Gelbensee der Fall ist. Hier neigt die Bodensonde der Station dazu, niedrigere Temperaturen zu messen, als es der MARWIS tut. Würde man als alleinige Ursache Messfehler des mobilen Sensors unterstellen, wäre es sehr unwahrscheinlich dass derselbe Sensor, der in der Regel nach ca. 15 Minuten von Gelbensee kommend an der GMA Offenbau vorbeifährt, plötzlich seine Messfehler kom-

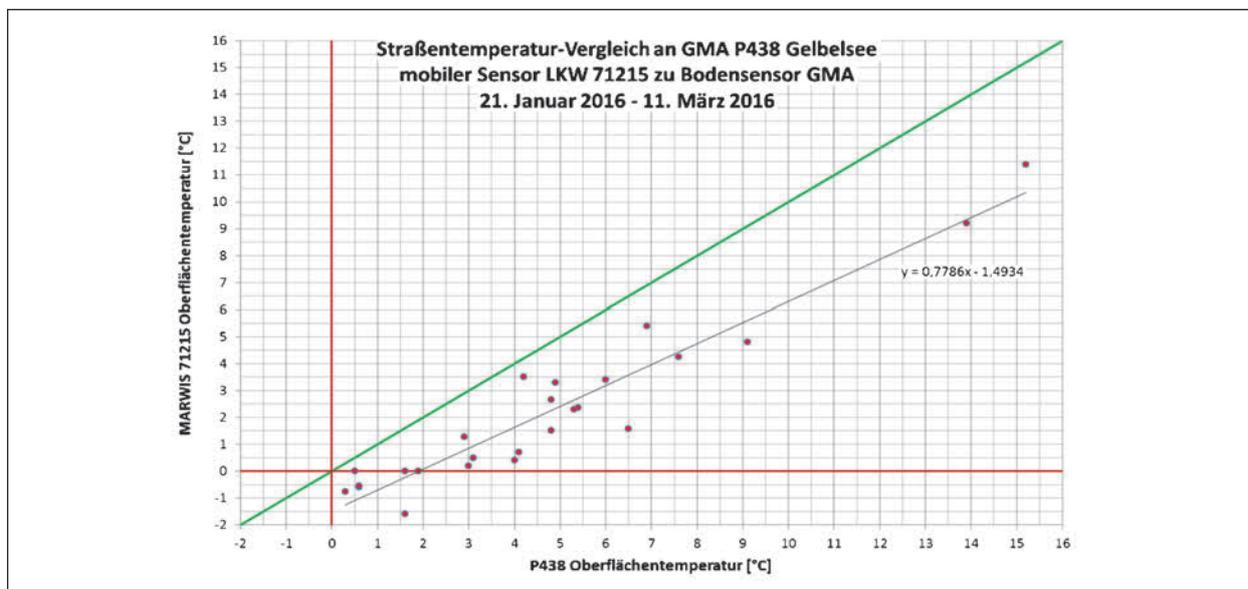


Bild 56: Korrelationsdiagramm des Vergleichs zwischen der Belagstemperatur an der Fahrbahnsonde der P438 Gelbensee in FR Nürnberg und der Oberflächentemperatur MARWIS bei der Vorbeifahrt an der Messstelle im ausgewählten Zeitraum. Unplausible Daten der P438 wurden entfernt

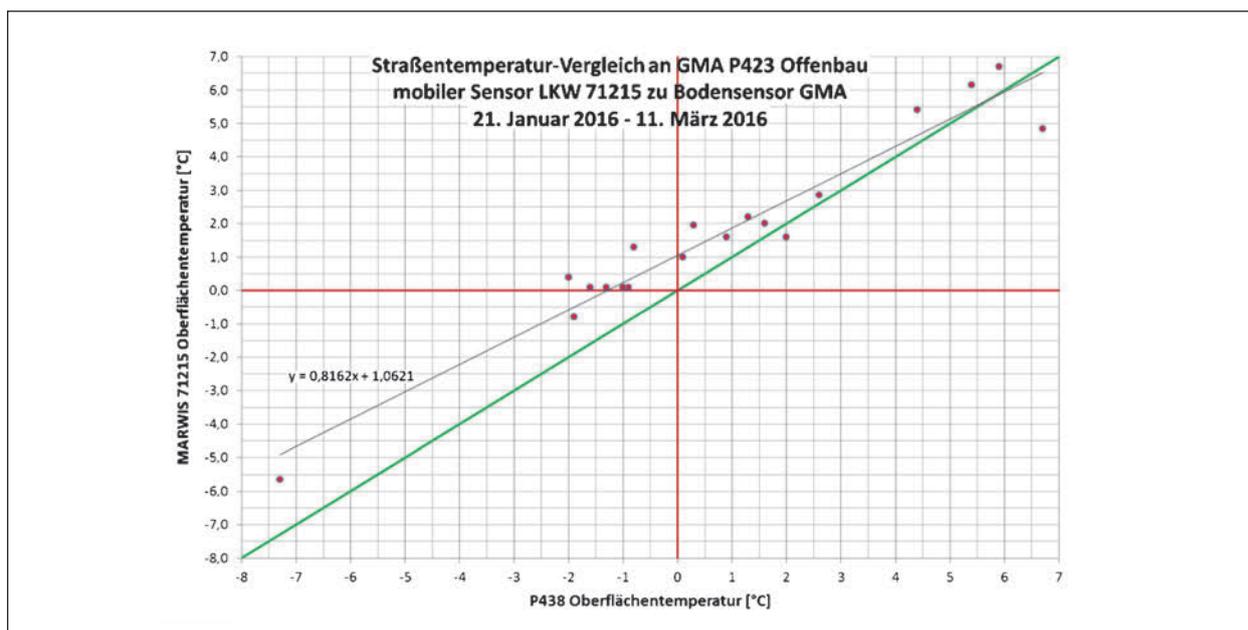


Bild 57: Korrelationsdiagramm des Vergleichs zwischen Belagstemperatur an der Fahrbahnsonde der P423 Offenbau in FR Nürnberg und der Oberflächentemperatur MARWIS bei der Vorbeifahrt an der Messstelle im ausgewählten Zeitraum. Daten im Zeitraum mit unplausiblen Verhalten sind ausgeblendet

plett in die andere Richtung umdreht. Daher dürfte die Messgenauigkeit der Bodensonden an der GMA Stationen in Zweifel zu ziehen sein. Deshalb wurden an den Standorten Offenbau und Gelbensee auf der BAB A 9 Teststrecke mit freundlicher Unterstützung der BAST und der Autobahndirektion Nordbayern (ABDN) zusätzliche Messstationen

mit moderner Technologie installiert (siehe Kapitel 6.1.2).

Auf einen Vergleich mit der Station Allersberg (P338) wird verzichtet, da im ausgewählten Zeitraum verschwindend geringe Überfahrten stattgefunden haben. Der Lkw dürfte meist vorher schon -

Offenbau II		NIRS Oberflächentemperatur			IRS Oberflächentemperatur		
		BIAS	MAE	StdDev	Bias	MAE	StdDev
alle	alle	1,0	1,4	1,6	1,0	1,1	1,3
trocken	0	0,8	1,3	1,6	0,7	1,0	1,2
feucht	1	1,1	1,1	1,2	0,8	0,6	0,7
Nass	2	0,0	0,6	0,6	0,2	0,9	1,0
Eis	3	1,4	0,9	1,2	1,9	0,8	1,0
Schnee/Eis	4						
chem.Nass	5	1,3	2,1	2,2	1,4	1,5	1,7
krit. Nass	6						

BIAS bedeutet der Mittelwert der Abweichung in °C, MAE bedeutet die mittlere absolut genommene Differenz in ± °C und StdDev bedeutet die Std. Abweichung in ± °C

Tab. 52: Ergebnisse der Analyse der Abweichung der mobilen Belagstemperaturen bei Vorbeifahrt an der Station Offenbau II der A 9 im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017

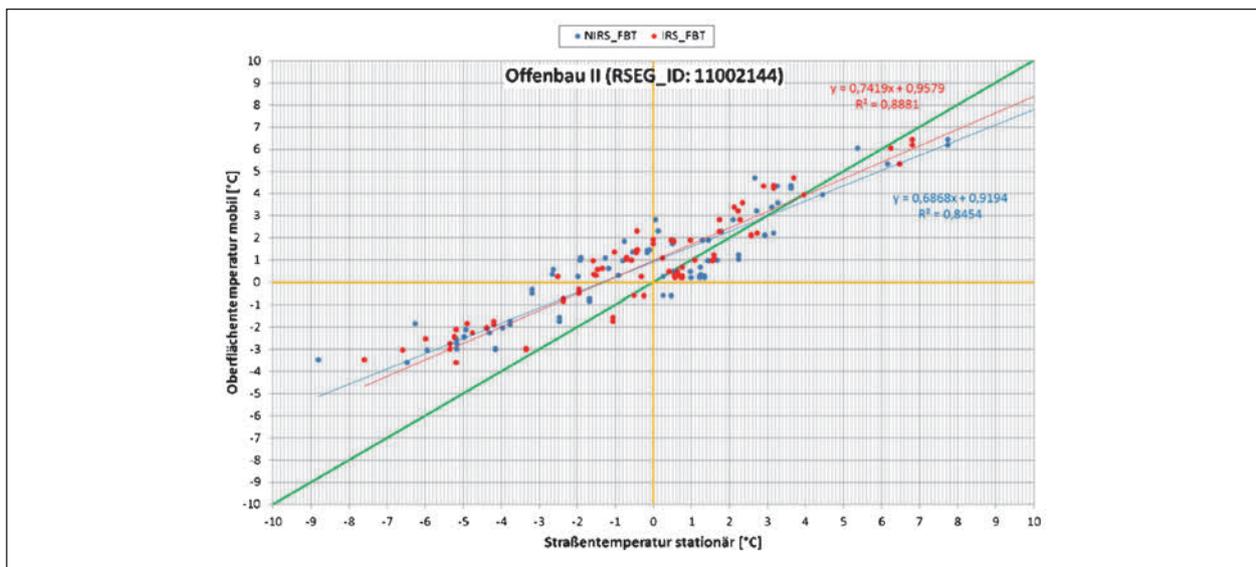


Bild 58: Grafische Darstellung der Korrelation der mobil gemessenen Straßentemperatur zur stationären an der Station A9 Offenbau II. Alle Fahrten Lkw MARWIS AM Greding im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. Rote Punkte markieren die Korrelation mit der eingebauten Sonde (IRS31pro), die blauen Punkte gehören zum berührungslosen Sensor (NIRS31)

über die Ausfahrt die Strecke verlassen haben und die Fahrbahnsensorik nicht passiert haben.

Ebenso wird auf die Validierung der Stationen auf der A 4 verzichtet, da hier die Anzahl der mobilen Messfahrten in der Winterperiode 2015/16 und 2016/17 zu gering waren.

Ab Mitte Dezember 2016 standen an der A 9 zwei neue SWS Stationen am Standort Offenbau und in Gelbensee. Wie in Kapitel 6.1 ausführlich beschrieben standen hier für die Oberflächentemperatur sowohl ein in den Belag eingebauter Sensor IRS31pro)

als auch ein berührungsloser Sensor (Pyrometer integriert in NIRS31) zur Verfügung.

In der Winterperiode 2016/17 wurden ebenfalls aus allen Fahrten, welche die beiden Standorte berührt haben, Vergleiche zwischen der mobilen Belagstemperatur (Stichproben, 1-sec-Intervall) und der stationär gemessenen (kontinuierlich, 1-Minuten-Intervall) gezogen.

Der obige Korrelationsplot (Bild 58) stellt die Ergebnisse noch einmal anschaulich dar. Die Abweichungen sind sowohl beim berührungslosen, wie auch

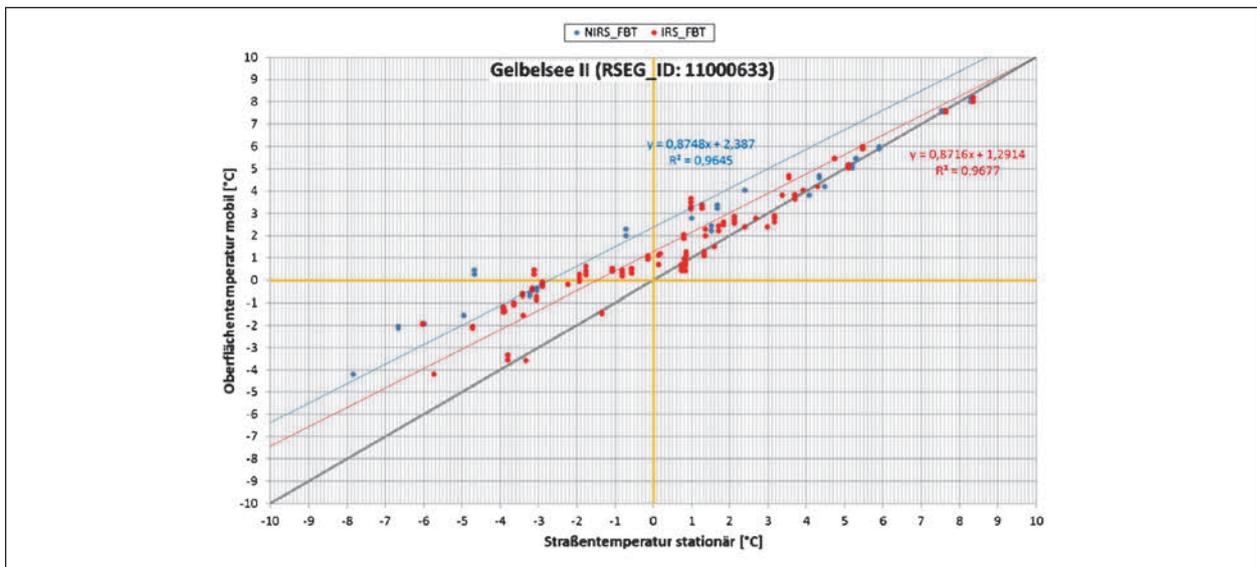


Bild 59: Grafische Darstellung der Korrelation der mobil gemessenen Straßentemperatur zur stationären an der Station A9 Offenbau II. Alle Fahrten Lkw MARWIS AM Greding im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. Rote Punkte markieren die Korrelation mit der eingebauten Sonde (IRS31pro), die blauen Punkte gehören zum berührungslosen Sensor (NIRS31)

Gelbelsee II		NIRS Oberflächentemperatur			IRS Oberflächentemperatur		
		BIAS	MAE	StdDev	Bias	MAE	StdDev
alle	alle	1,2	1,8	3,5	1,1	1,6	3,5
trocken	0	0,2	1,4	3,0	0,3	1,5	3,4
feucht	1	2,4	2,8	5,3	1,9	2,8	5,4
nass	2	3,1	0,4	0,4	1,9	0,7	0,8
Eis	3	0,6	0,3	0,3	1,3	0,3	0,4
Schnee/Eis	4	0,8	0,1	0,1	-0,1	0,1	0,1
chem. Nass	5	4,4	1,2	1,4	3,3	0,8	0,9
krit. Nass	6						

BIAS bedeutet der Mittelwert der Abweichung in °C, MAE bedeutet die mittlere absolut genommene Differenz in ± °C und StdDev bedeutet die Standardabweichung in ± °C

Tab. 53: Ergebnisse der Analyse der Abweichung der mobilen Belagstemperaturen bei Vorbeifahrt an der Station Gelbelsee II der A 9 im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017

beim eingebauten Sensor ähnlich. Der eingebaute Sensor zeigt sogar eine minimal bessere Übereinstimmung. Gleichwohl sind die Ergebnisse hier deutlich besser, als dies bei den alten Anlagen der Fall war.

Die gleiche Analyse wurde auch für die Station Gelbelsee II durchgeführt (Bild 59 und Tabelle 53). Hier scheint die Übereinstimmung noch besser zu sein, als an der Station Offenbau II.

Auch für die St2139 wurden die Fahrten des Lkw der SM Viechtach gegen die stationäre SWS Pre-digtstuhl (P471) verglichen (Tabelle 54 und Bild 60).

Die Ergebnisse sind offensichtlich etwas schlechter als dies bei der gleichen Analyse im Winter 2015/16 der Fall war (siehe Bild 54). Mögliche Ursachen könnten, neben natürlichen witterungsbedingten Veränderungen, der Austausch der eingebauten Sonde vor Beginn der Winterperiode 2016/17 und mehrmalige Änderungen der Firmware am mobilen Gerät infrage kommen.

Aus den mobilen Testfahrten der BAST mit IceCar5 Ausstattung konnten 13 Fahrten ausgewertet werden, welche an der Sensorik des Testfeldes der BAST auf der A 4 Fahrtrichtung Olpe → Köln vorbeigeführt haben. Das Ergebnis der Korrelation kann

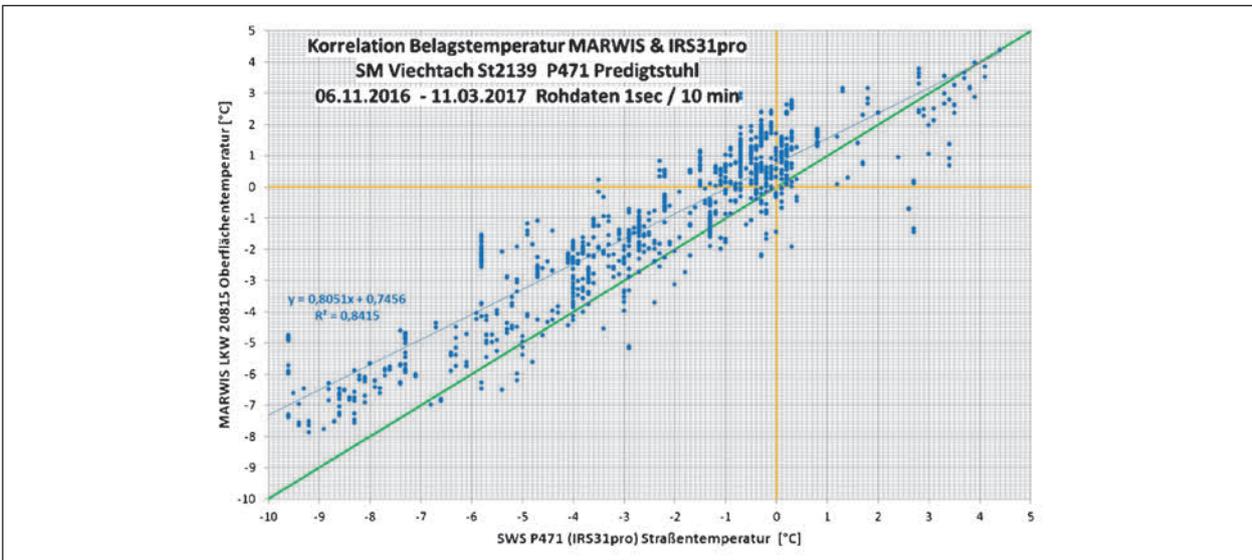


Bild 60: Grafische Darstellung der Korrelation der mobil gemessenen Straßentemperatur zur stationären an der Station St2139 Predigtstuhl. Alle Fahrten Lkw MARWIS SM Viechtach im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017

Predigtstuhl		Oberflächentemperatur IRS31pro		
		BIAS	MAE	StdDev
alle	alle	1,2	0,9	1,2
trocken	0	1,0	0,9	1,3
feucht	1	1,2	0,8	0,9
nass	2	1,9	0,6	1,0
Eis	3	1,2	1,0	1,4
Schnee/Eis	4	0,8	0,8	1,2
chem.Nass	5	1,3	0,8	1,1
krit. Nass	6	1,4	0,7	1,0

BIAS bedeutet der Mittelwert der Abweichung in °C, MAE bedeutet die mittlere absolut genommene Differenz in ± °C und StdDev bedeutet die Standardabweichung in ± °C

Tab. 54: Ergebnisse der Analyse der Abweichung der mobilen Belagstemperaturen bei Vorbeifahrt an der Station Predigtstuhl der St2139. Im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017. BIAS bedeutet der Mittelwert der Abweichung in °C, MAE bedeutet die mittlere absolut genommene Differenz in ±°C und StdDev bedeutet die Standardabweichung in ±°C

dem Diagramm in Bild 61 entnommen werden. Das Ergebnis der berechneten Standardabweichungen (stationär zu mobil) findet sich in Tabelle 55.

Fast alle Vergleiche fanden bei nahezu trockener Fahrbahn statt.

A 4 Testfeld	Einh.	IRS-1	NIRS-1	NIRS-2
FBT	± °C	± 0,97	± 1,11	± 0,75

IRS-1 → eingebaute Sonde in der Lastspur
 NIRS-1 → berührungsloser Sensor in der Lastspur
 NIRS-2 → berührungsloser Sensor in der Spur 2 (Überholspur)

Tab. 55: Abweichungen der Vergleiche der mobilen Stichproben zu den gleichzeitig ermittelten stationären Werten

7.3 Mobile Taupunkttemperatur

Die Taupunkttemperatur ist eine wichtige Größe, welche die Beurteilung von Kondensation oder Verdunstung von Feuchte auf der Fahrbahn zulässt, und wird bei den mobilen Messfahrten mitgemessen.

Ein Vergleich mit den stationären Messstellen bietet sich somit an. Dazu ist zu beachten, dass im Fall des mobilen Sensors MARWIS an den Einsatzfahrzeugen die Temperatur und Feuchte der Luft gemessen wird, welche sich innerhalb des Schutzgehäuses am Sensor einstellt, während bei den stationären Messstellen in der Regel in ca. 4 m Höhe am Mast neben der Straße gemessen wird.

Aus diesen Gründen kann eigentlich an den Vergleich der Taupunkttemperaturen grundsätzlich keine hohen Erwartungen gestellt werden. Dennoch zeigt sich statistisch eine sehr gute Korrelation, allerdings auch eine mittlere Abweichung (Bias) von

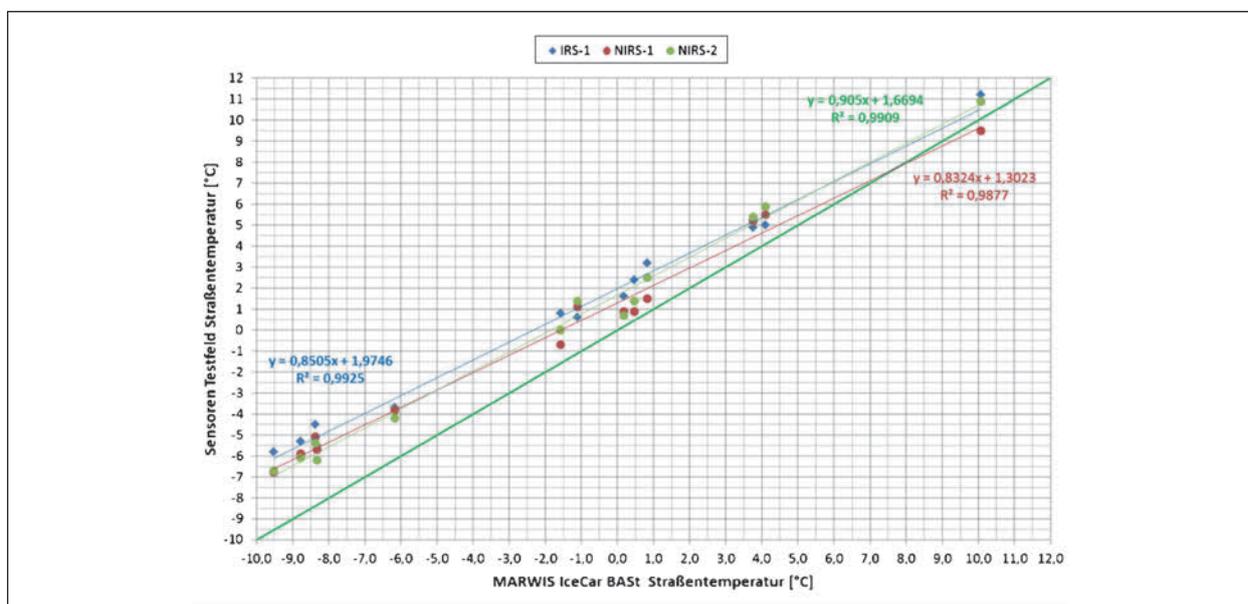


Bild 61: Grafische Darstellung der Korrelation der mobil gemessenen Straßentemperatur zur stationären der micKS Station am Testfeld A4 der BAST. Alle Fahrten der BAST mit IceCar5 im Zeitraum Dez. 16. bis Feb. 17. Blaue Punkte markieren die Korrelation mit der eingebauten Sonde (IRS31pro), die roten Punkte gehören zum berührungslosen Sensor (NIRS31-1) und die grünen zum NIRS-2

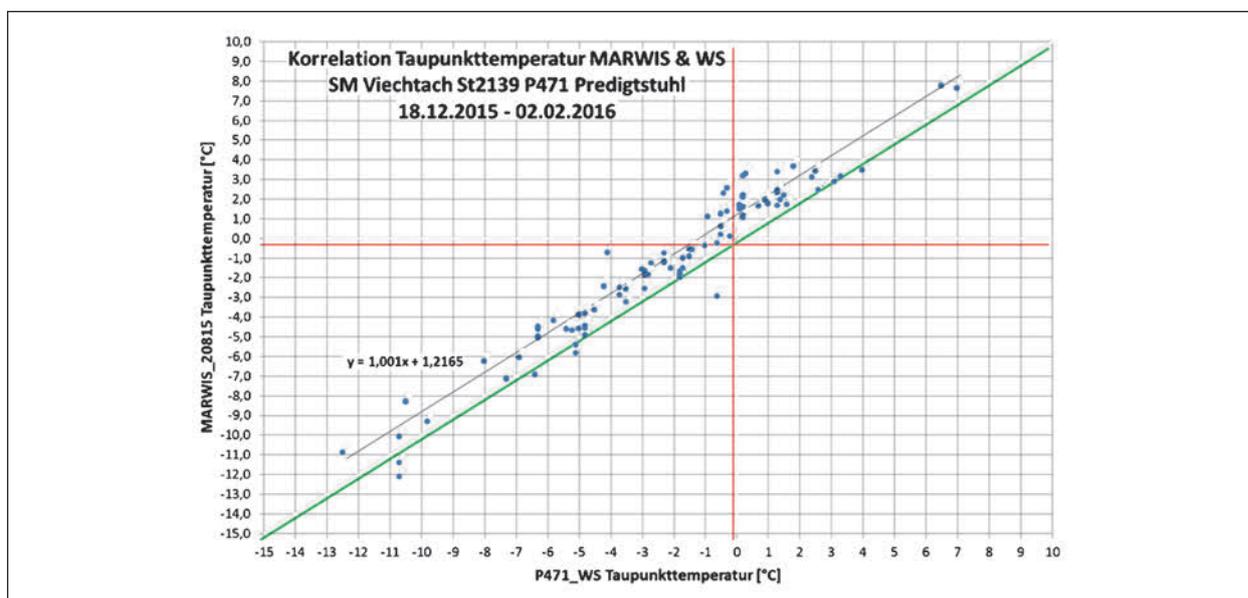


Bild 62: Korrelation zwischen Taupunkttemperatur am MARWIS (20815) des Lkw SM Viechtach und der stationären Messstelle P471 Predigtstuhl jeweils bei Vorbeifahrt im ausgewählten Zeitraum. 169 Datensätze

ca. +1,2 °C, konstant über den gesamten Wertebereich. Die grafische Darstellung der Korrelation ist in Bild 62 gezeigt.

Wie auch schon bei den Belagstemperaturen zeigt sich bei der Teststrecke 1 A 9 Greding bei den Lkw-Fahrten ebenfalls eine schlechtere Korrelation, als dies bei der Staatsstraße St2139 der Fall war. An der Station Gelbensee (Bild 63) liegt die statistische Abweichung bei unter +0,2 °C, der Mittelwert

der absoluten Differenzen beträgt dabei ±0,8 °C. Unter Berücksichtigung der oben erwähnten Messbedingungen, liegen diese Abweichungen aber durchaus noch innerhalb der theoretischen Toleranzen von ±3 °C.

Bei der Station Offenbau ist die Korrelation (Regressionsgerade) der Taupunkttemperaturen noch etwas besser, wie in Bild 64 ersichtlich. Der Mittelwert der Differenzen liegt hier bei -0,5 °C und der

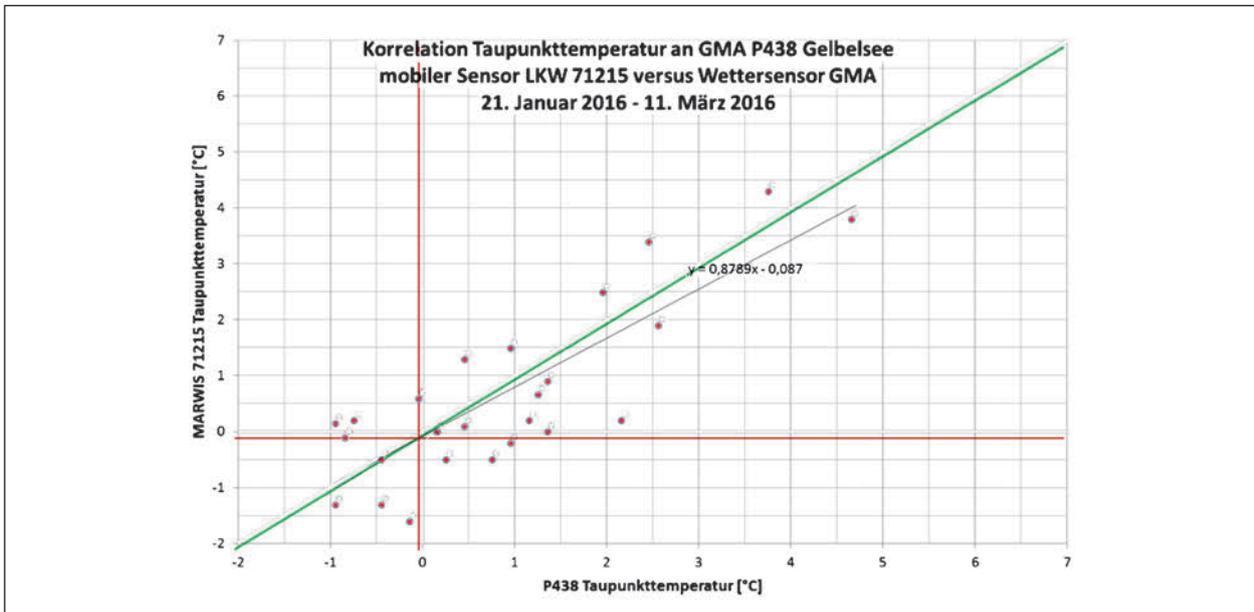


Bild 63: Korrelationsdiagramm Vergleich der Taupunkttemperatur am mobilen Sensor MARWIS (71215) Lkw AM Greding mit Station P438 Gelbensee bei Vorbeifahrt im ausgewählten Zeitraum. 25 Datensätze

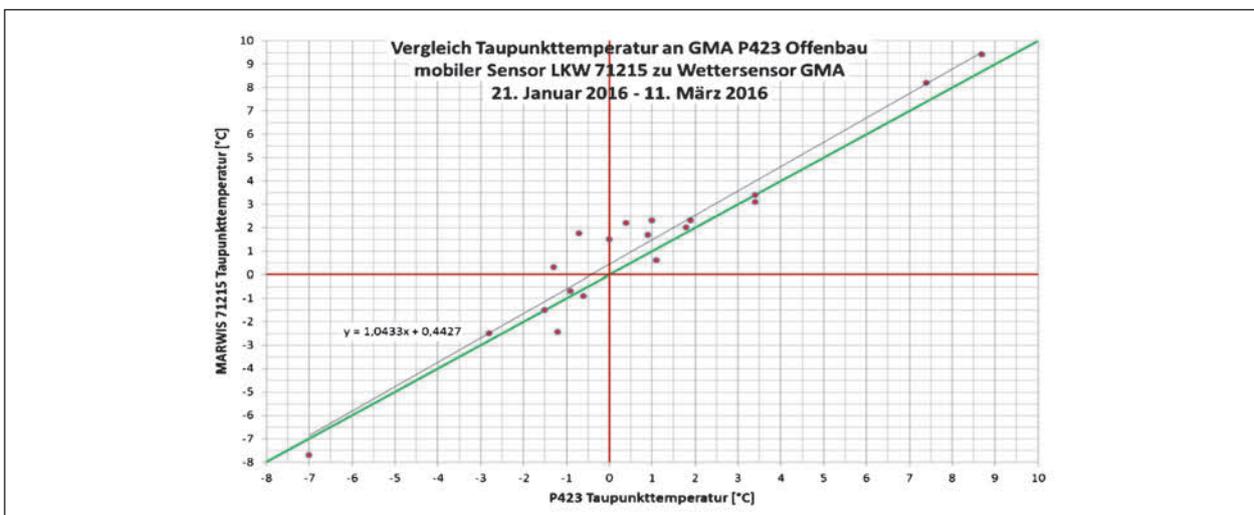


Bild 64: Korrelationsdiagramm Vergleich der Taupunkttemperatur am mobilen Sensor MARWIS (71215) Lkw AM Greding mit Station P423 Offenbau bei Vorbeifahrt im ausgewählten Zeitraum. 19 Datensätze

Mittelwert der absoluten Abweichungen bei $\pm 0,8$ °C. Hier sind es 19 Datensätze, die in das betreffende Streckensegment fallen.

Für einen Vergleich der mobilen Daten des Testfahrzeuges der BAST (IceCar5) waren zwei Sensoren für den Taupunkt montiert: Einmal der im Wettersensor (WS501), auf dem Dach des Fahrzeuges montierte, integrierte und dann der im mobilen Sensor MARWIS eingebaute Sensor. Im Testfeld wurden die Daten des dort installierten WS600 Sensors (auf ca. 4 m) am Rand der Autobahn A 4 Testfeld an

der Richtungsfahrbahn Olpe→Köln erfasst (Bild 65). Die Standardabweichungen der zwei mobilen Sensoren zum stationären Wettersensor ergab:

TPT(W.S) $\pm 0,89$ °C,

TPT(MARWIS) $\pm 0,66$ °C.

Trotz der Tatsache, dass der im MARWIS integrierte Taupunktsensor in einem langen Schutzgehäuse auf der Rückseite des Fahrzeuges in ca. 2 m Höhe sitzt und der Wettersensor frei in der Umgebungsluft auf dem Dach des Fahrzeuges montiert ist, zeigt

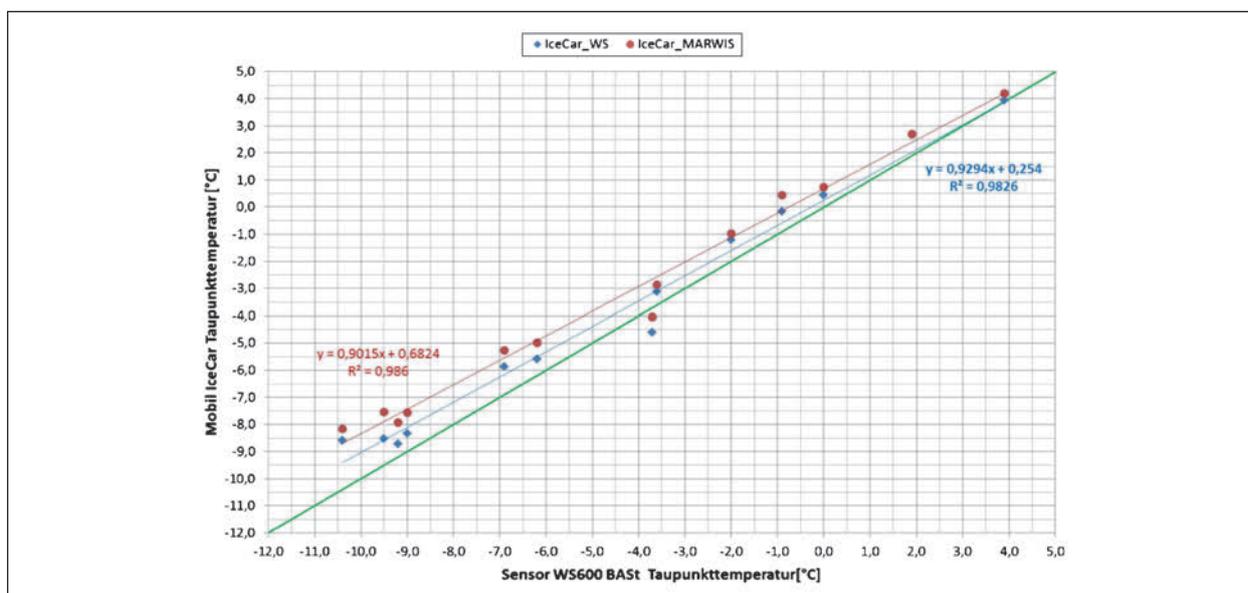


Bild 65: Korrelationsdiagramm der mobilen Taupunkttemperaturen zur stationär gemessenen am Testfeld A4 BAST. Blaue Punkte markieren die Vergleichswerte zum Wettersensor am Fahrzeug, rote Punkte markieren die am MARWIS gemessenen. Insgesamt 13 Datensätze im Zeitraum Dez. 16 bis Feb.17

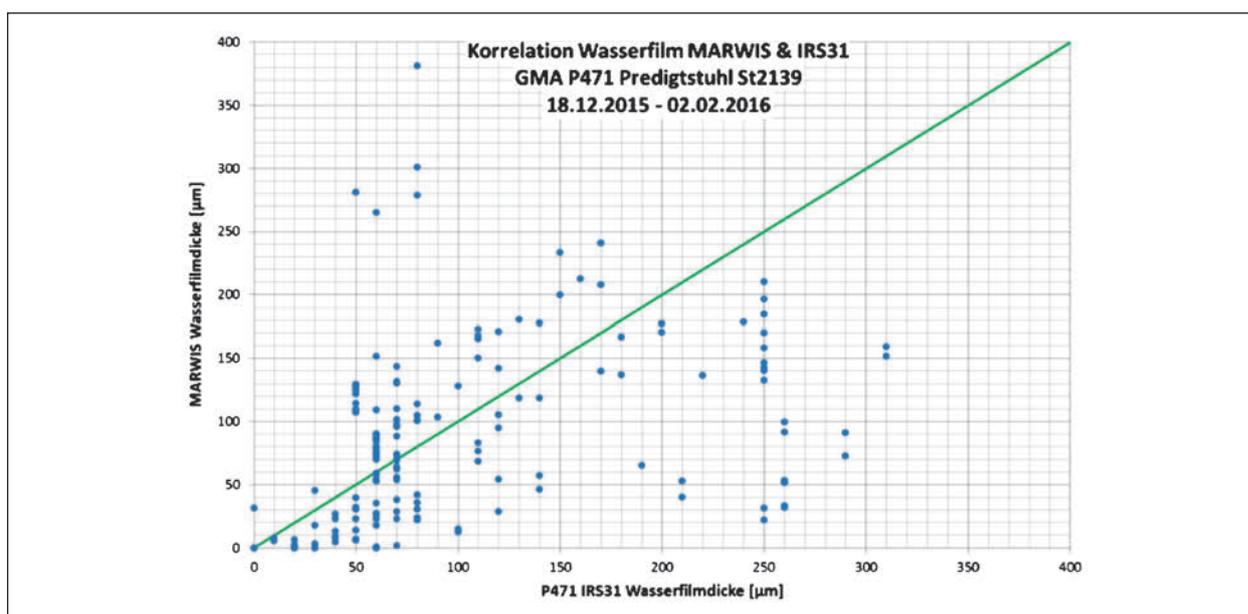


Bild 66: Korrelation der mobil gemessenen Wasserfilmdicken (MARWIS ID 20815) mit Station P471 Predigtstuhl bei Vorbeifahrt des Lkw SM Viechtach. 169 Datensätze im Winter 2015/16

der MARWIS im Vergleich zum stationären eine etwas geringere Standard Abweichung. Die Standardabweichung ist allerdings nicht so aussagekräftig wie das Korrelationsdiagramm: hier liegt der WS600 erwartungsgemäß etwas näher an der Ideallinie, was sich auch in der Regressionsgleichung ausdrückt (Bild 65).

7.4 Mobile Wasserfilmdicken

In der ersten Phase des Projektes gab es lediglich auf der Teststrecke2 St2139 Viechtach die Möglichkeit mit signifikanten Stichproben einen Vergleich der mobil gemessenen Wasserfilmdicken mit denen der Fahrbahnsonden zu unternehmen. Das Ergebnis ist in Bild 66 und Bild 67, sowie Tabelle 56 dargestellt. Bild 68 zeigt den zeitlichen Verlauf der stationär an der SWS Predigtstuhl gemessenen Was-

serfilmdicken im Vergleich zu den mobilen Stichproben bei Vorbeifahrt. Dies zeigt auch die Problematik der zeitlichen und örtlichen Streuung der Wasserfilmdicken.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass eine direkte Vergleichbarkeit der Wasserfilmdicken, wie der Plot in Bild 66 und Bild 67 zeigt, nicht gegeben ist, aus mehreren verschiedenen Gründen:

- Verteilung der Wasserfilmdicken über die Oberfläche natürlicherweise extrem variabel,

- Örtliche und zeitliche Unsicherheit der mobilen Messung im direkten Vergleich mit der stationären Messung,
- Unterschiedliche Messverfahren mit unterschiedlichen Querempfindlichkeiten und Genauigkeiten.

Bei den neuen SWS auf der A 9, welche mit zwei unterschiedlichen Sensoren Wasserfilmdicken messen und auch Niederschläge detektieren, wurden für die Winterperiode 2016/17 auch Vergleiche

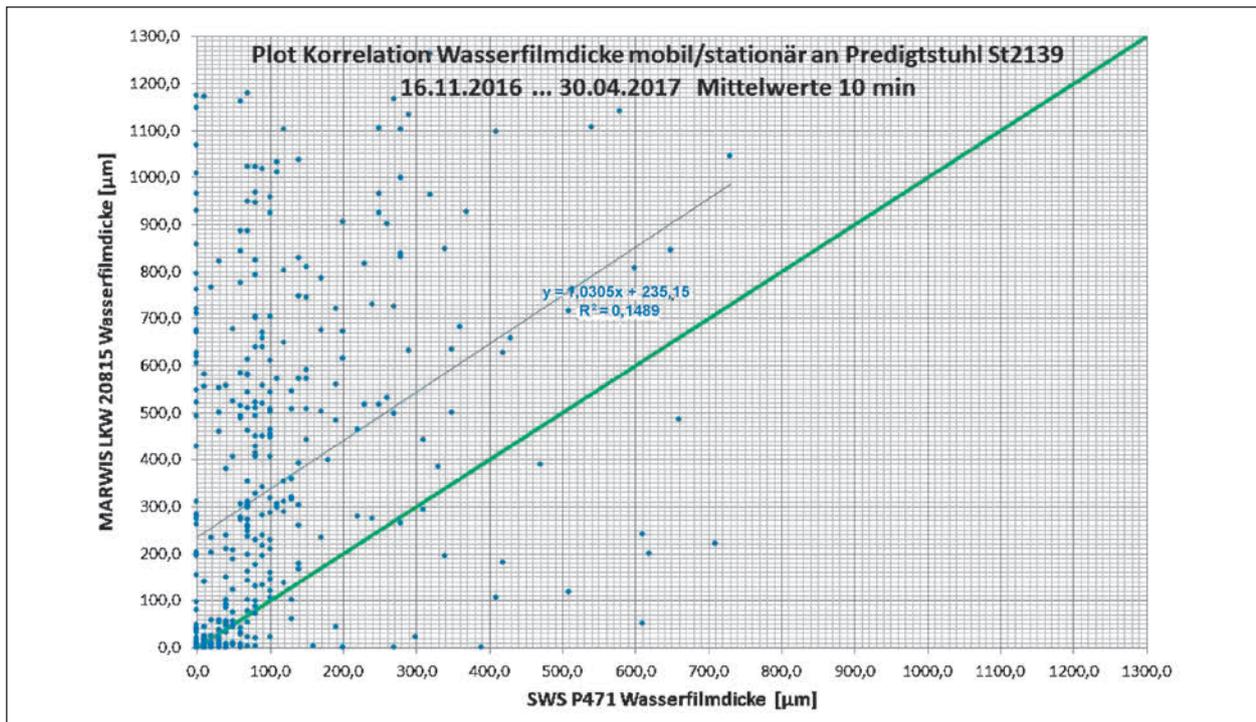


Bild 67: Korrelation der mobil gemessenen Wasserfilmdicken (MARWIS ID 20815) mit Station P471 Predigtstuhl bei Vorbeifahrt des Lkw SM Viechtach. Ca. 393 Datensätze im Winter 2016/17

Predigtstuhl	St2139	Wasserfilmdicke		
		BIAS	MAE	StdDev
all	all	245,0	274,1	334,9
trocken	0	- 48,1	58,2	83,8
feucht	1	117,8	93,1	124,8
nass	2	507,0	191,8	228,0
Eis	3	505,0	255,4	309,0
Schnee/Eis	4	522,6	216,2	273,1
chem. Nass	5	72,4	149,0	216,7
krit. Nass	6	416,0	228,2	269,6

BIAS = Mittelwert der Differenzen
 MAE = Mittelwert der absoluten Abweichungen
 StdDev = Std. Abweichung

Tab. 56: Statistik des Vergleichs zwischen der mobil und stationär gemessenen Wasserfilmdicke an der SWS Predigtstuhl (St2139) im Zeitraum 06.11.2016 bis 11.03.2017 mit Lkw MARWIS ID 20815, ca. 1.025 Stichproben

angestellt. Bild 69 und Bild 70 zeigen, das auch an den neuen Stationen der A 9 die Wasserfilmdicken Messungen schwer vergleichbar sind. Bei der Stati-

on Offenbau II liefert der berührungslose Sensor NIRS31 offensichtlich nicht plausible Werte. Der Grund dürfte wahrscheinlich daran liegen, dass bei

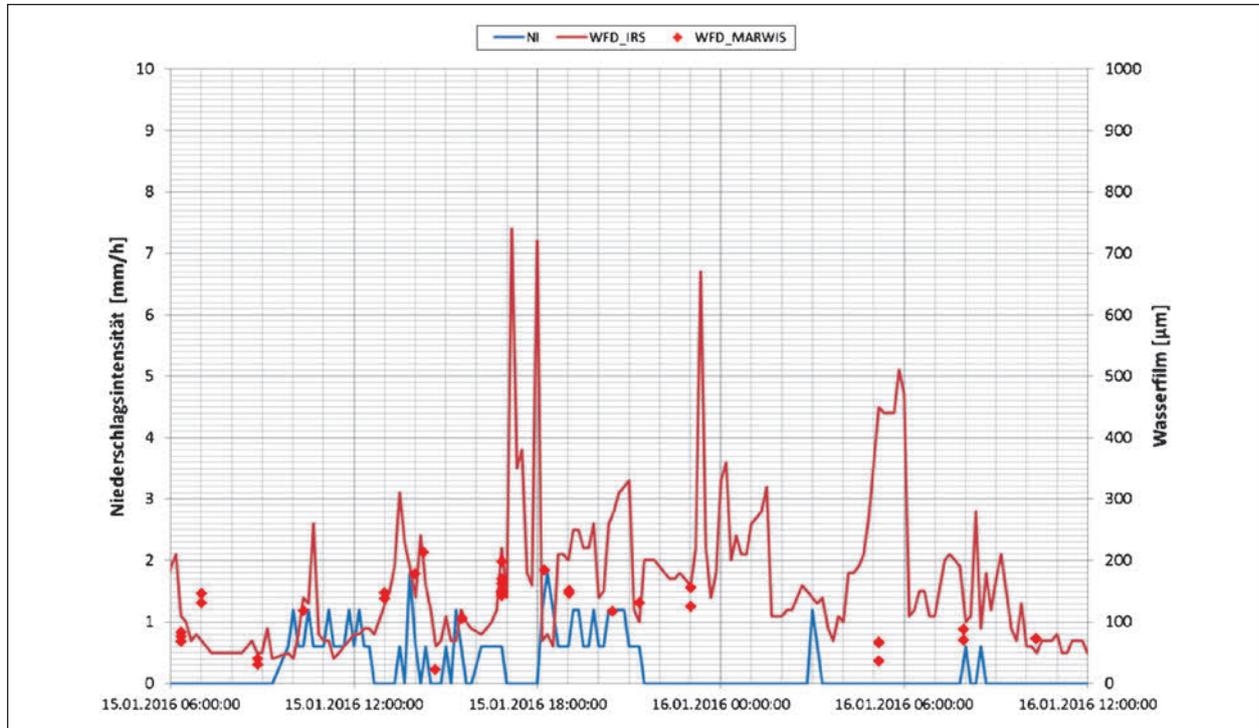


Bild 68: Diagramm zeitl. Verlauf der Wasserfilmdicken kontinuierlich gemessen mit Fahrbahnsonde (rote Kurve) und Niederschlagsintensität (blaue Kurve) an P471 Predigtstuhl und die bei Vorbeifahrt erfasstem mobil gemessenen Wasserfilmdicken (rote Punkte). Herausgegriffener Zeitraum von ca. 30 Stunden am 15. Januar 2016

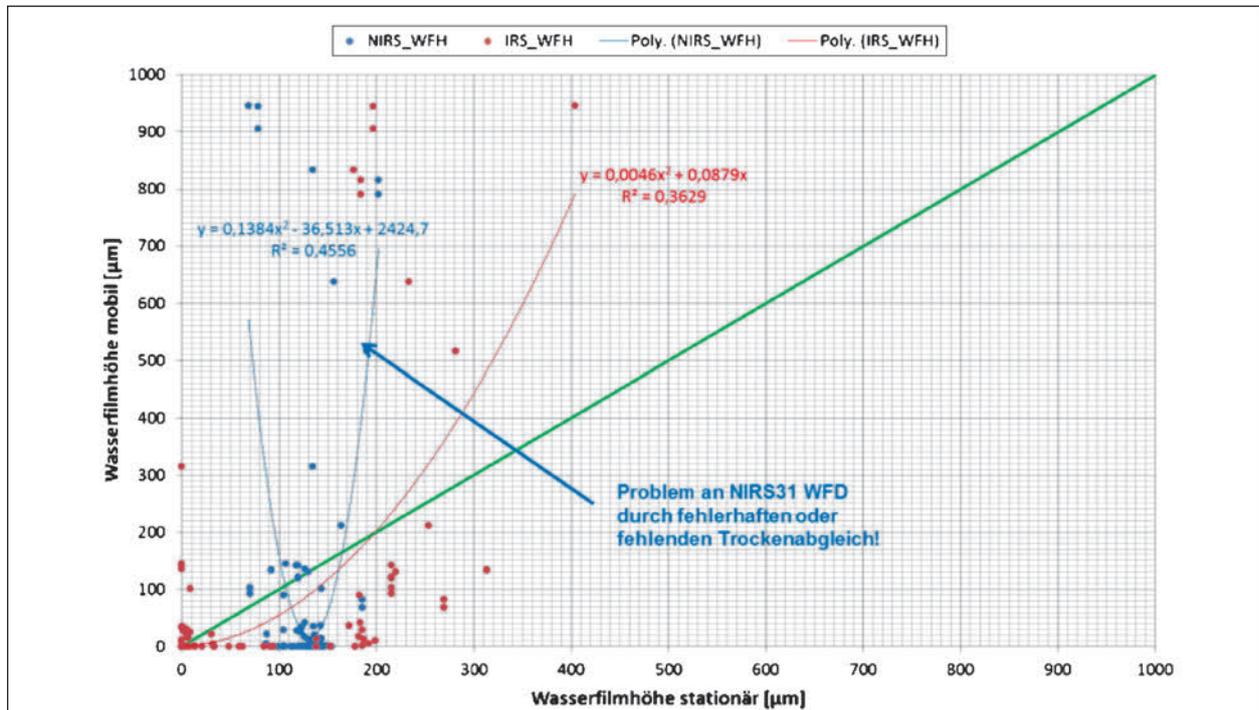


Bild 69: Korrelationsplot des Vergleichs der mobilen Wasserfilmdicken (Lkw AM Greding) mit den stationär an der Station Offenbau II. Blaue Punkte beziehen sich auf den berührungslosen Sensor (NIRS31), die roten Punkte beziehen sich auf den eingebauten Sensor (IRS3). Bei Offenbau II ist ein Polynom die beste Näherung. NIRS31 an Offenbau II liefert offensichtlich unplausible Werte, vermutlich wegen fehlendem Trockenabgleich

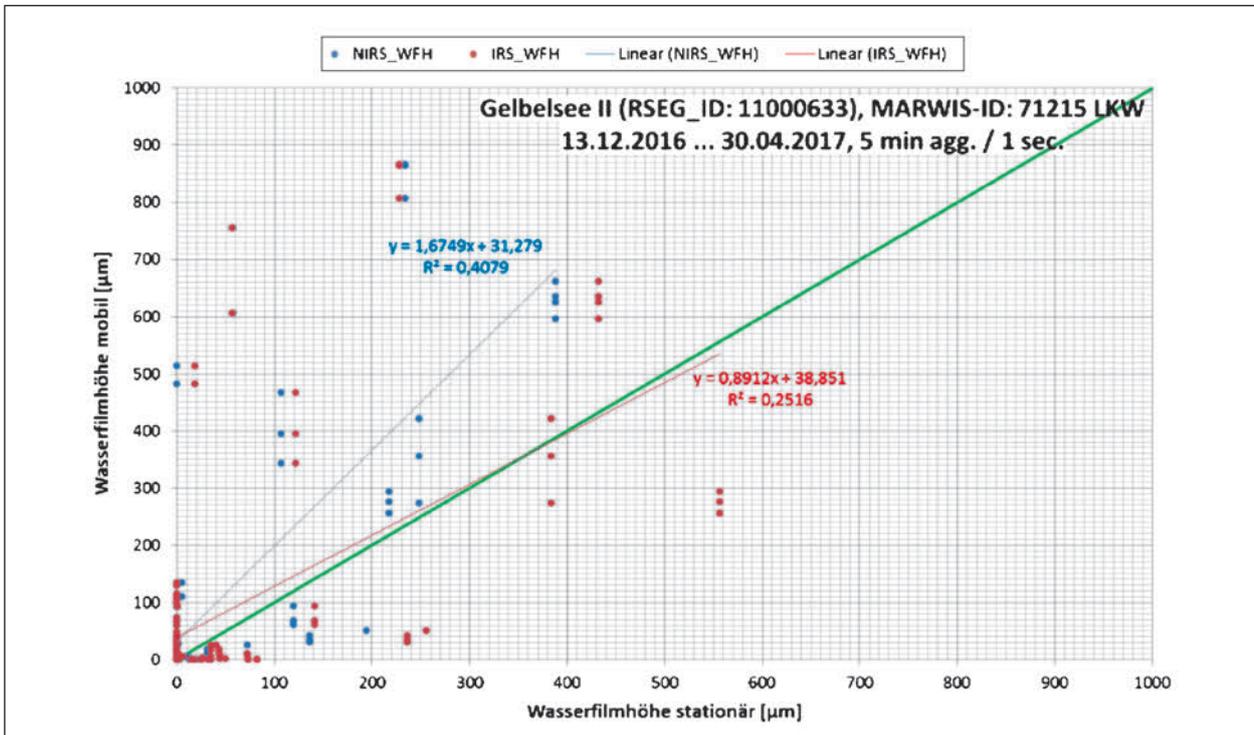


Bild 70: Korrelationsplot des Vergleichs der mobilen Wasserfilmdicken (Lkw AM Greding) mit den stationären an der Station Gelbensee II. Blaue Punkte beziehen sich auf den berührungslosen Sensor (NIRS31), die roten Punkte beziehen sich auf den eingebauten Sensor (IRS3). Bei Gelbensee II ein linearer Trend die beste Näherung

Offenbau II	A 9	NIRS Wasserfilmdicke			IRS Wasserfilmdicke		
		BIAS	MAE	StdDev	BIAS	MAE	StdDev
alle	alle	- 14,7	157,6	252,7	20,3	128,8	208,9
trocken	0	- 129,1	13,0	16,0	- 44,3	50,1	61,2
feucht	1	- 96,3	11,8	16,5	- 16,5	56,6	66,7
nass	2	176,2	203,0	216,2	90,8	208,8	222,3
Eis	3	388,1	386,9	411,1	261,1	383,4	399,5
Schnee/Eis	4						
chem. Nass	5	- 19,2	62,8	79,1	8,5	99,5	124,1
krit. Nass	6						
BIAS = Mittelwert der Differenzen MAE = Mittelwert der absoluten Abweichungen StdDev = Std. Abweichung							

Tab. 57: Statistik des Vergleichs zwischen der mobil und stationär gemessenen Wasserfilmdicke [µm] an Offenbau II A 9 im Zeitraum 15.12.2016 bis 22.04.207 mit Lkw MARWIS ID 71215 ca. 89 Stichproben

der Installation kein erfolgreicher Trockenabgleich durchgeführt wurde bzw. nicht möglich war. Die Wasserfilmdicken dieses Sensors wurde bei der weiteren Auswertung nicht mehr berücksichtigt. Das erklärt auch den gegenüber den relativ geringen mittleren Abweichungen hohen negativen BIAS in Tabelle 57.

Auf der Teststrecke 3 A 4 BAST konnten keine Auswertungen bezüglich der Wasserfilmdicke angestellt werden, da die Fahrten nahezu ausschließlich bei trockenen Straßenzustände unternommen wurden.

Gelbelsee II	A 9	NIRS Wasserfilmdicke			IRS Wasserfilmdicke		
		BIAS	MAE	StdDev	BIAS	MAE	StdDev
alle	alle	54,2	94,2	175,2	30,7	96,7	186,6
trocken	0	- 5,5	9,7	13,6	- 20,3	23,2	28,4
feucht	1	- 4,3	47,8	69,1	- 20,6	66,9	92,0
nass	2	697,0	298,4	351,6	692,3	303,4	357,1
Eis	3	215,6	177,2	214,1	108,5	249,8	298,1
Schnee/Eis	4	- 11,1	0,4	0,4	1,8	0,4	0,4
chem.Nass	5	73,5	32,9	35,9	74,1	33,3	36,4
krit. Nass	6						
BIAS = Mittelwert der Differenzen MAE = Mittelwert der absoluten Abweichungen StdDev = Std. Abweichung							

Tab. 58: Statistik des Vergleichs zwischen der mobil und stationär gemessenen Wasserfilmdicke [μm] an Gelbelsee II A 9 im Zeitraum 16.12.2016 bis 30.03.2017 mit Lkw MARWIS ID 71215 ca. 166 Stichproben

7.4.1 Betrachtungen zu Einflüssen der mobilen Wasserfilm-Messung

Die Streuungen von mobil erfassten Wasserfilmdicken sind hoch (Bild 71). Diese Streuungen von mobil erfassten Wasserfilmdicken setzen sich zusammen aus:

- 1.) Ungenauigkeiten des Sensors selbst (bzw. der Auswertung dahinter).
- 2.) Ändernde Messbedingungen durch wechselnde Mikrotexur und Beschaffenheit der Belagsoberfläche, welche die Messgenauigkeit selbst beeinflusst.
- 3.) Die tatsächlich vorhandene Verteilung des Wasserfilms durch die Mikro- und Makrotexur der Fahrbahn, die Unebenheiten der Belagsoberfläche und die wellenförmige Bewegung der Wasseroberfläche, die durch Neigung der Oberfläche, durch Wind und Verkehr zusätzlich in Bewegung gehalten wird. Schnee und vor allem Schneematsch verändert noch zusätzlich in extremen Masse die Variation der Verteilung der Wassermengen (gefroren und flüssige Mischung).

In der ersten Phase des Projektes und durch andere Tests war aufgefallen, dass der MARWIS bis Firmware Version 2.3 tendenziell zu geringe Wasserfilmdicken anzeigt, was inzwischen vom Herstel-

ler weiter korrigiert wurde. Es ist auch sicher zu erwarten, dass die Entwicklung zu den Unsicherheiten die durch die in 1.) und 2.) genannten Einflüsse weitergeht und dass weiter verbesserte Sensoren auf den Markt kommen. Aus den umfangreichen Erfahrungen, die im Projekt und auch anderswo bisher gesammelt werden konnten, muss man davon ausgehen, dass der überwiegende Anteil der Streuungen der mobil erfassten Wasserfilmdicke von dem in 3.) genannten Effekten abhängt. Selbst wenn Sensoren zur Verfügung stünden, die absolut 100 % genau sind und im Labor unter reproduzierbaren Bedingungen keine Messunsicherheiten mehr aufweisen würden, würde das Problem der streuenden Wasserfilmwerte nicht lösen. Es gibt auf einer realen Straßenoberfläche nicht eine bestimmte Wasserfilmdicke – was man gerne annehmen möchte – sondern es gibt unendlich viele verschiedene. Und dabei können Unterschiede im Bereich 50...200 % bereits auf einige Millimeter bzw. Zentimeter vorkommen. Aber auch an stationären Sensoren, die immer an der gleichen Stelle messen, sind erhebliche zeitliche Variationen durch Verkehr, Wind, Quer- und Längsneigung etc. an der Tagesordnung- auch hier sprechen wir von Veränderungen im Sekundenbereich. Das macht deshalb Vergleiche zwischen stationären und mobilen Sensoren nahezu aussichtslos.

Dennoch kann man auf diese Messungen nicht verzichten, da sie trotz aller Unsicherheiten zu-

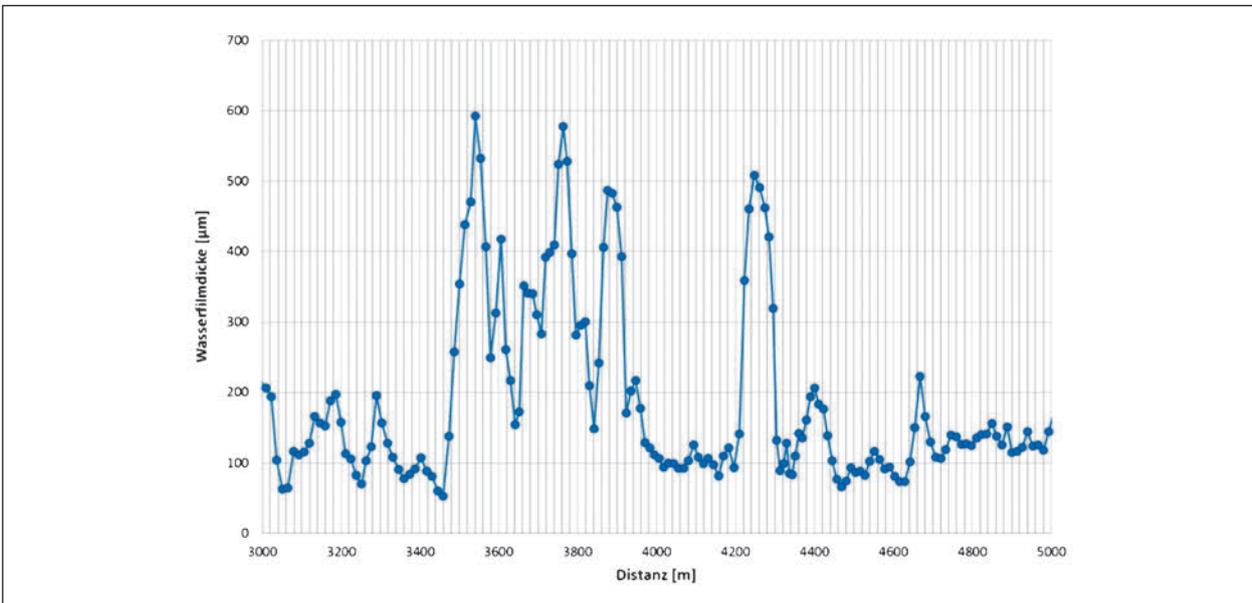


Bild 71: Auszug aus den registrierten Wasserfilmdaten (1-Sekunden-Intervall) einer Lkw Fahrt der SM Viechtach auf der St2139. Es treten hier auf ca. 30 m Änderungen um 250 µm und auf 100 m teilweise über 500 µm auf

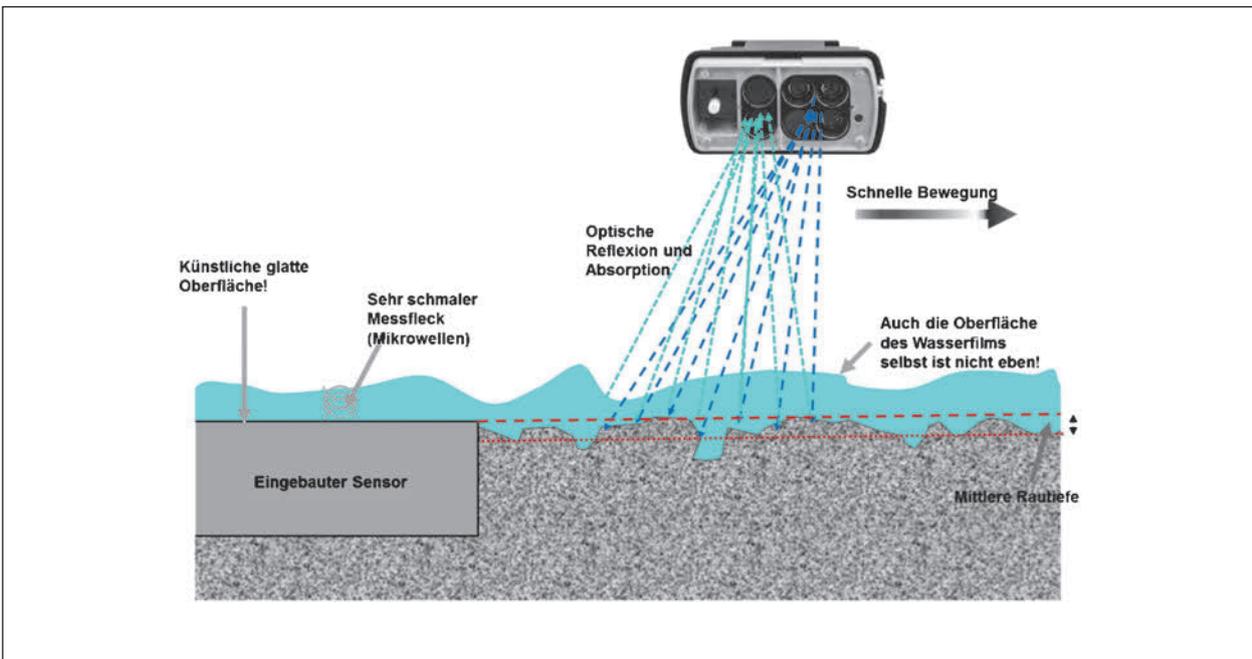


Bild 72: Illustration der Unterschiede und Einflüsse der Wasserfilm-Messung bei eingebauten und berührungslosen mobilen Sensoren

sätzliche Informationen beinhalten, die zur Verbesserung der kleinräumigen Vorhersage des Straßenzustands und zur Optimierung der Winterdienstmaßnahmen beitragen können (Bild 72). Durch statistische Methoden kann man dennoch trotz Streuung Möglichkeiten finden, damit umzugehen.

7.4.2 Dämpfungsfilter für die mobilen Wasserfilmdicken

Aus den vorstehenden Betrachtungen wird klar, dass die örtlichen und zeitlichen Schwankungen aufgrund den Mikrostrukturen der Wasserfilme- und der Belagsoberfläche, dahingehend aufbereitet werden sollten, dass eine der durchschnittlichen

Verteilung der Wasserfilme auf der Strecke möglichst am nächsten kommt.

Der gleitende Mittelwert wird häufig zur Glättung von stark schwankenden Messwerten einer Zeitreihe verwendet. Allgemein formuliert wird der gleitende Mittelwert einer Messgröße ($gM.MW_t$) zum Zeitstempel t wie folgt berechnet:

$$gM.MW_t = \frac{1}{m} \sum_{i=t-m}^{i=t} MW_i \quad (\text{Gl. 4})$$

Dabei werden zurückliegende Abtastwerte zusammengezählt und der Durchschnitt gebildet. In Falle der mobilen Messungen im Projekt wären das Abtastwerte im Abstand von 1 Sekunde, und bei entsprechender Fahrgeschwindigkeit 10...20 m lange Streckensegmente. Um einen einigermaßen geglätteten Verlauf zu erhalten, müssten gleitende Mittelwerte über 10...20 Abtastungen (m) gebildet werden, was über 10...20 Sekunden und örtlich über 100 bis 400 m entsprechen würde.

Gleitende Mittelwerte haben aber in diesem Zusammenhang einige Nachteile. Erstens muss man bei sequenzieller Verarbeitung mindestens m originale Messwerte vorhalten und zweitens zeigt das Signal eine gewisse Verzögerung und reagiert nicht unmittelbar auf eine Änderung der Tendenz.

Besser geeignet erscheint für die Glättung die Anwendung eines Dämpfungsfilters (oder auch Tiefpassfilter). Bei Änderungen der Tendenz in der Original Messreihe folgt das gedämpfte Signal unmit-

telbar der Tendenz im Gegensatz zum gleitenden Mittelwert – allerdings mehr oder weniger stark gedämpft.

Die Differenzgleichung einer Dämpfungsfunktion erster Ordnung (auch Tiefpassfilter oder PT1-Glied genannt) auf einer zeitdiskreten Reihe von MW Messwerten lautet allgemein formuliert:

$$g.MW_t = a \cdot MW_t + (1 - a) \cdot g.MW_{t-1} \quad (\text{Gl. 5})$$

$$a = \frac{1}{\frac{T}{\Delta t} + 1}$$

$g.MW$ ist der gedämpfte Ausgangswert zum Zeitpunkt t , MW der original Messwert und a der Dämpfungskoeffizient (in dem Fall gibt es keinen Verstärkungsfaktor bzw. ist gleich 1). Der Dämpfungskoeffizient a kann aus der gewünschten Reaktionszeit T und dem Erfassungsintervall Δt ermittelt werden. Die obige Formel beschreibt die sog. Sprungantwort $y(t)$, die sich aus der Reaktionszeit T ergibt. Auf eine sprunghafte Änderung des Ausgangssignals erreicht das Antwortsignal nach der Reaktionszeit T 63 % des Endwertes. Bei $3 \cdot T$ sind 95 % des Endwertes erreicht.

In Bild 73 ist der Unterschied an einem Beispiel illustriert. Das über Dämpfungsfilter geführte Signal zeigt eine bessere Wiedergabe der Tendenz als beim gleitenden Mittelwert. Im Projekt wurden für einige Auswertungen Dämpfungsfilter mit einer

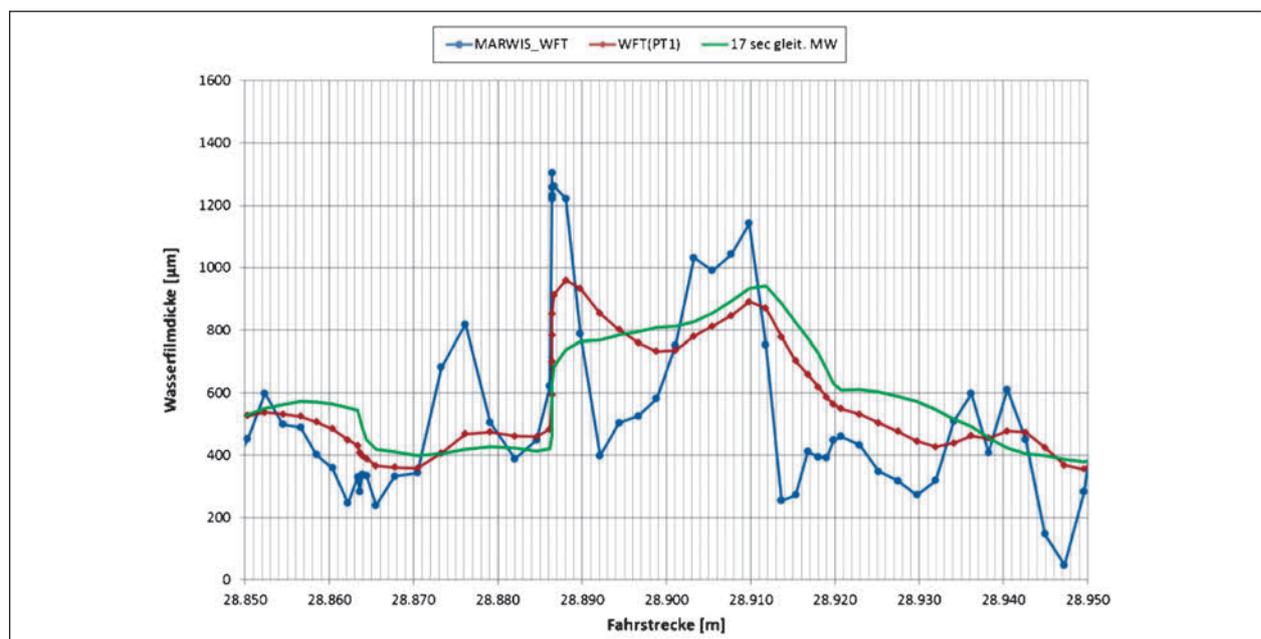


Bild 73: Gegenüberstellung gleitender Mittelwert (grüne Kurve) und Dämpfungsfilter (rote Kurve) an einer Original-Zeitreihe von mobilen Wasserfilmdicken (blaue Kurve). Gleitender Mittelwert mit $m = 17$ und Dämpfungsfilter mit $a = 0,15$

Dämpfungskonstanten zwischen 0,1 und 0,2 verwendet.

Grundsätzlich kann auch diskutiert werden, den Sprüngen der Wasserfilmmessung mit Bildung von Nässeklassen zu begegnen. Dies kann später bei der Anwendung z. B. automatisches Streuen nach aktuellen mobilen Messwerten durchaus sinnvoll sein, aber bei den verwendeten Methoden in diesem Projekt werden kontinuierliche Werte benötigt.

7.5 Referenzverfahren zur in situ Bestimmung der Wasserfilmdicke

Details zur stationären und mobilen Datenerfassung, unter anderem auch für Wasserfilme sind in den vorstehenden Kapiteln 6.2.1 und 7.4 nachzulesen. Die Wasserfilmdicke wird in μm angegeben. Das entspricht einem Wasservolumen von 1 ml pro m^2 auf der Oberfläche. Im Zweifel ist damit die gesamte Menge von Wasser (auch in Form von Eis und/oder Schnee) oder wässrige Taumittellösung auf der Oberfläche gemeint. Auch wenn die Oberfläche von Straßenbelägen in der Praxis keinesfalls glatt und eben sind. Sie weisen unterschiedliche Texturen auf, wo Wasser auch in mehr oder weniger tiefen Poren sich befinden kann.

Ein relativ einfaches Verfahren, vor Ort vorhandene flüssige Wasser- oder Lösungs-Filme für Vergleichszwecke auf der Oberfläche zu bestimmen ist der sog. WETTEX- oder Tuch-Test (Bild 74). Hierbei wird mit einem sehr saugfähigen Tuch mit definierter Fläche plan auf die Oberfläche aufgelegt, fixiert und durch leichten Andruck auf der Oberfläche möglichst die gesamte Menge an Feuchte aufgenommen. Das Tuch wird vorher im trockenen Zustand mit einer Präzisionswaage gewogen und unmittelbar nach Aufsaugen des Wasserfilms wieder gewogen. Die Differenz ist die Masse der aufgesaugten Flüssigkeit. Bezogen auf die Fläche des Tuches erhält man dann die Masse pro Quadratmeter und damit, über die spezifische Masse (in der Regel näherungsweise 1,0 kg/mm), die Wasserfilmdicke.

Ausrüstung für den WETTEX-Test im Projekt

- Akkubetriebene portable Präzisionswaage (Kern PCD) mit einer Auflösung von 0,001 g und einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ g,
- WETTEX Tücher mit den Abmaßen 25 x 36 cm = $0,09 \text{ m}^2$,

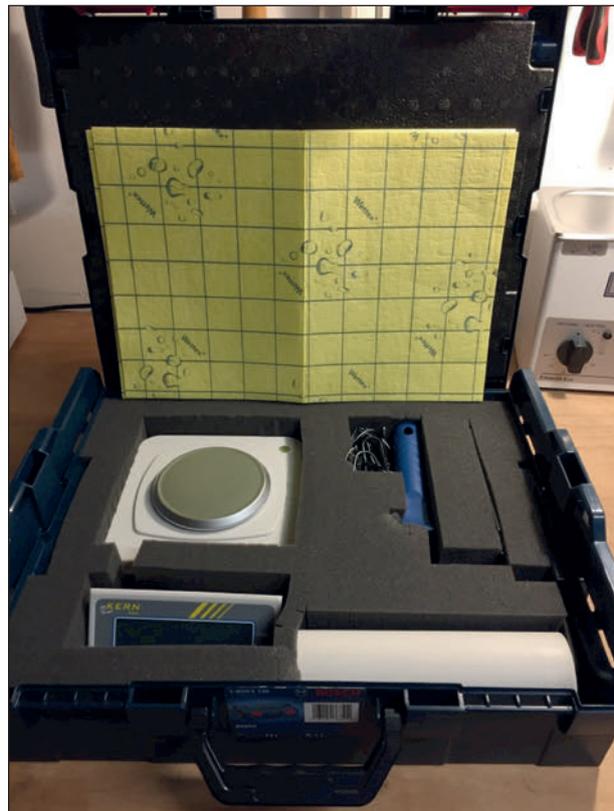


Bild 74: Koffer (L-BOXX) mit der Ausrüstung zum WETTEX- bzw. Tuch-Test zur in situ Bestimmung der Wasserfilmdicke (Foto: Karl Schedler)

- Andruckroller ca. 20 x \varnothing 5 cm.

Als Tuch wird am besten ein Schwammtuch aus Naturfaser (Baumwolle und Cellulose) mit dem Produktnamen „WETTEX“ verwendet. Das Tuch besitzt eine sehr hohe Saugfähigkeit. Das Schwammtuch in der oben genannten Größe hat ein Eigengewicht von ca. 12 g (140 g/m^2) und kann bis zu 135 g ($> 1.500 \text{ g/m}^2$) Feuchtigkeit aufnehmen.

Das einfache Auflege-Verfahren kann daher bis ca. 1,5 mm entsprechend $1.500 \mu\text{m}$ Wasserfilmdicke verwendet werden. Sind noch größere Mengen aufzunehmen, muss man einen Rahmen zur Begrenzung der Fläche auflegen und mehrere Tücher zum Aufsaugen des Wassers verwenden. Allerdings sind auch da nach oben Grenzen gesetzt, da man bei hohen Wasserfilmen ein Abfließen auch durch einen Rahmen kaum verhindern kann. Für praktische Fragestellungen reicht aber in der Regel der WFT Bereich vollkommen aus.

Die Waage muss möglichst waagrecht und auf festem Untergrund ohne Vibration aufgestellt werden. Ebenso sollte man dafür sorgen, dass keine stärkere Luftströmung oder Wind die Wägung beeinflusst.

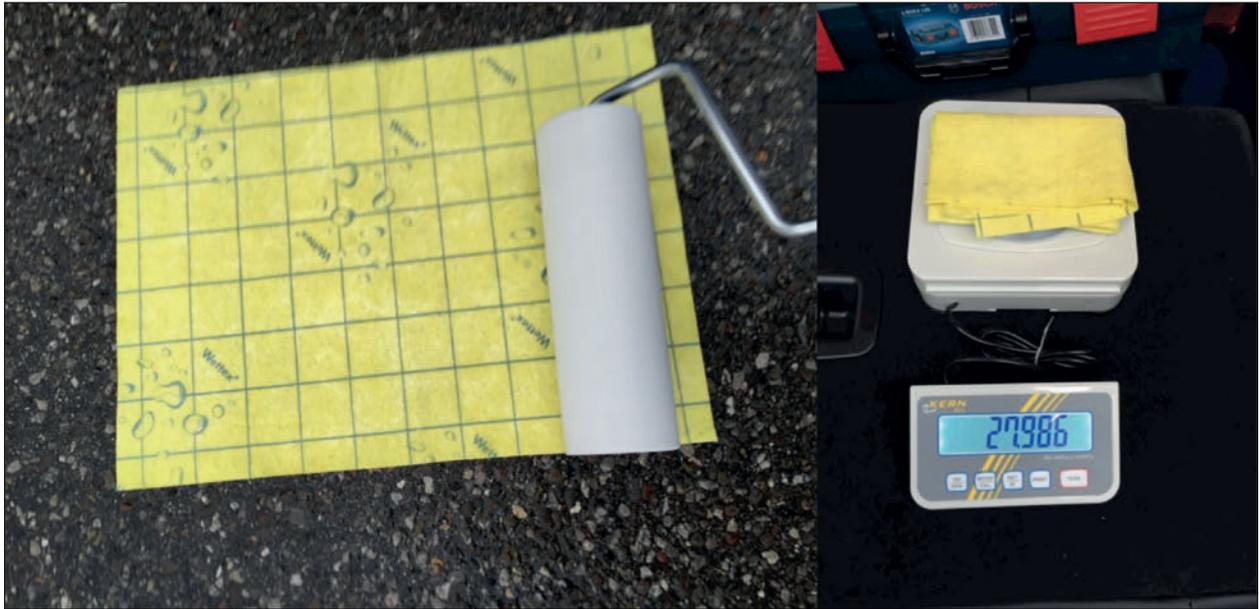


Bild 75: Beispiel zur Durchführung des Tuchtestes (Fotos: Karl Schedler)

Ebenso ist möglichst direkte Sonneneinstrahlung sowohl an der Messstelle, als auch an der Waage zu vermeiden. Um die Verdunstungsverluste gering zu halten, muss das Tuch so schnell wie möglich nach der Aufnahme gewogen werden.

In Bild 75 ist als Beispiel das Auflegen und der Andruck des Schwammtuches auf der Oberfläche zu sehen, sowie das anschließende Wiegen des Tuches.

Die Wasserfilmdicke bei reinem Wasser errechnet sich bei der gegebenen Tuchfläche wie folgt:

$$WFT[\mu\text{m}] = (\text{Gewicht}[g]_{\text{Feucht}} - \text{Gewicht}[g]_{\text{Trocken}}) / 0,09[\text{m}^2] \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Unsicherheit hängt im Wesentlichen von der nicht aufgesaugten Restmenge ab, die wiederum von der Rautiefe der Oberflächentextur abhängt. Diese Restmenge muss geschätzt werden. Je glatter die Oberfläche, desto geringer die Unsicherheit. Handelt es sich bei der Bedeckung um eine höher konzentrierte Salzlösung, muss erst die Konzentration bestimmt werden und das Ergebnis durch den Faktor der Massendichte der Salzlösung geteilt werden (z. B. bei 26 % NaCl-Lsg. ca. 1,2 [kg/l = kg/mm]). Bis ca. 10%iger Lösung ist der Fehler im Vergleich zu den anderen Unsicherheiten noch vernachlässigbar. Bei höheren Konzentrationen, sollte die Dichte-Korrektur vorgenommen werden.

Bei Schnee und Eis ist dieses Verfahren natürlich weniger geeignet. Hier muss man ggf. die Mengen

mit anderen Mitteln auf einer definierten Fläche aufnehmen und dann nach dem Schmelzen wiegen.

7.6 Mobile Strahlungsmessung

Bei den mobilen Messfahrten der Einsatzfahrzeuge ist aus Gründen der praktischen Umsetzung eine Strahlungsmessung zu aufwendig.

Für die gezielt durchgeführten Thermalkartierungen wurde im Rahmen des Projektes versucht die Eigenschaften des Belags und die der Umgebungsbedingung im Hinblick auf die Strahlungsbedingungen, die für die Vorhersagemodelle wichtig sind, zu ermitteln.

Genau Strahlungssensoren arbeiten je nach spektraler Empfindlichkeit mit einer sog. Thermosäule (oder thermophile). Jedenfalls beruht das Messprinzip auf der Energiewirkung der Strahlung und wird mit Thermoelementen in elektrische Signale umgewandelt. Es gibt auch Sensoren für die Globalstrahlung, welche auf lichtempfindlichen Halbleitern beruhen, diese können aber nicht für langwellige Abstrahlungsmessung verwendet werden. Diesem thermischen Messprinzip haftet aber unabwendbar eine mehr oder weniger ausgeprägte Trägheit an. Die Reaktionszeiten auf eine sprunghafte Änderung der Strahlung, bis zum Erreichen des endgültigen Messwertes, können von 15 bis 60 Sekunden reichen. Bei einer Fahrtgeschwindigkeit im Bereich

um 60 km/h und einem Erfassungsintervall von einer Sekunde würde der wahre Messwert erst nach einer Wegstrecke von ca. 250 bis 1.000 m erreicht werden. Bei ständig wechselnden Strahlungssituationen würde der wahre Messwert nie wirklich erreicht werden, Abschattungen von geringer Ausdehnung z. B. unter Brücken und in kurzen Waldstücken etc., wären in den Messdaten überhaupt nicht zu erkennen.

Daher kommt man nicht umhin, diese Charakteristik bei der Aufbereitung der erfassten Messdaten zu berücksichtigen. Für die Kompensation der Trägheit des Sensors und die Schätzung des wahren Messwerts aus den vorliegenden Abtastwerten, wurde der Begriff dynamische Kalibrierung geprägt.

7.6.1 Dynamische Kalibrierung der Strahlungsmessung

Voraussetzung für die dynamische Kalibrierung des Strahlungssensors für die Kompensation der Reaktionszeit ist die Vermessung der dynamischen Eigenschaften. Dies kann leicht durchgeführt werden unter Laborbedingungen und unter Verwendung des endgültigen Messaufbaus, mit allen Komponenten, die auch nachher bei der Messfahrt verwendet werden.

Dazu genügt eine oder mehrere hintereinander folgenden sprunghaften Anregungen mit einer konstanten Strahlungsquelle. Am besten im verdunkelten Raum, eine Strahlungsquelle mit einer konstan-

ten Stärke, die mindestens im mittleren Teil des Messbereichs liegt. Die Strahlungsquelle wird dabei eingeschaltet und solange belassen, bis der Messwert sich stabilisiert hat. Danach ausgeschaltet, bis der Messwert wieder auf den niedrigsten Wert gesunken und stabil ist (siehe Bild 76).

Das Antwortsignal des Sensors lässt sich in der Regel mit einer einfachen Übertragungsfunktion als Differenzgleichung beschreiben in der Form:

$$\begin{aligned} \text{Output}_t &= \text{Input}_{t-1} \cdot (1 - \tau) + \text{Input}_t \cdot \tau \\ \tau &= \frac{1}{T_R} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 7})$$

wobei Output das Antwortsignal des Sensors bedeutet, Input ist das Anregungssignal, die äquidistanten Abtastwerte (Samples) werden mit t durchnummeriert mit einem Abtastintervall von $T = 1$ sec. τ bedeutet die Zeitkonstante und kann aus der Reaktionszeit T_R in [sec] berechnet werden. Die Reaktionszeit kann entweder aus den Abtastwerten manuell ermittelt werden, oder mithilfe der multiplen Regression.

Die dynamische Kompensation wird dann nach der Umkehrfunktion aus zwei hintereinander folgenden Erfassungswerten im Abstand von $T = 1$ sec vorgenommen, wie folgt:

$$\text{ETV}_t = \text{SV}_t \cdot \frac{1}{\tau \cdot T} - \text{SV}_{t-1} \cdot \left(\frac{1}{\tau \cdot T} - 1 \right) \quad (\text{Gl. 8})$$

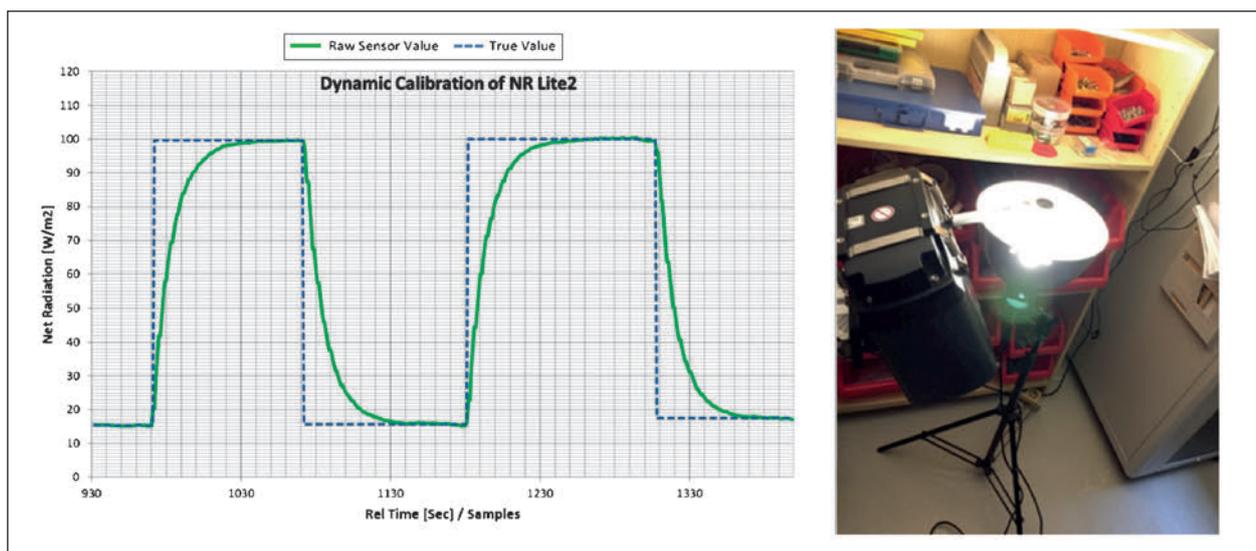


Bild 76: Messung der Reaktionszeit des Strahlungssensors mithilfe einer einfachen Strahlungsquelle. Die gestrichelte blaue Kurve ist die tatsächliche Anregung, die grüne Kurve ist die Antwortfunktion des Sensors. Bei dem Bilanzstrahlungsgeber sollten vorsorglich die obere und untere Sensorfläche getrennt vermessen werden. In der Regel sind beide Seiten identisch (Foto: Karl Schedler)

Wobei ETV zum Abtastzeitpunkt t der geschätzte wahre Wert (ETV = Estimated True Value) aus den beiden Sensorwerten SV zum Zeitpunkt t und $t-1$ den Abtastwert im Intervall zuvor. Sollte, etwa durch Messwertausfälle etc., das Intervall zwischen den zwei Abtastungen größer als 1 Sekunden sein, wird dies durch Multiplikation mit T , der tatsächlichen Intervalldauer berücksichtigt. T muss aber immer kleiner sein, als die Reaktionszeit des Sensors. Ansonsten wird die Kompensation nicht angewendet.

Die Kompensation funktioniert aber nur, wenn die zufälligen Störungen des Sensorsignals vernachlässigbar sind. Bei stochastischen Störsignalen reagiert die Kompensation zu heftig auf die additiven Störungen, was zur Überkompensation führt. In diesem Fall müssen vorher die Sensordaten über eine Dämpfungsfunktion geglättet werden. Dies führt aber dann zu einer bleibenden Verzögerung, welche in dem Fall in Kauf genommen werden muss. Besser ist dann die Dämpfung bereits vor der Erfassung in der Messelektronik zu realisieren und die Reaktionszeit im gesamten zu bestimmen.

Bei der IceCar4-Lösung besitzt der Bilanzstrahlungsgeber ein analoges Messsignal, das mithilfe ANACON digitalisiert wird. Die dort in geringem Umfang auftretenden stochastischen Störungen können mit einer leichten Dämpfungsfunktion kompensiert werden. Übrig bleibt eine Unsicherheit der Zuordnung zum Erfassungsort von ca. 2 Sekunden. Das entspricht bei üblichen Fahrgeschwindigkeiten

einer Strecke von max. 40 m. Der Globalstrahlungsdetektor im WS301 weist dagegen keinerlei signifikanten Störungen auf und kann vollständig kompensiert werden.

Wie Bild 77 zeigt, kann der wahre Wert sehr gut aus den jeweils hintereinander folgenden Werten der erfassten Zeitreihe rekonstruiert werden. Lediglich am Beginn der Sprunganregung ergibt sich naturgemäß eine Abweichung, die aber in der Praxis, wo solche Sprünge eher selten sind, weniger ins Gewicht fällt.

Am 19.04.2017 wurde in der Lichthalle der BAST durch Erzeugen einer sprungförmigen Anregung durch eine Strahlungs Lampe, die Abstrahlungssensoren (Unterseite zur Bodenoberfläche hin) angelegt und die Sprungantwort vermessen.

Für den kurzwelligen Strahlungsaufnehmer war die Anregung einigermaßen ausreichend und es konnte die Sprungfunktion ermittelt werden. Allerdings für den langwelligen Strahlungssensor war die Methode ungeeignet, weil offensichtlich keine typische Sprunganregung erzeugt werden konnte. Die Wärmestrahlung erhöht sich während des Versuchs stetig in unbekannter Weise, sodass keine Sprungfunktion ermittelt werden kann. Da in den technischen Daten des CNR4 als Reaktionszeit für beide Sensoren die gleichen Zeiten angegeben sind, wird näherungsweise auch für den langwelligen Sensor die gleiche Zeitkonstante für die Kompensation verwendet (siehe Bild 78).

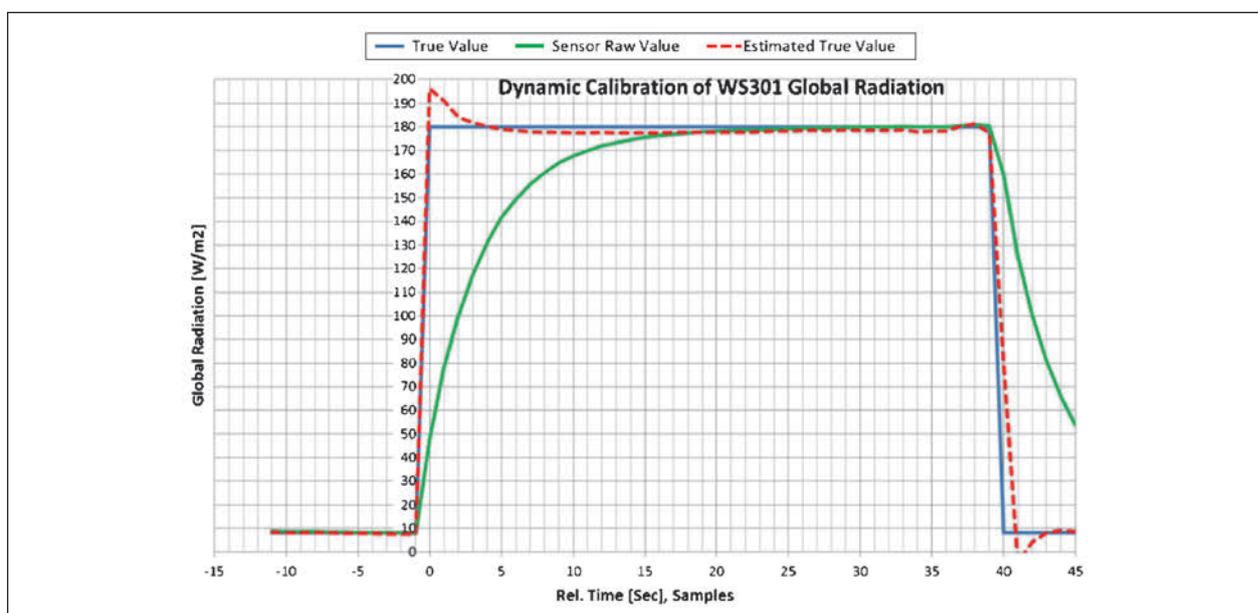


Bild 77: Dynamische Kalibrierung der Globalstrahlung des WS301. Blaue Kurve zeigt die Anregung, die grüne Kurve die Sensorwerte, wie sie erfasst werden. Die rot gestrichelte Linie zeigt die nach der Kompensation sich ergebenden Werte-Zeitreihe

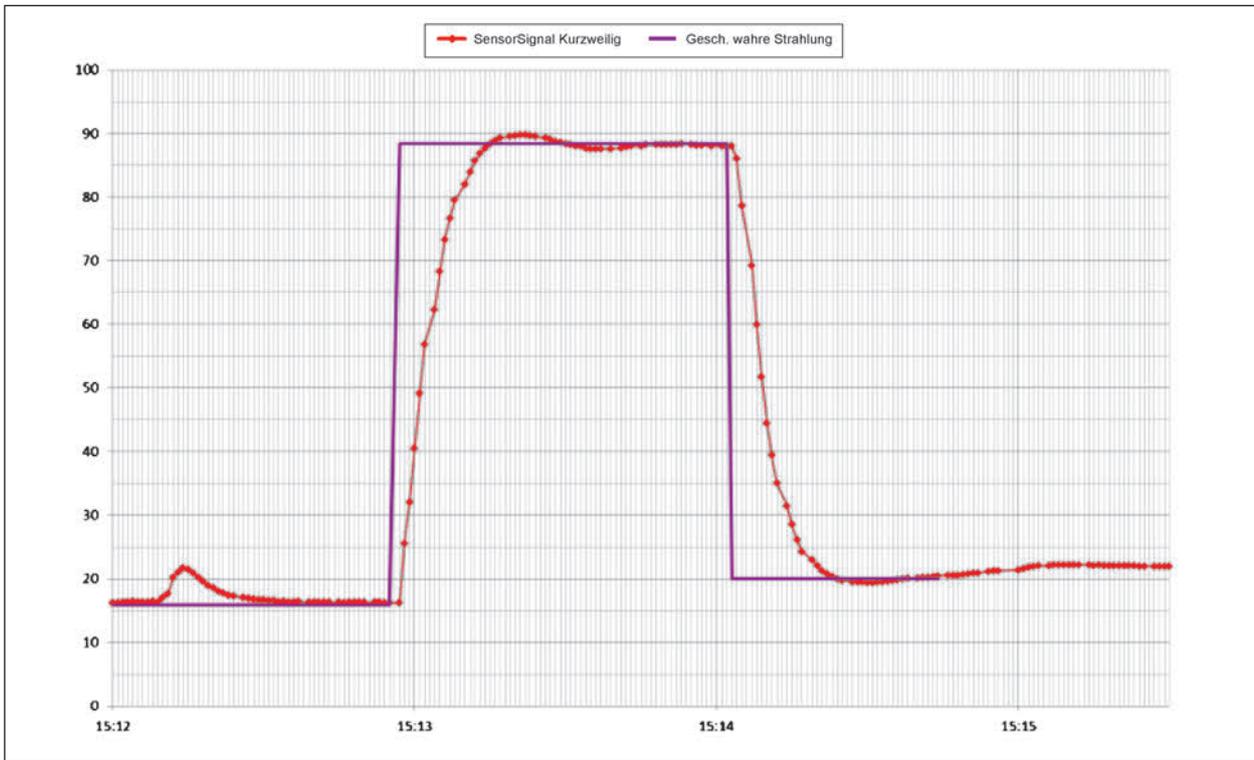


Bild 78: Sprungantwort des Strahlungsgebers CNR4 am IceCar5 der BAST

$$WMW_t = SMW_t \cdot c_1 + SMW_{t-1} \cdot c_2 \quad (Gl. 9)$$

Parameter c_1, c_2 mittels Regression berechnet

$$\tau = \frac{1}{c_1} = -\frac{1}{c_2 - 1} \Rightarrow c_1 = c_2 - 1$$

CNR4: $\tau = 0,199$ $\text{interval} = 1 \text{ sec}$

7.6.2 Kompensation Windeinfluss beim Bilanzstrahlungsgeber NR Lite2 (Kipp&Zonen)

Der Bilanzstrahlungsgeber besteht aus einer oberen und unter Sensorfläche, die ungeschützt der umgebenden Luft ausgesetzt ist. Da das Messprinzip auf der Wärmewirkung beruht ist es verständlich, dass starke Luftbewegungen zu einer zusätzlichen Abkühlung führen. Gerade im mobilen Einsatz wird nicht unerheblicher Wind alleine durch die Fahrtgeschwindigkeit erzeugt.

Der Hersteller gibt eine Kompensationsformel, abhängig von der Windgeschwindigkeit an, die in diesem Fall aus der Fahrgeschwindigkeit abgeleitet werden kann. Wir gehen davon aus, dass die Windgeschwindigkeit allein durch die Fahrgeschwindigkeit verursacht wird und die natürliche Windgeschwindigkeit demgegenüber vernachlässigt werden kann. Zumal die Wetterverhältnisse bei den gezielten Messfahrten berücksichtigt werden.

Der Kompensationsalgorithmus lautet folgendermaßen:

$$NR_t = (NR.IN_t - NR.OUT_t) \cdot (1 + c_w \cdot v_t^{3/4}) \quad (Gl. 10)$$

$c_w = 0,01$

NR bedeutet die Bilanzstrahlung in $[W/m^2]$ aus den zwei Messkanälen NR.IN $[W/m^2]$ für Bilanzstrahlung, wenn Einstrahlung überwiegt (positives Sensorsignal) und NR.OUT $[W/m^2]$ wenn die Abstrahlung überwiegt (negatives Sensorsignal). Der Windeinflussfaktor c_w ist ein vom Hersteller angegebener Wert. Diese Kompensation kann auch Offline bei der Aufbereitung noch vor der dynamischen Kompensation vorgenommen werden.

7.7 Mobile Windmessung (IceCar5)

Folgende Winddaten werden erfasst aus dem Wettersensor WS500 in Bezug auf das fahrende Fahrzeug:

- SWG = scheinbare Windgeschwindigkeit (aus Sicht des fahrenden Fahrzeugs) in $[m/s]$,
- SWR = scheinbare Windrichtung (in Bezug zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs) in $[^\circ]$.

Aus den GPS Daten des Erfassungsgerätes (miniPAD, Apple und MARWIS App):

$v =$ Fahrgeschwindigkeit über Grund in [m/s],

Kurs = rechtweisender Kurs über Grund (geogr. Fahrtrichtung) in [°].

Die wahre Windgeschwindigkeit WWG [m/s] über Grund berechnet sich wie in Bild 79 dargestellt.

$$WWG = \sqrt{SWG^2 + v^2 - 2 \cdot SWG \cdot v \cdot \cos(\alpha)} \quad (\text{Gl. 11})$$

$$\alpha[\text{rad}] = \text{SWR}[\text{°}] \cdot \frac{\pi}{180}$$

Die wahre geogr. Windrichtung WWR [°] über Grund berechnet sich folgendermaßen:

$$\beta[\text{rad}] = \sin^{-1}\left(\frac{SWG}{WWG} \cdot \sin \alpha[\text{rad}]\right) \quad (\text{Gl. 12})$$

$$\gamma[\text{°}] = 180 - \text{SWR}[\text{°}] - \beta \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$WWR[\text{°}] = \text{SWR}[\text{°}] + \text{Kurs}[\text{°}] + \gamma[\text{°}]$$

Der mobile Windsensor muss so ausgerichtet sein, dass seine Nordrichtung in Fahrtrichtung des Fahrzeugs zeigt.

Die archivierten Rohdaten sind in einem offline Bearbeitungsschritt konvertiert worden und die wahre Wind-Richtung und Geschwindigkeit mit abgespeichert. Der Winkel zwischen der scheinbaren (aus Sicht des am fahrenden Fahrzeug installierten Sensors) und der wahren Windrichtung ist hier mit γ bezeichnet. Der Winkel zwischen dem wahren Fahrtwind (= wahrer Kurs) und der scheinbaren Windrichtung

ist mit β bezeichnet. Der Winkel zwischen scheinbarer Windrichtung und dem wahren Fahrtwind (= wahrer Kurs) ist mit α bezeichnet.

7.8 Schätzung der Taustoff-Konzentration und -Dichte anhand mobiler Messdaten

Für die spätere Anwendung der mobilen Datenerfassung und der streckenbezogenen Glättevorhersage, speziell zur automatischen Ermittlung der benötigten Taustoffausbringung, kann die vorhandene Taustoffdichte (TSQ) auf der Straßenoberfläche eine wichtige Information darstellen. Grundsätzlich kann Restsalz bzw. Taustoffkonzentration (TSK), die entscheidend für die Gefriertemperatur-Erniedrigung ist, nur gemessen werden, wenn das Taumittel in wässriger Lösung vorliegt. Auch wenn noch trockenes oder nicht gelöstes Taumittel auf der Straße liegt, kann es durch die vorhandene Sensorik nicht bestimmt werden. Kommt Wasser dazu, in der Regel entweder durch Kondensation oder durch Niederschlag, kann sich erst die Gefriertemperatur erniedrigende Wirkung entfalten und nur dann kann es gemessen werden. Grundsätzlich kann auch in Lösung und besonders bei positiven Temperaturen die Taustoffkonzentration bzw. Gefriertemperatur passiv oder aktiv nur durch in die Oberfläche eingebettete Sensoren bestimmt werden. Es gibt aber Zustände, bei denen durch die chemisch-physikalischen Zusammenhänge die Gefriertemperatur und Taustoffkonzentration zumindest abgeschätzt werden kann.

Das Phasendiagramm (siehe Bild 80) zeigt den Zusammenhang zwischen der Massenkonzentration des Taustoffs (in dem Beispiel NaCl) und der Gefriertemperatur. Grundsätzlich stellt sich auf der Straßenoberfläche – abgesehen von Übergangszuständen, die entstehen weil die Prozesse nicht beliebig schnell ablaufen – immer ein Gleichgewicht zwischen der dort herrschenden Oberflächen-Temperatur und der Konzentration. Ist nicht genügend Taustoff vorhanden bei der entsprechenden Wasserfilmdicke, dann bildet sich solange Eis, bis die Restflüssigkeit die Konzentration aufweist, die der Temperatur entspricht. Ist überhaupt kein Taustoff vorhanden, bewegen sich die Zustände auf der 0%-Achse und nach energetischem Ausgleich bildet sich theoretisch eine vollständige Eisschicht. In der Praxis sind aber noch andere Stoffe vorhanden, die ein sofortiges Gefrieren verlangsamen und nicht

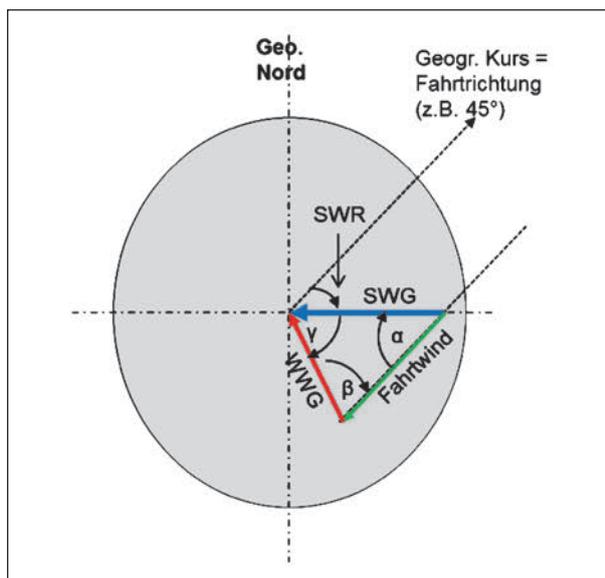


Bild 79: Berechnung der wahren Windrichtung aus der scheinbaren Windrichtung am fahrenden Fahrzeug

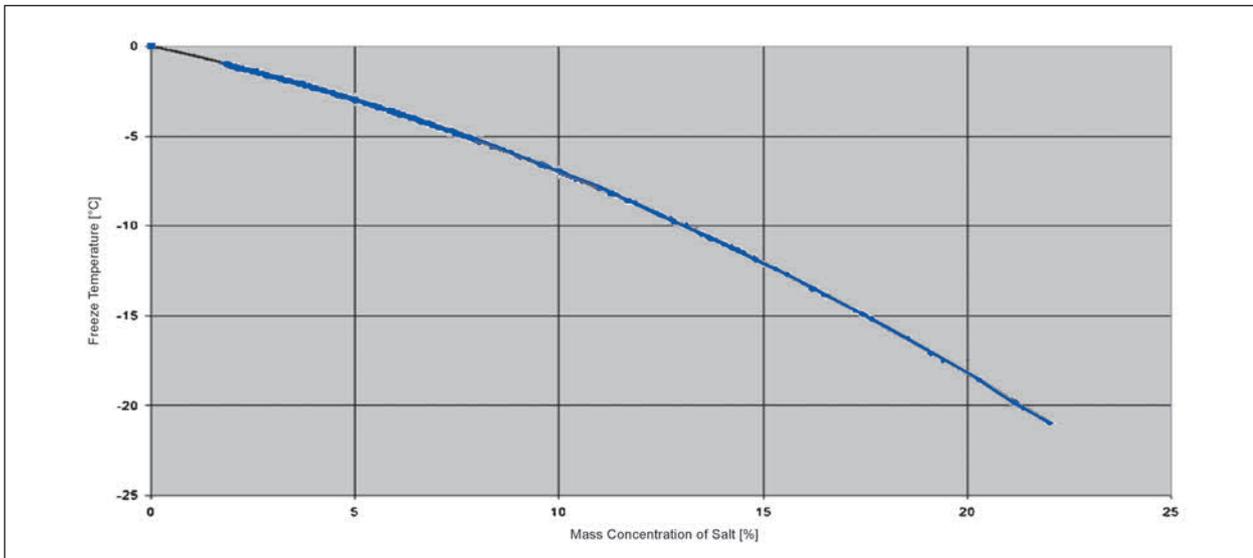


Bild 80: Phasendiagramm für NaCl. Zusammenhang zwischen Massenkonzentration des Tausalzes zur Gefriertemperatur der Lösung

genau bei 0 °C stattfinden lassen. Außerdem wird bei Gefriervorgang Energie frei, die sich erst mit der Umgebung ausgleichen muss.

Mit einem berührungslosen, optischen Straßenzustands-Sensor kann man die Oberflächen-Temperatur (RST) messen, die Filmdicke (WFT) der Bedeckung (zumindest bis zu einer oberen Grenze) und den Eisanteil (IP) in der Kontamination. Mit diesen Parametern lässt sich der Zustand im Phasendiagramm bestimmen. Genaueres über die mobile Datenerfassung findet sich im Kapitel 6.2).

Dabei sind 3 Fälle zu unterscheiden:

- Oberflächen-Temperatur > 0 °C
Hier kann keine Aussage über die Taumittelkonzentration und -dichte getroffen werden.
- Oberflächen-Temperatur ≤ 0 °C und Eisanteil = 0 %
Hier kann die Aussage getroffen werden, dass mindestens so viel Taumittel vorhanden sein muss, um das Gefrieren bei dieser Temperatur zu verhindern. Mindest-Taumittelkonzentration und über Wasserfilmdicke Mindest-Taumitteldichte!
- Oberflächen-Temperatur ≤ 0 °C und Eisanteil > 0 %
Hier kann die Taumittelkonzentration am Phasendiagramm genau angegeben werden und damit über die Wasserfilmdicke die Taumitteldichte.

Im Folgenden wird beschrieben, wie aus den mobilen Daten Wasserfilmdicke (WFT), Fahrbahntemperatur (RST) und Eisprozent (IP) des Sensors MARWIS die Taustoffkonzentration TSK und die Taustoffdichte bzw. -menge pro Quadratmeter TSQ bei NaCl näherungsweise abgeschätzt werden kann.

Das Verfahren funktioniert, wie erwähnt, bei gemessenen FBT von ≤ 0 °C.

Singemäß kann die TSK von anderen Taustoffarten bei bekannter Näherungsformel für das Phasendiagramm (Equilibrium) bestimmt werden (siehe dazu auch [40]). Die Bestimmung der Taustoffdichte (TSQ) auf der Oberfläche ist natürlich abhängig von der Messung der Wasserfilmdicke, die über die Oberfläche sehr stark variiert, dem entsprechend variiert auch die TSQ.

$$TSQ[g/m^2] = WFT_{\text{flüssig}}[\mu m] \cdot \frac{TSK[\%]}{100 - TSK[\%]} \quad (\text{Gl. 13})$$

$$WFT_{\text{flüssig}}[\mu m] = WFT_{\text{MARWIS}}[\mu m] \cdot (1 - IP[\%]/100)$$

$$TSK_{\text{NaCl}}[\%] = -0,0328[\%/^{\circ}C^2] \cdot RST^2[^{\circ}C] \sqrt{-1,7439[\%/^{\circ}C]} \cdot RST[^{\circ}C]$$

Es wurden nach dem Verfahren einige auf den Teststrecken erfassten mobile Daten dahingehend ausgewertet. Ein Beispiel an der Teststrecke St2139 zeigt das Diagramm in Bild 81. Es ist zu erkennen, dass bei der Hinfahrt geringere Taustoffdichten vorhanden waren. Das Streufahrzeug hat vermutlich die Strecke, zumindest teilweise, dabei gestreut. Bei der Rückfahrt ist zu erkennen, dass die Restsalzmengen deutlich höher sind. Bei den Fahrten waren die Temperaturen durchweg unter 0 °C.

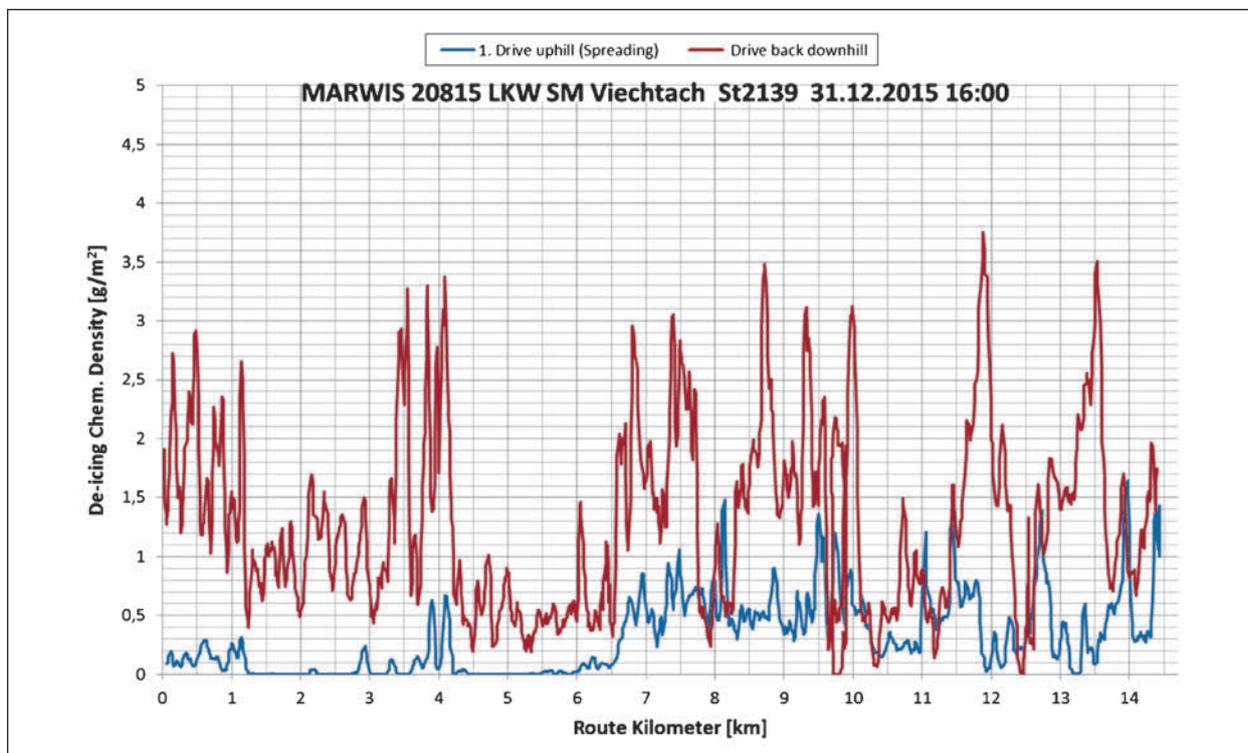


Bild 81: Verlauf der Taustoffdichte $[g/m^2]$ während einer Fahrt mit dem Streufahrzeug auf der Teststrecke Viechtach – St. Engelmar St2139. Blaue Kurve war auf der Hinfahrt (Bergfahrt) aufgenommen, die rote Kurve bei der Rückfahrt (Talfahrt). Leichte Glättung durch gleitenden Mittelwert über ca. 4 Sekunden. Darstellung bezogen auf Streckensegmente (relative Kilometrierung)

Die Bestimmung der Taustoffdichte hängt natürlich stark von der Messung der Wasserfilmdicke ab. Grundsätzlich gehen die Unsicherheiten dieser Abschätzung tendenziell eher dahin, die Taustoffmenge zu unterschätzen. Insofern können die Werte bei der Streumenge durchaus als noch vorhandene Mindestmengen berücksichtigt werden.

8 Untersuchungen zur Modellierung von Streckeneigenschaften mittels stationärer und mobiler Messdaten

8.1 Problemstellung und Ansätze

Die wesentliche Aufgabe dieses Projektes besteht darin, zu prüfen, inwieweit stationäre und vor allem mobile Messdaten des Straßenwetters und des Straßenzustands die verschiedenen Streckeneigenschaften widerspiegeln können. Bild 82 zeigt den Ansatz für den Datenfluss einer Streckenvorhersage, der den Untersuchung zugrunde liegt. Kern des Ansatzes ist ein durch stationäre und mobile Messungen gestütztes Streckenmodell.

In der obigen Darstellung werden numerische, auf regelmäßige geogr. Rasterpunkte bezogene Vorhersagemodelle (siehe [37]) als Grundlage verwendet. Unter Verwendung der regelmäßig und stationär erfassten Wetter- und Straßenbelagsdaten am Standort der Referenzstationen, wird über statistische Verfahren (MOS – siehe Glossar) ein Modell über den Zusammenhang der Wettersituation am Referenzstandort zu den Rasterpositionen der globalen numerischen Vorhersage hergestellt. Das statistische Streckeneigenschafts-Modell stellt wiederum den Zusammenhang (statistische Transformationsfunktion) zwischen der Wettersituation am ortsfesten Referenzstandort (Straßenwetterstation) und den einzelnen Streckensegmenten mithilfe der mobil erfassten Daten, her. Statische Meta Daten bedeuten in diesem Fall alle nicht zeitveränderlichen Eigenschaften der Referenzstation und der Strecke (wie geografische Koordinaten, Ausstattungsmerkmale, Belageigenschaften etc.).

In der vorliegenden Untersuchung soll geklärt werden, inwieweit die Eigenschaften der einzelnen Streckensegmente durch eine Transformationsfunktion aus den Straßenwetterzuständen an einem stationären Referenzort dargestellt werden können.

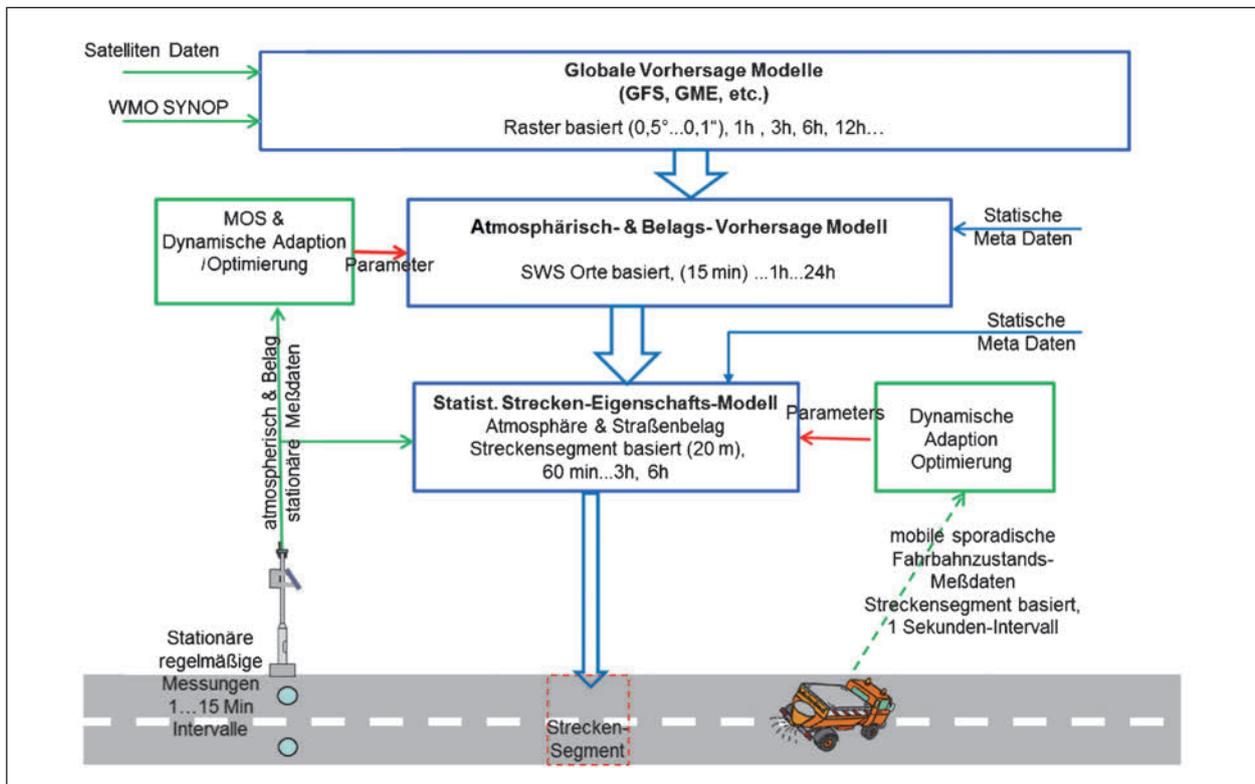


Bild 82: Schematische Darstellung des Lösungsansatzes für die Modellierung der Streckeneigenschaften und für die streckenbezogene Vorhersage des Straßenzustandes

Grundsätzlich können letztlich Vorhersagen und auch aktuelle Straßenwetterzustände nur durch Beobachtung verifiziert und beschrieben werden. Dabei ist selbstverständlich bekannt, dass stationäre und vor allem mobile Sensoren Messunsicherheiten aufweisen. Die Alternative wären menschliche Beobachter. Abgesehen vom Aufwand, sind auch diese Beobachtungen ebenfalls mit nicht unerheblichen Unsicherheiten behaftet. Wir gehen deshalb davon aus, dass die detaillierten Straßenwettergrößen immer noch am besten mit Sensoren zu erfassen sind. Ein Modellierungsansatz, der sich auf den statistischen Zusammenhang dieser Größen stützt, ist einem theoretischen Modell, sei es noch so detailliert, vorzuziehen. Bei diesem Ansatz, wie er in Bild 82 dargestellt wird, können systematische Abweichungen und Kalibrierfehler prinzipiell korrigiert werden. Die kleinräumigen Eigenschaften einer Strecke sind derart komplex und vielschichtig (Belags-Art und -Farbe, Textur, Quer- und Längsneigung, Unebenheiten sowie Umgebungsbedingungen wie Bewuchs, Abschattung, Bebauung etc.) dass sie mit vertretbarem Aufwand einzeln kaum modellierbar sind. Selbst wenn alle Aspekte berücksichtigt werden könnten, müssten die quantitativen Auswirkungen dennoch mithilfe von Messungen parametrisiert werden.

Die stationären Daten werden regelmäßig und kontinuierlich erfasst und geben den zeitlichen Wetterverlauf wieder. Der Referenzort sollte für eine überschaubare Strecke (ca. 20...50 km) repräsentativ den Straßenwettertrend wiedergeben. Mobile Messdaten sind sporadisch, unregelmäßig erfasst und sind als Momentaufnahmen der Situation zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem kleinräumigen Streckensegment bzw. im statistischen Sinne als Stichproben anzusehen. Je mehr Stichproben pro Segment zu verschiedenen Wettersituationen erfasst werden, desto genauer können die Streckeneigenschaften herausgearbeitet werden. Wenn Winterdienstfahrzeuge dauerhaft mit derartigen mobilen Sensoren ausgerüstet werden, trägt jede Fahrt dazu bei, die Stichprobenmenge zu erhöhen und damit die Streckeneigenschaften deutlicher zu beschreiben.

In der folgenden Untersuchung wurde der Zusammenhang der stationären Messdaten an den Referenzstandorten auf der A 9 (Offenbau und Gelbsee), sowie der St2139 (Predigtstuhl) und der mobilen Daten der Meistereifahrzeuge auf den Teststrecken A 9 Greding und St2139 Viechtach analysiert.

Dabei sind die für die Glättebildung und die Ermittlung Taumitteldichte wesentlichen Größen betrachtet worden:

- Straßentemperatur (Fahrbahnoberflächentemperatur),
- Taupunkttemperatur,
- Wasserfilmdicke (Menge an Wasser pro Fläche, in allen möglichen Aggregatzuständen).

Untersucht wurden zwei Ansätze:

- Auf einer einmaligen, bei Standard Bedingungen durchgeführten Thermalkartierung, basierenden Übertragungsfunktion (einfachste Form als additive Konstante pro Streckensegment),
- auf allen mit Einsatzfahrzeugen durchgeführten mobilen Messfahrten basierenden statistischen Transformationsfunktion.

Zunächst werden die Methoden und Ergebnisse der speziell durchgeführten erweiterten Thermalkartierungen (→ 8.2) erläutert. Danach werden die Methoden und Ergebnisse des statistischen Transformationsmodells erörtert und am Schluss die Ergebnisse verglichen.

8.2 Methoden der Auswertung der Messfahrten zur Thermalkartierung

8.2.1 Temperaturprofil der Strecke

Die wichtigste Aussage einer Thermalkartierung ist das Temperaturprofil der Fahrbahnoberfläche der Strecke. Das Temperaturprofil gibt an, um wie viel höher oder niedriger die Belagstemperatur an einer Stelle der Strecke ist im Vergleich zu einem Referenzpunkt. Als Referenzpunkt sollte grundsätzlich die Position einer Messstelle gewählt werden, bei der die Fahrbahnoberflächentemperatur kontinuierlich gemessen wird und als Referenzpunkt für die Vorhersage geeignet ist. Die Position sollte möglichst innerhalb eines Streckenabschnitts liegen. Im Projekt wurde davon ausgegangen, dass eine Teststrecke mit einer Richtungsfahrbahn als Streckenabschnitt im Sinne des Temperaturprofils zu betrachten ist und dass ein Referenzpunkt zunächst pro Teststrecke festgelegt wird.

Grundsätzlich ist auch zu beachten, dass ein aufgenommenes Temperaturprofil streng genommen nur

für die Wettersituation gültig ist, bei der sie gemessen wurde. Noch strenger genommen, hat der zurückliegende Wetterverlauf ebenfalls einen Einfluss auf das Profil.

Am aussagekräftigsten ist das Temperaturprofil, welches in einer klaren, durchgehend wolkenlosen und windstillen Nacht aufgenommen worden ist. Hier ist die Abstrahlung am größten und die Abkühlung an den sog. Cold-Spots, also kalten Stellen, am größten und die sog. Hot-Spots, also warmen Stellen, treten am deutlichsten hervor. Ebenso lassen sich Abschattungen und eingeschränkte Himmels- Apertur am deutlichsten erkennen.

Zeitlicher Temperatur-Gradient

Während der Dauer einer Messfahrt verändert sich natürlich auch die Temperatur auf natürliche Weise z. B. wegen vorschreitender Abkühlung in der Nacht oder umgekehrt am Tage, wegen vorschreitender Erwärmung. Dieser Effekt verfälscht das Temperaturprofil, bei dem ja nur die geogr. Streckenunterschiede von Interesse sind. Daher wurde nach Ende der Messfahrt noch einmal ein Stück derselben Strecke abgefahren, die bei Beginn der Messfahrt aufgenommen worden ist.

Der sich aus den Temperaturdifferenzen und der zeitlichen Differenz ergebende Temperatur-Gradient wird als Gradientenverlauf den Temperaturwerten überlagert. In Bild 83 sieht man ein Beispiel für eine Messfahrt, bei der am Schluss ein kleines Stück der anfangs befahrenen Strecke noch einmal abgefahren wird. Zwischen dem ersten Aufnehmen der Strecke und dem zweiten nochmaligen Abfahren lagen ca. 100 Minuten. Der Gradienten-Verlauf ist im Diagramm mit dargestellt.

Das Temperaturprofil TP(RSEG) an einem Streckensegment RSEG berechnet wie folgt:

$$T(RSEG_{Ref}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (T_i(RSEG_{Ref})_i + g \cdot (t - t_0)) \quad (\text{Gl. 14})$$

$$TP(RSEG) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (T_i(RSEG)_i + g \cdot (t - t_0) - T(RSEG_{Ref}))$$

Die Anzahl der geografisch in einem Streckensegment zugeordneten Temperaturwerte zum Messzeitpunkt t sei n . Es wird damit, wenn mehrere Abtastwerte in ein Segment fallen, der Mittelwert berechnet. Der Abtastzeitpunkt des Messfahrtbeginns ist t_0 . Der Parameter g ist der Temperaturgradient in \pm °C/sec der über die Dauer der Messfahrt und der Temperaturdifferenz ermittelt wird.

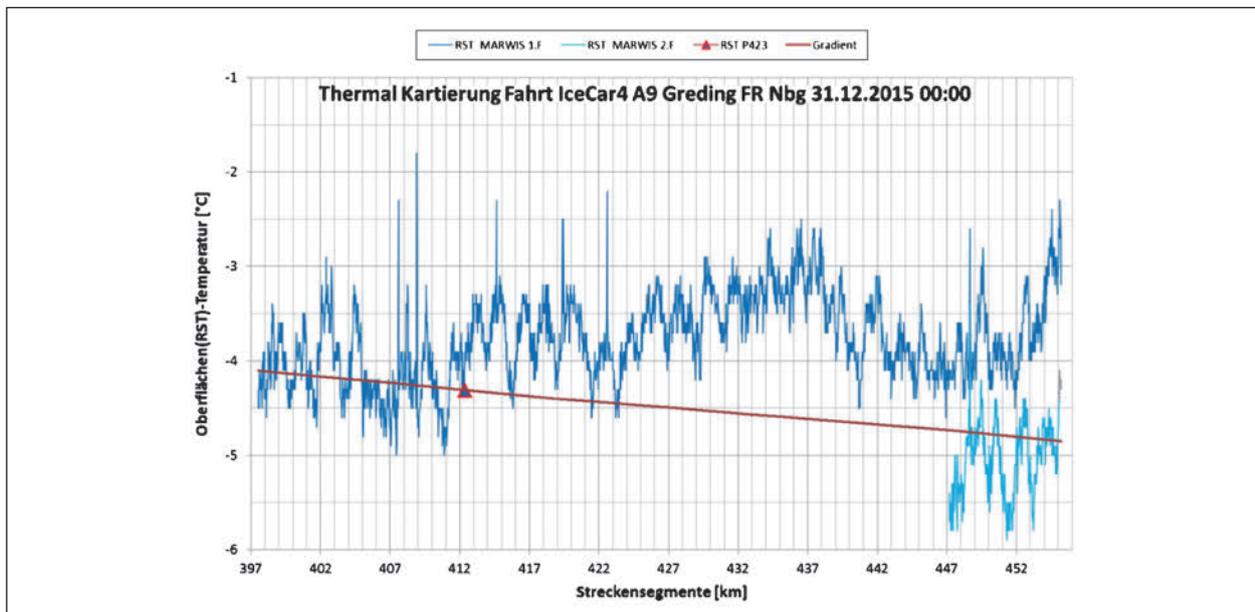


Bild 83: TM Messfahrt auf der A 9. Dunkelblau: erste Messfahrt, Hellblau: zweite Messfahrt im Anschluss an die erste von km 457 bis 447. Rot: die sich aus der Differenz ergebende Gradientenlinie mit der die absoluten Temperaturwerte zu korrigieren sind

Der Referenzwert $T(RSEG_{Ref})$ ist der mobile Temperaturwert, der am Referenzpunkt (Position Messstelle), bereinigt um den Temperaturgradienten, ermittelt worden ist. Am Referenzpunkt hat demnach das Temperaturprofil den Wert 0!

Alternative zum Temperaturgradient

Wenn das Temperaturprofil auf die Referenzstation bezogen wird (muss von der Messfahrt abgedeckt werden) und kontinuierlich erfasste stationäre Daten während der Thermalkartierungs-Fahrt vorliegen, bietet sich eine wesentlich einfachere Methode zur Kompensation des generellen Temperaturtrends an.

Die einzelnen Temperatur-Abtastwerte der Strecke werden direkt auf die zum selben Zeitpunkt an der Referenzstation gemessenen Temperaturwerte bezogen.

Da es erfahrungsgemäß immer einen Unterschied zwischen der mobilen Temperatur und der stationären Temperatur gibt, wird diese noch zusätzlich durch die am Referenzstandort bei der Vorbeifahrt gemessenen Temperaturunterschied kompensiert. Damit erreicht man, dass das Temperaturprofil an der Stelle des Referenzortes den Wert 0 aufweist.

Bild 84 zeigt ein Beispiel für die Rohdaten einer Thermalkartierungs-Fahrt und die sich während der Messfahrt leicht ändernden Straßentemperatur am

Referenzort. Indem nicht die ganze Messfahrt auf den Wert am Referenzort bezogen wird, sondern der zum jeweiligen Zeitpunkt gemessenen stationären Wert am Referenzort, wird der natürliche Gradient berücksichtigt. Hier in dem Beispiel standen lediglich im 15 Minuten Intervall erfasste Daten zur Verfügung. Die Änderung während der ca. 45 Minuten dauernden Fahrt sind allerdings ohnehin minimal $-0,2 \text{ °C}$, sodass der Fehler vernachlässigbar ist.

Die Formel sieht folgendermaßen aus:

$$TP(RSEG) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{j=m} (Tm_i(RSEG)_i - Ts_i(RSEG_{Ref})) + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{j=m} (Ts_{t_0}(RSEG_{Ref})_j - Tm_{t_0}(RSEG_{Ref})_j) \quad (\text{Gl. 15})$$

Dabei ist TP das Temperaturprofil an dem Streckensegment RSEG. T_m ist die mobile Temperatur und T_s die stationäre Temperatur am Referenzort $RSEG_{Ref}$ und zum Zeitpunkt t . Die mittlere Differenz, aus der am Zeitpunkt t_0 jeweils am Referenzort selbst gemessene mobile und stationäre Temperatur wird als Korrekturwert addiert. Die Zähler n und m bezeichnen jeweils die Anzahl der an einen Segment vorhandenen Stichprobenwerte.

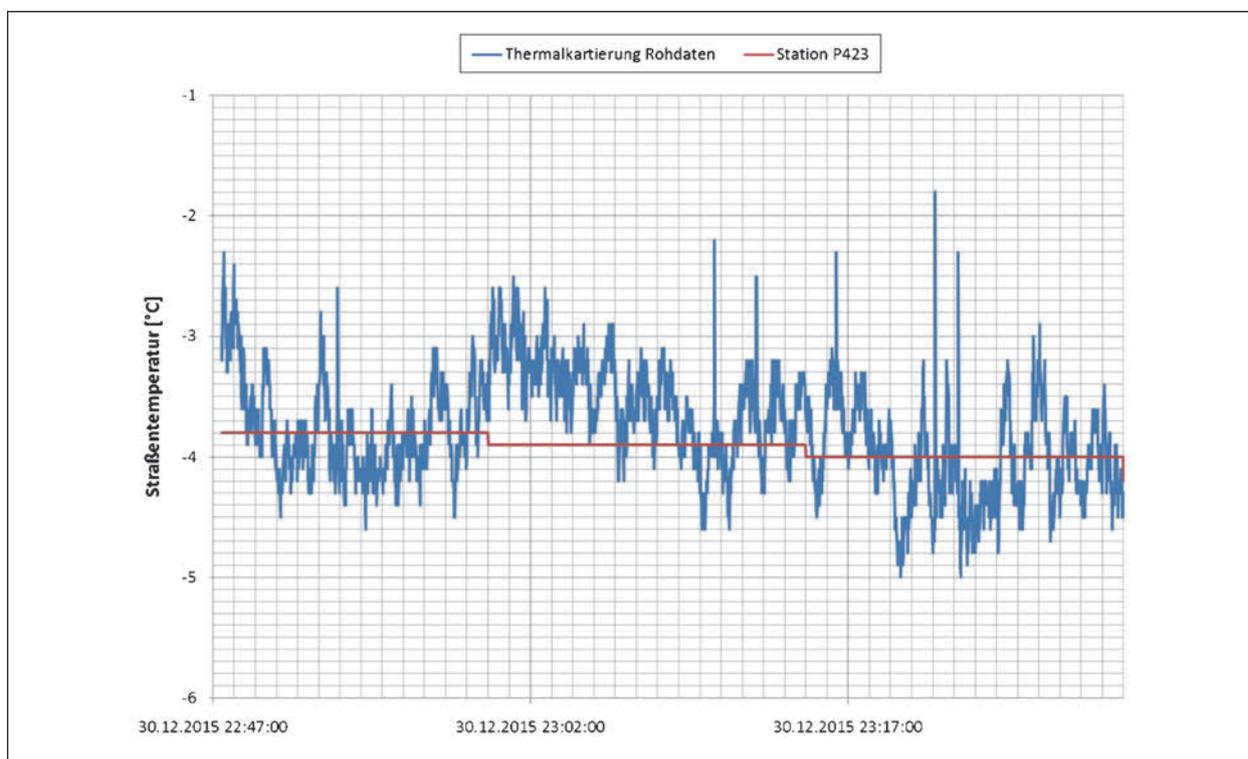


Bild 84: Rohdaten einer Thermalkartierungs-Fahrt (blaue Linie) auf der A 9 und die stationär gemessene Temperatur an der Referenzstation P423 Offenbau (rote Linie). Die stationäre Temperatur ist bereits korrigiert um die Messdifferenz zum mobilen Sensor

8.2.2 Himmelsapertur (sky-view-factor)

Speziell bei Messfahrten in klaren Nächten ohne Sonneneinstrahlung kann man durch die Messung der Abstrahlung von der Straßenoberfläche einen Hinweis darauf erhalten, in welchem Grad die freie Öffnung zum Himmel besteht bzw. wie stark die Abschattung durch Umgebungsbedingen ist.

Vorerst wird mit einem sog. Apertur-Faktor (oder sky-view-factor) gearbeitet. Er beschreibt das Verhältnis der an einem Streckensegment gemessenen Abstrahlungsleistung zur maximal vorkommenden Abstrahlung der Messfahrt.

Der relative Apertur-Faktor an einem Streckensegment RSEG ist dann noch einmal die Differenz bezogen auf den am Referenzort (Position Referenz-Messstelle) ermittelten Apertur-Faktor.

Die Abstrahlungsleistung wird aus der Bilanzstrahlung (NR = Net Radiation) ermittelt. Wenn die Bilanzstrahlung nicht positiv ist ($NR.IN = 0$) und die Globalstrahlung $GS = 0$ ist und damit $NR.OUT > 0$ ist, dann herrscht nur Abstrahlung und keine Einstrahlung.

Der Apertur-Faktor (SKF) in % an einem Streckensegment RSEG wird aus dem Mittelwert aller geogr. in das Segment fallenden Abtastwerten ermittelt, im

Verhältnis zur maximal vorkommenden Abstrahlungsleistung. Der relative SKF ist die jeweilige Differenz zum SKF am Referenzort.

$$SKF(RSEG) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{i=n} NR.OUT(RSEG)_i \right) \cdot \frac{100}{MAX(NR.OUT_{t_0} \dots NR.OUT_{t_m})}$$

$$rSKF(RSEG) = SKF(RSEG) - SKF(RSEG_{Ref}) \quad (\text{Gl. 16})$$

8.2.3 Thermalkartierung an der Teststrecke 1 (A 9 Greding)

Absolutes Profil der Teststrecke 1

Das Ergebnis einer Messfahrt bei klarer, trockener Nacht in Fahrtrichtung Nürnberg ist in Bild 85 aufgezeigt. Die auf dem separaten Sensor WS301 auf dem Dach des Fahrzeugs gemessene Lufttemperatur (AT) und die mit MARWIS gemessene Oberflächentemperatur (RST) von der 1. Fahrt und die gleichen Rohdaten der 2. Kontrollfahrt sind aufgetragen. Die durch den sich ergebenden Temperaturgradienten bereinigte Kurve ist jeweils fett eingetragen. Am Verlauf der Lufttemperatur im Vergleich zum Höhenprofil erkennt man den typischen regelrechten Zusammenhang von ca. 1 °C Temperaturdifferenz pro 100 m Höhenunterschied. Auch

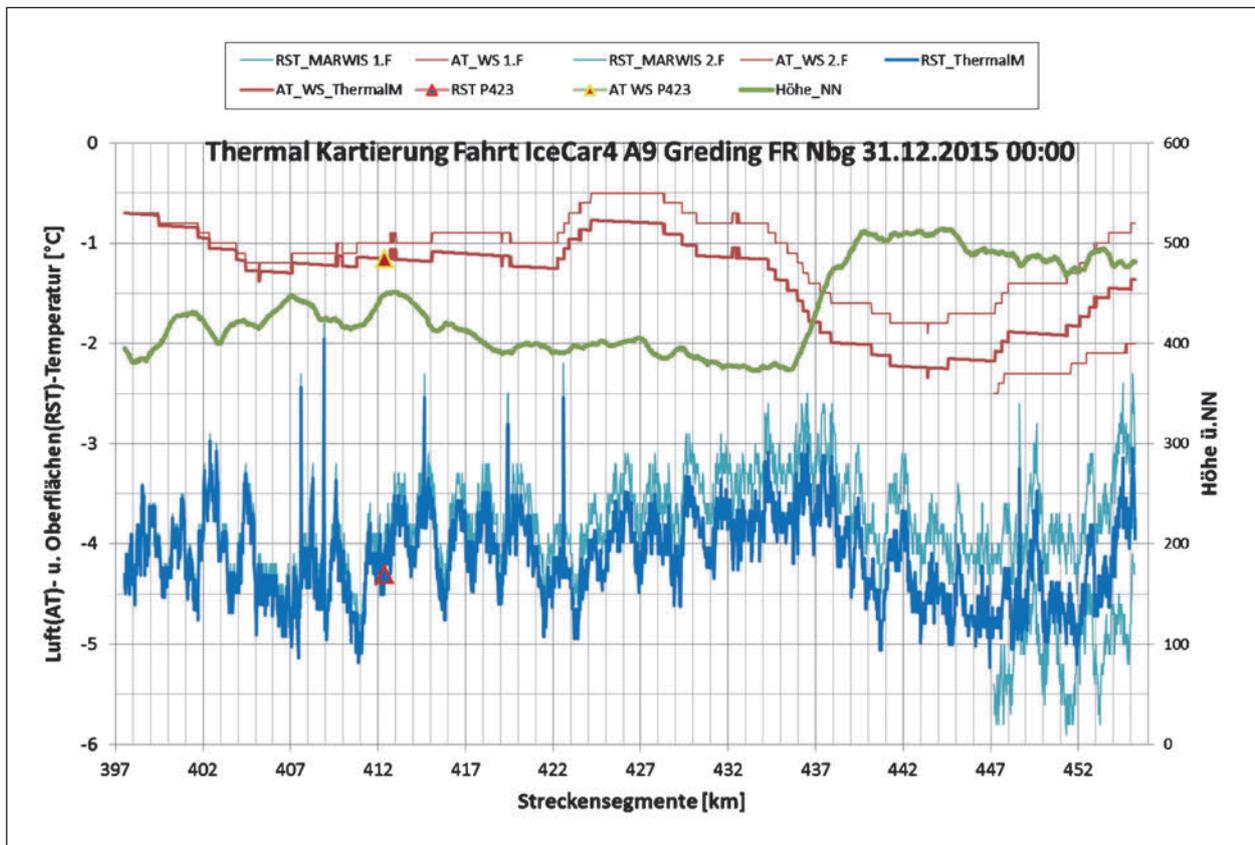


Bild 85: Rohdaten einer Messfahrt bei trockener klarer Nacht. Lufttemperaturen (AT) sind Rot dargestellt und Oberflächentemperatur (RST) sind Blau dargestellt, sowie das Höhenprofil in Grün. Die um den Temperaturgradienten bereinigten Kurven ist jeweils fett eingetragen

die Belagstemperatur folgt in etwa dem Zusammenhang. Die Streckensegmente mit der höheren Kilometerzahl liegen in Fahrtrichtung München.

Der Temperaturverlauf, ebenfalls nach Streckensegmenten aufgetragen, ist zusammen mit der Abstrahlungsleistung in Bild 86 dargestellt. In der Temperaturkurve sieht man deutlich einige kurze Spitzen (hot-spots) nach oben. Alle diese Spitzen sind Brücken, die über die Autobahn führen und dort die freie Abstrahlung behindern und somit die Abkühlung verhindern. An der Kurve der dynamisch kalibrierten Abstrahlungsleistung sieht man das entsprechend deutlich als Einbruch um teilweise mehr als 30 %.

Greift man sich eine solche deutliche Spitze heraus und schaut sich den Ort genauer an, kann man deutlich eine Brücke über der Autobahn als Ursache identifizieren, wie in Bild 87 zu erkennen.

Umgekehrt lassen sich auch in einer GIS Anwendung die Ursache von sog. cold-spots, also kalte Stellen als Unterführungen oder Brücken finden.

Die Eigenschaften der Strecke und deren Umgebung mit einer Ausdehnung schon ab 10...20 m lassen sich mit dieser Methode gut identifizieren. Mit den Größen Abstrahlung und Temperatur kann man dann auch direkt die Auswirkung auf die Straßenwetterentwicklung beurteilen.

Das Ergebnis der Auswertung liefert – zumindest für eine klare, trockene Nacht – die Temperatur- und Strahlungsprofile bezogen auf einen Referenzpunkt. Hier wurde für die Teststrecke A 9 Greding als Referenzpunkt die Station Offenbau P423 festgelegt.

Normiertes Profil der Teststrecke A9 Greding

Wie unter Kapitel 8.2.1 beschrieben, kann das auf die Referenzstation normierte Temperaturprofil zur Berechnung der Temperatur auf die Streckensegmente verwendet werden und für die Vergleiche mit anderen statistischen Methoden auf Basis der mobilen Daten herangezogen werden. Die normierte Kurve in Bild 88 entsteht dadurch, dass nur die Differenz der mobil gemessenen Belagstemperatur

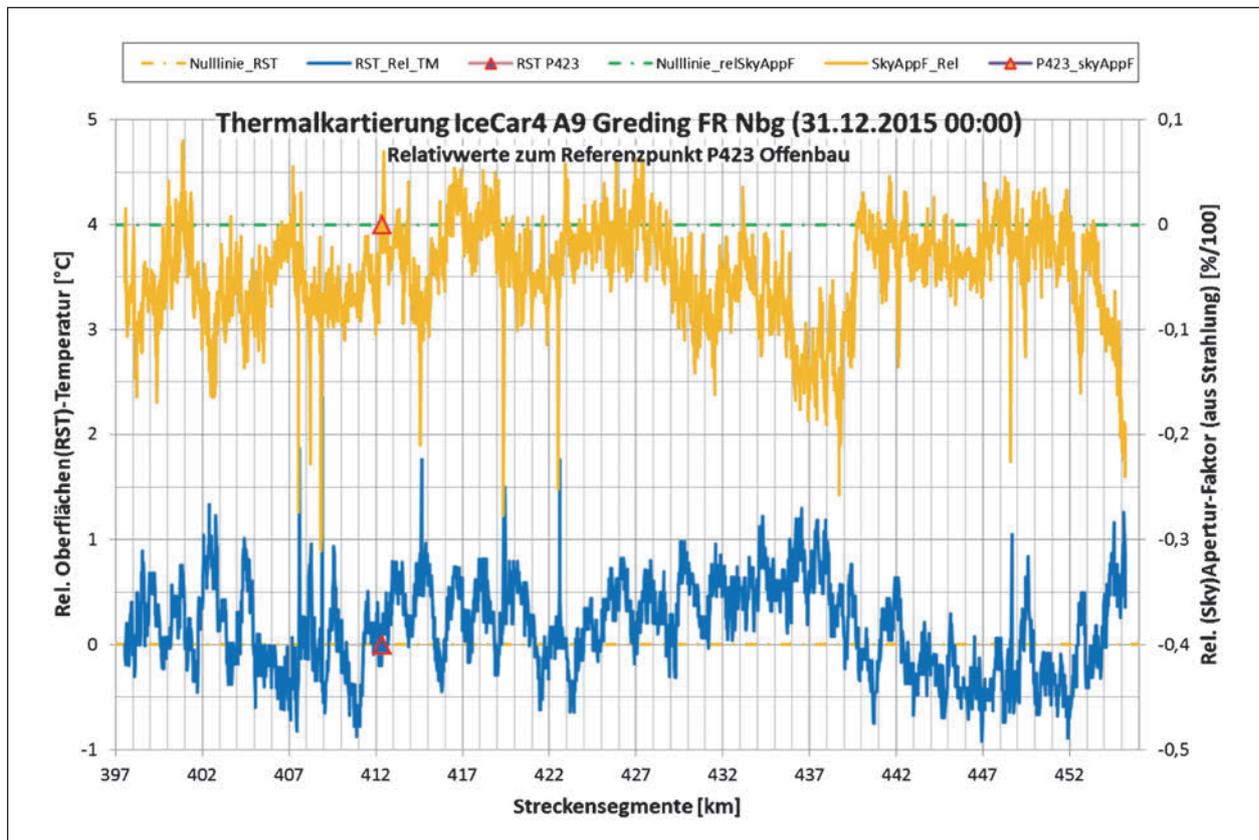


Bild 86: Endgültige Auswertung der Thermalkartierung für trockene klare Nacht. Das Belegs-Temperaturprofil bezogen auf den Referenzpunkt z. B. bedeutet ein negativer Apertur-Faktor von -0,3, dass die Abstrahlung um 30 % niedriger ist als am Referenzpunkt. Referenzpunkt: P423 Offenbau RSEG_ID: 11002145, km 412,340

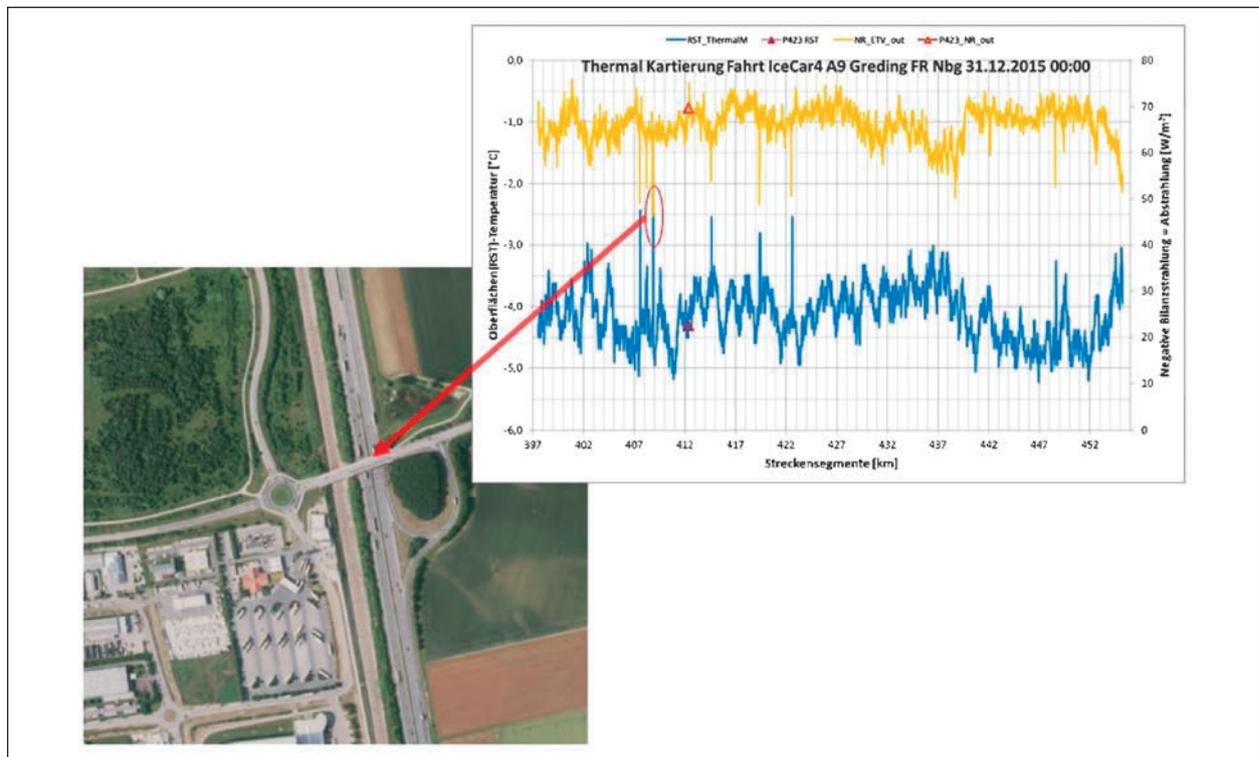


Bild 87: Verortung eines sog. hot-spots im Strahlungs- und Temperatur-Diagramm und in GeoBasis-DE/BKG(2020). Hier kreuzt die die St2238 bei der AS Sindersdorf. Die Belagstemperatur ist unter der Überführungsbrücke mehr als 2 °C höher als in der Umgebung. Ebenso ist die Abstrahlung deutlich geringer

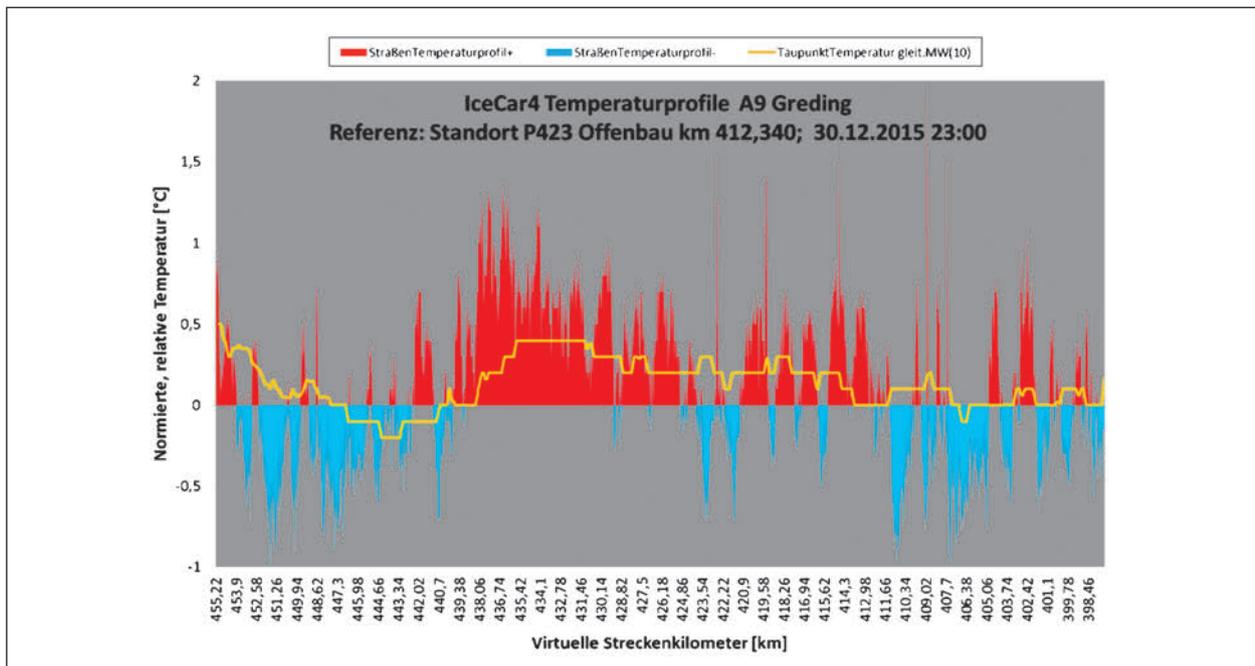


Bild 88: Normiertes Temperaturprofil der Teststrecke A 9

am Streckensegment zur gleichzeitig an der ortsfesten Referenzstation gemessenen Belagstemperatur dargestellt wird. Die positive Differenz ist rot ausgefüllt, die negative Differenz (also Temperatur niedriger als am Referenzort) ist Blau ausgefüllt. Zusätzlich ist noch der gleitende Mittelwert des Verlaufs der Taupunkttemperatur über die Strecke in der umgebenden Atmosphäre in Gelb dargestellt.

8.2.4 Thermalkartierung an der Teststrecke 2 St2139 Viechtach

Das Ergebnis einer TM Messfahrt während einer trockenen, klaren Nacht ist in Bild 89 gezeigt. Hier ist die Strahlung negativ aufgetragen, wie es eigentlich der Bilanzstrahlung entspricht. Negative Strahlung bedeutet Abstrahlung von der Fahrbahnoberfläche und bewirkt Abkühlung. In diesem Fall ist die Darstellung gleichsinnig. Dies ist auch deutlich an zwei Abschnitten zum Ende der Messfahrt zu erkennen. Dennoch sieht man Streckenabschnitte, bei denen es sich gerade umgekehrt verhält. Auf jeden Fall können diese Effekte wertvolle Hinweise im Hinblick auf die kleinräumigen Vorhersagemodelle liefern.

Die Roh-Werte der Messfahrt am 31.12.2015 sind in Bild 90 noch mal nach Streckensegmenten wiedergegeben. Wie man sieht, ist das Temperaturprofil bei Berg- und Talfahrt erwartungsgemäß ziemlich übereinstimmend. Dies ist auch ein Hinweis darauf,

dass eine Fahrtrichtungstrennung nicht notwendig ist. Einen Teil der Strecke, welche zu Beginn abgefahren worden ist, ist noch einmal am Schluss abgescannt worden, um die natürliche Temperaturänderung während der Fahrtdauer zu bestimmen. Grundsätzlich kann für die Bestimmung des Temperaturgradienten auch die Straßenwetter-Messstelle verwendet werden, sofern die Messstelle innerhalb der gemessenen Strecke liegt und überfahren wird.

In Bild 91 ist beispielhaft eine auffällige kalte Stelle (cold-spot) herausgegriffen. In der Verortung zeigt sich, dass es sich dabei um einen bewaldeten Streckenabschnitt handelt mit einer Lichtung von ca. 100 m Ausdehnung, die offensichtlich mit höherer Abstrahlungsleistung für deutliche Abkühlung sorgt. Zusätzlich kann hier auch der Windangriff als weitere Ursache angesehen werden.

Das Ergebnis der Thermalkartierung für die St2139 – für strahlungsarme trockene Situation – wird in Bild 92 gezeigt.

Zum Schluss noch ein Diagramm, welches eine Thermalkartierung mit IceCar4 während der Mittagszeit zeigt. Das Strahlungs- und Temperatur-Profil der Strecke ist hier deutlich anders, als dies bei der Thermalkartierung in einer einstrahlungsarmen Nacht der Fall ist. Hier zeigt sich, wie wichtig die Beachtung der Wettersituation – ggf. sogar mit Vorgeschichte – bei der Auswertung der Streckeneigenschaften ist (Bild 93).

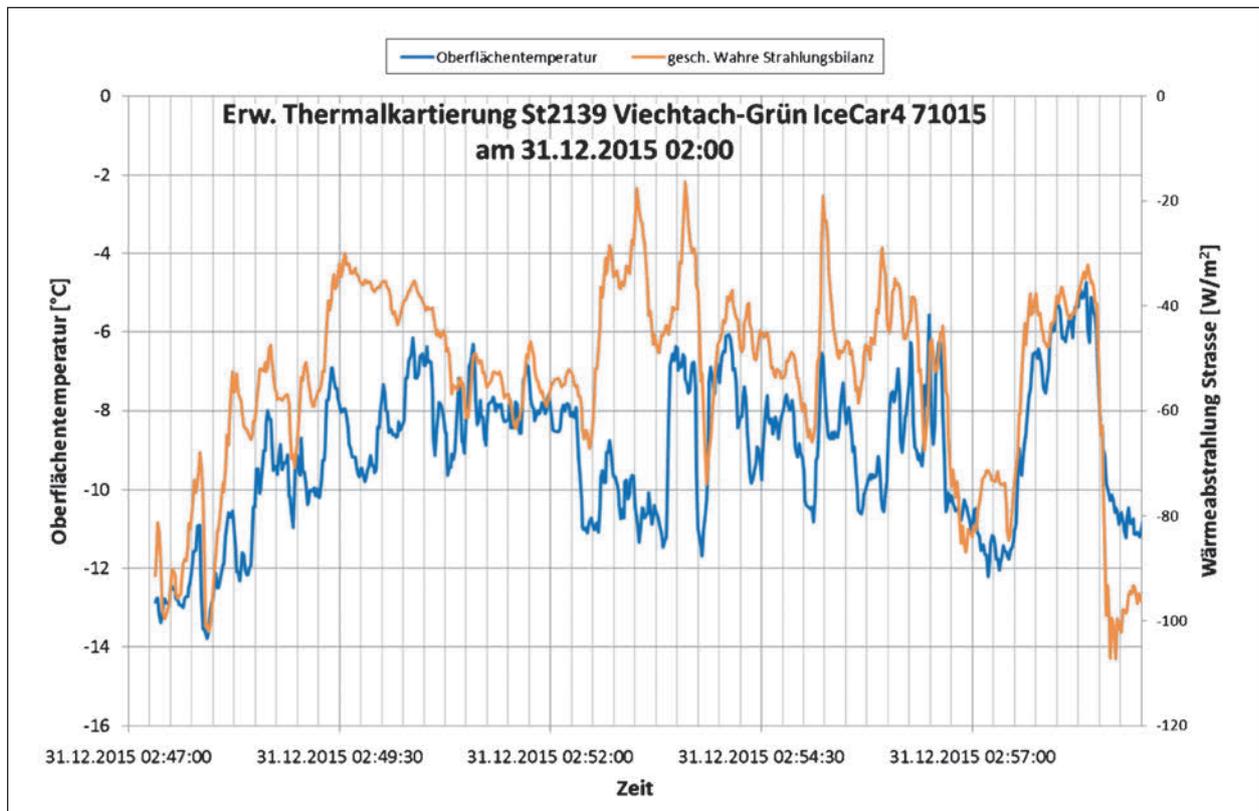


Bild 89: Erweiterte Thermalkartierung an der St2139 in einer trockenen, klaren Nacht. Die Darstellung zeigt den zeitlichen Ablauf der Messfahrt. Belagstemperatur (Blau) und die Bilanzstrahlung (Orange). Die Strahlung ist diesmal negativ aufgetragen, was Abstrahlung von der Straßenoberfläche bedeutet, um die Gleichsinnigkeit mit dem Temperaturverlauf zu demonstrieren, die aber nicht überall vorhanden ist

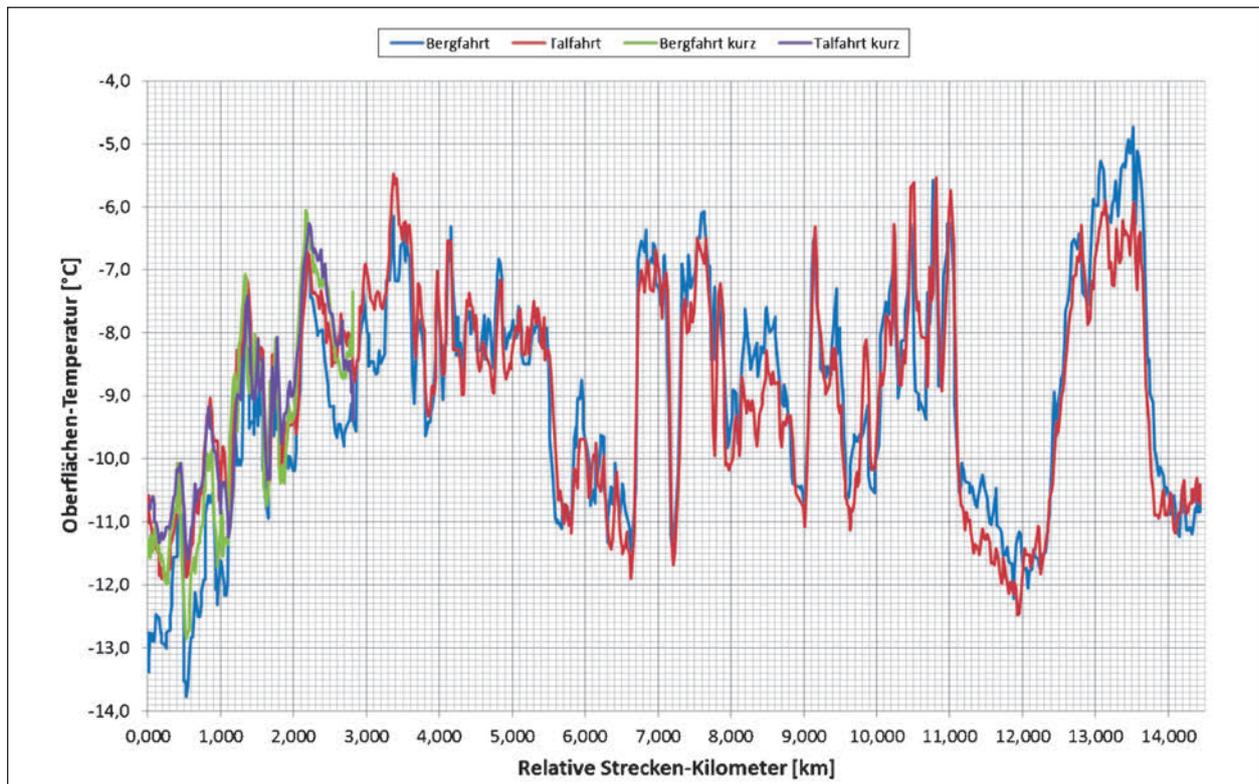


Bild 90: Belagstemperaturverlauf nach Streckensegmenten des Streckenmodells aufgetragen. Bergfahrt und Talfahrt, sowie eine kurze Strecke zu Beginn der Fahrt nochmal überfahren um den Temperaturgradient zu bestimmen

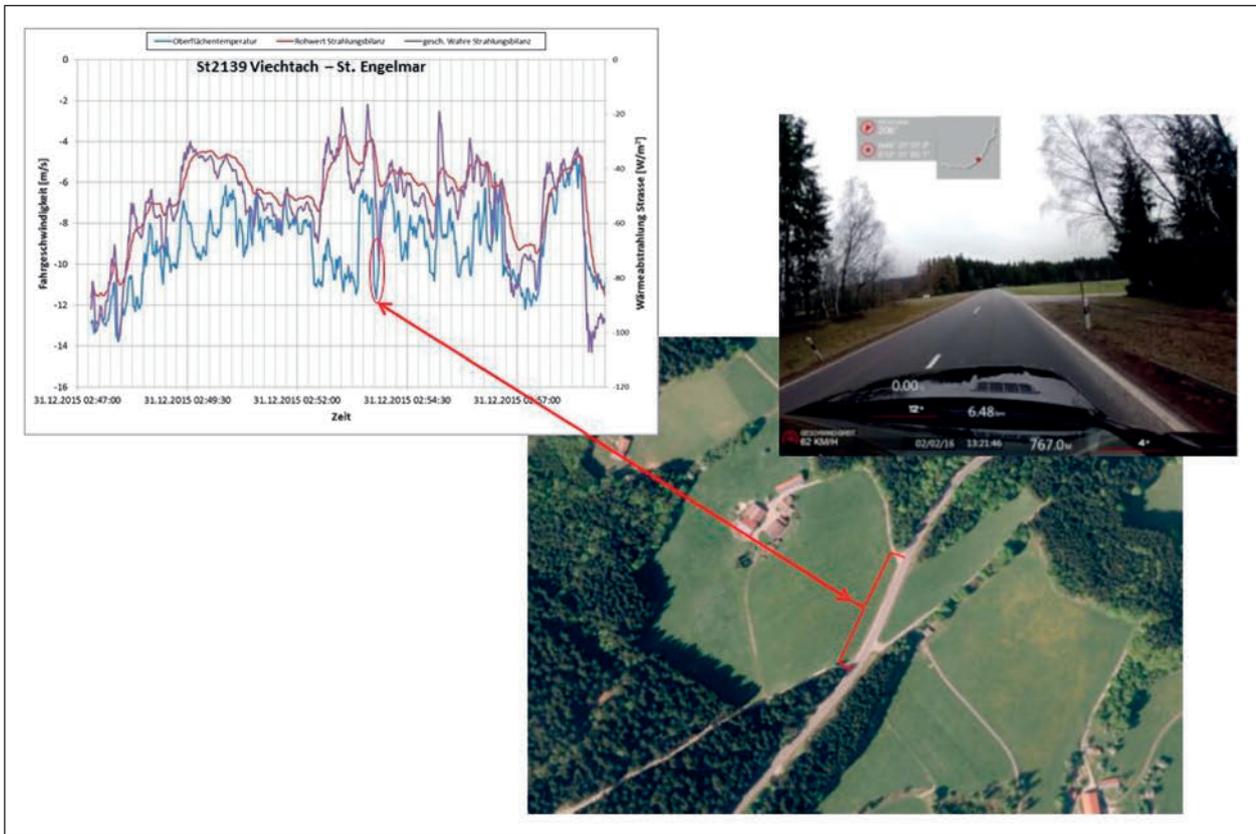


Bild 91: Auffälliger cold-spot und Erhöhung der Abstrahlung kann als kurze Lichtung innerhalb eines bewaldeten Streckenabschnitts identifiziert werden

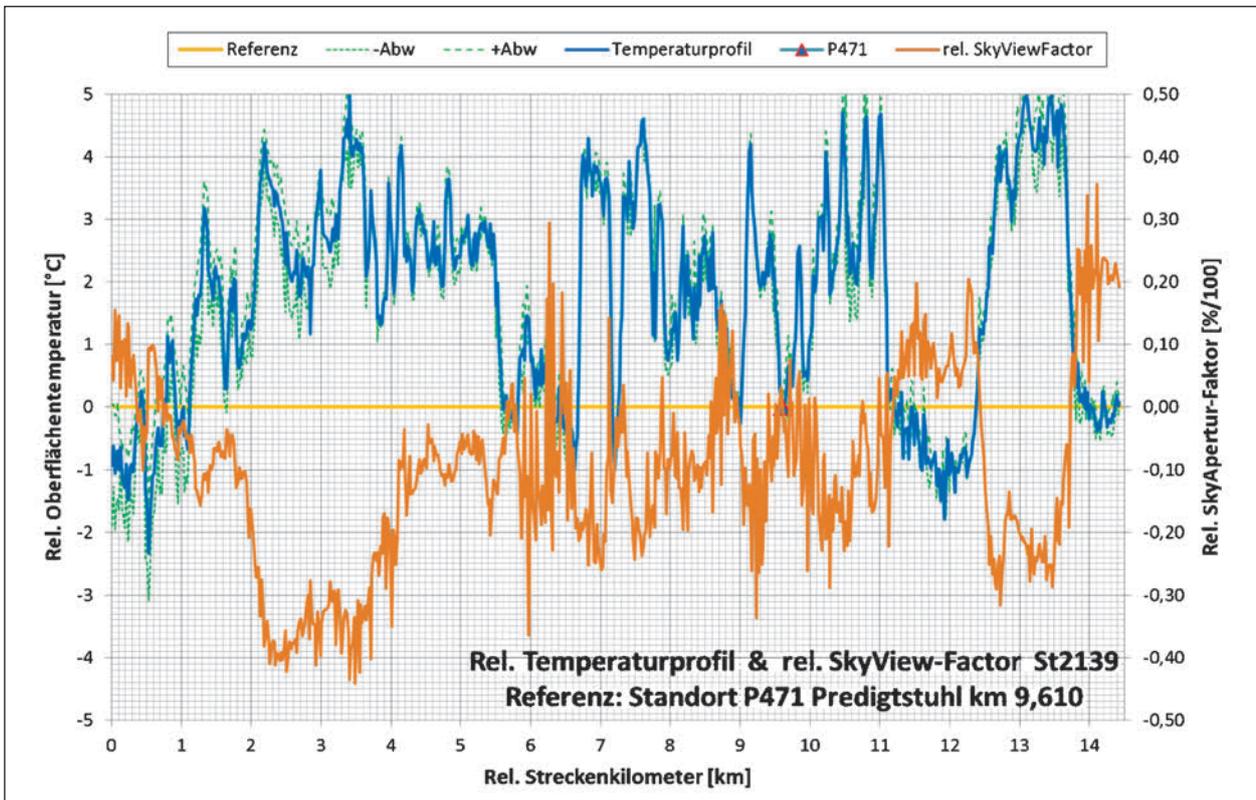


Bild 92: Endgültiges Strahlungs- u. Temperatur-Profil der Strecke St2139 nach Segmenten des Streckenmodells. Relative Abweichungen zum Referenzpunkt P471 Predigtstuhl

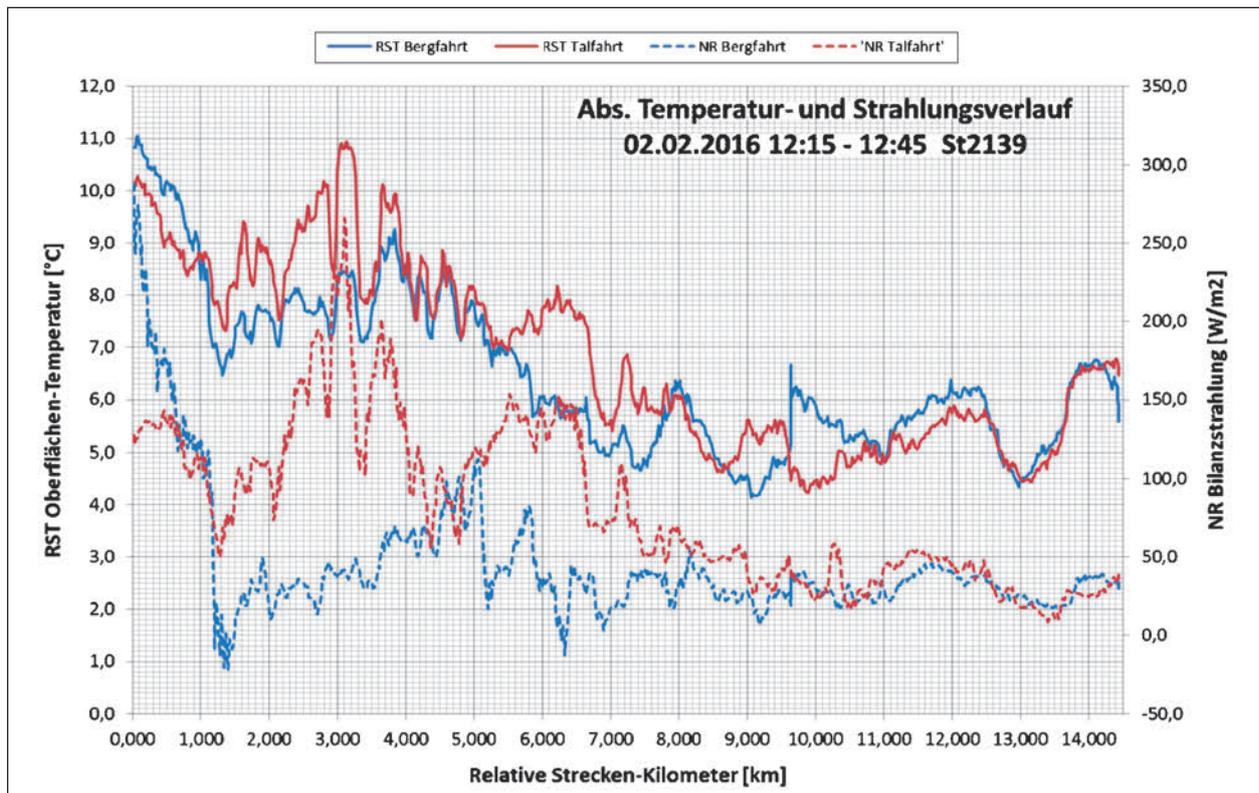


Bild 93: Rohwerte des Strahlungs- und Oberflächentemperatur-Verlaufs einer Messfahrt am Tage mit Einstrahlungsbedingung. Aufgetragen nach Segmenten des Streckenmodells. Fahrt mit IceCar4 141215

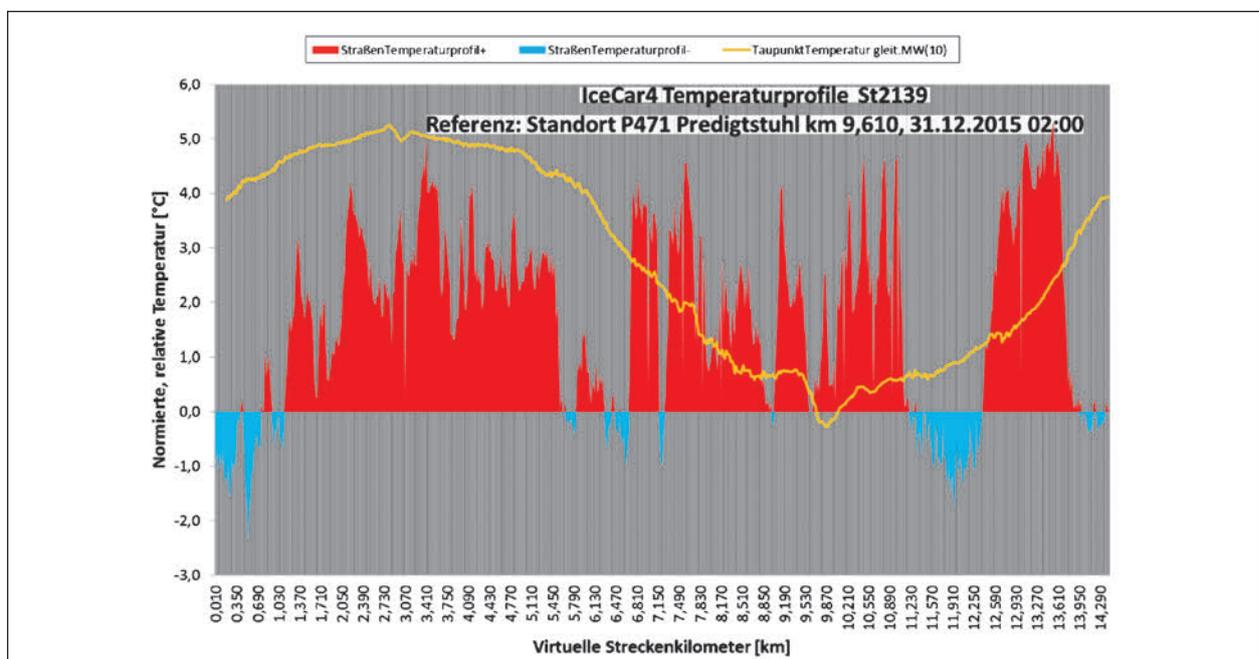


Bild 94: Normiertes Temperaturprofil der Teststrecke St2139. Rot: höhere Temperatur; blau: niedrigere Temperatur als an der Referenzstation (Predigtstuhl). Gelb: Verlauf der Taupunkttemperatur

Normiertes Profil der Teststrecke St2139

Wie bereits für die A 9 in Kapitel 8.2.3 beschrieben, kann das auf die Referenzstation normierte Temperaturprofil zur Berechnung der Temperatur auf die

Streckensegmente verwendet werden und für die Vergleiche mit anderen statistischen Methoden auf Basis der mobilen Daten herangezogen werden (siehe Bild 94).

8.2.5 Thermalkartierung der Teststrecke 3 A 4 BAsT

Von der BAsT wurden mit der IceCar5 Ausrüstung im Zeitraum 12.12.2016 bis 28.02.2017 insgesamt ca. 27 Fahrten in Richtung Olpe und ca. 29 Fahrten in Richtung Köln registriert. Teilweise wurden auch nur Teile der Strecke abgefahren.

Es wurden dabei allerdings keine ausgesprochenen Standardbedingungen (absolut klare Nacht, um Mitternacht bzw. der zweiten Nachthälfte) für die Thermalkartierung eingehalten. Dennoch können dabei einige typische Streckeneigenschaften abgeleitet werden.

Bild 95 zeigt ein typisches Temperaturprofil (absolute Temperaturen) in einer annähernd klaren Witterung in den frühen Morgenstunden.

Einen deutlichen Cold-Spot ist zu erkennen an der Wiehltalbrücke – um mehr als 3 °C. Dies ist allerdings nur bei entsprechenden Strahlungsbedin-

gungen gültig. An anderen Fahrten ist zu erkennen, dass die Brücke auch durchaus zu einem Hot-Spot werden kann, wie das Diagramm in Bild 96 zeigt.

Bei hoher Abstrahlung wie dies beispielsweise nachts bei wolkenlosem Himmel der Fall ist, dann kühlt die Fahrbahnoberfläche auf der Brücke schneller ab als in der Umgebung. Bei Bedingungen mit hoher Einstrahlung, was tagsüber bei Sonnenschein der Fall ist, dann steigt die Temperatur der Fahrbahnoberfläche schneller an, als in der Umgebung.

Weitere Profile sind in Bild 97 gezeigt. Bei entsprechenden Witterungsbedingungen, erreicht die Teststrecke Temperaturspannweiten von ca. 7 bis 8 °C.

Eine ausführliche Aufstellung der statistischen Auswertung aller Messfahrten ist in einem gesonderten Bericht zusammengestellt, welcher dem AG vorliegt, sowie in den übergebenen Erhebungsdaten.

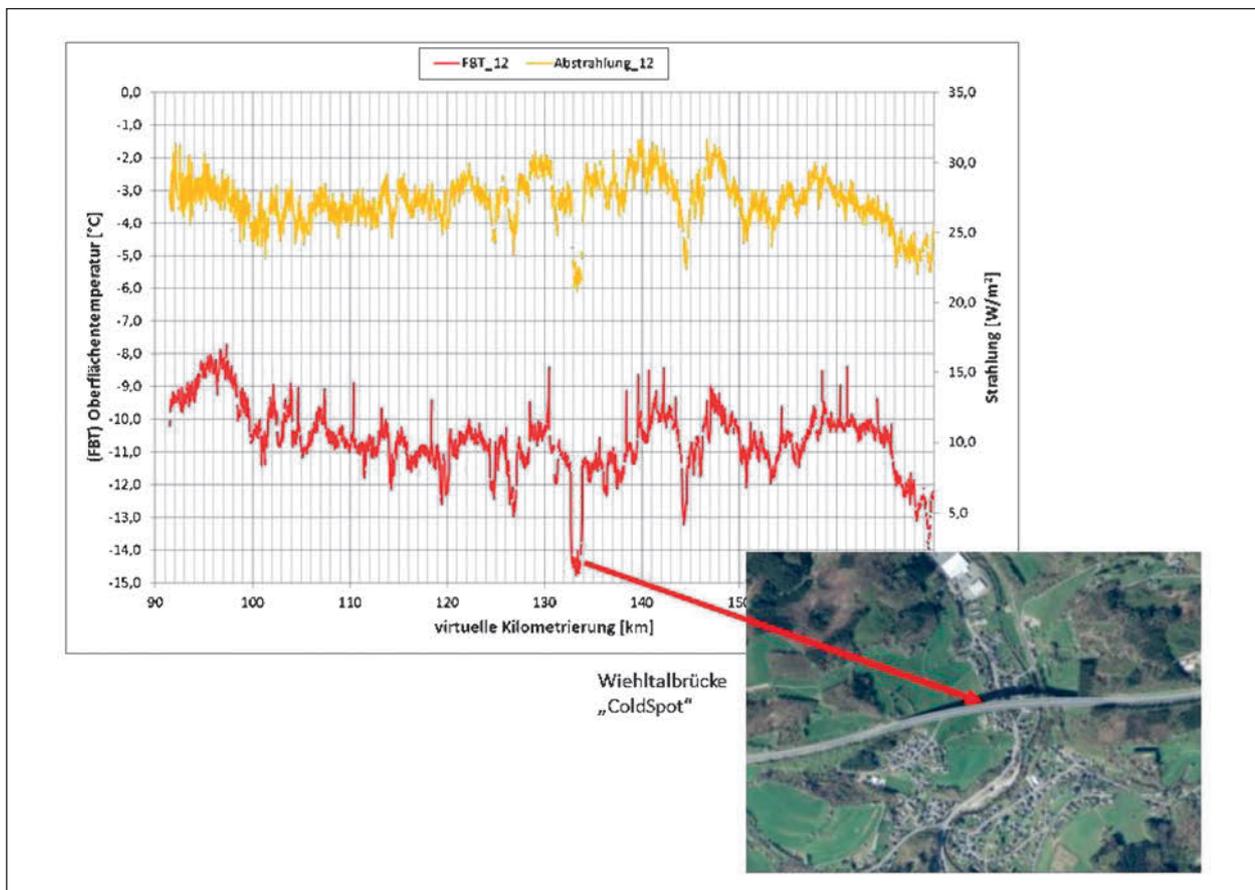


Bild 95: Messfahrt mit annähernd Bedingungen für eine Thermalkartierung am 18.01.2017 um ca. 06:00 in Fahrtrichtung Olpe.
(Bild: GeoBasis-De/BKG(2020))

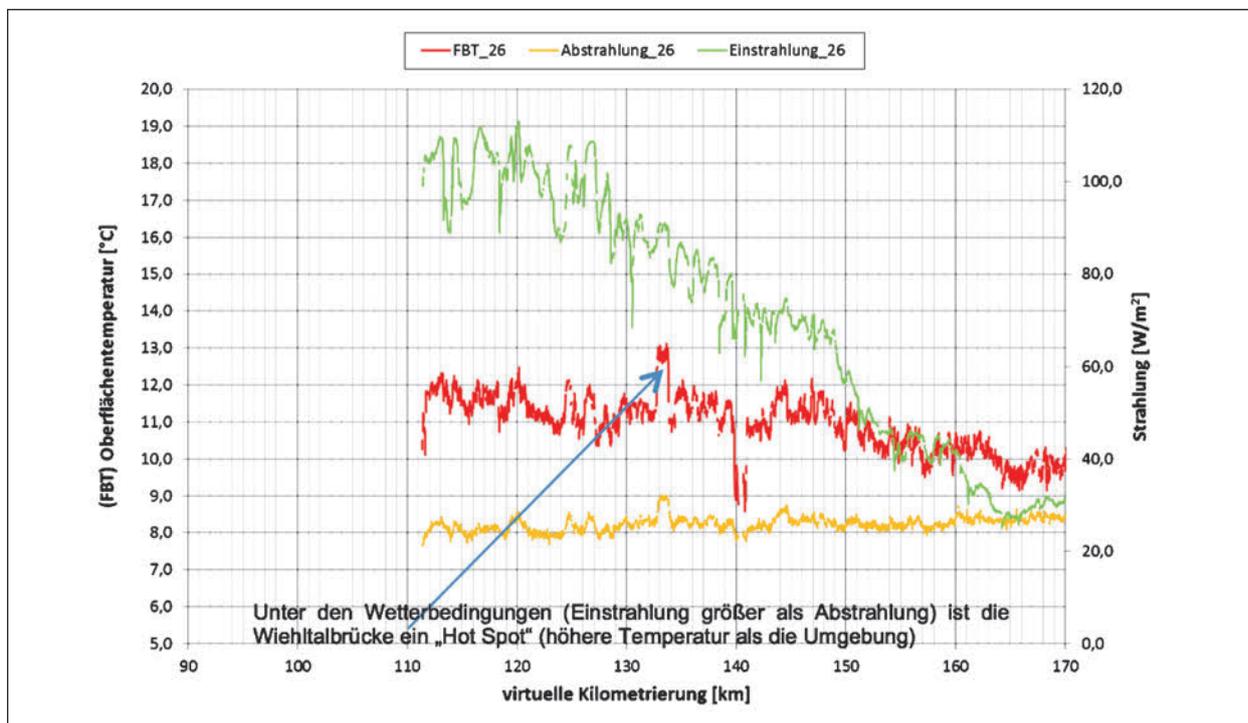


Bild 96: Temperaturprofile und Strahlungssituation bei einer Messfahrt am 16.02.2017 nachmittags (15:45 CET) in Fahrtrichtung Olpe. Rote Kurve ist die Straßentemperatur, die grüne Kurve zeigt die kurzwellige Einstrahlung und die gelbe Kurve die langwellige Abstrahlung von der Fahrbohnoberfläche

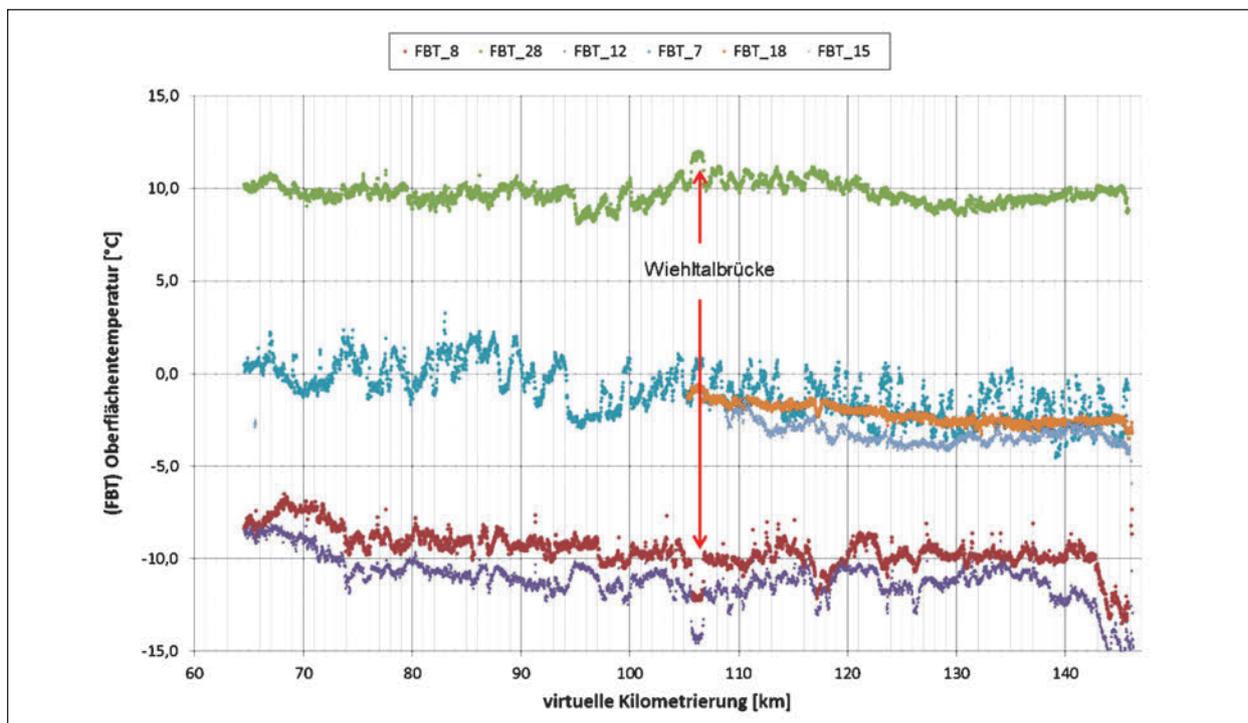


Bild 97: Temperaturverläufe von 6 Messfahrten in Fahrtrichtung Köln zu verschiedenen Wetterbedingungen. 7: 16.01.2017 13:38; 8: 17.01.2017 05:12; 12: 18.01.2017 06:30; 15: 23.01.2017 12:25; 18: 24.01.2017 19:48; 28: 16.02.2017 15:38. Bitte beachten, dass die virtuelle Kilometrierung in FR Köln nicht identisch ist mit FR Olpe!!

8.3 Statistisches Transformations-Modell der Streckeneigenschaften

8.3.1 Auswertung der mobilen Daten der Winterdienstfahrzeuge

Es wurden herangezogen 204 Fahrten auf der St2139 des Lkw der SM Viechtach im Zeitraum von November 2016 bis einschließlich April 2017. Auf Teststrecke A 9 des Lkw der AM Greding mit 243 Fahrten beschränkt auf den Zeitraum Mitte Dezember 2016 bis einschließlich April 2017. Der Grund dafür ist, dass die neuen SWS auf der A 9 mit dem für die Vergleiche erforderlichen Sensorausbau ab 13. Dezember in Betrieb gegangen sind.

Die Referenzstationen sind auf der St2139 Predigtstuhl und auf der A 9 Offenbau II und Gelbelsee II.

Auswertung von vollständigen Fahrten und Vergleich mit Referenzstation

Die Auswertung der Fahrten besteht darin, dass alle mobilen gemessenen Parameter über alle Datensätze, welche während einer Fahrt angefallen sind, der Mittelwert gebildet wird.

Das gleiche wird mit den korrespondierenden Parametern der stationären Referenzstation gemacht. Von allen, vom Startzeitpunkt der Fahrt bis zum Endzeitpunkt erfassten Ergebniswerte wird der Mittelwert gebildet.

Eine Fahrt wird dadurch definiert, dass zeitlich zusammenhängende Datensätze nicht mehr als 30

Minuten Unterbrechung aufweisen. Datensätze, deren Zeitstempel mehr als 30 Minuten auseinander liegen, werden zu zwei verschiedenen Fahrten zugeordnet.

Danach wird die Korrelation der Mittelwerte betrachtet, die einen Hinweis darauf geben, ob die Referenzstation geeignet ist, repräsentativ für die betrachtete Strecke betrachtet zu werden.

Auswertung A 9 Greding über den Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017

- Anzahl der Fahrten im Zeitraum: 243.
- Unterschiedliche Dauer, es wird nicht immer die vollständige Strecke abgefahren, daher auch nur Teilstrecken.
- Durchschnittlich ca. 34 min Dauer pro Fahrt.

Als Referenzstation für die Teststrecke A 9 wird die SWS P423 II (Offenbau II) betrachtet. Die Auswertung lässt die individuellen Eigenschaften der kurzen Streckensegmente verschwinden, zeigt aber zumindest bei der Belagstemperatur eine sehr gute Korrelation (siehe Bild 98). Die Unsicherheiten sind in der Größenordnung, die generell bei Vergleichen von mobilen und stationären Sensoren zu erwarten sind.

Im Gegensatz dazu zeigen die Wasserfilmdicken eine erhebliche Abweichung. Abweichungen in derselben Größenordnung finden sich aber auch unmittelbar an dem Standort der Referenzstation, wenn man die Daten direkt beim Überfahren vergleicht.

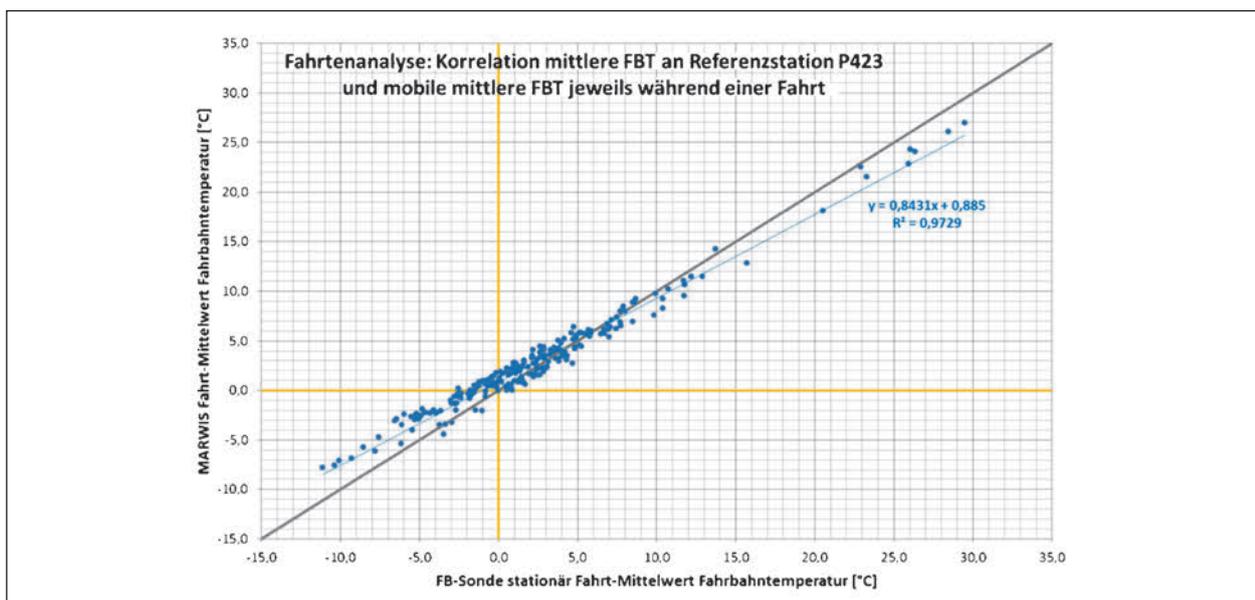


Bild 98: Korrelation der mittleren Belagstemperatur der mobilen Messfahrten zum Mittelwert der während der Fahrt gemessenen stationären Belagstemperatur

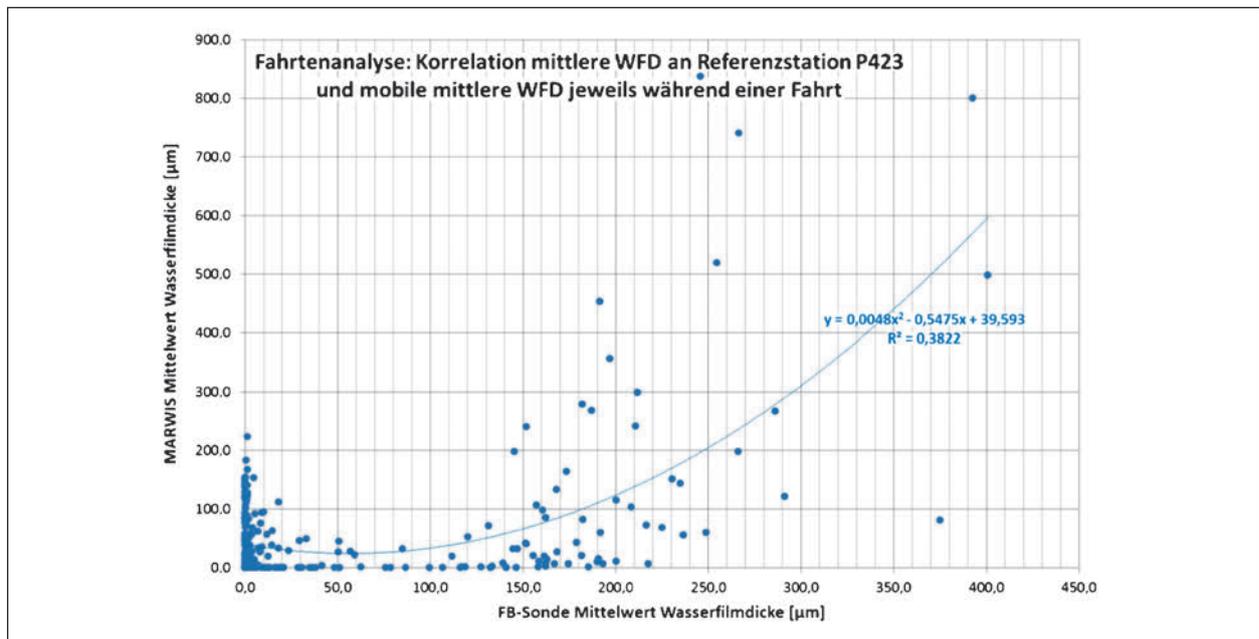


Bild 99: Korrelation der mittleren Wasserfilmdicken der mobilen Messfahrten zum Mittelwert der während der Fahrt gemessenen stationären Wasserfilmdicken

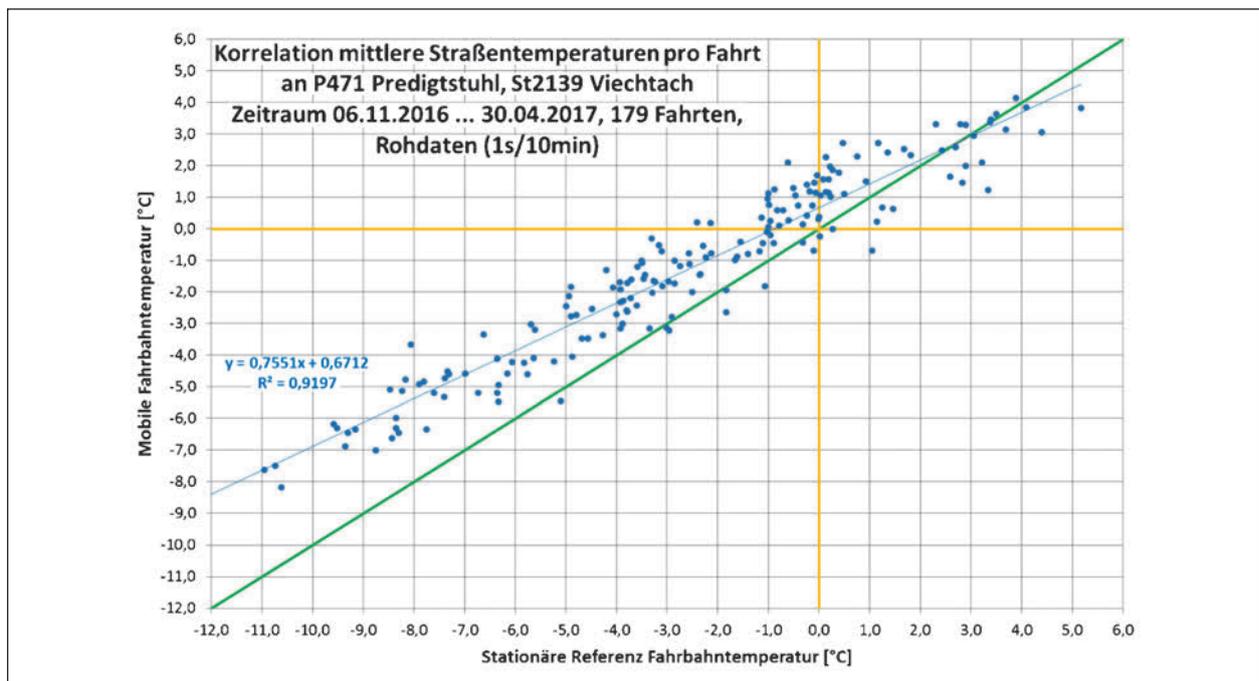


Bild 100: Korrelation der mittleren Belagstemperatur der mobilen Messfahrten zum Mittelwert der während der Fahrt gemessenen stationären Belagstemperatur

Auswertung St2139 Viechtach über den Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017

- Anzahl der Fahrten in diesem Zeitraum: 179.
- Die Fahrten waren unterschiedlicher Dauer. Es wurde meist die vollständige Strecke gefahren. Es wurde nicht nach Fahrtrichtung unterschieden.
- Die durchschnittliche Dauer betrug hier ca. 80 Minuten pro Fahrt.

Als Referenzstation für die Teststrecke St2139 wird die SWS P471 (Predigtstuhl) betrachtet.

Die Belagtemperatur korreliert mit einem Bestimmtheitsmaß von 92 % relativ gut. Dass die Streuungen höher sind als auf der A 9 Offenbau, dürfte der Tatsache geschuldet sein, dass die Strecke generell komplexer ist und größere Unterschiede aufweist.

Das zeigt sich noch mehr an der Korrelation der Wasserfilmdicken (siehe Bild 101).

Auswertung nach Streckensegmenten

Bei dieser Auswertung werden die einzelnen mobilen Daten getrennt nach (20m-)Streckensegmenten sortiert und für die jeweiligen Parameter die Differenz zum jeweiligen mittleren Messwert der Referenzstation, in dem der Zeitstempel der mobilen Daten liegt, gebildet. Aus den Differenzen werden

der statistische Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Somit wird jede mobile Messung in einem Streckensegment mit der gleichen Messgröße zum gleichen Zeitpunkt an der Referenzstation verglichen. Die regelmäßige stationäre Messung am Referenzort gibt die für die gesamte Strecke geltende Wettersituation und deren Trend mit guter Näherung wieder und in den Differenzen sind die individuellen kleinräumigen Eigenschaften der Streckensegmente abzulesen. Bei dieser Auswertung sind also die spezifischen Eigenschaften – allerdings zunächst gemittelt über alle vorkommenden Wettersituationen und Zeiten – der Streckensegmente zu erkennen. Hier werden Strecken-Eigenschaften, die unabhängig von der Wettersituation vorhanden sind, sichtbar.

Es wurden wieder die Parameter FBT Fahrbahntemperatur und WFD Wasserfilmdicke untersucht.

Die Diagramme zeigen die Mittelwertkurve und die Standardabweichung nach oben und unten, die relativen Differenzen zur Referenzstation über alle mobilen Daten in der Betrachtungsperiode, und deren geografische Position die in das Streckensegment fällt.

In Bild 102 sind die mobilen Temperaturmessungen aller Fahrten des Streu-Lkw der AM Greding im ausgewählten Zeitraum der Winterperiode 2015/16 zu einer Mittelwertkurve zusammengefasst und zwar

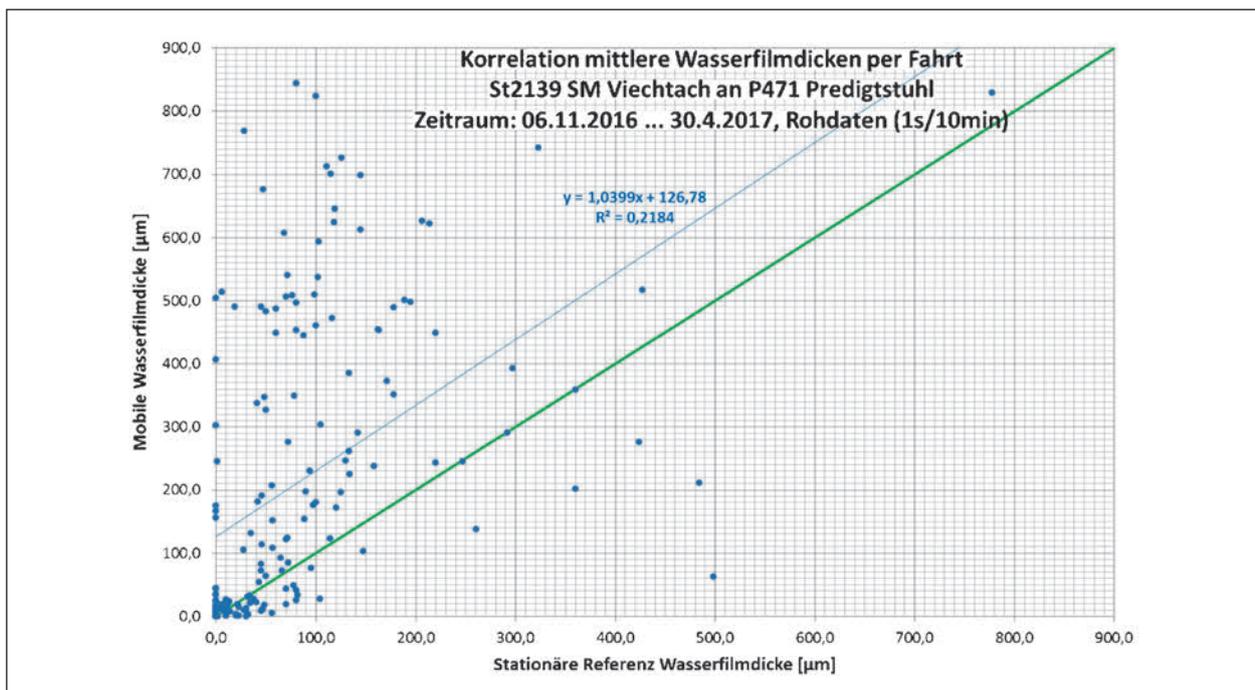


Bild 101: Korrelation des Mittelwerts aller gemessenen Wasserfilmdicken jeweils einer Messfahrt mit dem Mittelwert der während der jeweiligen Dauer der Fahrt gemessenen stationären Wasserfilmdicken

für diese Darstellung die tatsächlichen Roh-Werte ohne Bezug zur Referenzstation. Da diese Fahrten alle zum jeweiligen Zeitpunkt herrschenden Wetterbedingungen beinhalten, ist zu erwarten, dass einzelne Streckeneigenschaften nicht mehr so deutlich hervortreten. Das ist auch zweifellos der Fall, aber auch hier erkennt man auch bei unterschiedlichen Wettersituationen einige signifikanten Merkmale, die offensichtlich ständig auftreten. Auch das sind wertvolle Hinweise für die Optimierung einer hochauflösenden Vorhersage.

Aus der Mittelwertkurve sind zwei auffällige Spitzen, sowohl nach unten, sogenannte Cold-Spot als auch nach oben sogenannte Hot-Spot. In Bild 103 ist die Verortung der beiden Spots dargestellt. Im einen Fall handelt es sich um eine Unterführung bei Göggelsbuch (Segment RSEG_ID 11002738 im digitalen Streckenmodell, virtuelle Kilometrierung: km 400,460). Die Unterführung bzw. das Brückenbauwerk hat eine ungefähre freie Ausdehnung von 30 m. Erwartungsgemäß ist dies eine Stelle mit niedrigerer Temperatur (ca. -2 °C) gegenüber der Umgebung. Im anderen Fall handelt es sich auch um eine relative lange Brücke (ca. 125 m) über den Main-Donau-Kanal (Segment RSEG_ID: 11002499, km 405,260). Entgegen der allgemeinen Erwartung

was Brücken angeht, ist hier offensichtlich signifikant häufig eine wärmere Stelle. Vermutlich durch die topografische Umgebung und dem Kanal.

Die Auswertung der mobilen Daten in der Winterperiode 2016/17 ist in Bild 104 zu sehen. Hier wurde die Kurve jeweils als Differenz zur jeweils zum selben Zeitpunkt gemessenen stationären Straßen-temperatur aufgetragen. Die Mittelwertkurve nach Streckensegmenten (RSEG_ID). Im Unterschied zu den Temperaturprofilen in Bild 102 aus den Fahrten 2016 bei denen die absolute Temperatur aufgetragen ist, sind in der Darstellung in Bild 104 die Differenzen dargestellt. Außerdem sind die Streckensegment ID aufgetragen dadurch erscheint die Fahrtrichtung entgegengesetzt. Durch die Differenzbildung sind für die jeweiligen Wettersituation spezifischen Temperaturabweichungen ausgeglichen und die reinen Streckenunterschiede werden deutlicher. Auch hier lassen sich „Hot-Spots“ und „Cold-Spots“ eindeutig verorten.

Der durchschnittliche Temperatur-Verlauf aus allen mobilen Erfassungen mit dem Lkw der SM Viechtach auf der St2139 in der Winterperiode 2015/16 zeigt Bild 105. Auch hier zeigt sich das unterschiedliche Streckenmerkmale nicht mehr so deutlich auftreten,

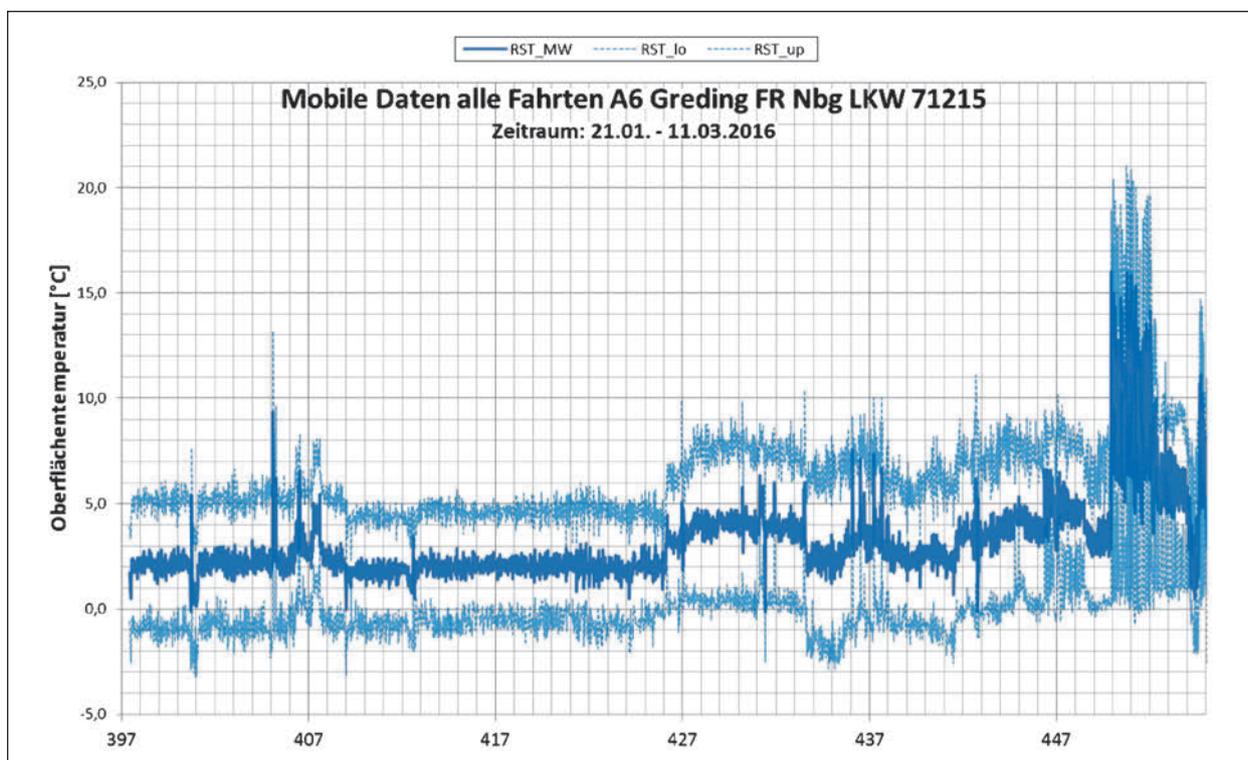


Bild 102: Mittelwertkurve aus allen Fahrten (mit allen Wettersituationen) im ausgew. Zeitraum. A 9 FR Nbg. Ebenso ist die Streuung (Standardabweichung) nach oben und unten angegeben. Hier sind die tatsächlichen Werte dargestellt, und nicht die Differenzen zu einem Bezugswert. RST_MW: Belagstemperatur Mittelwertkurve; RST_lo: Belagstemperatur untere Standardabweichung; RST_up: Belagstemperatur obere Standardabweichung

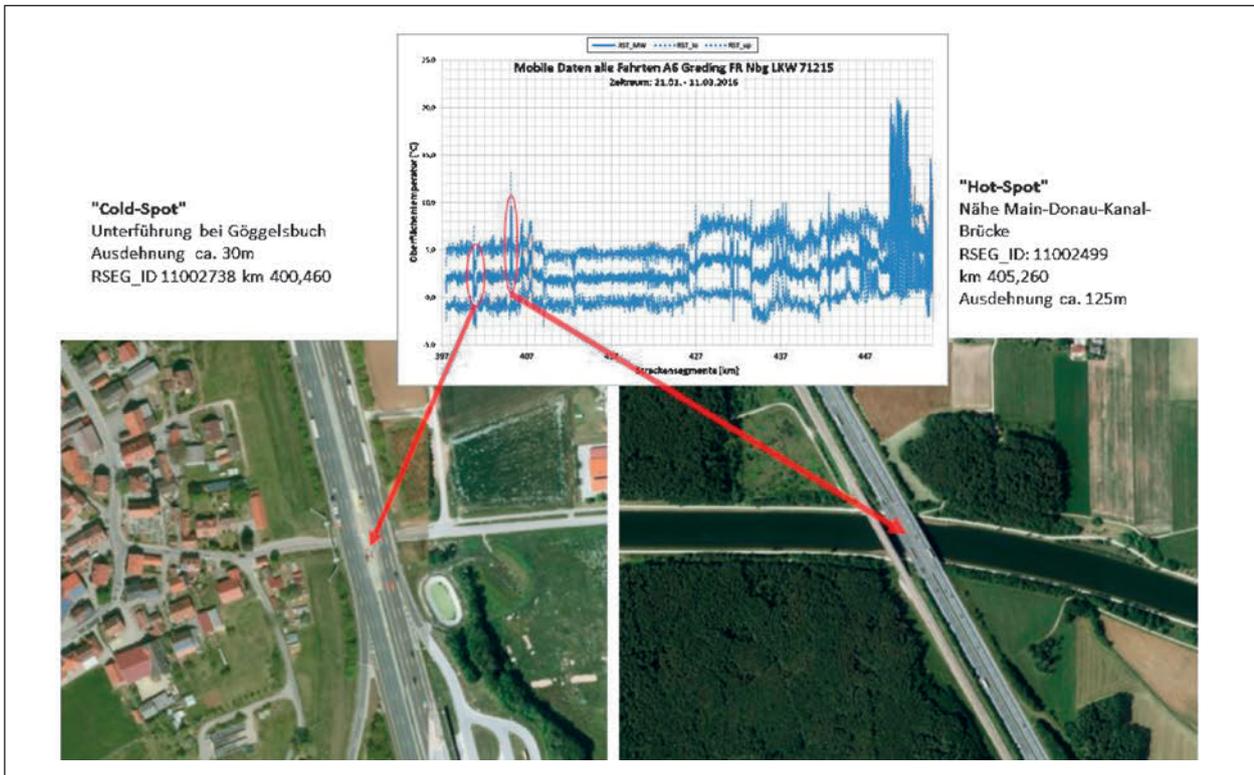


Bild 103: Verortung zweier markanter Merkmale aus der Mittelwertkurve aller Lkw Fahrten im ausgewählten Zeitraum. Sowohl bei sog. Cold-Spots als auch bei sog. Hot-Spots können geografische und topografische Streckeneigenschaften gefunden werden, welche diese Effekte verursachen

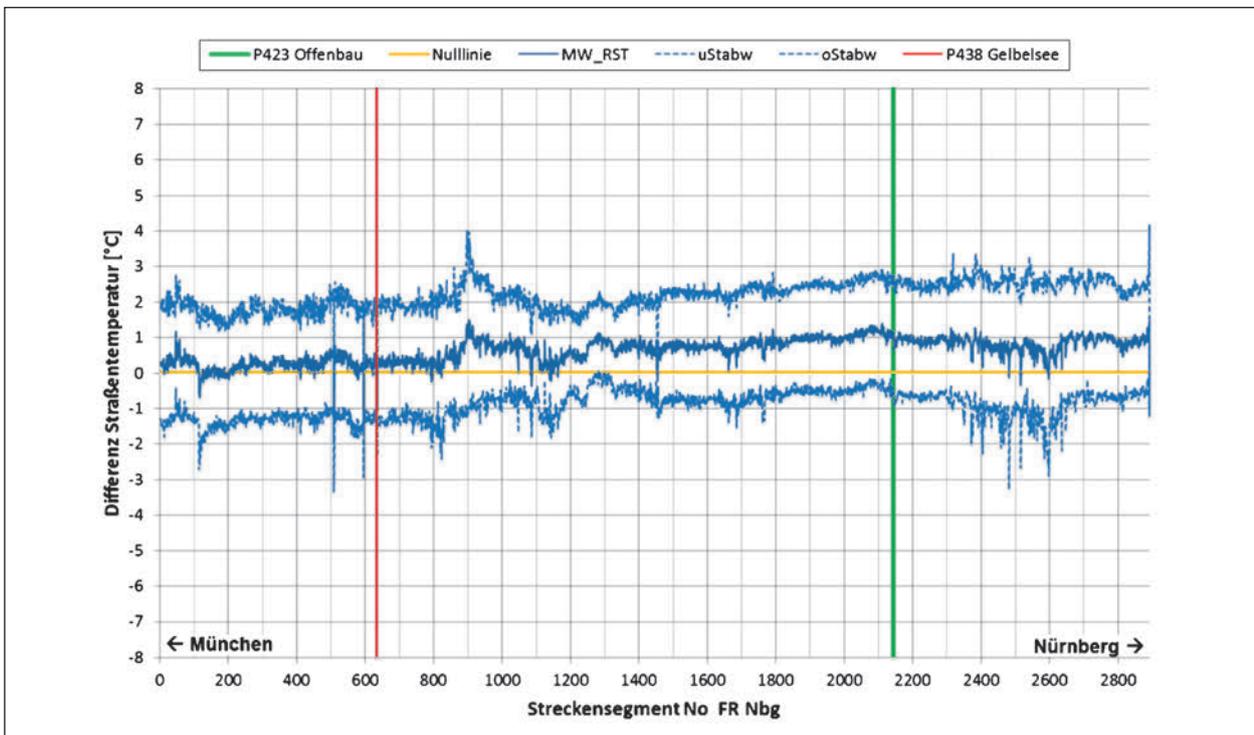


Bild 104: Mittelwertkurve der Differenz der Straßentemperatur zur Referenzstation Offenbau II aller Lkw Fahrten im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017 auf der Teststrecke A9 nach Streckensegmenten. Auf der x-Achse sind die letzten 4 Ziffern des Segment-Indexes angegeben. Die obere und untere Kurve markieren jeweils die Standardabweichung. Rote senkrechte Linie markiert den Standort von Gelbsee und die grüne Offenbau

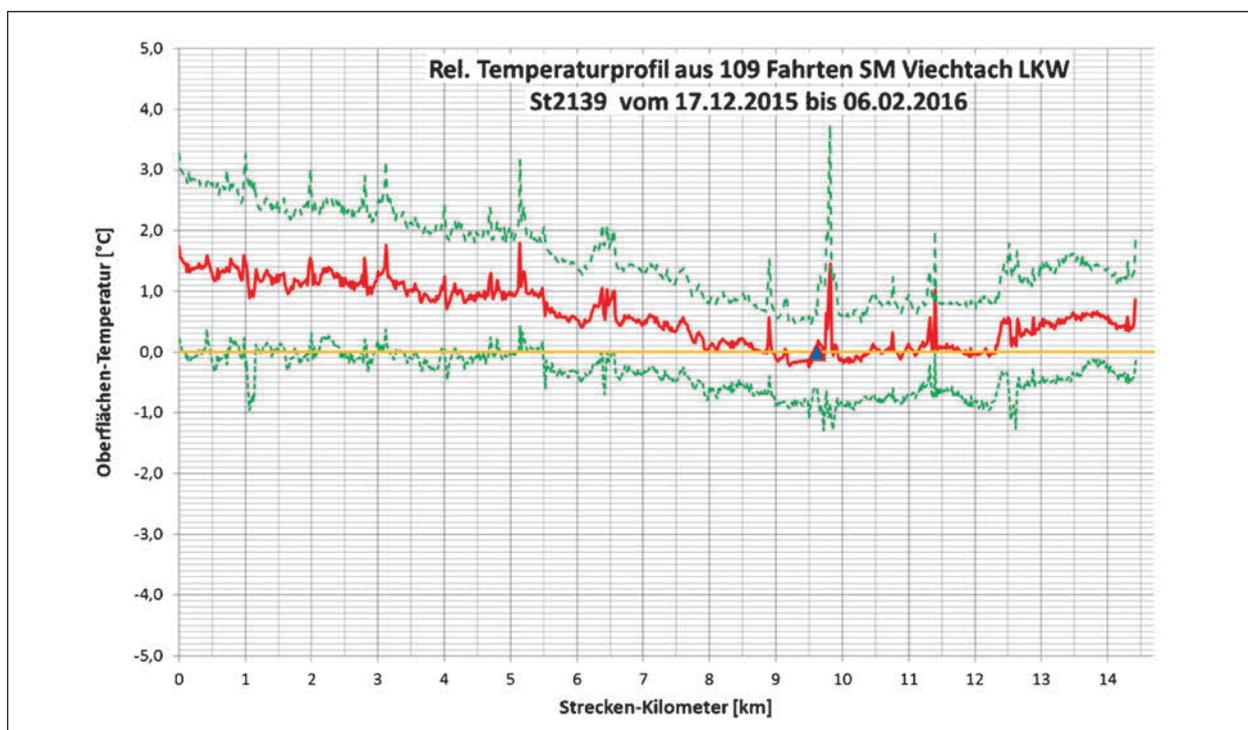


Bild 105: Mittelwertskurve mit \pm Std.Abweichungen der mobilen Oberflächen-Temperatur von 109 Lkw-Fahrten der SM Viechtach an der St2139 Viechtach-Grün im ausgew. Zeitraum

was zu erwarten ist. Aber auch hier gibt es offensichtlich auch bei unterschiedlichen Wettersituationen wiederkehrende Effekte. Die Spitze erhöhter Temperatur kurz nach der Station Predigtstuhl ist auffällig. Dafür kann aber in den digitalen Karten und Satellitenkarten keine auffällige Ursache gefunden werden. Meteorologen vermuten hier eine durch die topografische Situation auftretende Windströmung. Auch diese Effekte liefern wertvolle Hinweise für die Optimierung der Vorhersage.

Dieselbe Auswertung wurde auch für Winter 2016/17 unternommen. In Bild 106 ist eine alternative Darstellung der Profilkurve zu sehen. Die Kurve beinhaltet alle 204 Lkw-Fahrten der SM Viechtach unter vielen verschiedenen Wettersituationen. Erwartungsgemäß sind die Unterschiede der Streckensegmente bei verschiedenen Wetterbedingungen nicht mehr so deutlich zu erkennen. Gleichwohl sieht man, dass die meisten Streckenbereiche statistisch überhäufig höhere Temperaturen aufweisen als die am höchsten gelegene Referenzstation.

Sinngemäß zu den Belagstemperaturen wurden auch die mobilen Wasserfilmdicken-Messungen in Bezug auf die stationären Wasserfilmdicken untersucht.

Wie bereits ausführlich in Kapitel 6.2.1 dargelegt, sind die Messungen mit sehr hohen Streuungen be-

haftet. Das spiegelt sich natürlich zwangsläufig in den Streckenprofilen wieder, die auf Basis der Wasserfilmdicke erstellt worden sind. Auch wenn teilweise die Streuungen deutlich höher sind als die durchschnittlichen Streckenunterschiede, so kann man diesen Parameter nicht außer Acht lassen. Wie im erwähnten Kapitel ebenfalls dargestellt, ist dies nicht allein ein Problem der Messunsicherheit der Sensorik, sondern in erheblicher Masse der natürlichen Umgebungsbedingungen. Die Mikrostruktur der Wasserverteilung auf der Oberfläche weist diese Streuungen auf.

Dennoch kann man in der Mittelwertkurve über die Streckensegmente aller Fahrten der Lkw der Meistereien deutliche statistische Unterschiede sehen, die auf unterschiedliche Nässe-Eigenschaften an diesen Stellen schließen lassen.

Die Nässesituation auf der A 9 konnte erst nach Fertigstellung der neuen SWS in Offenbau und Gelbsee untersucht werden. Bild 107 zeigt die Mittelwerte der Abweichung zur Station Offenbau der Wasserfilmdicken pro Streckensegment (dargestellt sind die letzten 4 Ziffern der RSEG_ID), sowie die Streuungen. Das Höhenprofil lässt gewisse Korrelationen zum Nässeverhalten erkennen.

Die statistische Verteilung der Wasserfilmdicken über die Streckensegmente zeigt ziemlich genau im

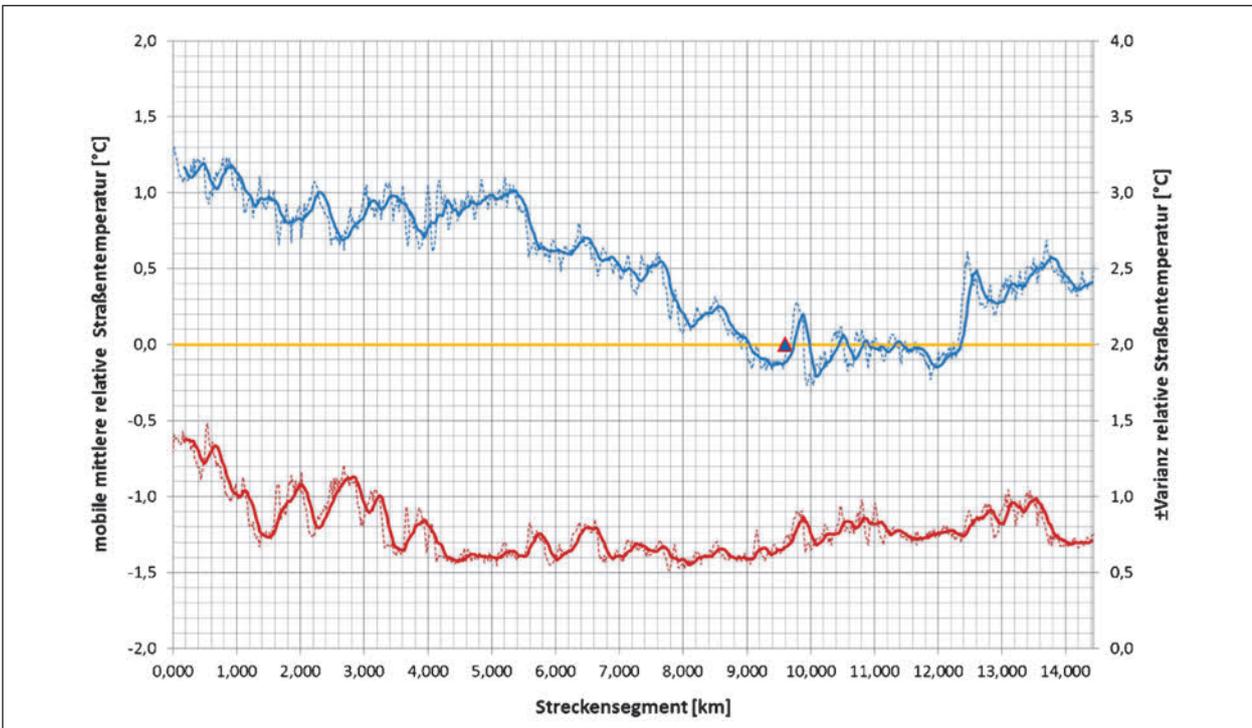


Bild 106: Profilkurve der relativen Straßentemperatur (Mittelwert der Differenzen zur stationären Referenz nach Streckensegment) – blaue Kurve. Dünne gestrichelte Linie sind die jeweiligen Mittelwerte pro Segment, die dicke Linie ist der gleitende Mittelwert über ca. 100 m. Die roten Kurven geben die Variation innerhalb dem Streckensegment (Std.Abweichung) wieder (rechte Y-Achse). Zeitraum ist der 06.11.2016 bis 30.04.2017 mit Lkw SM Viechtach. St2139. Die Position der Referenzstation ist markiert

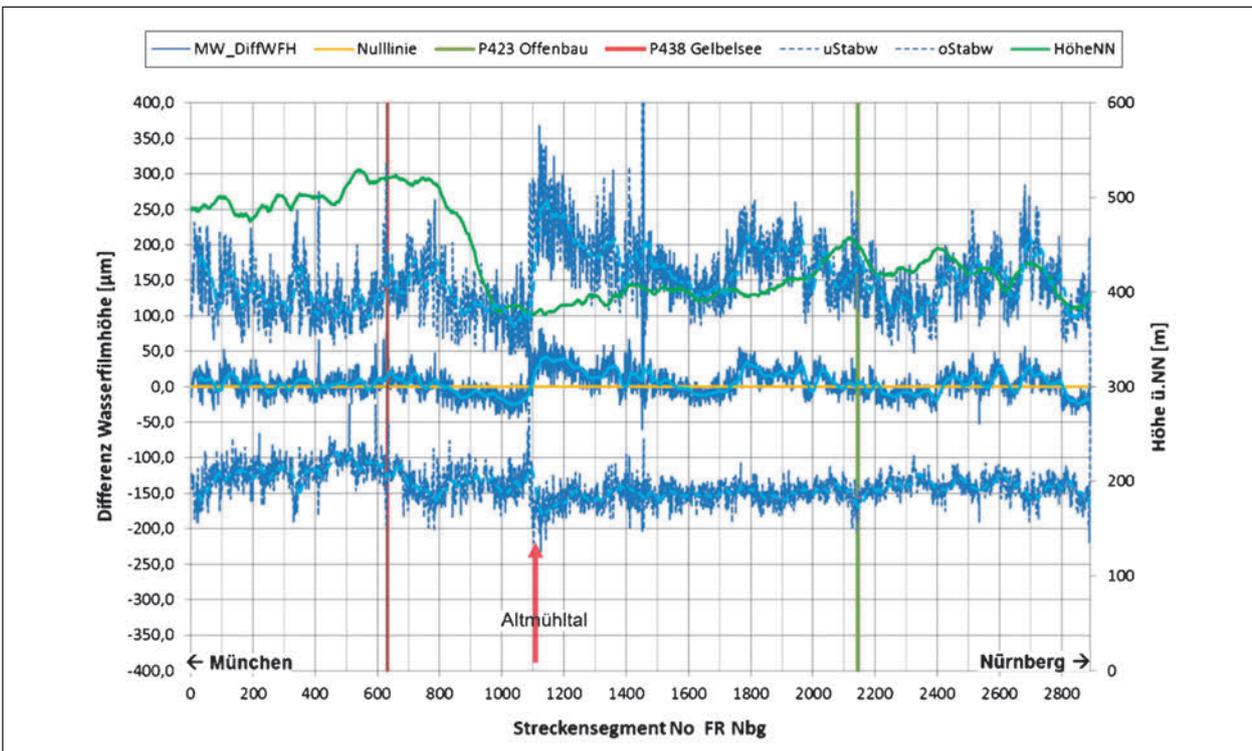


Bild 107: Mittelwertkurve der mobilen relativen Wasserfilmdicken nach Streckensegment (letzten 4 Digits des Index). Referenzstation ist Offenbau II (eingebauter Sensor). Die oberen und unteren Kurven sind die Standardabweichungen. Zusätzlich ist die geogr. Höhe über NN. (grüne Kurve) eingezeichnet

Bereich der Anschlussstelle Altmühltal (wo auch das Gelände am niedrigsten ist), am Zusammenfluss von Schwarzach und Anlauter, eine auffällige Änderung im Nässeverhalten. In Richtung München, wo das Gelände relativ steil ansteigt, ist die



Bild 108: Lage der Nässeauffälligkeit im Altmühltal auf der A 9 Anschlussstelle (Tool: GeoBasis-De/BKG(2020))

Nässe deutlich geringer und zeigt weniger Streuung, als im Verlauf Richtung Nürnberg wo sich offensichtlich die Nässe deutlich stärker kumuliert.

Grundsätzlich wurden die mobilen Wasserfilmdicken, welche erheblichen kleinräumigen Schwankungen unterworfen sind, mit einer leichten Dämpfungsfunktion mit einer Konstante von 0,1 (siehe Kapitel 7.4.2) verarbeitet.

Auch auf der St2139 Viechtach wurden die mobil erfassten Wasserfilmdicken über alle Wettersituationen (und damit auch unterschiedliche Straßenzustände einschließlich Schnee und Eis) ausgewertet und die Mittelwerte der Differenz von der Referenzstation Predigtstuhl pro Streckensegment in Bild 109 dargestellt. Da die Abweichung der mobilen Messung zur stationären Messung auch am gleichen Standort immer eine gewisse Abweichung zeigt ist die Differenzkurve um die mittlere Abweichung am Referenzort noch normiert, sodass an

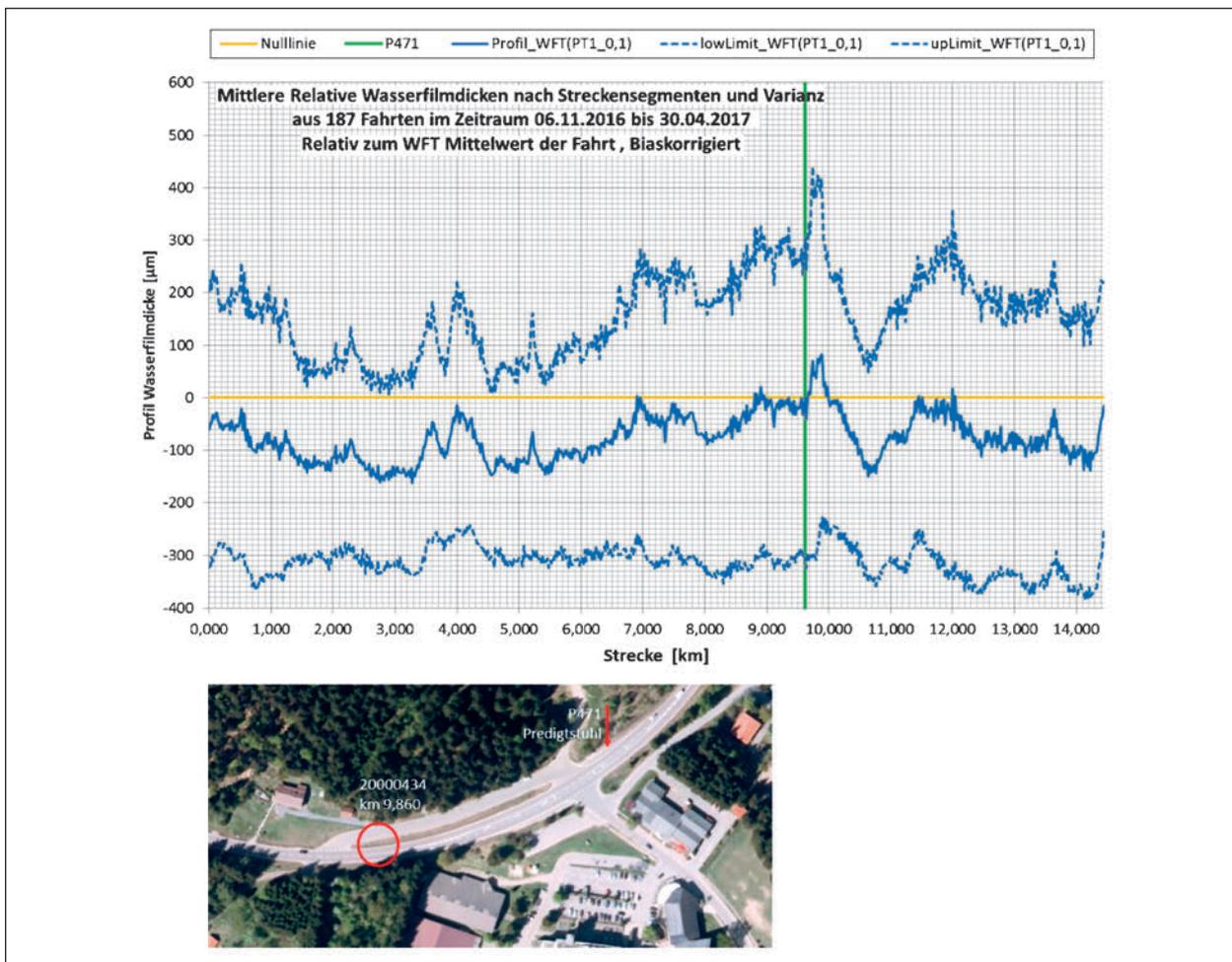


Bild 109: Verlauf der Mittelwerte der Differenz der Wasserfilme aller Fahrten im Zeitraum auf der St2139 zum Referenzstandort Predigtstuhl. Die untere und obere Kurve markieren die Standardabweichung. Luftbild: Die Stelle mit der durchschnittlichen größten Nässe liegt ziemlich an der höchsten Stelle in St. Englmar in der Nähe der Referenzstation

der Stelle Predigtstuhl die Wasserfilm-Profilkurve den Wert 0 annimmt.

8.3.2 Transformationsfunktion von Referenzstelle zu Streckensegment

Ermittlung der Transformationsfunktion

Die Untersuchung soll die Frage klären: „Wie lassen sich die in einem Streckensegment gemessenen Daten mittels einer Transformationsfunktion aus den Daten der Referenzstation darstellen?“

Die Analyse der Korrelation und Residuen der Regression zwischen den zeitgleich erfassten Daten an der Referenzposition (Straßenwetter-Station) und den Stichproben aus den Streckensegmenten geben keinen Hinweis auf nichtlineare Zusammenhänge. Deshalb kann in guter Näherung von einer Lineartransformation ausgegangen werden.

Betrachtet werden sollen die wesentlichen Parameter Straßentemperatur, Taupunkttemperatur und die Wasserfilmdicke (Wasseräquivalent).

Der allgemeine Ansatz für eine lineare Transformationsfunktion lautet:

$$MW_t(RSEG) = c_{WK,RSEG} \cdot MW_t(REF) + b_{WK,RSEG} \quad (\text{Gl. 17})$$

Dabei bedeutet $MW_t(RSEG)$ die Messgröße bezogen auf das Streckensegment RSEG zum Zeitpunkt t und $MW_t(REF)$ ist die Messgröße an der Referenzposition.

Die Parameter c (Koeffizient) und b (Konstante oder Bias) gelten jeweils für ein bestimmtes Streckensegment (RSEG) und sollten erwartungsgemäß die Streckeneigenschaften an der Stelle widerspiegeln. Die Parameter sind aus den Beobachtungsdaten an der Referenzstation und den mobilen Daten aus den Streckensegmenten nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (lineare Regression) zu bestimmen. Um die Fehler weiter einzugrenzen kann die Parameterschätzung nach Wetterklassen (WK) gefiltert werden. Die Parameter gelten dann für jeweils ein Streckensegment (RSEG) und eine Wetterklasse (WK).

Die Wetterklasse (WK) wird bezogen auf die Referenzstation ermittelt.

Die Lineartransformation nach der obigen Formel liefert dann den Erwartungswert an dem Streckensegment in Abhängigkeit von der Beobachtung oder später der Vorhersage an der Referenzstation.

Nachstehend ist die Berechnung der Parameter der Transformationsfunktion in einer vereinfachten Darstellung wiedergegeben:

$$c_{RSEG} = \frac{\sum (MW(REF) - \overline{MW(REF)}) \cdot (MW(RSEG) - \overline{MW(RSEG)})}{\sum (MW(REF) - \overline{MW(REF)})^2}$$

$$\overline{MW} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} MW_i$$

$$b_{RSEG} = \overline{MW(RSEG)} - c_{RSEG} \cdot \overline{MW(REF)} \quad (\text{Gl. 18})$$

Der einfachen Darstellung wegen, sind die Indizes für Zeit und Wetterklasse weggelassen. Die Summen verstehen sind jeweils über alle Datensätze zum Zeitpunkt der Erfassung der mobilen Messgröße am Streckensegment und ggf. gefiltert nach Wetterklasse (oder über alle Wetterklassen). Die Gesamtzahl der Datensätze ist N (bedeutet im Prinzip die Anzahl der erfassten Stichproben pro Streckensegment). $MW(REF)$ bedeutet der jeweilige Messwert an der Referenzstation, $MW(RSEG)$ der jeweilige mobile Messwert im Streckensegment (RSEG).

Den Vertrauensbereich liefert auch die Standardabweichung der Regressionsgleichung.

$$s_{RSEG} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (MW_i(RSEG) - \tilde{MW}_i(RSEG))^2} \quad (\text{Gl. 19})$$

Für den Vertrauensbereich des Erwartungswertes der Transformationsfunktion dient am besten die Standardabweichung der Differenz zwischen dem tatsächlichen Messwert und dem durch die Transformation geschätzten Wert, jeweils pro Streckensegment.

Nach dieser Methode wurden für die Teststrecke A 9 Greding mit den Referenzstationen Offenbau II und Gelbelsee II, sowie der Teststrecke St2139 Viechtach mit der Referenzstation Predigtstuhl (P471) die Transformationsparameter zunächst über alle Wettersituationen bestimmt. Dabei wurden alle erfassten mobilen Daten des Lkw der AM Greding im Zeitraum Mitte Dezember 2016 bis Ende April 2017 und des Lkw der SM Viechtach im Zeitraum November 2016 bis einschließlich April 2017 berücksichtigt.

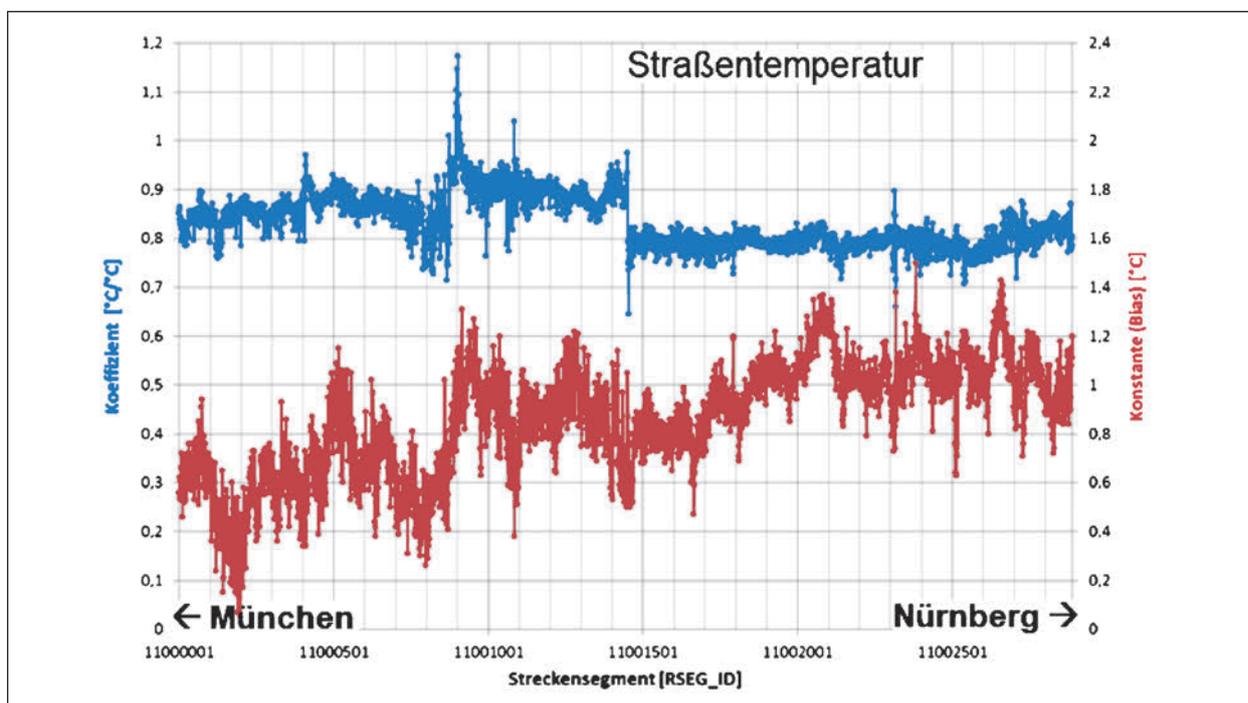


Bild 110: Übersicht der ermittelten Parameter für die Taupunkttemperatur des Transformationsmodells pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke A9 Fahrtrichtung Nord, aus erfassten Daten im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte jeweils Koeffizienten und rote Punkte die Konstante. Die Parameter sind über alle vorkommenden Wettersituationen ermittelt – also ohne Wetterklassierung!

Bei der A 9 wurde nur die Fahrtrichtung Nürnberg berücksichtigt, da sich auf dieser Seite die Sensorik der Referenzstation befindet.

In Bild 111 und Bild 112 sind als Übersicht die ermittelten Parameter über alle Streckensegmente für die drei Messgrößen dargestellt. Bei der Wasserfilmdicke wurden die Koeffizienten derart ermittelt, dass die Konstante verschwindet, damit natürlich bei Abtrocknung die Wasserfilmdicke auch auf null zurückgeht.

Die Auflistung der Ergebnisse aller 3.615 Streckensegmente wäre extrem unübersichtlich, daher wird die Betrachtung beispielhaft auf einige wenige selektierte Streckensegmente beschränkt. In Tabelle 59 sind die ausgewählten Streckensegmente aufgeführt.

Die Verortung der ausgewählten Segmente ist in Bild 113 zu sehen.

In Tabelle 60 sind die ermittelten Parameter aufgeführt, beispielhaft für die selektierten Streckensegmente.

Dieselben Auswertungen wurden auch auf der Teststrecke St2139 Viechtach → St. Englmar unternommen. Hier waren alle Fahrten des Lkw der SM

km	RSEG-ID	Bemerkung
400,840	11002720	Höchster SkyView Factor (Strahlungsauswertung) im TM
405,600	11002482	Hohe Varianz der Temperaturdifferenzen
408,900	11002317	Höchste Differenztemperatur im TM, Überführungsbrücke
410,880	11002218	Niedrige Temperatur im TM
432,820	11001121	Hohe WFD in den mobilen Daten
437,120	11000906	Hohe Temperaturdifferenz im TM
445,060	11000509	Niedrigste mittlere Differenztemperatur in den mobilen Daten
451,900	11000167	Niedrige Temperatur im TM

Tab. 59: Beispielhafte Auswahl der Streckensegmente für die Überprüfung der Transformation. TM bedeutet Thermal Mapping bzw. erweiterte Thermalkartierungsfahrten. WFD bedeutet Wasserfilmdicke (Wasseräquivalent). Die Kilometerangabe ist rein virtuell und dient lediglich der Entfernungsinformation und ist nicht identisch mit der Kilometrierung im Betriebsdienst

Viechtach im Zeitraum November 2016 bis einschließlich April 2017 untersucht worden.

Eine Übersicht in grafischer Form der Parameter der Transformationsfunktion für alle Streckensegmente der St2139 ist in Bild 114 bis Bild 116 gezeigt. Hier gilt das gleiche wie bei der A 9 erwähnt.

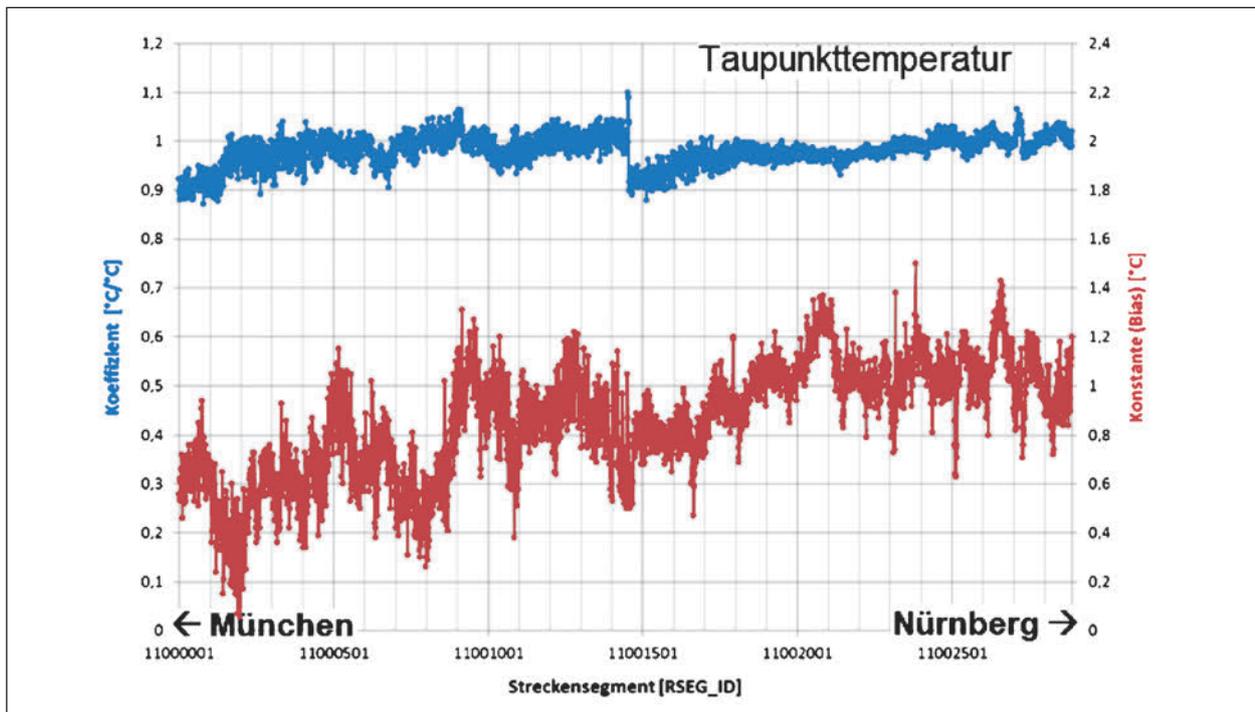


Bild 111: Übersicht der ermittelten Parameter für die Straßentemperatur des Transformationsmodells pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke A 9 Fahrtrichtung Nord, aus erfassten Daten im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte jeweils Koeffizienten und rote Punkte die Konstante. Die Parameter sind über alle vorkommenden Wettersituationen ermittelt – also ohne Wetterklassierung!

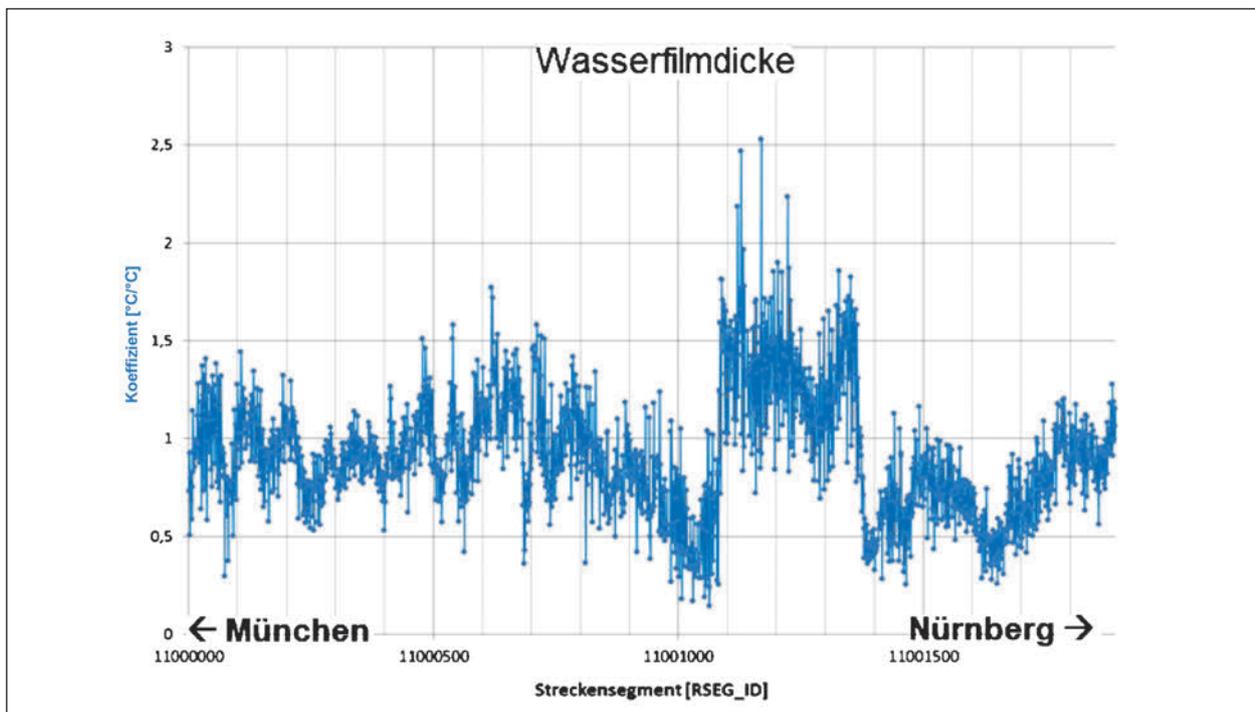


Bild 112: Übersicht aller ermittelten Parameter für die Wasserfilmdicke des Transformationsmodells pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke A 9 Fahrtrichtung Nord, aus erfassten Daten im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte bedeuten jeweils die Koeffizienten. Bei der Wasserfilmdicke sind die Koeffizienten so ermittelt, dass die Konstante = 0 wird, da hier ein Bias keinen Sinn macht – über alle Wettersituationen



Bild 113: Verortung der selektierten Streckensegmente auf der Teststrecke A 9. Jeweils die letzten 4 Ziffern des Index (RSEG-ID) sind aufgeführt. Fahrrichtung Nord, Nürnberg (Stammham → Allersberg)

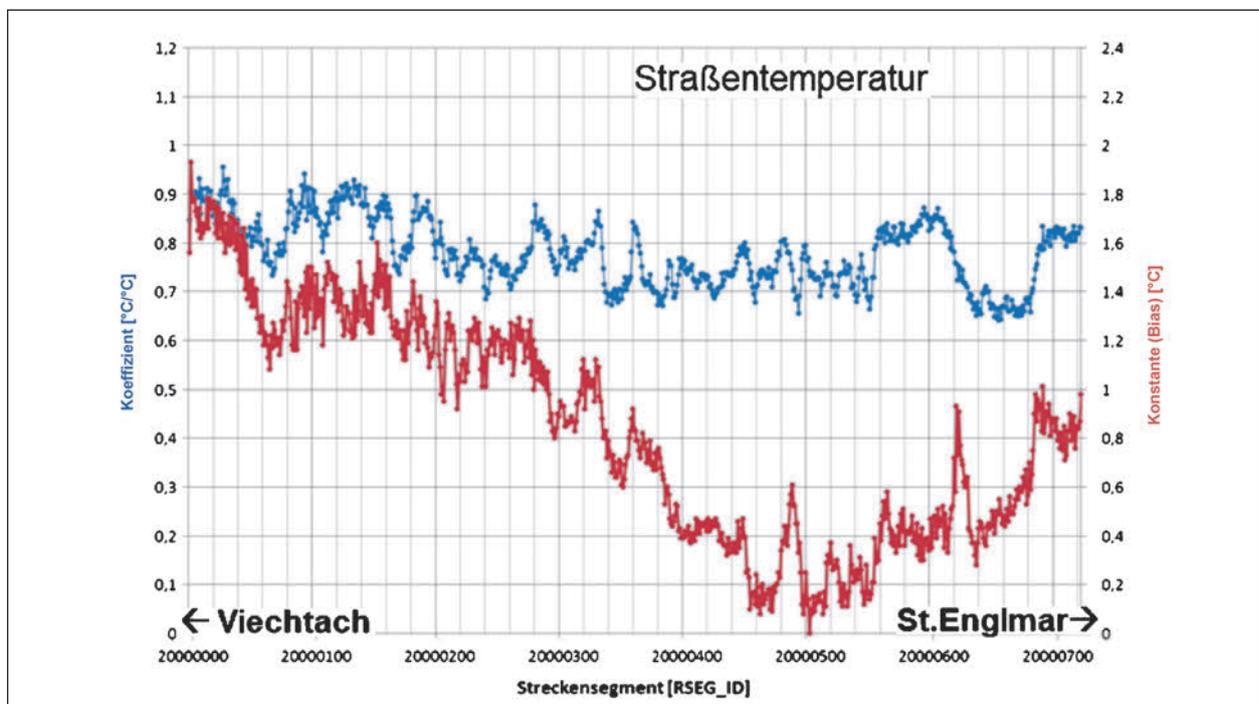


Bild 114: Übersicht aller ermittelten Parameter des Transformationsmodells für die Taupunkttemperatur pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke St2139, aus erfassten Daten im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte jeweils Koeffizienten und rote Punkte die Konstante. Die Parameter sind über alle Wettersituationen ermittelt – also keine Wetterklassierung!

Straßentemperatur						
RSEG_ID	KILOMETR	Mittl. Abw.	Vertr. Ber.	Koeffizient	Konst. (Bias)	R2
enum	km	°C	± °C	°C/°C	°C	
11000167	451,900	0,1	± 1,43	0,83141	0,35	0,958
11000509	445,060	0,6	± 1,2	0,90796	0,97	0,984
11000906	437,120	1,1	± 1,94	1,04425	0,96	0,961
11001121	432,820	0,5	± 1,4	0,86599	0,77	0,98
11002218	410,880	0,8	± 1,26	0,79504	1,00	0,936
11002317	408,900	0,6	± 1,46	0,82555	0,85	0,927
11002428	406,680	1,0	± 1,28	0,80575	1,04	0,907
11002720	400,840	1,1	± 1,5	0,79884	1,05	0,913
Taupunkttemperatur						
RSEG_ID	KILOMETR	Mittl. Abw.	Vertr. Ber.	Koeffizient	Konst. (Bias)	R2
enum	km	°C	± °C	°C/°C	°C	
11000167	451,900	1,2	± 0,87	0,95685	1,08	0,963
11000509	445,060	1,6	± 0,82	1,00032	1,59	0,968
11000906	437,120	1,5	± 0,59	1,02619	1,65	0,983
11001121	432,820	1,8	± 0,89	0,95723	1,62	0,962
11002218	410,880	2,0	± 0,67	0,97306	1,87	0,974
11002317	408,900	2,0	± 0,81	0,99549	2,02	0,965
11002428	406,680	2,0	± 0,65	0,98956	2,01	0,971
11002720	400,840	2,2	± 0,91	1,05377	2,43	0,938
Wasserfilmdicke						
RSEG_ID	KILOMETR	Mittl. Abw.	Vertr. Ber.	Koeffizient	Konst. (Bias)	R2
enum	km	µm	± µm	µm/µm	µm	enum
11000167	451,900	7,9	± 114,84	0,97695	0	0,601
11000509	445,060	- 0,2	± 81,47	0,8118	0	0,584
11000906	437,120	- 3,2	± 114,72	0,80017	0	0,346
11001121	432,820	94,9	± 289,43	2,18765	0	0,5
11002218	410,880	- 6,5	± 131,86	0,946	0	0,463
11002317	408,900	- 22,6	± 101,63	0,6306	0	0,397
11002428	406,680	10,1	± 156,94	0,7447	0	0,276
11002720	400,840	28,7	± 202,71	1,1387	0	0,468
Parameter über alle Wettersituationen. R2 bedeutet das Bestimmtheitsmaß						

Tab. 60: Berechnete Parameter der Transformationsfunktion der einzelnen Streckensegmente der A 9 in Bezug auf den Referenzort SWS Offenbau

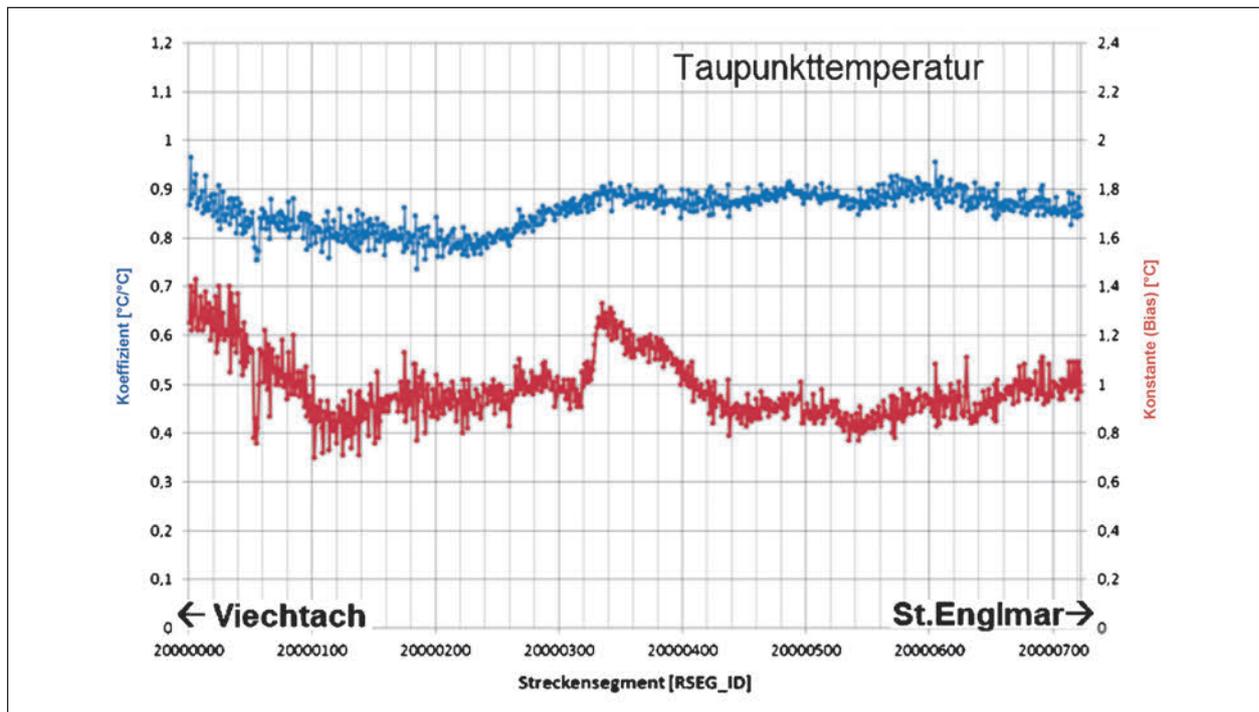


Bild 115: Übersicht aller ermittelten Parameter des Transformationsmodells für die Straßentemperatur pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke St2139, aus erfassten Daten im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte jeweils Koeffizienten und rote Punkte die Konstante. Die Parameter sind über alle Wettersituationen ermittelt – also keine Wetterklassierung!

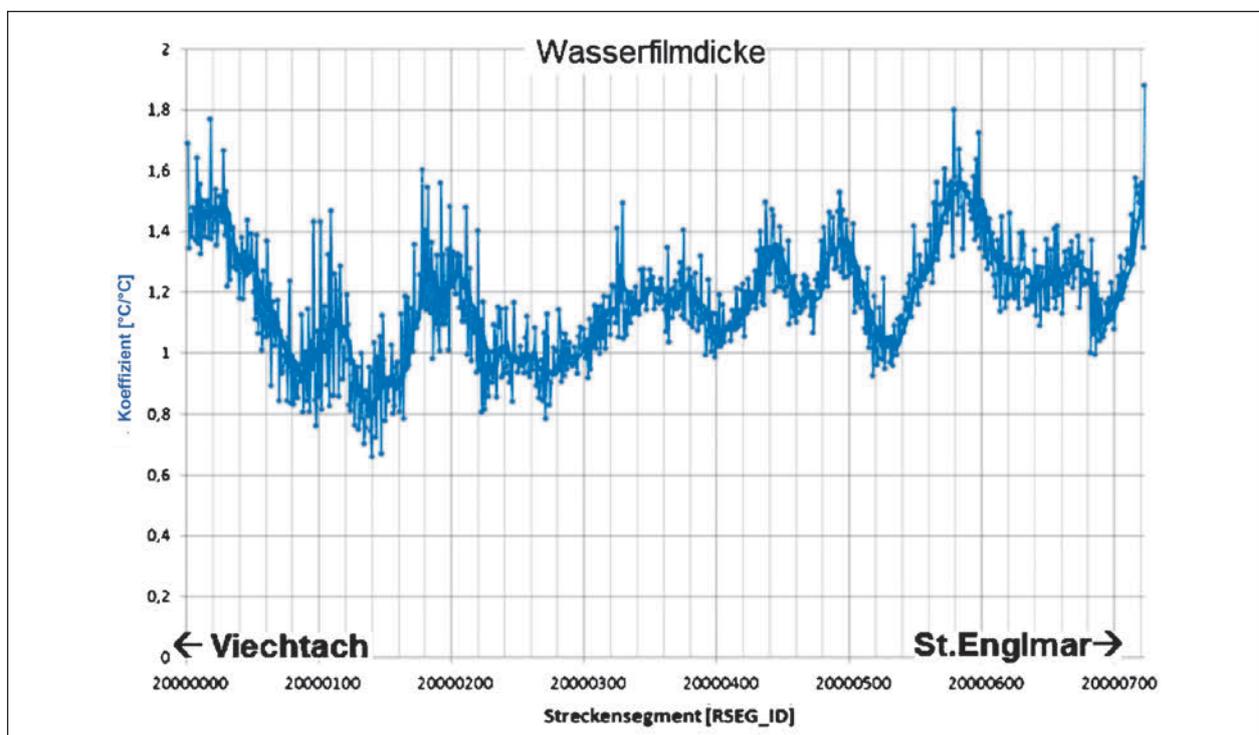


Bild 116: Übersicht aller ermittelten Parameter des Transformationsmodells pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke St2139. Aus erfassten Daten im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte jeweils Koeffizienten und rote Punkte die Konstante. Bei der Wasserfilm sind die Koeffizienten so ermittelt, dass die Konstante = 0 wird, da hier ein Bias keinen Sinn macht – über alle Wettersituationen

Auch für die St2139 wurden zur weiteren Darstellung nur einige Streckensegmente beispielhaft herausgegriffen (siehe Tabelle 61).

Die Verortung der ausgewählten Streckensegmente ist in Bild 117 dargestellt, sowie die Lage der Segmente auf der Teststrecke. Die Parameter der Transformationsfunktion für die ausgewählten Segmente sind in Tabelle 62 zusammengefasst.

KILOMETR	RSEG_ID	Höhe üNN	Bemerkung
2,820	20000142	584	geringer Wasserfilm
7,220	20000362	762	höchste Temp.Differenz TM
7,980	20000400	793	geringste Streuung
12,420	20000622	824	höchste durchn. Nässe, hohe Streuung

Tab. 61: Auflistung der ausgewählten Streckensegmente für die Teststrecke St2139

Eine Diskussion der Ergebnisse wird in den nächsten Kapiteln noch vorgenommen.

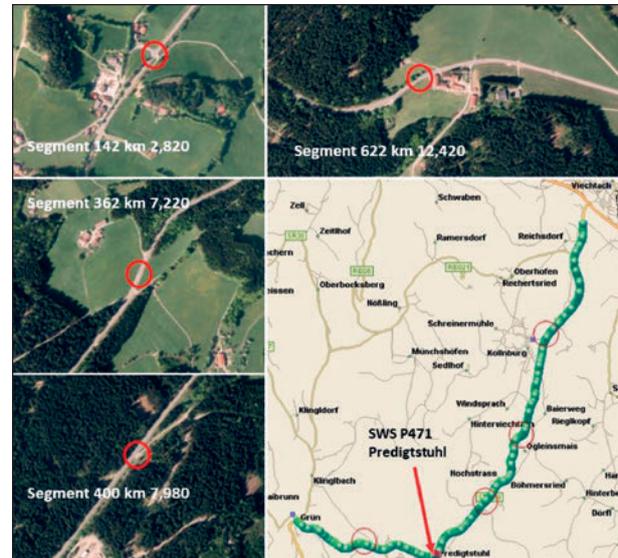


Bild 117: Verortung der ausgewählten Streckensegmente der Teststrecke St2139

Straßentemperatur						
RSEG_ID	KILOMETR	Mittl. Abw.	Vertr. Ber.	Koeffizient	Konst. (Bias)	R2
	km	°C	± °C	°C/°C	°C	--
20000142	2,820	1,7	± 1,6	0,87447	1,4	0,785
20000362	7,220	1,2	± 1,28	0,83252	0,83	0,851
20000400	7,980	0,9	± 1,24	0,76701	0,39	0,867
20000622	12,420	1,5	± 1,26	0,75771	0,93	0,869
Taupunkttemperatur						
RSEG_ID	KILOMETR	Mittl. Abw.	Vertr. Ber.	Koeffizient	Konst. (Bias)	R2
	km	°C	± °C	°C/°C	°C	--
20000142	2,820	1,6	± 2,22	0,79999	0,86	0,76
20000362	7,220	1,5	± 1,32	0,88107	1,14	0,906
20000400	7,980	1,4	± 1,23	0,89925	1,09	0,91
20000622	12,420	1,3	± 1,34	0,88563	0,95	0,908
Wasserfilmdicke						
RSEG_ID	KILOMETR	Mittl. Abw.	Vertr. Ber.	Koeffizient	Konst. (Bias)	R2
	km	µm	± µm	µm/µm	µm	--
20000142	2,820	110,7	± 282,52	1,03245	0	0,214
20000362	7,220	172,9	± 297,68	1,07054	0	0,302
20000400	7,980	139,2	± 294,15	1,12855	0	0,306
20000622	12,420	160,1	± 271,04	1,30825	0	0,321
Der Vertrauensbereich (Vertr.Ber.) entspricht der Standardabweichung der Transformation. R2 bedeutet das Bestimmtheitsmaß. Die mittlere Abweichung ist der Mittelwert der Differenzen nach oben oder unten						

Tab. 62: Parameter der Transformationsfunktion für die ausgewählten Streckensegmente der Teststrecke St2139

Erprobung der Transformationsfunktion, Vergleiche und Diskussion

Die Testumgebung ermöglicht die Erprobung durch Simulation der Modelle anhand der archivierten Daten. Dabei können sowohl die archivierten stationären Messdaten, als auch prinzipiell aktuelle Messdaten oder ersetzt durch Vorhersagedaten zur Anwendung kommen. Die Anwendung der linearen Transformation als Modell für die Streckeneigenschaften für die Messgrößen Straßentemperatur, Taupunkttemperatur und Wasserfilmdicke aus den Messgrößen der Referenzstelle ist natürlich keine echte Vorhersage, kann aber als Simulation für die streckenbezogene Vorhersage verstanden werden, unter der Voraussetzung, dass es eine optimal auf die Referenzstelle abgestimmte Vorhersage gibt. Die über die Transformation berechneten Streckenwerte werden dann mit den sporadischen, stichprobenhaften Messwerten der mobilen Sensoren verglichen.

Dabei wird die Methode der statistischen Transformationsfunktion bei den Straßentemperaturen und dem Taupunkt zusätzlich verglichen mit der einfachen Standardmethode der Berechnung der Streckenvorhersage aus dem Profil einer einmalig bei Standardbedingungen durchgeführten Thermalkartierung. Dazu wurden die in Kapitel 8.2.3 und 8.2.4 ermittelten Profile zugrunde gelegt.

Ein weiterer interessanter Vergleich sind die von einigen Anbietern gelieferten streckenbezogenen Vorhersagen. Der Anbieter GWC (Global Weather Corp., siehe Kapitel 6.4.3) liefert sog. NowCasting Daten im Intervall von 15 min. Der Prognosehorizont ist hier minimal, die Ausgabezeit entspricht auch der dem Gültigkeitszeitpunkt der Daten. Diese streckenbezogenen Detaildaten entstammen einem numerischen globalen Wettermodell und sind nicht unter Verwendung von Messdaten direkt aus der Strecke weder stationär noch mobil zustande gekommen. Man kann davon ausgehen, dass durch den sehr geringen Vorhersagehorizont die Fehler des atmosphärischen Wettermodells ebenfalls relativ gering sind. Dieser Vergleich ist interessant um der Beantwortung der Frage näher zu kommen, wie gut sind die frei fliegenden Modelle über die Streckeneigenschaften gegenüber den statistischen Methoden die mit ständigen Messdaten aus dem Straßenzustand der Strecke arbeiten.

Zunächst wurden die über alle Wetterklassen ermittelten Parameter für das Transformationsmodell auf die archivierten Daten angewendet und mit den mobilen Daten verglichen. Am aussagekräftigsten ist der MAE (Mean Absolute Error), also der Mittelwert der absolut genommenen Differenzen (Fehler) zwischen der Schätzung für die Streckensegmente und die im Streckensegment erfassten mobilen Stichproben. Tabelle 63 listet die dabei gefundenen Fehlerwerte auf für die A 9 in der Winterperiode 2016/17.

Für die Teststrecke St2139 gibt Tabelle 64 Auskunft.

Für die Illustration der für die Auswertung zugrunde liegenden Daten, sind beispielhaft einige Situationen herausgegriffen (Bild 118). Im Diagramm sind fast 3 Monate sichtbar, daher ist ein Teilstrich ein Tag. Da häufig innerhalb eines Tage das Streckensegment mehrmals befahren worden ist, erscheinen einige mobilen Datenpunkte (rote Markierung) über- bzw. untereinander. Bei Wettersituationen mit schnellen Temperaturänderungen können diese Temperaturwerte zwischen den Vorbeifahrten auch entsprechend differieren.

	Strecken- segment A 9	km		451,900	445,060	437,120	432,820	410,880	408,900	406,680	400,840	
		RSegID		11000167	11000509	11000906	11001121	11002218	11002317	11002428	11002720	
aus statistischem Transformationsmodell	Straßen- temperatur	BIAS	°C	0	0	0	0	0	0	0	0	
		MAE	± °C	0,7	0,7	0,7	0,6	0,9	1	0,9	0,8	
		STDDEV	± °C	0,9	0,9	0,9	0,8	1,1	1,2	1,2	1,1	
	Taupunkt- temperatur	BIAS	°C	0	- 0,1	0	0,2	0	0	0	- 0,1	0,1
		MAE	± °C	0,5	0,4	0,4	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,9
		STDDEV	± °C	0,7	0,5	0,5	0,9	1,1	1,2	1,1	1,1	1,2
	Wasserfilm- dicke	BIAS	µm	1,3	- 20	- 8,1	- 39	- 25,3	4,1	- 18,6	- 1,4	
		MAE	± µm	49	48	55	177	89	68	87	158	
		STDDEV	± µm	64	67	113	289	177	106	164	217	
aus Thermalkartierung	Straßen- temperatur	BIAS	°C	- 2	- 2,1	- 0,8	- 1,2	- 2,7	0,8	- 2,2	- 1,4	
		MAE	± °C	2	2,1	1,2	1,3	2,7	1,5	2,3	1,7	
		STDDEV	± °C	1,3	1,2	1,3	1,1	1,5	1,6	1,6	1,7	
	Taupunkt- temperatur	BIAS	°C	- 1,3	- 1,7	- 0,9	- 0,8	- 1,2	- 1,1	- 1,4	- 1,2	
		MAE	± °C	1,3	1,7	0,9	0,8	1,2	1,1	1,4	1,2	
		STDDEV	± °C	1,0	0,9	0,7	0,9	1,3	1,3	1,4	1,4	

BIAS = Mittelwert der Fehler
MAE = Mittelwert der absoluten Abweichungen
STDDEV = Std. Abweichung der Differenzen

Tab. 63: Statistische Kennzahlen der Anwendung der Transformationsfunktion (Streckeneigenschafts-Modell) auf die Streckensegmente der A 9 im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017 auf der Teststrecke im Vergleich zu den mobilen Messdaten des Lkw AM Greding

	St2139	km		2,820	7,220	7,980	12,420
		RSeg_ID		20000142	20000362	20000400	20000622
aus statistischem Transformationsmodell alle Wittersituationen	Straßentemperatur	BIAS	°C	0	0	0	0
		MAE	± °C	1,2	0,9	0,7	0,7
		STDDEV	± °C	1,5	1,2	1,0	1,0
	Taupunkttemperatur	BIAS	°C	- 0,2	- 0,1	- 0,2	- 0,2
		MAE	± °C	1,4	0,9	0,8	0,8
		STDDEV	± °C	2,2	1,3	1,2	1,2
	Wasserfilmdicke	BIAS	µm	- 108	- 165	- 125	- 130
		MAE	± µm	180	227	212	209
		STDDEV	± µm	284	302	299	282
aus Thermalkartierung	Straßentemperatur	BIAS	°C	0,2	- 1,8	0	- 0,3
		MAE	± °C	1,2	1,9	0,9	1
		STDDEV	± °C	1,6	1,3	1,2	1,3
	Taupunkttemperatur	BIAS	°C	2	0,5	0	0
		MAE	± °C	2,3	0,8	0,5	0,5
		STDDEV	± °C	2,6	1,2	1,1	1,1

BIAS = Mittelwert der Fehler
MAE = Mittelwert der absoluten Abweichungen
STDDEV = Std. Abweichung der Differenzen

Tab. 64: Statistische Kennzahlen der Anwendung der Transformationsfunktion auf die Streckensegmente der St2139 im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017 auf der Teststrecke im Vergleich zu den mobilen Messdaten des Lkw der SM Viechtach

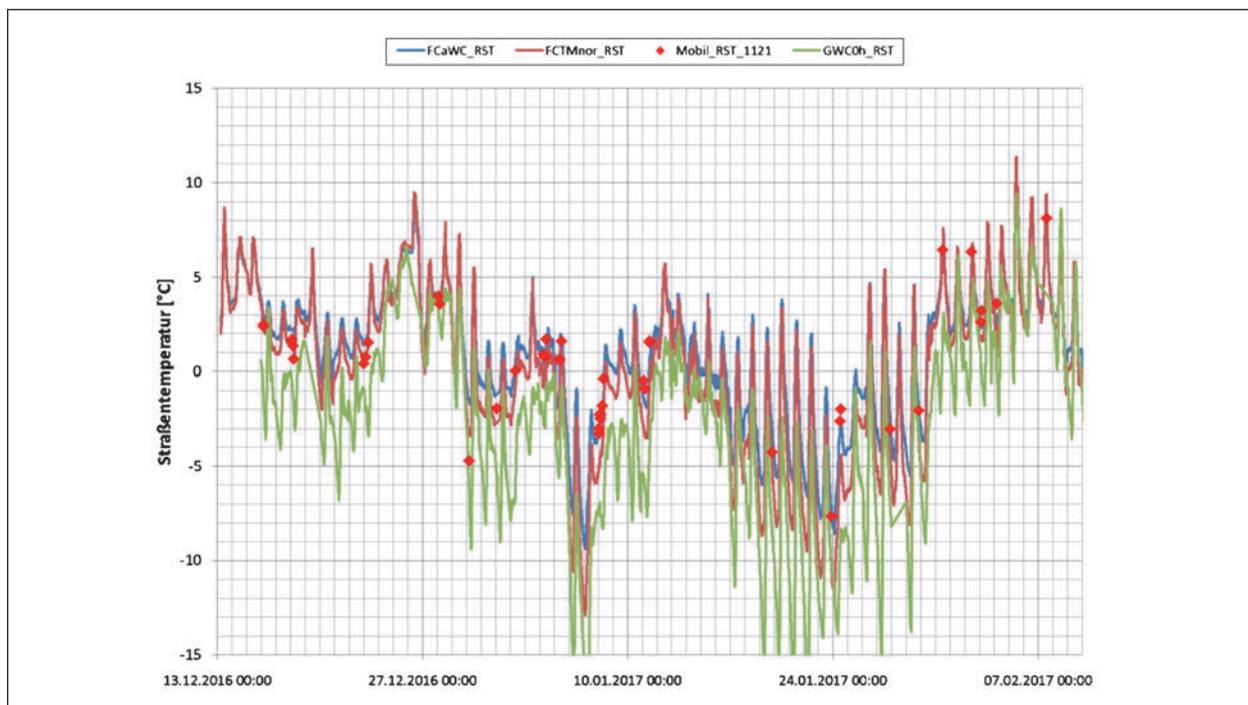


Bild 118: Übersicht Trenddiagramm der geschätzten Straßentemperatur auf der A 9 Streckensegment 110001121 Anschluss stelle Altmühltal. Rote Kurve aus Thermalkartierung ermittelte Temperatur. Blaue Kurve aus stat. Streckeneigenschaftsmodell (Transformationsmodell) ermittelte Straßentemperatur und grüne Kurve im Vergleich aus dem numerischen Modell stammenden Nowcasting Daten von GWC. Rote Punkte: mobile Messdaten an der Stelle

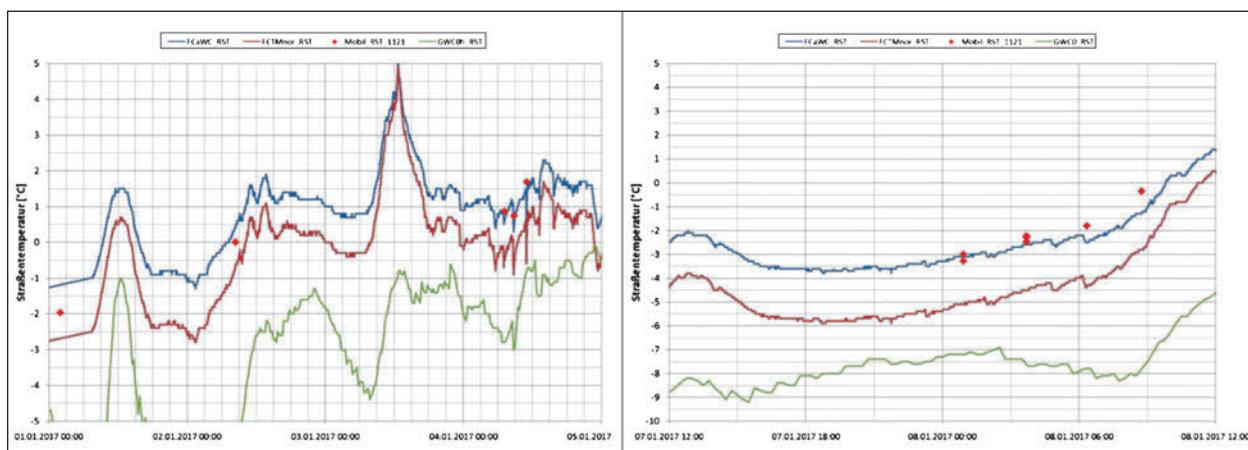


Bild 119: Zwei Beispiele aus Januar 2017. Anschlussstelle Altmühltal. Blaue Kurve: aus stat. Transformationsmodell ermittelte Straßentemperatur. Rote Kurve: aus Thermalkartierung ermittelte Temperatur. Grüne Kurve: im Vergleich aus einem numerischen Modell stammenden Nowcasting Daten von GWC. Rote Punkte mobile Messdaten an der Stelle

Aus den Vergleichen der unterschiedlichen Streckentemperatur-Schätzungen erkennt man, dass offensichtlich das Vorhersage-Modell von GWC die Belagstemperatur deutlich unterschätzt. Die aus der einmalig durchgeführten Thermalkartierung abgeleitete Schätzung liegt schon deutlicher in der Nähe der mobilen Strecken-Messdaten. Die nach der linearen Transformation, die sich auf viele mobile Messdaten stützt, ermittelten Schätzung

liegt eindeutig am nächsten an den Beobachtungen.

Das gleiche kann man auch aus den Daten der Teststrecke St2139 ablesen. Bild 120 dient als Übersicht über den grundsätzlichen Verlauf der Belagstemperaturen.

Wie in Bild 121 zu sehen ist, wird auch hier sowohl die von der GWC Vorhersage, als auch die von der

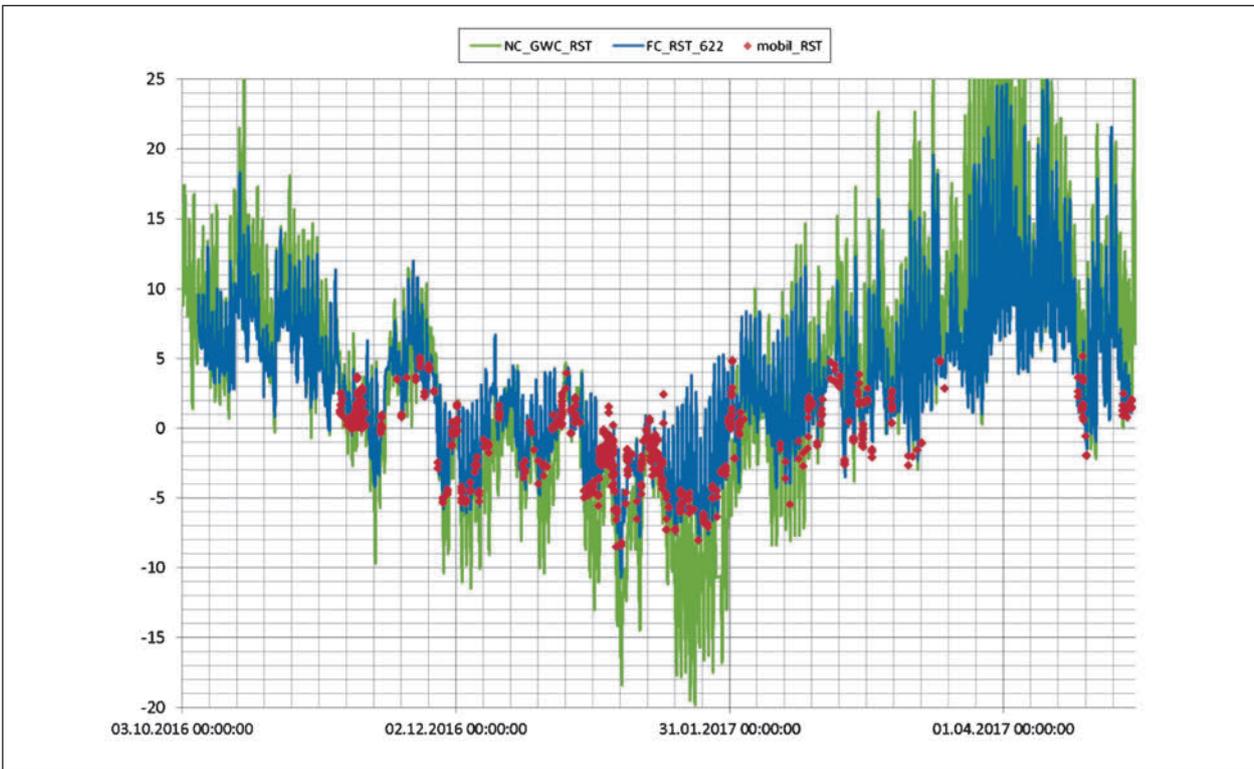


Bild 120: Übersicht Trenddiagramm der geschätzten Straßentemperatur auf der St2139 Streckensegment 20000622 St.Englmar. Blaue Kurve aus stat. Transformationsmodell ermittelte Straßentemperatur und grüne Kurve im Vergleich aus numerischen Modell stammenden Nowcasting Daten von GWC. Rote Punkte mobile Messdaten an der Stelle

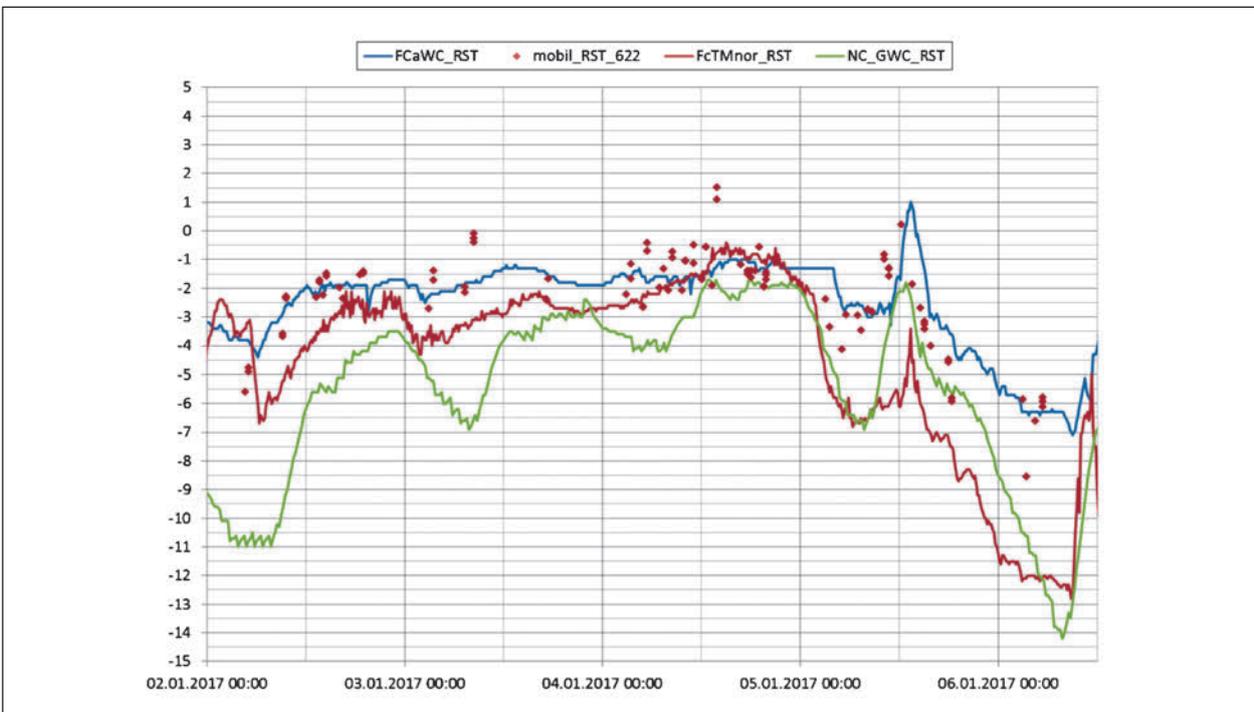


Bild 121: Ein Beispiele aus Januar 2017 auf der St2139 bei St.Englmar. Blaue Kurve: aus stat. Streckeneigenschaftsmodell (Transformationsmodell) ermittelte Straßentemperatur. Rote Kurve: aus Thermalkartierung ermittelte Temperatur. Grüne Kurve: im Vergleich aus einem numerischen Modell stammenden Nowcasting Daten von GWC. Rote Punkte mobile Messdaten an der Stelle

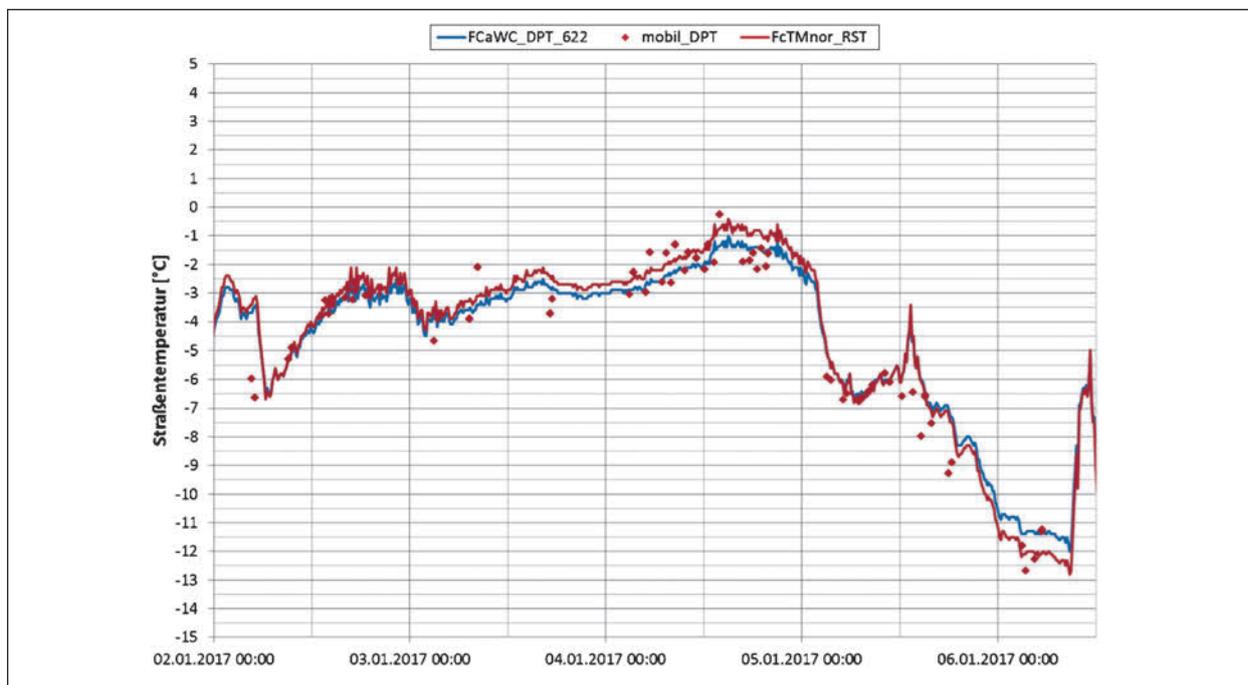


Bild 122: Beispiel Schätzung der Taupunkttemperatur am Streckensegment St.Englmar der St2139 aus Thermalkartierung (rote Kurve) und aus dem stat. Streckeneigenschaftsmodell (Transformationsmodell) (blaue Kurve). Zum Vergleich die an der Stelle mobil gemessene Taupunkttemperatur (MARWIS Lkw)

Thermalkartierung abgeleitete Belagstemperatur tendenziell unterschätzt. An der Stelle liegen etwas mehr mobile Stichproben vor und man sieht auch die damit verbundenen Streuungen der mobil gemessenen Temperaturen. Selbst in einem engen Zeitraum liegen die mobil gemessenen Temperaturen teilweise bis zu 2,5 °C auseinander. Bei dieser Teststrecke kommt allerdings erschwerend hinzu, dass keine Trennung der Fahrtrichtung vorgenommen wird. Daher kann ein Streckensegment durchaus in kurzen Zeitabständen mehrmals in verschiedenen Richtungen und Fahrspuren befahren worden sein.

Das statistische Transformationsmodell für die Streckeneigenschaften hat den Vorteil, dass solche „Ausreißer“ ausgemittelt werden.

Die Schätzung der Taupunkttemperatur an einem Streckensegment ist eher unkritisch. Bild 122 ist ein Beispiel für die Taupunkttemperatur aus Thermalkartierung und Transformationsmodell. Beide Methoden liegen dabei relativ gut auf den Beobachtungsdaten. GWC hat keine Taupunktvorhersagen (auch keine Luftfeuchte) geliefert, weshalb hier kein Vergleich mit einem numerischen Wettermodell gezogen werden kann. Bei der Staatsstraße St2139 kann man sicher davon ausgehen, dass durch die topografische Umgebungssituation im Hinblick auf die Variation der Luftparameter kritischer einzuschätzen ist, als die Teststrecke A 9.

Aus den Wasserfilmdicken Messungen ein Modell für die Nässeigenschaften abzuleiten, ist zweifellos die größte Herausforderung. Wie in Kapitel 6.2.1 und 7.4 bereits ausführlich erläutert, befinden wir uns im Bereich der Mikrostrukturen der Belagsoberfläche, welche eine breite Streuung der Verteilung der Wassermengen (oder Schnee und Eis) verursacht. Das wird auch deutlich, wenn man sich die Schätzungen der Wasserfilmdicken an Streckensegmenten ansieht. Bild 123 gibt eine Übersicht an der St2139 St.Englmar, dort sind die höchsten Nässewerte im Durchschnitt aufgetreten.

Auszugsweise sind vier Beispiele in Bild 124 und Bild 125 herausgegriffen. In den ersten beiden Beispielen scheint das numerische Modell von GWC die Beobachtungsdaten besser zu treffen. In den anderen beiden Beispielen liegt das Transformationsmodell besser. Im Beispiel aus dem Dezember scheint das GWC-Modell den Niederschlag kaum abzubilden und im Februar scheint die Niederschlagsmenge deutlich überschätzt zu sein. Insgesamt liegt aber das Transformationsmodell in der Fehleranalyse durchaus noch deutlich besser als das „freifliegende“ numerische globale Wettermodell. Unter „freifliegend“ wird in diesem Zusammenhang verstanden, dass die Vorhersage sich nicht auf aktuelle Messdaten (weder stationär noch mobil) aus der betreffenden Strecke stützt.

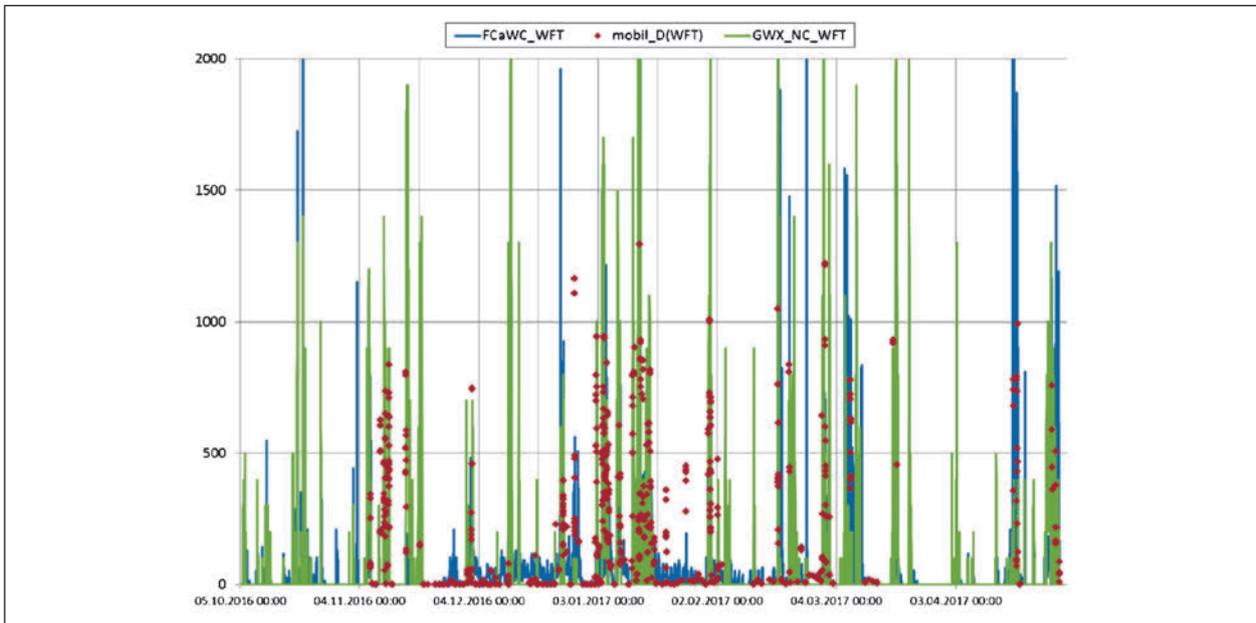


Bild 123: Übersicht über die geschätzten Wasserfilmdicken an der Stelle St.Englmar auf der St2139. Zeitraum Oktober 2106 bis April 2017. Aus stat. Transformationsmodell (blaue Kurve) und der numerischen Straßenwetter Modell von GWC (grüne Kurve) im Vergleich mit den mobilen Beobachtungen (rote Punkte) an der Stelle

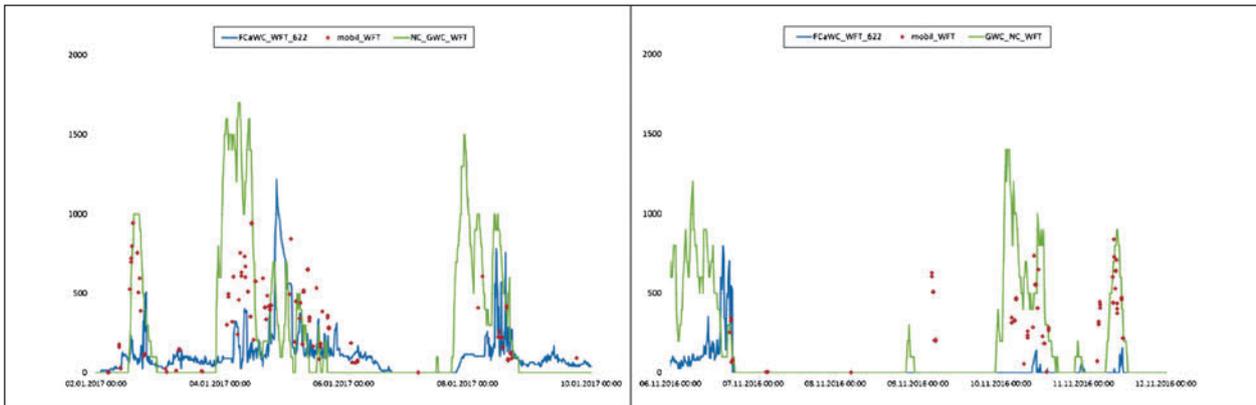


Bild 124: Beispiel-Auszug Januar 2017 und November 2016 an St2139 St. Englmar. Schätzung Wasserfilm aus Transformationsmodell (blaue Kurve) und numerisches Vorhersagemodell GWC (grüne Kurve) im Vergleich mit mobilen Beobachtungsdaten

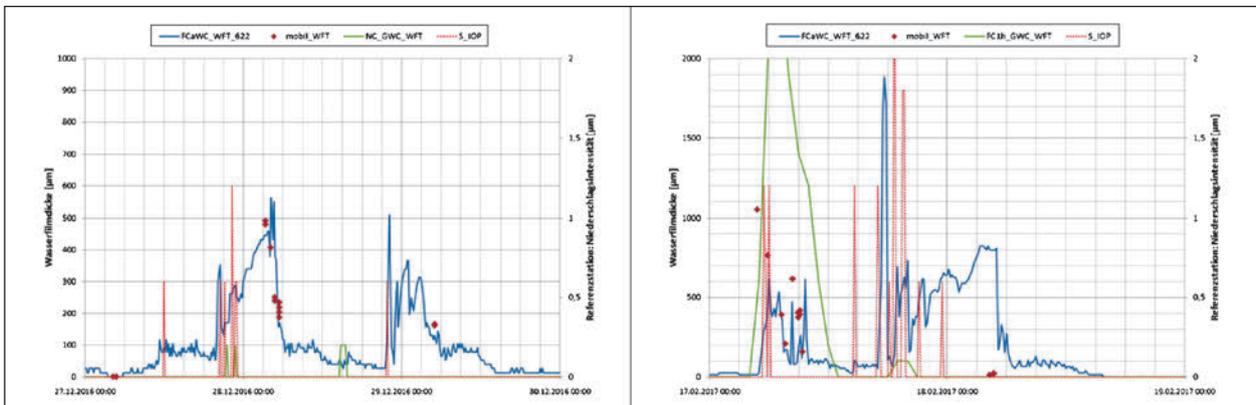


Bild 125: Beispiel-Auszug Dezember 2016 und Februar 2017 an St2139 St. Englmar. Schätzung Wasserfilm aus Transformationsmodell (blaue Kurve) und numerisches Vorhersagemodell GWC (grüne Kurve) im Vergleich mit mobilen Beobachtungsdaten. Als zusätzliche Information ist die Niederschlagsintensität (rot gestrichelt) an der Referenzstation Predigstuhl dargestellt

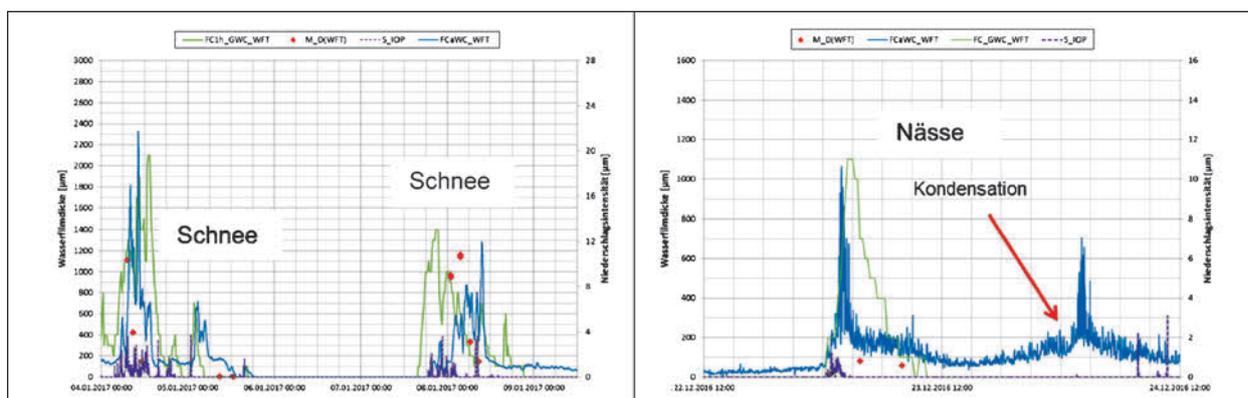


Bild 126: Zwei Beispiele aus A9 Altmühltal. Januar 17 und Dezember 16. Schätzung der Wasserfilmdicke aus Transformationsmodell (blaue Linie) und aus numerischem Modell GWC (grüne Linie). Zusätzlich zur Information die an der Referenzstation gemessene Niederschlagsintensität (violette Linie)

Allerdings, wie man den Tabellen (Tabelle 63 und Tabelle 64) entnehmen kann, bleiben durchschnittliche Fehler von $\pm 200 \dots \pm 300 \mu\text{m}$ übrig auf der A 9 sind die Abweichungen nicht ganz so groß, was auch zu erwarten ist.

Zwei Beispiele aus der A 9 Altmühltal sind in Bild 126 zu sehen. Bei dem Beispiel aus dem Januar 2017 handelt es sich um Schneebedeckung bzw. Schneematsch. Die Schätzung aus dem Transformationsmodell, die ja aus den Daten der Referenzstation abgeleitet ist, zeigt naturgemäß stärkere Schwankungen. Gerade bei Schnee und Schneematsch können häufig sehr schwankende Messwerte auftreten. Das numerische Modell bildet solche Schwankungen natürlich nicht ab. Im Beispiel Dezember 2017 handelt es sich um eine Nässesituation mit anfänglich leichtem überwiegend Regen. Die Luft ist mit Feuchte gesättigt (100 % rel. Feuchte) und der Taupunkt liegt nahe der Straßentemperatur. Der spätere Anstieg der Nässe auf der Fahrbahn dürfte durch Kondensation und verstärkt durch die hygroskopischen Eigenschaften des Tausalzes entstehen. Dies kann durch das numerische Modell erwartungsgemäß schlecht abgebildet werden. Da die Vorgänge an der Referenzstation gemessen werden wird gemäß dem Transformationsmodell auf das Streckensegment (hier Altmühltal) übertragen. Allerdings dürfte in diesem Fall die Menge etwas überschätzt worden sein.

Untersuchung nach Wetterklassen

Der Zusammenhang zwischen der Referenzstelle und den Streckensegmenten ist natürlich nicht unter allen Wetterbedingungen gleich. Durch die kontinuierliche Erfassung des Wettertrends an der stationären Stützstelle wird zwar die zeitliche Ände-

rung der Zustandsgrößen wiedergegeben, aber auch wenn die Referenzstation noch so repräsentativ für die Strecke ist, muss man davon ausgehen, dass die lineare Transformationsfunktion sich bei unterschiedlichen Wettersituation sich unterscheidet.

Um dem Rechnung zu tragen, kann man die im vorstehenden Kapitel beschriebene Transformationsfunktion nach Wetterklassen unterteilt ermitteln.

Bei dieser Untersuchung war es wichtig, dass die Kriterien für die Klassierung aus an der stationären SWS zur Verfügung stehenden Messgrößen abgeleitet werden können. Damit erreicht man auch die bestmögliche Annäherung an die tatsächlich herrschenden Verhältnisse.

Für die Transformationsfunktion der Straßentemperatur kommen folgende Kriterien infrage:

1.) Die Strahlungssituation

Da die SWS selten mit Strahlungsgebern ausgerüstet sind, muss ein indirektes Kriterium gefunden werden. Durch Auswertung der Strahlungsbilanzmessung an den neuen A 9 Stationen und dem Temperaturverhalten, konnte als geeignetes Kriterium der Abstand der Straßentemperatur zur Lufttemperatur gefunden werden. Bild 127 zeigt das Ergebnis der Auswertung anhand der Verteilung der Differenzwerte.

2.) Die Fahrbahnzustände

Anhand der Ergebnisse der Messvergleiche und der Abweichungen, welche deutliche Unterschiede zeigen bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen, kann man davon ausgehen, dass der Fahrbahnzustand einen Einfluss auf

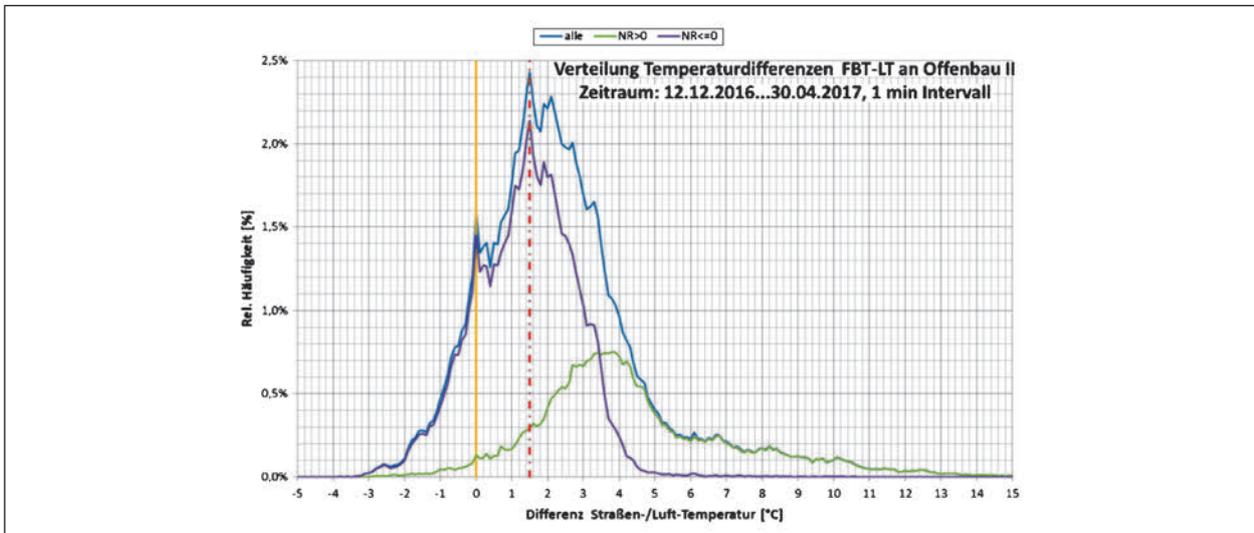


Bild 127: Verteilung der Differenz zwischen Straßentemperatur und Lufttemperatur bei negativer und positiver Strahlungsbilanz. Die rote gestrichelte Linie markiert einen geeigneten Grenzwert für das hilfswise Klassenkriterium zur Differenzierung der Ein- und Abstrahlungssituation für Stationen bei denen keine Strahlungsmessung vorhanden ist. Violette Kurve: Strahlungsbilanz negativ oder 0 (NR ≤ 0) also Abstrahlung. Grüne Kurve: Strahlungsbilanz positiv (NR > 0) das heißt Einstrahlung

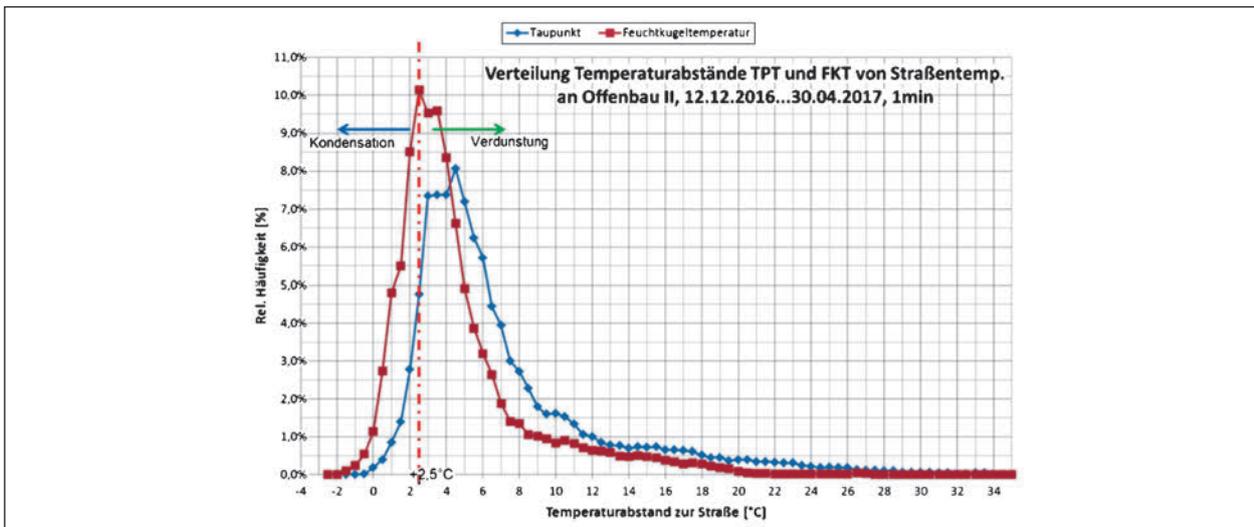


Bild 128: Verteilung der Differenzen zwischen Taupunkttemperatur und Feuchtigkeitstemperatur zu Straßentemperatur. Die rot gestrichelte Linie markiert einen geeigneten Grenzwert für die Differenzierung zwischen Kondensation und Verdunstung

die Entwicklung der Straßentemperatur hat. Dabei sind die Unterschiede am deutlichsten zwischen trockenem und mit allen anderen Arten von durch Bedeckung durch Wasser in allen Aggregationszuständen.

Für die Transformationsfunktion der Wasserfilmdicke kommen folgende Kriterien infrage:

1. Die Niederschlagssituation

Der Zusammenhang von Niederschlag und Wasserfilm ist natürlich offensichtlich. Dabei ist auch zu unterscheiden welche Art von Niederschlag fällt.

2. Die Evapo-Kondensation

Wettersituation, die Abtrocknung (durch Verdunstung oder auch Evaporation genannt) begünstigen oder eher zu Kondensation neigen, haben sicherlich einen Einfluss auf die Entwicklung der Wasserfilmdicke. Als ein hilfswises Kriterium für die Klassierung dieser Situation konnte die Taupunktdifferenz oder besser die Feuchttemperatur-Differenz identifiziert werden (siehe Bild 128). Die Feuchttemperatur oder Feuchtkugeltemperatur kann näherungsweise aus dem Mittelwert der Taupunkttemperatur und der Lufttemperatur bestimmt werden.

Wetterklassen für Straßentemperatur (FBT)					
WK (FBT)	SB od. FBT-LT		Fahrbahnzustand		
	SB < 0 od. (FBT-LT) ≤ 1,5 °C	SB > 0 od. (FBT-LT) > 1,5 °C	FBZ = trocken	FBZ = nicht trocken	
1	X		X		
2		X	X		
3	X			X	
4		X		X	
Wetterklassen für Wasserfilmdicke (WFD) und Taupunkttemperatur (TPT)					
WK (WFD)	Feuchttemp.-Abstand FBT-FKT		Niederschlag		
	(FBT-FKT) < 2,5 °C	(FBT-FKT) ≥ 2,5 °C	NA = kein	NA = Regen	NA = Schnee
1	X		X		
2		X	X		
3	X			X	
4		X		X	
5	X				X
6		X			X

SB = Strahlungsbilanz
 FBT-LT = Differenz zwischen Fahrbahntemperatur und Lufttemperatur
 FBT-FKT = Differenz zwischen Fahrbahntemperatur und Feuchtkugeltemperatur

Tab. 65: Definition der Wetterklassen für das statistische Streckeneigenschaftsmodell (Übertragungsfunktion)

	St2139	km		2,820	7,220	7,980	12,420
		RSeg_ID		20000142	20000362	20000400	20000622
Statistisches Transformationsmodell mit Wetterklassen	Straßentemperatur	BIAS	°C	- 0,1	- 0,1	- 0,2	- 0,2
		MAE	± °C	1,2	1	0,8	0,8
		STDDEV	± °C	1,5	1,3	1,2	1,0
	Taupunkttemperatur	BIAS	°C	0,2	0,3	0,1	- 0,2
		MAE	± °C	1,4	0,8	0,8	0,8
		STDDEV	± °C	2,0	1,2	1,2	1,1
	Wasserfilmdicke	BIAS	µm	- 104	- 149	- 123	- 128
		MAE	± µm	173	226	209	208
		STDDEV	± µm	273	304	297	281
„freies“ numerisches Straßenwettermodell GWC (ohne Straßendaten)	Straßentemperatur	BIAS	°C	- 2,2	- 1,4	- 1,2	- 1,5
		MAE	± °C	2,7	2,5	2,6	2,6
		STDDEV	± °C	2,4	3,0	3,3	3,5
	Wasserfilmdicke	BIAS	µm	198	52	86	31
		MAE	± µm	282	273	278	282
		STDDEV	± µm	500	444	462	431

Tab. 66: Ergebnisse der Fehleranalyse bei Anwendung des wetterklassierten Transformationsmodells am Beispiel der Streckensegmente der St2139 in der Winterperiode 2016/17. Im Vergleich die Ergebnisse der Fehler des numerischen Modells von Global Weather Corp. (GWC)

Für die Transformationsfunktion der Taupunkttemperatur wurde dieselbe Klassierung verwendet, wie für die Wasserfilmdicke, da auch hier Evapo-Kondensation und Niederschlag eine Rolle spielen.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Fehleranalyse bei der Anwendung des stat. Transformationsmodells mit Berücksichtigung der Wetterklassen dargestellt (siehe Tabelle 66). Im Vergleich sind dazu die Abweichungen des numerischen Straßenwettermodells von Global Weather Corp. (GWC) dargestellt.

Die Fehleranalyse ergibt wider Erwarten im statistischen Mittel nur einen sehr geringen Vorteil gegenüber der Transformationsfunktion über alle Wetterklassen. Die Streuungen bei der Wasserfilmdicke sind generell im Wesentlichen der Tatsache geschuldet, dass die mobilen (und auch stationären) Messwerte aus bekannten Gründen erhebliche Streuungen aufweisen.

In Kapitel 10 werden Wetterklassen und Streckenprofile aus meteorologischer Sicht noch genauer behandelt.

8.3.3 Wasserfilmdicken-Modell

Einige Anbieter haben bereits Modelle für die Wasserfilmdicke auf dem Straßenbelag entwickelt. Einige Anbieter, darunter auch der Deutsche Wetterdienst haben zwar für die Straßentemperatur ein Energiebilanz-Modell und liefern auch Straßenzustand, allerdings keine quantitative Angabe der Menge der Bedeckung. Die Wasserfilmdicke (Wasseräquivalent) ist aber für eine spätere Automation der Streumengen und auch für die Schätzung der Glättegefahr eine wichtige Größe.

Im Folgenden wird kurz ein Ansatz beschrieben, um aus den prognostizierten oder aktuell gemessenen Größen Niederschlagsintensität (Wasseräquivalent in mm/h), Belagtemperatur und Taupunkttemperatur oder auch der relativen Luftfeuchte, die Wasserfilmdicke auf dem Belag zu schätzen.

Das Modell ist so ausgelegt, dass keine konstruktiven Eigenschaften der Belagsoberfläche notwendig sind, da dies ohnehin für unterschiedliche Standorte sehr komplex und ungenau werden könnte. Das Modell ist sehr einfach ausgelegt und die quantitativen Parameter werden aus den archivierten Messgrößen über einen größeren Zeitraum, in dem entsprechend unterschiedliche Wettersituation vorkommen, am Standort durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt.

Das Modell zur Beschreibung des Verhaltens der Wasserfilmdicke in Abhängigkeit von Niederschlag und Temperaturen der Straße und der umgebenden Luft, sowie der Luftfeuchte, wurde bereits in mehreren Projekten angewendet. Die statistische Schätzung der Parameter des Modells aus den Messdaten liefert Hinweise auf die Streckeneigenschaften an der Messstelle.

Der Ansatz für die zeitdiskrete Differenzgleichung des Näherungs-Modells für die Wasserfilmdicke (WFD) zum Zeitschritt t in $[\mu\text{m}]$ lautet:

$$WFD_t = c_1 \cdot WFD_{t-1} + c_2 \cdot NI + c_3 \cdot (1 - RLF/100)$$

$$AR = 1 - c_1 \left[\frac{\mu\text{m}}{\mu\text{m} \cdot \text{min}} \right]$$

$$ZR = c_2 \left[\frac{\mu\text{m} \cdot \text{h}}{\text{mm} \cdot \text{min}} \right]$$

$$ET = c_3 \left[\frac{\mu\text{m}}{\% \cdot \text{min}} \right] \quad (\text{Gl. 20})$$

Die Parameter c_1 bis c_3 können aus den Messdaten durch multiple lineare Regression ermittelt werden.

Die Bestimmung der Parameter liefert auch näherungsweise die Streckeneigenschaften an der Messstelle in Bezug auf das Verhalten der Wasserfilmdicke.

Die zeitdiskrete Messreihe geht von einem Intervall $\Delta t = 1 \text{ min}$ aus.

AR ist ein Maß für die Abflussrate pro Zeitschritt und wiederum abhängig von der Wasserfilmdicke. Je höher die Wasserfilmdicke, desto höher die Abflussrate.

ZR ist die Zuflussrate pro Zeitschritt, die im Modell natürlich alleine von der Niederschlagsintensität (NI) in $[\text{mm/h}]$ abhängig ist.

ET ist die sog. Evapotranspirations-Rate und ist ein Maß für die Verdunstung bzw. Kondensation an der Oberfläche, welche näherungsweise vom Sättigungsdefizit der Luftfeuchte abgeleitet wird.

Am Beispiel Offenbau im Zeitraum zwischen 13.12.2016 bis 30.04.2017 ergeben sich nach multipler Regression folgende Parameter:

Abflussrate:	-0,0317,
Zuflussrate:	+3,0364,
Evapotranspiration:	1,2855.

In Bild 129 ist beispielhaft der Verlauf der Wasserfilmdicke des Modells im Vergleich mit der tatsächlich gemessenen wiedergegeben. Die Güte der Anpassung des Modells hängt natürlich von der Niederschlagsmessung und auch die Streuungen der Wasserfilmmessung am Standort ab, die ebenfalls sehr hoch sind. Wie man sieht wird die Höhe des Zuflusses bei Niederschlag noch besser modelliert als das Wasserfilmverhalten nach dem Niederschlag. Der von der Feuchte abgeleitete Parameter ist nur eine Hilfskonstruktion und gibt die Evapotranspirations-Vorgänge nur unvollständig wieder. Das Beispiel arbeitet mit Modellparametern, die nicht nach Wetterklassen getrennt ermittelt sind. Durch geeignete Wetterklassen kann das Modell so angepasst werden, dass zumindest die maximal bei einem Niederschlag erreichten Wasserfilmdicken mit guter Näherung abgeschätzt werden können. Was im Hinblick auf Streumengenentscheidungen am wichtigsten ist.

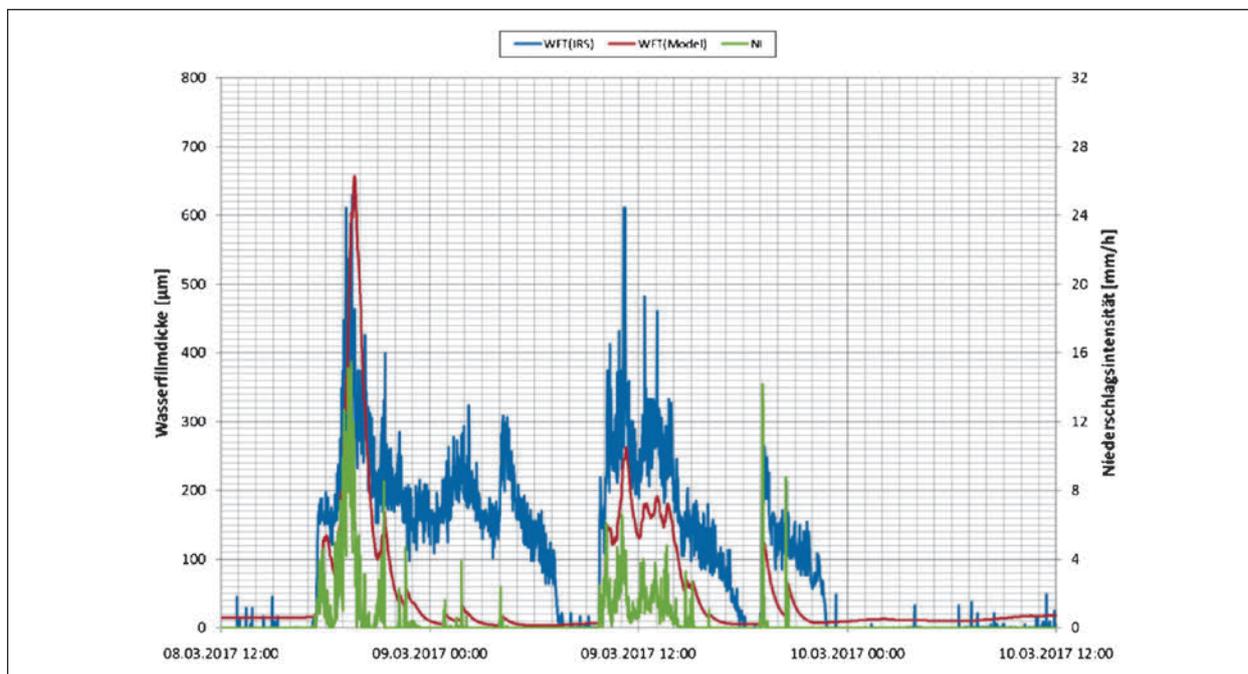


Bild 129: Beispiel-Auszug aus der über das Modell berechneten Wasserfilmdicke (rote Kurve) und der am Standort tatsächlich gemessenen Wasserfilmdicke (IRS31pro, blaue Kurve) an der Station Offenbau II A 9. Die Modellparameter wurden bestimmt aus den archivierten Messdaten im Zeitraum Winter 2016/17. Zusätzlich ist die gemessene Niederschlagsintensität dargestellt (grüne Kurve)

9 Validierung der Straßenwetterprognosen

9.1 Validierungsmethoden

9.1.1 Datenquellen

Messungen:
von SWS Stationen.

Vorhersagen:
Als Datengrundlage für diesen Bericht werden Simulationsdaten aus NEMS4 (NEMS = NOAA Environmental Modeling System) verwendet, ein zentraleuropäisches Modell mit einer räumlichen Auflösung von 4 km und einer zeitlichen Auflösung von 1h. Der Aggregationszeitraum ist auf Tagesbasis.

Obs (Messfahrten):
Mobile Daten (unregelmäßige Zeiträume).

9.1.2 Parameter

Temperatur:
Methoden = Bias, MAE, RMSE,

Windgeschwindigkeit:
Methoden = Bias, MAE, RMSE,

Feuchte:
Methoden = Bias, MAE, RMSE,

Strahlung:
Methoden = Bias, MAE, RMSE,

Niederschlagsmenge:
Methoden = Bias (Tag), MAE (Tag), RMSE (Tag),
Ereignisse, Heidke Skill Score (HSS),

Niederschlagsart:
Methoden = Ereignisse, Heidke Skill Score (HSS).

9.1.3 Validierungskoeffizienten

MAE

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - t_i| \quad (\text{GL. 21})$$

n = Anzahl der zu vergleichenden Werte

f = Vorhersage

t = tatsächliches Ergebnis

Der mittlere absolute Fehler (eng. mean absolute error) ist ein Maß dafür, wie nahe eine Vorhersage an dem tatsächlichen Ergebnis ist. Wie der Name

schon sagt, handelt es sich beim MAE um einen Mittelwert. Die Beträge der Differenzen zwischen Vorhersagen (f) und den tatsächlichen Ergebnissen (t) werden aufsummiert und danach durch ihre Anzahl (n) geteilt.

RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - t_i)^2} \quad (\text{Gl. 22})$$

n = Anzahl der zu vergleichenden Werte

f = Vorhersage

t = tatsächliches Ergebnis

Die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (eng. Root Mean Square Error) beschreibt wie der MAE die Abweichung einer Vorhersage (f) vom tatsächlichen Wert (t). Die Quadrate der Differenzen zwischen Vorhersage und tatsächlichem Wert werden aufsummiert und danach die Wurzel gezogen. Durch das Quadrieren fallen größere Differenzen zwischen Vorhersage und tatsächlichem Wert stärker ins Gewicht als beim MAE.

Standardabweichung

Standardabweichung beschreibt den Wert der Abweichung vom Mittelwert unter der Annahme, alle Werte entsprechen einer Normalverteilung, bei der immer ca. 68 % der Werte im Intervall von der Breite von zwei Standardabweichungen um den Mittelwert liegen.

Ereignisse

Die sog. Ereignisse beschränken sich auf Situationen, die mit Ja/Nein beantwortet werden können. Solche Fälle sind vor allem Niederschlagsereignisse, denn diese kann man einteilen in: „Es gibt Nie-

Vorhersage	Tatsächliches Ergebnis	Auswirkung
•		False Alarm
	•	Miss
•	•	Hit
		Correct Negative
• = 1 (Ja), leer = 0 (Nein)		

Tab. 67: Einteilung der Ereignisse

derschlag Ja/Nein“ und „Der Niederschlag fällt als Schnee Ja/Nein“.

False Alarm: Das Ereignis wurde von der Vorhersage mit 1 markiert, das tatsächliche Ergebnis war jedoch 0. Eine Falscheinschätzung der Vorhersage. Mögliches Beispiel: Vorhersage meldet Schneefall, doch die Temperaturen bleiben knapp über dem Gefrierpunkt.

Miss: Das Ereignis wurde von der Vorhersage mit 0 markiert, das tatsächliche Ergebnis war jedoch 1. Die Vorhersage hat ein Ereignis übersehen. Mögliches Beispiel: Vorhersage meldet keinen Schneefall, doch die Temperaturen sinken unter den Gefrierpunkt und es beginnt zu schneien.

Hit: Die Vorhersage hat ein Ereignis erkannt und richtig eingestuft. Mögliches Beispiel: Schneefall wurde korrekt vorhergesagt.

Correct Negative: Es findet kein Ereignis statt und die Vorhersage hat dies richtig vorhergesehen. Mögliches Beispiel: Regen wurde vorhergesagt und die Temperaturen blieben über dem Gefrierpunkt.

Heidke Skill Score (HSS)

Mithilfe von Skill Scores werden Vorhersagen mit sog. Referenzprognosen (Zufalls-, Persistenzprognosen oder langjähriges Mittel) verglichen (siehe Bild 130). Der Heidke Skill Score verwendet die Trefferrate als Mittel zur Qualitätsüberprüfung einer Prognose und wird durch folgende Formel beschrieben:

$$HSS = \frac{2(ad - bc)}{((a + c)(c + d) + (a + b)(b + d))} \quad (\text{Gl. 23})$$

Die Werte des HSS' variieren zwischen -1 und 1, wobei der Wert 1 eine perfekte Prognose, 0 gleich der Referenzprognose und ein negativer Wert eine Prognose die schlechter als die Zufallsprognose ist.

Bias

Als Bias bezeichnet man ein systematischer Fehler, welcher die Vorhersagen verzerrt. Es ist die Diffe-

Vorhergesagte Ereignisse	Gemessene Ereignisse		
	Ja	Nein	Summe
Ja	a	b	a+b
Nein	c	d	c+d
Summe	a+c	b+d	a+b+c+d=n

Bild 130: Eventeinteilung beim HSS

renz zwischen dem Erwartungswert der Vorhersage und der Messung B.

$$\text{Bias} = E(f) - E(t) \quad (\text{Gl. 24})$$

Mit Erwartungswert E einer Stichprobe x:

$$E(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x \quad (\text{Gl. 25})$$

MSE (auch RMSE)

Mit dem mittleren quadratischen Fehler (eng. Mean Squared Error) kann die Abweichung der Vorhersage zum tatsächlichen Wert berechnet werden. Ein geringer MSE bedeutet, dass sowohl der systematische Fehler (Bias) und die Streuung (Varianz V) der Vorhersagen gering sind.

$$\text{MSE} = \text{Bias}^2 + V(f) \quad (\text{Gl. 26})$$

9.1.4 Ort & Zeit

Stationen: Messungen an bestimmten Stellen, i. d. R. Glättemeldeanlagen (GMA) in stündlichen Intervallen, um ein einheitliches Format zusammen mit den stündlichen Vorhersagen zu ermöglichen. Hier werden folgende Vergleiche geführt:

- V1: Messung Station (MS) X Vorhersage an der Station (VS) – stündliche Intervalle,
- Strecke: Messungen auf der gesamten Strecke (Mobil), i. d. R. mit MARWIS zu bestimmten, nicht regelmässigen, Stunden. Hier werden folgende Vergleiche geführt:
 - V2.1: Messung Station (MS) X Messung Mobil (MM),
 - V2.2: Messung Mobil (MM) X Vorhersage „mobil“ an der Strecke (VSM).

9.2 Messdaten

9.2.1 Übersicht der Messdaten

Dieses Kapitel behandelt die Ergebnisse und Erkenntnisse, die im Verlauf des vorliegenden Projekts erarbeitet wurden. Diese sind vor allem für die weitere Planung relevant und zeigen wesentliche Ergebnisse und Problemfelder auf. Aus methodischen Gründen ist die Untersuchung der Vorhersage-Parameter beschränkt auf bestimmte Standorte. Die Auswertung beabsichtigt keine allgemeine meteorologische Aussagen, sondern eine Klassifika-

tion der Ergebnisse nach dem Arbeitsschema (siehe Bild 1), als Grundlage für Empfehlungen in der weiteren Arbeit.

Temperatur

Momentaner Stundenwert bei xx:00 Uhr ohne Aggregation wird verwendet. Sollte nur die relative Luftfeuchtigkeit angegeben sein, wurde die Taupunkttemperatur mittels folgender Formel und $c_1 = 6.1078$ berechnet:

$$T_d = \frac{237.3 \cdot e^{\frac{\varphi}{100} \cdot c_1 \cdot 10^{\frac{7.5 \cdot T}{237.3 + T}}}}{7.5 - e^{\frac{\varphi}{100} \cdot c_1 \cdot 10^{\frac{7.5 \cdot T}{237.3 + T}}}} \quad (\text{Gl. 27})$$

Windgeschwindigkeit

Mittelwert der vergangenen Stunde wird bei xx:00 Uhr eingesetzt.

Windrichtung

Mittelwert der vergangenen Stunde wird bei xx:00 Uhr eingesetzt.

Niederschlagsmenge

Der gesamte Niederschlag der vergangenen Stunde wird zusammengezählt und als Summe bei xx:00 Uhr eingesetzt.

9.2.2 Verfügbarkeit der Daten 2015/16

Die unterschiedlichen Datenformate (csv, txt, BUFR u. a.), Zeitstempel, Parameter-Einheiten u. a. m. stellen für die Aufbereitung der Daten eine erhebliche Erschwernis dar. Dies ist bei der Einrichtung operationeller Systeme zu berücksichtigen.

Eine zu Beginn des Projekts nicht erkennbare Problematik wird in Tabelle 68 sichtbar: An keinem Standort mit GMA erreichen die Messdaten mehr als 96 % Vollständigkeit auf Stundenbasis, an manchen Standorten (Predigtstuhl) erreichen sie nur 56 %. Dies schränkt die Möglichkeiten der Validierung ein, da sowieso nur relativ wenige Standorte zum Vergleich bereitstehen.

Eine weitere, in diesem Umfang nicht erwartete Problematik liegt in der Genauigkeit der Messungen. Die teilweise auftretenden Fehler sind meist

Code	Standort GMA	GMA (Messungen)	-	%	Prognose DWD	-	%	Prognose meteoblue	-	%
H746	Moitzfeld AS*	1.11.2015- 22.3.2016		95 %	23.11.2015- 03.5.2016	(fl)	98 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
H754	Engelskirchen EM*	1.11.2015- 22.3.2016		95 %	23.11.2015- 3.5.2016	(fl)	98 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
H765	Wiehltalbruecke*	1.11.2015- 22.3.2016		95 %	23.11.2015- 3.5.2016	(fl)	98 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
H774	Reichshof*	1.11.2015- 22.3.2016		95 %	23.11.2015- 3.5.2016	(fl)	98 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
H775	Eckenhagen*	1.11.2015- 22.3.2016		63 %	23.11.2015- 3.5.2016	(fl)	98 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
P338	Allersberg*	25.11.2015- 18.4.2016		96 %	22.11.2015- 28.4.2016	(fl?)	97 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
P423	Offenbau*	25.11.2015- 18.4.2016		96 %	22.11.2015- 28.4.2016	(fl?)	97 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
P438	Gelbensee*	25.11.2015- 18.4.2016		96 %	22.11.2015- 28.4.2016	(fl?)	97 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
P465	Zinzenzell	14.11.2014- 30.4.2016	(fl)	97 %	22.11.2015- 28.4.2016	(fl?)	95 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
P469	Am Pfahl	11.11.2014- 30.4.2016	(fl)	97 %	22.11.2015- 28.4.2016	(fl?)	95 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
P471	Predigtstuhl*	12.11.2014- 30.4.2016	(fl)	56 %	22.11.2015- 28.4.2016	(fl?)	95 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
P473	Kalteck	12.11.2014- 30.4.2016	(fl)	83 %	22.11.2015- 28.4.2016	(fl?)	95 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %
P484	Mais	12.11.2014- 30.4.2016	(fl)	k. A.	22.11.2015- 28.4.2016	(fl)	95 %	01.10.2015- 22.5.2016	(fl)	100 %

Anmerkungen: Code = Kennung der Station; (fl) = fortlaufend; ? = Daten konnten nicht vollständig ausgewertet.
 Quellen: GMA (Glättemeldeanlage), markiert mit *, Daten stündlich archiviert und aggregiert; DWD = Vorhersage des Deutschen Wetterdienstes für GMA; meteoblue = Vorhersage von meteoblue für am nächsten an der GMA gelegene Position. % = Datenverfügbarkeit im angegebenen Zeitraum

Tab. 68: Verfügbarkeit der Mess- und Prognose-Daten an allen Mess-Standorten (GMA) 2015/2016

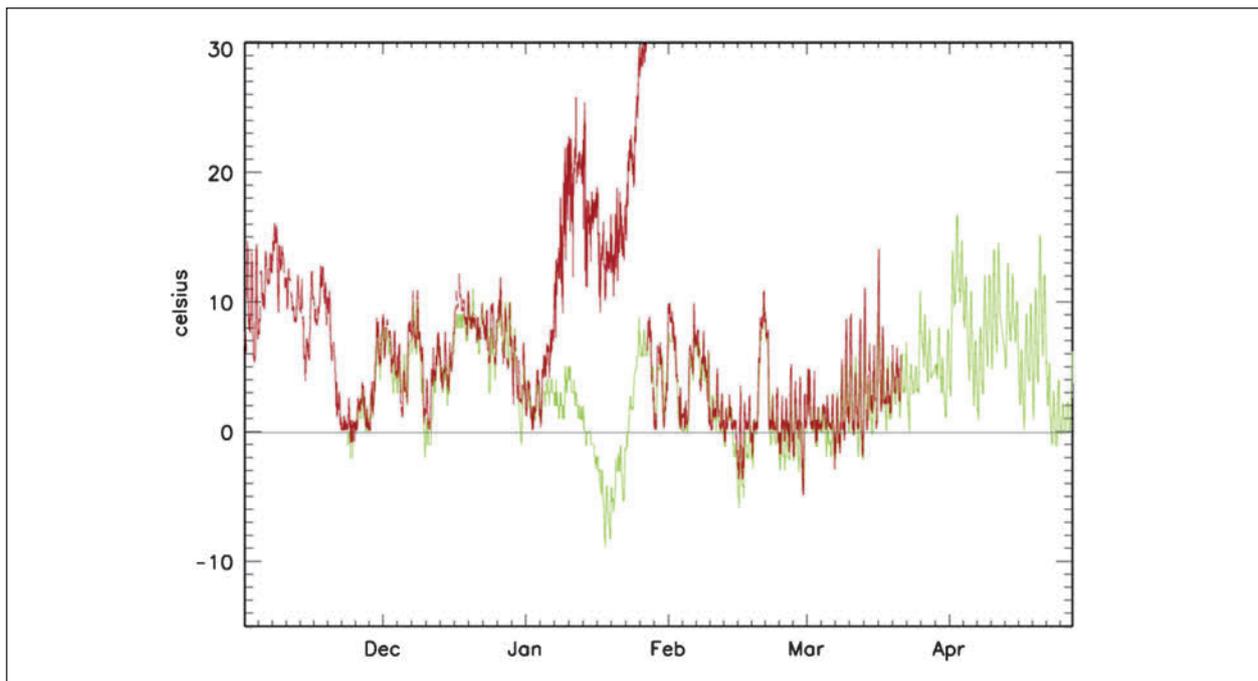


Bild 131: Lufttemperatur in 2 m Höhe zwischen November 2015 und April 2016 am Standort Eckenhagen (H775). Messung in Rot, Simulation des DWD (1-23h in die Zukunft) in Grün

stations-spezifisch und zeitlich begrenzt, und wurden somit erst bei der Betrachtung einzelner Stationen sichtbar. So wurden am Standort Eckenhagen (H775) ab Mitte Januar 2016 Temperaturen zwischen 10 und 30 °C gemessen. Ein Vergleich mit der gleichzeitigen Prognose (Bild 131) zeigt, dass dies nicht plausibel ist. Ebenso zeigen Messungen am Standort Wiehthalbrücke (H765) weniger voll-

ständige Temperaturmessungen (< 70 %) als für andere Parameter (Bild 132).

An den Standorten der A 4 lagen keine Messwerte für Niederschlag vor.

An manchen Standorten waren die Messungen nahezu lückenlos und plausibel (Bild 132 und Bild 133).

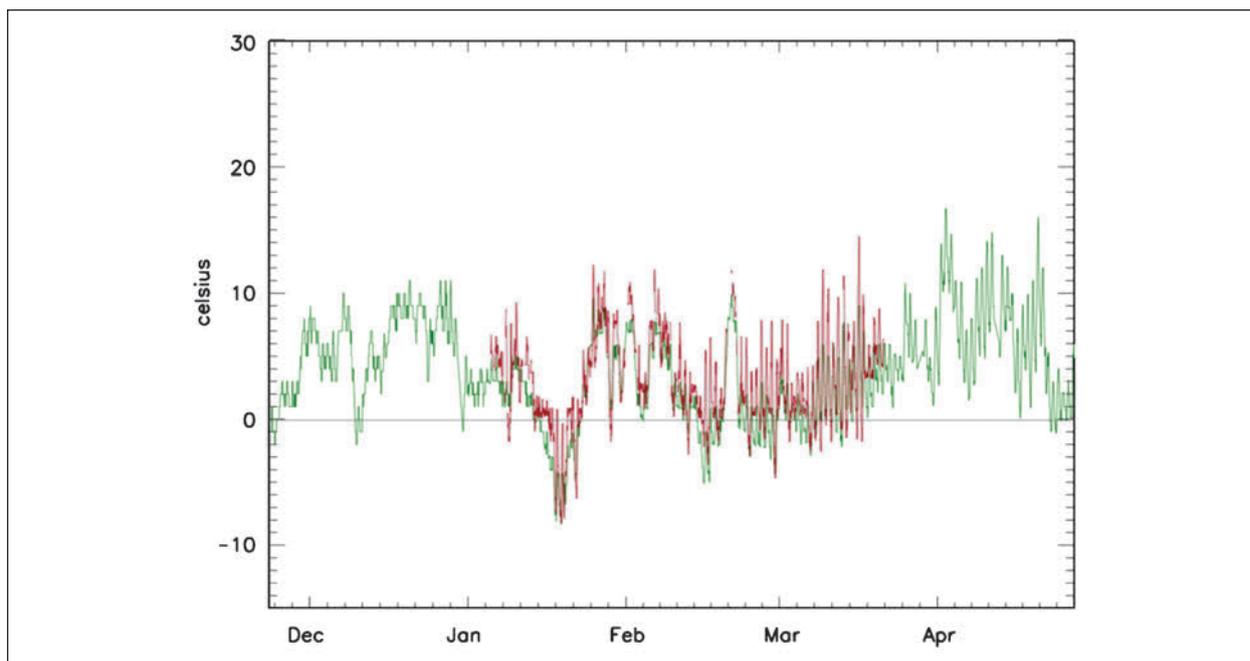


Bild 132: Lufttemperatur in 2 m Höhe zwischen Dezember 2015 und April 2016 am Standort Kalteck (P471). Messung in Rot, Simulation von DWD (1-23h in die Zukunft) in Grün

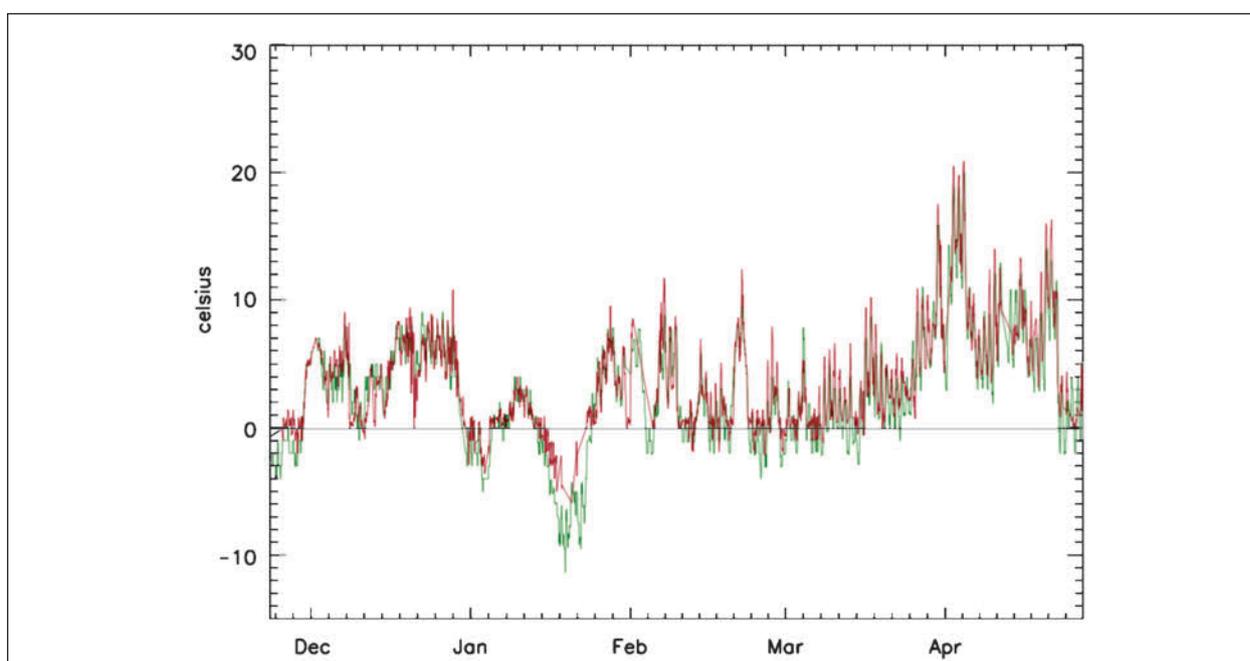


Bild 133: Lufttemperatur in 2 m Höhe zwischen Dezember 2015 und April 2016 am Standort Kalteck (P471). Messung in Rot, Simulation von DWD (1-23h in die Zukunft) in Grün

9.2.3 Verfügbarkeit der Daten 2016/17

Für 2017 wurde nur auf die Stationen in unmittelbarer Nähe der Strecken zurückgegriffen, da:

- Die entfernteren Stationen keine brauchbaren Daten für eine Streckenprognose liefern
- Nur für diese Stationen Vorhersagen aller Anbieter vorliegen;
- Der Vergleich von verschiedenen Vorhersagen an wenigen Stationen i. d. R. repräsentativ ist.

Die Stationen sind in Tabelle 69 aufgeführt.

Code	Standort GMA	Zeitraum	Messdaten [%]
P471	Predigtstuhl*	01.10.2016-30.4.2017	95
P423	Offenbau*	13.12.2016-30.4.2017	99
P438	Gelbelsee*	13.12.2016-30.4.2017	50
P338	Allersberg*	13.12.2016-30.4.2017	50
P	A4*	13.12.2016-30.4.2017	0

Tab. 69: Verfügbarkeit der Mess- und Prognose-Daten an allen Mess-Standorten (GMA) 2016/2017

9.2.4 Verfügbarkeit der Daten: Schlussfolgerungen

Die Problematik der fehlenden oder zweifelhaften Messdaten von Stationen lässt sich auch bei den Fahrbahn-Parametern feststellen. Dies ist ein bekanntes Phänomen, das daher nicht weiter erläutert wird. An ausgewählten Standorten werden Vergleiche mit mobilen Messgeräten gemacht (siehe Kapitel 7.)

Ursachen für die Messfehler und -lücken sind nach den heutigen Erkenntnissen:

- Externe Einwirkung auf die Station: Abdeckung, Verschmutzung von Sensoren oder ähnliches;
- Ausfall bei der Datenerfassung in der Station: dafür kommen Stromversorgung, Datenspeicherung und Sensorfehlfunktionen infrage;
- Ausfall bei der Datenübertragung von der Station zum zentralen Server: dies wird wiederholt synchron an mehreren Stationen von derselben Strecke beobachtet, und dürfte auf Fehler im Übertragungsnetz hinweisen;
- Probleme bei der Speicherung auf dem zentralen Server: möglich, aber weniger wahrscheinlich.
- Ausfall bei der Datenübertragung vom zentralen Server zum Projektserver: dieses war für wenige Fehler verantwortlich, da dieser Fehler meist synchron bei allen Stationen auftreten würde.
- Fehler bei der Datenspeicherung auf dem Projekt-Server: dies ist weniger wahrscheinlich, da die Daten nicht verändert werden und Datenausfälle nicht vorgekommen sind.

Die Problematik ist in der Frequenz so hoch, dass eine Prozesskette und mögliche Lösungen, welche Stationsdaten im Live-Betrieb benötigt, hiervon streckenabhängig erheblich betroffen ist. Aus den im Rahmen des Projektes erhobenen Messdaten können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Messdaten: die Anzahl und Vollständigkeit der Messdaten reicht (trotz Messfehler und Datenlücken) für eine punktbezogene Bewertung der Vorhersagen aus.
2. Eine stationsbasierte Vorhersage (MOS) auf der Basis von Messdaten wird nur an Standorten mit mehr als 90 % Messdaten zu signifikanten Verbesserungen führen, aber nicht aus die restliche Strecke ableitbar sein.
3. Messdaten: die Anzahl und Vollständigkeit der Messdaten reicht (wegen häufiger Messfehler und Datenlücken) für eine Steuerung einer streckenbezogenen Vorhersagen im Live-Betrieb nicht aus. Dafür müssten geeignete Korrektur- oder Vorbeugemaßnahmen für und Erkennung und Beseitigung von Messlücken und -Fehlern getroffen werden.
4. Für eine genaue Beurteilung der Messgenauigkeit von mobilen Sensoren ist ein genauere Prüfung der Stations-Messdaten oder ggf. eine andere Eichung nötig.

Diese Schlussfolgerungen stellen die Machbarkeit des Projektes nicht infrage, erfordern jedoch geeignete, bzw. alternative Maßnahmen.

9.3 Validierungsergebnisse

9.3.1 Wetterprognose (Modelle): Vergleich mit Stationsmessungen 2015/16

Für Prognosen lagen bis Ende März 2016 folgende Datensätze vor:

1. DWD, mit 95 % – 98 % vorliegender Prognose, für die Stunden 1-24,
2. meteoblue, mit 100 % vorliegender Prognose, für die Stunden 1-24,
3. INRIX, mit ca. < 10 % vorliegender Prognose, für die Stunden 1-12,
4. TELVENT, mit < 10 % vorliegender Prognose, für die Stunden 1-24.

Für die weiteren Vergleiche wurden nur die 2 weitgehend vollständigen Prognose-Datensätze heran-

gezogen. Die anderen Prognosen erlauben mit weniger als 10 % verfügbarer Daten im Winterhalbjahr noch keine Auswertung. Diese folgt in der Saison 2016/17.

Die Vorhersagen wurden verglichen für die Parameter Niederschlagsmenge, Luft- und Taupunkt-Temperatur. Erwartungsgemäß liegen die Fehler (MSE) im flachen Gelände (A 4) tiefer als im Hügelland (A 9), und an Brücken (z. B. Wiehltalbrücke), und am höchsten an der St2139 (Predigtstuhl). Diese Tendenz zeigt sich bei allen Parametern.

Der Vergleich der beiden Vorhersage-Quellen zeigt für Luft- und Taupunkt-Temperatur etwas bessere Ergebnisse bei den Vorhersagen von meteoblue im Vergleich zu DWD. Der Vorteil kam v. a. durch einen geringeren BIAS zustande, was der Höhen-Anpassung im hochaufgelösten numerischen Modell geschuldet sein könnte.

BIAS		DWD			meteoblue		
Code	Standort	Temp	TP	NS (Menge)	Temp	TP	NS (Menge)
H746	Moitzfeld AS	- 0,3	2,1		- 0,1	0,3	
H754	Engelskirchen EM	0,3	0,5		0,0	0,1	
H765	Wiehltalbruecke	- 0,7	- 2,0		- 0,3	- 0,3	
H774	Reichshof	- 0,3	- 4,3		- 0,5	- 4,7	
H775	Eckenhagen	3,7	4,1		2,6	3,0	
P338	Allersberg	0,3	0,8	0,0	- 0,4	0,3	0,0
P423	Offenbau	0,9	1,5	0,2	0,4	1,4	0,0
P438	Gelbelsee	0,7	2,1	0,0	0,3	1,8	0,0
P465	Zinzenzell	- 0,5	0,6	- 0,1	0,5	0,6	- 0,1
P469	Am Pfahl	0,0	0,1	- 0,1	- 0,2	- 1,8	0,0
P471	Predigtstuhl	0,8	0,5	- 0,1	0,9	0,6	- 0,3
P473	Kalteck	1,7	1,8	- 0,1	- 1,0	0,2	- 0,1
Maxima		3,7	4,1	0,2	2,6	3,0	0,0
Mittelwerte		0,6	0,6	0,0	0,2	0,1	- 0,1
Minima		- 0,7	- 4,3	- 0,1	- 1,0	- 4,7	- 0,3
MSE		DWD			meteoblue		
Code	Standort	Temp	TP	NS (Menge)	Temp	TP	NS (Menge)
H746	Moitzfeld AS	2,1	2,1		1,3	1,1	
H754	Engelskirchen EM	2,2	2,1		1,2	1,0	
H765	Wiehltalbruecke	3,9	3,9		1,3	1,3	
H774	Reichshof	2,0	6,2		1,3	6,1	
H775	Eckenhagen	2,1	2,4		1,1	1,2	

Tab. 70: BIAS, MAE und RMSE der Vorhersagen von DWD und meteoblue für Lufttemperatur (Temp), Taupunkt (TP) und Niederschlag (NS) an allen Mess-Standorten (GMA) für Wintersaison 2015/16 (nur Zeiträume und Stationen mit gültigen Messdaten)

MSE		DWD			meteoblue		
Code	Standort	Temp	TP	NS (Menge)	Temp	TP	NS (Menge)
P338	Allersberg	3,7	2,8	0,1	2,1	1,9	0,1
P423	Offenbau	3,7	3,0	0,1	2,2	2,3	0,1
P438	Gelbelsee	3,5	3,2	0,1	2,2	2,5	0,1
P465	Zinzenzell	2,2	1,8	0,1	3,4	2,8	0,1
P469	Am Pfahl	3,8	2,9	0,2	3,9	3,9	0,1
P471	Predigtstuhl	4,6	3,9	0,1	4,7	4,1	0,3
P473	Kalteck	4,2	3,8	0,2	5,3	5,2	0,2
Maxima		4,6	6,2	0,2	5,3	6,1	0,3
Mittelwerte		3,2	3,2	0,1	2,5	2,8	0,1
Minima		2,0	1,8	0,1	1,1	1,0	0,1
RMSE		DWD			meteoblue		
Code	Standort	Temp	TP	NS (Menge)	Temp	TP	NS (Menge)
H746	Moitzfeld AS	2,9	2,9		1,6	1,4	
H754	Engelskirchen EM	2,9	2,9		1,5	1,3	
H765	Wiehltalbruecke	5,0	4,8		1,6	1,8	
H774	Reichshof	2,7	7,2		1,6	7,2	
H775	Eckenhagen	2,9	5,5		1,4	4,7	
P338	Allersberg	4,7	3,6	0,2	2,8	2,6	0,3
P423	Offenbau	4,6	3,8	0,2	2,9	3,0	0,3
P438	Gelbelsee	4,4	4,1	0,2	3,0	3,2	0,3
P465	Zinzenzell	3,1	2,4	0,2	4,4	3,6	0,4
P469	Am Pfahl	4,7	3,8	0,3	5,1	4,9	0,3
P471	Predigtstuhl	6,0	5,0	0,3	6,1	5,4	0,7
P473	Kalteck	5,5	4,9	0,4	6,4	6,3	0,6
Maxima		6,0	7,2	0,4	6,4	7,2	0,7
Mittelwerte		4,1	4,2	0,3	3,2	3,8	0,4
Minima		2,7	2,4	0,2	1,4	1,3	0,3

Tab. 70: Fortsetzung

Ein Beispiel einer guten Vorhersage für Temperatur zeigt Bild 134 (Reichshof): die Kurven von Messung und Vorhersage decken sich oft und fast alle Frostereignisse werden vorhergesagt. In Zinzenzell (Bild 135) ist der BIAS höher: dort liegen die Temperatur-Vorhersagen etwas zu hoch, zudem sind auch höhere Abweichungen von der Messung zu beobachten als in Reichshof (A 4).

Eine Stations-Anpassung (MOS) könnte den BIAS reduzieren, erfordert jedoch komplette Messdaten. Die zu erwartende Verringerung des Temperaturfehlers durch MOS beträgt ca. 20 – 40 % des Modell-Fehlers. Dies wäre v. a. im hügeligen Gelände nötig, um die Vorhersagen für Temperatur auch nur

annähernd in den Bereich zu bringen, in dem die Fehler für eine lokale Behandlung vertretbar sind. Angestrebt werden hier MAE-Werte von unter 2 °C. Solche Werte werden von der meteoblue – Vorhersage nur an 5 Standorten und von der DWD – Vorhersage an keinem der 12 Standorten erreicht.

Für Niederschlagsmenge waren die DWD-Vorhersagen etwas besser als die von meteoblue. Dies dürfte an einer besseren Initialisierung der DWD Modelle liegen, die für Mitteleuropa mit wesentlich mehr Messdaten beschickt werden, als die globalen Modelle, die dem NEMS (siehe Glossar) von meteoblue zugrunde liegen.

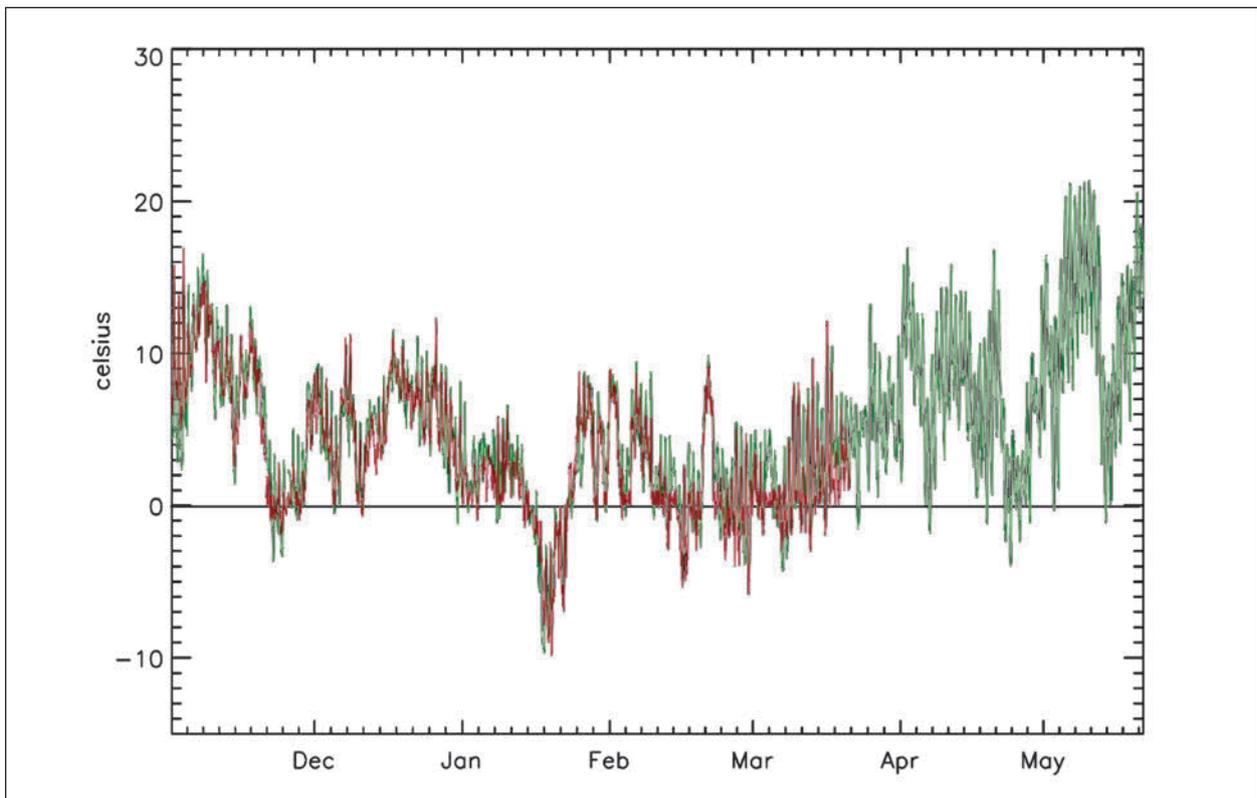


Bild 134: Lufttemperatur in 2 m Höhe zwischen Dezember 2015 und April 2016 am Standort Reichshof (H774). Messung in Rot, Simulation von meteoblue (1-23h in die Zukunft) in Grün

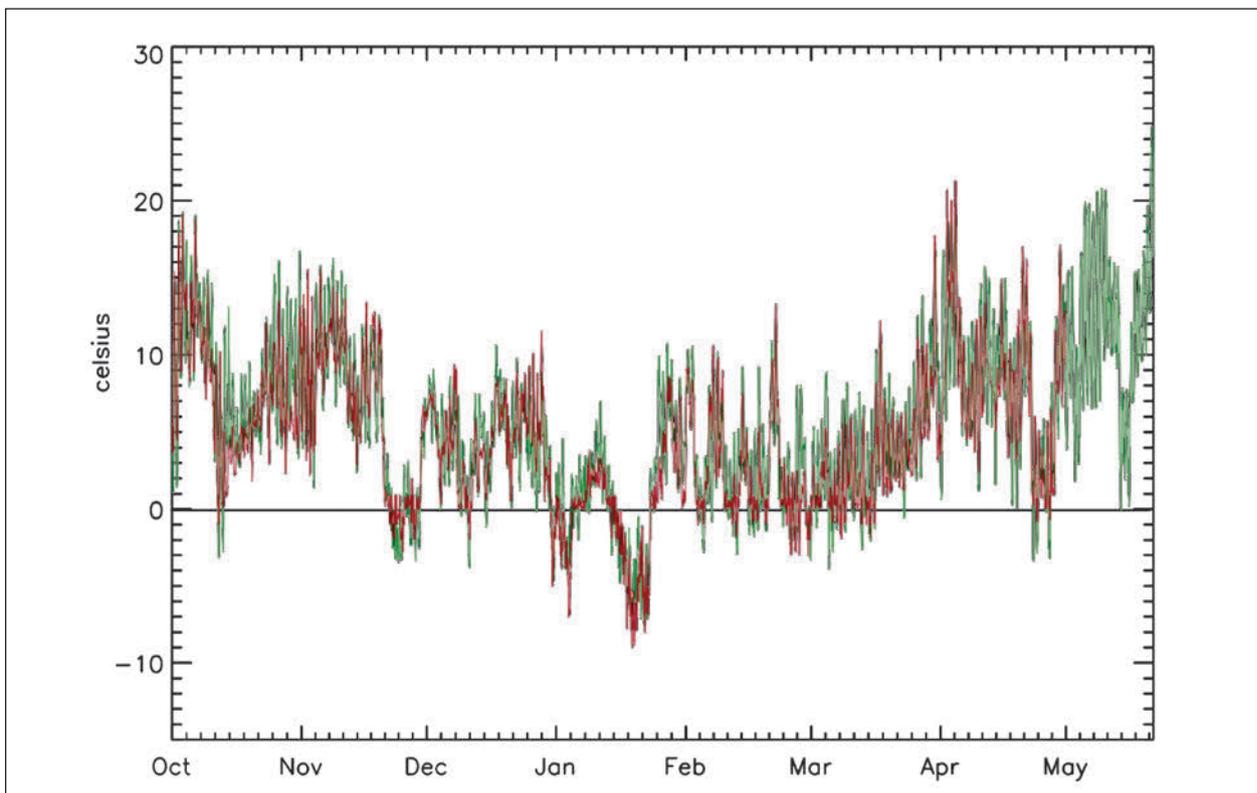


Bild 135: Lufttemperatur in 2 m Höhe zwischen Dezember 2015 und April 2016 am Standort Zinzenzell (P465). Messung in Rot, Simulation von meteoblue (1-23h in die Zukunft) in Grün

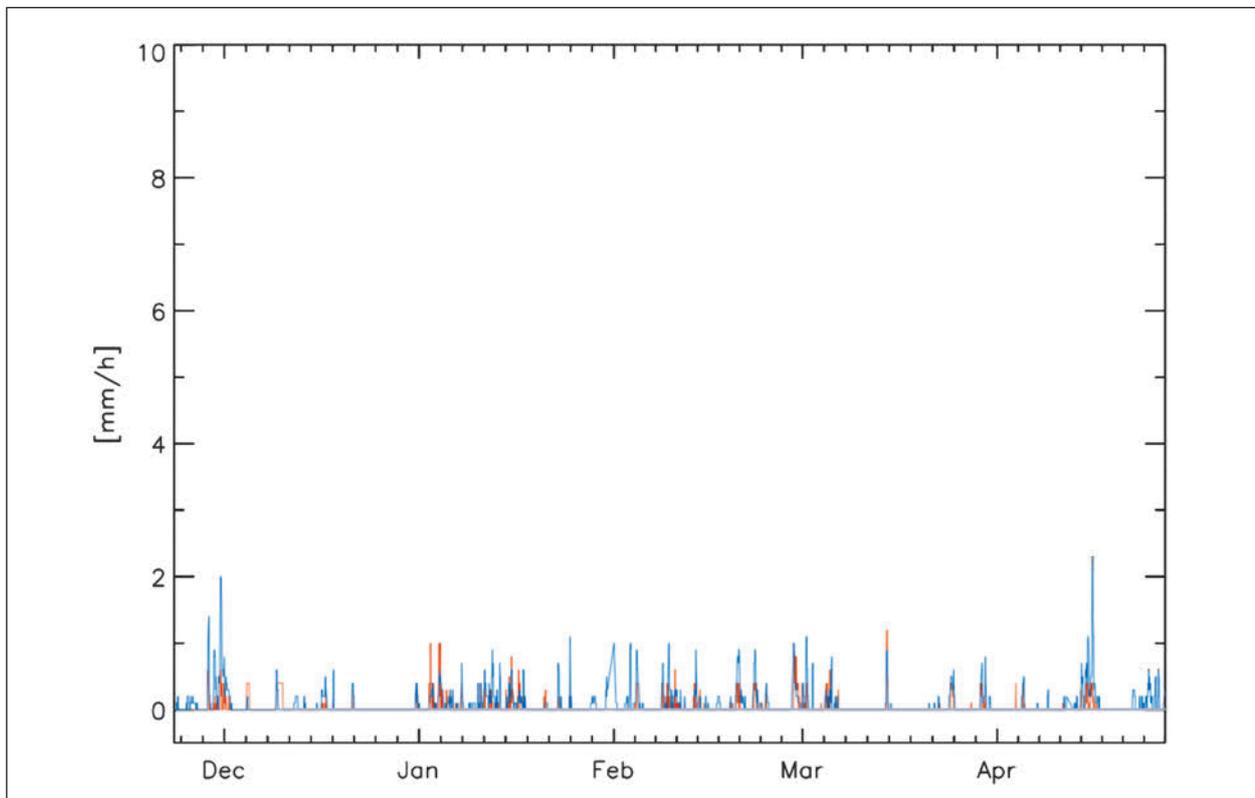


Bild 136: Niederschlagsmenge zwischen Dezember 2015 und April 2016 am Standort Allersberg (P338). Messung in Orange, Simulation von DWD (1-23h in die Zukunft) in Blau

In Allersberg (A9), konnte eine bessere Vorhersage der Niederschlagsmenge erzielt werden (siehe Bild 136). Trotzdem wurden zu häufig Niederschläge vorhergesagt (ca. 50 % Fehlalarme auf Stundenbasis), die zu Fehlwarnungen geführt hätten. Dies zeigt die Schwierigkeiten in der stundengenauen Vorhersage von Niederschlägen.

Eine detailliertere Validierung der Vorhersagen auf Ereignisse und Niederschlagsarten (Schnee, Regen) ist erst nach eingehender Qualitätsprüfung sinnvoll, und für dieses Projekt aus folgenden Gründen nicht relevant:

1. Die wesentlichen Entscheidungen erfolgen auf der Strecke, nicht an einem einzelnen Ort.
2. Die Niederschlagsmengen variieren innerhalb von wenigen Kilometern Entfernung teils erheblich.
3. Die mobilen Messungen verschiedener Fahrten unterschieden sich erheblich, was auf deutliche Unterschiede in der Wasserfilmdicke schließen lässt (siehe u. a. Kapitel 8).

9.3.2 Wetterprognose (Modelle): Vergleich mit Stationsmessungen 2016/17

Für Prognosen lagen bis Ende April 2017 folgende Datensätze vor:

1. DWD, mit 95 % – 98 % vorliegender Prognose, für die Stunden 1 – 24;
2. meteoblue, mit 31 – 86 % vorliegender Prognose, für die Stunden 1 – 24;
3. INRIX, mit ca. 45 % vorliegender Prognose, für die Stunden 1 – 12;
4. TELVENT/DTN, mit 85 – 99.9 % vorliegender Prognose, für die Stunden 1 – 24;
5. FORECA mit 33 % – 85 %, mit 8 – 99.9 % vorliegender für die Stunden 1 – 24.

Die Daten sind aufgeführt in Tabelle 71.

Methodik

Für den Vergleich der Prognose-Anbieter wurden die GMA auf der A9 und der St2139 aufgrund der gemeinsamen Verfügbarkeit und der fast vollständigen Zeitserien ausgewählt.

Code	Standort GMA	Zeitraum	Messdaten [%]	DWD [%]	INRIX [%]	DTN [%]	FORECA [%]	meteoblue_ [%]
P471	Predigtstuhl*	01.10.2016-30.4.2017	95,0	99,9	99,9	84,4	33,5	31,7
P423	Offenbau*	13.12.2016-30.4.2017	99,0	99,9	95,8	85,1	45,7	43,6
P438	Gelbelsee*	13.12.2016-30.4.2017	48,0	99,9	n. a.	85,1	45,7	43,6
P338	Allersberg*	13.12.2016-30.4.2017	0	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
P___	A 4*	13.12.2016-30.4.2017	0	n. a.	0	0	0	n. a.

Anmerkungen:
Code = Kennung der Station; Quellen: GMA (Glättemeldeanlage), markiert mit *, Daten stündlich archiviert und aggregiert
% = Verfügbarkeit von Temperaturmessungen
n. a. = Nicht anwendbar, d. h. Vorhersagen verfügbar, aber keine ausreichenden Messungen
INRIX = Vorhersage von INRIX für GMA
DWD = Vorhersage des Deutschen Wetterdienstes für GMA
DTN = Vorhersage von DTN für GMA
FORECA = Vorhersage von FORECA für das am nächsten an der GMA gelegene Straßensegment
meteoblue = Vorhersage von meteoblue für am nächsten an der GMA gelegene Position
% = Durchschnittliche Datenverfügbarkeit im angegebenen Zeitraum, die Verfügbarkeit ist parameterabhängig, jedoch sind keine nennenswerten Differenzen der Gesamtverfügbarkeit erkennbar

Tab. 71: Verfügbarkeit der Mess- und Prognose-Daten an allen Mess-Standorten (GMA) 2016/2017

Für den Vergleich von den Anbietern war es wichtig, nur die gemeinsame Schnittmenge der Parameter zur verwenden, die gleichzeitig gemessen und vom jeweiligen Vorhersageanbieter zur Verfügung gestellt hat. Diese Einschränkung ist nötig, damit die Ergebnisse nicht durch günstige Wetterlagen während der Lieferung durch einen einzelnen Anbieter verfälscht werden (siehe auch Kapitel 9.4.2).

Um die Validierung der Vorhersagen an den ausgewählten Stationen durchzuführen, wurde der Startpunkt für jeden Tag um jeweils 00:00 gewählt und davon ausgehend ein Vorhersagehorizont von bis zu 24 Stunden abgedeckt (erste Vorhersagewerte um 01:00 und der letzte Wert um 00:00 des nächsten Tages). War für den Startpunkt kein oder ein grob fehlerhaftes Vorhersage-File vorhanden, so wurde der ganze Tag aus der Datenbank des Anbieters entfernt. Dies dient dazu, einen möglichst fairen Vergleich (gleicher Vorhersagezeitpunkte) zu gewährleisten. Waren für eine bestimmte Stunde die Messwerte der GMA nicht verfügbar, wurde diese Stunde bei allen Anbietern entfernt (ohne die Zahl für ihre jeweilige Verfügbarkeit zu verringern).

Für die einzelnen zu validierenden Parameter Temperatur (Luft- und Oberflächen-) und Wasserfilmdicke (resp. Niederschlag) wurde für Anbieter, welche eine höhere zeitliche Auflösung als eine Stunde lieferten, folgende Aggregation angewendet:

- Temperatur (beide): Momentaner Wert der jeweiligen vollen Stunde,
- Wasserfilmdicke: Mittel der letzten Stunde,

- Niederschlag: Summe der letzten Stunde.

Die Validierung der Vorhersagen erfolgte auf stündlichen Werten für den in Tabelle 71 festgehaltenen Zeitraum und anhand typischer statistischen Kenngrößen: maximaler absoluter Fehler (AE), mittlerer absoluter Fehler (MAE), Root Mean Square Error (RMSE) und dem systematischen Fehler (BIAS). Da die räumliche Auflösung der Anbieter verschieden ist, und nicht alle direkt für die GMA einen Prognosepunkt zur Verfügung stellen konnten, wurde in diesen Fällen der nächstgelegene verfügbare Vorhersagepunkt verwendet (insofern sinnvoll; es wurden keine Quervergleiche zwischen St2139 und A9 vorgenommen). Neben dem direkten Parametervergleich (gemessene Lufttemperatur mit vorhergesagter Lufttemperatur und gemessener Oberflächentemperatur und vorhergesagter Oberflächentemperatur) wurde zusätzlich ein Quervergleich zwischen gemessener Oberflächentemperatur und vorhergesagter Lufttemperatur gemacht, um zu testen, welcher Vorhersageparameter sich besser zur Vorhersage der Oberflächentemperatur eignet. Zusätzlich dient dieser Vergleich einer ersten Abschätzung, mit welchen Unsicherheiten zu rechnen sind, sollte in einem späteren Schritt aus der Prognose der Lufttemperatur die Oberflächentemperatur abgeleitet werden.

Ergebnisse

Die Ergebnisse werden nach Parameter geordnet präsentiert. Für den Vergleich der Prognose-Anbieter wurden die GMA auf der A 9 und der St2139 auf-

AT vs. AT (°C)					
Größen	DWD	DTN	FORECA	GWC	meteoblue
BIAS	- 0,50	2,40	0,60	- 2,30	- 1,20
MAE	6,90	5,40	7,20	6,30	8,20
RMSE	8,60	6,80	8,80	7,90	9,50
AT vs. RT (°C)					
Daten	DWD	DTN	FORECA	GWC	meteoblue
BIAS	- 3,00	3,60	- 1,80	- 4,70	- 3,60
MAE	8,30	6,80	9,60	6,00	7,40
RMSE	10,60	8,60	11,80	7,60	8,80
TD vs. TD (°C)					
Daten	DWD	DTN	FORECA		meteoblue
BIAS	0,80	2,60	- 0,60		0,50
MAE	4,80	5,00	8,30		7,70
RMSE	6,10	6,40	9,50		9,30
RT vs. RT (°C)					
Daten	DWD	DTN	FORECA	GWC	
BIAS	- 5,80	1,20	0,80	- 2,00	
MAE	7,70	7,50	9,10	7,90	
RMSE	10,00	9,40	11,40	10,00	
WFH (µm)					
Größen			FORECA		
BIAS			- 129,80		
MAE			132,00		
RMSE			133,80		
AT = Luft- Temperatur; RT = Straßen- Temperatur; TD = Taupunkt- Temperatur; WFH = Wasserfilmdicke [µm], PR = Niederschlag. Farben: grün = beste Vorhersage; gelb = zweitbeste Vorhersage. Prognosehorizont: 24 h, 1 h Werte.					

Tab. 72: Ergebnisse der Vorhersage-Validierung am Mess-Standort Offenbau (P423) 2016/2017

grund der gemeinsamen Verfügbarkeit und der fast vollständigen Zeitserien ausgewählt (siehe Tabelle 72 bzw. Tabelle 73). Die Abweichungen sind deutlich höher als bei Messungen, liegen jedoch im üblichen Bereich von Temperatur-Vorhersagen mit einem Prognosehorizont von 24 h und 1 h Auflösung für Standorte im Gelände, die gekennzeichnet sind durch sehr unterschiedliche Höhen, Hangneigungen und -Ausrichtungen, Oberflächenbeschaffenheit und -zustand (in diesem Projekt v. a. Feuchte des Straßenbelags) und Beschattungsverhältnisse, was für Straßenverläufe charakteristisch ist und sich von standardisierten Messpunkten unterscheidet.

9.3.3 Downscaling Prognose (auf Messstelle bezogen)

Die von den Prognose-Anbietern bereitgestellten Vorhersagen beinhalten bereits unterschiedliche Downscaling-Methoden. Die Bedeutung der Methoden für das Downscaling ist an Folgendem erkennbar:

- Höhenkorrektur (adiabatisches Downscaling): diese kann bei Temperatur in hügeligen Gelände Verbesserungen bringen; die tendenziell besseren Temperaturvorhersagen der Europäischen Anbieter wird i. d. R. durch die Verwendung (eigener) engmaschiger Wettermodelle ermöglicht, welche das Gelände in feinerem Raster reproduziert.

AT vs. AT (°C)					
Größen	DWD	DTN	FORECA	GWC	meteoblue
BIAS	- 0,60	3,70	0,80	- 1,50	- 1,50
MAE	5,90	7,00	6,60	6,60	6,40
RMSE	7,50	8,50	7,90	8,60	7,80
AT vs. RT (°C)					
Daten	DWD	DTN	FORECA	GWC	meteoblue
BIAS	- 2,30	3,70	2,70	- 1,40	- 1,50
MAE	4,60	8,40	8,30	6,60	6,60
RMSE	5,80	10,00	10,50	8,50	8,00
TD vs. TD (°C)					
Daten	DWD	DTN	FORECA		meteoblue
BIAS	0,30	3,40	1,20		- 0,70
MAE	5,60	6,90	6,10		5,90
RMSE	7,20	8,60	7,50		7,60
RT vs. RT (°C)					
Daten	DWD	DTN	FORECA	GWC	
BIAS	- 2,20	4,30	2,80	0,80	
MAE	5,40	7,50	8,20	8,10	
RMSE	7,20	9,30	10,70	10,60	
WFH (µm)					
Größen			FORECA		
BIAS			- 36,90		
MAE			41,90		
RMSE			88,00		
PR (mm)					
Größen	DWD	DTN		GWC	meteoblue
BIAS	- 0,12	- 0,18		- 0,11	- 0,20
MAE	0,33	0,35		0,33	0,22
RMSE	1,10	1,43		1,02	0,96
AT = Luft- Temperatur; RT = Straßen- Temperatur; TD = Taupunkt- Temperatur; WFH = Wasserfilmdicke [µm], PR = Niederschlag. Farben: grün = beste Vorhersage; gelb = zweitbeste Vorhersage. Prognosehorizont: 24 h, 1 h Werte.					

Tab. 73: Ergebnisse der Vorhersage-Validierung am Mess-Standort Predigtstuhl (P423) 2016/2017

- BIAS-Korrektur: je geringer der BIAS (bei Temperatur), desto eher wurde eine Stationsanpassung vorgenommen, erkennbar z. B. an den Vorhersagen des DWD, der über die meisten Messdaten verfügt.

Die genaue Verwendung von Downscaling-Routinen der Prognose-Anbieter ist nicht bekannt. MOS (Model Output Statistics) ist die bekannteste und effektivste Methode, bei der Prognosen anhand von Messungen (i. d. R. mindestens ein Jahr stündliche

Daten automatisch korrigiert werden. Damit werden im Durchschnitt 30 – 50 % vom Restfehler eliminiert (siehe u. a. Kapitel 2.3 und Literatur [38, 39]).

Downscaling wird in Form der angebotenen Prognosen geprüft und stellt den heutigen allseits verfügbaren Stand der Technik dar. Liegen stations-spezifische Ergebnisse für die wesentlichen Wetter-Parameter vor (siehe Kapitel 9.3.1), können Downscaling-Routinen (MOS) mit vertretbarem Aufwand angewendet werden. Es ist aber wahrschein-

lich, dass bei den bereitgestellten Prognosen der meisten Anbieter MOS Verfahren auf die Standorte der Straßenwetterstationen nicht angewendet worden sind.

9.3.4 Straßenwetter-Prognose

Die Vorhersagen für Luft-Temperatur (AT) treffen die an Stationen gemessenen Straßen-Temperaturen meist deutlich besser als die Vorhersage für Straßen-Temperaturen (RT) an beiden Standorten: Nur zwei von 4 Anbietern auf der A 9 (Tabelle 72) und ein Anbieter (DTN) auf der St2139 (Tabelle 73) – also nur 3 von 8 insgesamt – legten eine leicht bessere Vorhersage für Straßen-Temperaturen vor als mit der Vorhersage für Luft-Temperaturen, allerdings nur, wenn das Fehlerniveau bei der Luft-Temperatur (MAE) höher lag als bei den anderen Anbietern.

Die Straßen-Temperaturen-Vorhersagen haben also keinen nachweisbaren Mehrwert: die Funktionen, welche für eine Transformation der Luft-Temperaturen in Straßen-Temperaturen verwendet werden, sorgen nicht für eine zuverlässigere Beschreibung der Realität (Messwerte) als die Berechnungen der Lufttemperatur.

Dies ist zu erklären mit mehreren im Rahmen des Projekts erhobenen Faktoren:

- kleinräumigen Unterschieden der Temperaturen auf der Fahrbahn, was zu größeren Fehlerpotentialen führt (siehe u. a. Kapitel 8),
- Unterschiede in den Annahmen zum Straßenbelag,
- Unterschiede in den Feuchtigkeitsverhältnissen, die in Wechselwirkung stehen mit der Temperatur der Fahrbahn.

Für die streckenbezogene Straßenwetter -Prognosen müssen also andere Verfahren entwickelt werden.

9.3.5 Streckenbezogene Glätteprognose

Streckenspezifische Validierungsmethoden wurden anhand der mobilen Messungen geprüft (siehe Kapitel 10).

9.3.6 Schlussfolgerungen: Vergleich von Prognosen mit Stationsmessungen

Aus den vorliegenden Daten können bzgl. der Modelle folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Die Vorhersagen verschiedener Modelle unterschieden sich.
2. Die Unterschiede variieren je nach Parameter und Standort: Das beste Modell für Temperatur ist nicht unbedingt das Beste für Niederschlag. Ebenso gibt es Modell-Unterschiede zwischen Standorten. Dies erfordert eine Modellauswahl oder eine Mischung von Modellen.
3. Die geforderten < 2 °C Fehler werden mit den Modellen an keiner Station erreicht. Dafür braucht es unterstützende Maßnahmen (z. B. MOS), auch an Mess-Standorten.
4. Die Vorhersagen für Luft-Temperatur treffen die an Stationen gemessenen Fahrbahn-Temperaturen besser als die Vorhersage für Fahrbahn-Temperaturen. Für die streckenbezogene Straßenwetter-Prognose sind somit Vorhersagen auf der Basis von Luft-Temperaturen zu bevorzugen, bzw. das vorgeschlagene Verfahren der Korrektur anhand von mobilen Streckenprofilen.
5. Für ein besseres Vorhersagen von Fahrbahn-Temperaturen aus den Luft-Temperaturen (ohne Messungen) müssten also verbesserte Verfahren entwickelt werden, als die gängigen.
6. Ohne eine gute Anpassung der Vorhersagen an die Messpunkte ist auch eine mobile Prognose auf der Strecke mit größeren Unsicherheiten behaftet. Eine Skalierung von Vorhersagen auf die Strecke setzt eine gute Anpassung an die Messpunkte voraus.

Die möglichen Maßnahmen für eine Verbesserung der Prognosen sind:

- Höhenanpassungen (Geländemodell),
- Stations-Anpassung (Modell-MOS),
- Nowcasting,
- Prüfung der Genauigkeit von Multi-Modell-Ansätzen,
- Prüfung der Möglichkeit zur Verwendung zusätzlicher Stations-Messungen,
- Validierung von verfügbaren Straßenparameter-Vorhersagen.

Die weiteren Empfehlungen bauen auf diesen Erkenntnissen auf.

9.4 Streckenvalidierung verschiedener Anbieter

9.4.1 Methoden der Streckenvalidierung

Bei den Streckenvalidierungen werden täglich gelieferte Prognosen verschiedener Anbieter mit mobilen Messungen entlang einer Strecke verglichen. Die Validierungen werden mit VAL2 abgekürzt. Sie beziehen sich im Wesentlichen auf einen Prognosehorizont von 24 h. Es wurden mehrere Validierungen für Straßentemperatur (RT), Taupunkttemperatur (DT) und Wasserfilmdicke (WFD bzw. WFH) durchgeführt. Um Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden alle Validierungen mit diesen Kürzeln versehen und durchnummeriert:

- VAL2 RT-1 bis VAL2 RT-4,
- VAL2 DT-1 bis VAL2 DT-4,
- VAL2 WFH-1 bis VAL2 WFH-3.

Die Anforderung an die Anbieter war, eine Streckenprognose der Straßentemperatur zu liefern. Auch wenn außer FORECA kein Anbieter bereit war, kostenlos Prognosen für alle 723 Straßensegmente zu liefern, wurde im Rahmen dieser Studie ein Vergleich der Prognosen mit allen Messpunkten (Straßensegmenten) durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die gelieferten Prognosepunkte auf alle benachbarten Straßensegmente angewendet und somit ein Prognoseprofil interpoliert. Es wurden die Messungen entlang der Strecke St2139

analysiert, da im Vergleich zur A 9 mehr qualitativ hochwertige Messungen zur Verfügung standen und da diese Strecke eine komplexere Topografie aufweist.

Es wurden Prognosen von 4 verschiedenen Anbietern geliefert und geprüft:

- Meteoblue,
- DTN,
- FORECA,
- GW.

9.4.2 Validierung der Straßentemperatur-Vorhersagen

Da auch die zeitliche Verfügbarkeit der Prognoseanbieter unterschiedlich war, wurden zwei verschiedene Analysen durchgeführt. Zunächst wurden von jedem Anbieter alle verfügbaren Prognosen validiert. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Anbieter zu gewährleisten, wurden in einem zweiten Schritt nur die Messfahrten ausgewertet, für die Prognosedaten aller Anbieter verfügbar waren. Das bedeutet, dass in dieser Auswertung für alle Anbieter die exakt gleiche Grundgesamtheit verwendet wurde, respektive dieselben Straßensegmente und Messfahrten. So waren es insgesamt nur etwa 30 Fahrten, an denen Prognosen aller Anbieter zu Verfügung stehen.

Zuletzt wurden für alle Anbieter eine Korrektur der systematischen Fehler (BIAS Korrektur) vorgenommen und die Daten nochmals verglichen.

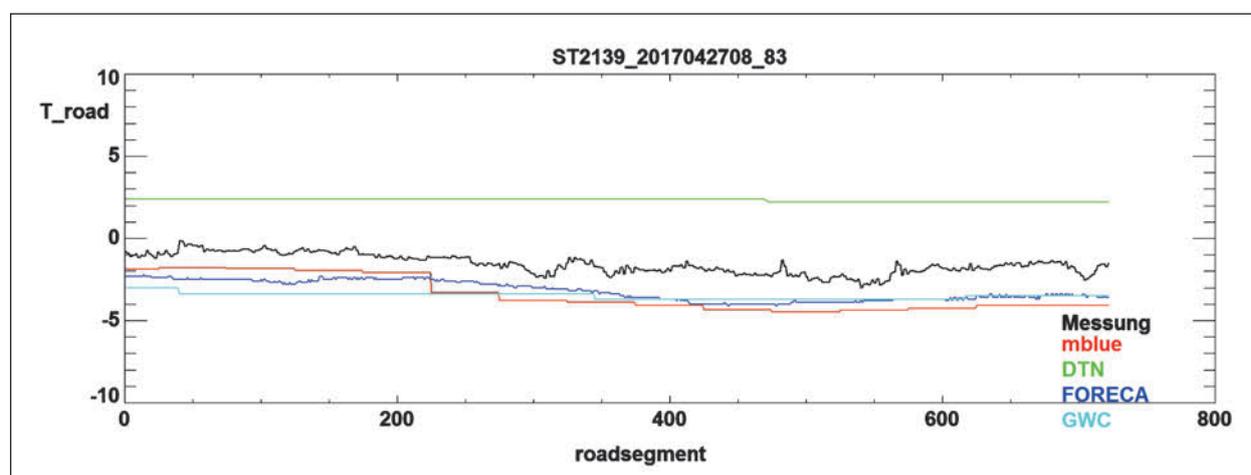


Bild 137: Streckenprofil der Straßentemperatur und interpolierte Prognosen der einzelnen Anbieter

Es wurden also insgesamt vier verschiedene Temperatur Validierungen vorgenommen:

1. Validierung verfügbarer Strecken-Prognosen jedes Anbieters (VAL 2-RT-1),
2. Validierung verfügbarer Strecken-Prognosen jedes Anbieters mit BIAS Korrektur (VAL 2-RT-2),
3. Validierung gemeinsam verfügbarer Strecken-Prognosen aller Anbieter (VAL 2-RT-3),
4. Validierung gemeinsam verfügbarer Strecken-Prognosen aller Anbieter mit BIAS Korrektur (VAL 2-RT-4).

Die Ergebnisse der einzelnen Validierungen sind in Tabelle 74 bis Tabelle 77 dargestellt.

Bei der Validierung der verfügbaren Datenpunkte jedes Anbieters (VAL 2-RT-1, vgl. Tabelle 74) wur-

den alle Prognosen des jeweiligen Anbieters mit den Daten der Messfahrten verglichen. Die Daten von meteoblue weisen hier mit ca. 2.03 °C MAE den geringsten Fehler auf, wobei die Daten von FORECA nur minimal (2.13 °C) schlechter sind. Der MAE von GWC liegt nochmal ca. 0.3 °C höher, wobei diese drei Anbieter einen geringen negativen BIAS aufweisen von -0.965 °C bis -1.429 °C. Da meteoblue einen leicht höheren BIAS hat, ist der Vorsprung bei der Standardabweichung noch etwas deutlicher. DTN hat einen hohen BIAS von fast 2.9 °C, weshalb auch die anderen Fehler deutlich höher ausfallen.

Während DTN für nahezu alle Messfahrten Daten geliefert hat und die Verfügbarkeit bei FORECA und GWC über 65 % liegt, weisen die Lieferungen von meteoblue nur eine Verfügbarkeit von etwa 30 % auf.

Anbieter	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte	Prognosepunkte
meteoblue	- 1.429	2.034	2.771	2.375	42426	15
DTN	2.8778	3.717	4.808	3.852	132890	5
FORECA	- 1.05	2.126	2.871	2.672	94381	722
GWC	- 0.965	2.471	3.184	3.034	107645	25

Tab. 74: Validierung der verfügbaren Temperatur-Strecken-Prognosen jedes Anbieters (VAL 2-RT-1)

Anbieter	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte	Prognosepunkte
meteoblue	0	1.594	2.375	2.375	42426	15
DTN	0	2.952	3.943	3.852	132890	5
FORECA	0	1.896	2.672	2.672	94381	722
GWC	0	2.286	3.034	3.034	107645	25

Tab. 75: Validierung der verfügbaren Temperatur-Strecken-Prognosen mit BIAS Korrektur (VAL 2-RT-2)

Anbieter	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte	Prognosepunkte
meteoblue	- 2.119	2.694	3.525	2.816	22182	15
DTN	2.1344	3.27	4.043	3.434	22182	5
FORECA	- 0.966	1.912	2.51	2.317	22182	722
GWC	- 0.466	2.315	2.986	2.95	22182	25

Tab. 76: Validierung gemeinsam verfügbarer Temperatur-Strecken-Prognosen aller Anbieter (VAL 2-RT-3)

Anbieter	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte	Prognosepunkte
meteoblue	0	2.005	2.816	2.816	22182	15
DTN	0	2.825	3.434	3.434	22182	5
FORECA	0	1.717	2.317	2.317	22182	722
GWC	0	2.203	2.95	2.95	22182	25

Tab. 77: Validierung gemeinsam verfügbarer Temperatur-Strecken-Prognosen aller Anbieter, mit BIAS Korrektur (VAL 2-RT-4)

Nun wurden die Prognosen aller Anbieter um die systematischen Fehler korrigiert und erneut verglichen. Die Validierung der verfügbaren Datenpunkte jedes Anbieters mit BIAS Korrektur (VAL 2-RT-2, vgl. Tabelle 74) weist ein nahezu identisches Bild auf, wobei die MAE von DTN und meteoblue etwas deutlicher reduziert sind als die von FORECA und GWC.

Um eine direkte Vergleichbarkeit der Anbieter zu gewährleisten, wurden dieselben Analysen nochmals durchgeführt. Allerdings wurden nun für alle Anbieter die gleichen Messfahrten validiert. Das bedeutet, es kamen nur noch Messfahrten in die Analyse, zu der alle Anbieter verfügbar waren. Dies sind nur etwa 15 % aller Fahrten. Die Validierung der Datenpunkte, an denen Vorhersagen aller Anbieter verfügbar sind (VAL 2-RT-3, vgl. Tabelle 76), zeigt ein etwas anderes Bild: meteoblue weist einen deutlich höheren BIAS (-2.119 °C) auf und auch die Standardabweichung ist etwas erhöht, während bei FORECA der BIAS ähnlich und die Standardabweichung niedriger ist. Somit schneidet FORECA am besten ab, mit einem MAE von nur 1.92 °C. GWC hat den geringsten BIAS und liegt mit 2.315 °C noch vor meteoblue mit 2.694 °C. DTN hat auch hier die größten Fehlerwerte.

Korrigiert man auch hier die systematischen Fehler, schneidet meteoblue etwas besser ab als GWC und belegt somit den zweiten Platz hinter FORECA (VAL 2-RT-4, vgl. Tabelle 77).

Diese Auswertung zeigt, dass wirkungsvolles Downscaling eine erhebliche Bedeutung für die Verbesserung der Temperatur-Prognosen hat.

9.4.3 Validierung der Taupunkttemperatur

Für die Taupunkttemperatur wurden von drei Anbietern Daten geliefert, wobei die Anzahl der gelieferten Prognosepunkte denen der Straßentemperatur entspricht. Keine Taupunkttemperatur kam von GWC. Die Prognosen von DTN wiesen eine sehr geringe Variabilität entlang der Strecke auf (vgl. Bild 138).

Die Datenverfügbarkeit ist verglichen mit der Temperatur-Prognose nochmals deutlich geringer, so dass etwa halb so viele Messpunkte validiert wurden. Es wurden auch hier vier Validierungen vorgenommen:

1. Validierung verfügbarer Strecken-Prognosen jedes Anbieters (VAL 2-DT-1),
2. Validierung verfügbarer Strecken-Prognosen jedes Anbieters mit BIAS Korrektur (VAL 2-DT-2),
3. Validierung gemeinsam verfügbarer Strecken-Prognosen aller Anbieter (VAL 2-DT-3),
4. Validierung wie VAL 2-DT-3, mit BIAS Korrektur (VAL 2-DT-4).

Die Ergebnisse der einzelnen Validierungen sind in Tabelle 78 bis Tabelle 81 dargestellt. Die Fehler (MAE) liegen ohne BIAS Korrektur zwischen 1.89 °C und 2.94 °C, wobei bei allen Anbietern deutliche systematische Abweichungen zwischen -1.55 °C und 2.61 °C zu sehen sind (vgl. Tabelle 78). Auffällig ist zudem, dass meteoblue bei der Standardabweichung deutlich besser abschneidet als wenn man beispielsweise den MAE der Validierung (vgl. Tabelle 78, VAL 2-DT-1) betrachtet. Dieser Effekt ist dann auch deutlich zu sehen, wenn man die Validierung mit BIAS Korrektur analysiert (vgl. Tabelle 79, VAL 2-DT-2). Der MAE liegt hier zwischen 1.21 °C und 2.02 °C.

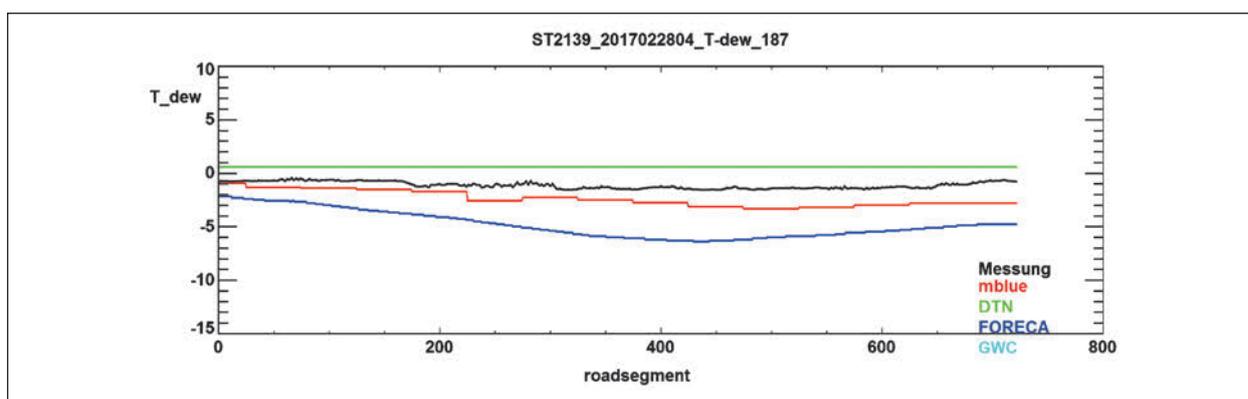


Bild 138: Streckenprofil der Taupunkttemperatur und interpolierte Prognosen der einzelnen Anbieter

Anbieter	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte	Prognosepunkte
meteoblue	- 2.05	2.25	2.68	1.73	21242	15
DTN	2.61	2.94	3.68	2.59	66536	5
FORECA	- 1.55	1.89	2.48	1.94	47255	722

Tab. 78: Validierung verfügbarer Taupunkt-Temperatur-Strecken-Prognosen jedes Anbieters (VAL 2-DT-1)

Anbieter	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte	Prognosepunkte
meteoblue	0.00	1.21	1.73	1.73	21242	15
DTN	0.00	2.02	2.59	2.59	66536	5
FORECA	0.00	1.43	1.94	1.94	47255	722

Tab. 79: Validierung verfügbarer Taupunkt-Temperatur-Strecken-Prognosen jedes Anbieters mit BIAS Korrektur (VAL 2-DT-2)

Anbieter	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte	Prognosepunkte
meteoblue	- 1.96	1.98	2.33	1.26	14364	15
DTN	2.23	2.50	3.08	2.12	14364	5
FORECA	- 1.31	1.53	1.97	1.47	14364	722

Tab. 80: Validierung gemeinsam verfügbarer Taupunkt-Temperatur-Strecken-Prognosen aller Anbieter (VAL 2-DT-3)

Anbieter	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte	Prognosepunkte
meteoblue	0.00	0.95	1.26	1.26	14364	15
DTN	0.00	1.66	2.12	2.12	14364	5
FORECA	0.00	1.15	1.47	1.47	14364	722

Tab. 81: Validierung gemeinsam Taupunkt-Temperatur-Strecken-Prognosen aller Anbieter, mit BIAS Korrektur (VAL 2-DT-4)

Validiert man nur die Punkte, an welchen alle Anbieter verfügbar sind, um eine bessere Vergleichbarkeit der Anbieter zu gewährleisten, sind die Fehlergrößen um ca. 0.4 °C niedriger und es werden nur noch etwa 20 Messfahrten validiert (vgl. Tabelle 80, VAL 2-DT-3). Ohne BIAS Korrektur schneiden die FORECA Prognosen am besten ab, wenn man MAE oder RMSE betrachtet. Wie bereits beschrieben liegt beim Anbieter meteoblue die Standardabweichung deutlich niedriger. So liegt der Anbieter an erster Stelle wenn man die Standardabweichung betrachtet, was entsprechend auch für die BIAS korrigierten Prognosen gilt, wo der MAE sogar unter 1 °C liegt (vgl. Tabelle 81, VAL 2-DT-4).

Generell ist die Taupunkttemperatur 1 Tag im Voraus vorhersagbar mit einer Genauigkeit von 1 °C – 2 °C. Somit sind die Vorhersagefehler etwas geringer als bspw. bei Straßen- oder Lufttemperatur (s. a. Kapitel 9.3.4).

9.4.4 Validierung der Prognosen für Wasserfilmdicke

Des Weiteren wurde eine Validierung der Prognosen für Wasserfilmdicke durchgeführt (für St2139). Die Wasserfilmdicke wurde in Mikrometern ($m \times 10^{-6}$, kurz μ) gemessen und 2 Anbieter haben Prognosen im Livebetrieb geliefert: bei FORECA 722 Prognosepunkte und bei GWC 25. Die Wasserfilmdicke schwankt im Verlauf der Strecke stark (Bild 139), somit ist auch mit großen Fehlern zu rechnen. Daher wurden die Prognosen nicht nur mit den Profilen verglichen, sondern auch mit dem Mittelwerte jeder Messfahrt.

Auf die Auswertung der Ereignisse (Heidke Skill Score – HSS) wurde – entgegen anfänglicher Planung – aus folgenden Gründen verzichtet:

1. Zur Ermittlung von Ereignissen müssen Klassen gebildet werden (z. B. WFD 0 – 100 mm, 100 – 200 mm usw.).

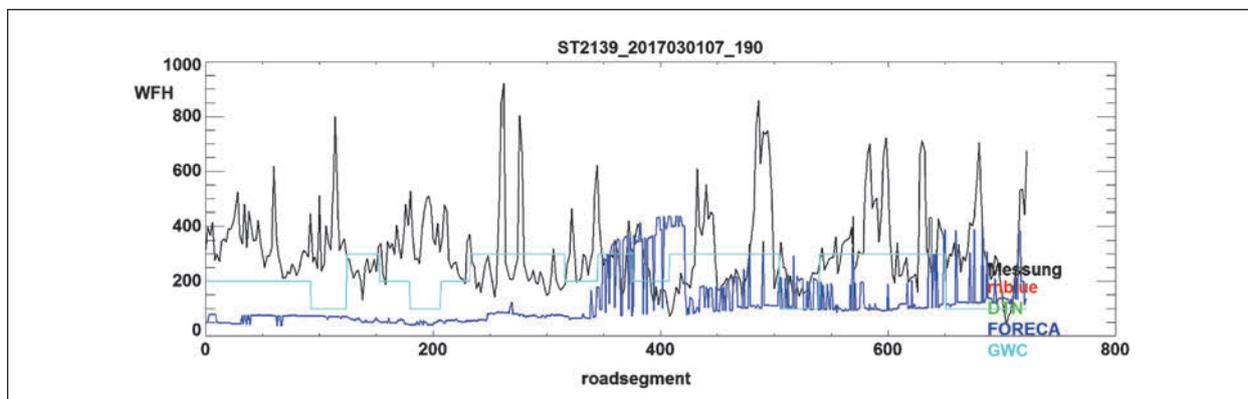


Bild 139: Streckenprofil der Wasserfilmdicke und interpolierte Prognosen der einzelnen Anbieter. St2139, 2017

2. Die Einteilung in Klassen erfordert eine genaue Kenntnis der Anwendungen – ansonsten befasst man sich mit vielen unbedeutenden Unterschieden.
 3. Die Komplexität der Auswertung nimmt zu, da der HSS für jede Klasse getrennt berechnet wird.
 4. Die Verteilung der Werte für WFD folgt nicht einer Normalverteilung, sondern eher einer binären Verteilung resp. doppelte Normalverteilung und ist somit nicht gleichmäßig genug für eine gleichmäßige Klassifizierung.
 5. Die Erarbeitung einer geeigneten Klassifizierung würde deren Prüfung auf verschiedenen Strecken voraussetzen, um allgemein anwendbar zu sein, und bleibt daher Arbeitsbedarf für zukünftige Anwendung.
 6. Die Aussagefähigkeit steigt kaum gegenüber einem Vergleich von MAE und RMSE.
1. Validierung der Prognosemittelwerte gegen den Mittelwerte des Messprofiles (VAL 2-WFH-1),
 2. Validierung aller Messprofile gegen verfügbaren Datenpunkte aller Anbieter (VAL 2-WFH-2),
 3. Validierung nasser Messprofile gegen verfügbaren Datenpunkte aller Anbieter (VAL 2-WFH-3).

Die mittlere Wasserfilmdicke aller Messungen auf der St2139 liegt bei 202 μ . Die Ergebnisse der Validierungen sind in Tabelle 82 bis Tabelle 84 zusammengefasst.

Bei der Analyse fällt sofort auf, dass die von FORECA prognostizierte Wasserfilmdicke an einzelnen Tagen extrem hohe Werte mit bis zu 4.500 μ aufweist. Auch wenn die Prognosen sonst weitgehend plausibel erscheinen, führen diese hohen Fehler dazu, dass die durchschnittlichen Fehlerwerte von FORECA höher liegen als der Mittelwert aller Messungen. Diese großen systematischen Abweichungen überlagern alles, wodurch eine detaillierte Analyse nicht gut möglich ist. Skaliert man die FORECA Prognosen mit einem Faktor von 0.4 (FORECA x 0.4) ist die Qualität der Prognosen mit denen von GWC vergleichbar. Diese Prozedur wurde für alle Validierungen vorgenommen. Die ursprünglichen FORECA Prognosen werden der Vollständigkeit halber ebenfalls aufgeführt, allerdings wird darauf nicht näher eingegangen.

Ein Vergleich von Bias (systematischer Fehler), MAE (absoluter Fehler) und RMSE (Quadratischer Fehler, der die Häufigkeit größerer Abweichungen hervorhebt) ist somit für die Beurteilung der Methoden ausreichend und zweckmäßiger.

Da die Wasserfilmdicke an allen trockenen Fahrten Null beträgt, ist eine BIAS Korrektur nicht so einfach anwendbar. Daher wurde bei der Wasserfilmdicke eine andere Unterscheidung getroffen. Einmal wurden nur Messfahrten analysiert, an denen Nässe gemessen wurde, während eine zweite Validierung auch trockene Messfahrten berücksichtigt. Es wurden jeweils nur Fahrten ausgewertet, wo Prognosen beider Anbieter verfügbar waren. Entsprechend wurden drei verschiedene Validierungen durchgeführt:

Vergleicht man die Fehler der Mittelwerte jeder Messfahrt mit den Mittelwerten der Prognosen, liegen die systematischen Abweichungen zwischen -98 μ und 5 μ , somit bei maximal 50 % des Mittelwertes der Messungen. Die mittleren absoluten Fehler liegen zwischen 145 μ und 182 μ . Die Standardabweichungen sind bei beiden ähnlich hoch bei fast 140 % des mittleren Messwertes (vgl. Tabelle 82, VAL 2-WFH-1).

Anbieter	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Stddev [μ]	Messpunkte	Prognosepunkte
FORECA	332	391	840	771	Mittelwerte	Mittelwerte
FORECA x0.4	5	145	267	267	Mittelwerte	Mittelwerte
GWC	- 98	182	309	293	Mittelwerte	Mittelwerte

Tab. 82: Validierung der verfügbaren Datenpunkte gegen den Mittelwert des Messprofils (VAL 2-WFH-1)

Anbieter	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Stddev [μ]	Messpunkte	Prognosepunkte
FORECA	341	432	877	808	37585	722
FORECA x0.4	1	176	308	308	37585	722
GWC	- 100	207	346	331	37585	25

Tab. 83: Validierung aller Messprofile gegen verfügbaren Datenpunkte aller Anbieter (VAL 2-WFH-2)

Anbieter	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Stddev [μ]	Messpunkte	Prognosepunkte
FORECA	362	459	906	830	35224	722
FORECA x0.4	1	187	318	318	35224	722
GWC	- 107	221	357	341	35224	25

Tab. 84: Validierung nasser Messprofile gegen verfügbaren Datenpunkte aller Anbieter (VAL 2-WFH-3)

Wie erwartet, liegen die Fehlerwerte höher, wenn man nun das Profil mit den Prognosewerten vergleicht. Dies lässt sich anhand der starken Variabilität der Wasserfilmdicke entlang des Streckenprofils auch leicht begründen. Der systematische Fehler ist bei beiden Anbietern etwa gleich. Die MAE-Werte steigen bei FORECA um ca. 20 % und bei GWC nur um ca. 10 %. Die Werte der Standardabweichung sind wieder ähnlich bei über 150 % des mittleren Messwertes (vgl. Tabelle 83, VAL 2-WFH-2).

Die Ergebnisse der Messfahrten mit nasser Fahrbahn (vgl. Tabelle 84, VAL 2-WFH-3) unterscheiden sich in der Grundgesamtheit im Vergleich zu allen Messprofilen (vgl. Tabelle 83, VAL 2-WFH-2) kaum. Dies deutet darauf, dass die Wasserfilmdicke nur gemessen wurde, wenn auch tatsächlich Wasser auf der Fahrbahn beobachtet werden konnte. Entsprechend sind auch die Fehlergrößen fast identisch.

Abschließend lässt sich sagen das, Prognosen der Wasserfilmdicke eine sehr große Unsicherheit beinhalten. Um verlässliche Glatteis- oder Streumengenprognosen zu erstellen, sollte man auf aktuelle Messungen zurückgreifen. Weitere Ansätze werden behandelt in Kapitel 10.

10 Entwicklung von Ansätzen für die Anwendung stationärer und mobiler Daten zur Optimierung der Streckenvorhersage

10.1 Vergleich verschiedener Methoden zur Verbesserung der Prognose der Straßentemperatur

10.1.1 Methoden

Grundsätzlich gibt es zahlreiche Möglichkeiten, die Straßentemperatur zu berechnen. Die einfachsten Methoden nutzen keinerlei Messdaten und leiten die Straßentemperatur einfach aus der Lufttemperatur des Wettermodells her. Die komplexen Methoden simulieren die Strahlungsbilanz, wofür neben Wetterdaten auch detaillierte Informationen zum Straßenbelag und der direkten Umgebung (insbesondere Horizont-Einschränkung) notwendig sind, weshalb diese Methoden – wenn überhaupt – bisher nur punktuell an Straßenwetterstationen zum Einsatz kommen. Um den Verlauf von Straßentemperaturprofilen besser abzuschätzen, kommen dank der verfügbaren Messdaten auch empirische Methoden infrage.

Grundsätzlich liegt die Annahme nahe, dass sich das Streckenprofil der Straßentemperatur unter ähnlichen Wetterbedingungen auch ähnlich verhält. Beispielsweise steigt die Straßentemperatur bei Sonnenschein und Verlassen eines Waldstückes immer an, da die Straße nun nicht mehr verschattet wird und die Sonnenstrahlung den Belag erwärmt. Derselbe Abschnitt kühlt in wolkenlosen Nächten im Vergleich zum bewaldeten Abschnitt stärker aus, da der Wald auch dann isolierend wirkt. Unter bewölkten Bedingungen sind diese Effekte kaum noch zu beobachten, da tagsüber die Einstrahlung stark reduziert ist und nachts die Ausstrahlung durch atmosphärische Gegenstrahlung der Wolken kompensiert wird.

Somit wurde versucht, gemessene Straßentemperaturprofile nach gewissen Wetterbedingungen zu klassifizieren, um für jede Wetterklasse ein Standardstreckenprofil zu bestimmen. Aus diesen Profilen und punktuellen Modell-Prognosen wird dann eine Strecken-Vorhersage errechnet (s. Kapitel 1, Schritt 4).

10.1.2 Prognosemodell mit typischen Streckenprofilen

Zuerst wurde ein Interpolationsmodell zur Prognose der Straßentemperatur für einzelne Abschnitte entwickelt. Dieses fußt auf der Annahme, dass sich die

gemessenen Straßentemperaturprofile so klassifizieren lassen, dass sich die Profile innerhalb einer Klassifizierung einheitlich verhalten. Gelingt dies, kann mithilfe der korrekten Klassifikation und einer dazugehörigen Tabelle, welche die typischen Profile enthält, die tatsächlichen Profile anhand der Punktprognose in die Strecke extrapoliert werden. Diese Methodik wurde zunächst konzipiert und dann auf Basis von archivierten Wettervorhersagen und Messungen simuliert und validiert.

Für dieses Prognosemodell sind folgende Schritte notwendig (vgl. Bild 140):

1. Erstellung einer Datenbank mit typischen Streckenprofilen der Straßentemperatur für verschiedene Wetterklassifikationen,
2. Modell zur punktuellen Prognose der Straßentemperatur,
3. Klassifikation der Wettersituation anhand des Wettermodells,
4. Auswahl des typischen Straßenprofils anhand der Wettersituation,
5. Extrapolation der punktuellen Straßentemperatur entlang der Strecke mithilfe des typischen Profils.

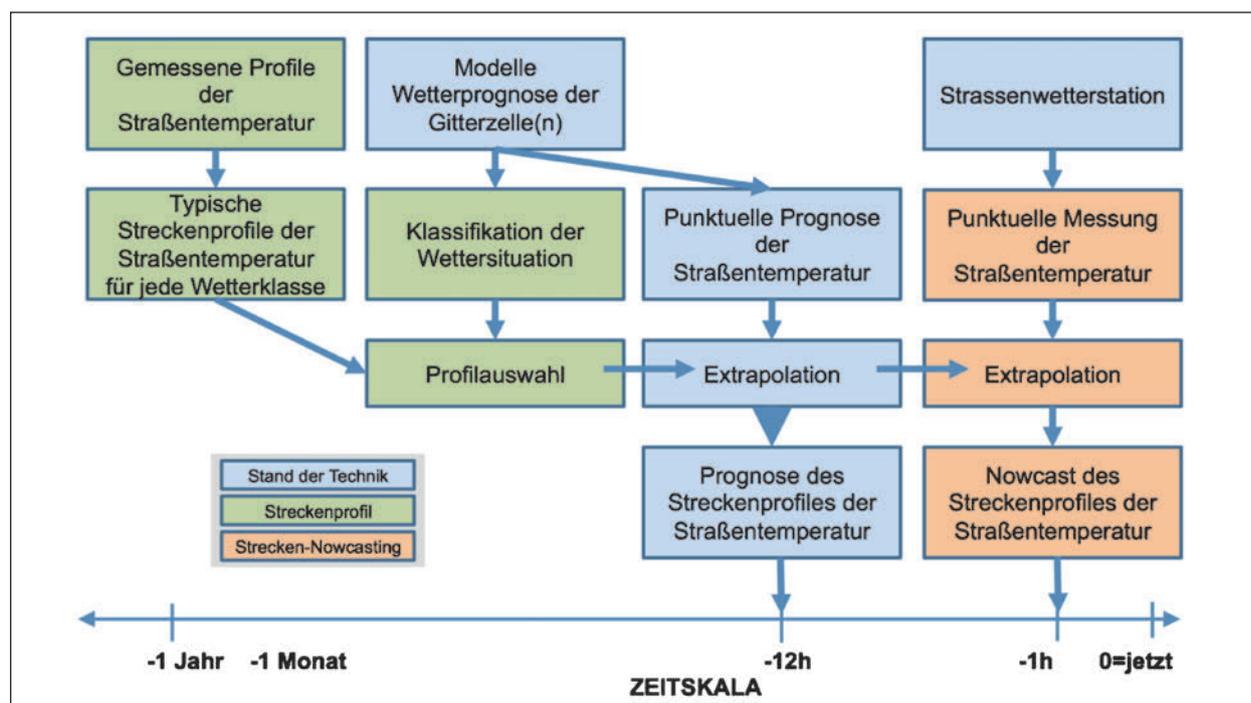


Bild 140: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Prognosemodells basierend auf gemessenen Straßentemperaturprofilen und Wetterklassen

Dieses Modell erscheint zunächst relativ simpel, allerdings ist die Implementierung beliebig komplex. Allein durch die Anzahl der Wetterklassen kann die Komplexität des Prognosemodells beliebig variiert werden. Andererseits ist die richtige Konzeption der Klassifikation entscheidend für Funktionsweise des Prognosemodells. Grundsätzlich gibt es für die punktuelle Prognose der Straßentemperatur auch wieder viele verschiedene Möglichkeiten, worauf bereits näher eingegangen wurde (siehe u. a. Kapitel 9.4.2). Hier wurden v. a. 2 Fälle untersucht, eine Punktprognose basierend auf einer Vortagesprognose, welche spätestens 12 Stunden vorher verfügbar ist und eine Nowcast-Prognose, welche aktuelle Messwerte verwendet und im realen Betrieb spätestens eine Stunde vorher verfügbar sein muss (vgl. Bild 140).

10.1.3 Erprobung verschiedener Prognosemodelle

Auf Basis archivierter Vorhersagen von meteoblue wurde diese neue Methodik nun entwickelt und getestet. Um die Güte der Methodik beurteilen zu können, im Vergleich zu anderen Methoden und im Vergleich zu den validierten Live Prognose, muss eine Referenzvalidierung definiert werden. Am aufschlussreichsten wäre es, die in Kapitel 9.4 beurteilten Vorhersagen zu reproduzieren. Da dies nicht hundertprozentig möglich war, wurde die Prognosemethode schrittweise implementiert und nach jedem Schritt eine Validierung durchgeführt, um etwaige Qualitätsverbesserungen zu dokumentieren. Die Validierungen von Methoden werden mit VAL 3 abgekürzt und mit der jeweiligen Variable (RT, WFH bzw. WFD) ergänzt und durchnummeriert. Dazu kommt noch ein Kürzel für den Prognosehorizont, entweder -12 h oder -1 h.

Es wurden zunächst fünf verschiedene Validierungen vorgenommen:

1. Validierung eines Modell-Gitterpunkts (VAL 3-RT-1-12h), siehe Kapitel 10.1.4,
2. Validierung von fünf Modell-Gitterpunkten (VAL 3-RT-2-12h), siehe Kapitel 10.1.4,
3. Validierung Modellvorhersage + adiabatisches Downscaling (VAL 3-RT-3-12h), siehe Kapitel 10.1.5,
4. Validierung Modellprognose + klassifiziertes Standardstreckenprofil (VAL 3-RT-2-12h), siehe Kapitel 10.1.6,

5. Validierung Downscaling + klassifiziertes Standardstreckenprofil (VAL 3-RT-2-12h), siehe Kapitel 10.1.7.

Die Validierungen VAL 3-RT-1-12h bis VAL 3-RT-3-12h dienen als Referenz, wobei VAL 3-RT-1-12h der in Kapitel 9.4 beurteilten Vorhersage von meteoblue am nächsten kommt. Es sollte allerdings auch überprüft werden, welchen Einfluss eine höhere räumliche Auflösung und eine Temperaturkorrektur anhand des Höhenprofils (adiabatisches downscaling) hat.

Für das neue Prognosemodell wurde zunächst eine sehr einfache Klassifizierung anhand der Unterscheidungen Tag/Nacht (Tag = Strahlung > 0 W/m²) und nass/trocken implementiert. Entsprechend wurden vier Klassen unterschieden:

1. Tagsüber trocken – dryday,
2. Nachts – trocken – drynight,
3. Tagsüber nass – wetday,
4. Nachts nass – wetnight.

Es wurden alle Fehlergrößen für die jeweiligen Klassen und für alle Messfahrten berechnet, um sowohl die einzelnen Klassifizierungen beurteilen, als auch die Methodik mit den Referenzwerten vergleichen zu können. Basierend auf den Ergebnissen von VAL 3-RT-1-12h bis VAL 3-RT-3-12h können so die Ergebnisse der Validierungen VAL 3-RT-4-12h und VAL 3-RT-5-12h eingeordnet werden, wobei die klassifizierten Standardprofile einmal auf die mittlere Modelltemperatur (VAL 3-RT-4-12h) angewendet wurde und danach auf die mittlere Temperatur der Downscaling-Prognose (VAL 3-RT-4-12h).

10.1.4 Prognose der Temperatur aus Wettermodell

Zunächst wurden die Daten aufgrund der Mess- und Simulationsdatengrundlage nur für einen Gitterpunkt an der Station Predigtstuhl (P472) berechnet und validiert (VAL 3-RT-1-12h, vgl. Tabelle 85), da hier am meisten mobile Messdaten vorliegen. Der systematische Fehler ist mit 1.7 °C relativ hoch, wobei der mittlere Fehler (MAE) mit 2.37 °C dennoch unter denen des Anbietervergleiches (VAL 2-RT-3, Tabelle 76) liegt.

Das hochaufgelöste NEMS4 Modell bietet 5 Modell-Gitterpunkte entlang der Messstrecke St2139. Nimmt man nun die Prognose dieser fünf Gitter-

Klassen	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte
Alle Profile	1.697	2.368	2.919	2.375	42342
dryday	1.214	2.447	2.785	2.506	6137
drynight	1.88	2.712	3.321	2.737	22791
wetday	1.56	1.701	2.191	1.538	6196
wetnight	1.647	1.789	2.112	1.321	7218

Tab. 85: Validierung eines Modell Gitterpunkts (VAL 3-RT-1-12h)

Klassen	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte
Alle Profile	0.3	2.13	2.759	2.743	42437
dryday	- 1.13	2.637	3.243	3.036	5415
drynight	1.069	2.742	3.333	3.157	21081
wetday	0.032	1.175	1.481	1.48	6918
wetnight	- 0.42	1.115	1.368	1.3	9023

Tab. 86: Validierung von fünf Modell Gitterpunkten (VAL 3-RT-2-12h)

Klassen	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte
Alle Profile	-0.058	2.13	2.762	2.762	42437
dryday	- 1.49	2.702	3.394	3.047	5415
drynight	0.708	2.66	3.267	3.189	21081
wetday	- 0.32	1.216	1.505	1.47	6918
wetnight	- 0.78	1.236	1.516	1.297	9023

Tab. 87: Validierung von Modellvorhersage + adiabatischen Downscaling (VAL 3-RT-3-12h)

punkte (VAL 3-RT-2-12h, Tabelle 86) und weist Sie dem jeweils nächstgelegenen Straßensegment zu, ist der systematische Fehler deutlich um 1.4 °C reduziert. Während die Standardabweichung auf 2.74 °C steigt, liegt der MAE mit 2.13 °C nochmals 0.25 °C niedriger.

Auffällig ist zudem, dass mehr als die Hälfte der Fahrten als trockene Nacht klassifiziert werden, während die anderen Klassen alle jeweils unter 20 % der Fälle ausmachen. Die Fehlergrößen sind unter trockenen Bedingungen deutlich höher, was nachvollziehbar ist, da die Messprofile bei trockenen Bedingungen deutlich höhere Schwankungen aufweisen. Bei nassen Bedingungen liegt der absolute Fehler bei 1.7°-1.8° für einen Gitterpunkt, während hier die deutlichsten Verbesserungen durch eine höhere Auflösung entstehen und bei 5 Gitterpunkten die Fehler nur noch bei 1.115 °C – 1.175 °C liegen.

10.1.5 Downscaling auf Straßensegmente (Modelliert oder Adiabatisch)

Im operationellen Vorhersagemodell von meteoblue werden alle Temperaturvorhersagen auf das jeweilige Höhengniveau angepasst (adiabatisches Downscaling). Das Wettermodell kennt die aktuellen Wetterbedingungen in verschiedenen Höhengniveaus und kann so die Temperatur an das jeweilige Höhengniveau anpassen. Diese Methode kann auf archivierte Vorhersagen nicht angewendet werden, da die Temperatur nicht in unterschiedlichen Höhen archiviert wird. In den meisten Fällen nimmt die Temperatur mit der Höhe ab und daher wurde eine lineare Korrektur gemäß der adiabatischen Abkühlung vorgenommen. Es zeigte sich, dass bei Anwendung des trockenadiabatischen Koeffizienten (1.0 °C/100 m) die systematischen Fehler deutlich erhöht waren. Bei Anwendung des feuchtadiabatischen Koeffizienten (0.6 °C/100 m) waren die Ergebnisse deutlich besser. Eine weitere Absenkung des adiabatischen Koeffizienten auf 0.4 °C/100,

brachte weitere Verbesserungen, weshalb dieser Koeffizient für die weitere Validierung verwendet wurde. Dennoch konnte durch Downscaling (VAL 3-RT-3-12h, Tabelle 87) die Prognosen im Vergleich zu VAL 3-RT-2-12h nicht verbessert werden. Die Fehlergrößen sind in der Höhe nahezu identisch. Diese Prognosen (mit MAE von 2.13 °C) werden als Stand der Technik und Referenz für weitere Validierungen gelten.

10.1.6 Klassifizierte Standardstreckenprofile

Nun wurden ausgehend von den Referenzvalidierungen VAL 3-RT-1-12h bis VAL 3-RT-3-12h die Methodik der klassifizierten Standardstreckenprofile angewendet. Dabei wurde ein Mittelwert aus der Modellprognose als Startwert verwendet und dieser mithilfe des klassifizierten Standardstreckenprofils der aktuellen Klassifizierung extrapoliert, um für jedes Straßensegment eine Straßentemperatur zu berechnen. Zuerst wurde als Startwert der Mittelwert der 5 Gitterzellen verwendet (VAL 3-RT-4-12h, vgl. Tabelle 88). Es gibt zwar leichte Verbesserungen, allerdings sind diese marginal. Dasselbe gilt für die 2. Variante, bei welcher der Mittelwert der Downscaling-Prognose als Startwert verwendet wurde (VAL 3-RT-5-12h, vgl. Tabelle 89). Um die Methode sauber validieren zu können, war es notwendig, ausreichend Mess-Profile zur Verfügung zu haben. Die Messfahrten wurden sowohl in der Wintersaison 2015/2016 als auch 2016/2017 durchgeführt. Daher wurde eine strikte Trennung vorgenommen, wobei zur Bestimmung von Standardprofilen

immer die Daten aus 2015/2016 verwendet wurden. Zur Bewertung der Methodik wurden dann Prognosen für die Saison 2016/2017 simuliert und anhand der Messdaten validiert.

Die Ergebnisse dieser Validierung sind deutlich schlechter als erwartet. Generell ist es schwierig, anhand dieser Validierung die Methodik zu bewerten, z. B. weil andere Klassifizierungen evtl. andere Ergebnisse bringen. Grundsätzlich war die Klassifikation anhand der Nässe auch bereits ein Vorgriff auf Nässe- und Glätte-Prognose. Daher wurde nun eine Klassifikation vorgenommen anhand von Variablen, welche die Straßentemperatur maßgeblich beeinflussen: dabei sind die Bewölkung und der sensible Wärmestrom potentiell interessant, weshalb auch Klassifikationen anhand dieser beiden Variablen erprobt wurde.

10.1.7 Klassifizierte Standardstreckenprofile anhand Bewölkung

Um die Methodik besser bewerten zu können, wurden nun noch weitere Klassifikationen ausprobiert und validiert. Da für die Straßentemperatur neben der Umgebungstemperatur die Strahlungsbilanz von großer Bedeutung ist, wurde der aktuelle Bewölkungszustand in Kombination mit der Unterteilung in Tag oder Nacht zur Klassifizierung herangezogen, wodurch 6 verschiedene Klassen resultieren (vgl. Tabelle 90).

Anhand dieser Klassifizierungen wurden zunächst die Standardprofile berechnet. Dazu hat man jede

Klassen	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte
Alle Profile	0.3807	2.092	2.697	2.67	42437
dryday	- 0.56	2.63	3.013	2.959	5415
drynight	1.012	2.689	3.306	3.147	21081
wetday	- 0.02	1.17	1.409	1.409	6918
wetnight	- 0.21	1.083	1.306	1.288	9023

Tab. 88: Validierung von Modellprognose + klassifiziertes Standardstreckenprofil (VAL 3-RT-4-12h)

Klassen	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte
Alle Profile	0.0263	2.079	2.67	2.67	42437
dryday	- 0.92	2.623	3.099	2.959	5415
drynight	0.657	2.605	3.215	3.147	21081
wetday	- 0.37	1.241	1.458	1.409	6918
wetnight	- 0.57	1.167	1.409	1.288	9023

Tab. 89: Validierung von Downscaling-Wert + klassifiziertes Standardstreckenprofil (VAL 3-RT-5-12h)

Fahrt einer bestimmten Klasse genommen und für jedes Straßensegment einen, für die Klassifikation typischen Temperaturwert, berechnet. Betrachtet man nun die Häufigkeiten wie oft zu den jeweiligen Bedingungen gefahren wurde (vgl. Tabelle 90), kommen Zweifel auf, da mehrere Klassen mit weniger als 10 Fahrten deutlich unterrepräsentiert sind. Vergleicht man weiterhin die verschiedenen Standardprofile, fällt auf, dass die meisten Profile nur eine sehr geringe Variabilität aufweisen. Logischerweise nimmt die Variabilität mit zunehmender Bewölkung ab. Die Standardstreckenprofile (Bild 141 bis Bild 143) bestätigen diese naheliegende Hypothese. Allerdings könnte dies auch daran liegen, dass für die bewölkten Fahrten deutlich mehr Fahr-

ten zur Verfügung stehen. Betrachtet man nun zusätzlich die wolkenlosen Nächte der Saison 2016/2017 (vgl. Bild 144), sieht man, dass sich das Standardprofil auch bei 40 zur Verfügung stehenden Messfahrten kaum verändert. Diese Erkenntnisse unterstützen die theoretischen Annahmen, dass die Strahlungssituation entscheidenden Einfluss auf die Straßentemperatur hat.

Somit scheint die wichtigste Komponente für die Variabilität der Straßentemperatur entlang eines Straßenprofils tatsächlich die Bewölkung zu sein. Neben den Veränderungen entlang der Strecke ist allerdings eine saubere Kalibrierung notwendig. Auch hier können die Klassifizierungen wiederum nütz-

Klassen	Kriterium	Kürzel	Messfahrten 2015/2016	Messfahrten 2016/2017
Tagsüber bewölkt	(Bewölkung > 65 %)	cloudyday	27	24
Nachts bewölkt	(Bewölkung > 65 %)	cloudynight	36	41
Tagsüber heiter-wolkig	(Bewölkung 20 % – 65 %)	halfcloudyday	8	4
Nachts heiter-wolkig	(Bewölkung 20 % – 65 %)	halfcloudynight	13	9
Tagsüber wolkenlos	(Bewölkung < 20 %)	nocloudsday	6	7
Nachts wolkenlos	(Bewölkung < 20 %)	nocloudsnight	10	40

Tab. 90: Bewölkungsklassifikation

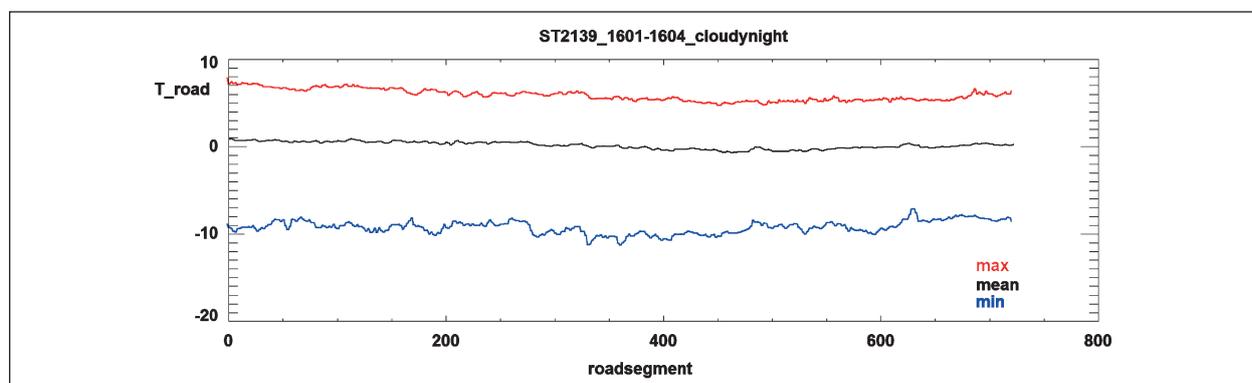


Bild 141: Standardstreckenprofil der Straßentemperatur für bewölkte Nächte (St2139, berechnet mit Messfahrten 2015/16)

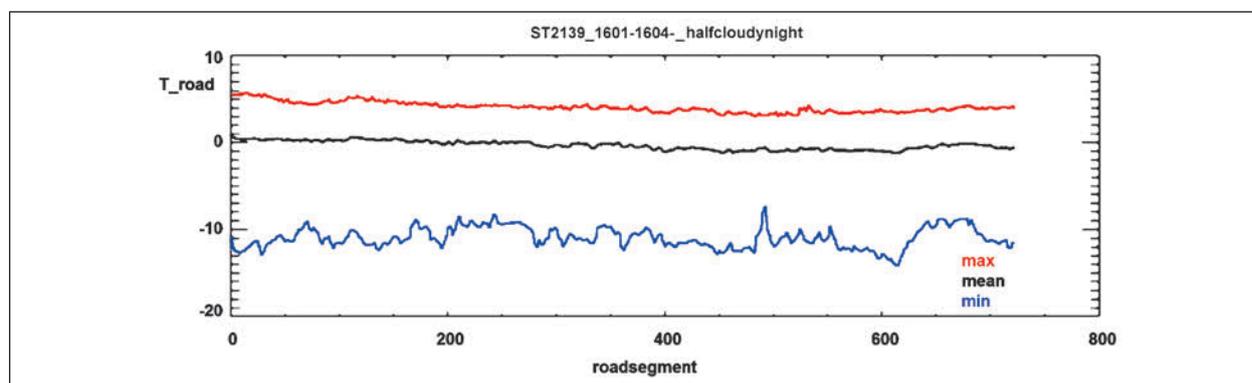


Bild 142: Standardstreckenprofil der Straßentemperatur für heiter bis wolkige Nächte (St2139, Messfahrten 2015/16)

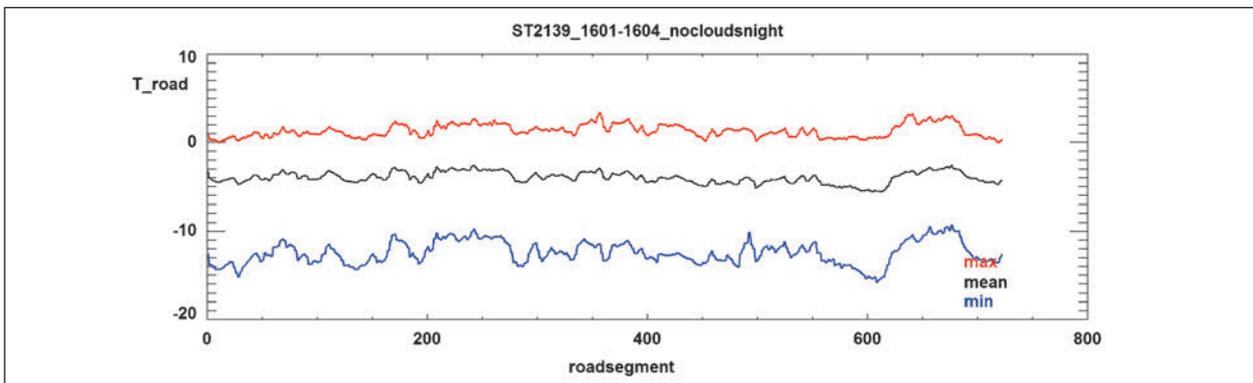


Bild 143: Standardstreckenprofil der Straßentemperatur für unbewölkte Nächte (St2139, Messfahrten 2015/16)

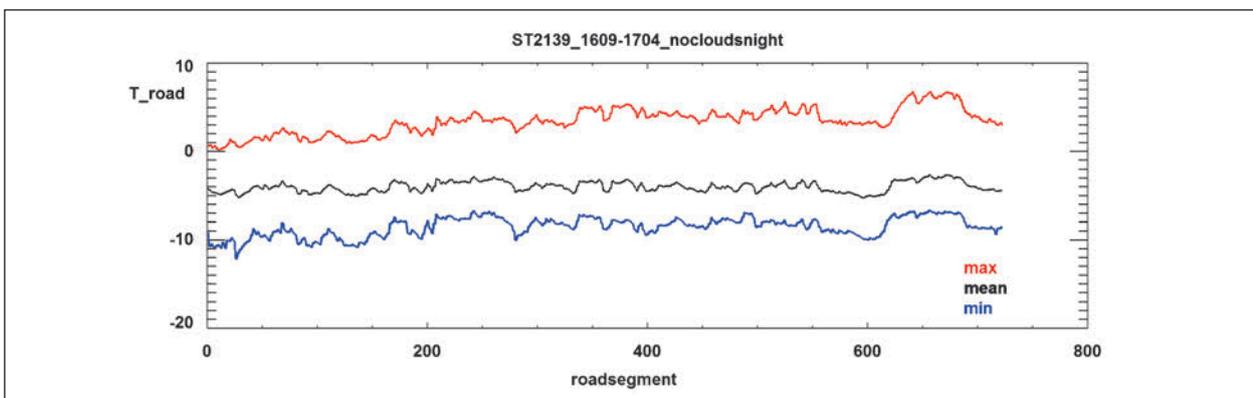


Bild 144: Standardstreckenprofil der Straßentemperatur für unbewölkte Nächte (St2139, berechnet mit Messfahrten 2016/17)

lich sein. Berechnet man nämlich für jede Klasse eine systematische Abweichung, kann diese später wiederum als Kalibrierungsfaktor für die Prognose dienen. Diese saubere Kalibrierung ist wichtiger als, die Veränderungen entlang des Streckenprofils, was leicht zu begründen ist, da die Variabilität der meisten Fahrten geringer ist als die Fehler der Validierungen VAL 3-RT-1-12h – VAL 3-RT-5-12h.

Um die Funktionsweise zu beweisen, wurden die Prognosen für die Saison 2016/2017 mithilfe der Standardprofile aus der Saison 2015/2016 berechnet. Als Referenz sind die Ergebnisse der Validierungen VAL 3-RT-3-12h weiterhin gültig. Es wurden insgesamt vier verschiedene Validierungen vorgenommen:

1. Validierung von Modellprognose + klassifiziertes Standardstreckenprofil (VAL 3-RT-6-12h),
2. Validierung von Modellprognose + klassifiziertes Standardstreckenprofil inkl. BIAS (VAL 3-RT-7-12h),
3. Validierung von Messwert + klassifiziertes Standardstreckenprofil inkl. BIAS (VAL 3-RT-8-1h),
4. Validierung von Messwert (VAL 3-RT-9-1h).

Die Validierung VAL 3-RT-6-12h (vgl. Tabelle 91) erzielt keine Verbesserungen im Vergleich zu einfachen Methoden (VAL 3-RT-2-12h, Tabelle 88 und VAL 3-RT-3-12h, Tabelle 87) den Referenzvalidierungen (VAL 3-RT-4-12h, Tabelle 88 und VAL 3-RT-5-12h, Tabelle 89). Dabei wird schnell ersichtlich, dass innerhalb der einzelnen Klassen hohe systematische Fehler auftreten. So liegt der BIAS für Tage mit mittlerer oder starker Bewölkung bei mehr als -3 °C und auch für unbewölkte Nächte ist ein BIAS von -2.35 °C zu sehen. Somit ist zu erwarten, dass sich durch die Korrektur der BIAS Werte eine deutliche Verbesserung erzielen lässt.

Für diese Korrektur wurden ebenfalls die Werte aus dem Vorjahr berechnet. Das bedeutet: für jedes Standardprofil aus der Saison 2015/2016 wurde eine systematische Abweichung berechnet, welche nun als Korrekturfaktor auf das jeweilige Prognoseprofil angewendet wurde. Die entsprechenden Validierungsergebnisse sind in Tabelle 92, VAL 3-RT-7-12h zu sehen. Die systematischen Fehler konnten in allen Klassen unter 1.5 °C gesenkt werden. Die Prognose weist mit einem MAE von 1.92 °C und einem RMSE von 2.502 °C eine Verbesserung von $0.2\text{°}-0.3\text{°}$ zu den Referenzvalidierungen auf.

Klassen	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte
Alle Profile	- 1.022	2.148	2.987	2.807	87347
cloudyday	0.355	1.196	1.462	1.418	16746
cloudynight	- 0.24	1.336	1.78	1.763	28819
halfcloudyday	- 3.07	4.2	4.59	3.407	2892
halfcloudynight	0.642	2.789	3.564	3.505	6282
nocloudsday	- 3.66	3.747	4.659	2.878	5061
nocloudsnight	- 2.35	2.921	3.82	3.006	27547

Tab. 91: Validierung von Modellprognose + klassifiziertes Standardstreckenprofil (VAL 3-RT-6-12h)

Klassen	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte
Alle Profile	- 0.153	1.92	2.502	2.497	87347
cloudyday	0.109	1.183	1.422	1.418	16746
cloudynight	- 0.48	1.383	1.827	1.763	28819
halfcloudyday	- 1.42	3.372	3.693	3.407	2892
halfcloudynight	- 0.13	2.703	3.508	3.505	6282
nocloudsday	- 1.1	2.599	3.083	2.878	5061
nocloudsnight	0.332	2.473	3.024	3.006	27547

Tab. 92: Validierung von Modellprognose + nach Tag/Wolken klassifiziertes Standardstreckenprofil + BIAS (VAL 3-RT-7-12h)

Klassen	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte
Alle Profile	- 0.032	0.544	0.758	0.758	87347
cloudyday	- 0.13	0.473	0.661	0.648	16746
cloudynight	- 0.04	0.355	0.486	0.484	28819
halfcloudyday	- 0.1	0.491	0.677	0.668	2892
halfcloudynight	-0.04	0.764	0.974	0.973	6282
nocloudsday	0.028	0.606	0.855	0.855	5061
nocloudsnight	0.041	0.728	0.955	0.954	27547

Tab. 93: Validierung von Messwert + nach Tag/Wolken klassifiziertes Standardstreckenprofil + BIAS (VAL 3-RT-8-1h)

10.1.8 Nowcasting mit klassifizierten Standardstreckenprofilen

Wie weiter oben beschrieben, ist die Abweichung des Startwertes häufig höher als die Temperaturschwankungen entlang des Streckenprofils. Daher wurde nun geprüft, welche Prognosequalität sich erreichen ließe, wenn ein aktueller Messwert zur Verfügung steht. Beispielsweise liegt der Messwert einer entlang der Strecke liegenden Straßenwetterstation vor. Mit diesem Messwert wird nun eine Profilprognose für das Streckenprofil mithilfe eines klassifizierten Standardstreckenprofils erstellt.

Die entsprechenden Ergebnisse zeigen einen MAE von nur noch 0.544 °C bei einem RMSE von

0.758 °C und nahezu ohne systematischen Fehler (vgl. Tabelle 93 VAL 3-RT-8-1h). Daraus lässt sich zunächst die Hypothese belegen, dass absolute Abweichungen der Temperaturprognose größer sind als die Variabilität entlang der Strecke. Es könnte allerdings auch sein, dass unsere Methodik die Variabilität entlang der Strecke nahezu perfekt abbildet. Daher wurde noch eine weitere Validierung VAL 3-RT-9-1h durchgeführt, welche für alle Straßensegmente dieselbe Prognose verwendet, nämlich den „entsprechenden Messwert“. Diese Prognose stellt also einen konstanten Wert entlang der Strecke dar, der aus Messwerten abgeleitet ist. Die Prognosefehler aus einer solchen statischen Prognose sind in Tabelle 94, VAL 3-RT-9-1h zu

Klassen	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte
Alle Profile	- 0.034	0.668	0.883	0.883	87347
cloudyday	- 0.12	0.686	0.923	0.914	16746
cloudynight	- 0.04	0.509	0.647	0.645	28819
halfcloudyday	- 0.1	0.683	0.874	0.867	2892
halfcloudynight	- 0.05	0.629	0.821	0.819	6282
nocloudsday	0.028	0.745	0.971	0.971	5061
nocloudsnight	0.036	0.815	1.054	1.054	27547

Tab. 94: Validierung von Einzelmesswert (VAL 3-RT-9-1h)

sehen. Der MAE liegt mit 0.668 °C um etwa 0.15 °C höher als mithilfe des Standardstreckprofils. So gering dieser Unterschied erscheinen mag, wird die Prognose durch die Anwendung des Standardstreckenprofils immerhin um fast 20 % verbessert.

Entgegen der Erwartung, dass sich das Profil in unbewölkten Fällen stärker auswirkt, sind die Effekte über alle Klassen hinweg gleichmäßig ausgeprägt.

Es wurde auch geprüft, ob die Methode mit lediglich vier Klassen ebenfalls funktioniert. Dabei wurde nur noch bewölkt und wolkenlos unterschieden mit einem Grenzwert von 25 % Bewölkung. Der MAE lag bei 2.02 für ein Prognosemodell vergleichbar mit VAL 3-RT-8-1h. Somit schneidet eine Klassifizierung mit vier Klassen etwas schlechter ab und bringt nur leichte Verbesserungen gegenüber einer Prognose ohne Streckenprofil. Sind nur wenige Messfahrten verfügbar, könnte diese Klassifikation aber von Vorteil sein.

10.1.9 Andere klassifizierte Standardstreckenprofile

Um die Bedeutung der Ergebnisse aus dem vorigen Kapitel einzuordnen, wurden nun noch andere Klassifizierungen erprobt. Diese sollen nun verkürzt betrachtet werden, dabei werden nur Fehlergrößen betrachtet, die direkt mit VAL 3-RT-7-12h vergleichbar sind. Zunächst wurde eine Klassifizierung anhand der Temperatur mit 5 Klassen ausprobiert (vgl. Tabelle 95).

Die Temperaturklassifikation bringt keine großen Verbesserungen, da die systematischen Fehler in den jeweiligen Klassen sehr hoch ausfallen (vgl. Tabelle 96, VAL 3-RT-10-12h). Die Begründung hierfür liegt darin, dass diese systematischen Abweichungen in den beiden Jahre unterschiedlich sind. Durch die Übertragung dieser Werte aus dem Vorjahr

bleibt somit noch ein hoher systematischer Fehler bestehen. Betrachtet man die Standardprofile, wird auch ersichtlich, dass man die Profile mit starken Schwankungen, welche bei wolkenlosen Bedingungen auftreten, nicht isolieren kann. Die Temperatur ist lediglich das Produkt einer komplexen Kette von Faktoren, welche nicht die Systematik und die Veränderung der Strassentemperatur mit der Zeit erklärt. Eine systematische Klassifizierung der beeinflussenden Faktoren ist sinnvoller und somit ist die Klassifikation nach Temperatur als unbrauchbar zu bewerten.

Die Klassen sind gleichmäßig verteilt und daher war die Idee, zusätzlich zur Temperatur noch die Einstrahlungsbedingungen zu berücksichtigen. Zunächst wurde diese Temperaturklassifikation mit der verfügbaren Einstrahlung der letzten beiden Stunden kombiniert. Es wurden für alle 5 Temperaturklassen nochmals 4 Strahlungsklassen (0 Wh, > 200 Wh, > 1.000 Wh, >1.000 Wh) gebildet. Daraus resultieren 20 verschiedene Klassen, wobei das Problem entstand, dass einigen Klassen gar keine oder nur eine einzige Messfahrt zugeordnet werden konnte. Diese wurde mit einem Generalprofil abgedeckt, um die Methodik dennoch validieren zu können. Die entstandenen Fehlerwerte sind noch höher (MAE = 2.315 °C) als die der Temperaturklassifizierung, mit hohen systematischen Fehlern in den einzelnen Klassen.

Als weitere Klassifikation wurde der Fühlbare (Sensible) Wärmestrom, also die Energie, welche für die Erwärmung der Luft verantwortlich ist, untersucht, da dieser stark von der Ein- und Ausstrahlung abhängig ist und somit die Bedingungen unterschiedlich variabler Streckenprofile gut repräsentiert. In Kombination mit der Temperaturklassifizierung lässt sich der Fehler (MAE = 2.209 °C) mit dieser Methodik zwar leicht reduzieren, allerdings bleiben hohe systematische Fehler innerhalb der Klassen und

Klassen	Kriterium	Kürzel	Messfahrten 2015/2016	Messfahrten 2016/2017
Kalter Frost	Unter - 4 °C	T-4	9	22
Frost	- 4 °C – - 1 °C	T-4-1	9	19
Gefrierpunkt	- 1 °C – 1 °C	T-1+1	44	42
Knapp über Null	+ 1 °C – 3 °C	T+1+3	23	19
Kein Frostrisiko	Über + 3 °C	T+3	15	23
Nachts wolkenlos	(Bewölkung < 20 %)	nocloudsnight	10	40

Tab. 95: Temperaturklassifikation

Klassen	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte
Alle Profile	0.1329	2.256	2.946	2.943	87347
T-4	- 3.47	3.703	4.409	2.714	14669
T-4-1	1.478	2.286	2.875	2.466	13729
T-1+1	1.361	1.95	2.599	2.214	30360
T+1+3	0.464	1.979	2.566	2.523	13737
T+3	- 0.36	1.681	2.071	2.038	14852

Tab. 96: Validierung von Modellprognose + klassifiziertes Standardstreckenprofil inkl. BIAS (VAL 3-RT-10-12h)

Klassen	Kriterium	Kürzel	Messfahrten 2015/2016	Messfahrten 2016/2017
Strahlungsnacht	Unter - 30 W/m ²	F-30	8	5
Halbstrahlungsnacht	- 30 W/m ² – 5 W/m ²	F-30-5	34	62
Wolkenfahrt	- 5 W/m ² – 5 W/m ²	F-5+5	29	28
Wolkentag	5 W/m ² – 30 W/m ²	F+5+30	23	22
Strahlungstag	Über 30 W/m ²	F+30	6	8

Tab. 97: Klassifikation anhand des sensiblen Wärmestromes

Klassen	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Stddev [°C]	Messpunkte
Alle Profile	- 0.002	1.948	2.594	2.594	87347
F-30	- 2.1	2.651	3.53	2.833	3607
F-30-5	0.194	2.255	2.935	2.929	42511
F-5+5	- 0.47	1.748	2.293	2.244	19539
F+5+30	0.25	1.507	1.946	1.93	15906
F+30	0.761	1.151	1.524	1.321	5784

Tab. 98: Validierung von Modellprognose + nach Wärmestrom klassifizierte Standardstreckenprofile + BIAS (VAL 3-RT-10-12h)

auch das Problem, dass nicht alle Klassen abgebildet werden können.

Bessere Ergebnisse erhält man, wenn man nur den sensiblen Wärmestrom zur Klassifikation verwendet. Es wurden 5 Klassen gebildet (vgl. Tabelle 97). Trotz teilweise hoher systematischer Fehler insbesondere für Strahlungsnächte (vgl. Tabelle 98, VAL 3-RT-10-12h) schneidet diese Klassifikationsme-

thode mit einem durchschnittlichen Fehler von unter 2 °C (MAE = 1.948 °C) sehr gut ab. Die Prognosequalität ist mit der von VAL 3-RT-7-12h vergleichbar. Ein entsprechendes Nowcasting äquivalent zu VAL 3-RT-8-1h kommt auf einen Fehler von 0.57 °C.

Somit weist diese Methodik nur minimale Abweichungen zur Bewölkungsklassifikation auf und ist daher ebenso gut geeignet.

10.1.10 Fazit

Die Prognose der Straßentemperatur lässt sich mithilfe von gemessenen Streckenprofilen etwas verbessern. Der mittlere absolute Fehler sinkt im Vergleich zu einer Modellprognose (Stand der Technik) von 2,13 °C (Adiabatisches Downscaling, Methode VAL 3-RT-3-12h) auf 1,92 °C mittels Streckenprofilen nach Tag/Nacht und Bewölkung mit 5 Klassen und BIAS Korrektur (VAL 3-RT-7-12h) um ca. 10 %. Um dies zu erreichen, klassifiziert man die Profile nach Bewölkung und Tag-/Nacht; alternativ kann zur Klassifikation auch der sensible Wärmestrom verwendet werden (VAL 3-RT-10-12h).

Deutlich stärkere Verbesserungen erzielt das nowcasting (VAL 3-RT-8-1h). Dabei sinkt der Fehler um ca. 70 % auf 0,54 °C. Dieser Qualität wird sich jedoch nicht für die Dauer von 12 Stunden in die Zukunft halten lassen. In der Praxis ist damit zu rechnen, dass mit Nowcasting (also der Verwendung eines aktuellen Punkt-Messwertes vor Beginn der Fahrt) die durchschnittliche Fehlerquote auf ca. 1,2 °C (Mittelwert zwischen 0,54 und 1,92) senken.

10.2 Vergleich verschiedener Methoden zur Verbesserung der Prognose der Wasserfilmdicke

Mithilfe der Messprofile der Wasserfilmdicke sollte untersucht werden, welche Möglichkeiten es zur Verbesserung der Prognose gibt, ähnlich der bereits mit Straßentemperatur durchgeführten. Die Analysen der im Rahmen des Forschungsprojektes gelieferten Prognosen in Kapitel 9.4.4 hatten ergeben, dass deren Qualität verbessert werden sollen, um die Planung von Streufahrten zu verbessern und bessere Pläne für Streumengenverteilung zu erstellen, weshalb dieses Thema intensiver betrachtet wurde.

10.2.1 Wasserfilmdicke anhand Niederschlag

Wetterprognosedaten kommen zunächst aus dem Wettermodell und diese liefern standardmäßig den Niederschlag innerhalb einer Gitterzelle. Die einfachste Methode, um die Höhe des Wasserfilmes zu berechnen ist, diese Niederschlagswerte (P) mit einem Nässekoeffizienten (γ) zu multiplizieren:

$$WFH = \gamma \times P$$

Klassifikation (Klassen)	Kürzel	BIAS [°C]	MAE [°C]	RMSE [°C]	Tabelle
Bester Anbieter (indirekter Vergleich, nur 22'282 Messpunkte)	VAL 2-RT-3	- 0.966	1.912	2.51	Tabelle 76
Adiabatisches Downscaling (Stand der Technik)	VAL 3-RT-3-12h	- 0.058	2.13	2.762	Tabelle 87
Downscaling + klassifiziertes Standardstreckenprofil	VAL 3-RT-5-12h	0.026	2.079	2.67	Tabelle 89
Nach Tag/Wolken (5)	VAL 3-RT-6-12h	- 1.022	2.148	2.987	Tabelle 91
Nach Tag/Wolken + BIAS (5)	VAL 3-RT-7-12h	- 0.153	1.920	2.502	Tabelle 92
Messwert + nach Tag/Wolken	VAL 3-RT-8-1h	- 0.032	0.544	0.758	Tabelle 93
Sensiblen Wärmestrom (5)	VAL 3-RT-10-12h	- 0.002	1.948	2.594	Tabelle 96

Tab. 99: Vergleich verschiedener Methoden für die Streckenprognose der Straßen-Temperatur, anhand von BIAS, MAE und RMSE aller Streckenprofile (VAL 3-RT-10-12h) an 87'347 Messpunkten

Methode	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Stddev [μ]	Messpunkte	Prognosepunkte
VAL-3-WFH-1-12h	- 32.18	106.7	208.2	205.7	87345	5
VAL-3-WFH-2-12h	- 24.4	100.9	194.7	193.2	87345	1
VAL-3-WFH-3-12h	- 32.18	106.7	208.2	205.7	87345	5
VAL-3-WFH-4-12h	- 59.77	93.99	175.4	164.9	87345	1
VAL-3-WFH-5-12h	- 25.00	100.3	185.9	184.2	87345	5
VAL-3-WFH-6-12h	- 25.91	97.04	175.9	174	87345	1

Tab. 100: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose berechnet, ohne Messdaten, mit Nässefaktoren für unterschiedliche Niederschlagsmengenklassen

Wie bereits für Straßentemperatur wurden als Referenz zunächst einfache Modelle für die Periode 01.09.2016-30.04.2017 berechnet und getestet. Dabei wurde der Niederschlag aus 5 verschiedenen Gitterzellen entlang des Streckenprofils entweder räumlich den Streckensegmenten zugeordnet, oder als Mittelwert auf alle Segmente angewendet und mit unterschiedlichen Nässekoeffizienten multipliziert:

1. Niederschlag aus 5 verschiedenen Gitterzellen multipliziert mit $\gamma = 0.5$ (VAL-3-WFH-1-12h),
2. Niederschlag aus 5 Zellen gemittelt multipliziert mit $\gamma = 0.5$ (VAL-3-WFH-2-12h),
3. Niederschlag aus 5 verschiedenen Gitterzellen, mit $\gamma = 0.2$ für Regen & Starkregen, und $\gamma = 0.5$ für Schauer (VAL-3-WFH-3-12h),
4. Niederschlag aus 5 Zellen gemittelt, mit $\gamma = 0.2$ für Regen & Starkregen, und $\gamma = 0.5$ für Schauer (VAL-3-WFH-4-12h),
5. Niederschlag aus 5 verschiedenen Gitterzellen, mit $\gamma = 0.2$ für Starkregen, $\gamma = 0.5$ für Regen, und $\gamma = 0.8$ für (VAL-3-WFH-5-12h),
6. Niederschlag aus 5 Zellen gemittelt, mit $\gamma = 0.2$ für Starkregen, $\gamma = 0.5$ für Regen, und $\gamma = 0.8$ für Schauer (VAL-3-WFH-6-12h).

Den Methoden 2-6 liegt die Annahme zugrunde, dass die Abflussmenge höher ist, je stärker es regnet. Somit trägt ein geringerer Teil des Niederschlags zur Wasserfilmdicke bei, weshalb mit zunehmender Niederschlagsmenge ein geringer Umrechnungsfaktor γ angewendet wird. Bei den Validierungen VAL-3-WFH-3-12h & VAL-4-WFH-3-12h wurden einfach 2 Abstufungen gemacht (Schauer & Regen, vgl. Tabelle 101) während bei VAL-5-WFH-6-12h & VAL-3-WFH-5-12h alle vier verschiedenen Abstufungen aus Tabelle 101 angewendet wurden. Um eine einfachere Berechnung zu ermöglichen, wurde dafür das Wasserfilmdickemodell vereinfacht (siehe Kapitel 8.3.3).

Die Ergebnisse dieser Referenzvalidierungen (vgl. Tabelle 100) sind bereits sehr vielversprechend, liegen sie doch bis zu 50 % tiefer als die besten Ergebnisse aus Kapitel 9.4.4 (MAE = 145 μ Tabelle 82, VAL 2-WFH-1). Dabei schneiden immer die Methoden besser ab, bei denen der Niederschlag aller Gitterzellen entlang der Strecke gemittelt wird. Dies erscheint zunächst überraschend, da eine höhere räumliche Auflösung auch eine höhere Präzision erwarten lässt. Allerdings ist die Ungenauigkeit bei Niederschlagsprognosen höher, weil es dem Wettermodell häufiger nicht gelingt, Wolken- bzw. Niederschlagsfelder zeitlich und räumlich exakt zuzuordnen. Dadurch werden letztlich die Fehlergrößen geringer, wenn man die entsprechenden Werte aus den benachbarten Gitterzellen mittelt. Die zweite wichtige Erkenntnis ist, dass der Nässekoeffizient γ bei stärkeren Niederschlägen geringer ist. Wie schon erwähnt, ist das insofern logisch, dass der Abfluss entsprechend höher ist und somit weniger Wasser auf der Straße verbleibt. Als Referenz für alle weiteren Methoden gilt nun VAL-3-WFH-4-12h mit einem MAE von 94 μ .

Somit sind die wichtigsten Erkenntnisse:

1. Durch Mittelwertbildung mehrerer Gitterzellen erhöht sich die Genauigkeit der Niederschlagsprognose für die Wasserfilmdicke (WFD).
2. Es ist sinnvoll, für starke Niederschläge einen geringeren Umrechnungsfaktor für die Berechnung von Wasserfilmdicke (WFH) anzuwenden.

Klasse	Kriterium	Kürzel	Messfahrten 2015/2016	Messfahrten 2016/2017
Trocken	0 mm/5 h	P-0	38	73
Schauer	< 5 mm/5 h	P+0	52	37
Regen	5 mm – 10 mm/5 h	P+5	8	12
Starkregen	> 10 mm/5 h	P+10	2	3

Tab. 101: Klassifikation der Niederschlagsprognosen in 5 mm Klassen, mit Anzahl Messfahrten zur Überprüfung

10.2.2 Klassifizierte Standardstreckenprofile anhand Niederschlag

In einem nächsten Schritt wurden nun anhand der Messdaten der Wasserfilmdicke klassifizierte Standardprofile berechnet, wie bereits anhand der Straßentemperatur erfolgreich durchgeführt. Für die Klassifikation wurde zunächst die Niederschlagssumme der vergangenen 5 Stunden verwendet. Da Niederschlag deutlich höhere Fehler aufweist, bringt die Klassifikation anhand der Wettermodell- daten einige Schwierigkeiten mit sich. So sind die Klassifikationen selbst schon viel stärker fehlerbehaftet als bspw. bei der Straßentemperatur. Es wurden vier Klassen gebildet im Abstand von 5 mm/5 h (vgl. Tabelle 101).

Für die Validierung der Profile wurde zunächst die beste Methode aus der Validierung ohne Profile verwendet (VAL-3-WFH-4-12h). Auf diesen entlang der Strecke unveränderlichen Werten wurde nun für jede Messfahrt das passende klassifizierte Standardprofil addiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 102 ersichtlich (VAL-3-WFH-7-12h). Der MAE liegt bei 91 μ und ist somit um 3 μ geringer im Vergleich zur Referenz. Dies ist vermutlich einem verringerten

systematischen Fehler zu verdanken, der statt -60 μ nur noch -27 μ beträgt. Dennoch sind die erreichten Verbesserungen gering. Ein Grund dafür könnte in der Wahl der Klassen liegen, schließlich sind für die Definition der Klasse Starkregen nur 2 Messfahrten verfügbar. Daher wurde noch eine weitere Klassifikation mit anderen Grenzwerten berechnet und getestet. Dabei wurden die Grenzwerte so gesetzt, dass in der kleinsten Klasse Starkregen, wenigstens 6 Messfahrten zur Verfügung stehen (vgl. Tabelle 103). Dabei wurden Klassen im Abstand von 3 mm/5h gebildet.

Die Ergebnisse der Validierung zeigen ein interessantes Bild (vgl. Tabelle 104, VAL-3-WFH-7-12h). So liegt der MAE über alle Profile leicht geringer als in der ersten Niederschlagsklassifikation. Dabei verbessern sich die Prognosen in den Klassen P+0 und P+3, welche nun 41 statt 52 resp. 13 statt 8 Messfahrten beinhalten. Für die Klasse Starkregen P+6, wo Verbesserungen zu erwarten waren nehmen die Fehlergrößen hingegen zu, sowohl im Vergleich zu P+5 als auch im Vergleich zu P+10. Im Vergleich zur Referenz ist der MAE um 4 μ geringer.

Klasse	Kriterium	Kürzel	Messfahrten 2015/2016	Messfahrten 2016/2017
Trocken	0 mm/5 h	P-0	38	73
Schauer	< 5 mm/5 h	P+0	52	37
Regen	5 mm – 10 mm/5 h	P+5	8	12
Starkregen	> 10 mm/5 h	P+10	2	3

Tab. 101: Klassifikation der Niederschlagsprognosen in 5 mm Klassen, mit Anzahl Messfahrten zur Überprüfung

Klassen	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Stddev [μ]	Messpunkte	Prognosepunkte
Alle Profile	- 27	91.23	162	159.7	87345	723
P0	- 14.2	27.43	73.48	72.09	50359	723
P+0	- 60.1	166	226.7	218.6	26141	723
P+5	8.286	208.4	248.3	248.2	8676	723
P+10	- 65	202.3	255.5	247	2169	723

Tab. 102: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose (VAL-3-WFH-4-12h) in 5 mm Klassen + Standardprofil berechnet (VAL-3-WFH-7-12h)

Klassen	Kriterium	Kürzel	Messfahrten 2015/2016	Messfahrten 2016/2017
Trocken	0 mm/5 h	P-0	38	73
Schauer	< 3 mm/5 h	P+0	41	27
Regen	3 mm – 6 mm/5 h	P+3	13	15
Starkregen	> 6 mm/5 h	P+6	6	10

Tab. 103: Niederschlagsklassifikation mit 3 mm Klassen

Klassen	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Stddev [μ]	Messpunkte	Prognosepunkte
Alle Profile	- 32.27	90.07	162.4	159.1	87345	723
P0	- 26.4	27.28	76.85	72.17	50359	723
P+0	- 64.8	155.4	220.2	210.5	19521	723
P+3	- 24.5	180.8	236.6	235.3	10235	723
P+6	3.956	222.4	259.3	259.3	7230	723

Tab. 104: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose (VAL-3-WFH-4-12h) in 3 mm Klassen + Standardprofil (VAL-3-WFH-8-12h)

Klasse	Kriterium	Kürzel	Messfahrten 2015/2016	Messfahrten 2016/2017
Bewölkt	(Bewölkung > 65 %)	cloudy	63	65
Heiter-wolkig	(Bewölkung 20 % – 65 %)	halfcloudy	21	13
Wolkenlos	(Bewölkung < 20 %)	noclouds	16	47

Tab. 105: Bewölkungsklassifikation

Klassen	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Stddev [μ]	Messpunkte	Prognosepunkte
Alle Profile	- 21.24	95.80	162.30	160.90	87345	723
cloudy	- 33.70	153.20	209.00	206.30	45563	723
halfcloudy	- 54.20	83.57	170.80	161.90	9174	723
noclouds	5.52	18.95	36.45	36.03	32608	723

Tab. 106: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose (VAL-3-WFH-4-12h) + Standardprofil berechnet, anhand Bewölkung VAL-3-WFH-9-12h

10.2.3 Klassifizierte Standardstreckenprofile anhand Bewölkung

Da Bewölkung räumlich homogener auftritt, wurde geprüft, ob eine Klassifikation nach der Bewölkung bessere Prognosen ermöglicht. Hierbei wurden die Bewölkungsklassen aus Kapitel 10.1.7 verwendet, wobei keine Unterscheidung in Tag oder Nacht vorgenommen wurde. Somit ergeben sich 3 Klassen wie in Tabelle 105 beschrieben. Die Validierungsergebnisse zeigen, dass der Fehler mit einem MAE 95.8 μ etwas höher liegen (vgl. Tabelle 106 VAL-3-WFH-9-12h), als der Referenzwert aus VAL-3-WFH-4-12h. Somit kann diese Klassifikationsmethode verworfen werden, da bereits ohne eine Klassifikation bessere Prognosen erzielt werden.

10.2.4 Fazit zu klassifizierten Standardstreckenprofilen

Daraus können nun abschließend einige wichtige Schlüsse gezogen werden. Zunächst ist Niederschlag die wichtigste Variable zur Bestimmung der

Wasserfilmdicke. Da Niederschlagsprognosen große Ungenauigkeiten mit sich bringen ist eine Klassifikation deutlich ungenauer als im Bereich der Temperatur. Das bedeutet, dass sich innerhalb einer Klasse immer auch Ausreißer befinden, und zwar an allen Fahrten, wenn Niederschläge fehlerhaft prognostiziert wurden.

Dennoch konnte eine ordentliche Prognose erstellt werden. Dies gelang vor allem mithilfe einer einfachen Annahme: Je mehr Niederschlag fällt desto schneller fließt das Wasser ab und entsprechend geringer ist der Nässekoeffizient γ , definiert als Umrechnungsfaktor von Niederschlag in Wasserfilmdicke. Somit ist also der Abfluss von entscheidender Bedeutung für die Berechnung der Wasserfilmdicke. Die Abflusseigenschaften der Straße wiederum sind natürlich von ihrer Topografie und insbesondere der Neigung abhängig. Diese ist unveränderlich, weshalb es dennoch möglich sein sollte mithilfe der Messdaten die Abflusseigenschaften für jedes Streckensegment zu berechnen, um somit die Prognose zu verbessern.

10.2.5 Berechnung der Wasserfilmdicke für jedes Straßensegment mit Nässekoeffizienten

Daraus wurde nun wiederum ein neues Konzept entwickelt. Das Ziel war dabei für jedes Straßensegment einen Umrechnungskoeffizienten zu bestimmen. Zu diesem Zwecke wurde die mittlere Wasserfilmdicke aller Profildfahrten für jedes Straßensegment berechnet. Betrachtet man nun diese mittlere Wasserfilmdicke aller Segmente sieht man, dass sich die Segmente sehr unterschiedlich verhalten (vgl. Bild 145). Um diese Information nun mit der Niederschlagsintensität in einem neuen Prognosemodell zu verknüpfen wurden die Umrechnungsfaktoren aus der Niederschlagsklassifikation mit 3 mm Klassen übernommen. Die mittlere Wasserfilmdicke wurde auf einen Mittelwert von eins skaliert

und mit den Umrechnungskoeffizienten der Niederschlagsklassen multipliziert. Nun wurde für jedes Messprofil des Folgejahres eine Prognose anhand des Niederschlags berechnet, indem dieser mit dem jeweiligen Faktor für jedes Segment separat berechnet wurde. Die Validierungsergebnisse sind in Tabelle 107 (VAL-3-WFH-10-12h) zu sehen.

Diese Methode ermöglicht nochmal eine geringe Verbesserung von etwa 3,5 % gegenüber der Methodik mit den Standardprofilen. Im Vergleich zur Referenzprognose ohne Standardprofil (VAL-3-WFH-4-12h) beträgt die Verbesserung knapp 10 %. Diese Methodik lässt sich natürlich auch auf einzelne Klassen anwenden. Dabei berechnet man die mittlere Wasserfilmdicke eben nicht für alle Fahrten, sondern für die einzelnen Klassen, äquivalent zu den klassifizierten Standardstreckenprofilen.

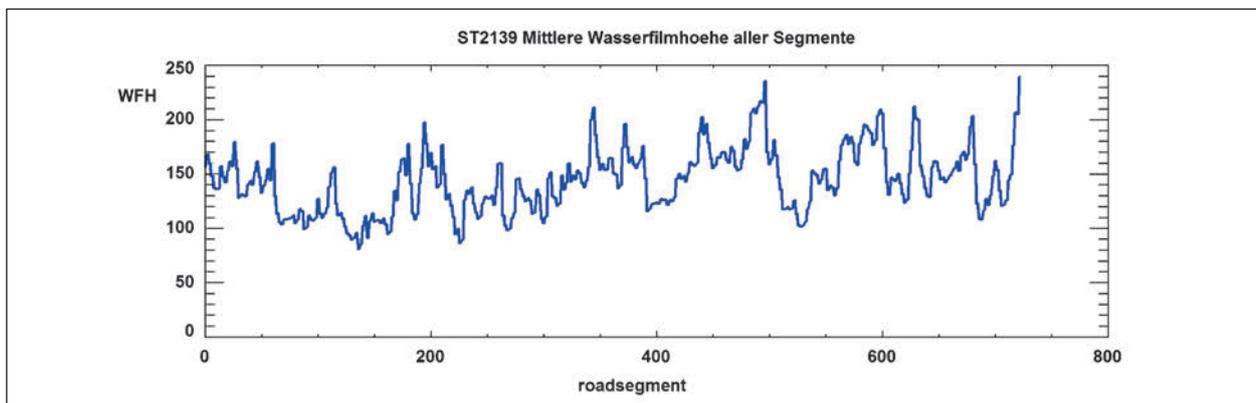


Bild 145: Die Wasserfilmdicke in μ aller Messfahrten als Mittelwert für jedes Straßensegment

Klassen	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Stddev [μ]	Messpunkte	Prognosepunkte
Alle Profile	- 32.23	87.37	159.8	156.5	87345	723
P0	- 26.3	26.38	77.05	72.39	50359	723
P+0	- 64.8	151.6	217.9	208	19521	723
P+3	- 24.2	174.3	228.7	227.4	10235	723
P+6	3.956	215.4	255.1	255.1	7230	723

Tab. 107: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose und Nässekoeffizienten für jedes Straßensegment (VAL-3-WFH-10-12h)

Klassen	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Stddev [μ]	Messpunkte	Prognosepunkte
Alle Profile	- 32.26	88.94	163.1	159.9	87345	723
P0	- 26.3	26.38	77.05	72.39	50359	723
P+0	- 64.8	152	219.5	209.7	19521	723
P+3	- 24.5	184	241.1	239.8	10235	723
P+6	3.956	219.5	260.1	260.1	7230	723

Tab. 108: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose und klassifizierten Nässekoeffizienten für jedes Straßensegment (VAL-3-WFH-11-12h)

Dies wurde durchgeführt und bewertet (vgl. Tabelle 108, VAL-3-WFH-11-12h), wobei die Fehlergrößen minimal höher liegen als VAL-3-WFH-10-12h. Daher genügt es bei dieser Methodik den Nässefaktor einmalig für jedes Straßensegment zu berechnen. Natürlich sollte man darauf achten mindestens 5 Messfahrten für jede Niederschlagsklasse zu haben.

10.2.6 Berechnung der Wasserfilmdicke für jedes Straßensegment mit aktuellen Messungen

Abschließend soll für die beste Methodik (VAL-3-WFH-10-12h) ein Nowcasting bewertet werden. Nowcasting ist eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste Vorhersage mit einem Vorhersagehorizont von maximal 6 Stunden. Da keine gesicherten Niederschlagsmessungen zur Verfügung standen, wurde die mittlere Wasserfilmdicke der jeweiligen Messfahrt als Messwert verwendet. Bei der Interpretation der Daten muss berücksichtigt werden, dass die in der Realität verfügbaren Messwerte weniger präzise sind. Zudem ist die Methodik nur anwendbar, wenn Niederschlags- oder Wasserfilmdickenmessungen verfügbar sind. Zur weiteren Verbesserung könnte man die Klassifikation der Niederschlagsintensität zur Bestimmung des Nässekoeffizienten γ auf Basis der Messwerte vornehmen. Daher werden die folgenden Ergebnisse wichtige Erkenntnisse ermöglichen, um die Methodik einzuordnen.

Als Referenz dieser Nowcastingmethode wurde die mittlere Wasserfilmdicke als Prognose für alle Streckensegmente verwendet und entsprechend validiert (VAL-3-WFH-11-1h). Diese Referenz-Validierung zeigt letztlich die Variabilität der Wasserfilmdicke entlang der Strecke, welche 48 μ beträgt (vgl. Tabelle 109). Dass dieser Wert plausibel ist, lässt sich wiederum bei der Betrachtung der mittleren Wasserfilmdicke erkennen (vgl. Bild 145). Optimiert man nun die Prognose, indem man den statischen Messwert multipliziert mit spezifischen Faktoren für jedes Streckensegment, lässt sich der Prognosefehler um 10 % verringern (vgl. Tabelle 110, VAL-3-WFH-12-1h). Der entsprechende Prognosefehler liegt dann noch bei 43.6 μ , was vermutlich auch im realen Betrieb zu erreichen ist, vorausgesetzt dass hochwertige Niederschlags- oder Wasserfilmmessungen der letzten Stunde zur Verfügung stehen.

10.2.7 Fazit

Die Prognose der Wasserfilmdicke lässt sich mithilfe von mobilen Messungen deutlich (mehr als die Temperaturvorhersage) verbessern. Die Fehlergrößen an der Straße ST2139 konnten in der Saison 2016/2017 von 187 μ (Stand der Technik) auf 87 μ verringert werden.

Die 3 Möglichkeiten sind:

1. Umrechnung der Niederschlagsprognosen in Wasserfilmdicke (WFD bzw. WFH) anhand ge-

Klassen	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Stddev [μ]	Messpunkte	Prognosepunkte
Alle Profile	- 2.085	48.06	89.69	89.69	-2.085	723
P0	- 1.49	71.26	110.8	110.8	-1.49	723
P+0	1.581	111.8	144.7	144.7	1.581	723
P+3	3.12	113.7	144.1	144.1	3.12	723
P+6	- 2.29	16.66	44.23	44.23	-2.29	723

Tab. 109: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Mittelwert der Wasserfilmmessung (VAL-3-WFH-11-1h)

Klassen	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Stddev [μ]	Messpunkte	Prognosepunkte
Alle Profile	0.0372	43.58	80.74	80.74	87345	723
P0	3.719	63.01	98.76	98.76	19521	723
P+0	0.373	99.61	131.1	131.1	10235	723
P+3	7.657	104.3	129.3	129.3	7230	723
P+6	- 0.01	15.94	40.34	40.34	50359	723

Tab. 110: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Mittelwert der Wasserfilmmessung und Nässekoeffizienten für jedes Straßensegment (VAL-3-WFH-12-1h)

Klassifikation (Klassen)	Kürzel	BIAS [μ]	MAE [μ]	RMSE [μ]	Tabelle
FORECA x0.4 (bester Anbieter, nur 35224 Messpunkte) (Stand der Technik)	VAL 2-WFH-3	1	187.00	318.0	35
Niederschlagsprognose mit Nässefaktoren 0.2 – 0.5 (5)	VAL-3-WFH-4-12h	- 59.77	93.99	175.4	50
Niederschlagsprognose in 3 mm Klassen + Standardprofil (4)	VAL-3-WFH-4-12h	- 32.27	90.07	162.4	54
Niederschlagsprognose, nach Bewölkung + Standardprofil (3)	VAL-3-WFH-9-12h	- 21.24	95.80	162.3	56
Nässekoeffizienten für jedes Straßensegment (4)	VAL-3-WFH-10-12h	- 32.23	87.37	159.8	57
Streckenprofil + Nowcasting (4)	VAL-3-WFH-12-1h	0.0372	43.58	80.74	60

Tab. 111: Vergleich verschiedener Methoden für die Streckenprognose der Wasserfilmdicke, anhand von BIAS, MAE und RMSE aller Streckenprofile (VAL 3-RT-10-12h) an 87347 Messpunkten

eigneter Faktoren: Verbesserung auf einen MAE von ca. 95 μ .

- Zusätzliche Umrechnung auf ein standardisiertes Streckenprofil, welches klassifiziert wird nach Bewölkung: Verbesserung auf einen MAE von ca. 87 μ .
- Nowcasting: Mittelwert der Wasserfilmmessung (Mobil oder Punkt) und Nässekoeffizienten für jedes Straßensegment. Diese Methode bietet großes Verbesserungspotenzial.

Dabei wurde die Messdaten der Vorsaison 2015/2016 zur Verbesserung der Prognosen verwendet. Die wesentlichen Verbesserungen können bereits erreicht werden, indem man die Niederschläge einiger Gitterzellen mittelt und einen Nässekoeffizienten für verschiedene Niederschlagsintensitäten einführt. Eine weitere Verbesserung um 10 % wird erreicht, wenn man für jedes Streckensegment einen spezifischen Nässekoeffizienten bestimmt. Diese Methodik kann für Prognosen 12 Stunden im Voraus anhand der Wetterprognosen und für Nowcasting Prognose mithilfe von Messwerten der vergangenen Stunde angewendet werden. Dafür sollte man je mindestens 5 Messfahrten zu unterschiedlichen Nässebedingungen aus der Vorsaison zu Verfügung haben.

10.2.8 Fazit für Wasserfilmdicke

- Die Vorhersagen der Wasserfilmdicke sind bislang wenig differenziert: alle Anbieter lieferten Prognosen mit geringer räumlicher Differenzierung.
- Alle Vorhersagen der Wasserfilmdicke mussten in der Menge (Bias) erheblich korrigiert werden, um sich der Realität der mobilen Messungen anzupassen. Die Fehler durch BIAS machten 50 % – 90 % des gesamten ermittelten Fehlers aus.
- Eine Korrektur vom BIAS der Vorhersage für Wasserfilmdicke erfordert allerdings eine Vielzahl von Messungen, um die Abweichung auch systematisch zu erfassen, da sich der BIAS offenbar zwischen Anbietern und Strecken deutlich unterscheidet, und auch die mobilen Messungen nicht eindeutig über Strecken hinweg kalibriert werden kann.
- Die streckenabhängige Prognose der Wasserfilmdicke lässt sich deutlich (mehr als die Temperaturvorhersage) verbessern. Die 2 Möglichkeiten der Verbesserungen sind:
 - Umrechnung der Niederschlagsprognosen in Wasserfilmdicke (WFD bzw. WFH) anhand geeigneter Faktoren: Annähernde Halbierung vom MAE gegenüber dem Stand der Technik.
 - Zusätzliche Umrechnung auf ein standardisiertes Streckenprofil, welches klassifiziert wird nach Bewölkung: Weitere Reduzierung vom MAE um 10 %.
- Diese 2 Methoden (4.1 und 4.2.) können als neu einsetzbarer Stand der Technik angesehen werden.
- Nowcasting + Streckenprofile ermöglichen einen weiteren erheblichen Fortschritt der Prognose für WFD.

11 Empfehlungen

11.1 Konzeptvorschlag für die netzweite Einführung eines Systems zur Streckenvorhersage

Auch wenn das Projekt durchaus offengelegt hat, dass es weitergehenden Bedarf an Forschung und Entwicklung gibt, ist der Erkenntnisgewinn so hoch, dass sich daraus Konzepte ableiten lassen, die auf jeden Fall versprechen, eine merkliche Verbesserung zu erzielen, gegenüber dem derzeitigen Stand, sowohl bei Prognosen der Fahrbahn-Temperatur wie insbesondere der Wasserfilmdicke mittels wetterabhängigen Streckenprofilen, die durch kontinuierliche mobile Messfahrten mit Sensoren für Temperatur und WFD erzeugt werden.

Dieses Konzept ist so angelegt, dass es auch weiter ausgebaut und verbessert werden kann. Außerdem enthält das Konzept auch adaptive und selbstoptimierende Ansätze. Dabei wird zunächst davon ausgegangen, dass dieses System vorwiegend dem Straßen-Winterdienst dienen soll und in dessen Umfeld eingeführt wird, wobei auch durchaus andere Anwendungen davon profitieren können, wie z. B. Warnungen für den Verkehr oder autonomes Fahren.

Die technische Ausgestaltung eines solchen Systems, insbesondere die technischen Schnittstellen, die Bereitstellung, Darstellung und Weiterverarbeitung der Streckenvorhersagen waren nicht Gegenstand dieses Projektes und sind deshalb weiteren Entwicklungen vorbehalten.

Das System-Konzept basiert auf folgenden Komponenten:

- Straßenwettervorhersage, die auf numerische Wettermodellen und ggf. MOS Verfahren basieren und von verschiedenen öffentlichen und privaten Wetterdienstleistern auf Standorte der SWS verfügbar sind
- stationäre Straßenwettermessstellen,
- mobile Straßenzustandssensoren,
- Streckeneigenschaftsmodelle und deren Optimierung.

11.1.1 Numerische Straßenwettervorhersagen

Mit der Qualität der Punktvorhersagen aus numerischen Wetter-Modellen und ggf. MOS Verfahren steht und fällt die Qualität der Streckenvorhersagen. In Kapitel 9 sind die Validierungsergebnisse

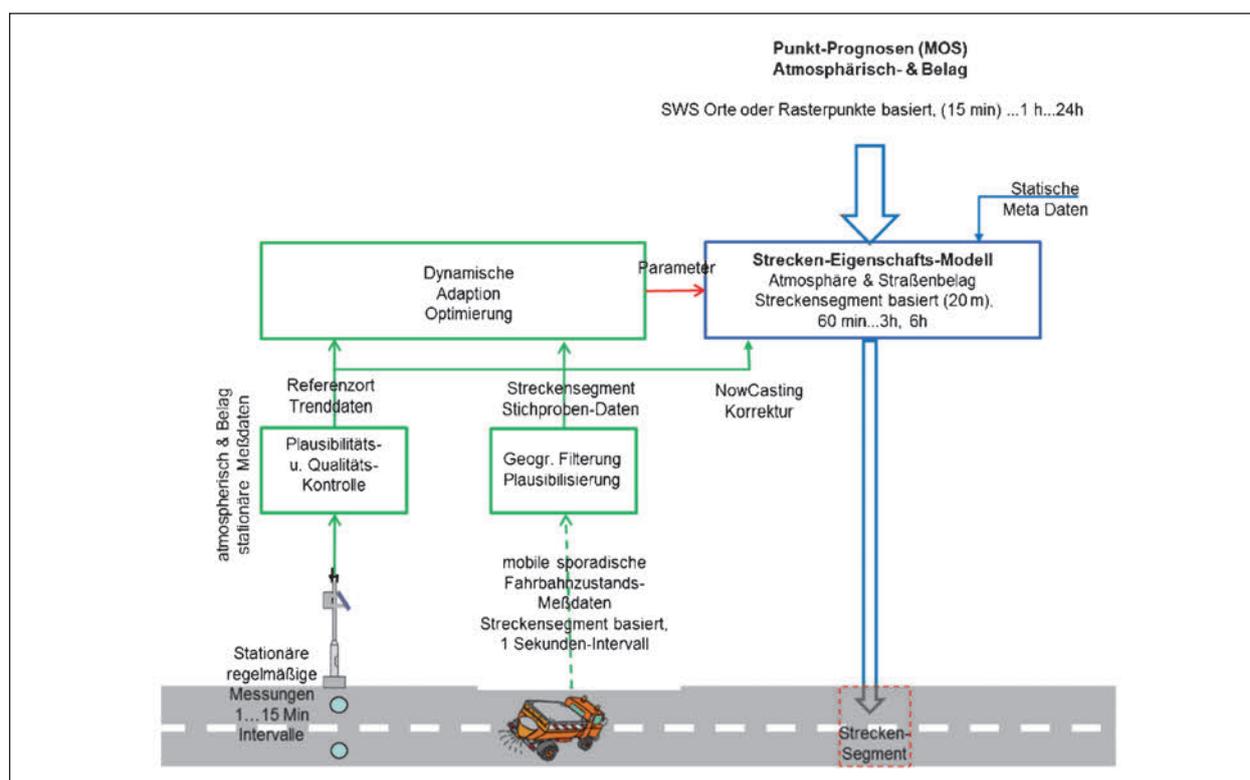


Bild 146: Schemadarstellung des Konzeptes zur streckenbasierten Straßenwettervorhersage

zumindest der am Projekt beteiligter Wetterdienstleister dargestellt.

Die zeitliche Auflösung sollte mindestens stündlich sein und die Aktualisierung mehrfach am Tage, mit der Möglichkeit der stündlichen Aktualisierung dort, wo ausreichend zuverlässige Messdaten zur Verfügung stehen. Die zeitliche Auflösung der Erfassung sollte ebenfalls mindestens 1 Stunde sein. Der Vorhersagehorizont sollte mindestens 24 Stunden sein. Zwar nehmen die Unsicherheiten bezogen auf kleinräumige Streckensegmente bei zunehmendem Horizont zu. Trotzdem sind Horizonte von 24 bis 72 Stunden wiederum für die gebietsweite Einsatzplanung relevant.

Mindestanforderungen an die zu liefernden Daten (für die Belange der Streckenvorhersage) sind

für Atmosphäre:

- Lufttemperatur,
- Taupunkttemperatur (Rel. Luftfeuchte),
- Niederschlagsintensität,
- Niederschlagsart (mindestens Ausprägungen: Regen, Schnee);

für Straßenoberfläche:

- Straßentemperatur,
- Wasserfilmdicke (als Wasseräquivalent der Kontamination),
- Straßenzustand (Trocken und Art der Kontamination: Nass, Eis, Schnee, Reif).

Weitere Größen, wie Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Strahlungswerte (Albedo etc.) können zur weiteren Optimierung beitragen, sind jedoch derzeit nicht essentiell.

Punktvorhersagen sollten, soweit vorhanden, die Standorte der Straßenwettermessstellen abdecken und ggf. weitere Rasterpunkte, die repräsentativ für einen Streckenabschnitt sind. Für Streckenabschnitte in diesem Sinne sollten ca. 10...30 km mindestens eine solche Stützstelle vorhanden sind.

11.1.2 Stationäre Straßenwettermessstellen

Stationäre Messstellen zeichnen sich dadurch aus, dass sie an einem – möglichst für einen Streckenabschnitt repräsentativen – Standort, kontinuierlich Daten über den Straßenwettertrend liefern können.

Die Daten können einmal für die Optimierung von Straßenwetterprognosen (z. B. MOS-Verfahren), für die Optimierung der Streckeneigenschaftsmodele in Verbindung mit mobilen Daten als auch für die kurzfristige Kalibrierung der Streckenprognosen (NowCasting) dienen.

Die Standorte sollten repräsentativ für einen Streckenabschnitt sein (10 ... 30 km – je nach Topografie auch mehr oder weniger). Viele bestehenden SWS erfüllen in der Regel diese Anforderung, wie auch die Auswertungen im Kapitel 8 zeigen.

Das Erfassungsintervall sollte idealerweise eine Minute betragen, wo dies nicht möglich ist, sollte auf jeden Fall nicht höher als 15 Minuten eingestellt werden. Folgende Mindestanforderungen an den Datenumfang im Hinblick auf die Streckenprognose sollten erfüllt sein:

- Lufttemperatur,
- Taupunkttemperatur (rel. Luftfeuchte),
- Niederschlagsintensität ,
- Niederschlagsart (mindestens Ausprägungen: Regen, Schnee),
- Straßentemperatur (Fahrbahnoberflächentemperatur),
- Wasserfilmdicke (Wasseräquivalent der Kontamination der Oberfläche)
 - oder
 - Wasserfilmdicke des flüssigen Anteils,
 - Eisfilmdicke und Schneefilmdicke.
- Straßenzustand (Trocken oder Art der Kontamination, wie Feucht, Nass, Eis, Schnee, Schneematsch).

Weitere Größen, wie Gefriertemperatur, Taumittelkonzentration und –Dichte sind vielleicht für den Betriebsdienst hilfreich, aber können in mittel- bis langfristige Streckenvorhersagen nicht einfließen. Weitere meteorologische Größen wie Wind, Luftdruck sowie Strahlungsbilanz können für die Wettermodelle brauchbar sein. Strahlungsbilanz stationär kann auch durchaus von Bedeutung sein für Plausibilitätskontrollen (siehe u. a. Kapitel 10, und [34]) und für Bildung von Wetterklassen (siehe Kapitel 10.1.7, 10.2.4 sowie Kapitel 8.3.2).

Bei der Wahl der Sensortechnologie für die Straßenzustands-Größen haben die bisherigen Erfah-

rungen gezeigt, dass – zumindest im Hinblick auf die Streckenvorhersage – einem berührungslosen Sensor, welcher mit optischen Absorptions-Messverfahren arbeitet, der Vorzug zu geben ist. Der Grund liegt u. a. auch darin, dass die Erkennung der Art der Kontamination (Nässe, Eis und Schnee) mit dieser Technologie zuverlässiger möglich ist, als mit den derzeit marktüblichen passiven Belagssensoren.

Selbstverständlich können in den Belag eingebaute aktive und passive Sensoren die Taumittelwirkung direkter detektieren. Unter bestimmten Bedingungen kann allerdings auch die Taumittelkonzentration und -dichte mithilfe der berührungslosen Messtechnik unter bestimmten Bedingungen und über das Phasendiagramm (Zusammenhang zwischen Gefriertemperatur und Taumittelkonzentration) des bekannten Taumittels zumindest abgeschätzt werden (siehe dazu auch Kapitel 7.8).

Die Daten der SWS sollten vor der Weiterverarbeitung einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden. Dazu gibt es bereits beim DWD (siehe [34]) und von der AG SWIS.net ([35]) erarbeitete Methoden, die nochmals an die Praxis angepasst worden sind (siehe [36]). Solche Verfahren sollten als Mindestanforderung angewendet werden.

11.1.3 Mobile Straßenzustandssensoren

Die Erfahrungen aus diesem Projekt zeigen deutlich, dass die streckenspezifischen Unterschiede, je nach Streckenlage und Wetterbedingungen so groß sind, dass sich die Berücksichtigung der verschiedenen Streckeneigenschaften durchaus lohnt. Die einzige derzeit verfügbare Möglichkeit einigermaßen objektive kleinräumige Beobachtungsdaten aus unterschiedlichsten Wettersituationen zu erhalten, sind mobile Straßenzustandssensoren, auch wenn die Messwerte mit Unsicherheiten behaftet sind. Wirklich aussagefähige menschliche Beobachtungsdaten zu erhalten, ist zum einen sehr aufwendig und ebenfalls mit nicht unerheblichen Unsicherheiten verbunden.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Streckenvorhersage der Temperatur, abgeleitet aus dem Temperaturprofil einer einmalig durchgeführten Befahrung der Strecke (Thermalkartierung), höhere Fehler ergibt, als wetterklassierte Temperaturprofile, welche statistisch aus einer Vielzahl von mobilen Stichproben abgeleitet werden. Eine einmalige Thermalkartierung macht nur dann Sinn, wenn aus

irgendwelchen Gründen eine ständige mobile Datenerfassung im normalen betrieblichen Ablauf nicht möglich ist. In dem Fall sollte allerdings die Thermalkartierung zu Standardbedingungen (siehe Kapitel 8.2) durchgeführt werden.

Eine einmalige Thermalkartierung unter Standardbedingungen kann natürlich auch als Erstversorgung des Streckeneigenschaftsmodells dienen, solange noch nicht genügend mobile Daten aus dem Normalbetrieb vorliegen.

Ansonsten ist zu empfehlen, möglichst viele mobile Stichproben-Daten aus der Strecke, zu möglichst allen vorkommenden Wettersituationen zu erfassen. Dies kann am besten dadurch geschehen, indem Einsatzfahrzeuge des Winterdienstes dauerhaft mit den mobilen Sensoren ausgerüstet sind. Die Erfassung der Daten kann ohne Behinderung des Betriebsablaufs und ohne Zutun des Betriebspersonals automatisch bei allen Fahrten stattfinden. Dazu stehen entsprechende Erfassungsgeräte zur Verfügung. Die mobile Erfassung der Daten im Projekt hat gezeigt, dass dies relativ problemlos und zuverlässig ablaufen kann, obwohl hier noch mehr oder weniger Provisorien im Einsatz waren und auch minimale Bedienschritte des Personals notwendig waren (siehe auch Kapitel 6.2.2 und 6.2.3). Im Regelbetrieb kann dies vollautomatisch ablaufen. Das ist auch umso mehr sinnvoll, als in Zukunft solche Sensoren auch für die Automation der Streueinsätze angewendet werden sollten.

Im Projekt wurde aus pragmatischen Gründen der mobile Sensor seitlich auf der Fahrerseite angebracht mit einem Messfleck außerhalb der Reifenspur. Nach allen bisherigen Erfahrungen ist der ideale Messort möglichst vor dem Fahrzeug – am besten an der Vorderfront (noch hinter einem ggf. montierten Schneepflug), wenn dort freie Sicht auf die Fahrbahn gewährleistet ist. Messabstände von 0,5 ... 2 m sind möglich, die Sensortechnologie sollte dies auch zulassen. Ein weiterer Ort für die Anbringung des Sensors kann im Fahrzeugrahmen innen zwischen Führerhaus und Aufbau sein mit einem Messfleck irgendwo zwischen der rechten und linken Reifenspur. Mit einem entsprechend kurzen Messabstand und einer geeigneten Schutzabdeckung.

Die mobilen Sensoren sollten die folgenden Mindestanforderungen erfüllen:

- Erfassungsintervall mindestens 1 Sekunde besser 0,1 Sekunde.

Die Erfassung folgender Größen:

- optional: Taupunkttemperatur,
- Straßentemperatur (Fahrbahnoberflächentemperatur),
- Straßenzustand (Art der Kontamination),
- Wasserfilmdicke (Wasseräquivalent aller Arten von Kontamination),
- Eisprozent (Anteil gefrorenes Wasser an der Kontamination).

oder

- Wasserfilmdicke (des flüssigen Wassers in der Kontamination),
- Eisfilmdicke,
- Schneefilmdicke.

Geografische Positionsdaten pro Datensatz:

- Längen- und Breitengrad (digital GPS Koordinaten, min. 6 Dezimalstellen),
- Höhe über NN,
- Bewegungsgeschwindigkeit (m/s),
- Bewegungsrichtung (rechtweisend in Grad).

Für die Glättevorhersage und auch für die präventive Streumengen-Entscheidung ist neben der Belagstemperatur auch die Wasserfilmdicke eine wichtige Größe. Wie im Kapitel 7.4.1 ausführlich dargestellt wird, weisen die Messwerte erhebliche Streuungen auf, auch am gleichen Streckensegment und unter gleichen Wetterbedingungen. Diese Streuungen kann man aber nur zu einem geringeren Anteil als Messfehler der Sensoren ansehen, sondern die Streuungen sind aufgrund der Mikrostrukturen der Oberfläche und der Kontamination tatsächlich vorhanden und weniger als systematische Fehler als vielmehr stochastische Streuungen anzusehen. Gerade wenn aber eine ausreichende Anzahl an Stichprobendaten aus einem Streckensegment bei vergleichbaren Wettersituationen zur Verfügung stehen, kann damit zumindest für die Streckenvorhersage mit statistischen Methoden umgegangen werden.

Die mobilen Daten (min. 1 Sekunden Datensätze) sollten Online in kurzen Zeitabständen (1... 0 Minuten) auf einen Server einer Rechnerzentrale über Mobilnetz übermittelt werden. Bei Netzausfall sind die Daten im Fahrzeug zwischen zu speichern, bis wieder eine Verbindung besteht.

Bei der Weiterverarbeitung der Daten sind später natürlich die Daten zu kontrollieren und Übermittlungsfehler (die allerdings nach den Erfahrungen im Projekt – außer klar erkennbaren Ausfällen – sehr selten sind) durch einfache Plausibilitäts-Kontrollen auszufiltern.

Ein weiterer Schritt ist die geografische Zuordnung zu den Streckensegmenten im digitalen Kartenmodell (siehe Kapitel 3.3). Im Projekt hat sich herausgestellt, dass Datensätze sorgfältig durch die geogr. Daten qualifiziert werden müssen. Durch die Unschärfe der Positionsdaten, mit denen immer gerechnet werden muss, kann es vorkommen, dass Daten aus parallel verlaufenden Zufahrtsrampen zu Park- und Rastplätzen zu Streckensegmenten zugeordnet werden. Diese können durch Auswertung der Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung meist ausgefiltert werden. Ebenso sollten Datensätze bei stehenden oder sehr langsam fahrenden Fahrzeug ausgeblendet werden. Zu der geogr. Zuordnung und Filterung stehen geeignete einfache Algorithmen zur Verfügung. In Zukunft kann vermutlich durch das im Aufbau befindliche europäische Satelliten Ortungs- und Zeitsystem GALILEO (GNSS) in Bezug auf die Ortungsgenauigkeit noch mit weiteren Verbesserungen gerechnet werden.

Die Daten sind eine wichtige Grundlage zur ständigen Validierung der Streckenvorhersagen und zur Optimierung und regelmäßige Anpassung der für die Streckenvorhersage benötigten Streckeneigenschaftsmodelle.

11.1.4 Streckeneigenschaftsmodelle

Grundlage für die Bild der Streckeneigenschaften ist ein digitales Kartenmodell welches die Streckensegmente definiert. Das im Projekt gewählte Kartenmodell für die Teststrecken hat sich bewährt (siehe Kapitel 3.3). Dabei wurde die Strecke in jeweils gleich lange Streckensegmente von 20 m Länge eingeteilt, die durch die Koordinaten des Schwerpunktes des Streckensegmentes und einer Orientierungsrichtung definiert sind. Bei Autobahnen bzw. Strecken mit Fahrtrichtungstrennung sollte auch die Fahrtrichtung getrennt behandelt werden. Bei untergeordneten Straßen ohne Fahrtrichtungstrennung macht das weniger Sinn. Auf Feinlinks (kleinste Streckenabschnitte einer digitalen Straßenkarte für Navigationszwecke) einer abgestimmte Streckensegmente vorhandener digitaler Karten abzu-

stützen ist weniger empfehlenswert, da die Feinlinks bei digitalen Karten erstens unterschiedlich lang sind und nach völlig anderen Kriterien festgelegt sind, als dies für straßenmeteorologische Fragestellung geeignet ist.

Grundsätzlich ist denkbar, dass bei einer netzweiten Umsetzung ein Kartenmodell aufgestellt wird, welches unterschiedliche Streckensegmente definiert, die nach straßenmeteorologischen Gesichtspunkten gewählt sind, wie z. B. Brücken, Segmente mit unterschiedlichen Belagsarten, Straßenkonstruktion, Waldstücke, freies Gelände, städtisch stark bebaut etc. Die Methoden der Streckeneigenschaftsmodelle sind darauf genauso anwendbar. Vermutlich kann dadurch eine leichte Verbesserung der Qualität der Streckenvorhersage erzielt werden. Wesentliche Verbesserungen sind dadurch aber nicht zu erwarten. Dies wäre aber Gegenstand weiterführender Untersuchungen.

Die wesentlichen Größen, welche ein Streckeneigenschaftsmodell abbilden muss, sind:

- Straßentemperatur,
- Taupunkttemperatur,
- Wasserfilmdicke (Wasseräquivalent aller Arten der Kontamination),
- Straßenzustand (abgeleitet aus den Grundgrößen).

Straßentemperatur

Für die Streckeneigenschaften in Bezug auf die Straßentemperatur wurden mehrere mögliche Verfahren getestet (siehe Kapitel 8.3.2 und 10). Von der Ableitung aus Thermalkartierung über statistischen wetterklassierten Transformationfunktion bis zu wetterklassierten Standard-Temperaturprofilen. Die Ergebnisse (Kapitel 8.3.2 und 10) der Erprobung zeigen, dass mit den wetterklassierten Strecken-Modellen aus mobilen Messfahrten die bei weitem geringsten Vorhersagefehler erreichbar sind. Die Modelle sind aus einer Vielzahl von mobilen Stichprobendaten nach Wetterklassen getrennt ermittelt und in Bezug auf die Referenzorte „kalibriert“. Mit den eigespeisten Wettervorhersagen aus den numerischen Wettermodellen kann dann damit auf die Strecke gerechnet und eine Belagstemperatur für jedes Streckensegment angegeben werden. Die Methoden und Ergebnisse sind in den Kapiteln 8 und 10 beschrieben.

Der Festlegung weiterer Wetterklassen bei Vorliegen ausreichender Stichprobenmengen sind grundsätzlich keine Grenzen gesetzt, soweit diese zu einer Verringerung der Vorhersagefehler führen. Das Modell sollte durch neu erfasste Messdaten ständig weiter optimiert werden.

Taupunkttemperatur

Die Taupunkttemperatur u. a. ist wichtig für die Abschätzung von Reifglättebildung, generell für Kondensations- und Verdunstungsvorgängen. Auch wenn die Variation über die Strecke nicht so groß ist als bei der Belagstemperatur, sorgen doch unterschiedliche Streckenumgebungen für ein variables Profil. Grundsätzlich kann hier als Streckeneigenschaftsmodell dieselbe Methode angewandt werden wie bei der Straßentemperatur. Untersuchungen mit linearer Transformation in Bezug auf Referenzmessstellen sind in Kapitel 8.3.2 beschrieben.

Wasserfilmdicke

Durch die generell mit der Wasserfilmmessung verbundenen erhebliche Streuungen (auch stationär gemessene Wasserfilme), ist ein Modell für die Streckeneigenschaften bezüglich Nässe, Eis und Schnee eine Herausforderung. Dank einer großen Anzahl von mobilen Stichprobendaten kann man mit statistischen Methoden damit einigermaßen umgehen. Wie in Kapitel 10 näher beschrieben ist, kann eine Streckenvorhersage der Wasserfilmdicken auf Basis der Niederschlagsvorhersage auf Referenzorte bezogen, welche auf die Mittelwerte der mobilen Daten der Streckensegmente „kalibriert“ ist, die besten Ergebnisse erzielt werden (Kapitel 8.3.3). Dieses Modell kann ständig an neu erfasste mobile und stationäre Daten angepasst werden.

Wie auch bei den Sensoren selbst wird auch bei der Streckenvorhersage der Straßenzustand, bzw. die Art der Kontamination aus den Grundgrößen abgeleitet. Die Regeln dafür entsprechen denen der Messsensoren. Damit ist auch eine Vergleichbarkeit hergestellt.

11.2 Weiterer Bedarf an Forschung und Entwicklung

11.2.1 Messtechnische F&E

Die berührungslose Messung der Straßenoberflächentemperatur auf Basis der Nah-Infrarot-Strahlung hat zweifellos Messunsicherheiten, die neben der Genauigkeit des Pyrometers selbst, auch im Wesentlichen von der Kenntnis des Emissionsgrades der Belagsoberfläche und zudem noch in gewissem Masse auch von der an der Oberfläche reflektierten Umgebungsstrahlung, die zwangsläufig mitgemessen wird, abhängt. Gerade bei der mobilen Datenerfassung mit häufig wechselnden Belageigenschaften und unterschiedlicher Kontamination ist das Problem besonders auffällig. Hier wäre durchaus Bedarf an Forschung und Entwicklung, welche der Frage klärt ob es Möglichkeiten gibt ggf. den Emissionsgrad automatisch zu adaptieren und welche Methoden es gibt, den Einfluss der Umgebungsstrahlung zu kompensieren oder auszuschalten.

Die Streuungen der Wasserfilmdicken wurden im Projekt mehrfach deutlich gemacht. Obwohl die Erfahrung gemacht werden konnte, dass selbst bei idealen Sensoren, das Problem der Streuungen bleibt, weil einfach die Mikrostrukturen von Wasserfilm und Belagsoberfläche dies verursachen. Dennoch bleibt ein Anteil an den Messunsicherheiten übrig, welche der Messtechnik anzulasten ist. Dabei sind nach bisherigen Erfahrungen folgende Aspekte, die eine genauere Untersuchung lohnenswert erscheinen lassen:

1. Die Wasserfilmdickenmessung (als Wasseräquivalent für jede Art von Kontamination) ist aufgrund des optischen Absorptionsverfahrens querempfindlich gegenüber dem Aggregatzustand. D. h. gefrorene Anteile werden in Bezug auf den äquivalenten Wassergehalt anders bewertet als flüssiger Wasserfilm. Das ist aber wichtig, um die gesamte vorhandene Wassermenge zu bewerten. Die Abschätzung der Taustoffdichte durch die berührungslose Messung bedingt ebenfalls dass der Wassergehalt von flüssigen und gefrorener Kontamination richtig bewertet wird (siehe auch Kapitel 7.8).
2. Die unterschiedlichen Belagstexturen der Fahrbahnoberfläche und deren Einfluss auf die Absorptions- und Reflexionsbedingungen ist häufig auch ein Problem für die Wasserfilmdickenbestimmung. Dieser Einfluss kommt noch zu

den ohnehin vorhandenen Streuungen, welche unvermeidlich tatsächlich vorhanden sind, dazu.

Hier wäre ein Bedarf an Forschung und Entwicklung zur Lösung dieser Probleme zu sehen.

11.2.2 Straßenmeteorologische F&E

Im Hinblick auf die Streckenvorhersage von Nässe, Eis und Schnee ist die kleinräumige Niederschlagsverteilung ein wesentliches Kriterium, welches bisher noch nicht ausreichend gelöst ist. Weiterführender Forschung wäre es vorbehalten genauer zu untersuchen, wie ggf. hoch auflösende Niederschlagsradar und deren Trendvorhersage oder durch die indirekte Rückkopplung durch mobile Nässe-detektion Methoden gefunden werden können, die Niederschlagsverteilung kleinräumig exakter vorherzusagen.

11.2.3 Systemtechnische Entwicklung

Bei der netzweiten Einführung sind eine Reihe von technischen Fragestellungen zu klären:

1. Eine einheitliche länderübergreifende Zusammenfassung und Vereinheitlichung der stationär erfassten Straßenwetterdaten, die leider immer noch nicht ausreichend vorhanden ist, sollte gelöst werden. Allerdings dürften die organisatorischen Probleme höher sein als die Technischen.
2. Welche Schnittstellen kommen zur Erfassung der mobilen Daten infrage, welche Fahrzeug-Komponenten sind dafür am geeignetsten (z. B. CAN-Bus, Bluetooth etc.).
3. Welche Schnittstellen sind notwendig bei der Bereitstellung von Streckenprognosen? Im Hinblick auf eine Automatisierung von Streueinsätzen sollten Streckenvorhersagen möglichst direkt in Fahrzeuge übermittelt werden können. Dabei ist die Frage zu klären, wie mit ggf. mögliche Ausfällen der mobilen Netzverbindung umzugehen ist etc.
4. Die Einbindung von Streckenvorhersagen in die Bordsteuerung der Fahrzeuge
5. Welche sonstigen Visualisierungen von Streckenvorhersagen sind sinnvoll? Schnittstellen zu vorhandenen Winterdienst und Straßenwetter-Informationssystemen sind zu definieren.

Literatur

- [1] Bayern Info: Internetauftritt der VIB Verkehrs-
informationsagentur Bayern GmbH, Stand
26.11. 2009, www.bayerninfo.de
- [2] CHUNG, E.; OHTANI, O.; WARITA, H.;
KUWAHARA, M.; MORITA, H. (2006): Does
weather affect highway capacity? Institute of
Industrial Science, University of Tokyo, Japan
- [3] CHUNG, E.; OHTANI, O.; KUWAHARA, M.
(2005): Effect of rainfall on travel time and
travel demand, Institute of Industrial Science,
University of Tokyo, Japan
- [4] MAZE, T. H.; AGARWAL, M.; BURCHETT, G.
(2005): Whether weather matters to traffic
demand, traffic safety and traffic flow, Center
for Transportation Research and Education,
Iowa State University, USA
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Techno-
logie (2008): Mobilität und Verkehrstechnologi-
en – Das 3. Verkehrsforschungsprogramm der
Bundesregierung, Baden-Baden
- [6] FACH, M. (1996): Einflußgrößen auf den Kraft-
schluß bei Nässe. Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen (BASt) Reihe Fahrzeug-
technik Heft F 21, Bergisch Gladbach
- [7] GNADLER, R. (1980): Naßgriff- und Aquapla-
ningverhalten von Pkw-Reifen. In: Veröffentli-
chungen des Institutes für Straßenbau und Ei-
senbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH)
(Hrsg.), Heft 22, Karlsruhe, S. 113 – 129
- [8] HEINZ, G. (1981): Erhöhtes Unfallrisiko bei
Nässe – Versuch einer Quantifizierung. In:
Straßenverkehrstechnik, 1981, H. 6, S. 188 –
194
- [9] HORNE, W. B. (1968): Tire Hydroplaning and
Its Effects on Tire Traction. In: Highway
Research Record No. 214, Transportation Re-
search Board, Washington, D.C., pp. 24 – 33
- [10] LEHNERT, D. (1975): Rechnerische Ermitt-
lung der Wasserfilmdicke auf Straßen bei
Regen. In: Straßen- und Tiefbau, 29, 1975,
H. 1, S. 12 – 15
- [11] RESSEL, W.; HERRMANN, S. R. (2006A):
Aquaplaning und Wasserfilmdicken – Aqua-
planing und Verkehrssicherheit in Verwin-
dungsbereichen dreistreifiger Richtungsfahr-
bahnen; Berechnung der Wasserfilmdicke.
FE 05.126/2001/AGB. Schlussbericht, Bun-
desanstalt für das Straßenwesen (BASt),
Bergisch Gladbach
- [12] HEINIJOKI, H. (1993): Influence of the type
and condition of tires and drivers' percep-
tions of road conditions on driving speed.
Helsinki 1993. Finnra reports 19/1994, 99
p + appendix 60 p. ISSN 0788-3722, ISBN
951-47-9098-7, TIEL 3200229
- [13] SAASTAMOINEN, K. (1993): Effect of road
conditions on driving behavior and proper-
ties of traffic flow. Helsinki 1993. Finnra
reports 80/1993. ISSN 0788-3722, ISBN
951-47-8139-2, TIEL 3200204
- [14] ALPPIVUORI, K. et al. (1994): Friction tires
and studded tires in different circumstances.
Helsinki 1994. Finnra 68/1994. TIEL
4000098
- [15] NORRMAN, J. (2000): Slipperiness on roads
– an expert system classification. Meteorolo-
gical applications, 7 (1), pp. 27 – 36, 2000
- [16] HERRMANN, S. R. (2008): Simulations-
modell zum Wasserabfluss- und Aquapla-
ning-Verhalten auf Fahrbahn-Oberflächen
(Dissertation) Universität Stuttgart, Institut
für Straßen- und Verkehrswesen, Univ.-Prof.
Dr.-Ing. W. RESSEL, Februar 2008
- [17] FACH, M. (1999): Lokale Effekte der Rei-
bung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn,
(Dissertation), Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt,
1999
- [18] FGSV, AK Nässeerfassung in SBA, (2002):
Merkblatt für die Nässeerfassung in Stre-
ckenbeeinflussungsanlagen (SBA), FGSV
Verlag
- [19] KLOTZ (2002): Besonderheiten des Ver-
kehrs auf Autobahnen unter winterlichen
Bedingungen, Dissertation, TU Darmstadt,
2002
- [20] Runway Surface Condition (RSC) and CFRI
Equivalent, Canadian Transport, [http://www.
tc.gc.ca/civilaviation/commerce/operational
standards/crfi/table4.htm](http://www.tc.gc.ca/civilaviation/commerce/operationalstandards/crfi/table4.htm)

- [21] RASMUSSEN, R. et al. (1998): Theoretical Considerations in the Estimation of Snowfall Rate Using Visibility, The National Center for Atmospheric Research, Colorado
- [22] FGSV (2001a): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) Köln 2001, Ausgabe 2005
- [23] PISZCEK, BAST_V5p Arbeitskreis 3.2.1 (2010): Umfelddatenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA), Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen, 2010
- [24] COST TU0702 (2010), Real-time monitoring, surveillance and control of road networks under adverse weather conditions, Les collections de l'INRETS – Ref.: R283, Dec. 2010
- [25] SCHEDLER, K. (1998): Verifikation der Wasserfilmhöhen durch die Niederschlagsintensität; Wasserfilmhöhen Modell, Spezifikation Umfelddatenstationen VBA A 1 Bremen, micKS MSR GmbH, 1998
- [26] JAKKO, R. (2008): Road Safety – Road Maintenance Strategies. Finish Road Association, Winter Road Congress 2008, Turku, Finnland
- [27] SCHEDLER, K.; SCHRÖDER, O. (2014): WOLKE – Wetterabhängige Kalibrierung von Verkehrsmodellen für eine optimierte Verkehrssteuerung, Schlussbericht der Fa. micKS MSR GmbH, Fellbach u. Oberstdorf, Forschungsbericht Förderkennzeichen 19 P 10017D (BMW). Technische Informationsbibliothek Hannover
- [28] BAST (2012): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, Ausgabe 2012
- [29] KIRSCHFINK, H.; POSCHMANN, M.; ZOBEL, D.; SCHEDLER, K.: Stauprävention auf BAB im Winter, Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen, Berichte der BAST, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 215, Juni 2012
- [30] HIPPI, M. et al.: A statistical forecast model for road surface friction. SIRWEC 15th International Road Weather Conference 2010, Quebec City, Canada Feb. 2010
- [31] DWD GDS: Definition des SH10-Schlüssels. legend_GMA_code.pdf http://www.dwd.de/DE/leistungen/gds/weiterfuehrende_informationen.html
- [32] DWD GDS: Definition des BUFR Schlüssels. legend_BUFR_GMA_xxxx <http://www.dwd.de/DE/leistungen/gds/gds.html>
- [33] BAKIRCIOGLU, I.; FRIEDRICH, M.; JANKO, J.; LOHMÜLLER, J.; PILLAT, J.; SCHEDLER, K.: Einfluss des Wetters auf die Verkehrsnachfrage, Verkehrsfluss und Verkehrssicherheit auf Autobahnen. Straßenverkehrstechnik, 03/2015. Kirschbaumverlag, S. 164 – 174
- [34] SCHMITZ, R.: Praxisorientierte Qualitätssicherung der Straßenwetterstationen (SWS), DWD Deutscher Wetterdienst, GBG SWIS Mitteilung, 11.09.2017
- [35] AG SWIS.net: Hinweispapier Plausibilitätskontrolle von GMA-Meldungen, Länderfachgruppe Straßenbetrieb, Ausgabe 2011
- [36] SCHEDLER, K.: Plausibilitätsprüfungen bei Glättemeldeanlagen, Bericht im Auftrag der ABDN/ZSB und der BAST, März 2017 (unveröffentlicht)
- [37] BÜHRER, M.; GUTBROD, K.: Prognose von Straßenglätte – Methoden- und Marktüberblick zu Verkehrswarnungen bei Straßenglätte auf Basis von Wettermodellen. 2016-03-08 (unveröffentlicht)
- [38] MÜLLER, M. D.: Effects of model resolution and statistical post-processing on shelter temperature and wind forecasts. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50:1627 – 1636, 2011
- [39] MÜLLER, M. D.; JANJIC, Z.: Verification of the new non-hydrostatic multi-scale model on the B grid (NMMB): a view on global predictability of surface parameters. Weather and Forecasting. 30(3): pp. 827 – 840, 2015
- [40] SCHEDLER, K.: Verifizierung der Gefrier-temperatur von Testlösungen. Abschätzung der Unsicherheiten des Prüfverfahrens zur Ermittlung der zulässigen Abweichungen für die Gefrier-temperatur, DIN/CEN TC337, CEN/TS 15518-4 (unveröffentlicht)

Bilder

- Bild 1: Prozessdiagramm für Straßenglätte-Vorhersage und wesentliche Strategien für die Optimierung
- Bild 2: Prozessdiagramm für Straßenglätte-Vorhersage und wesentliche Strategien für die Optimierung
- Bild 3: Darstellung des Prinzips der Einteilung der Strecke in Segmente konstanten Abstands. Das Segment ist definiert durch die geogr. Position eines Referenzpunktes der in der Mitte des Segmentes liegt. Der Abstand zum nächsten Referenzpunkt ist konstant und beträgt hier 20 m. Bei der BAB werden die beiden Richtungsfahrbahnen mit einem getrennten Streckenmodell beschrieben. Die Fahrtrichtung durch die geogr. Ausrichtung des Polygonzuges am Referenzpunkt ist der rechtweisende Kurs in Grad. Jeder Referenzpunkt und damit das Straßensegment (RSEG) wird mit einer ID (RSEG_ID) gekennzeichnet. In der Darstellung ist der Polygonzug in der Mitte der Richtungsfahrbahn gezeichnet. In Wirklichkeit liegen die Referenzpunkte eher in der rechten Hälfte des rechten Hauptfahrstreifens
- Bild 4: Skizzen zur Definition der Parameter Längsneigung (Longitudinal Gradient LT_GRAD) und Querneigung (Transversal Gradient TR_GRAD), sowie Kurvenradius (CURVR)
- Bild 5: Höhenprofil der A 9 zwischen AK Nürnberg-Ost und AS München-Schwabing mit Markierung der Teststrecke zwischen Stammham und Allersberg. Die Teststrecke führt durch das Altmühltal (Quelle: Autobahnatlas)
- Bild 6: Streckenverlauf Teststrecke A 9 Länge jeweils in eine Richtung ca. 50 km (Quelle: Website ABDN)
- Bild 7: (Zoom)Auszug aus dem Streckenmodell im Bereich der Station Gelbsee mit Markierung der Referenzpunkte für die Streckensegmente. RSEG_ID und KILOMTR. (Bitte beachten die Kilometerangabe im Modell stimmt nicht mit den offiziellen Betriebskilometer überein) (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020))
- Bild 8: Übersichtskarte Teststrecke 2 Viechtach-Grün im Bereich der SM Viechtach (Tool: MS MapInfo)
- Bild 9: Höhenprofil der Teststrecke 2 St2139 Viechtach-Grün. Gemessen mit IceCar4 (GPS minIPAD)
- Bild 10: (Zoom) Auszug aus den Referenzpunkten der Teststrecke 2 St2139 auf der Satelliten-Karte (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020)). Mit RSEG_ID und KILOMTR
- Bild 11: (Zoom) Weiterer Auszug aus den Referenzpunkten des Streckenmodells St2139 auf der Satelliten-Karte (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020)). Die Punkte liegen in der rechten Hälfte des Fahrstreifens Richtung Grün. Angaben mit RSEG_ID und KILOMTR
- Bild 12: Übersicht Verlauf der Teststrecke 3 BAST (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020))
- Bild 13: Höhenprofil der Teststrecke 3 BAST (Quelle: Autobahnatlas)
- Bild 14: (Zoom) Ausschnitt als Beispiel aus den Referenzpunkten der Straßensegmente der Teststrecke 3 A4 BAST in FR Olpe mit Angabe der RSEG_ID und KILOMTR (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020))
- Bild 15: (Zoom) Ausschnitt als Beispiel aus den Referenzpunkten der Straßensegmente der Teststrecke 3 A4 BAST in FR Köln mit Angabe der RSEG_ID und KILOMTR (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020))
- Bild 16: Lage der SWIS Station P338 AS Allersberg in Fahrtrichtung Nord/Nürnberg. Ungefähre Lage von Mast und Bodensonde anhand der Satelliten-Karte (GeoBasis-DE/BKG(2020). Die Fotos zeigen die Anlage aus Sicht der Kamera bei einer Messfahrt, sowie ein Foto der Bodensonden in der Mitte des äußersten linken Fahrstreifens (Fotos: Karl Schedler)
- Bild 17: Lage der SWIS Station P423 Offenbau in Fahrtrichtung Nord/Nürnberg. Ungefähre Lage von Mast und Bodensonde anhand

- der Satelliten-Karte (GeoBasis-DE/BKG(2020)). Die Fotos zeigen die Anlage aus Sicht der Kamera bei einer Messfahrt, sowie ein Foto der Bodensonden in der Mitte des äußersten linken Fahrstreifens (Fotos: Karl Schedler)
- Bild 18: Lage der SWIS Station P438 Gelbelsee in Fahrtrichtung Nord/Nürnberg. Ungefähre Lage von Mast und Bodensonde anhand der Satelliten-Karte (GeoBasis-DE/BKG(2020)). Die Fotos zeigen die Anlage aus Sicht der Kamera bei einer Messfahrt, sowie ein Foto der Bodensonden in der Mitte des äußersten linken Fahrstreifens (Fotos: Karl Schedler)
- Bild 19: Konzept für die Erweiterungs-Messstellen Offenbau II und Gelbelsee II auf der A 9 Greiding
- Bild 20: Ansicht der Stationen in Offenbau II (links) und Gelbelsee II (rechts) (Fotos: Karl Schedler)
- Bild 21: Lage der GMA Predigtstuhl P471 auf der St2139 (Bild: SM Viechtach). Ansicht der atmosphärischen Sensoren mit Kamera auf einem Mast am Straßenrand (Foto: Karl Schedler)
- Bild 22: Foto der Bodenmessstelle P471 auf der St2139 bei Predigtstuhl. Rechts ein Beispiel für das Kamerabild (Foto: Karl Schedler)
- Bild 23: Installierte Antenne für Mobilfunk an der Station Predigtstuhl (Foto: Jimmy Latimer, mickS)
- Bild 24: Lage des Testfeldes BAST in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020)). Es sind zwei berührungslose Straßenzustands-Sensoren NIRS31 der Firma LUFFT installiert, die auf zwei Fahrstreifen in FR Köln ausgerichtet sind (Foto: BAST)
- Bild 25: Lage der GMA Moitzfeld H746 in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020)). Anlage in FR Ost/Olpe. Je eine Bodensonde in beiden FR jeweils in dem linken äußeren Fahrstreifen
- Bild 26: Lage der GMA Wiehltalbrücke H765 in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020)). Anlage in FR West/Köln. Eine Bodensonde in FR West/Köln in der Mitte des linken äußeren Fahrstreifens (Foto: BAST)
- Bild 27: Lage der GMA Engelskirchen H754 in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020)). Anlage in FR West/Köln. Je eine Bodensonde in beiden FR jeweils in dem linken äußeren Fahrstreifen (Fotos: BAST)
- Bild 28: Lage der GMA Reichshof H774 in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020)). Anlage in FR West/Köln. Eine Bodensonde in FR West/Köln in der Mitte des linken äußeren Fahrstreifens (Foto: BAST)
- Bild 29: Lage der GMA Eckenhagen H775 in der Satellitenkarte (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020)). Anlage in FR Ost/Olpe. Je eine Bodensonde in beiden FR jeweils in der Mitte des linken äußeren Fahrstreifens (Foto: BAST)
- Bild 30: Darstellung des MARWIS Sensors mit den verschiedenen Messeinrichtungen (Quelle: LUFFT)
- Bild 31: Prinzip der zwei MARWIS Versionen, optimiert auf 1 m und 2 m Messabstand zur Belagsoberfläche (Quelle: LUFFT)
- Bild 32: Prinzip der mobilen Datenerfassung an Einsatzfahrzeugen der Meistereien
- Bild 33: Montage des mobilen Straßenzustands-Sensors am Streufahrzeug (Lkw) der AMGreding. Der Abstand zum Führerhaus ermöglicht eine sichere Bluetooth (drahtlose) Datenverbindung (Fotos: Karl Schedler)
- Bild 34: Ansicht miniIPAD im Führerhaus (Foto: Karl Schedler)
- Bild 35: Prinzipdarstellung der Messanordnung am Streufahrzeug. Messabstand ca. 2 m
- Bild 36: Montage MARWIS ID 71215 an neuem Fahrzeug Lkw Kennz.: N - AN 1029 Montagehöhe in etwa gleichbleibend (Foto: Karl Schedler)
- Bild 37: Montage des Straßenzustands-Sensor MARWIS am Kolonnenführer-Fahrzeug

- (KoF) der AM Greding. Eine 2m-Version (Meßabstand ca. 2 m) mit kurzem Schutzgehäuse (Fotos: Karl Schedler)
- Bild 38: Ausstattung des MAN Streuerfahrzeugs (Streuer: Küpper-Weisser) der SM Viechtach mit Straßenzustands-Sensor MARWIS 2m-Version mit kurzem Schutzgehäuse. Montiert auf der Rückseite des Führerhauses mit Magnethalterung und mechanischer Sicherung. Im Führerhaus miniIPAD von Apple mit MARWIS-App und Mobilfunkanbindung (Fotos: Karl Schedler)
- Bild 39: Prinzipdarstellung der Messanordnung
- Bild 40: Dienstfahrzeug der BAST mit montiertem mobilen Sensor MARWIS 2m-Version mit langem Schutzgehäuse. Hier noch zu Beginn des Projektes ohne Strahlungssensoren und ohne atmosphärische Messung
- Bild 41: Darstellung der technischen Ausstattung IceCar 4.0
- Bild 42: Fahrzeug KS-C mit IceCar Vers. 4.04 (Fotos: Karl Schedler)
- Bild 43: Fahrzeug micKS mit IceCar 4.00 (Fotos: Olav Schröder, micKS)
- Bild 44: Datenfluss der mobilen Messstelle IceCar4
- Bild 45: Darstellung der technischen Ausstattung IceCar 5.0 (BAST)
- Bild 46: Action-Kamera GARMIN VIRB und Anbringung der Kamera über Magnethalterung am Heck des Fahrzeugs (alternativ auch auf dem Dach an der Front) (Bild: GARMIN; Foto: Karl Schedler)
- Bild 47: Beispiele für die Heckansicht und Frontansicht. Jeweils snapshot aus Video (Fotos: Karl Schedler)
- Bild 48: Skizze Architektur und Datenfluss des Projektserver des AN(micKS/LUFFT)
- Bild 49: Darstellung der Positionen der Datensätze innerhalb einem ca. 15 m Toleranzbereich. Der Abstand der Punkte lässt die absolute Auflösung der GPS Positionen erkennen. die roten Punkte sind die Referenzkoordinaten der Segmente des Streckenmodells. (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020))
- Bild 50: Vergleichsmessung/ Kalibrierung MARWIS am Streufahrzeug SM Viechtach bei bedecktem Himmel (Foto: Karl Schedler)
- Bild 51: Handheld Pyrometer GIS 1000 C von Bosch und rechts ein HEITRONIC Labor-Pyrometer als Referenzinstrumente (Bild: Bosch; Foto: Karl Schedler)
- Bild 52: Kontrolle und Kalibrierung der MARWIS Temperaturmessung am IceCar4. Zusätzlich Vergleich mit Kontaktthermometer. MARWIS-Anzeigt stimmt exakt mit Pyrometer überein. Kontaktthermometer zeigt um 0,1 °C höhere Temperatur und damit deutlich in der Toleranz (Fotos: Karl Schedler)
- Bild 53: Vergleiche der berührungslos gemessenen Temperaturen direkt auf der Sonde und auf dem Asphalt neben der Sonde. Am Beispiel der GMA Pfahl (ARCTIS, Fa. Boschung) und GMA Hochbühl (IRS31, Fa. LUFFT). Wetterbedingung: Trocken aber bedeckt
- Bild 54: Korrelations-Diagramm der Temperaturmessung des mobilen Sensors bei der Vorbeifahrt an dem eingebauten Belagsensors IRS3. Die 169 Datenpunkte sind unabhängig vom Wetter- und Straßen-Zustand aufgetragen
- Bild 55: Trenddiagramm der Fahrbahnoberflächen- und der Luft-Temperatur im ausgewählten Zeitraum. In der dargestellten Periode ist das zeitliche Verhalten unplausibel. Dazu kommen Datenausfälle
- Bild 56: Korrelationsdiagramm des Vergleichs zwischen der Belagstemperatur an der Fahrbahnsonde der P438 Gelbsee in FR Nürnberg und der Oberflächentemperatur MARWIS bei der Vorbeifahrt an der Messstelle im ausgewählten Zeitraum. Unplausible Daten der P438 wurden entfernt
- Bild 57: Korrelationsdiagramm des Vergleichs zwischen Belagstemperatur an der Fahrbahnsonde der P423 Offenbau in FR Nürnberg und der Oberflächentemperatur

- MARWIS bei der Vorbeifahrt an der Messstelle im ausgewählten Zeitraum. Daten im Zeitraum mit unplausiblen Verhalten sind ausgeblendet
- Bild 58: Grafische Darstellung der Korrelation der mobil gemessenen Straßentemperatur zur stationären an der Station A 9 Offenbau II. Alle Fahrten Lkw MARWIS AM Greding im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. Rote Punkte markieren die Korrelation mit der eingebauten Sonde (IRS31pro), die blauen Punkte gehören zum berührungslosen Sensor (NIRS31)
- Bild 59: Grafische Darstellung der Korrelation der mobil gemessenen Straßentemperatur zur stationären an der Station A 9 Offenbau II. Alle Fahrten Lkw MARWIS AM Greding im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. Rote Punkte markieren die Korrelation mit der eingebauten Sonde (IRS31pro), die blauen Punkte gehören zum berührungslosen Sensor (NIRS31)
- Bild 60: Grafische Darstellung der Korrelation der mobil gemessenen Straßentemperatur zur stationären an der Station St2139 Predigtstuhl. Alle Fahrten Lkw MARWIS SM Viechtach im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017
- Bild 61: Grafische Darstellung der Korrelation der mobil gemessenen Straßentemperatur zur stationären der mickS Station am Testfeld A 4 der BAST. Alle Fahrten der BAST mit IceCar5 im Zeitraum Dez. 16 bis Feb. 17. Blaue Punkte markieren die Korrelation mit der eingebauten Sonde (IRS31pro), die roten Punkte gehören zum berührungslosen Sensor (NIRS31-1) und die grünen zum NIRS-2
- Bild 62: Korrelation zwischen Taupunkttemperatur am MARWIS (20815) des Lkw SM Viechtach und der stationären Messstelle P471 Predigtstuhl jeweils bei Vorbeifahrt im ausgewählten Zeitraum. 169 Datensätze
- Bild 63: Korrelationsdiagramm Vergleich der Taupunkttemperatur am mobilen Sensor MARWIS (71215) Lkw AM Greding mit Station P438 Gelbensee bei Vorbeifahrt im ausgewählten Zeitraum. 25 Datensätze
- Bild 64: Korrelationsdiagramm Vergleich der Taupunkttemperatur am mobilen Sensor MARWIS (71215) Lkw AM Greding mit Station P423 Offenbau bei Vorbeifahrt im ausgewählten Zeitraum. 19 Datensätze
- Bild 65: Korrelationsdiagramm der mobilen Taupunkttemperaturen zur stationär gemessenen am Testfeld A 4 BAST. Blaue Punkte markieren die Vergleichswerte zum Wettersensor am Fahrzeug, rote Punkte markieren die am MARWIS gemessenen. Insgesamt 13 Datensätze im Zeitraum Dez. 16 bis Feb.17
- Bild 66: Korrelation der mobil gemessenen Wasserfilmdicken (MARWIS ID 20815) mit Station P471 Predigtstuhl bei Vorbeifahrt des Lkw SM Viechtach. 169 Datensätze im Winter 2015/16
- Bild 67: Korrelation der mobil gemessenen Wasserfilmdicken (MARWIS ID 20815) mit Station P471 Predigtstuhl bei Vorbeifahrt des Lkw SM Viechtach. Ca. 393 Datensätze im Winter 2016/17
- Bild 68: Diagramm zeitl. Verlauf der Wasserfilmdicken kontinuierlich gemessen mit Fahrbahnsonde (rote Kurve) und Niederschlagsintensität (blaue Kurve) an P471 Predigtstuhl und die bei Vorbeifahrt erfasstem mobil gemessenen Wasserfilmdicken (rote Punkte). Herausgegriffener Zeitraum von ca. 30 Stunden am 15. Januar 2016
- Bild 69: Korrelationsplot des Vergleichs der mobilen Wasserfilmdicken (Lkw AM Greding) mit den stationär an der Station Offenbau II. Blaue Punkte beziehen sich auf den berührungslosen Sensor (NIRS31), die roten Punkte beziehen sich auf den eingebauten Sensor (IRS3). Bei Offenbau II ist ein Polynom die beste Näherung. NIRS31 an Offenbau II liefert offensichtlich unplausible Werte, vermutlich wegen fehlendem Trockenabgleich
- Bild 70: Korrelationsplot des Vergleichs der mobilen Wasserfilmdicken (Lkw AM Greding) mit den stationären an der Station Gelbensee II. Blaue Punkte beziehen sich auf den berührungslosen Sensor (NIRS31), die roten Punkte beziehen sich auf den

- eingebauten Sensor (IRS3). Bei Gelbelsee II ein linearer Trend die beste Näherung
- Bild 71: Auszug aus den registrierten Wasserfilmdaten (1 Sekunden-Intervall) einer Lkw-Fahrt der SM Viechtach auf der St2139. Es treten hier auf ca. 30 m Änderungen um 250 μm und auf 100 m teilweise über 500 μm auf
- Bild 72: Illustration der Unterschiede und Einflüsse der Wasserfilm-Messung bei eingebauten und berührungslosen mobilen Sensoren
- Bild 73: Gegenüberstellung gleitender Mittelwert (grüne Kurve) und Dämpfungsfiter (rote Kurve an einer Original-Zeitreihe von mobilen Wasserfilmdicken (blaue Kurve). Gleitender Mittelwert mit $m = 17$ und Dämpfungsfiter mit $a = 0,15$
- Bild 74: Koffer (L-BOXX) mit der Ausrüstung zum WETTEX- bzw. Tuch-Test zur in situ Bestimmung der Wasserfilmdicke (Foto: Karl Schedler)
- Bild 75: Beispiel zur Durchführung des Tuchtestes (Fotos: Karl Schedler)
- Bild 76: Messung der Reaktionszeit des Strahlungssensors mithilfe einer einfachen Strahlungsquelle. Die gestrichelte blaue Kurve ist die tatsächliche Anregung, die grüne Kurve ist die Antwortfunktion des Sensors. Bei dem Bilanzstrahlungsgeber sollten vorsorglich die obere und untere Sensorfläche getrennt vermessen werden. In der Regel sind beide Seiten identisch (Foto: Karl Schedler)
- Bild 77: Dynamische Kalibrierung der Globalstrahlung des WS301. Blaue Kurve zeigt die Anregung, die grüne Kurve die Sensorwerte, wie sie erfasst werden. Die rot gestrichelte Linie zeigt die nach der Kompensation sich ergebenden Werte-Zeitreihe
- Bild 78: Sprungantwort des Strahlungsgebers CNR4 am IceCar5 der BAST
- Bild 79: Berechnung der wahren Windrichtung aus der scheinbaren Windrichtung am fahrenden Fahrzeug
- Bild 80: Phasendiagramm für NaCl. Zusammenhang zwischen Massenkonzentration des Tausalzes zur Gefriertemperatur der Lösung
- Bild 81: Verlauf der Taustoffdichte [g/m^2] während einer Fahrt mit dem Streufahrzeug auf der Teststrecke Viechtach – St. Engelmar St2139. Blaue Kurve war auf der Hinfahrt (Bergfahrt) aufgenommen, die rote Kurve bei der Rückfahrt (Talfahrt). Leichte Glättung durch gleitenden Mittelwert über ca. 4 Sekunden. Darstellung bezogen auf Streckensegmente (relative Kilometrierung)
- Bild 82: Schematische Darstellung des Lösungsansatzes für die Modellierung der Streckeneigenschaften und für die streckenbezogene Vorhersage des Straßenzustandes
- Bild 83: TM Messfahrt auf der A 9. Dunkelblau: erste Messfahrt, Hellblau: zweite Messfahrt im Anschluss an die erste von km 457 bis 447. Rot: die sich aus der Differenz ergebende Gradientenlinie mit der die absoluten Temperaturwerte zu korrigieren sind
- Bild 84: Rohdaten einer Thermalkartierungs-Fahrt (blaue Linie) auf der A 9 und die stationär gemessene Temperatur an der Referenzstation P423 Offenbau (rote Linie). Die stationäre Temperatur ist bereits korrigiert um die Messdifferenz zum mobilen Sensor
- Bild 85: Rohdaten einer Messfahrt bei trockener klarer Nacht. Lufttemperaturen (AT) sind Rot dargestellt und Oberflächentemperatur (RST) sind Blau dargestellt, sowie das Höhenprofil in Grün. Die um den Temperaturgradienten bereinigten Kurven ist jeweils fett eingetragen
- Bild 86: Endgültige Auswertung der Thermalkartierung für trockene klare Nacht. Das Belegs-Temperaturprofil bezogen auf den Referenzpunkt z. B. bedeutet ein negativer Apertur-Faktor von -0,3, dass die Abstrahlung um 30 % niedriger ist als am Referenzpunkt. Referenzpunkt: P423

- Offenbau RSEG_ID: 11002145, km 412,340
- Bild 87: Verortung eines sog. hot-spots im Strahlungs- und Temperatur-Diagramm und in GeoBasis-DE/BKG(2020. Hier kreuzt die die St2238 bei der AS Sindorsdorf. Die Belagstemperatur ist unter der Überführungsbrücke mehr als 2 °C höher als in der Umgebung. Ebenso ist die Abstrahlung deutlich geringer
- Bild 88: Normiertes Temperaturprofil der Teststrecke A 9
- Bild 89: Erweiterte Thermalkartierung an der St2139 in einer trockenen, klaren Nacht. Die Darstellung zeigt den zeitlichen Ablauf der Messfahrt. Belagstemperatur (blau) und die Bilanzstrahlung (orange). Die Strahlung ist diesmal negativ aufgetragen, was Abstrahlung von der Straßenoberfläche bedeutet, um die Gleichsinnigkeit mit dem Temperaturverlauf zu demonstrieren, die aber nicht überall vorhanden ist
- Bild 90: Belagstemperaturverlauf nach Streckensegmenten des Streckenmodells aufgetragen. Bergfahrt und Talfahrt, sowie eine kurze Strecke zu Beginn der Fahrt nochmal überfahren um den Temperaturgradient zu bestimmen
- Bild 91: Auffälliger cold-spot und Erhöhung der Abstrahlung kann als kurze Lichtung innerhalb eines bewaldeten Streckenabschnitts identifiziert werden
- Bild 92: Endgültiges Strahlungs- u. Temperatur-Profil der Strecke St2139 nach Segmenten des Streckenmodells. Relative Abweichungen zum Referenzpunkt P471 Predigtstuhl
- Bild 93: Rohwerte des Strahlungs- und Oberflächentemperatur-Verlaufs einer Messfahrt am Tage mit Einstrahlungsbedingung. Aufgetragen nach Segmenten des Streckenmodells. Fahrt mit IceCar4 141215
- Bild 94: Normiertes Temperaturprofil der Teststrecke St2139. Rot: höhere Temperatur; Blau: niedrigere Temperatur als an der Referenzstation (Predigtstuhl). Gelb: Verlauf der Taupunkttemperatur
- Bild 95: Messfahrt mit annähernd Bedingungen für eine Thermalkartierung am 18.01.2017 um ca. 06:00 in Fahrtrichtung Olpe. (Bild: GeoBasis-DE/BKG(2020))
- Bild 96: Temperaturprofile und Strahlungssituation bei einer Messfahrt am 16.02.2017 nachmittags (15:45 CET) in Fahrtrichtung Olpe. Rote Kurve ist die Straßentemperatur, die grüne Kurve zeigt die kurzwellige Einstrahlung und die gelbe Kurve die langwellige Abstrahlung von der Fahrbahnoberfläche
- Bild 97: Temperaturverläufe von 6 Messfahrten in Fahrtrichtung Köln zu verschiedenen Wetterbedingungen. 7: 16.01.2017 13:38; 8: 17.01.2017 05:12; 12: 18.01.2017 06:30; 15: 23.01.2017 12: 25; 18: 24.01.2017 19:48; 28: 16.02.2017 15:38. Bitte beachten, dass die virtuelle Kilometrierung in FR Köln nicht identisch ist mit FR Olpe!
- Bild 98: Korrelation der mittleren Belagstemperatur der mobilen Messfahrten zum Mittelwert der während der Fahrt gemessenen stationären Belagstemperatur
- Bild 99: Korrelation der mittleren Wasserfilmdicken der mobilen Messfahrten zum Mittelwert der während der Fahrt gemessenen stationären Wasserfilmdicken
- Bild 100: Korrelation der mittleren Belagstemperatur der mobilen Messfahrten zum Mittelwert der während der Fahrt gemessenen stationären Belagstemperatur
- Bild 101: Korrelation des Mittelwerts aller gemessenen Wasserfilmdicken jeweils einer Messfahrt mit dem Mittelwert der während der jeweiligen Dauer der Fahrt gemessenen stationären Wasserfilmdicken
- Bild 102: Mittelwertkurve aus allen Fahrten (mit allen Wettersituationen) im ausgew. Zeitraum A 9 FR Nbg. Ebenso ist die Streuung (Standardabweichung) nach oben und unten angegeben. Hier sind die tatsächlichen Werte dargestellt, und nicht die Differenzen zu einem Bezugswert. RST_MW: Belagstemperatur Mittelwertkurve; RST_lo: Belagstemperatur untere Standardabweichung;

- RST_up: Belagstemperatur obere Standardabweichung
- Bild 103: Verortung zweier markanter Merkmale aus der Mittelwertkurve aller Lkw-Fahrten im ausgewählten Zeitraum. Sowohl bei sog. Cold-Spots als auch bei sog. Hot-Spots können geografische und topografische Streckeneigenschaften gefunden werden, welche diese Effekte verursachen
- Bild 104: Mittelwertkurve der Differenz der Straßentemperatur zur Referenzstation Offenbau II aller Lkw-Fahrten im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017 auf der Teststrecke A 9 nach Streckensegmenten. Auf der x-Achse sind die letzten 4 Ziffern des Segment-Indexes angegeben. Die obere und untere Kurve markieren jeweils die Standardabweichung. Rote senkrechte Linie markiert den Standort von Gelbsee und die grüne Offenbau
- Bild 105: Mittelwertskurve mit \pm Std.Abweichungen der mobilen Oberflächen-Temperatur von 109 Lkw-Fahrten der SM Viechtach an der St2139 Viechtach-Grün im ausgew. Zeitraum
- Bild 106: Profilkurve der relativen Straßentemperatur (Mittelwert der Differenzen zur stationären Referenz nach Streckensegment) – blaue Kurve. Dünne gestrichelte Linie sind die jeweiligen Mittelwerte pro Segment, die dicke Linie ist der gleitende Mittelwert über ca. 100 m. Die roten Kurven geben die Variation innerhalb dem Streckensegment (Std.Abweichung) wieder (rechte Y-Achse). Zeitraum ist der 06.11.2016 bis 30.04.2017 mit Lkw SM Viechtach. St2139. Die Position der Referenzstation ist markiert
- Bild 107: Mittelwertkurve der mobilen relativen Wasserfilmdicken nach Streckensegment (letzten 4 Digits des Index). Referenzstation ist Offenbau II (eingebauter Sensor). Die oberen und unteren Kurven sind die Standardabweichungen. Zusätzlich ist die geogr. Höhe über N.N. (grüne Kurve) eingezeichnet
- Bild 108: Lage der Nässeauffälligkeit im Altmühltal auf der A 9 Anschlussstelle (Tool: GeoBasis-DE/BKG(2020))
- Bild 109: Verlauf der Mittelwerte der Differenz der Wasserfilme aller Fahrten im Zeitraum auf der St2139 zum Referenzstandort Predigtstuhl. Die untere und obere Kurve markieren die Standardabweichung
- Bild 110: Übersicht der ermittelten Parameter für die Straßentemperatur des Transformationsmodells pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke A9 Fahrtrichtung Nord, aus erfassten Daten im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte jeweils Koeffizienten und rote Punkte die Konstante. Die Parameter sind über alle vorkommenden Wetersituationen ermittelt – also ohne Wetterklassierung!
- Bild 111: Übersicht der ermittelten Parameter für die Taupunkttemperatur des Transformationsmodells pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke A9 Fahrtrichtung Nord, aus erfassten Daten im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte jeweils Koeffizienten und rote Punkte die Konstante. Die Parameter sind über alle vorkommenden Wetersituationen ermittelt – also ohne Wetterklassierung!
- Bild 112: Übersicht aller ermittelten Parameter für die Wasserfilmdicke des Transformationsmodells pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke A 9 Fahrtrichtung Nord, aus erfassten Daten im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte bedeuten jeweils die Koeffizienten. Bei der Wasserfilmdicke sind die Koeffizienten so ermittelt, dass die Konstante = 0 wird, da hier ein Bias keinen Sinn macht – über alle Wetersituationen
- Bild 113: Verortung der selektierten Streckensegmente auf der Teststrecke A 9. Jeweils die letzten 4 Ziffern des Index (RSEG-ID) sind aufgeführt. Fahrtrichtung Nord, Nürnberg (Stammham → Allersberg)
- Bild 114: Übersicht aller ermittelten Parameter des Transformationsmodells für die

Straßentemperatur pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke St2139, aus erfassten Daten im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte jeweils Koeffizienten und rote Punkte die Konstante. Die Parameter sind über alle Wettersituationen ermittelt – also keine Wetterklassierung!

Bild 115: Übersicht aller ermittelten Parameter des Transformationsmodells für die Taupunkttemperatur pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke St2139, aus erfassten Daten im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte jeweils Koeffizienten und rote Punkte die Konstante. Die Parameter sind über alle Wettersituationen ermittelt – also keine Wetterklassierung!

Bild 116: Übersicht aller ermittelten Parameter des Transformationsmodells pro Streckensegment (RSEG_ID) der Teststrecke St2139. Aus erfassten Daten im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017. Blaue Punkte jeweils Koeffizienten und rote Punkte die Konstante. Bei der Wasserfilm sind die Koeffizienten so ermittelt, dass die Konstante = 0 wird, da hier ein Bias keinen Sinn macht – über alle Wettersituationen

Bild 117: Verortung der ausgewählten Streckensegmente der Teststrecke St2139

Bild 118: Übersicht Trenddiagramm der geschätzten Straßentemperatur auf der A 9 Streckensegment 110001121 Anschlussstelle Altmühltal. Rote Kurve aus Thermalkartierung ermittelte Temperatur. Blaue Kurve aus stat. Streckeneigenschaftsmodell (Transformationsmodell) ermittelte Straßentemperatur und grüne Kurve im Vergleich aus dem numerischen Modell stammenden Nowcasting Daten von GWC. Rote Punkte: mobile Messdaten an der Stelle

Bild 119: Zwei Beispiele aus Januar 2017. Anschlussstelle Altmühltal. Blaue Kurve: aus stat. Transformationsmodell ermittelte Straßentemperatur. Rote Kurve: aus Thermalkartierung ermittelte Temperatur. Grüne Kurve: im Vergleich aus einem numerischen Modell stammenden

den Nowcasting Daten von GWC. Rote Punkte mobile Messdaten an der Stelle

Bild 120: Übersicht Trenddiagramm der geschätzten Straßentemperatur auf der St2139 Streckensegment 20000622 St.Englmar. Blaue Kurve aus stat. Transformationsmodell ermittelte Straßentemperatur und grüne Kurve im Vergleich aus numerischen Modell stammenden Nowcasting Daten von GWC. Rote Punkte mobile Messdaten an der Stelle

Bild 121: Ein Beispiele aus Januar 2017 auf der St2139 bei St.Englmar. Blaue Kurve: aus stat. Streckeneigenschaftsmodell (Transformationsmodell) ermittelte Straßentemperatur. Rote Kurve: aus Thermalkartierung ermittelte Temperatur. Grüne Kurve: im Vergleich aus einem numerischen Modell stammenden Nowcasting Daten von GWC. Rote Punkte mobile Messdaten an der Stelle

Bild 122: Beispiel Schätzung der Taupunkttemperatur am Streckensegment St.Englmar der St2139 aus Thermalkartierung (rote Kurve) und aus dem stat. Streckeneigenschaftsmodell (Transformationsmodell) (blaue Kurve). Zum Vergleich die an der Stelle mobil gemessene Taupunkttemperatur (MARWIS Lkw)

Bild 123: Übersicht über die geschätzten Wasserfilmdicken an der Stelle St. Englmar auf der St2139. Zeitraum Oktober 2106 bis April 2017. Aus stat. Transformationsmodell (blaue Kurve) und der numerischen Straßenwetter Modell von GWC (grüne Kurve) im Vergleich mit den mobilen Beobachtungen (rote Punkte) an der Stelle

Bild 124: Beispiel-Auszug Januar 2017 und November 2016 an St2139 St. Englmar. Schätzung Wasserfilm aus Transformationsmodell (blaue Kurve) und numerisches Vorhersagemodell GWC (grüne Kurve) im Vergleich mit mobilen Beobachtungsdaten

Bild 125: Beispiel-Auszug Dezember 2016 und Februar 2017 an St2139 St. Englmar. Schätzung Wasserfilm aus Transformationsmodell (blaue Kurve) und numeri-

- ches Vorhersagemodell GWC (grüne Kurve) im Vergleich mit mobilen Beobachtungsdaten. Als zusätzliche Information ist die Niederschlagsintensität (Rot gestrichelt) an der Referenzstation Predigtstuhl dargestellt
- Bild 126: Zwei Beispiele aus A 9 Altmühltal. Januar 17 und Dezember 16. Schätzung der Wasserfilmdicke aus Transformationsmodell (blaue Linie) und aus numerischem Modell GWC (grüne Linie). Zusätzlich zur Information die an der Referenzstation gemessene Niederschlagsintensität (violette Linie)
- Bild 127: Verteilung der Differenz zwischen Straßentemperatur und Lufttemperatur bei negativer und positiver Strahlungsbilanz. Die rote gestrichelte Linie markiert einen geeigneten Grenzwert für das hilfswise Klassenkriterium zur Differenzierung der Ein- und Abstrahlungssituation für Stationen bei denen keine Strahlungsmessung vorhanden ist. Violette Kurve: Strahlungsbilanz negativ oder 0 ($NR \leq 0$) also Abstrahlung. Grüne Kurve: Strahlungsbilanz positiv ($NR > 0$) das heißt Einstrahlung
- Bild 128: Verteilung der Differenzen zwischen Taupunkttemperatur und Feuchtkugltemperatur zur Straßentemperatur. Die Rot gestrichelte Linie markiert einen geeigneten Grenzwert für die Differenzierung zwischen Kondensation und Verdunstung
- Bild 129: Beispiel-Auszug aus der über das Modell berechneten Wasserfilmdicke (rote Kurve) und der am Standort tatsächlich gemessenen Wasserfilmdicke (IRS31pro, blaue Kurve) an der Station Offenbau II A 9. Die Modellparameter wurden bestimmt aus den archivierten Messdaten im Zeitraum Winter 2016/17. Zusätzlich ist die gemessene Niederschlagsintensität dargestellt (grüne Kurve)
- Bild 130: Eventeinteilung beim HSS
- Bild 131: Lufttemperatur in 2 m Höhe zwischen November 2015 und April 2016 am Standort Eckenhagen (H775). Messung in Rot, Simulation des DWD (1-23h in die Zukunft) in Grün
- Bild 132: Lufttemperatur in 2 m Höhe zwischen Dezember 2015 und April 2016 am Standort Kalteck (P471). Messung in Rot, Simulation von DWD (1-23h in die Zukunft) in Grün
- Bild 133: Lufttemperatur in 2 m Höhe zwischen Dezember 2015 und April 2016 am Standort Kalteck (P471). Messung in Rot, Simulation von DWD (1-23h in die Zukunft) in Grün
- Bild 134: Lufttemperatur in 2 m Höhe zwischen Dezember 2015 und April 2016 am Standort Reichshof (H774). Messung in Rot, Simulation von meteoblue (1-23h in die Zukunft) in Grün
- Bild 135: Lufttemperatur in 2 m Höhe zwischen Dezember 2015 und April 2016 am Standort Zinzenzell (P465). Messung in Rot, Simulation von meteoblue (1-23h in die Zukunft) in Grün
- Bild 136: Niederschlagsmenge zwischen Dezember 2015 und April 2016 am Standort Allersberg (P338). Messung in Orange, Simulation von DWD (1-23h in die Zukunft) in Blau
- Bild 137: Streckenprofil der Straßentemperatur und interpolierte Prognosen der einzelnen Anbieter
- Bild 138: Streckenprofil der Taupunkttemperatur und interpolierte Prognosen der einzelnen Anbieter
- Bild 139: Streckenprofil der Wasserfilmdicke und interpolierte Prognosen der einzelnen Anbieter. St2139, 2017
- Bild 140: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Prognosemodells basierend auf gemessenen Straßentemperaturprofile und Wetterklassen
- Bild 141: Standardstreckenprofil der Straßentemperatur für bewölkte Nächte (St2139, berechnet mit Messfahrten 2015/16)
- Bild 142: Standardstreckenprofil der Straßentemperatur für heiter bis wolkige Nächte (St2139, Messfahrten 2015/16)

- Bild 143: Standardstreckenprofil der Straßentemperatur für unbewölkte Nächte (St2139, Messfahrten 2015/16)
- Bild 144: Standardstreckenprofil der Straßentemperatur für unbewölkte Nächte (St2139, berechnet mit Messfahrten 2016/17)
- Bild 145: Die Wasserfilmdicke in μ aller Messfahrten als Mittelwert für jedes Straßensegment
- Bild 146: Schemadarstellung des Konzeptes zur streckenbasierten Straßenwettervorhersage
- Tab. 9: Liste der Straßenwetter Anbieter, die im Rahmen der Recherche betrachtet worden sind
- Tab. 10: Vergleichstabelle der Merkmale der verschiedenen Anbieter von Straßenwetter-Vorhersagen
- Tab. 11: Liste der ursprünglich vorgeschlagenen und untersuchten Teststrecken (Erklärung: DWD = Deutscher Wetterdienst; GWC = Global Weather Corporation; FOR = FORECA; DTN = Telvent DTN)
- Tab. 12: Übersicht über die vorgesehene Erfassung der Daten im Projekt

Tabellen

- Tab. 1: Aufstellung der für die streckenbezogene Straßenwetter-Vorhersage wünschenswerten Parameter. Mit „O“ sind optionale und mit „M“ (= mandatory) oder „A“ (alternative mandatory) sind obligatorische Parameter gekennzeichnet
- Tab. 2: Aufstellung der Ausprägungen (Enumerations) der Niederschlagsart (TOP = Type of Precipitation)
- Tab. 3: Aufstellung der Ausprägungen (Enumerations) des Fahrbahnoberflächenzustands (RSC = Road Surface Condition)
- Tab. 4: Struktur der DatenTab. des digitalen Streckenmodells für die Teststrecken. Die Kilometrierung (KILOMTR) ist nur zur Abschätzung der Distanzen gedacht und entspricht nicht der offiziellen Betriebskilometrierung
- Tab. 5: Liste der Ausprägungen (Enum = Enumerations) für die Art des Belages (TYPPAV)
- Tab. 6: Liste der vordefinierten Ausprägungen (Enum = Enumerations) für Art der Straßenkonstruktion (TYPROAD)
- Tab. 7: Liste der vordefinierten Ausprägungen (Enum = Enumerations) für Art der Umgebung (TYPENVIR)
- Tab. 8: Übersicht der Anbieter von Straßenwettervorhersagen, die sich am Projekt beteiligen
- Tab. 13: Liste der SWIS BAB GMA bzw. Straßenwetterstationen im Bereich der im Projekt bearbeiteten Teststrecken. Grün markierte Felder sind gegenüber den offiziellen Angaben korrigierte Positionen
- Tab. 14: Datentabellen der aus dem SH10-Schlüssel konvertierten CSV Dateien. Außerdem ist für jede GMA gekennzeichnet, welche Datentypen jeweils unterstützt werden
- Tab. 15: Liste der verwendeten Codierung der Ausprägungen für die Zustandsgröße (TOP) „Niederschlagsart“
- Tab. 16: Liste der verwendeten Codierung der Ausprägungen für die Zustandsgröße (RSC) „Fahrbahnoberflächenzustand“
- Tab. 17: Liste der verwendeten Codierung der Ausprägungen für die Zustandsgröße (ICOP) „Niederschlagsintensitätsklasse“
- Tab. 18: Liste der archivierten Daten an den Stationen Offenbau II und Gelbelsee II an der Teststrecke A9 Greding. Gelb hinterlegte Felder sind Datentypen, welche nur speziell für das Projekt erfasst worden sind – normalerweise werden im SWIS diese Datentypen nicht verwendet
- Tab. 19: Erläuterung zu den Ausprägungen der Kodierung (enum = Enumerations) von Niederschlagsart, Straßenzustand (RSC = Road Surface Condition) des eingebauten Sensors und des optischen berührungslosen Sensors (optical remote)

- Tab. 20: Datentabellen der CSV Dateien der Messstellen aus dem Bereich SM Viechtach
- Tab. 21: Codierung der Ausprägungen für die Zustandsgröße (RSC) „Fahrbahnoberflächenzustand“
- Tab. 22: Codierung der Ausprägungen für die Zustandsgröße „Niederschlagsart“
- Tab. 23: Liste der Positionen der GMA im Bereich der Teststrecke3 A 4 BAST im Streckenmodell mit Angabe der Streckensegment ID (RSEG_ID) und der Modell-Kilometrierung (KILOMTR). Die Segment-Kilometrierung stimmt nicht mit den offiziellen Betriebskilometern überein!
- Tab. 24: Aufbau der Datendateien aus der SWIS Rechnerzentrale Kamen (KM)
- Tab. 25: Datenstruktur der Dateien der GMA'n im Bereich A 4 BAST
- Tab. 26: Kodierung der Ausprägungen (Enumerations) für die Zustandsgröße (TR) „Niederschlagsstufe“
- Tab. 27: Kodierung der Ausprägungen (Enumerations) der Zustandsgröße (SWHR) „Wasserfilmstufe“
- Tab. 28: Kodierung der Ausprägungen (Enumerations) der Zustandsgröße (RST) „Straßenzustand“
- Tab. 29: Liste der Datenfelder der archivierten Dateien. Die Abkürzungen der Messgrößen sind gemäß TLS. Die Ausprägungen der Zustandsgrößen FBZ, NS, FZW sind gemäß TLS. Fahrspur 1 = Lastfahrstreifen, 2 = Überholspur
- Tab. 30: Aufstellung aller bisher im Einsatz befindlichen Fahrzeuge für die mobile Datenerfassung. Einschließlich Fahrzeuge des AN für die thermische Kartierung
- Tab. 31: Kodierung (Enumerations) der Ausprägung des Fahrbahnoberflächenzustands mit Erläuterung
- Tab. 32: Datentabellen der Exportdatei für die auszuwertenden mobilen Daten
- Tab. 33: Datentabellen der Export Dateien für die IceCar4 Messfahrten. Die gelb unterlegten Positionen sind lediglich für evtl. Diagnosezwecke vorgesehen
- Tab. 34: Liste der archivierten Daten des IceCar5 Messfahrzeugs der BAST
- Tab. 35: Kriterien für die Wetterklassen, die für die einzelnen Thermalkartierungen angesetzt werden müssen
- Tab. 36: Übersicht der archivierten Straßenwetter-Prognosen zur Validierung
- Tab. 37: Codierung der Ausprägungen (Enumerations) für Straßenzustand (SZ), sowie die Zuordnung zu der im Projekt einheitlich zu verwendenden Ausprägungen
- Tab. 38: Liste der Codierung der Ausprägungen (Enumerations) für Niederschlagsart (WR), sowie die Zuordnung zu den im Projekt einheitlich verwendeten Codierungen und Ausprägungen für Niederschlagsart (TOP = Type of Precip.)
- Tab. 39: Dateistruktur Straßenwettervorhersagen des DWD auf SWIS Messstellen bezogen in stündl. Auflösung
- Tab. 40: Codierung der Ausprägungen (Enum) für Niederschlagsart (precipitation_type) in den Vorhersagen der MeteoBlue
- Tab. 41: Dateistruktur der Straßenwettervorhersagen der MeteoBlue AG bezogen auf Streckensegmente an Messstellen
- Tab. 42: Dateistruktur der Straßenwettervorhersagen der GWC/INRIX bezogen auf ein Strecken-Raster von 500 m Auflösung
- Tab. 43: Codierung der Ausprägungen (Enum) für die Niederschlagsart (precip_type) der GWC/INRIX Vorhersagen
- Tab. 44: Codierung der Ausprägungen (Enum) für den Belagszustand (road_condition) der GWC/INRIX Vorhersagen
- Tab. 45: Codierung der Ausprägungen (Enum) für Niederschlagsart (TypeOfPrecip) der Vorhersagen von Telvent DTN

- Tab. 46: Codierung der Ausprägungen (Enum) von Belagszustand (RoadSurfaceCondition) der Vorhersagen von Telvent DTN
- Tab. 47: Dateistruktur der Straßenwettervorhersagen von Telvent DTN, bezogen auf Messstellen der Teststrecken
- Tab. 48: Datenstruktur der von FORECA gelieferten Vorhersagedaten
- Tab. 49: Tabellen der Ausprägungen (Enumerations) der Zustandsgrößen Niederschlagsart (TOP = Type of precipitation) und Fahrbahnzustand (RSC = Road Surface Condition) der von FORECA gelieferten Vorhersagedaten
- Tab. 50: Ordnerstruktur auf dem FTP Server, sowie die Accounts mit Zugriffsrechten
- Tab. 51: Statistische mittlere Abweichung Bias (= Mittelwert der Abweichungen) und MAE (= Mittlere absolute Abweichung), differenziert nach dem gemeldeten Fahrbahnzustand (FBZ) nach IRS31 und nach MARWIS
- Tab. 52: Ergebnisse der Analyse der Abweichung der mobilen Belagstemperaturen bei Vorbeifahrt an der Station Offenbau II der A 9. Im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. BIAS bedeutet der Mittelwert der Abweichung in °C, MAE bedeutet die mittlere absolut genommene Differenz in ± °C und StdDev bedeutet die Std.Abweichung in ± °C
- Tab. 53: Ergebnisse der Analyse der Abweichung der mobilen Belagstemperaturen bei Vorbeifahrt an der Station Gelbelsee II der A 9. Im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017. BIAS bedeutet der Mittelwert der Abweichung in °C, MAE bedeutet die mittlere absolut genommene Differenz in ± °C und StdDev bedeutet die Standardabweichung in ± °C
- Tab. 54: Ergebnisse der Analyse der Abweichung der mobilen Belagstemperaturen bei Vorbeifahrt an der Station Predigtstuhl der St2139. Im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017. BIAS bedeutet der Mittelwert der Abweichung in °C, MAE bedeutet die mittlere absolut genommene Differenz in ± °C und StdDev bedeutet die Standardabweichung in ± °C
- Tab. 55: Std.Abweichungen der Vergleiche der mobilen Stichproben zu den gleichzeitig ermittelten stationären Werten. IRS-1 → eingebaute Sonde in der Lastspur; NIRS-1 → berührungsloser Sensor in der Lastspur; NIRS-2 → berührungsloser Sensor in der Spur 2 (Überholspur)
- Tab. 56: Statistik des Vergleichs zwischen der mobil und stationär gemessenen Wasserfilmdicke an der SWS Predigtstuhl (St2139) im Zeitraum 06.11.2016 bis 11.03.2017. Mit LKW MARWIS ID 20815, ca. 1.025 Stichproben. BIAS = Mittelwert der Differenzen, MAE = Mittelwert der absoluten Abweichungen, StdDev = Std. Abweichung
- Tab. 57: Statistik des Vergleichs zwischen der mobil und stationär gemessenen Wasserfilmdicke [µm] an Offenbau II A 9 im Zeitraum 15.12.2016 bis 22.04.2017. LKW MARWIS ID 71215 ca. 89 Stichproben. BIAS = Mittelwert der Differenzen, MAE = Mittelwert der absoluten Abweichungen, StdDev = Std.Abweichung
- Tab. 58: Statistik des Vergleichs zwischen der mobil und stationär gemessenen Wasserfilmdicke [µm] an Gelbelsee II A 9 im Zeitraum 16.12.2016 bis 30.03.2017. LKW MARWIS ID 71215 ca. 166 Stichproben.
- Tab. 59: Beispielhafte Auswahl der Streckensegmente für die Überprüfung der Transformation. TM bedeutet Thermal Mapping bzw. erweiterte Thermalkartierungsfahrten. WFD bedeutet Wasserfilmdicke (Wasseräquivalent). Die Kilometerangabe ist rein virtuell und dient lediglich der Entfernungsinformation und ist nicht identisch mit der Kilometrierung im Betriebsdienst

- Tab. 60: Berechnete Parameter der Transformationsfunktion der einzelnen Streckensegmente der A 9 in Bezug auf den Referenzort SWS Offenbau. Parameter über alle Wettersituationen. R2 bedeutet das Bestimmtheitsmaß
- Tab. 61: Auflistung der ausgewählten Streckensegmente für die Teststrecke St2139
- Tab. 62: Parameter der Transformationsfunktion für die ausgewählten Streckensegmente der Teststrecke St2139. Der Vertrauensbereich (Vertr.Ber.) entspricht der Standardabweichung der Transformation. R2 bedeutet das Bestimmtheitsmaß. Die mittlere Abweichung ist der Mittelwert der Differenzen nach oben oder unten
- Tab. 63: Statistische Kennzahlen der Anwendung der Transformationsfunktion (Streckeneigenschafts-Modell) auf die Streckensegmente der A 9 im Zeitraum 13.12.2016 bis 30.04.2017 auf der Teststrecke im Vergleich zu den mobilen Messdaten des LKW AM Greding. BIAS = Mittelwert der Fehler, MAE = Mittelwert der absoluten Abweichungen, STDDEV = Std.Abweichung der Differenzen
- Tab. 64: Statistische Kennzahlen der Anwendung der Transformationsfunktion auf die Streckensegmente der St2139 im Zeitraum 06.11.2016 bis 30.04.2017 auf der Teststrecke im Vergleich zu den mobilen Messdaten des LKW der SM Viechtach. BIAS = Mittelwert der Fehler, MAE = Mittelwert der absoluten Abweichungen, STDDEV = Std.Abweichung der Differenzen
- Tab. 65: Definition der Wetterklassen für das statistische Streckeneigenschaftsmodell (Übertragungsfunktion). SB = Strahlungsbilanz; FBT-LT = Differenz zwischen Fahrbahntemperatur und Lufttemperatur; FBT-FKT = Differenz zwischen Fahrbahntemperatur und Feuchtkugeltemperatur
- Tab. 66: Ergebnisse der Fehleranalyse bei Anwendung des wetterklassierten Transformationsmodells am Beispiel der Streckensegmente der St2139 in der Winterperiode 2016/17. Im Vergleich die Ergebnisse der Fehler des numerischen Modells von Global Weather Corp. (GWC)
- Tab. 67: Einteilung der Ereignisse
- Tab. 68: Verfügbarkeit der Mess- und Prognose-Daten an allen Mess-Standorten (GMA) 2015/2016
- Tab. 69: Verfügbarkeit der Mess- und Prognose-Daten an allen Mess-Standorten (GMA) 2016/2017
- Tab. 70: BIAS, MAE und RMSE der Vorhersagen von DWD und meteoblue für Lufttemperatur (Temp), Taupunkt (TP) und Niederschlag (NS) an allen Mess-Standorten (GMA) für Wintersaison 2015/16 (nur Zeiträume und Stationen mit gültigen Messdaten)
- Tab. 71: Verfügbarkeit der Mess- und Prognose-Daten an allen Mess-Standorten (GMA) 2016/2017
- Tab. 72: Ergebnisse der Vorhersage-Validierung am Mess-Standort Offenbau (P423) 2016/2017. AT = Luft-Temperatur; RT = Straßen-Temperatur; TD = Taupunkt-Temperatur; WFH = Wasserfilmdicke [μm], PR = Niederschlag. Farben: Grün = beste Vorhersage; Gelb = zweitbeste Vorhersage. Prognosehorizont: 24 h, 1 h Werte
- Tab. 73: Ergebnisse der Vorhersage-Validierung am Mess-Standort Predigtstuhl (P423) 2016/2017. AT = Luft-Temperatur; RT = Straßen-Temperatur; TD = Taupunkt-Temperatur; WFH = Wasserfilmdicke [μm], PR = Niederschlag. Farben: Grün = beste Vorhersage; Gelb = zweitbeste Vorhersage. Prognosehorizont: 24 h, 1 h Werte
- Tab. 74: Validierung der verfügbaren Temperatur-Strecken-Prognosen jedes Anbieters (VAL 2-RT-1)
- Tab. 75: Validierung der verfügbaren Temperatur-Strecken-Prognosen mit BIAS-Korrektur (VAL 2-RT-2)

- Tab. 76: Validierung gemeinsam verfügbarer Temperatur-Strecken-Prognosen aller Anbieter (VAL 2-RT-3)
- Tab. 77: Validierung gemeinsam verfügbarer Temperatur-Strecken-Prognosen aller Anbieter, mit BIAS-Korrektur (VAL 2-RT-4)
- Tab. 78: Validierung verfügbarer Taupunkt-Temperatur-Strecken-Prognosen jedes Anbieters (VAL 2-DT-1)
- Tab. 79: Validierung verfügbarer Taupunkt-Temperatur-Strecken-Prognosen jedes Anbieters mit BIAS-Korrektur (VAL 2-DT-2)
- Tab. 80: Validierung gemeinsam verfügbarer Taupunkt-Temperatur-Strecken-Prognosen aller Anbieter (VAL 2-DT-3)
- Tab. 81: Validierung gemeinsam Taupunkt-Temperatur-Strecken-Prognosen aller Anbieter, mit BIAS-Korrektur (VAL 2-DT-4)
- Tab. 82: Validierung der verfügbaren Datenpunkte gegen den Mittelwert des Messprofils (VAL 2-WFH-1)
- Tab. 83: Validierung aller Messprofile gegen verfügbaren Datenpunkte aller Anbieter (VAL 2-WFH-2)
- Tab. 84: Validierung nasser Messprofile gegen verfügbaren Datenpunkte aller Anbieter (VAL 2-WFH-3)
- Tab. 85: Validierung eines Modell Gitterpunkts (VAL 3-RT-1-12h)
- Tab. 86: Validierung von fünf Modell Gitterpunkten (VAL 3-RT-2-12h)
- Tab. 87: Validierung von Modellvorhersage + adiabatischen Downscaling (VAL 3-RT-3-12h)
- Tab. 88: Validierung von Modellprognose + klassifiziertes Standardstreckenprofil (VAL 3-RT-4-12h)
- Tab. 89: Validierung von Downscaling-Wert + klassifiziertes Standardstreckenprofil (VAL 3-RT-5-12h)
- Tab. 90: Bewölkungsklassifikation
- Tab. 91: Validierung von Modellprognose + klassifiziertes Standardstreckenprofil (VAL 3-RT-6-12h)
- Tab. 92: Validierung von Modellprognose + nach Tag/Wolken klassifiziertes Standardstreckenprofil + BIAS (VAL 3-RT-7-12h)
- Tab. 93: Validierung von Messwert + nach Tag/Wolken klassifiziertes Standardstreckenprofil + BIAS (VAL 3-RT-8-1h)
- Tab. 94: Validierung von Einzelmesswert (VAL 3-RT-9-1h)
- Tab. 95: Temperaturklassifikation
- Tab. 96: Validierung von Modellprognose + klassifiziertes Standardstreckenprofil inkl. BIAS (VAL 3-RT-10-12h)
- Tab. 97: Klassifikation anhand des sensiblen Wärmestromes
- Tab. 98: Validierung von Modellprognose + nach Wärmestrom klassifizierte Standardstreckenprofile + BIAS (VAL 3-RT-10-12h)
- Tab. 99: Vergleich verschiedener Methoden für die Streckenprognose der Straßen-Temperatur, anhand von BIAS; MAE und RMSE aller Streckenprofile (VAL 3-RT-10-12h) an 87'347 Messpunkten
- Tab. 100: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose berechnet, ohne Messdaten, mit Nässefaktoren für unterschiedliche Niederschlagsmengenklassen
- Tab. 101: Klassifikation der Niederschlagsprognosen in 5 mm Klassen, mit Anzahl Messfahren zur Überprüfung
- Tab. 102: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose (VAL-3-WFH-4-12h) in 5 mm Klassen + Standardprofil berechnet (VAL-3-WFH-7-12h)
- Tab. 103: Niederschlagsklassifikation mit 3 mm Klassen

-
- Tab. 104: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose (VAL-3-WFH-4-12h) in 3 mm Klassen + Standardprofil (VAL-3-WFH-8-12h)
- Tab. 105: Bewölkungsklassifikation
- Tab. 106: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose (VAL-3-WFH-4-12h) + Standardprofil berechnet, anhand Bewölkung VAL-3-WFH-9-12h
- Tab. 107: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose und Nässekoeffizienten für jedes Straßensegment (VAL-3-WFH-10-12h)
- Tab. 108: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Niederschlagsprognose und klassifizierten Nässekoeffizienten für jedes Straßensegment (VAL-3-WFH-11-12h)
- Tab. 109: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Mittelwert der Wasserfilmmessung (VAL-3-WFH-11-1h)
- Tab. 110: Validierung Wasserfilmdicke basierend auf Mittelwert der Wasserfilmmessung und Nässekoeffizienten für jedes Straßensegment (VAL-3-WFH-12-1h)
- Tab. 111: Vergleich verschiedener Methoden für die Streckenprognose der Wasserfilmdicke, anhand von BIAS; MAE und RMSE aller Streckenprofile (VAL 3-RT-10-12h) an 87.347 Messpunkten

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2016

V 275: Modellversuch für ein effizientes Störfallmanagement auf Bundesautobahnen

Grahl, Skottke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 276: Psychologische Wirkung von Arbeitsstellen auf die Verkehrsteilnehmer

Petzoldt, Mair, Krems, Roßner, Bullinger € 30,50

V 277: Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen

Kathmann, Roggendorf, Scotti

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 278: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014

Fitschen, Nordmann € 30,50

V 279: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen

Geistefeldt, Giuliani, Busch, Schendzielorz, Haug, Vortisch, Leyn, Trapp € 23,00

2017

V 280: Demografischer Wandel im Straßenbetriebsdienst – Analyse der möglichen Auswirkungen und Entwicklung von Lösungsstrategien

Pollack, Schulz-Ruckriegel € 15,50

V 281: Entwicklung von Maßnahmen gegen Unfallhäufungsstellen – Weiterentwicklung der Verfahren

Maier, Berger, Kollmus € 17,50

V 282: Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen

Lippold, Vettters, Steinert € 19,50

V 283: Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten

Bark, Krähling, Kutschera, Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Schuckließ, Maier, Berger € 19,50

V 284: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten

Geistefeldt, Sievers

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 285: Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz

Kamptner, Thümmeler, Ohmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 286: Telematisch gesteuertes Kompaktparken – Grundlagen und Entwicklung

Kleine, Lehmann € 16,50

V 287: Werkzeuge zur Durchführung des Bestandsaudits und einer erweiterten Streckenkontrolle

Bark, Kutschera, Resnikow, Follmann, Biederbick € 21,50

V 288: Überholungen von Lang-Lkw – Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf

Roos, Zimmermann, Köhler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 289: Verkehrsqualität an verkehrsabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen

Geistefeldt, Giuliani, Vieten, Dias Pais € 20,00

V 290: Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 19,00

V 291: Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 18,50

V 292: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw

Burg, Schrempp, Röhling, Klaas-Wissing, Schreiner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 293: Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen

Geistefeldt, Hohmann, Estel
Unterauftragnehmer: Manz € 17,50

V 294: Wirtschaftlichkeitsbewertung besonderer Parkverfahren zur Lkw-Parkkapazitätserhöhung an BAB

Maibach, Tacke, Kießig € 15,50

V 295: Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss

Grotehusmann, Lambert, Fuchs, Graf € 16,50

V 296: Parken auf Rastanlagen mit Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Übergröße

Lippold, Schemmel, Kathmann, Schroeder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 297: Sicherheitstechnische Überprüfung von Elementen plangleicher Knotenpunkte an Landstraßen

Zimmermann, Beeh, Schulz, Roos

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 298: Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalysesysteme

Balck, Schüller, BalMBERGER, Rossol

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 299: Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen

Schwietering, Neumann, Volkenhoff, Fazekas, Jakobs, Oeser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

2018

V 300: Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten

Werkenthin, Kluge, Wessolek

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 301: Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung

Kemper, Sümmermann, Baier, Klemps-Kohnen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 302: Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB

Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

- V 303: **Psychologische Wirkungen von Arbeitsstellenlängen, -staffelung und -gestaltung auf die Verkehrsteilnehmer**
Scotti, Kemper, Oeser, Haberstroh, Welter, Jeschke, Skottke € 19,50
- V 304: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015**
Fitschen, Nordmann € 31,00
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: www.schuenemann-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,00
- V 305: **Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen**
Hartmann, Londong € 16,00
- V 306: **Anpassung des bestehenden Straßennetzes an das Entwurfskonzept der standardisierten Straßen – Pilotprojekt zur Anwendung des M EKLBest**
Lippold, Wittig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 307: **Evaluation des Sicherheitsaudits von Straßen in der Planung**
Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Bark, Beaulieu, Theis € 17,50
- V 308: **Überarbeitung und Aktualisierung des Merkblattes für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 1999)**
Gerstenberger, Hösch, Listl, Schwietering
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 309: **Photokatalytische Oberflächen zur Minderung von Stickoxidbelastungen an Straßen – TiO₂-Pilotstudie Lärm-schutzwand**
Baum, Lipke, Löffler, Metzger, Sauer € 16,50
- V 310: **Umweltfreundlicher Straßenbelag – photokatalytischer Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie**
Wang, Oeser, Steinauer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 311: **Feldversuch mit Lang-Lkw**
Irzik, Kranz, Bühne, Glaeser, Limbeck, Gail, Bartolomaeus, Wolf, Sistenich, Kaundinya, Jungfeld, Ellmers, Kübler, Holte, Kaschner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 312: **Sicherheitswirkung, Dauerhaftigkeit und Lärmemission von eingefrästen Rüttelstreifen**
Hegewald, Vesper, Irzik, Krautscheid, Sander, Lorenzen, Löffler, Ripke, Bommert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- 2019**
- V 313: **Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen**
Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50
- V 314: **Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten**
Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50
- V 315: **Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung**
Kappich, Westermann, Holst € 15,50
- V 316: **Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände**
Lindner, Hartmann, Schulze, Hübelt € 18,50
- V 317: **Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen**
Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Walther € 22,00
- V 318: **Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen**
Wolf, Berger, Bärwolff € 15,50
- V 319: **Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen**
Lippold, Veters, Ressel, Alber
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 320: **Einsatzbereiche und Entwurfsэлеmente von Rad-schnellverbindungen**
Malik, Lange, Andriesse, Gwiasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden € 18,00
- V 322: **Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren**
Hausmann € 18,00
- V 323: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2016**
Fitschen, Nordmann € 31,50
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: www.schuenemann-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,00
- 2020**
- V 321: **Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**
Diegmann, Wursthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00
- V 324: **Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA**
Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckließ, Schimpf, Schmotz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 325: **Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete**
Schmitt, Gerlach, Schwedler, Huber, Sander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 326: **Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen**
Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50
- V 327: **Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse**
Frenken, Mahmoudi € 16,50
- V 328: **Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**
Meisel, Balzer-Hebborn, Ellmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 329: **Entwicklungen für eine streckenbezogene Glättevorhersage**
Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50
- Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48
- Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
- www.schuenemann-verlag.de
- Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.