

Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (KliBet)

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 270

The logo for 'bast' is displayed in a bold, green, lowercase sans-serif font. The letters are thick and have a slight shadow effect, giving them a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (KliBet)

von

Christian Holldorb
Franziska Rumpel

Hochschule Biberach
Institut für Immobilienökonomie,
Infrastrukturplanung und
Projektmanagement (IIP)

Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe
Hermann Österle
Peter Hoffmann

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 270

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 Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, 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 Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt: FE-Nr.04.0251/2011/LRB
Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (KliBet)

Fachbetreuung:
Horst Badelt

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
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 978-3-95606-248-3

Bergisch Gladbach, April 2016

Kurzfassung – Abstract

Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst

Da es derzeit weitgehend offen ist, wie die Leistungen des Straßenbetriebsdienstes durch den Klimawandel beeinflusst werden, ist es Ziel des Forschungsprojektes, die Wechselwirkungen zwischen Klimawandel und Straßenbetriebsdienst abzuschätzen. Der Schwerpunkt hierbei liegt auf der Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst, wofür in einem ersten Schritt der generelle Einfluss der Witterung auf die Leistungen des Straßenbetriebsdienstes analysiert wird, da eine Vielzahl der Leistungen im Straßenbetriebsdienst durch die Witterung beeinflusst wird. Aufbauend auf umfangreichen Klimaprojektionen werden dann die Änderungen infolge des Klimawandels ermittelt. Ergänzend erfolgt eine Abschätzung, inwieweit durch die Optimierung des Straßenbetriebsdienstes die Emission der Treibhausgase reduziert werden kann.

Bis 2030 zeigt die Klimaprojektion nur geringe Änderungen der Lufttemperatur. Erst in den weiteren Perioden ist mit einem deutlichen Anstieg zu rechnen. Die Niederschläge werden im Winter zu- und im Sommer abnehmen. Regionale Unterschiede dieser Entwicklungen sind nur schwach ausgeprägt. Für den Winterdienst führen die stagnierenden Temperaturen bei gleichzeitigem Anstieg der Niederschläge bis 2030 zu einer Zunahme bei Einsatzstunden und Salzverbrauch um etwa 10 %. Danach ist mit einer deutlichen Reduktion der Einsatzstunden sowie der erforderlichen Salzmenge um durchschnittlich 16 % bis 2050 und um 40 % bis 2080 gegenüber 1991 bis 2010 zu rechnen. Die Aufwendungen infolge von Frostschäden an Fahrbahnen werden sich bis 2030 kaum verändern. Erst danach wird es zu einem signifikanten Rückgang der Frostschäden kommen. Bei der Grasmahd wird sich bis 2030 der Aufwand für die Grasmahd ebenfalls nicht signifikant ändern, erst in den darauffolgenden Perioden ist mit einer Zunahme zu rechnen.

Die Schadstoffemissionen, die durch den Straßenbetriebsdienst hervorgerufen werden, haben einen Anteil von unter 2 ‰ an den gesamten Emissionen des Kfz-Verkehrs. Maßnahmen, die zu einer Reduktion des Schadstoffausstoßes beitragen, sind jedoch trotz des geringen Anteils vielfach zu empfehlen, da mit ihnen noch weitere Vorteile verbunden sind.

Analysis of the effects of climate change on road operation services

At the current time, it largely remains to be seen how the work of the road operation services will be influenced by climate change, it is the objective of the research project to assess the interconnection between climate change and road operation services. The focus lies on ascertaining the effects of climate change on the road operation service, for which, as a first step, the general effect of the weather on the work of the road operation services is analysed, as a great number of the work of the road operation service is influenced by the weather. Building on extensive climate projections, changes due to climate change can then be ascertained. Additionally, an assessment takes place as to what extent the emission of greenhouse gases can be reduced through the optimisation of the road operation service.

The climate projection shows only slight changes of air temperature until 2030. Only in further periods is a distinct increase to be expected. Precipitation will increase in winter and decrease in summer. Regional differences of these developments are not strongly pronounced. For the winter service, the stagnating temperatures with a simultaneous increase in precipitation until 2030 lead to an increase of working hours, as well as the necessary amounts of salt by around 10%. Afterwards, a distinct reduction of working hours, as well as the necessary amounts of salt by an average of 16% until 2050 and by 40% until 2080 is to be expected compared to 1991 to 2010. The costs due to frost damage to road surfaces will hardly change until 2030. Only afterwards will there be a significant decrease of frost damage. The costs for roadside mowing will also not significantly change until 2030, only in the following periods is an increase to be expected.

Pollutant emissions, which are caused by the road operation service, come to a total of under 2‰ of overall emissions of traffic. Measures which contribute to a reduction of pollutant emissions, are, however, despite the low amount, still to be recommended, as other advantages are connected with them.

Summary

Analysis of the effects of climate change on road operation services

1 Task

Continuing global climate change will also be noticeable in Germany in the coming years. Not only an increase in the average temperature, but also a predicted increase in extreme weather events can have distinct effects on our environment. While the effects of climate change on road infrastructure are already a matter of research, it remains, however, largely to be seen how the work of the road operation services will be influenced by climate change.

The overall objective of the research project is an assessment of the interconnection between climate change and road operation services. The focus lies on ascertaining the effects of climate change on the road operation service, for which, as a first step, the general effect of the weather on the work of the road operation services is analysed. Building on extensive climate projections, changes due to climate change can then be assessed. In order to consider different effects of climate change on a regional basis, but also different boundary conditions for the road operation services, this research covers twelve motorway and road maintenance centres overall. Generally, all work areas of the road operation service in Germany are examined for their dependence on the weather, as a great number of work in road operation service is influenced by the weather in its scope and implementation. Additionally, in the R&D project, an assessment as to what extent the emission of greenhouse gases can be reduced through the optimisation of the road operation service has been carried out.

2 Research method

On the basis of a literature analysis, two workshops, as well as interviews with maintenance centre managers and experts in the field, possible climatic influences on the work of the road operation services and the associated relevant climatic ranges of influence have been derived. In choosing the involved maintenance centres it was ensured that different climatic regions, topographies and traffic conditions were taken into account.

As a data basis for the analysis of the influence of the weather on the scope of work of the road operation service, the recorded operational data of the respective maintenance centres from 2006 to 2010 have been used. For this, working hours, as well as the use of salt on a monthly basis was made available. In order to ascertain the influence of the weather on the operational data, the meteorological parameters of the meteorological stations which lie in the area of the maintenance centre or within its vicinity, were enhanced. For selected services, extensive correlation analyses were carried out to quantify the influence of the weather on the road operation service.

To project the climate data for the future, the regional statistic climate model STARS (STatistical Analogue Resampling Scheme) was selected. This creates substantiated, spatial as well as temporal assessments of regional climate developments in high resolution. An important feature of the procedure is that the simulations are only limited by a given linear temperature system (for example, average value and increase during the simulation period). The simulations are put together from past observations of the period observed, in such a way that the new sequence of observations create temperature data, which correspond to the given temperature system (trend). Furthermore, heuristic criteria ensure that the simulations display realistic years. Different test procedures show that the model is very well able to reproduce the observed climatology of a region. Comparison to a similar experiment of a dynamic model shows that the statistical approach achieves a considerably better correlation with the observations.

100 realisations of the RCP8.5 scenario, calculated with the STARS model on a daily values basis until the year 2080 have been used as climate projections. The stated temperature trend is 4°K until 2100. As the reference climate the 20-year observation period of 1991 to 2010 was used, and the climate projections with the three 20-year periods of 2011 to 2030, 2031 to 2050 and 2061 to 2080 have been evaluated in contrast to the period of 1991 to 2010. The focus of the future climatic conditions analysis was placed on the first two periods of 2011 to 2030 and 2031 to 2050, as the uncertainty of the scenario results distinctly increases with increasing distance from the current condition. Generally, the average values of 12 maintenance centres were analysed and only in

special cases were the values of the individual maintenance centres observed.

The climate projections for the three projected periods (2011 to 2030, 2031 to 2050, 2061 to 2080) and the reference period (1991 to 2010) were transferred onto the road operation service, while operation hours were back-calculated or projected for future periods, on the basis of the ascertained weather dependencies with the help of linear models. The influence of changes on the road operation service due to climate change during extreme weather events is not described quantitatively, but only qualitatively, as considerable expenditures can be connected with these weather events in individual cases, but overall these do not significantly affect the spectrum of tasks of the operation service.

For an assessment, as to what extent the road operation service can be optimised in order to minimise the emissions of pollutants which influence the environment, the pollutant emissions were estimated on the basis of blanket approaches, which are caused by the road operation service.

3 Research results

A large number of work in the road operation service is influenced by the weather. The weather can influence the scope, frequency, as well as the type of work. This influence on the winter service can be clearly quantified, for other services a trend is discernible: that the cost correlates with the weather, but with this other influences are also decisive for the scope of services.

For the service of "removing damage to road surfaces", a tendency is discernible: With low minima of daytime air temperature and a higher amount of icy days in the winter months, meaning in colder winters, more working hours are registered for this service. However, the correlation is very low, so that a statistically secure quantification of this influence is not possible. An influence of frost-thaw changes was not discernible with the available day values about the weather situation. For weather situations which lead to heat damage to road surfaces in summer, however, no effects on the scope of services could be discerned.

The scope of roadside mowing in intensive areas is also not significantly influenced by the weather.

Neither air temperature, duration of the vegetation period, nor precipitation intensity influenced the working hours so strongly that secure statements are possible. It can be assumed that only extreme weather conditions influence growth so strongly that the scope of maintenance for landscaped areas has to be adapted. Furthermore, a lower quality of roadside mowing can be accepted at times, as long as traffic safety is not immediately affected.

In contrast, in winter service a high correlation of operation hours for snow ploughing and spreading assignments, as well as for salt use depending on the amount of fresh snow, as well as the number of days with snowfall, slippery ice or black ice and frost has been ascertained. However, this correlation is only maintenance centre-specific, a nationally uniform quantification is not possible. This confirms other research, e.g. from Switzerland, in which winter indexes were also only ascertained with regional validity.

Until 2030, the climate projection only displays low changes of air temperature. Only in the later periods is a clear increase to be expected. In winter, temperatures will increase by around 3°K until 2080. In summer, the increase in temperature is less distinct, the day maximum increases by a little more than 2°K, the day minimum, on the other hand, only by 1°K. Precipitation will increase in winter and decrease in summer in all time periods. Regional differences of these developments are only weak. However, the increase of precipitation in winter until 2030 leads to more snowfall in the regions with lower air temperature (low mountain ranges, foothills of the Alps, etc.) compared to the milder regions.

For the road operation service, expenditures as a consequence of frost damage to road surfaces will not change dramatically until 2030. Only afterwards, due to the distinct rise in temperature, will there be a significant decrease of frost damage and, connected to this, a decrease in the expenditure for the road operation service. Due to low correlation between expenditure and climate data, as well as the low regional differentiation of the climatic development, no regional differences between maintenance centres can be discerned.

Also, with the expenditure for mowing the grass, no secure statement can be made about changes due to climate change, as it is getting warmer and

therefore the duration of the vegetation period increases but precipitation decreases in summer and with that the vegetation period is becoming drier overall. Until 2030, the expenditure for mowing the grass will not significantly change, only in the following periods is an increase to be expected. Tendentially, this increase will be stronger in higher elevations, as the vegetation period will be prolonged there especially and, at the same time, the reduction of precipitation is lower than in the lowlands. A quantification of the changes is, however, not possible, as the expenditure for mowing the grass is not directly proportional to the weather, but, above all, becomes significant when an additional mowing cycle becomes necessary due to the weather.

For the winter service, the stagnating temperatures with a simultaneous increase in precipitation in the winter months until 2030 will lead to an increase of operation hours and salt use by around 10%. In the following periods, a distinct reduction of operation hours, as well as the necessary amounts of salt by an average of 16% until 2050 and by 40% until 2080 is to be expected compared to the 1991 to 2010 reference period. Tendentially, it can be expected that the long-term decrease will be stronger for maintenance centres in the lowlands than for maintenance centres at higher altitudes, as the periods in which no winter service is necessary will increase distinctly in the lowlands. The 100 realisations of climate projects carried out show that the scope of the winter service will also be subject to great variations from year to year in the future. Therefore, even with a long-term average decrease, there can still be extreme weather conditions like in 2010.

The development of extreme weather events (storms, heavy precipitation, continuous rain, periods of hot and dry weather), as well as their effects on the scope of the road operation service cannot be quantified at the present time. As a consequence of extreme weather events, especially control services, safeguards, as well as cleaning and clearing work will have to be carried out by the operation service. The clearing of extensive damage is not usually carried out by the operation service, but in the framework of maintenance measures. Besides, extreme weather periods can also affect working conditions.

Pollutant emissions which are caused by the road operation service – the emissions of operation service vehicles and additional emissions through traffic as a consequence of traffic obstructions – have to be taken into account. However, their scope is low compared with the overall emissions through traffic. An amount of nearly 1‰ has been ascertained for the vehicles of the operation service and an amount of around 0.7‰ for the additional emissions of traffic as a consequence of traffic obstructions. Measures, which contribute to a reduction of pollutant emissions, however, are still to be recommended, despite the low amount as further advantages are connected with them.

4 Conclusions for practice

The research in the framework of the R&D project led to the conclusion that no considerable effects of climate change to the road operation service are to be expected. Substantially, however, the following aspects should be considered:

- The average expenditure for the winter service will increase by around 10% until 2030; afterwards a distinct decrease is to be expected. Accordingly, the cost of the winter service and the utilised capacity of resources will also increase first of all.
- The probability of extreme wintery weather conditions like in 2010 does not change significantly so that with the sufficient equipment today normally no increase in the available resources is necessary.
- A decrease of costs due to frost damage is to be expected long-term, so that frost-proof road construction according to the applicable technical standards is still recommended.
- As a consequence of better growth conditions, for the long-term additional mowing in intensive areas is to be expected more regularly; until 2030, however, this will only be necessary for individual cases.
- The projection of extreme weather events can still be improved with the help of dynamic calculation models and should therefore be adapted as soon as according data from global models is available. However, at the moment, at least for the period until 2030, considerable

changes of extreme weather conditions are not to be expected, so the scope of control, safeguarding, cleaning and clearing work will not change significantly for the time being.

- Climate changes, especially the tendential increase of hot and dry periods, can affect work and operational conditions. However, presumably they will only be moderate, so reactions can be flexible.

Inhalt

Abkürzungen und Glossar	10	3.2.6 Leistungsbereich: Streckenkontrolle. . .	39
1 Einleitung	13	3.2.7 Weiteres	39
2 Stand der Wissenschaft	14	3.3 Exemplarische Auswertungen für ausgewählte Leistungen	40
2.1 Witterungsabhängigkeit des Straßenbetriebsdienstes.	14	3.3.1 Bauliche Unterhaltung	40
2.2 Szenarien des Klimawandels für Deutschland	17	3.3.2 Grünpflege im Intensivbereich	45
2.2.1 Szenarien für Deutschland	17	3.3.3 Winterdienst	49
2.2.2 Weitere nationale Untersuchungen . . .	19	4 Klimaprojektionen bis 2080	52
2.2.3 Internationale Untersuchungen	20	4.1 Modell- und Szenarienauswahl zur Szenarienbildung für die Klimaprojektionen	52
2.3 Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation.	21	4.2 Projektion der für den Straßen- betriebsdienst relevanten Klima- parameter	53
2.4 Auswirkungen des Klimawandels auf das Straßennetz	23	4.2.1 Bauliche Unterhaltung	58
2.4.1 Nationale Untersuchungen	23	4.2.2 Grünpflege	60
2.4.2 Internationale Untersuchungen	25	4.2.3 Winterdienst	62
2.5 Zusammenfassende Analyse	29	4.2.4 Extremwetterereignisse	63
3 Analyse des Witterungs- einflusses auf Leistungen des Straßenbetriebsdienstes	30	4.3 Zusammenfassende Analyse	66
3.1 Methodik und Untersuchungs- umfang	30	5 Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst	69
3.1.1 Betrachtete Meistereien	30	5.1 Methodik und Untersuchungs- umfang	69
3.1.2 Verwendete Daten zum durchge- führten Betriebsdienst.	32	5.2 Aufwand infolge von Frostschäden . . .	70
3.1.3 Verwendete Klimadaten	32	5.3 Grünpflege im Intensivbereich	72
3.1.4 Durchgeführte Untersuchungen	34	5.4 Winterdienst	74
3.2 Identifikation möglicher Witterungs- einflüsse und relevanter klimatischer Einflüsse	35	5.5 Auswirkungen von Extremwetter- ereignissen	77
3.2.1 Leistungsbereich: Bauliche Unterhaltung	35	6 Optimierung des Betriebsdienstes zur Minimierung des Schadstoff- ausstoßes durch den Verkehr	80
3.2.2 Leistungsbereich: Grünpflege.	36	7 Zusammenfassung und Ausblick . . .	82
3.2.3 Leistungsbereich: Wartung und Instand- haltung der Straßenausstattung	37	8 Literatur	86
3.2.4 Leistungsbereich: Reinigung	37	Anlagen	
3.2.5 Leistungsbereich: Winterdienst	38	Die Anlagen zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:	
		http://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar	

Abkürzungen/Glossar

AD	Autobahndreieck	GCM	General Circulation Model
AK	Autobahnkreuz	GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
AkD	Arbeitsstelle kürzerer Dauer	GLOWA	Globaler Wandel des Wasserkreislaufes
AID	Arbeitsstellen längerer Dauer	GMA	Glättemeldeanlage
AM	Autobahnmeisterei	i	Parameternummer
AP	Arbeitspaket	i_d	Tag (bezogen auf Datum)
AR	Assessment Report	IIP	Institut für Immobilienökonomie, Infrastrukturplanung und Projektmanagement der Hochschule Biberach
AS	Anschlussstelle	i_m	Monat (bezogen auf Datum)
BG	Bedeckungsgrad	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	i_r	Nummer der Realisierung
BMV	Bundesministerium für Verkehr	i_y	Jahr (bezogen auf Datum)
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung	j	Periodennummer/Parameternummer
CCLM	COSMO – Climate Limited-area Modelling	k	Meistereinummer (von 1 bis 12)
CO ₂ e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent	K	Kelvin
COSMO	Consortium for small scale modeling	L	Landesstraße
CRCM	Canadian Regional Climate Model	LDR	Luftdruck
DDR	Wasserdampfdruck	MLR	Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz, Baden-Württemberg
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.	mm	Millimeter
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr	MPI-OM	Ozeanmodell des Max Planck Institut für Meteorologie in Hamburg
DWD	Deutscher Wetterdienst	NP	Länge der analysierenden Saison innerhalb des Jahres
E Emi	Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen	NSk	Anzahl der Stationen innerhalb der Meisterei
ECHAM	Modell des ECMWF, Hamburger Version	RAS-Ew	Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	RCP	Representative Concentration Pathway
FAZ	Frankfurter Allgemeine Zeitung	REMO	Regional climate Modelling
FE	Forschungs- und Entwicklung	RF	Relative Luftfeuchte
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen	RR	Tagessumme des Niederschlags
Finnra	The Finnish Road Administration	s	Stationsnummer

SH	Schneedeckenhöhe
SHRP	Strategic Highway Research Program
SM	Straßenmeisterei
SN	Neuschneehöhe
SON	Sonnenscheindauer
SRES	Special Report on Emission Scenarios
ST	Staatsstraße
STARS	Statistical regional model
STR	Globalstrahlung
T_{\max}	Tagesmaximum der Lufttemperatur
T_{\min}	Tagesminimum der Lufttemperatur
T_{mit}	Tagesmittel der Lufttemperatur
TU	Technische Universität
W	Mittlere Windgeschwindigkeit
WETTREG	Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode
WS	Windspitzen für die Sturmtage
WVA	Wechselverkehrszeichen
σ	Sigma (Standardabweichung)

Glossar

A1, A2, B1, B2

Szenarienfamilien des IPCC Fourth Assessment Report (AR4) – ökonomisch ausgerichtete Szenarien

- globale Wirtschaftswachstum, 2,0-5,4 °C (A1),
- regionale Wirtschaftsentwicklung, 2,0-5,4 °C (A2),
- globale Nachhaltigkeit, 1,1-2,9 °C (B1),
- regionale Nachhaltigkeit, 1,4-3,8 °C (B2).

A1B-Szenarium

Szenariengruppe des IPCC Fourth Assessment Report (AR4) ausgewogene Nutzung fossiler und nicht fossiler Energiequellen

ECHAM

ECHAM ist ein globales Klimamodell des Max Planck Institut für Meteorologie in Hamburg

GCM-Läufe

General Circulation Models (Simulationen globaler Klimamodelle)

Gitterdaten

siehe Re-Analysen

Guanting-Projekt

The Guanting Project – A German Chinese cooperation. Sustainable water and agricultural land use in the Guanting watershed under limited water resources

Heuristische Kriterien

auf Erfahrungen beruhende Annahmen

Impaktmodell

Modelle die mit Atmosphärendaten angetrieben werden, und Änderungen im Klima auf verschiedenen Sektoren (Hydrologie, Agrar, Forstwirtschaft etc.) abbilden

Klima

beschreibt die saisonale Abfolge des Wetters an einem Ort über einen Zeitraum von mehreren Dekaden

Lokales Modell

siehe CCLM

Monte-Carlo-Simulation

sehr häufig durchgeführte Zufallsexperimente

RCP 4.5

niedrige Treibhausgaskonzentration mit +2.6 W/m² Strahlungsantrieb

RCP8.5-Szenarium

hohe Treibhausgaskonzentration mit +8.5 W/m² Strahlungsantrieb

RCP-Szenarien

Szenarien des 5th Assessment Report (AR5)

Re-Analysen

Globaler Datensatz meteorologischer Parameter, bei welchem Beobachtungen in ein Wettervorhersagemodell assimiliert werden. Sie werden auch Gitterdaten genannt.

SRES

Special Report on Emissions Scenarios des IPCC Fourth Assessment Report (AR4)

Subskalige

Subskalige Prozesse sind Vorgänge auf einer kleineren Skala, die durch das Gitternetz globaler bzw. regionaler Klimamodelle nicht aufgelöst werden können. Da diese trotzdem relevant sind, werden sie parametrisiert.

Szenarium

Bezogen auf die Emission von Treibhausgasen spiegeln Szenarien die mögliche Entwicklung von Treibhausgasen auf der Grundlage unterschiedlichster Entwicklungsmöglichkeiten der Weltwirtschaft wieder. Diese gehen als äußerer Antrieb in die globale Klimamodelle ein.

Waldwachstumsmodell 4C

Forest Ecosystems in a Changing Environment

1 Einleitung

Der fortschreitende globale Klimawandel wird sich auch in Deutschland in den kommenden Jahren bemerkbar machen. Nicht nur eine erhöhte Durchschnittstemperatur sondern auch die prognostizierte Zunahme von Extremwetterereignissen, wie Hitzewellen, Starkniederschlag und Stürme, werden deutliche Auswirkungen auf unsere Umwelt haben [MÄDER 2009].

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) befasst sich in mehreren Untersuchungen mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Straßeninfrastruktur und mit möglichen Anpassungsstrategien. Weitgehend offen ist aber, wie die Leistungen des Straßenbetriebsdienstes durch den Klimawandel beeinflusst werden. Daher beauftragte das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), vertreten durch die BASt das Institut für Immobilienökonomie, Infrastrukturplanung und Projektmanagement (IIP) der Hochschule Biberach mit dem FE-Vorhaben „Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst“. Die Aufbereitung vorliegender Witterungsdaten und die Klimaprojektion erfolgte durch das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) als Unterauftragnehmer.

Gesamtziel des Forschungsprojektes ist es, die Wechselwirkungen zwischen Klimawandel und Straßenbetriebsdienst abzuschätzen. Der Schwerpunkt hierbei liegt auf der Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst, wofür in einem ersten Schritt der generelle Einfluss der Witterung auf die Leistungen des Straßenbetriebsdienstes analysiert wird. Aufbauend auf umfangreichen Klimaprojektionen können dann die Änderungen infolge des Klimawandels abgeschätzt werden. Um regional unterschiedliche Auswirkungen des Klimawandels, aber auch verschiedene Randbedingungen für den Straßenbetriebsdienst berücksichtigen zu können, erfolgen diese Untersuchungen für insgesamt zwölf Autobahn- und Straßenmeistereien. Generell werden alle Leistungsbereiche des Straßenbetriebsdienstes in Deutschland auf ihre Witterungsabhängigkeit untersucht, da eine Vielzahl der Arbeiten im Straßenbetriebsdienst in Umfang und Durchführung durch die Witterung beeinflusst werden. Ergänzend erfolgt im FE-Vorhaben eine Abschätzung inwieweit durch die Optimierung

des Straßenbetriebsdienstes die Emission der Treibhausgase reduziert werden kann.

Im vorliegenden Forschungsbericht werden in Kapitel 2 zunächst die bekannten Erkenntnisse zur Witterungsabhängigkeit des Straßenbetriebsdienstes, die möglichen Szenarien des Klimawandels für Deutschland sowie die Auswirkungen des Klimawandels auf die Straßeninfrastruktur und Vegetation dargestellt. Anschließend werden in Kapitel 3 die Witterungseinflüsse auf die Leistungen des Straßenbetriebsdienstes analysiert. Aufbauend auf einer Betrachtung des gesamten Leistungsspektrums wurden für die zwölf ausgewählten Autobahn- und Straßenmeistereien die Sofortmaßnahmen infolge Fahrbahnschäden, die Grasmahd und der Winterdienst detailliert betrachtet, um den Einfluss der Witterung mithilfe vorliegender Klimadaten und erfasster Aufwandsdaten auf den Leistungsumfang quantifizieren zu können. Für das weitere Leistungs- und Tätigkeitsspektrum werden die Witterungseinflüsse qualitativ beschrieben. Die maßgebenden Klimaparameter werden definiert, die den Witterungseinfluss am besten abbilden.

Die in Kapitel 3 ausgewählten maßgebenden Klimaparameter werden im Kapitel 4 für die drei Perioden 2011 bis 2030, 2031 bis 2050 und 2061 bis 2080 projiziert und mit den gemessenen Werten für den Betrachtungszeitraum 1991 bis 2010 verglichen. Hiermit ist es möglich, die Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst abzuschätzen. In Kapitel 5 sind hierzu für die ausgewählten Leistungen (Sofortmaßnahmen infolge Fahrbahnschäden, die Grasmahd und den Winterdienst) quantitative Abschätzungen dokumentiert. Die Auswirkungen auf das weitere Leistungsspektrum wird in Kapitel 5 ebenfalls dargestellt, wobei besonderes Augenmerk auf die Entwicklung der Extremwetterereignisse gelegt wird.

Die Abschätzung, inwieweit durch die Optimierung des Straßenbetriebsdienstes die Emission der Treibhausgase reduziert werden kann und welche Optimierungsmöglichkeiten im Betriebsdienst hierzu sinnvoll sind, erfolgt in Kapitel 6. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse des FE-Vorhabens zusammengefasst. Der Schlussbericht wird durch einen umfangreichen Anhang ergänzt, dessen Schwerpunkt die detaillierte Darstellung der Untersuchungsergebnisse für jede der zwölf berücksichtigten Meistereien ist.

2 Stand der Wissenschaft

2.1 Witterungsabhängigkeit des Straßenbetriebsdienstes

Eine Vielzahl von Leistungen des Straßenbetriebsdienstes ist von der Witterung abhängig. Zum einen sind Leistungen, wie im Winterdienst, nur aufgrund der Witterungsbedingungen erforderlich, zum anderen werden aber auch der Umfang, die Produktivität und ggf. auch die erforderlichen Ressourcen durch die Witterung beeinflusst, z. B. der Aufwand für die Absicherung infolge eingeschränkter Sichtverhältnisse. Bereits bei der Entwicklung des Leistungsheftes für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen wurde deutlich, dass viele Leistungen in ihrer Häufigkeit, aber auch im erforderlichen Aufwand unmittelbar durch die Witterung beeinflusst werden, wobei nicht nur Mittelwerte, sondern gleichermaßen auch extreme Witterungsereignisse maßgebend sind [BMVBS 2004]. Eine umfassende Quantifizierung des Witterungseinflusses auf Häufigkeit und Aufwand für alle Leistungen gemäß Leistungsheft, wie sie auch für die Ermittlung von Soll-Werten im Rahmen der wirtschaftlichen Steuerung des Betriebsdienstes erforderlich ist, ist bisher jedoch noch nicht erfolgt. Nur für den Winterdienst wurden in Deutschland und im Ausland Modelle und hieraus abgeleitet Winterindizes entwickelt, mit denen Aufwand und Salzverbrauch auf Grundlage vorliegender Witterungsdaten simuliert bzw. prognostiziert werden können.

Einfluss der Witterung auf den Winterdienst

Räumen und Streuen als wesentliche Winterdienstleistungen sind nur erforderlich, wenn winterliche Straßenzustände aufgetreten sind bzw. prognostiziert werden. Der qualitative Zusammenhang ist in Bild 1 dargestellt. Es wird deutlich, dass im Wesentlichen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, Niederschlag und Luftfeuchtigkeit bei der Glättebildung zu berücksichtigen sind.

Welche Witterungsparameter den Winterdienst beeinflussen können, lässt sich auch daraus ableiten, welche Parameter an Glättemeldeanlagen (GMA) zur Erfassung und Prognose von Witterung und Fahrbahnzustand erfasst werden. Gemäß der DIN EN 15518, Teil 3 sind an jeder GMA folgende atmosphärische Witterungsparameter zu messen: Lufttemperatur, Relative Luftfeuchte, Niederschlagserkennungszeit und Niederschlagsart. Optional können zusätzlich Witterungsparameter

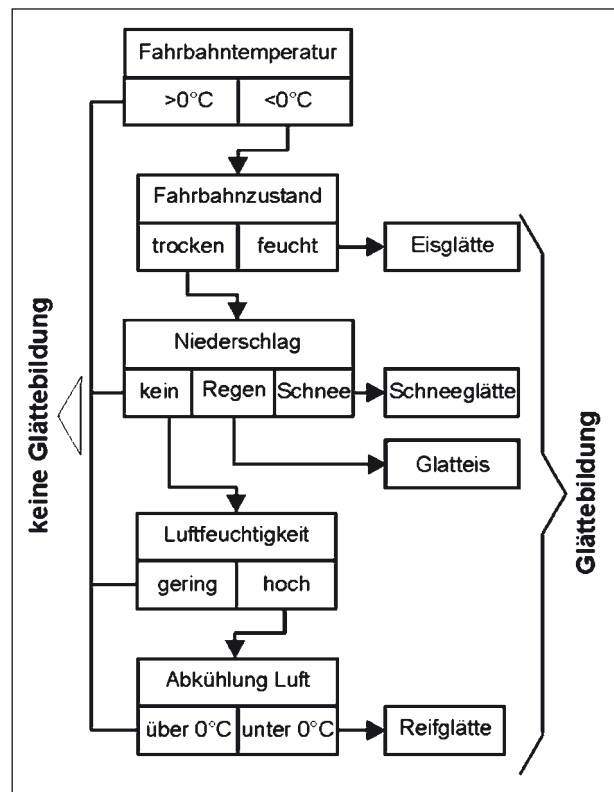


Bild 1: Entstehung von Winterglätte, aus [FGSV 2010]

erfasst werden, um die Aussagen für den Winterdienst zu verbessern: Niederschlagsintensität, Schneehöhe, Sichtweite sowie Windgeschwindigkeit, -spitzen und -richtung [DIN 2011].

Den starken Einfluss der winterlichen Witterung auf den Umfang des Winterdienstes und den Salzverbrauch haben in Deutschland die ungewöhnlich starken Winterperioden 2009/2010 und 2010/2011 deutlich gemacht, die einen erheblichen Mehraufwand im Winterdienst in Bezug auf Räumen und Streuen, aber auch einen erhöhten Bedarf an Streusalz erforderten. Die Salzproduzenten konnten in diesen Wintern der gestiegenen Nachfrage nicht immer gerecht werden, daher mussten viele Meistereien ihren Winterdienst zeitweise mit weniger oder gar keinem Streusalz durchführen, was zu erheblichen Problemen im Winterdienst in der gesamten Bundesrepublik führte [HANKE 2011]. Ursachen waren die deutlich unter dem langjährigen Durchschnitt liegenden Lufttemperaturen, die lang anhaltende Frostperiode ohne wesentliche Unterbrechungen und die intensiven Schneefälle, auch bei sehr tiefen Lufttemperaturen. Dabei war aber nicht die Niederschlagsmenge alleine ausschlaggebend, da diese kaum höher war als in bisherigen schneereichen Wintern, sondern vielmehr der Umstand, dass aufgrund der tieferen Lufttem-

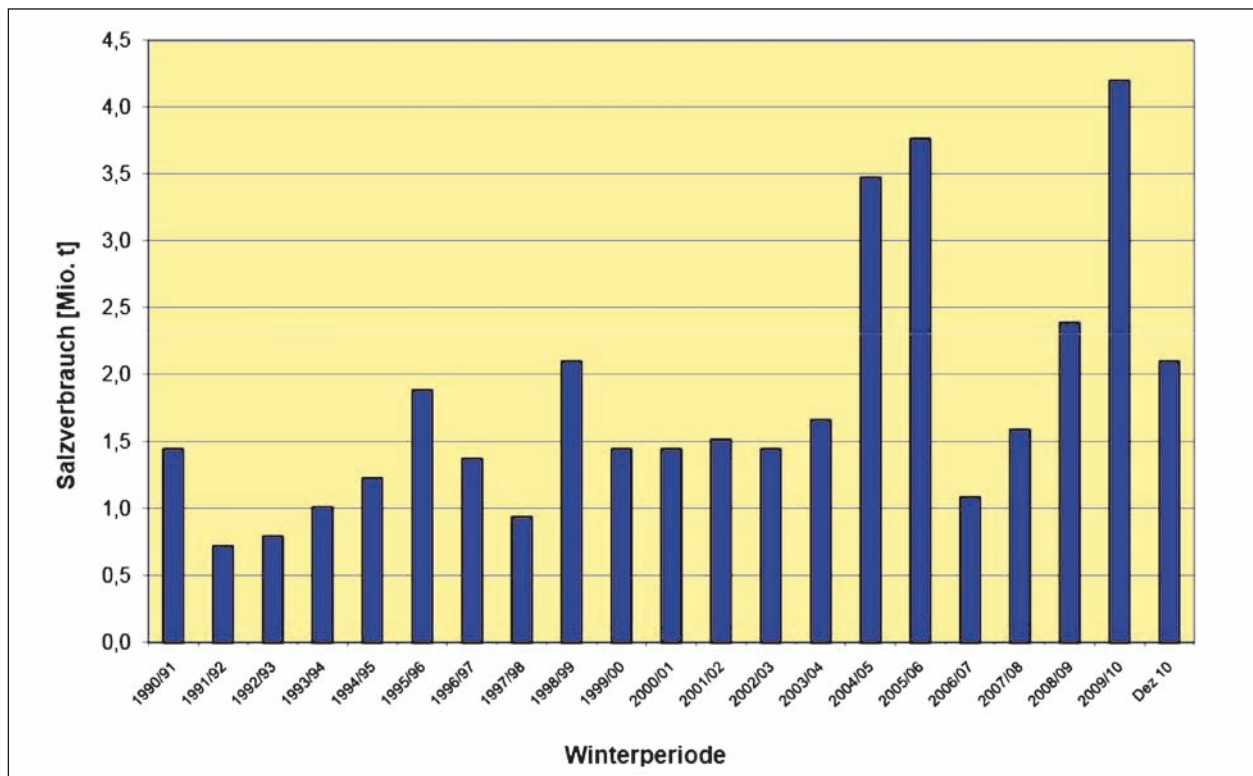


Bild 2: Salzverbrauch der letzten Winterperioden in der Bundesrepublik Deutschland im Vergleich, entnommen HANKE [2011]

peraturen fast der gesamte Niederschlag in den beiden Winterperioden als Schnee fiel. Die mittlere Lufttemperatur im Winter 2009/2010 lag über 2 °C unter dem langjährigen Schnitt, ebenso war es im Dezember 2010, als es fast 4 °C kälter als im Mittel war [HANKE 2011].

Bild 2 macht deutlich, wie stark der Salzverbrauch in Deutschland in Abhängigkeit der Winterperioden schwankt. Die Spannweite zwischen minimalem (ca. 0,7 Mio t) und maximalem (ca. 4,2 Mio. t) Salzverbrauch ist erheblich. Es ist davon auszugehen, dass auch der Aufwand für den Winterdienst, d. h. die Personal-, Fahrzeug- und Geräteeinsatzstunden in ähnlichem Umfang mit der winterlichen Witterung korrelieren.

Quantifizierung des Einflusses der Witterung mit Winterindizes

Mithilfe von Winterindizes kann der Einfluss der winterlichen Witterungsparameter auf Winterdienstumfang und Salzverbrauch quantifiziert werden. Für die Berechnung der Winterindizes werden in der Regel Korrelationsanalysen zwischen gemessenen Witterungsparametern und erfassten Einsatzstunden oder Salzverbräuchen durchgeführt. Somit können die Winterindizes nur für den zugrunde liegenden Untersuchungsraum und Betrachtungs-

zeitraum gelten. Weiterhin ist zu differenzieren, welche Zielsetzung mit dem Winterindex verfolgt wird. Beispiele sind die Überprüfung von erbrachten Einsatzstunden auf ihre Notwendigkeit bei privaten Winterdienstleistern oder die Abschätzung von Salzlagerkapazitäten zur Abdeckung des erforderlichen Streustoffverbrauchs.

Für Deutschland wurde durch BREITENSTEIN [1995] zum ersten Mal ein Winterindex entwickelt. Zielsetzung hierbei war vor allem der bundesweite Vergleich von tatsächlichem und hypothetischem Salzverbrauch infolge der gemessenen Witterungskenngrößen. Wesentlichen Einfluss auf den Streusalzverbrauch haben in schneereichen Regionen Neuschneemenge und Häufigkeit des Schneefalls. In anderen Regionen mit weniger Schneefall ist die Häufigkeit der Temperaturwechsel um den Gefrierpunkt maßgebend.

In der Schweiz wurde ein Winterindex entwickelt, mit dem die gesamten Betriebskosten für den Winterdienst abgebildet werden sollen. Es wurde deutlich, dass sich die Indikatoren regional stark unterscheiden, dass aber bei einer regionalen Differenzierung hohe Korrelationen zwischen tatsächlichen und hypothetischen Winterdienstkosten vorhanden sind. Wesentliche Einflussgröße ist die Schneemenge, in manchen Regionen ist die Anzahl der

Schneefalltage dominant. Die Schneedeckentage sind nur in einzelnen Regionen von Bedeutung, ebenso kann durch die Berücksichtigung des Parameters Frosttage vereinzelt eine Verbesserung der Korrelation erzielt werden [RUESS 2004].

Das Snow and Ice Databook [PIARC 2010] gibt einen umfassenden Überblick über die aktuelle Entwicklung und Nutzung von Winterindizes:

- Belgien: Durch die Straßenbauverwaltung Flanderns wurde ein Winterindex zur Überprüfung des Salzverbrauchs erstellt. Hierbei wird der hypothetische Salzverbrauch linear in Abhängigkeit der Anzahl der Nächte ermittelt, in denen entweder die Fahrbahntemperatur unter 0 °C und der Taupunkt über der Fahrbahntemperatur liegt oder in denen Schneefall oder winterliche Niederschläge gemeldet werden. Diese Eingangsgrößen werden für neun Regionen differenziert ermittelt; die Korrelationskoeffizienten sind jedoch für Flandern einheitlich.
- Tschechien: Der in Tschechien entwickelte Winterindex wird genutzt, um die Winterdienstkosten unterschiedlicher Regionen in Abhängigkeit der winterlichen Witterung zu vergleichen. Hierbei wird nach Streu- und Räumensätzen differenziert.
- Dänemark: Der dänische Winterindex dient ebenfalls dazu, die Winterstrenge mit dem Umfang des Winterdienstes zu vergleichen. Hierfür wird ein linearer Zusammenhang zugrunde gelegt, in dem folgende Einflussgrößen berücksichtigt werden: Anzahl der Tage mit Fahrbahntemperaturen unter 0,5 °C, Häufigkeit, in der die Fahrbahntemperatur unter 0 °C und der Taupunkttemperatur liegt, Häufigkeit der Frost-Tau-Wechsel, Schneefalltage, Tage mit Schneeverwehungen.
- Norwegen: Ein Winterindex wurde testweise für zwei Regionen entwickelt, um die Anzahl der erforderlichen Winterdienstesätze mit den tatsächlichen, durch private Winterdienstleister erbrachten Einsätzen vergleichen zu können. Der Winterindex basiert im Wesentlichen auf Daten der meteorologischen Stationen im Einsatzgebiet zu Niederschlag, Wind, Luftfeuchtigkeit und Frost-Tau-Wechsel.
- State of Indiana (USA): Der für Indiana einheitlich entwickelte Winterindex berücksichtigt in einem linearen Ansatz folgende Witterungsparameter: Frosttage, Tage mit gefrierendem Regen, Tage mit Schneeverwehungen, Neuschneemenge, Schneedeckenhöhe, Sturmintensität und mittlere Temperatur während des Ereignisses.
- State of Wisconsin (USA): In diesem Winterindex werden in einem linearen Ansatz folgende Parameter berücksichtigt: Schneefallereignisse, Witterungsereignisse mit gefrierendem Regen, Neuschneemenge, Dauer von Stürmen und besondere Ereignisse, wie Schneeverwehungen, Frostperioden etc.
- States of Kansas und Minnesota (USA): In diesen beiden Staaten wird ein Winterindex genutzt, der im Rahmen des Strategic Highway Research Program (SHRP) für die USA entwickelt wurde. In diesem nichtlinearen Ansatz werden der mittlere tägliche Schneefall, der Anteil der Tage mit Dauerfrost, die Spannweite der Temperaturen und ein Temperaturindex genutzt, der von maximaler und minimaler Lufttemperatur abhängt.

Es wird deutlich, dass sich aufgrund der unterschiedlichen Winterdienststrategien, klimatischen Gegebenheiten und Zielsetzungen die entwickelten Winterindizes stark voneinander unterscheiden. Neben verschiedenen mathematischen Ansätzen werden auch verschiedene Witterungsparameter einbezogen.

Wie schon oben genannt, gab es erhebliche Probleme mit der Salzversorgung in den beiden Winterperioden 2009/2010 und 2010/2011. BADELDT [2011] zeigt in seinem Bericht „Ein neues Modell für einen Winter-Index zur Abschätzung und Bewertung des Salzverbrauches“ einen Lösungsansatz auf, wie eine genauere Bedarfsabschätzung für die Streustoffe erfolgen kann. Dafür wird ausgehend von vorliegenden Wetterdaten für das jeweilige Gebiet eine massenbezogene Schätzung des Salzverbrauches durchgeführt. Nach diesem Modellansatz gibt es drei verschiedene Streuszenarien, die durch bestimmte Witterungsparameter definiert werden: Bei Räum-Streueinsätzen ist der maßgebende Parameter die Neuschneehöhe. Für Streueinsätze infolge Glatteis oder Eisglätte muss die minimale Lufttemperatur unter 0 °C liegen und es muss Niederschlag geben, der jedoch nicht als Schnee fällt. Für das Streuszenario der Reifglätte sind die bestimmenden Witterungsparameter die minimale Lufttemperatur unter 0 °C, kein Niederschlag sowie eine relative Luftfeuchte über 90 %.

Weitere Leistungen des Betriebsdienstes

Der unmittelbare Einfluss von besonderen Witterungsereignissen, wie Unwetter, Hochwasser oder Frostschäden, lässt sich aus den Anforderungen an die Streckenwartung ableiten. Im neuen Maßnahmenkatalog zur Streckenwartung ist definiert, dass bei diesen Witterungsereignissen zusätzliche Kontrollen durchzuführen sind [HACKL 2009]. Ähnlich wird im Anhang 5 des Merkblatts für den Straßenbetriebsdienst, Teil: Grünpflege [FGSV 2006] ausgeführt, dass „nach starkem Sturm oder Unwetter, bei Schnee- und Eisbruchgefahr ... zusätzliche Baumkontrollen erforderlich werden [können]“. Gemäß den Richtlinien für die Anlage an Straßen, Teil: Entwässerung [FGSV 2005] ist es erforderlich, Entwässerungsanlagen nach Starkregen zu überprüfen und ggf. Unrat zu entfernen. Im Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen, Teil: Reinigung von Straßen außerhalb von Ortsdurchfahrten [FGSV 1999] ist gefordert, dass Straßenabläufe nach Starkregenfällen zusätzlich zu kontrollieren sind.

Auch wenn neben dem Winterdienst zahlreiche weitere Leistungen des Betriebsdienstes durch die Witterung beeinflusst werden, sind über die vorgenannten pauschalen Anforderungen des technischen Regelwerks keine weiteren Untersuchungen bekannt, in denen dieser Zusammenhang detailliert beschrieben oder quantifiziert wird.

2.2 Szenarien des Klimawandels für Deutschland

2.2.1 Szenarien für Deutschland

Die bisher für Deutschland verfügbaren Klimaszenarien basieren auf den sogenannten SRES-Szenarien (Second Report on Emission Szenarios) des 4. ARs (Assessment Report). Es gibt vier Szenariengruppen: A1, A2, B1 und B2 sowie eine Anzahl daraus abgeleiteter Untergruppen (s. Bild 3).

Das am häufigsten für Deutschland verwendete Szenarium ist das A1B-Szenarium, das wie folgt definiert ist: Die A1-Szenarien postulieren ein sehr rasches Wirtschaftswachstum, mit einer bis Mitte des Jahrhunderts kulminierenden und dann rückläufigen Weltbevölkerung. Weiterhin wird die rasche Einführung neuer und effizienterer Technologien vorausgesetzt. Das A1B-Szenarium nimmt weiterhin eine ausgewogene Nutzung aller Energiequellen an. Unter ausgewogen wird dabei der

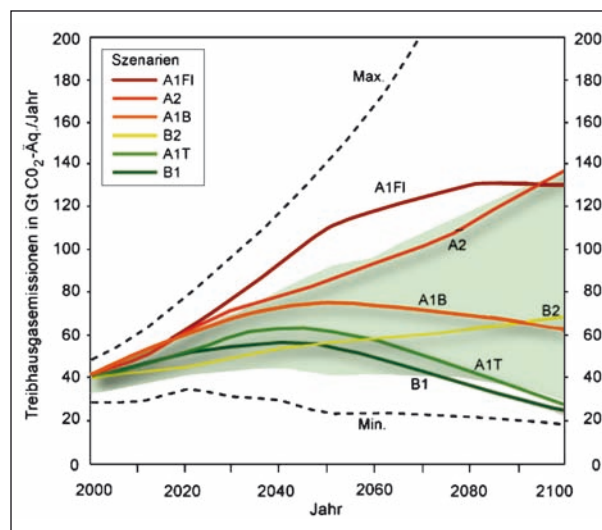


Bild 3: Verlauf der Treibhausgasemissionen für verschiedene SRES-Szenarien zwischen 2000 und 2100, [KASANG 2013]

gleichrangige Einsatz der vorhandenen Energiequellen verstanden. Die vollständige Beschreibung weiterer Szenarien enthält NAKICENOVIC/SWART [2000].

Für den 5. AR, der voraussichtlich 2014 veröffentlicht wird, wurde eine neue Klasse von Szenarien entwickelt, die sogenannten RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathway). Diese Szenarienklasse definiert sich durch den, aufgrund der Treibhausgasemissionen zu erwartenden, Energieeintrag in die Atmosphäre. In Bild 4 ist der Verlauf der Entwicklung des Strahlungsantriebs für vier verschiedene RCP-Szenarien dargestellt. Eine ausführliche Dokumentation zu diesen Szenarien findet man unter MEINSHAUSEN et al. [2011].

Anhand von Bild 4 erkennt man, dass das RCP8.5-Szenarium das neu gewählte Extremszenarium darstellt. Rechnet man die 8.5 W/m² um in den dafür benötigten CO₂-Eintrag in die Atmosphäre, so erhält man die in Bild 5 dargestellte Entwicklung der Treibhausgasemissionen. Man erkennt sofort, dass die geschätzten realen CO₂-Emissionen in der Größenordnung derjenigen liegen, die man benötigt, um das RCP8.5-Szenarium zu erfüllen. Das heißt, dass das RCP8.5-Szenarium die aktuelle Entwicklung der CO₂-Emissionen realistisch widerspiegelt. Aus diesem Grund wurde für die Szenarienberechnung in diesem Projekt das RCP8.5-Szenarium ausgewählt.

Die nächste Frage, die geklärt werden musste, ist die nach dem für das RCP8.5-Szenarium zu erwartenden Temperaturtrend für Deutschland zwischen

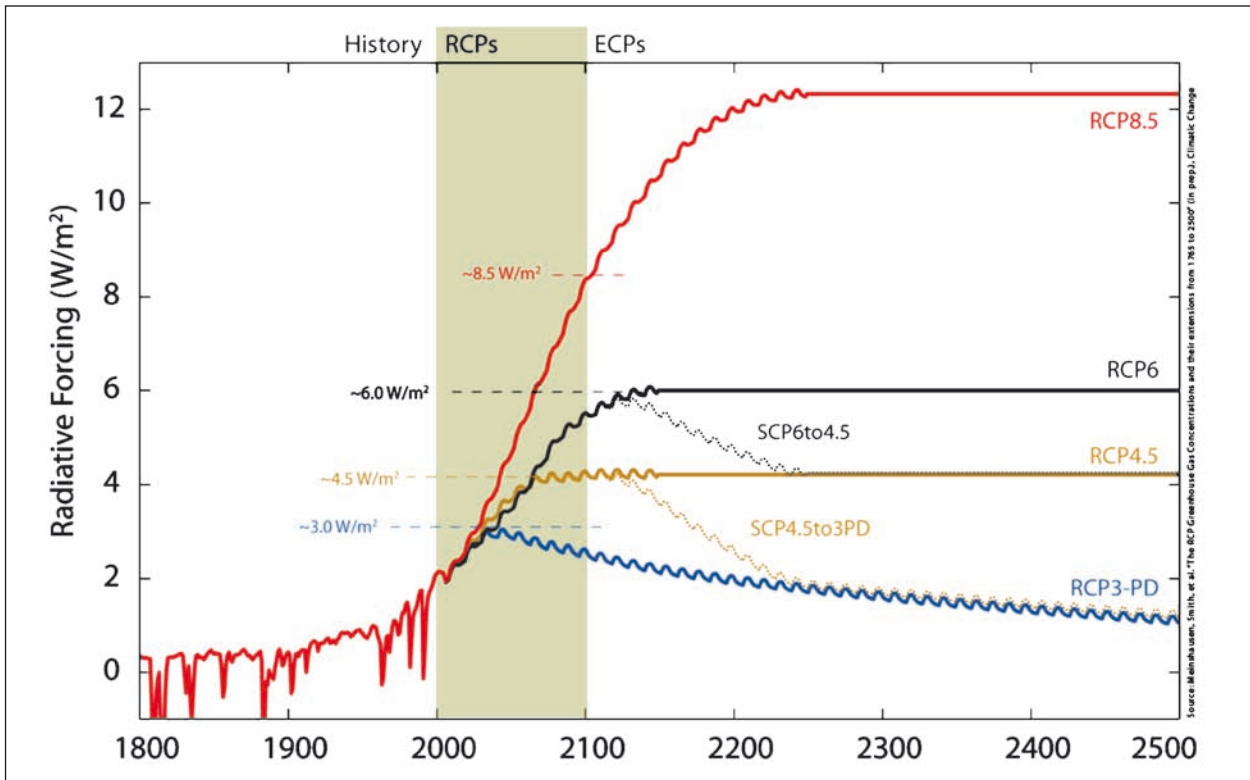


Bild 4: Strahlungsantrieb für vier verschiedene RCP-Szenarien [MEINSHAUSEN et al. 2011]

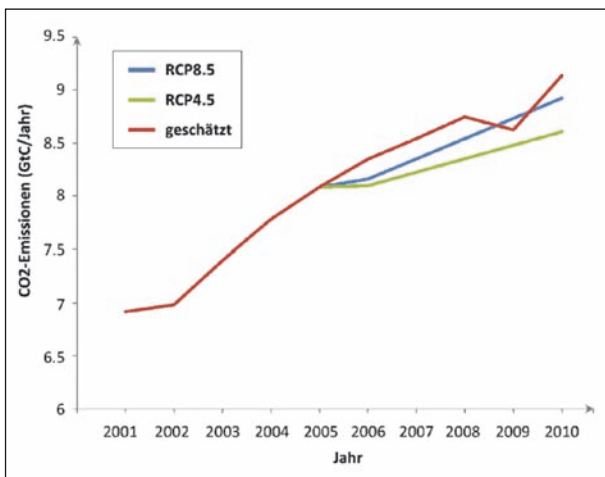


Bild 5: Beobachtete und entsprechend dem RCP8.5-Szenarium vorgegebene globale CO₂-Emissionen pro Jahr für den Zeitraum 2001 bis 2010 (im Vergleich dazu das schwächere Szenarium RCP4.5) [PIK Copyright 2013]

2011 und 2100. Dieser Trend wird als Antriebsgröße für den Einsatz des statistischen Regionalmodells STARS benötigt, das in Kapitel 4.1 näher erläutert wird. Zur Berechnung dieses Trends wurden die Ergebnisse von 23 globalen Klimamodellen (GCM) für das RCP8.5-Szenarium herangezogen (MCSWEENEY et al. [2011]). Das Ergebnis ist in Bild 6 dargestellt. Man erkennt sofort, dass die Schwankungsbreite der Temperaturanomalien der

Stationsnummer	Name	Breite (°)	Länge (°)	Höhe NN (m)	T-Trend (K)
13115	Großkiesow-Schlagtow	54.02	13.50	34	3.4
19200	Werne-Wessel	51.72	7.86	94	3.6
25136	Biberach-Riss	48.08	9.78	581	4.3
29115	Wolfegg (Nst)	47.81	9.79	623	4.4
31134	Siegdorf-Maria-Eck	47.80	12.62	828	4.5

Tab. 1: Mittlerer Temperaturtrend der Bezugsstationen

23 GCM von etwa 1.5 K am Anfang des Berechnungszeitraumes auf rund 4 K um 2.100 ansteigt. Da es im Rahmen dieses Pilotprojektes aus rechen-technischen Gründen nicht möglich war, die gesamte Bandbreite der Temperaturentwicklung durch das regionale Modell abzudecken, wurde der mittlere Temperaturtrend für die Bezugsstationen (siehe Tabelle 1) als Antriebsgröße gewählt (schwarze Kurve in Bild 6 = mittlerer Trend für Deutschland).

Damit liegen die für die im zweiten Arbeitsschwerpunkt des AP 2 geplanten Szenarienrechnungen notwendigen Informationen vor, wobei durch den

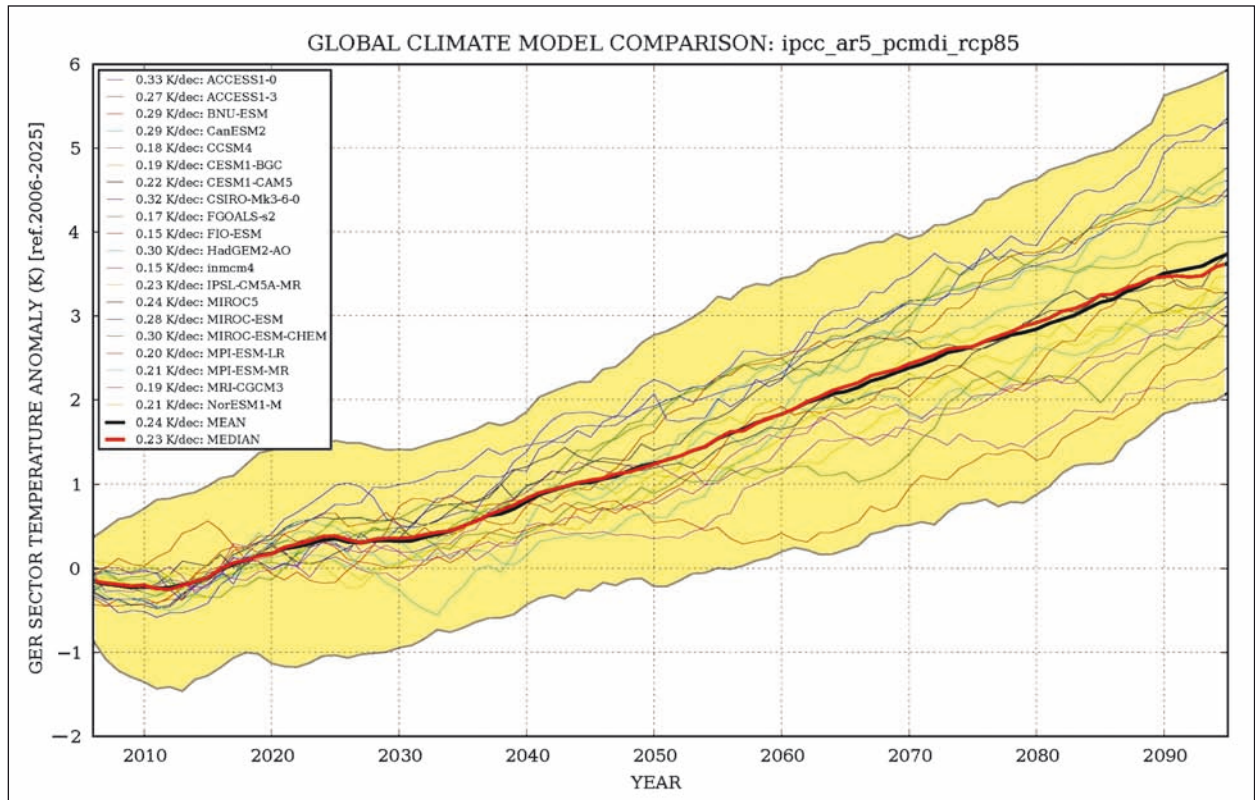


Bild 6: Entwicklung der Temperaturanomalien für Deutschland berechnet aus den RCP8.5-Szenarien von 23 globalen Klimamodellen bis 2100 bezogen auf den Referenzzeitraum 2006 bis 2025 [PIK Copyright 2013]

Einsatz der neuen RCP-Szenarien auf die Ergebnisse des aktuellsten wissenschaftlichen Standes bezogen auf die Szenarientwicklung zurückgegriffen wird. Auf die ebenfalls notwendige Bereitstellung der meteorologischen Ausgangsdaten wird ausführlich im Kapitel 3.1.3 eingegangen.

2.2.2 Weitere nationale Untersuchungen

Im Rahmen der Programme zur Untersuchung der zukünftig zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesellschaft werden in Deutschland seit Jahren zahlreiche Projekte, zum Teil mit sehr unterschiedlichen Ansätzen und Zielstellungen, bearbeitet. Dabei greifen alle bereits abgeschlossenen Projekte in der Regel auf regionale Klimamodellergebnisse zurück, die auf der Basis der bereits erwähnten ESRES-Szenarien berechnet wurden. Ein typisches Projekt dafür ist das im Rahmen des Forschungsprogramms „Globaler Wandel des Wasserkreislaufes“ durchgeführte Projekt GLOWA-ELBE. Übergreifendes Ziel von GLOWA-Elbe war es: „Die Risiken als auch die Optionen, die sich aus dem globalen Wandel für das Einzugsgebiet der Elbe ergeben, zu verstehen und das gewonnene Verständnis den Entscheidungsträgern

der Region für die Ziele einer nachhaltigen Bewirtschaftung zukommen zu lassen“ [PIK 2013a].

In einer Pressemitteilung vom 12.10.2009 des PIK wurden wesentliche Ergebnisse dieses Forschungsprojektes zusammengefasst. Unter anderem wurde ausgeführt: „Seit 1951 ist im Elbeinzugsgebiet die Durchschnittstemperatur bereits um 1,2 Grad Celsius gestiegen. Modellrechnungen zeigen, dass ein weiterer Temperaturanstieg von zwei bis drei Grad Celsius bis zur Mitte des Jahrhunderts den Wasserhaushalt im Elbegebiet weiter stark verändern wird. In den berechneten Szenarien verlagert sich das Maximum des von der Elbe und Ihrer Nebenflüsse geführten Wassers demnach vom Frühjahr in den Winter. Zugleich treten Phasen von Niedrigwasser früher ein und halten länger an, wobei die Pegel das bisherige Niveau immer häufiger unterschreiten. Eine Folge davon wären abnehmende Grundwasservorräte. Die Landwirtschaft werde zwar noch einige Zeit von den ansteigenden Temperaturen profitieren, so Wechsung, Wasser werde jedoch zunehmend zum begrenzenden Faktor weiterer Ertragssteigerungen. Im Energiesektor seien Einbußen vor allem bei der von Kühlwasser abhängigen Stromerzeugung in Ostdeutschland und der Wasserkraftnutzung in Tschechien und

Deutschland zu erwarten. Die Elbe-Schifffahrt habe ihr Transportaufkommen wegen der verschlechterten Schifffbarkeit des Flusses schon jetzt deutlich reduziert. Was die regionalen wirtschaftlichen Folgen der Klimaänderungen betrifft, geben die Modellrechnungen der Forscher jedoch vorerst Entwarnung. Die Kosten der Klimafolgen in Ostdeutschland und Tschechien werden zunächst überschaubar bleiben, nicht zuletzt weil der Wasserverbrauch von Industrie und Haushalten deutlich gesenkt wurde und sogar weitere Minderungen zu erwarten sind. „Die Ergebnisse des GLOWA-Elbe-Projektes verdeutlichen, wie stark sich die vom Wasser abhängigen Gebiete in Zukunft an den Klimawandel anpassen müssen“ [PIK 2009].

Als ein weiteres Beispiel, das den aktuellen Stand der Wissenschaft gut widerspiegelt, kann das vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) in Auftrag gegebene Projekt zur Abschätzung der „Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadenssituation in der deutschen Versicherungswirtschaft – Teilbereich Sturm/Hagel und Hochwasser“ angesehen werden. Neben dem PIK waren an dieser Studie die Meteorologischen Institute der Universitäten Köln und Berlin beteiligt. In einer vom GDV herausgegebenen Broschüre wird u. a. folgendes ausgeführt: „In Zusammenarbeit mit führenden Klimaforschern hat die deutsche Versicherungswirtschaft die wetterbedingten Schäden der letzten Jahrzehnte mit unterschiedlichen Klimamodellen verknüpft und dabei erstmals konkrete Schadensszenarien für die Zukunft ermittelt. Hauptaugenmerk lag dabei auf den in Deutschland am häufigsten auftretenden Naturkatastrophen: Sturm und Hagel sowie Hochwasser. Überschwemmungsschäden durch Starkregenereignisse, die mittlerweile einen hohen Anteil am Schadensgeschehen in Deutschland ausmachen, werden in einer separaten Untersuchung 2012 näher analysiert. Die deutsche Versicherungswirtschaft hat somit einen bis dato einzigartigen Blick in die Zukunft geworfen, um Antworten auf die zentralen Fragen zu geben: Sind die Folgen des Klimawandels auch in Zukunft noch versicherbar? Auf welche Veränderungen müssen wir uns in Deutschland einstellen?“ [GDV 2011].

Auswertungen zu vergangenen Sturmereignissen und den dadurch verursachten Schäden der Versicherungswirtschaft [GERSTENGARBE et al. 2013] zeigen eine Zunahme in der Häufigkeit und Intensität. In Zukunftsprojektionen zeichnet sich eine Verschiebung hin zu kürzeren Wiederkehrintervallen ab. Die geplanten Untersuchungen zu kleinräumi-

gen Starkregenereignissen und Sturzfluten werden derzeit von Seiten des GDV strategisch neu durchdacht. Dazu fehlen derzeit noch die dafür notwendigen Modellergebnisse.

Beide Beispiele zeigen, dass mit den vom PIK eingesetzten Modellen und Methoden die Möglichkeit besteht, belastbare Aussagen zur Klimaentwicklung anhand vorgegebener Szenarien zu generieren. Belastbar heißt in diesem Zusammenhang, dass Angaben zu den jeweiligen Unsicherheiten, die durch die Modellrechnungen hervorgerufen werden, gemacht werden können. Damit wird den Nutzern der Informationen die Möglichkeit gegeben, die eigenen Untersuchungen so auszurichten, dass im Endeffekt Empfehlungen für eine nachhaltig zu planende Entwicklung gegeben werden können. Dazu wurde u. a. in Zusammenarbeit mit der WetterOnline GmbH eine Internetplattform entwickelt, die für Deutschland in einer Auflösung bis auf Kreisebene Informationen zu den Feldern Klima, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft, Energie, Tourismus und Gesundheit für verschiedene Klimaszenarien bereitstellt. Die Plattform wird zurzeit in der bis Ende 2013 laufenden Pilotphase schrittweise erweitert und den Bedürfnissen der Nutzer angepasst (siehe auch www.klimafolgenonline.com).

2.2.3 Internationale Untersuchungen

Auch im internationalen Rahmen gibt es bereits zahlreiche Projekte, bei denen die am PIK entwickelten Modelle und Methoden erfolgreich zum Einsatz kommen. Ein Beispiel dafür ist das 2012 abgeschlossene Guanting-Projekt (siehe auch <http://guanting.pik-potsdam.de/>). Hauptziel dieses Projektes war die Entwicklung eines Management-Plans für das Flusseinzugsgebiet des Guanting in China unter sich ändernden Klimabedingungen. Ein Programm zur nachhaltigen Wasser- und Landnutzung wurde erarbeitet, sodass auch unter veränderten Klimabedingungen eine Sicherung der Wasserverfügbarkeit und Wasserqualität möglich ist. Seitens des PIK wurden neben einem hydrologischen Modell auch zwei am PIK entwickelte regionale Klimamodelle, das CCLM (siehe auch <http://www.clm-community.eu>) und das STARS eingesetzt (http://www.glowa-elbe.de/german/modeldescriptions/STAR/dt/model_star_d.html).

Dabei handelt es sich zum einen um ein dynamisches, nicht-hydrostatisches Regionalmodell (CLM) zum anderen um ein statistisches Regionalmodell

(STARS). Beide Modelle sind in Kombination in der Lage, Aussagen zu Andauern, Häufigkeiten, Intensitäten Mittelwerten etc. mit Angabe der Modellunsicherheiten zu berechnen. In Kopplung mit Impactmodellen ist man dann in der Lage, Aussagen zu bestimmten Sektoren (z. B. Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Gesundheit etc.) zu treffen. Nähere Informationen dazu liefern u. a. die Internetseiten:

- <http://www.fumeproject.eu/>,
- <http://www.climate-kic.org/>,
- <http://www.inka-bb.de/>,
- http://www.klima.tu-berlin.de/index.php?show=forschung_dch_ucahs.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit den vorhandenen Modellen und Methoden eine für Deutschland flächendeckende Untersuchung der aufgrund der Klimaänderungen zu erwartenden Auswirkungen auf die Autobahn- und Straßenmeistereien möglich ist. Dadurch wird eine nachhaltige deutschlandweite Planung hinsichtlich der Unterhaltung des gesamten Straßennetzes möglich.

2.3 Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation

Um die Folgen des Klimawandels auf die Vegetation in Deutschland und damit indirekt auf das Straßenbegleitgrün abschätzen zu können, wird nachfolgend auf bereits laufende bzw. abgeschlossene Untersuchungen am PIK eingegangen. Die Aussagen beziehen sich im Wesentlichen auf die am PIK erstellte Deutschlandstudie, deren Ergebnisse unter www.klimafolgenonline.com [PIK 2013b] abgerufen werden können.

Deshalb wird im Folgenden der Fokus der Untersuchungen auf die Änderungen des Wachstums einiger Hauptbaumarten wie Fichte, Kiefer, Buche und Eiche, aber auch auf die Risiken, die sich mit dem Klimawandel ergeben können, gelegt. Dabei können nur an ausgewählten Beispielen mögliche Effekte des Klimawandels auf die Bäume aufgezeigt werden. Weiterhin ist einschränkend zu beachten, dass sich die vorliegenden Untersuchungsergebnisse auf Wälder beziehen. Dadurch wird zum Beispiel die spezielle Situation von Alleebäumen nur unvollständig erfasst. Trotzdem sind in erster Näherung die folgenden Aussagen auch auf die Bäume als Straßenbegleitgrün übertragbar.

Im Rahmen der Deutschlandstudie wurde das auch in diesem Projekt verwendete regionale statistische Klimamodell STARS zur Szenarienberechnung eingesetzt. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wälder in Deutschland wurden dann unter Verwendung des am PIK entwickelten dynamischen prozessbasierten Waldwachstumsmodells 4C [LASCH et al. 2005] berechnet.

Wachstum der Bäume

Der Holzzuwachs eines Baumes hängt stark vom jeweiligen Witterungsverlauf im Jahr und somit von der den Witterungsverlauf bestimmenden klimatischen Entwicklung ab. Um Aussagen über Änderungen des jährlichen Holzzuwachses unter dem vorgegebenen Klimaszenarium RCP8.5 zu erzielen, wurde das Waldwachstumsmodell 4C für 4.583 Waldbestände der vier Hauptbaumarten jeweils 20 Jahre für die beiden Betrachtungsperioden (1991 bis 2010 und 2031 bis 2050) gerechnet. Anschließend wurde die prozentuale Änderung des mittleren jährlichen Holzzuwachses der einzelnen Flächen im Zeitraum 2031 bis 2050 gegenüber dem mittleren jährlichen Holzzuwachs für 1991 bis 2010 berechnet. Die Simulationen wurden mit und ohne steigender CO₂-Konzentration, passend zu dem Szenarium RCP8.5, durchgeführt, um die Unsicherheit über das Wachstumsverhalten unter dem sogenannten CO₂-Düngungseffekt nicht zu vernachlässigen.

Die Ergebnisse für den Fall, dass der zusätzliche CO₂-Düngungseffekt nicht betrachtet wird, zeigen Anstiege des Holzzuwachses für die betrachteten Kiefernbestände in fast allen Regionen, aber insbesondere im Nordostdeutschen Tiefland, wo sie am häufigsten vorkommen. Die Steigerung des Holzzuwachses für die Fichten fällt etwas geringer aus, und ist vor allem in den Mittelgebirgslagen und im Süden Deutschlands am höchsten, aber am geringsten im Nordostdeutschen Tiefland. Die betrachteten Eichenbestände zeigen ähnliche Holzzuwachsstörungen wie die Fichte, allerdings gibt es Standorte im Nordostdeutschen Tiefland, an denen der Holzzuwachs unter dem betrachteten Klimaszenarium zurückgeht. Für die Buchenbestände wird unter dem Klimaszenarium an den meisten Standorten, zum Beispiel in den Mittelgebirgsregionen und vor allem im Nordostdeutschen Tiefland, ein geringerer Holzzuwachs als gegenwärtig berechnet. Nur einige Bestände in der Alpenregion und in der Mitte Deutschlands (westliche Mittelgebirge wie Harz) können von der im

Szenarium abgebildeten klimatischen Situation profitieren. Die Buchenbestände sind unter dem betrachteten Szenarium eher die Verlierer, während die Kiefernbestände auch aufgrund der klimatischen Ansprüche der Kiefer eher zu den Gewinnern gehören können. Wenn man diese Modellanalyse mit dem anhaltenden CO₂-Düngungseffekt durchführt, sind die Anstiege im Holzzuwachs wesentlich stärker und für alle Baumarten zutreffend, was auch auf die dann steigende Wassereffizienz der Bäume zurückzuführen ist [LASCH et al. 2012].

Eine weitere Ursache für steigende Holzerträge ist neben der direkten Wirkung der höheren Temperaturen in der Szenariumsperiode die dadurch bedingte Verlängerung der Vegetationsperiode. Die Phase der Blattentfaltung wurde für die Baumarten Birke, Buche und Eiche untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der schon beobachtete Trend der früheren Blattentfaltung weiter anhalten kann und damit vermutlich die Länge der Vegetationsperiode für die Laubbaumarten zunimmt [LASCH et al. 2012].

Risiken für die Wälder

Die Abschätzungen für das Waldwachstum anhand des Holzzuwachses zeigen nur ein Potenzial des Wachstums auf. Die Holzvorräte der Wälder in Deutschland sind durch eine Reihe biotischer und abiotischer Störungen gefährdet. Dazu gehören Störungen, die durch Extremereignisse hervorgerufen werden, wie zum Beispiel Stürme und Dürreperioden, aber auch das massenhafte Auftreten von Schaderregern. All diese Störungen sind ebenfalls von den sich ändernden klimatischen Bedingungen beeinflusst. Beispielfhaft werden nachfolgend einige der damit verbundenen Risiken dargestellt [LASCH et al. 2012].

Steigende Temperaturen, verbunden mit zurückgehenden Niederschlägen in den Frühjahrs- und Sommermonaten, können die klimatischen Bedingungen für die Waldbrandgefahr deutlich verändern. Um dies zu belegen, wurde für das Klimaszenarium ein von KÄSE [1969] entwickelter Index berechnet. Er drückt die klimatisch bedingte Waldbrandgefährdung aus und wird in ähnlicher Form als Waldbrandgefahrenindex vom Deutschen Wetterdienst benutzt, um von März bis Oktober eine tägliche Waldbrandgefährdung zu prognostizieren. An allen Stationen, für die das Klimaszenarium RCP8.5 erzeugt wurde, wurde sowohl für das Gegenwartsklima als auch die Szenariensperiode

dieser Index jährlich berechnet und über dem entsprechenden Zeitraum gemittelt. In dem Gebiet mit der heute schon höchsten klimatischen Waldbrandgefahr, dem Nordostdeutschen Tiefland, insbesondere Brandenburg, steigt die klimatische Waldbrandgefahr um bis zu 16 % und damit besonders deutlich an. Am geringsten fällt die Änderung in den Gebieten mit gegenwärtig geringer Waldbrandgefahr, wie der Alpenregion, teilweise dem Alpenvorland oder dem Nordwesten Deutschlands aus. Die Ausbreitung der Regionen mit einem mittleren Index größer als zwei nimmt im Nordosten und im Südwesten, hier vor allem im Gebiet des Oberrheingrabens deutlich zu [LASCH et al. 2012].

Diese Projektion der klimatischen Waldbrandgefahr muss nicht zwangsläufig zu höheren Schäden durch Waldbrände führen. Sie können dort hoch sein, wo auch andere Bedingungen Waldbrand begünstigen, wie zum Beispiel Kiefernmonokulturen und sehr trockene Standortbedingungen. Andererseits werden immer mehr moderne Methoden zur Waldbranderkennung eingesetzt, wie zum Beispiel das Waldbrand-Früherkennungssystem „Fire Watch“ in Brandenburg [LASCH et al. 2012].

Ein weiteres Risiko für Bäume ist das Auftreten von Trockenstress infolge von Hitze- oder Dürreperioden. Deshalb ist es eine wichtige Information, in welchen Gebieten man mit einem Anstieg der Trockenheitsgefährdung bestimmter Baumarten rechnen kann und muss. Trockenstress kann zu kurzfristigen Rückgängen in der Produktivität der Bäume führen, zum Beispiel durch vermindertes Dickenwachstum. Andererseits kann es die Bäume anfälliger für Schaderreger und Krankheiten machen. Der hier verwendete baumartenspezifische Trockenstress-Index beschreibt pro Jahr, wie gut die Bäume eines Bestandes einer Baumart ihren Wasserbedarf decken können. Sein Wert liegt zwischen null (kein Trockenstress) und eins, dem maximalen Trockenstress aufgrund mangelnden Wasserangebots [LASCH et al. 2012].

Die Ergebnisse für das Klimaszenarium RCP8.5 zeigen zum Beispiel für die Alpenregion und das Nordostdeutsche Tiefland für die Baumart Buche, dass der Trockenstress für Buchenbestände unter heutigem Klima in der Alpenregion relativ gering ist. Im Nordostdeutschen Tiefland dagegen ist er höher. Gleiches gilt für die Variabilität des Trockenstress, vor allem aufgrund der Böden, die in dieser Region vorkommen. Unter dem Klimaszenarium ändert sich der mittlere Trockenstressindex in

der Alpenregion kaum und die Variabilität nimmt gering zu, das heißt, es gibt einige wenige Standorte beziehungsweise Böden in dieser Region, an denen der Trockenstress für die Buche steigt. Für die simulierten Buchenbestände im Nordostdeutschen Tiefland sind die Auswirkungen des Klimaszenariums deutlicher als für die Alpenregion. Hier steigt der mittlere jährliche Wert des Trockenstress-Index für die Szenarienperiode gegenüber dem Zeitraum 1991 bis 2010 deutlich an, die Variabilität über den Standorten nimmt ebenfalls stark zu. Mit Berücksichtigung des CO₂-Düngungseffekts nimmt der Trockenstress weniger stark zu. Dieser Effekt wird durch eine bessere Wassereffizienz der Bäume unter höherer CO₂-Konzentration verursacht. Die gezeigten Ergebnisse können so interpretiert werden, dass es unter dem Klimaszenarium zunehmend mehr Standorte im Nordostdeutschen Tiefland gibt, an denen Buchenbestände trockenstressgefährdet sind [LASCH et al. 2012].

Zusammenfassend kann folgendes festgestellt werden:

- Durch steigende Temperaturen wird sich der schon zu beobachtende Trend zur Verschiebung der Blattanfaltung auf frühere Termine vermutlich fortsetzen verbunden mit einem höheren Produktionszeitraum der Bäume. Der wachstumssteigernde Effekt einer höheren CO₂-Konzentration bedingt eine zusätzliche, höhere Produktion.
- Die steigenden biotischen und abiotischen Risiken für die Bäume werden sich in den nächsten Dekaden weiter erhöhen.
- Da diese Entwicklungstendenzen nicht „Eins zu Eins“ auf das Straßenbegleitgrün übertragbar sind, sind gesonderte Untersuchungen dringend erforderlich.

2.4 Auswirkungen des Klimawandels auf das Straßennetz

2.4.1 Nationale Untersuchungen

Anpassungsstrategien für die Straßeninfrastruktur der Bundesanstalt für Straßenwesen

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) befasst sich schon seit einigen Jahren gezielt mit dem Thema Anpassung an den Klimawandel im Straßenwesen. Aus verschiedenen Forschungsprojek-

ten gibt es bereits erste Erkenntnisse, wie die Auswirkungen des Klimawandels auf die Straßenverkehrsinfrastruktur aussehen werden. Diese bestehen grundsätzlich aus dem globalen Temperaturanstieg und den Extremwetterlagen, wie Hitzeperioden, Niederschläge sowie Stürme [KRIEGER 2009].

Der globale Temperaturanstieg bewirkt eine Erhöhung der Spurrinnenbildung bei Asphaltbelägen und „Blow-ups“ bei Betonfahrbahnecken. Aber auch Brücken werden durch diese Veränderung beeinflusst, so können Schäden an den Lagerkonstruktionen entstehen und eine Überschreitung der zulässigen Längsdehnungen ist möglich [BASt 2012].

Die Beeinflussung der Brückenbauwerke durch die Klimaveränderung wird im Forschungsprojekt „Auswirkung des Klimawandels auf bestehende Spannbetonbrückenbauwerke“ näher betrachtet. Dieses FE-Projekt befasst sich mit den klimatologischen Einwirkungen und deren Einfluss auf die Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Brückenbauwerke. Als Einwirkungsarten wurden ein konstanter Lufttemperaturanteil und der linear veränderlicher Lufttemperaturanteil sowie Wind und Niederschlag identifiziert [TEGETHOF 2011].

Extremwetterlagen mit starken Niederschlägen verursachen u. a. Rutschungen wasserübersättigter Böden und Überschwemmungen bei unterdimensionierten Entwässerungseinrichtungen an Straßen und Tunneln [BASt 2012]. Die Auswirkungen dieser Extremereignisse werden im Projekt „Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen“ ausführlich im Hinblick auf das Auftreten von Rutschungsereignissen analysiert. Die Untersuchung ergab, dass Rutschungsereignissen niederschlagsreiche Winter oder sommerliche Starkniederschläge vorangehen [TEGETHOF 2011]. Starke Niederschläge und daraus resultierende Hochwasser haben jedoch noch weitere Auswirkungen, wie die Auskolkung von Flussbrücken und der Anprall von Schwemmgut an Brücken [BASt 2012]. Die Erhöhung der Aquaplaninggefahr wird in dem weiteren FE-Projekt „Ermittlung des Aquaplaningrisikos auf Bundesfernstraßen unter Berücksichtigung des Klimawandels und den damit verbundenen Niederschlagsereignissen“ in Hinblick auf die zu erwartende Wasserfilmdicke und die notwendigen Auslegungen der vorhandenen Entwässerungseinrichtungen untersucht [TEGETHOF 2011].

Eine weitere Bedrohung aufgrund des Klimawandels besteht in Extremwetterlagen, wie Stürmen, die u. a. sturmbedingte Unfälle verursachen. Aber auch Schäden an Brücken durch winderregte Schwingungen und eine Überschreitung zulässiger Verankerungslasten von Lärmschutzwänden oder Verkehrszeichenbrücken können Stürme zur Folge haben [BASt 2012].

Themenblatt des Umweltbundesamtes zur Anpassung des Verkehrs an den Klimawandel

Das Umweltbundesamt befasst sich ebenfalls seit ein paar Jahren mit der Anpassung an die Klimaveränderung in Deutschland in unterschiedlichen Sparten und dort u. a. auch im Verkehrsbereich. Dabei werden die Zunahme von Starkregenereignissen und starken Stürmen sowie von Hitzetagen als die relevanten Klimaveränderungen für die Verkehrsinfrastruktur genannt. Die Stark- und Dauerregenereignisse führen „... zu Überschwemmungen, Bodeninstabilität sowie Beeinträchtigungen der Kapazität der Infrastruktur und der Erreichbarkeit von Industrieanlagen“ [ROTTER et al. 2011]. Des Weiteren werden ein erhöhtes Risiko von Erdbeben bei Starkregen nach längeren Trockenperioden sowie die Überlastung der Entwässerung aufgrund von Dauerregen aufgeführt. Aber auch die Infrastruktur in Küstenregionen ist durch Überschwemmungen gefährdet [ROTTER et al. 2011].

Die Zunahme an Stürmen bringt vermehrt Gewitter und Blitzschläge mit sich, welche zum Ausfall der Elektrizitätsversorgung und damit zu Schäden an elektronischen Verkehrsanlagen führen kann. Aber auch Oberleitungen und Verkehrsschilder sind durch diese klimatische Veränderung gefährdet. Des Weiteren können durch die stärkeren Stürme Gegenstände, Äste oder auch Bäume auf die Fahrbahn gelangen, die die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer gefährden und einen erhöhten Reinigungsaufwand der Fahrbahn mit sich bringen [ROTTER et al. 2011].

Des Weiteren gefährden die Lufttemperaturveränderungen die Verkehrsinfrastruktur. Dabei werden in diesem Zusammenhang die erhöhten Lufttemperaturen genannt, die Schäden am Material und der Struktur der Fahrbahn verursachen und zu Spurrinnen in der Asphaltdecke führen. Aber auch Brücken sind von den veränderten Lufttemperaturen betroffen, so kann es zu thermischen Expansionen kommen. Aber auch häufige Frost-Tau-

Wechsel werden als Gefährdung für die Fahrbahn genannt. Darüber hinaus ist das Straßenbegleitgrün betroffen. So können lange Hitzeperioden und erhöhte Lufttemperaturen zu Vegetations-, Böschungs- und Schwellbränden führen [ROTTER et al. 2011].

ROTTER et al. [2011] spricht generell aufgrund der Klimaveränderungen in Form von zunehmenden Hitzetagen, Starkregenereignissen und Stürmen von einer stärkeren Abnutzung bis hin zum Ausfall der Infrastruktur. Diese Entwicklung führe zu kürzeren Lebensdauern und zu höheren Instandhaltungskosten. Im Themenblatt des UBA werden auch Anpassungsmaßnahmen erwähnt. Dabei ist vor allem die Erforschung von neuen Materialien und verbesserten Baustoffen eine kurz- bis mittelfristige Handlungsoption. Aber auch kürzere Wartungs- und Instandhaltungsintervalle helfen, Schäden an Fahrbahnen und der Infrastruktur frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen [ROTTER et al. 2011].

Eröffnungsvortrag des Kolloquiums Straßenbetrieb in Karlsruhe 2011

Welche Problematik Lufttemperaturen um die Null-Grad-Grenze mit sich ziehen, wird im Beitrag „Globale Ursachen – Regionale Folgen: Künftige Entwicklung des Winterwetters in Deutschland“ im Rahmen des Kolloquiums Straßenbetrieb 2011 in Karlsruhe [SCHIPPER 2011] näher erläutert. So belasten Wechsel zwischen Gefrieren und Auftauen, aber auch Lufttemperaturen unter dem Gefrierpunkt erheblich die Baustoffe. Vor allem die Straßenoberfläche wird markant durch Frost-Tau-Wechsel geschädigt, sie erhöhen damit den Instandhaltungsaufwand auch im Straßenbetriebsdienst. Ausschlaggebend für einen strengen Winter sind, zwar meteorologisch gesehen die Eistage, für den Straßenbelag sind aber die Frosttage viel entscheidender, die einen größeren negativen Einfluss haben [SCHIPPER 2011].

Aufgrund des Klimawandels werden vor allem die Frosttage, aber auch die Eistage zurückgehen. Der Rückgang der Eistage wird sich nach Tabelle 2 im Mittel für die Periode 2021 bis 2050 für ganz Deutschland auf 8,3 Tage und bei den Frosttagen auf 20,1 Tage belaufen, dies kann für manche Regionen beinahe eine Halbierung bedeuten [SCHIPPER 2011].

2021 bis 2050	Frosttage			Eistage		
	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.
Deutschland	-8,4	-20,1	-25,3	-2,6	-8,3	-14,2
Mecklenburg-Vorpommern	-10,8	-19,1	-29,6	-3,9	-10,2	-17,0
Baden-Württemberg	-8,4	-13,8	-22,3	-2,3	-6,4	-11,1

Tab. 2: Die zu erwartende minimale, mittlere und maximale Änderung der Frost- und Eistage für ganz Deutschland sowie zwei ausgewählte Bundesländer aus mehreren Klimamodellen im Mittel für die Periode 2021 bis 2050 [Helmholtz Gemeinschaft 2012]

2.4.2 Internationale Untersuchungen

The Finnish Road Administration Report

Die Finnish Road Administration (Finnra) behandelt in ihrem jährlichen Bericht aus dem Jahr 2009 die Auswirkungen des Klimawandels auf die regelmäßige und wiederkehrende Instandhaltung von Straßen ("The effect of climate change on the routine and periodic maintenance of roads"). Erste Erkenntnisse ergaben, dass die Straßeninfrastruktur in Finnland aufgrund von Extremniederschlägen, Hitzeperioden im Sommerhalbjahr, regional häufigeren Frost-Tau-Wechseln und Starkwindereignissen infolge des Klimawandels beeinträchtigt wird [RUOTOISTENMAKI et al. 2009].

Diese Kernaussagen im Finnra Report resultieren vor allem aus der Erhöhung der Lufttemperatur und der Zunahme des Niederschlags im Winter. Dies hat zum einen zur Folge, dass sich die Perioden, in denen Schnee geräumt werden muss, verkürzen, aber zum anderen die Tauprozesse zunehmen, was einen erhöhten Salzverbrauch nach sich zieht. Aufgrund der wärmeren und regnerischen Winter werden sich die Winterwartungskosten erhöhen. Diese steigen an, da die veränderten Witterungsverhältnisse den Straßenbelag beanspruchen und dadurch die Spurrinnenbildung beschleunigen. Aber vor allem die Frost- und Tauwechsel strapazieren den Asphalt und erhöhen die Anzahl der Schlaglöcher [RUOTOISTENMAKI et al. 2009].

Die Untersuchungen ergaben auch, dass die steigenden Niederschläge einen Anstieg des Grundwasserspiegels verursachen, welcher zu einer Reduktion der Belastbarkeit von Straßen mit geringem Verkehrsaufkommen führt. Finnra weist drauf hin, dass Extremwetterverhältnisse, wie Stürme, Hitzewellen und Überschwemmungen, allgemein Menschenleben bedrohen, Lebensgrundlagen vernichten und die Ausbreitung von Krankheitserregern begünstigen können [RUOTOISTENMAKI et al. 2009].

Analyse der Auswirkungen regionaler Änderungen von Infrastruktur bezogenen Klimaindizes in Quebec

Bei dem Forschungsprojekt „Analysis of regional climate model stimulations of transport-related climate indices over southern Quebec“ wurden Winterklima-Indikatoren, die für die Verkehrsinfrastruktur und die Straßenverhältnisse im südlichen Quebec relevant sind, bis 2070 simuliert. Ergebnis dieses Forschungsprojektes ist, dass voraussichtlich die Zahl der Schneefallereignisse zurückgehen wird, aber die Niederschläge im Winter sowie die Tauwetterereignisse zunehmen werden [CHAUMONT/BROWN 2010]. Für diese Aussage wurden 11 verschiedene Winterklima-Indikatoren definiert und anschließend analysiert. Diese Indikatoren sollen nachfolgend, vor allem in Bezug auf ihre Klimaparameter, näher erörtert werden.

Ein Winterklima-Indikator ist die Anzahl und Intensität des Wintertauwetters. Dieses Ereignis wird definiert ab dem Tag x , an dem die maximale Lufttemperatur größer 0 °C und die durchschnittliche Tageslufttemperatur in einen Zeitraum von ± 4 Tagen kleiner als -5 °C war. Die Intensität des Wintertauwetters ist die Summierung der Auftautage ($T_{\max} > 0\text{ °C}$) in der Dauer des Ereignisses. Ein weiterer Winterklima-Indikator ist die Anzahl der täglichen Frost-Tau-Wechsel, diese treten auf, wenn mindestens zwei Wechsel zwischen Lufttemperaturen unter dem Gefrierpunkt und über dem Gefrierpunkt an einem Tag stattgefunden haben. In diesem Zusammenhang werden die Auswirkungen der Frost-Tau-Wechsel auf die Verwitterung und den Verfall von Baustoffen sowie die Schlaglochbildung genannt. Darüber hinaus wurden Indikatoren wie das Eintrittsdatum des Winterfrosts und des Frühlingstauwetters sowie die Dauer des Winters definiert. Der Beginn der Winterfrostperiode wurde mit dem ersten Tag, an dem die tägliche Lufttemperatur über einen Zeitraum von ± 14 Tagen unter 0 °C lag, festgelegt. Demzufolge wird der Anfang des

Frühlingstauwetters und somit das Ende der Winterfrostperiode als der Tag bestimmt, an dem sich die Lufttemperatur über einen Zeitraum von ± 14 Tagen über Nullgrad befindet. Des Weiteren wurde ein Indikator für die Schwere des Winters bestimmt. Dieser wird definiert als die kumulierte Summe aller Tage, deren mittlere Tageslufttemperatur kleiner $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Zeitraum November bis April ist. Ein weiterer Winterklima-Indikator ist die Häufigkeit und Intensität der Schneefallereignisse. Ein Schneefallereignis wurde als ein Ereignis bestimmt, dass einen Tag oder mehr, an dem täglicher Schneefall gemessen wurde, anhält. Korrespondierend hierzu wurde auch die Häufigkeit und Intensität der Winterniederschlagsereignisse betrachtet, also der Perioden, an denen ein täglicher Niederschlag, jedoch kein Schneefall in der oben definierten Winterfrostperiode gemessen wurde [CHAUMONT/BROWN 2010].

Mit dem regionalen Klimamodell CRCM (Canadian Regional Climate Model) wurden Klimawandelsimulationen für die Jahre 2041 bis 2070 durchgeführt (s. Tabelle 3). Ergebnis dieser Klimasimulationen für das südliche Quebec ist, verglichen zum Zeitraum 1971 bis 2000, zum einen ein allgemein wärmeres und feuchteres Klima im Winter. Dies spiegelt sich einerseits im verspäteten Eintrittsdatum des Winterfrosts um 13 Tage und andererseits dem verfrühten Eintritt des Frühlingstauwetters um 11 Tage wider. Demnach verkürzt sich die Winterfrostperiode um 24 Tage. Zum anderen

wurde ein Rückgang der Schneefallereignisse sowie eine Zunahme von Winterniederschlags- und Wintertauereignissen simuliert. Diese Klimabedingungen verstärken die Bildung von Schlaglöchern. Die tägliche Anzahl von Frost-Tau-Wechseln sinkt allerdings, was der Schlaglochbildung entgegenwirkt. In diesem Zusammenhang wird auch darauf eingegangen, dass wärmere Winter eigentlich auch eine Zunahme an Frost-Tau-Wechseln zur Folge haben. Die CRCM basierte Simulation über einen Zeitraum von 20 bis 30 Jahren zeigt signifikante Zu- und Abnahmen von Frost-Tau-Wechseln. Langfristig besteht jedoch ein Rückgang der täglichen Anzahl von Frosttauwechseln [CHAUMONT/BROWN 2010].

Strategie der Federal Highway Administration (USA) zur Anpassung an den Klimawandel

Die amerikanische Federal Highway Administration hat im Forschungsprojekt „Federal Highway Administration’s development of a strategy to address adaptation to climate change“ eine Strategie zur Anpassung an den Klimawandel entwickelt. Dafür wurden einige Einflüsse des Klimawandels und potenzielle infrastrukturelle sowie operative Auswirkungen erarbeitet. In diesem Zusammenhang werden als wesentliche klimatische Folgen des Klimawandels die Erhöhung des Meeresspiegels, eine erhöhte Sturmhäufigkeit und -schwere, höhere Sturmfluten und Wellenhöhen, die Änderung der Niederschläge, eine Lufttempe-

Winter Index	CRCM		Analogue	
	Mean Change 2041-2070 minus 1971-2000	% points with sig. local inc. () or dec. ()	Mean Change 1997-2001 minus 1969-1973	% points with sig. local inc. () or dec. () in mean
freeze onset date	13 d later	10% later	7 d later	91.4% later
thaw onset date	11 d earlier	98.3% earlier	9 d earlier	100% earlier
winter duration	-24 d	100%	-16 d	100%
cumulative sum of FDD	-428.1	100.0%	-361.0%	100%
# daily freeze-thaw cycles	-6.3	81.6%	+9.6 / yr	79.6% 6.7%
# winter rainfall events	+0.5 / yr	< 1%	+0.4 / yr	34.5% 13.0%
winter rainfall event	+1.8 mm	0%	+0.4 mm	31.1% 27.0%
# snowfall events	-3.5 / yr	93.3%	-3.0 / yr	82.9%
# snowfall event amount	+0.6 mm we	0%	-0.7 mm we	15.2% 50.4%
# winter thaw	-0.9 / yr	27.1%	-0.9 / yr	8.7% 51.5%
thaw event TDD	+0.4	0	-0.4	6.7% 29.2%

Tab. 3: Vergleich von CRCM simulierten Veränderungen der Winterklima-Indikatoren für das südliche Quebec zwischen 1971 und 2000 sowie 2041 und 2070, gemittelt über den Untersuchungsbereich [CHAUMONT/BROWN 2010]

raturveränderung und Windlasten genannt [CULP et al. 2010].

Die erhöhte Sturmhäufigkeit und -schwere führt im Wesentlichen zu stärkeren Niederschlägen, zu höheren Windgeschwindigkeiten und mehr Blitzen. Potenzielle Auswirkungen können Schäden an der Straßeninfrastruktur oder Störungen der elektronischen Verkehrsinfrastruktur, aber auch Sperrungen oder erhebliche Störungen von Straßenabschnitten sowie Notevakuiierung oder Reisezeitverspätungen sein [CULP et al. 2010].

Die Änderung im Niederschlag macht sich zum einen durch mehr Niederschläge, damit verbunden einem höheren Grundwasserspiegel, einem höheren Pegel bei Hochwasser oder einem höheren Feuchtigkeitsgehalt im Boden bemerkbar. Zum anderen besteht auch die Möglichkeit einer Verringerung der Niederschläge. Diese Veränderungen im Klima wirken sich auf die Straßenbeläge, die Gründung, die Entwässerung und die Düker sowie auf die Materialbemessung aus. Ebenfalls besteht die Gefahr stärkerer und häufigerer Erdbeben, die neben den Schäden auch Behinderungen auf der Fahrbahn aufgrund von Schutt zur Folge haben können. Darüber hinaus werden eine Verschlechterung der Betonqualität und Brückenausspülungen aufgrund der erhöhten Niederschläge erwähnt. Niederschlag in Form von Schnee kann zu Schneeverwehungen führen. Wie auch bei dem vermehrten Auftreten von Sturmereignissen resultieren auch aus den Niederschlagsereignissen Reisezeitverluste. In diesem Kontext wird durch den Straßenbetrieb eine gezieltere Wartung erforderlich, um Überschwemmungen zu vermeiden [CULP et al. 2010].

Hinsichtlich der Temperaturänderungen wird von steigenden maximalen Lufttemperaturen, geringeren minimalen Lufttemperaturen sowie von größeren Temperaturschwankungen gesprochen. Infolge dieses klimatischen Wandels bilden sich bei Asphaltfahrbahnen Spurrinnen, aus welchen schlussendlich Risse und Schlaglöcher resultieren können. Darüber hinaus bildet sich auf dem Straßenbelag ein Bindemittelüberschuss, welcher zum „Schwitzen“ der Fahrbahn führt und damit die Griffigkeit des Straßenbelags reduziert. Die Lufttemperaturänderung hat auch einen Einfluss auf die biologische Vielfalt, der sich ebenfalls auf die Straßeninfrastruktur und deren Betrieb auswirkt. So werden verstärkt Schädlinge bekämpft werden müssen und Sichtbehinderungen aufgrund von Blätter tragen-

den Bäumen sowie rutschige Fahrbahnen infolge von Laub können über einen längeren Zeitraum zunehmen. Des Weiteren werden das Versagen von Straßenböschungen, das Absacken von flachen Pfahlgründungen und die Wärmeausdehnung von Brücken genannt. Wie schon bei den Veränderungen infolge Niederschlag und Sturmereignissen geht die Federal Highway Administration von einem erhöhten Instandsetzungsbedarf infolge der Temperaturänderungen aus [CULP et al. 2010].

Weiterhin wird auch auf die Auswirkungen geänderter Windlasten auf die Straßeninfrastruktur eingegangen. Die klimatischen Veränderungen machen sich durch höhere Windgeschwindigkeiten und damit mehr Lasten auf Brückenbauwerke sowie mehr Turbulenzen bemerkbar [CULP et al. 2010].

Auswirkungen des Klimawandels auf das Straßennetz in Schweden

Auch die schwedische Road Administration hat sich im Forschungsprojekt „What Impact will climate change have on roads in Sweden and how to deal with it“ mit den Auswirkungen auf die Straßeninfrastruktur in Schweden aufgrund des Klimawandels befasst und stellt in diesem Zusammenhang Lösungsansätze vor, wie mit diesen veränderten Rahmenbedingungen umgegangen werden kann.

Als Auswirkung auf die Straßeninfrastruktur wird zum einen die Zunahme des Niederschlags genannt, die eine Erhöhung des Hochwasserrisikos mit sich zieht. Die Schwachstellen in der Straßeninfrastruktur sind hierbei niedrige Brücken und Durchlässe, an denen sich unabhängig von der Wasserlaufbreite Erddämme bilden können. Des Weiteren sind Brücken über kleinen Wasserläufen besonders bei intensiven Regenfällen auf kleinen Einzugsgebieten gefährdet. Brückentragwerke sind durch die Niederschlagszunahme von Erosionsschäden betroffen. Darüber hinaus gefährden häufiger auftretende Starkregenereignisse die Hangstabilität von Böschungen und verursachen häufiger Überflutungen. Zum anderen wird der negative Einfluss steigender Temperaturen auf die Tragfähigkeit des Permafrosts in Nordschweden genannt [NORDLANDER 2010].

Als die größte Herausforderung in den kommenden Jahrzehnten für die schwedische Road Administration wurde aber die Ableitung von Regenwasser identifiziert. Die Entwässerungssysteme werden daher an Bedeutung zunehmen, die Instandhaltung

und der Betrieb werden dabei eine wichtige Rolle einnehmen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Instandhaltung von Gräben und Durchlässen eine höhere Priorität haben wird und dieser mehr Ressourcen zugeteilt werden müssen [NORLANDER 2010].

Als die Hauptrisiken für die Straßeninfrastruktur in Schweden wurden Erdbeben, Einstürze und Schäden an Straßen und Brücken mit hohem Wasserdurchfluss, Unfälle mit gefährlichen Gütern sowie Hochwasser allgemein identifiziert [NORLANDER 2010].

ROADEX “Implementing Accessibility” Project Report

Das ROADEX Projekt der Europäischen Union wurde in den Jahren 1998 bis 2012 als eine transnationale Zusammenarbeit durchgeführt, um Möglichkeiten für ein interaktives und innovatives Management von Straßen mit geringem Verkehrsaufkommen in den kalten Klimazonen des nördlichen Randbereichs von Europa (s. Bild 7) zu entwickeln. Im Bericht „Climate Change Adaptation – A Report on Climate Change Adaptation Measures for Low Volume Roads in the Northern Periphery“ aus dem Jahr 2012 wird u. a. auf die möglichen Auswirkungen auf das Straßennetz in den nördlichen Randbereichen (Schweden, Norwegen, Finnland, Island, Schottland, Irland sowie Grönland, Alaska und Kanada) eingegangen.

Zusammenfassend werden im ROADEX-Report Störungen des Straßennetzes aufgrund von Unwet-



Bild 7: The Northern Periphery Area and ROADEX Partners [HUDECZ 2012]

tereignissen (Regen, Schnee, hohe Lufttemperaturen), die Beschädigung der Straßen durch Verfall, Verformung und Setzung, Überschwemmungen durch Gewässer und unzureichende Entwässerung, die Unterbrechung von Strecken durch Erosion, Erdbeben und Lawinen sowie die Beschädigung straßenseitiger Infrastruktur durch starke Winde sowie neue Herausforderungen an die Straßensicherheit genannt [HUDECZ 2012].

Die zu erwartenden Auswirkungen der klimatischen Änderungen auf das Straßennetz werden im Bezug auf die zwei Parameter Lufttemperatur und Niederschlag näher betrachtet. Die prognostizierten heißeren Sommer und milderen Winter, die Änderungen in der Häufigkeit der Frost-Tau-Zyklen, der Anstieg des Meeresspiegels durch das Abschmelzen des Eises in den arktischen Gebieten sowie das Auftauen von Permafrostgebieten haben temperaturbedingte Folgen auf die Straßeninfrastruktur [HUDECZ 2012].

Die Stabilität des Belags wird durch höhere sommerliche Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlung beeinflusst. Die Veränderungen im Klima können langfristig die Lebensdauer von Fahrbahnen beeinträchtigen. Diese wirken sich in Form einer Zunahme an Spurrinnen und einem leichten Anstieg der Asphaltalterung sowie einer Abnahme an thermischen Rissbildungen aus. Diese Auswirkungen wurden aber als nicht signifikant eingestuft [HUDECZ 2012].

Durch die wärmeren Winter und die häufigeren Frost-Tau-Zyklen können Frostschäden an Fahrbahnen in Form von unregelmäßigen Frostaufbrüchen sowie längs- und querlaufenden Rissen vermehrt auftreten. Des Weiteren weicht der Straßenbau durch die häufigen Frost-Tau-Wechsel auf, was zu permanenten Verformungen führen kann. Diese Schäden begünstigen das Eintreten von Fahrbahnoberflächenwasser in die Schichten des Straßenaufbaus. Dieses Wasser durchläuft Frost-Tau-Wechsel, die einen zunehmenden Schaden am Straßenaufbau hinterlassen. Vermehrte Frost-Tau-Zyklen werden als eines der größten Probleme des Klimawandels im Straßenwesen gesehen. Aber auch die unterschiedliche Frostbildung kann zu Rissen und Verformungen an der Fahrbahnoberfläche führen.

Es wird auch auf die Veränderungen im Winterdienst durch Glatteis, Schneeverwehungen und Vereisung eingegangen. Das Auftreten von Glatteis

wird sich aufgrund der häufigeren Frost-Tau-Wechsel erhöhen und damit werden auch die Probleme im Winterdienst mit vereisten Straßen sowie der Streusalzverbrauch zunehmen. Im Gegensatz hierzu werden Schneeverwehungen aufgrund der milderen Winter und dem damit verbundenen geringeren Schneefall abnehmen. Die prognostizierten kürzeren Winter könnten laut dem ROADEX-Report eine Reduzierung der Schnee- und Eisräumung bedeuten, welche eine Kosteneinsparung im Winterdienst mit sich bringen könnte. Ebenso wird das Auftreten von Schneelawinen infolge der prognostizierten milderen Winter abnehmen [HUDECZ 2012].

Der Anstieg des Meeresspiegels beeinflusst die Straßeninfrastruktur durch Überflutungen von tief liegenden Küstenstraßen und Dämmen sowie durch die Erosion von Straßen und Böschungen entlang der Küsten [HUDECZ 2012].

Die Zunahme an Niederschlag, verbunden mit stärkeren und häufigeren Stürmen wird voraussichtlich unterschiedliche Auswirkungen und Schäden an Straßen zur Folge haben können: Überschwemmungen, Entwässerungsprobleme des Oberflächenwassers, Erosion von Straßen und Brücken, Versagen von Straßenböschungen, Erdbeben und Lawinen. Überschwemmungen werden als wichtigste Auswirkung des Klimawandels in den ROADEX-Ländern betrachtet. Unterdimensionierte Dückerkapazitäten, die Überschwemmungen verursachen, sowie Überströmungsprobleme an Bauwerken und Auskolkungsprobleme an Brückenpfeilern und Widerlagern treten in der Zukunft wahrscheinlich öfter auf. Aber auch die Überschwemmung von Straßen in Flussauen sowie die Erosion von Straßen und Böschungen zählen zu diesen zunehmenden Ereignissen. In diesem Zusammenhang wird auch die Straßenentwässerung genannt, die aufgrund des Klimawandels größere Mengen von Wasser in kürzerer Zeit aufnehmen muss. Erdbeben werden aufgrund häufigerer und stärkerer Niederschläge vermehrt auftreten [HUDECZ 2012].

2.5 Zusammenfassende Analyse

Viele Aufgaben des Straßenbetriebsdienstes werden zwar durch die Witterung beeinflusst, allerdings gibt es nur für den Bereich des Winterdienstes hierzu mathematische Ansätze. Mithilfe von Winterindizes lassen sich die Auswirkungen der winterlichen Witterung auf Streustoffverbrauch und Winter-

dienstumfang beschreiben. Wesentliche Witterungsparameter sind hierbei Menge und Dauer des Schneefalls als Maß für den Räumaufwand, Wind und vorhandene Schneedecke als Maß für die Beseitigung von Schneeverwehungen, weitere Niederschläge und Luftfeuchtigkeit als Maß für Streueinsätze sowie die absoluten Temperaturen und die Temperaturschwankungen vor allem um den Gefrierpunkt.

Für die weiteren Leistungsbereiche des Betriebsdienstes wird in der Literatur nur auf die Erfordernis zusätzlicher Kontroll-, Reinigungs- und Wartungsarbeiten infolge extremer Witterungsereignisse eingegangen. Für diese Einzelereignisse fehlen jedoch quantitative Zusammenhänge. Weiterhin sind die Auswirkungen wachstumsfördernder oder -behindernder Witterungsbedingungen auf das Straßenbegleitgrün und somit den Umfang der Grünpflege nicht untersucht worden.

Der Großteil der Szenarien zur Klimaentwicklung geht von einem deutlichen Temperaturanstieg für Deutschland aus. In den als am realistischsten einzuschätzenden Szenarien kann man je nach Berechnungsmodell von einem mittleren Temperaturanstieg von ca. 1 K bis 2.050 und danach um weitere 3 K bis 2.100 ausgehen. Dieser Anstieg wird jedoch regional unterschiedlich ausgeprägt sein, tendenziell ist er in Mittelgebirgslage etwas stärker als in den flachen Regionen in Norddeutschland.

Wie in Deutschland wurden auch in anderen Ländern Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Straßeninfrastruktur insgesamt initiiert. Besonders in den nordischen Ländern ist diese Fragestellung ein Forschungsschwerpunkt, da die dortige Infrastruktur durch den Klimawandel besonders betroffen ist. Zum einen ist die Straßeninfrastruktur infolge der langen Frostperioden stärkeren Beanspruchungen ausgesetzt, zum anderen kann der Klimawandel in diesen Regionen größere Ausprägungen hinsichtlich Temperaturen und Niederschlägen haben. Aus den bisher veröffentlichten Ergebnissen lassen sich folgende Schwerpunkte ableiten, wie sich der Klimawandel auf die Straßeninfrastruktur auswirkt:

- Der Straßenaufbau kann im Winter durch die häufigeren Frost-Tau-Wechsel stärker beansprucht werden. Weiterhin führen höhere Temperaturen im Sommer zu stärkeren Beanspruchungen, sowohl bei Asphalt- als auch bei Betonfahrbahnen.

- Bei den Ingenieurbauwerken, vor allem den Straßenbrücken, sind größere Temperaturspitzen, stärkere Temperaturschwankungen, aber ggf. auch größere Belastungen infolge Wind und Sturm zu berücksichtigen. Stützen und Gründungen können durch stärkere Überflutungen und Hochwasser gefährdet werden.
- Für die Entwässerungseinrichtungen der Fahrbahn ist mit stärkeren Niederschlagsspitzen zu rechnen. Diese sind bei der Entwässerung der Fahrbahnoberfläche zu berücksichtigen, die Gefahr des Aquaplaning und der Überflutung von Fahrbahnen kann steigen. Bei den weiteren Entwässerungseinrichtungen, Durchlässen und Düchern können sich stärkere Niederschläge ebenfalls negativ auswirken.
- Böschungen und Hänge können infolge lang andauernder, starker Niederschläge durchweichen und abrutschen; dies kann durch Schäden an der Vegetation infolge vorausgehender Hitze- und Trockenperioden noch begünstigt werden.
- Häufigere und stärkere Unwetter, verbunden mit starken Niederschlägen, Sturm und Gewittern, können zu Schäden an Bäumen und Vegetation sowie der Straßenausstattung führen. Die elektrotechnische Straßenausstattung kann durch elektrostatische Aufladungen der Luft und Blitzeinschläge ausfallen.
- Die Verschmutzung der Fahrbahnen infolge Überflutungen und Stürmen kann zunehmen. Andererseits kann es auch bei langen Trockenperioden zu stärkeren Verschmutzungen infolge Verwehungen kommen.
- Im Winter können kurzzeitige intensive Schneefälle verbunden mit hohen Windgeschwindigkeiten zu stärkeren Schneeverwehungen führen.

Diese Auswirkungen führen zu Gefährdungen und Behinderungen der Verkehrsteilnehmer und zu Schäden an der Verkehrsinfrastruktur. Sie beeinflussen die Leistungen des Straßenbetriebsdienstes nur zum Teil unmittelbar, da beispielsweise die Schadensbehebung an Fahrbahnen oder Ingenieurbauwerken in der Regel im Rahmen der Erhaltung durchgeführt wird. Weiterhin lassen sich durch eine Anpassung bei der Dimensionierung und Ausführung die Auswirkungen des Klimawandels teilweise kompensieren, sodass der Straßenbetriebsdienst nicht mehr betroffen ist. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass diese Anpassungen viel-

fach für das bestehende Straßennetz nicht erfolgen können, sodass hier verstärkt mit Schäden und Beeinträchtigungen zu rechnen ist.

Inwieweit infolge der angesprochenen möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Straßeninfrastruktur insgesamt die Leistungen des Straßenbetriebsdienstes konkret beeinflusst werden, wird detailliert in Kapitel 3.2 identifiziert, wobei neben den Ergebnissen aus den vorliegenden und laufenden Untersuchungen auch die Einschätzungen von Experten aus der Praxis des Straßenbetriebsdienstes berücksichtigt werden.

3 Analyse des Witterungseinflusses auf Leistungen des Straßenbetriebsdienstes

3.1 Methodik und Untersuchungsumfang

3.1.1 Betrachtete Meistereien

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Leistungen des Betriebsdienstes quantifizieren und auch die Erfahrungen aus der Praxis mit dem Witterungseinfluss berücksichtigen zu können, wurden ausgewählte Autobahn- und Straßenmeistereien in das FE-Vorhaben einbezogen. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass unterschiedliche Klimaregionen, Topografien und verkehrliche Randbedingungen berücksichtigt werden.

Im Bundesland Brandenburg wurden insgesamt vier Meistereien, je zwei Autobahn- und Straßenmeistereien, ausgewählt. Diese wurden aufgrund der Flachlandlage und des geringen Niederschlags bestimmt. In Bayern wurden drei Meistereien ausgewählt, und zwar eine Autobahn- und zwei Straßenmeistereien. Diese Meistereien wurden aufgrund der Voralpen- bzw. Mittelgebirgslage und des hohen Niederschlags bestimmt. Mit ähnlichen klimatischen und topografischen Randbedingungen wurde die AM Ulm-Dornstadt in Baden-Württemberg in das FE-Vorhaben einbezogen. In Hessen wurden die SM Offenbach und die AM Rodgau im Rhein-Main-Gebiet, d. h. in Flachlandlage und mit hohen Verkehrsstärken ausgewählt. Weiterhin wurden die AM Rheinberg und die SM Legden aus Nordrhein-Westfalen, ebenfalls im Flachland gelegen und teilweise mit hohen Verkehrsmengen, ausgewählt. Die Lage aller Meistereien zeigt Bild 8.



Bild 8: Übersichtkarte über die ausgewählten Meistereien, Kartengrundlage: BATCHGEO [2012]

Im Anhang 1 sind die zwölf ausgewählten Meistereien in Bezug auf Topografie, Straßennetz, Verkehrsbelastung, Klima und besonderen Charakteristika

detailliert beschrieben. Des Weiteren sind in Anhang 2 die zu betreuenden Streckennetze und die Meistereigehöfte differenzierter dargestellt.

3.1.2 Verwendete Daten zum durchgeführten Betriebsdienst

Als Datengrundlage für die Analyse des Witterungseinflusses auf den Leistungsumfang des Straßenbetriebsdienstes wurden die aufgezeichneten Daten aus den Jahren 2006 bis 2010 der jeweiligen Meistereien verwendet. Dazu wurden die Personeneinsatzstunden und die Kosten für Fremdleistungen nach dem Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen [BMVBS 2004] sowie der Salzverbrauch auf Monatsbasis zur Verfügung gestellt.

Allerdings liegen für die Korrelationsanalysen keine vollständigen Daten vor: Bei den Meistereien in Brandenburg konnten die Daten zu den vergebenen Fremdleistungen nicht zur Verfügung gestellt werden. Bei den Meistereien in Nordrhein-Westfalen fehlen die Daten aus dem Jahr 2006 für die Personeneinsatzstunden und die Fremdleistungen. Darüber hinaus fehlen zum Salzverbrauch der SM Legden Daten von Anfang 2006 sowie der AM Rheinberg Daten des Winters 2009/10. Für die Meistereien in Bayern fehlen Daten zum Salzverbrauch für Anfang 2006. Die Daten zu den Fremdleistungen stehen dort erst ab 2007 und nur quartalsweise zur Verfügung, weiterhin lassen sie sich für die Kooperationsmeistereien nicht nach Standorten differenzieren. Trotz dieser Einschränkungen ist es jedoch möglich, den Zusammenhang von Einsatzdaten und Witterungsparametern zu analysieren.

Die Datengrundlage der Personeneinsatzstunden und der Fremdleistungen nach dem Leistungsheft ist je nach Bundesland teilweise unterschiedlich, da die meisten Bundesländer das Leistungsheft durch landesspezifische Leistungspositionen ergänzt haben. Für die Korrelationsanalysen wurden daher die auf den vergleichbaren Leistungspositionen erfassten Daten individuell den jeweiligen Leistungspositionen gemäß Leistungsheft des Bundes zugeordnet.

3.1.3 Verwendete Klimadaten

Als Basisdaten wurden die meteorologischen Beobachtungsdaten aus dem beim PIK aufgebauten vollständigen und homogenisierten Datensatz verwendet. Der Datensatz enthält tägliche Werte von 180 Klima- und 1.038 Niederschlagsstationen für den Zeitraum 1951 bis 2010. Die räumliche Verteilung der Stationen ist dem Bild 9 zu entnehmen.

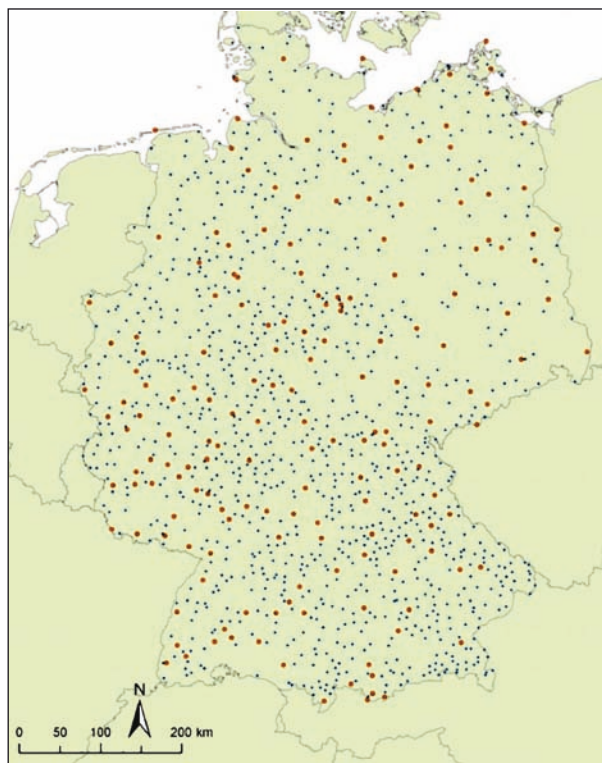


Bild 9: Verteilung der 180 Klima- (rot) und 1.038 Niederschlagsstationen (blau) über Deutschland

Im Einzelnen handelt es sich um folgende Primärdaten sowie daraus abgeleitete Parameter:

1. Tagesminimum der Lufttemperatur (T_{\min}) [$^{\circ}\text{C}$],
2. Tagesmaximum der Lufttemperatur (T_{\max}) [$^{\circ}\text{C}$],
3. Tagesmittel der Lufttemperatur (T_{mit}) [$^{\circ}\text{C}$],
4. Tagessumme des Niederschlags (RR) [mm],
5. Relative Luftfeuchte (RF) [%],
6. Bedeckungsgrad (BG) [1/8],
7. Sonnenscheindauer (SON) [h],
8. Luftdruck (LDR) [hPa],
9. Mittlere Windgeschwindigkeit (W) [m/s],
10. Wasserdampfdruck (DDR) [hPa],
11. Globalstrahlung (STR) [J/cm^2],
12. Windspitzen für der Sturmtage (WS) [m/s],
13. Neuschneehöhe (SN) [cm],
14. Schneedeckenhöhe (SH) [cm].

In einem ersten Bearbeitungsschritt wurden die vom DWD bereitgestellten meteorologischen

Bundesland	Meisterei	Anzahl aller Stationen im Areal	Anzahl ausgewählter Stationen
Bayern	AM Rehau	10	6
	SM Rödelmaier	19	5
	SM Hausham	16	4
Brandenburg	AM Erkner	5	4
	AM Gramzow	5	5
	SM Fürstenwalde	5	4
	SM Elsterwerda	8	4
Baden-Württemberg	AM Ulm-Dornstadt	9	6
Hessen	AM Rodgau	23	5
	SM Offenbach	23	6
Nordrhein-Westfalen	AM Rheinberg	8	5
	SM Legden	11	4

Tab. 4: Ausgewählte Autobahnmeistereien (AM) bzw. Straßenmeistereien (SM) und die Anzahl aller und der ausgewählten meteorologischen Stationen im Areal der Meisterei

Messdaten beim PIK auf Vollständigkeit kontrolliert und gegebenenfalls ergänzt. Außerdem wurden die Zeitreihen der einzelnen meteorologischen Größen auf ihre Homogenität geprüft und im Fall nicht klimatisch bedingter Inhomogenitäten homogenisiert [ÖSTERLE et al. 2006]. Die Globalstrahlung wurde für die Stationen, an denen sie nicht direkt gemessen wurde, aus der Sonnenscheindauer mittels Regressionsgleichungen berechnet [ÖSTERLE 2001]. Die beobachteten Niederschlagsmengen der Niederschlagsstationen wurden entsprechend geprüft und homogenisiert und die fehlenden meteorologischen Parameter auf Basis der Beobachtungen der benachbarten Klimastationen interpoliert. Die Schneehöhe wurde aus den Niederschlags- und Lufttemperaturdaten mithilfe eines linearen Regressionsmodells berechnet.

Zusätzlich wurden die täglichen Windspitzen für die im Zeitraum 1972 bis 2008 im Winter aufgetretenen 157 Stürme verwendet. Berechnet wurden diese Windspitzen mithilfe des dynamischen Modells CCLM [BÖHM et al. 2006; BORN et al. 2012] auf der Basis der ECMWF-Re-Analysen [UPPALA et al. 2005]. Die Auflösung des Gitters betrug $0.165^\circ \times 0.165^\circ$. Die mittlere Andauer für jeden Sturm wurde mit vier Tagen (einschließlich Genese und Durchzug) vorgegeben. Die Windspitzen wurden von den jeweils umliegenden Gitterpunkten des Modells auf die ausgewählten Stationen interpoliert. Die Werte der Windspitzen wurden zusätz-

lich zu den anderen meteorologischen Größen, wie Luft, relative Feuchte, Niederschlag, Wind, Sonnenscheindauer und Globalstrahlung als Eingangs- und Ausgabeparameter für das STARS-Modell bereitgestellt. Dieser Datensatz bildet die Grundlage für die folgenden Untersuchungen.

Auf die Nutzung von Gitterdaten mit hoher Auflösung wurde außer bei der Bestimmung der Windspitzen verzichtet. Durch die räumliche Interpolation der Originaldaten bestand die Gefahr, dass die Extremwerte zu sehr geglättet würden. Besonders betroffen wären in diesem Fall zum Beispiel die räumlich hoch variablen Niederschläge.

Die Auswertungen wurden für die insgesamt zwölf ausgewählten Autobahn- (AM) bzw. Straßenmeistereien (SM) durchgeführt (siehe Kapitel 3.1.1). Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die ausgewählten AM und SM sowie die in dem jeweiligen Areal (Umkreis von ungefähr 50 km) liegende Anzahl an meteorologischen Stationen. Aufgrund der Lage der Stationen zum Betreuungsnetz wurde eine Auswahl der Klimastationen getroffen, die im oder in unmittelbarer Nähe des Meistereibereichs liegen (siehe Anhang 2 und 3). Diese Aussonderung wurde u. a. vorgenommen, um regionale Extremwetterereignisse, die direkt die jeweilige Meisterei betreffen, präziser erfassen zu können. Für diese Stationen wurden die oben erwähnten meteorologischen Parameter für die Zeitperiode 2006 bis 2010 aufbereitet.

3.1.4 Durchgeführte Untersuchungen

Aus der Literaturanalyse (s. Kapitel 2), zwei Workshops mit den Leitern der beteiligten Meistereien und weiteren Mitgliedern des Betreuungsausschusses sowie Interviews mit den Meistereileitern wurden mögliche Witterungseinflüsse auf Leistungen des Straßenbetriebsdienstes und die dazugehörigen relevanten klimatische Einflussgrößen abgeleitet. Um diese zu berücksichtigen, wurden aus den 14 in Kapitel 3.1.3 aufgelisteten meteorologischen Parametern weitere Klimaparameter (s. Kapitel 3.3) als Tageswerte abgeleitet.

Die zur Verfügung gestellten Daten zu den Einsatzstunden wurden mithilfe der Daten zu den Fremdleistungen dahin gehend überprüft, dass keine temporäre Kompensation von Eigenleistungen durch Fremdleistungen erfolgte, die den Einfluss der Witterung auf die Einsatzstunden verfälschen würde. Personaleinsatzstunden und Daten zum Salzverbrauch wurden dann mit den relevanten Klimaparametern verglichen, um entsprechende Witterungsabhängigkeiten identifizieren zu können. Dies erfolgte für den Winterdienst auf Monatsbasis, da hierbei die Einsatzstunden direkt zum Zeitpunkt der erfassten Witterungssituation anfallen. Für andere Leistungen, wie z. B. die Grünpflege wurden die Vergleiche auf Jahresbasis durchgeführt, da die Einsätze nicht unmittelbar,

sondern auch zeitlich versetzt erfolgen. Eine Übersicht über die verwendete Dateienstruktur bei den Korrelationsanalysen je Meisterei gibt Bild 10.

Diese Korrelationsanalysen wurden für ausgewählte Leistungspositionen in den Leistungsbereichen bauliche Unterhaltung, Grünpflege und Winterdienst durchgeführt, für die eine unmittelbare Witterungsabhängigkeit am wahrscheinlichsten ist.

Bei der baulichen Unterhaltung wurde nur die Position 01.01 „Schäden an Fahrbahnen beseitigen“ analysiert. Hierbei wurde die Annahme getroffen, dass Frostschäden vor allem in der kalten Jahreszeit im Zeitraum Januar bis März und Hitzeschäden im meteorologischen Sommer von Juni bis August entstehen und die Aufwendungen des Straßenbetriebsdienstes im gleichen Zeitraum auftreten. Weitergehende Leistungen zur Schadensbeseitigung, die auch später erfolgen, sind nicht Aufgaben des Straßenbetriebsdienstes, sondern erfolgen im Rahmen der baulichen Erhaltung. Bei der Grünpflege wurden die Positionen 02.01, 02.03 bis 02.05, die die Mäharbeiten im Intensivbereich abdecken, zusammengefasst. Ebenso wurden beim Winterdienst die Positionen 05.01 bis 05.06, die zum Leistungsbereich Räumen und Streuen gehören, zusammen betrachtet.

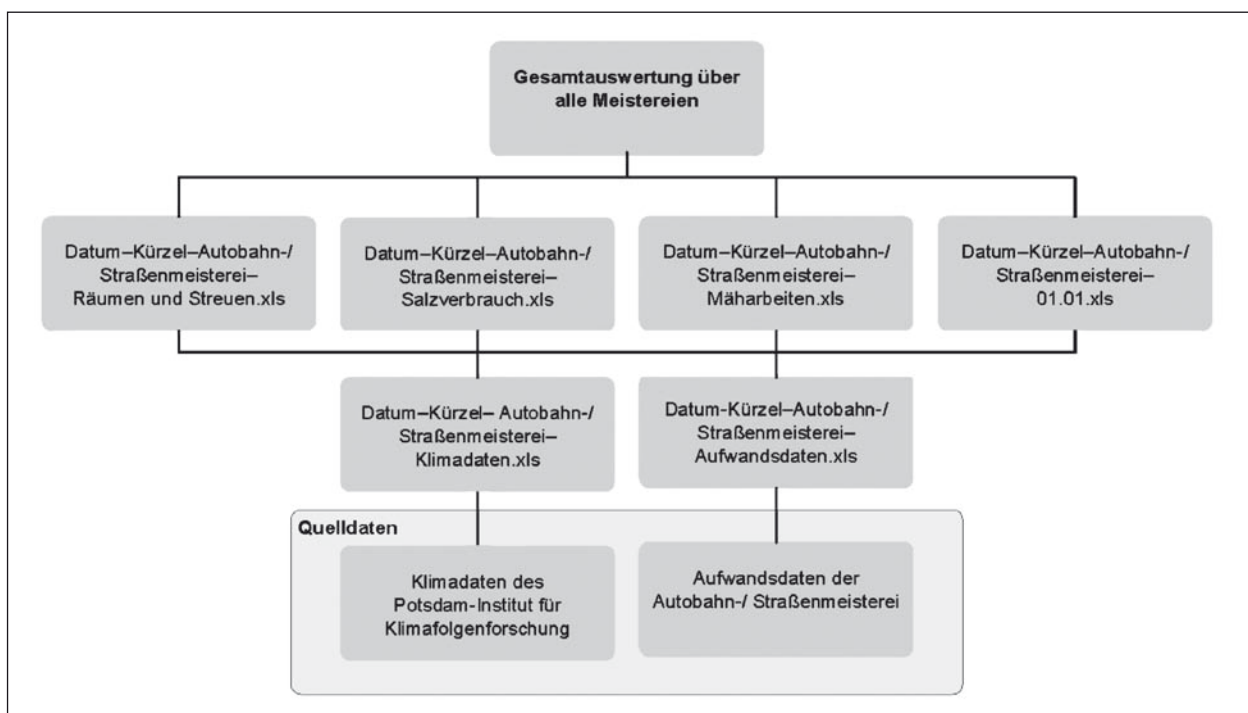


Bild 10: Schematische Darstellung der für die Auswertungen verwendeten Dateienstruktur je Meisterei

3.2 Identifikation möglicher Witterungseinflüsse und relevanter klimatischer Einflüsse

3.2.1 Leistungsbereich: Bauliche Unterhaltung

Position 01.01 – Schäden an Fahrbahnen beseitigen

Bei dieser Position können zum einen Aufwendungen für die Beseitigung von Hitzeschäden verbucht werden, wie Spurrinnenbildung, Aufweichen der Deckschicht und permanente Verformung bei Asphaltfahrbahnen sowie „Blow ups“ (Aufplatzungen, Hitzeaufbruch) bei Betonfahrbahndecken. Diese Schäden werden vor allem durch folgende Parameter hervorgerufen:

- hohe Lufttemperaturen (größer 25-30 °C),
- Sonneneinstrahlung.

Aber nicht nur einer dieser Parameter, sondern vor allem die Kombination aus beiden Parametern über mehrere Stunden führt zu Schäden an Fahrbahnen. Die Bildung von Schäden an der Fahrbahn aufgrund von hohen Lufttemperaturen wird bei Asphaltbelägen unterstützt durch niedrige Geschwindigkeiten, vorherige Oberflächenbehandlung oder wenn die Fahrbahn „schwitzt“. Gefahren bestehen bei Fahrbahnoberflächentemperaturen über 50 °C.

Zum anderen wurden Frostschäden, wie Schlaglöcher und Risse im Asphalt, als witterungsabhängig identifiziert, die meist in oder nach den Wintermonaten beseitigt werden. Diese Schäden werden durch bereits vorhandene Risse und Baumängel begünstigt und vor allem durch folgende klimatologische Parameter verursacht:

- Frost-Tau-Wechsel,
- Dauer von Frostperioden,
- Intensität des Frosts,
- starke Lufttemperaturschwankungen im Tagesverlauf,
- Niederschlag.

Aber auch starker Niederschlag, der Erosionsschäden an asphaltierten Straßen bei fehlender Entwässerung sowie die Überschwemmung küstennaher oder flussnaher Straßen zur Folge hat, kann zur Beschädigung der Fahrbahn führen. In besonde-

rem Maße treten Schäden an der Fahrbahn bei älteren Strecken in einem schlechten Erhaltungszustand auf, aber auch hohe Verkehrsmengen begünstigen Hitze- und Frostschäden.

Positionen 01.02 und 01.03 – Schäden an befestigten Radwegen und nicht befahrenen, befestigten Flächen beseitigen

Die bei der Position 01.01 genannten Klimaparameter und deren Einfluss auf die Fahrbahn treffen auch auf die Position 01.02 und 01.03 mit vermindertem Einfluss zu.

Position 01.04 – Schäden an unbefestigten Flächen beseitigen

Schäden an unbefestigten Flächen werden vor allem durch Niederschläge begünstigt, die durch folgende Parameter charakterisiert werden:

- Niederschlagsmenge,
- Niederschlagsintensität,
- Niederschlagsdauer.

Die Niederschläge rufen Überschwemmungen, Unterspülungen und Erosionen im Böschungsbereich hervor.

Position 01.05 – Mängel an steinschlaggefährdeten Felshängen

Die bei der Position 01.04 genannten Parameter spielen bei dieser Position ebenfalls eine wesentliche Rolle. Sie verringern die Hangstabilität und tragen dadurch zu Hang- bzw. Erdbeben sowie Felsabgängen bei. Darüber hinaus verursachen aber auch folgende Witterungseinflüsse Schäden:

- Frosttage,
- Frost-Tau-Wechsel.

Position 01.06 – Schäden an Ingenieurbauwerken und deren Entwässerungseinrichtungen beseitigen

Bei dieser Position wurden folgende Witterungseinflüsse bestimmt, die Schäden an Ingenieurbauwerken und deren Entwässerungseinrichtungen verursachen können:

- lang anhaltende tiefe Lufttemperaturen,
- hohe Lufttemperaturen,

- Sturm/Windspitzen,
- Niederschlagsmenge,
- Niederschlagsintensität,
- Niederschlagsdauer.

Bei Ingenieurbauwerken können einerseits tiefe Temperaturen Schäden an Lager- und Übergangskonstruktionen verursachen. Andererseits führen hohe Lufttemperaturen zu einer thermischen Expansion oder zur Überschreitung der zulässigen Längsdehnungen. Stürme oder Windspitzen können zu Schäden durch winderregte Schwingungen beitragen. Starke Niederschläge können durch Dammbildung an niedrigen Brücken, hohem Wasserdurchfluss, Anprall von Schwemmgut, der Auskolkung und Erosion Schäden hervorrufen.

Positionen 01.07 bis 01.12 – Schäden an Straßenrinnen und befestigten Straßengräben, Rohrleitungen und Durchlässen, Straßenabläufen und Schächten, Rückhalteanlagen und Versickerungsanlagen sowie Mängel an unbefestigten Gräben und Mulden, unbefestigten Seiten-, Mittel- und Trennstreifen beseitigen

Bei diesen sechs Positionen wurden ebenfalls die den Niederschlag beschreibenden Parameter bei unzureichender Fahrbahntwässerung identifiziert:

- Niederschlagsmenge,
- Niederschlagsintensität,
- Niederschlagsdauer.

Starke, lang anhaltende Niederschläge können zu erheblichen Verschmutzungen nach Überschwemmungen führen, die zum Teil auch im Rahmen der baulichen Unterhaltung beseitigt werden.

3.2.2 Leistungsbereich: Grünpflege

Positionen 02.01 bis 02.08 – Mäharbeiten (Bankette an Fahrbahnen und Radwegen, Mittel- und Trennstreifen an Fahrbahnen, Sichtfelder im Bereich von Knotenpunkten, Straßenmulden und Entwässerungsgräben, Erholungs- und Aufenthaltsflächen, Grasflächen außerhalb des Straßenrandbereichs sowie Rückhalte-, Absetz- und Versickerungsbecken)

Bei den Positionen, die die Mäharbeiten umfassen, sind die Klimaparameter maßgebend, die das

Pflanzenwachstum beeinflussen. Hier ist vor allem die Vegetationsperiode ausschlaggebend, die nach DWD [2013] „als derjenige Zeitraum des Jahres [bezeichnet wird], in dem die Pflanzen photosynthetisch aktiv sind, d. h. wachsen, blühen und fruchten. Als Beginn der Wachstumszeit wird im allgemeinen der Abschnitt des Jahres definiert, in dem das Tagesmittel der Lufttemperatur mindestens 5 °C (für verschiedene Pflanzen auch 10 °C) beträgt. Beim Unterschreiten der Schwellenwerte für die Temperatur bzw. bei Trockenheit tritt Vegetationsruhe ein.“ Laut FORMAYER et al. [2007] könnten dann aber „einzelne warme Tage oder kurze Perioden mitten im Winter“ dazu gezählt werden. Eine laufende Vegetationsperiode gilt als unterbrochen wenn an fünf aufeinander folgenden Tagen die Tagesmitteltemperatur unter 5 °C bleibt. Somit wurden folgende Klimaparameter bestimmt:

- Vegetationsperiode: Tage mit einer mittleren Lufttemperatur über 5 °C (Beginn, wenn an mindestens fünf aufeinander folgenden Tagen $T_{mit} > 5$ °C, Ende, wenn an mindestens fünf aufeinander folgenden Tagen $T_{mit} < 5$ °C),
- Tage mit einer mittleren Lufttemperatur über 10 °C (große Vegetationsperiode),
- Niederschlag,
- Sonneneinstrahlung,
- Frosttage.

Aber auch hier ist zusätzlich das Zusammenspiel aus diesen Parametern ausschlaggebend für das Pflanzenwachstum, so begünstigen vor allem Niederschläge während der Vegetationsperiode das Wachstum. Der letzte Frosttag nach der Winterperiode sowie der erste Frosttag vor der nächsten Winterperiode können als Indikatoren für die Vegetationsperiode herangezogen werden. Hohe Lufttemperaturen und ausbleibender Niederschlag über einen längeren Zeitraum beeinträchtigen hingegen das Pflanzenwachstum.

Bei Grasflächen im Extensivbereich (Positionen 02.07 und 02.08) haben die genannten Parameter nur einen reduzierten Einfluss auf die erforderlichen Mäharbeiten, da hier i. d. R. einmal jährlich oder sogar nur im mehrjährigen Turnus gemäht wird.

Positionen 02.10 bis 02.15 – Gehölze im Straßenrandbereich, in Mittel- und Trennstreifen zwischen Fahrbahnen, an Erholungs- und Aufenthaltsflächen, außerhalb des Straßenrand-

bereichs zurückschneiden sowie Bäume pflegen, sanieren oder fällen

Bei den Positionen, die die Gehölz- und Baumpflege beinhalten, wurden nahezu dieselben Klimaparameter wie bei den Mäharbeiten identifiziert. Darüber hinaus beeinflussen noch folgende Parameter den Aufwand für diese Positionen:

- lang anhaltende hohe Lufttemperaturen,
- Stürme/Windspitzen.

Hohe Lufttemperaturen wie auch ausbleibender Niederschlag über einen längeren Zeitraum beeinträchtigen aber nicht nur das Wachstum, sie können auch dazu führen, dass die ingenieurbio-logische Funktion der Vegetation durch Vertrocknen beeinträchtigt wird, was zum Versagen von Straßenböschungen führen kann. Die Gefahr von Vegetations-, Böschungs- und Schwelbränden steigt in Trockenperioden. Diese Witterungssituationen machen auch das Gehölz und die Bäume mürbe und damit anfällig für Schädlinge und Pilze. Der Schädlingsbefall wird auch durch mildere Lufttemperaturen gefördert. Darüber hinaus verursachen Stürme mit hohen Windspitzen Mehrarbeiten durch Sturmschäden an Bäumen.

3.2.3 Leistungsbereich: Wartung und Instandhaltung der Straßenausstattung

Im Leistungsbereich 3 wurden nur bei den nachfolgend aufgeführten Positionen Witterungsabhängigkeiten identifiziert. Alle anderen Positionen des Leistungsbereiches 3 sind nicht witterungsabhängig.

Position 03.01 – Verkehrszeichen instand halten

Bei der Position 03.01 können folgende Witterungseinflüsse das Instandhalten von Verkehrszeichen beeinflussen:

- Sonneneinstrahlung,
- Sturm/Windspitzen,
- siehe Winterdienstparameter zu „Räumen“.

Stürme mit hohen Windspitzen können Schäden an hochragenden Anlagen, wie Verkehrszeichen, verursachen. Des Weiteren kann die Sonneneinstrahlung eine Rolle spielen, da die Oberfläche nach Süden ausgerichteter Verkehrszeichen durch eine starke Einstrahlung schneller verwittert. Schäden an Verkehrszeichen können aber auch durch die Räumarbeiten im Zuge des Winterdienstes auftreten.

Position 03.02 – Leitpfosten instand halten

Leitpfosten können einerseits durch die Grünpflege im Intensivbereich und andererseits durch die Schneeräumung im Winterdienst beschädigt werden. Daher ist diese Position theoretisch abhängig von den identifizierten Klimaparametern im Bereich Grünpflege und Winterdienst.

Positionen 03.08 bis 03.10 – Wechselverkehrszeichen-(WVA), Lichtsignal-(LSA) und Beleuchtungsanlagen warten und instand halten

Bei den Positionen, die sich mit dem Warten und Instandhalten von elektrotechnischen Anlagen befassen, wurden folgende Witterungssituationen als aufwandsbeeinflussend identifiziert:

- hohe Spitzenwerte der Lufttemperatur,
- lang anhaltende hohe Lufttemperatur,
- Sturm/Windspitzen,
- Gewitter.

Bei elektrotechnischen Anlagen können hohe Lufttemperaturen zu Schäden in Form von Kurzschlüssen im Schaltkasten führen. Darüber hinaus können Stürme Ausfälle oder Schäden verursachen. Aber auch Gewitter haben einen Einfluss auf den Instandhaltungsumfang: Durch Blitzeinschläge können Ausfälle oder Schäden an den elektrotechnischen Anlagen hervorgerufen werden.

3.2.4 Leistungsbereich: Reinigung

Positionen 04.01 bis 04.05 – Kehrarbeiten (Fahrbahnränder und Standstreifen, Befestigte Mittel- und Trennstreifen, Befahrene Verkehrsflächen im Bereich von Rastanlagen, Radwege und begehbare befestigte Flächen)

Bei den Kehrarbeiten sind folgende Klimaparameter von Bedeutung:

- Niederschlagsmenge,
- Niederschlagsintensität,
- Niederschlagsdauer,
- lang anhaltende Periode ohne Niederschlag,
- Stürme/Windspitzen.

Starker Niederschlag kann durch Überflutung die Verkehrsflächen verschmutzen. Des Weiteren kann

bei der Kombination aus einer lang anhaltenden Periode ohne Niederschlag und zusätzlichem Wind vermehrt Sand und Staub von angrenzenden Feldern auf die Verkehrsflächen geweht werden. Aber auch Stürme mit hohen Windspitzen verursachen Verwehungen von Gegenständen und Astwerk auf die Verkehrsflächen, was einen erhöhten Reinigungsaufwand zur Folge hat.

Position 04.06 – Verkehrsbehindernde oder -gefährdende Verschmutzungen auf Verkehrsflächen beseitigen

Bei der Position 04.06 sind dieselben Klimaparameter wie bei den Kehrarbeiten relevant. Aber vor allem Überflutungen sowie Verwehungen bei Stürmen spielen eine wesentliche Rolle für diese Leistungsposition.

Positionen 04.07 bis 04.13 – Reinigungsarbeiten (Befestigte Straßenmulden und -gräben sowie Böschungsrinnen, Sonderrinnen, Straßenabläufe, Schächte, Rohrleitungen, Durchlässe und Düker, Sonstige Entwässerungseinrichtungen)

Bei den Reinigungsarbeiten an der Entwässerung sind dieselben Klimaparameter maßgebend wie bei den Verkehrsflächen, da die Verschmutzungen auch die Entwässerungseinrichtungen verstopfen können.

Position 04.18 – Leitpfosten reinigen

Eine hohe Niederschlagsmenge verursacht häufiger eine nasse Fahrbahn, bei der durch Spritzwasser die Leitpfosten verunreinigt werden können, sodass dieser Klimaparameter relevant sein kann. Ein intensiverer Winterdienst kann zu einer stärkeren und schnelleren Verschmutzung von Leitpfosten führen, sodass indirekt auch die Einflussgrößen, aus denen ein stärkerer Winterdienst resultiert, relevant sein können.

Positionen 04.21 bis 04.22 – Abfälle und Müllablagerungen entlang der Strecke sowie an Park- und Rastanlagen einsammeln und entsorgen

Stürme mit Windspitzen begünstigen die Verwehung von Abfall und können damit einen Mehraufwand im Straßenbetriebsdienst bedeuten.

Bei allen anderen Positionen im Bereich Reinigung konnte keine Witterungsabhängigkeit identifiziert werden.

3.2.5 Leistungsbereich: Winterdienst

Im Leistungsbereich Winterdienst sind alle neun Leistungen meistens unmittelbar abhängig von der Witterung.

Positionen 05.01 bis 05.06 – Räumen und Streuen (Fahrbahn einschließlich Standstreifen, Radwege, sonstige Verkehrsflächen)

Folgende Klimaparameter beeinflussen den Aufwand für Räum- und Streueinsätze:

- Niederschlag,
- Neuschneehöhe,
- minimale Tageslufttemperatur,
- relative Luftfeuchtigkeit,
- Frost-Tau-Wechsel,
- tiefe Tageslufttemperaturen,
- Frosttage,
- Eistage.

Diese Klimaparameter charakterisieren – auch in Kombination – die Witterungssituationen, die die Einsätze aufgrund von Schneefall, Glatteis oder Eisglätte und Reifglätte verursachen (Definitionen siehe Kapitel 3.1.3). Der absolute Aufwand für die Einsätze ist allerdings auch von der vorherrschenden Verkehrsstärke, der Anzahl der Räum- und Streuschleifen und der Topografie abhängig.

Position 05.07 – Erhebliche Schneeüberwehungen beseitigen

Für das Auftreten erheblicher Schneeüberwehungen sind folgende Klimaparameter maßgebend:

- Wind (ab 3 m/s),
- Schneedeckenhöhe,
- Neuschneehöhe,
- tiefe Lufttemperaturen.

Diese Parameter begünstigen auch die Verwehung von vorhandenem „Pulverschnee“, wofür eine geschlossene Schneedecke Voraussetzung ist.

Laut DURTH/HANKE [2004] liegen die lawinengefährdeten Strecken im deutschen Straßennetz in Oberbayern im Gebirge, wo große Schneemengen auftreten, in der Regel über 800 m ü. NN. Die SM

Hausham zählt daher zu den Meistereien mit Lawinengefahr. Alle Arbeiten im Zusammenhang mit der Beseitigung von Lawinen werden in dieser Meisterei auf die Position 05.07 gebucht. Folgende Klimaparameter werden als ausschlaggebende Faktoren für Lawinenabgänge eingeschätzt:

- Schneedeckenhöhe (ab 40 cm),
- Neuschneehöhe.

Position 05.08 – Schneezäune auf- oder abbauen

Zur Vermeidung von erheblichen Schneeverwehungen werden Schneezäune vor dem Winter auf- und nach dem Winter abgebaut. Die Erfordernis, Schneezäune aufzustellen, resultiert aus den für Schneeverwehungen maßgebenden Einflussgrößen (s. Position 5.07).

Der Auf- bzw. Abbau ist abhängig von der Witterung im Herbst bzw. Frühjahr. Wesentliche Parameter sind dabei:

- Niederschlag,
- Lufttemperatur.

Schneezäune werden möglichst erst nach einer lang anhaltenden Periode ohne Niederschlag im Herbst und optimaler Weise bei gefrorenem Boden aufgestellt. Aber auch das Ende der Vegetationsperiode (siehe Klimaparameter Grünpflege) ist ausschlaggebend, da die Schneezäune meist auf landwirtschaftlich genutzten Flächen aufgestellt. Dieselben Parameter gelten auch für den Abbau der Schneezäune. Allerdings wird bei dieser Leistung weniger der Aufwand zur Leistungserbringung als vielmehr vor allem der Zeitpunkt der Leistungserbringung beeinflusst.

3.2.6 Leistungsbereich: Streckenkontrolle

Im Leistungsbereich Streckenkontrolle ist der Witterungseinfluss meist nur sekundär.

Position 06.01 – Beseitigen von Unfallschäden

Bei der Position 06.01 wurden folgende Klimaparameter als mögliche Einflussparameter identifiziert, welche witterungsbedingte Unfälle verursachen können:

- Sturm/Windspitzen,
- Niederschlagsintensität,

- Dauer des Winters.

Diese Parameter haben vor allem in Form von Starkwetterereignissen einen Einfluss auf diese Position.

Position 06.02 – Allgemeine Wartungstätigkeiten

Die Position 06.02 wird ebenfalls von Starkwetterereignissen beeinflusst. So liegt hier der Schwerpunkt beim Mehraufwand im Zuge zusätzlicher Streckenkontrollen nach Unwettern. Dies beinhaltet z. B. Aufrichten von Leitpfosten nach dem Winter oder Reinigung und/oder Reparatur von Einlaufschächten nach einem Hochwasser.

Position 06.03 – Verkehrsregelnde Maßnahmen bei Katastrophenfällen

Die Position 06.03 wird ebenfalls durch extreme Wetterereignisse beeinflusst. Die wesentlichen Klimaparameter, die diese charakterisieren, sind

- Sturm/Windspitzen,
- Niederschlagsintensität,
- Niederschlagsmenge.

3.2.7 Weiteres

Darüber hinaus gibt es noch weitere Witterungseinflüsse, die den Aufwand, aber vor allem auch den Zeitpunkt der Leistungserbringung beeinflussen. Zum Teil sind hiervon auch Leistungen betroffen, die nicht unmittelbar dem Straßenbetriebsdienst zuzuordnen sind.

Markierungsarbeiten

Bei Markierungsarbeiten muss die Fahrbahn trocken sein, damit eine Fahrbahnmarkierung aufgebracht werden kann, d. h. Perioden ohne Niederschlag sind relevant. Ein Mehraufwand für Markierungsarbeiten kann durch viele Räumereinsätze in der Winterperiode entstehen, da diese die Markierung beschädigen können.

Arbeiten im Verkehrsraum und generell im Freien

Generell werden Arbeiten im Verkehrsraum und vor allem auch im Freien stark durch die vorherrschende Witterungssituation beeinflusst. Folgende Klimaparameter können in diesem Zusammenhang relevant sein:

- Nebel,
- hohe Lufttemperatur,
- Niederschlagsintensität.

Nebel kann zum einen die Gefahr von Arbeiten im Verkehrsraum deutlich erhöhen, da die Sichtverhältnisse der Autofahrer, aber auch der Arbeiter dadurch stark verringert wird. Zum anderen kann dies auch einen Mehraufwand im Bezug auf die erhöhte Absicherung des Arbeitsraums verursachen. Aber auch starke Niederschläge können die Sichtverhältnisse reduzieren und bergen daher dieselben Risiken sowie Mehraufwand. Des Weiteren können hohe Lufttemperaturen die Konzentrationsfähigkeit der Autofahrer, aber auch der Arbeiter beeinträchtigen, was ebenfalls zu einer zunehmenden Gefährdung führt. Darüber hinaus können hohe Lufttemperaturen auch das Arbeiten im Freien allgemein beeinträchtigen. Erhöhte Staubbildung in Trockenperioden und Hitze reduzieren die Leistungsfähigkeit bei Arbeiten im Freien. Aber auch starke Niederschläge beeinträchtigen die Arbeiten im Freien.

Veränderungen der Flora

Weiterhin gibt es derzeit auch Veränderungen in der Pflanzenwelt, die den Aufwand in der Grünpflege erheblich erhöhen können. Mildere Temperaturen begünstigen u. a. die Ausbreitung von Neophyten, d. h. von Pflanzen, die sich mit oder ohne menschliche Einflussnahme in einem Gebiet etabliert haben, in dem sie zuvor nicht heimisch waren. Diese stehen außer Konkurrenz und ihre Verbreitung geht sehr schnell [HEGER 2004]. Diese Ausbreitung und vor allem die Entsorgung dieser Pflanzen kann erhebliche gesundheitliche Gefährdungen für die Mitarbeiter des Straßenbetriebsdienstes verursachen.

3.3 Exemplarische Auswertungen für ausgewählte Leistungen

3.3.1 Bauliche Unterhaltung

Im Bereich der baulichen Unterhaltung wurde in erster Linie die Position 01.01 „Schäden an Fahrbahnen beseitigen“ auf ihre Witterungsabhängigkeit analysiert, da bei dieser die größte Korrelation zu erwarten ist. Die anderen, in Kapitel 3.2.1 genannten Einflüsse im Bereich der baulichen Unterhaltung, wie z. B. Hangrutschungen, sind eher singuläre Ereignisse, sodass der durch sie verursachte

Aufwand nicht so stark ins Gewicht fällt oder nicht im Rahmen des Straßenbetriebsdienstes erfasst wird.

Für die Korrelationsanalyse wurde zwischen Fahrbahnschäden aufgrund von Frost und aufgrund von Hitze unterschieden (siehe dazu auch Kapitel 3.1.3). Hierfür wurde der Einfluss von je drei relevanten Klimaparametern analysiert, die als maßgebend für die Entstehung von Schäden an Fahrbahnen angesehen werden. Ein Einfluss von Frost-Tau-Wechseln auf den Leistungsumfang der baulichen Unterhaltung konnte mit den zur Verfügung stehenden Tageswerten zur Witterung nicht nachgewiesen werden, Hierfür kann die unzureichende zeitliche Auflösung der Witterungsdaten ursächlich sein; es ist aber auch möglich, dass der Einfluss auf die Leistungsposition 1.01 nur gering ist.

Frostschäden

1. Mittel des Tagesminimums der Lufttemperatur von Januar bis März [$^{\circ}\text{C}$]:
Die minimale tägliche Lufttemperatur ist ein Maß für die Schwere des Winters. Je geringer dieser Parameter, desto länger und auch stärker sind die Frostperioden, durch die Frostschäden verursacht werden.
2. Anzahl der Eistage von Januar bis März [d]:
Schäden an Fahrbahnen werden generell durch tiefe Temperaturen verursacht, die Summe der Eistage ist daher ebenfalls ein Maß für die Schwere des Winters. Je mehr Eistage auftreten, desto länger ist die Frostandauer und in der Regel auch die Frostintensität.
3. Anzahl der Tage mit großen Temperaturschwankungen im Tagesverlauf im Zeitraum Januar bis März [d]:
Die Entstehung von Frostschäden wird vor allem bei Asphaltfahrbahnen, durch häufige Frost-Tau-Wechsel begünstigt. Große tägliche Temperaturschwankungen ($> 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) um die Nullgrad beschleunigen diese Schadstellenbildung.

Da davon auszugehen ist, dass Frostschäden nicht immer unmittelbar während der entsprechenden Witterung, sondern auch in den darauffolgenden Monaten auftreten und behoben werden, wurde die Korrelation nicht auf Monatsbasis sondern über die drei relevanten Monate zusammengefasst. Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen für die Frostschäden zeigen Bild 11 bis Bild 13. Dargestellt sind

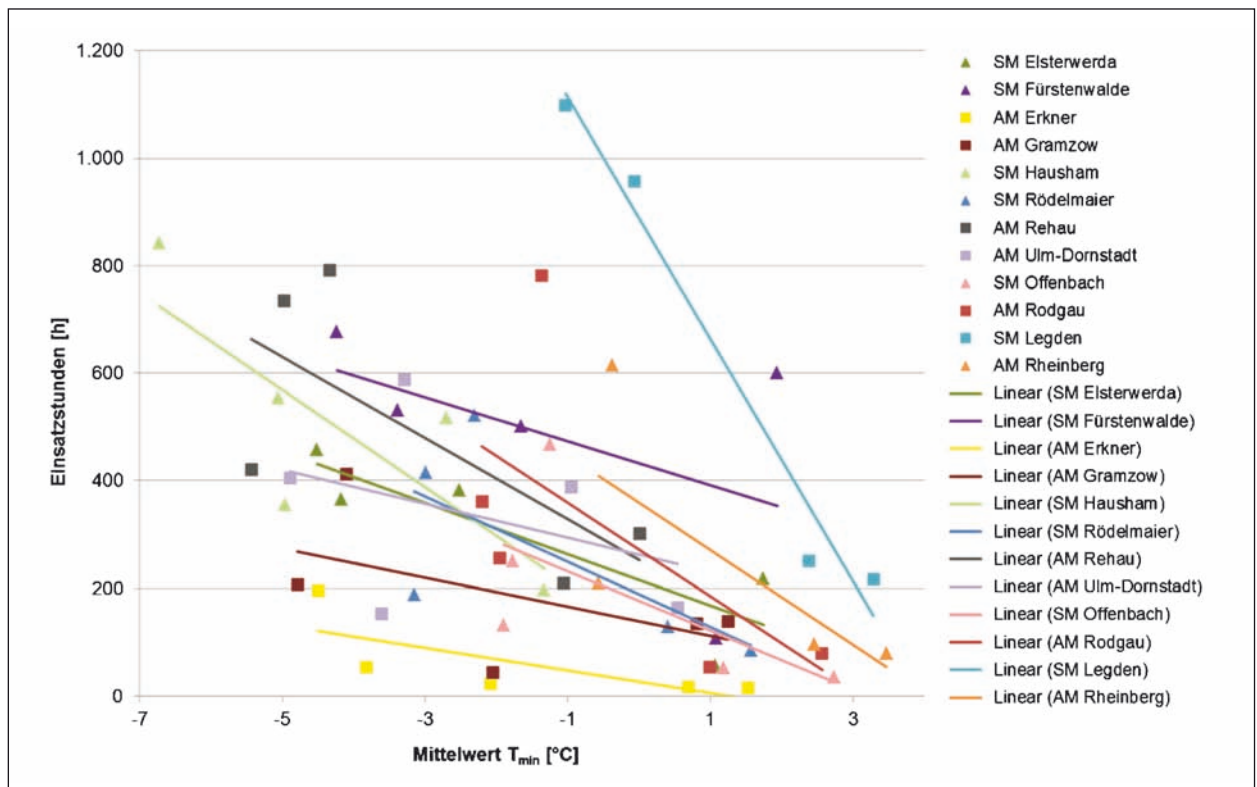


Bild 11: Korrelation der Einsatzstunden der Leistung 01.01 mit dem Mittel des Tagesminimums der Lufttemperatur im Zeitraum Januar bis März

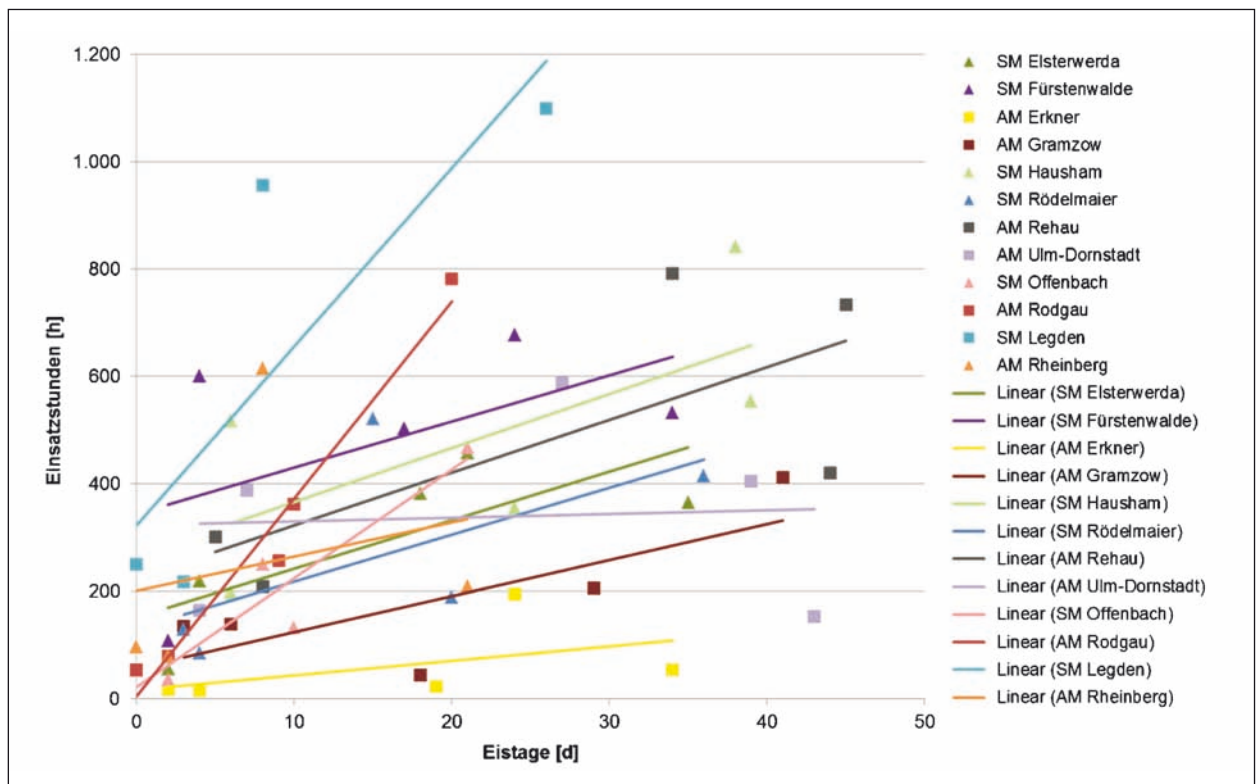


Bild 12: Korrelation der Einsatzstunden der Leistung 01.01 mit der Anzahl der Eistage im Zeitraum Januar bis März

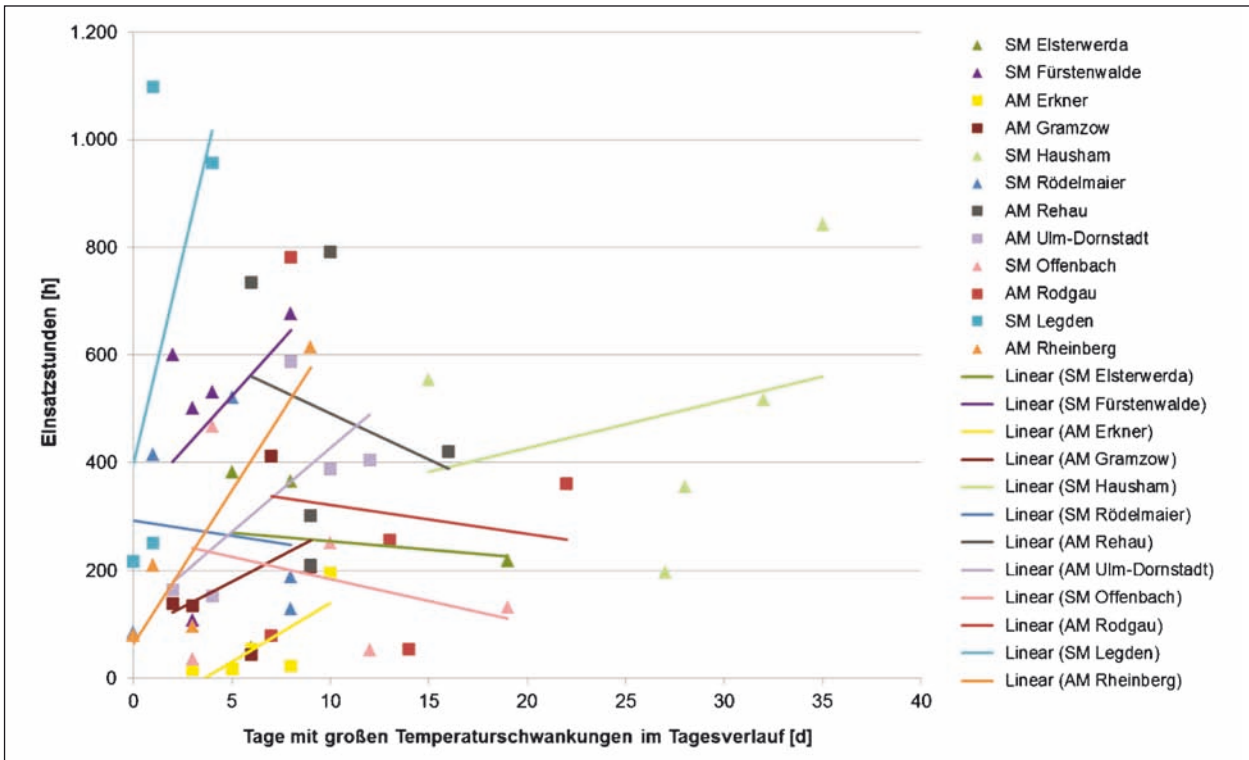


Bild 13: Korrelation der Einsatzstunden der Leistung 01.01 mit der Anzahl der Tage mit großen Temperaturschwankungen im Tagesverlauf im Zeitraum Januar bis März

Meisterei	Korrelationskoeffizient für das Tagesminimum der Lufttemperatur T_{min}	Korrelationskoeffizient für die Anzahl der Eistage
SM Elsterwerda	0,7604	0,5832
SM Fürstenwalde	0,2491	0,3475
AM Erkner	0,5319	0,2311
AM Gramzow	0,2924	0,5913
SM Hausham	0,6371	0,2792
SM Rödelmaier	0,4666	0,3843
AM Rehau	0,5090	0,5392
AM Ulm-Dornstadt	0,1414	0,0044
SM Offenbach	0,4027	0,8817
AM Rodgau	0,3779	0,9693
SM Legden	0,9710	0,7031
AM Rheinberg	0,5096	0,0589
Mittelwert	0,4874	0,4644

Tab. 5: Korrelationskoeffizienten je Meisterei für die linearen Trendfunktionen auf Basis der Klimaparameter „Tagesminimum der Lufttemperatur“ und „Anzahl der Eistage“ im Zeitraum Januar bis März

je Meisterei jeweils die erfassten Einsatzstunden in Abhängigkeit des jeweiligen Klimaparameters sowie der sich für diese Werte ergebende lineare Trend.

Fremdleistungen auf dieser Leistungsposition wurden nur in wenigen Meistereien und auch nur in vernachlässigbarem Umfang verbucht, sodass diese den Leistungsumfang nicht beeinträchtigt haben.

Die Korrelationsanalyse der Frostschäden brachte, wie in den Bildern erkennbar, kein eindeutiges Ergebnis. Der Zusammenhang zwischen den Personeneinsatzstunden im Frühjahr und den untersuchten Klimaparametern für die Schwere des Winters ist sehr gering. Es ist zwar für die Mehrzahl der Meistereien der Trend erkennbar, dass bei geringeren Tagesminima bzw. bei mehr Eistagen auch der Personalaufwand für die Leistung 01.01 höher ist. Jedoch sind beim dritten Parameter, keine eindeutigen Tendenzen zu erkennen.

Auch wenn bei zwei Parametern ein Trend erkennbar ist, so ist zu berücksichtigen, dass die Korrelationen (s. Tabelle 5) nur sehr gering sind und dass somit die jährlichen Personeneinsatzstunden in den Meistereien deutlich vom angenommenen linearen Modell abweichen. Der vermutete lineare Anstieg der Personeneinsatzstunden im Verhältnis zum jeweiligen Klimaparameter ist somit zwar bei zwei Parametern als Trend erkennbar, aufgrund der geringen Korrelationen, sind jedoch keine statistisch abgesicherten Aussagen möglich.

Es ist zwar der Trend erkennbar, dass der Aufwand für die Beseitigung von Schäden an Fahrbahnen umso größer ist, je geringer die Temperaturen im Winter sind, allerdings zeigt die geringe Korrelation, dass die Aufwendungen auf dieser Leistungsposition auch stark von anderen, nicht witterungsabhängigen Einflüssen geprägt werden. Starken Einfluss können z. B. auch der Erhaltungszustand sowie die Dimensionierung des Straßenaufbaus haben. Weiterhin kann die geringe Korrelation auch darauf zurückzuführen sein, dass die Beseitigung der Frostschäden nicht im Rahmen des Betriebsdienstes, sondern als Erhaltungsmaßnahme durchgeführt wird.

Hitzeschäden

1. Mittel des Tagesmaximums der Lufttemperatur von Juni bis August [$^{\circ}\text{C}$]:
Die Entstehung von Schäden an Fahrbahnen wird durch hohe Tagesmaxima der Lufttemperatur begünstigt und ist somit ein Parameter für die Hitze der Sommermonate.
2. Anzahl der Tage mit Tagesmaximum der Lufttemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$ und Sonnenscheindauer $> 6\text{ h}$ von Juni bis August [d]:
Schäden an Fahrbahnen werden generell durch die Kombination von heißen Tagen und gleich-

zeitiger hoher Sonnenscheindauer hervorgerufen, da dann die Fahrbahn am stärksten aufgeheizt. Die Anzahl dieser Tage ist daher ein Indikator für Hitzeschäden.

3. Maximale Andauer der Tage mit Tagesmaximum der Lufttemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$ und Sonnenscheindauer $> 6\text{ h}$ von Juni bis August [d]:
Die Entstehung von Hitzeschäden wird bei länger anhaltenden Hitzeperioden begünstigt. Hitzetage sind wie oben beschrieben Tage mit hoher Lufttemperatur und Sonnenschein. Daher kann auch die maximale Andauer dieser Tage ein Maß für Hitzeschäden sein.

Für die Analyse der Korrelation wurden die Witterungsparameter und die Personeneinsatzstunden des Zeitraums Juni bis August zusammengefasst verglichen, da Aufwendungen infolge von Hitzeschäden wie auch bei den Frostschäden nicht unmittelbar im selben Monat, sondern ggf. auch in den darauffolgenden Monaten behoben werden. Der Umfang der verbuchten Fremdleistungen ist auch in den Sommermonaten nicht relevant.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse der Personaleinsatzstunden von Juni bis August mit den Witterungsparametern, die Hitzeschäden begünstigen, sind in Bild 14 bis Bild 16 dargestellt.

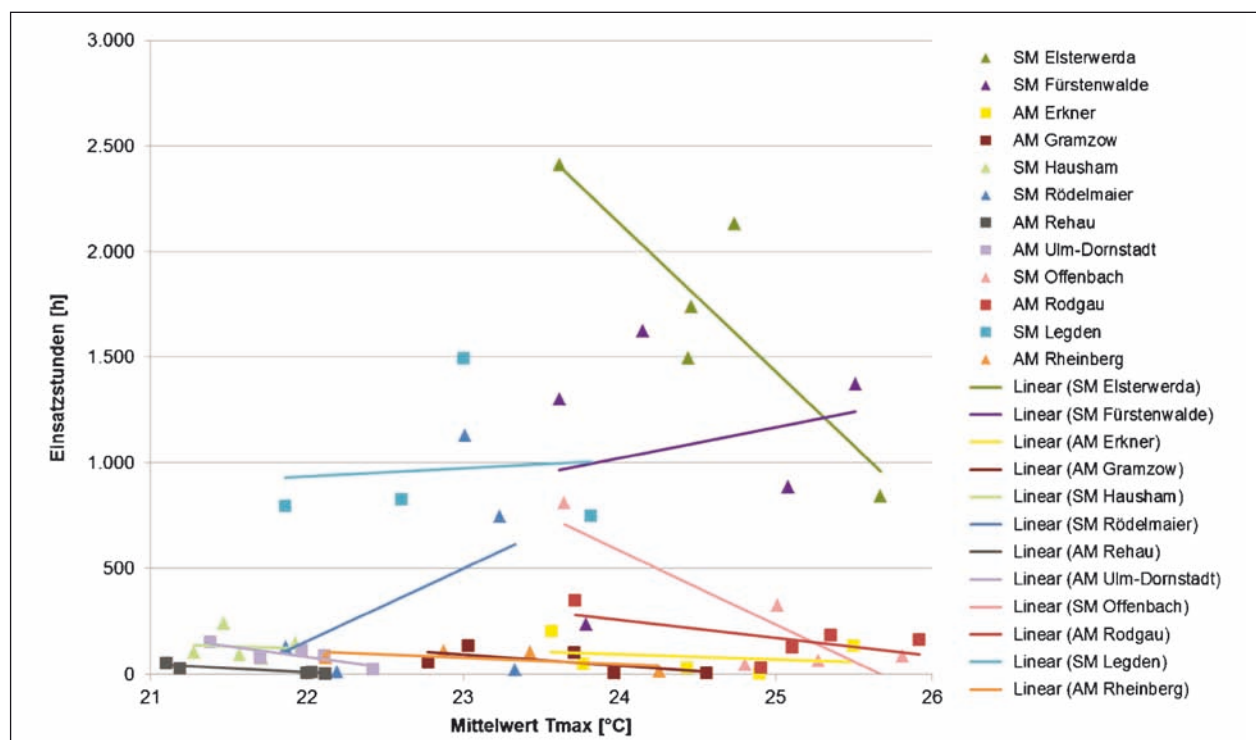


Bild 14: Korrelation der Einsatzstunden der Leistung 01.01 mit dem Mittel des Tagesmaximums der Lufttemperatur im Zeitraum Juni bis August

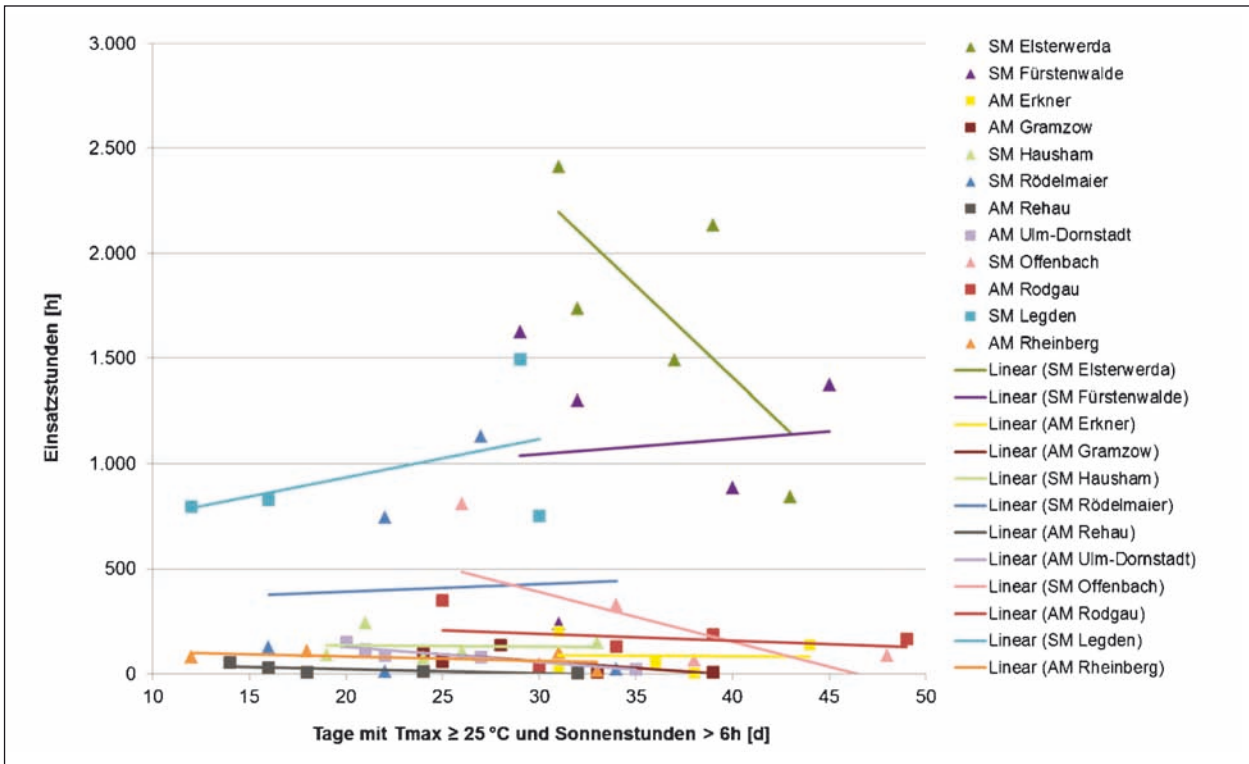


Bild 15: Korrelation der Einsatzstunden der Leistung 01.01 mit der Anzahl der Tage mit Tagesmaximum der Lufttemperatur $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ und Sonnenscheindauer $> 6\text{ h}$ im Zeitraum Juni bis August

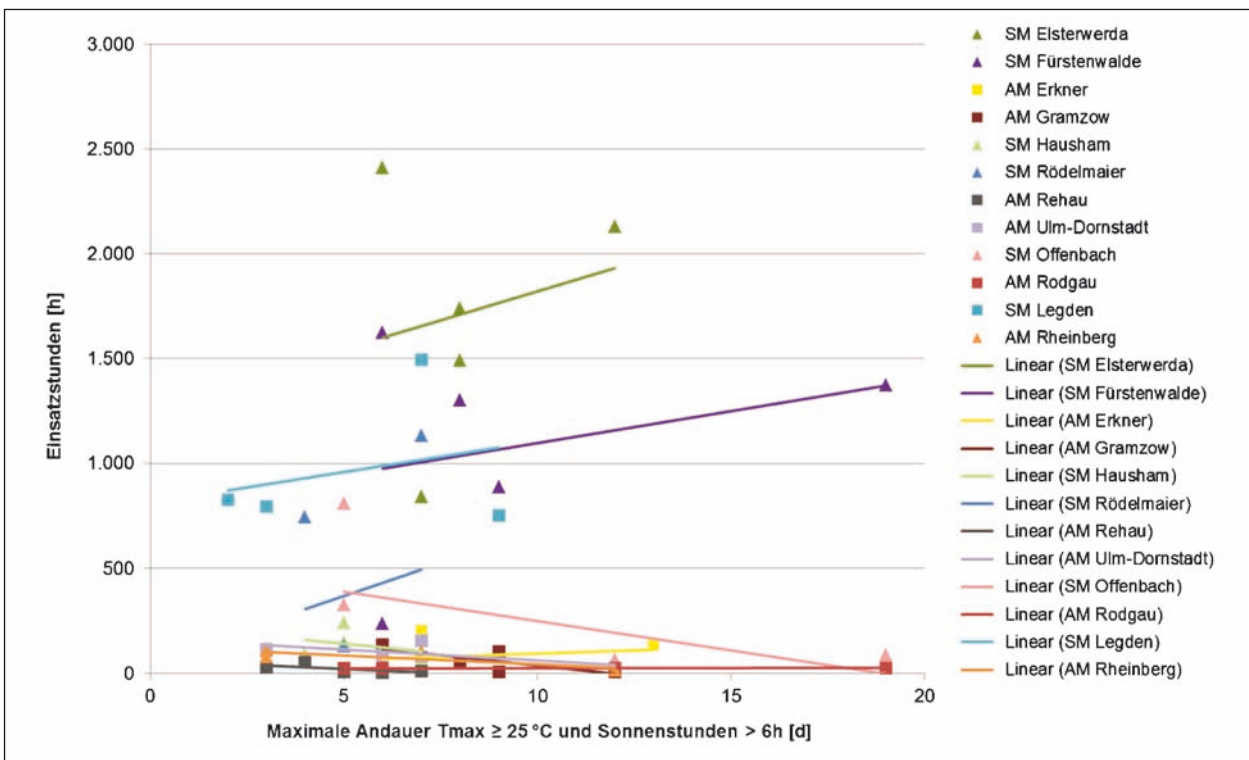


Bild 16: Korrelation der Einsatzstunden der Leistung 01.01 mit der maximalen Andauer der Tage mit Tagesmaximum der Lufttemperatur $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ und Sonnenscheindauer $> 6\text{ h}$ im Zeitraum Juni bis August

Bei allen betrachteten Parametern nimmt der Personalaufwand mit zunehmender Hitze eher ab, was der erwarteten Tendenz widerspricht. Allerdings ist dieser Trend nicht einheitlich. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Korrelation für diesen Trend nur sehr gering ist. Die zum Teil etwas höhere Korrelation bei einzelnen Meistereien ist vor allem bei mehr oder minder konstantem jährlichen Aufwand zu erkennen, was ebenfalls kein Indikator für einen Einfluss der sommerlichen Hitze auf den Personalaufwand darstellt.

Daher lässt sich folgern, dass für die Beseitigung von Fahrbahnschäden im Sommer keine Korrelation zur Ausprägung sommerlicher Hitzeperioden besteht. Dies kann zum einen daran liegen, dass nur wenige typische Hitzeschäden auftreten, die durch den Betriebsdienst sofort beseitigt werden müssen. Zum anderen können die Aufwendungen auf dieser Leistungsposition auch in den Sommermonaten durch andere nicht witterungsbedingte Schäden verursacht werden.

3.3.2 Grünpflege im Intensivbereich

Im Rahmen des FE-Vorhabens wurde nur der Einfluss der Witterung auf die Mäharbeiten im Intensivbereich analysiert, da für diese Leistungen am ehesten eine unmittelbare Korrelation zu vermuten ist, die sich auch auf Jahresbasis in den Aufwandsdaten widerspiegelt. Die anderen, in Kapitel 3.2.2 genannten Einflüsse sind eher singuläre Einzelergebnisse oder aber langjährige Zusammenhänge, die durch andere Einflussgrößen leicht überlagert werden können.

Für die Korrelationsanalyse wurden insgesamt sechs Klimaparameter bzw. Kombinationen aus Klimaparametern untersucht, die als ausschlaggebend für das Pflanzenwachstum erachtet werden können.

1. Jährliche Sonnenscheindauer [h]:
Die Photosynthese von Pflanzen wird generell durch eine hohe Sonneneinstrahlung begünstigt. Fallen allerdings niederschlagsarme Jahre mit einer hohen jährlichen Sonneneinstrahlung zusammen, kann das Pflanzenwachstum auch beeinträchtigt werden.
2. Jährliche Anzahl der Tage mit Tagesmittel der Lufttemperatur $> 10\text{ °C}$ [d]:
Eine hohe Anzahl an Tagen, in der sogenannten großen Vegetationsperiode (siehe Kapitel

3.2.2), ist ein Maß für das jährliche Pflanzenwachstum

3. Jährliche Anzahl der Tage mit Tagessumme des Niederschlags $> 0\text{ mm}$ und Tagesmittel der Lufttemperatur $> 10\text{ °C}$ [d]:
Eine hohe Anzahl an Tagen mit Niederschlag in der großen Vegetationsperiode ist ein Maß für das tatsächliche Pflanzenwachstum (ohne Vegetationsruhen durch Trockenheit) im Jahr.
4. Jährliche Dauer der Vegetationsperiode [d]:
Jährliche Summe von Tagen mit Lufttemperatur $T_{\text{mit}} \geq 5\text{ °C}$ an mindestens 5 aufeinander folgenden Tagen. An diesen Tagen kommt das Pflanzenwachstum nicht zum Erliegen, d. h. je länger die Vegetationsperiode ist, desto größer ist das Pflanzenwachstum.
5. Jährliche Anzahl der Frosttage [d]:
Eine hohe Anzahl an Frosttagen beeinträchtigt das Pflanzenwachstum und verlängert somit die sogenannte Vegetationsruhe (siehe Kapitel 3.2.2.)
6. Jährliche Anzahl der Trockentage [d]:
Tage ohne Niederschlag und Tagesmaximum der Lufttemperatur $> 30\text{ °C}$. Eine hohe Anzahl an Trockentagen beeinträchtigt das Pflanzenwachstum.

Diese genannten Parameter wurden mit den jährlichen Personeneinsatzstunden im Bereich der Grünpflege im Intensivbereich über die Jahre 2006 bis 2010 auf Korrelation untersucht. Für die AM Ulm-Dornstadt sind die erfassten Personeneinsatzstunden zum Großteil nicht repräsentativ, da während des Untersuchungszeitraums Mähgeräte ausgefallen waren, sodass die Grünpflege im Intensivbereich nicht im erforderlichen Umfang durchgeführt werden konnte. In Bild 17 bis Bild 22 werden die Ergebnisse der Korrelationsanalyse je Klimaparameter veranschaulicht.

Wie bei der baulichen Unterhaltung wurden auch für die Grünpflege im Intensivbereich die Fremdleistungskosten betrachtet, um eine Verfälschung der Korrelation ausschließen zu können. Nur bei den Straßenmeistereien Hausham und Rödellaier sowie den Autobahnmeistereien Rehau und Rheinberg sind Fremdleistungen in relevantem Umfang auf die ausgewählten Leistungspositionen gebucht worden (s. Anhang 4). Bis auf die AM Rehau korrelieren die Fremdleistungen mit dem Eigenleistungsanteil, d. h., je höher die Eigenleistung, desto höher

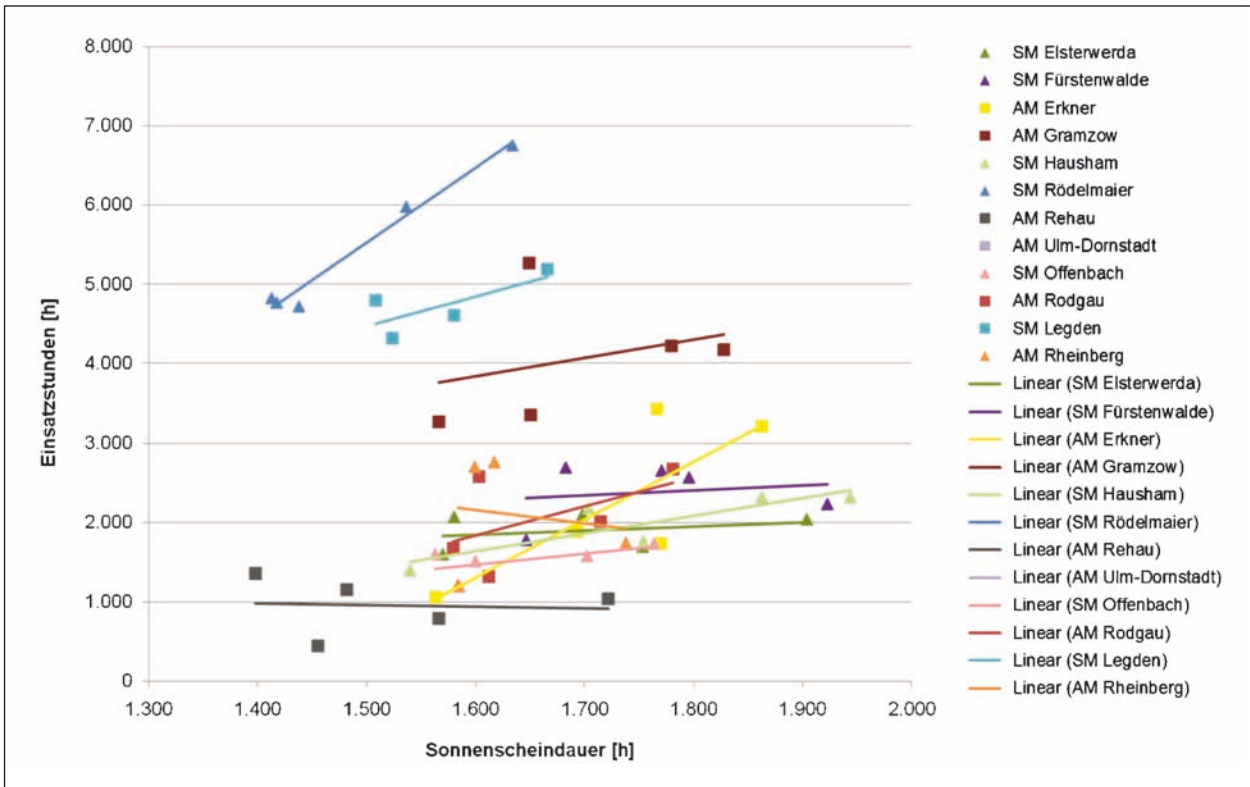


Bild 17: Korrelation der jährlichen Einsatzstunden für die Grünpflege im Intensivbereich mit der jährlichen Sonnenscheindauer

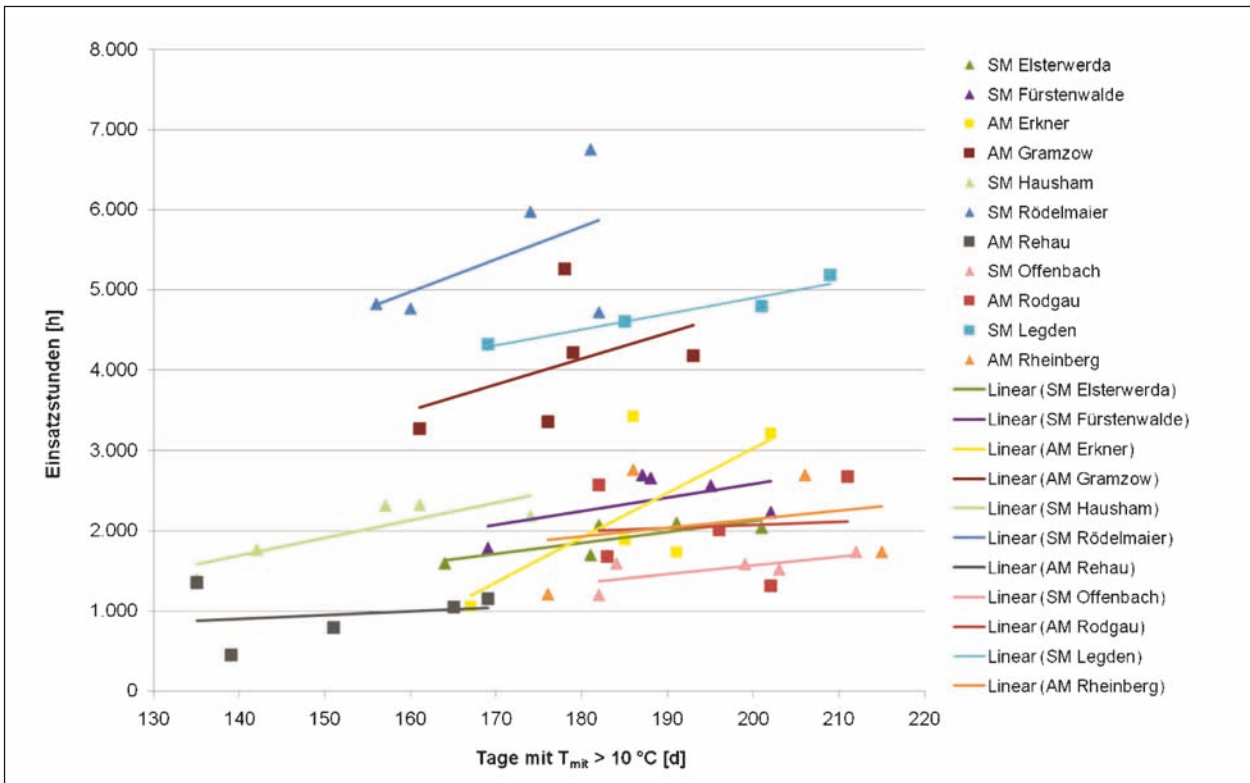


Bild 18: Korrelation der jährlichen Einsatzstunden für die Grünpflege im Intensivbereich mit der jährlichen Anzahl der Tage mit $T_{mit} > 10\text{ °C}$

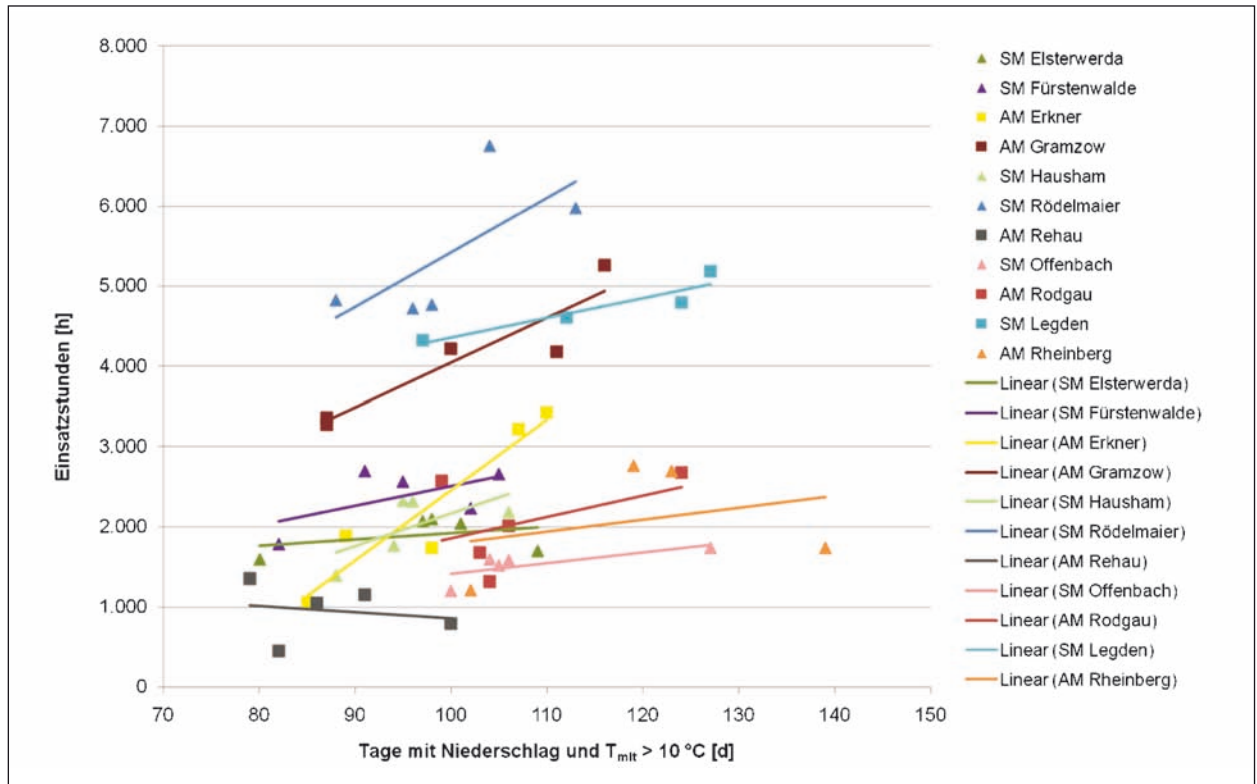


Bild 19: Korrelation der jährlichen Einsatzstunden für die Grünpflege im Intensivbereich mit der jährlichen Anzahl der Tage mit Niederschlag und $T_{mit} > 10\text{ °C}$

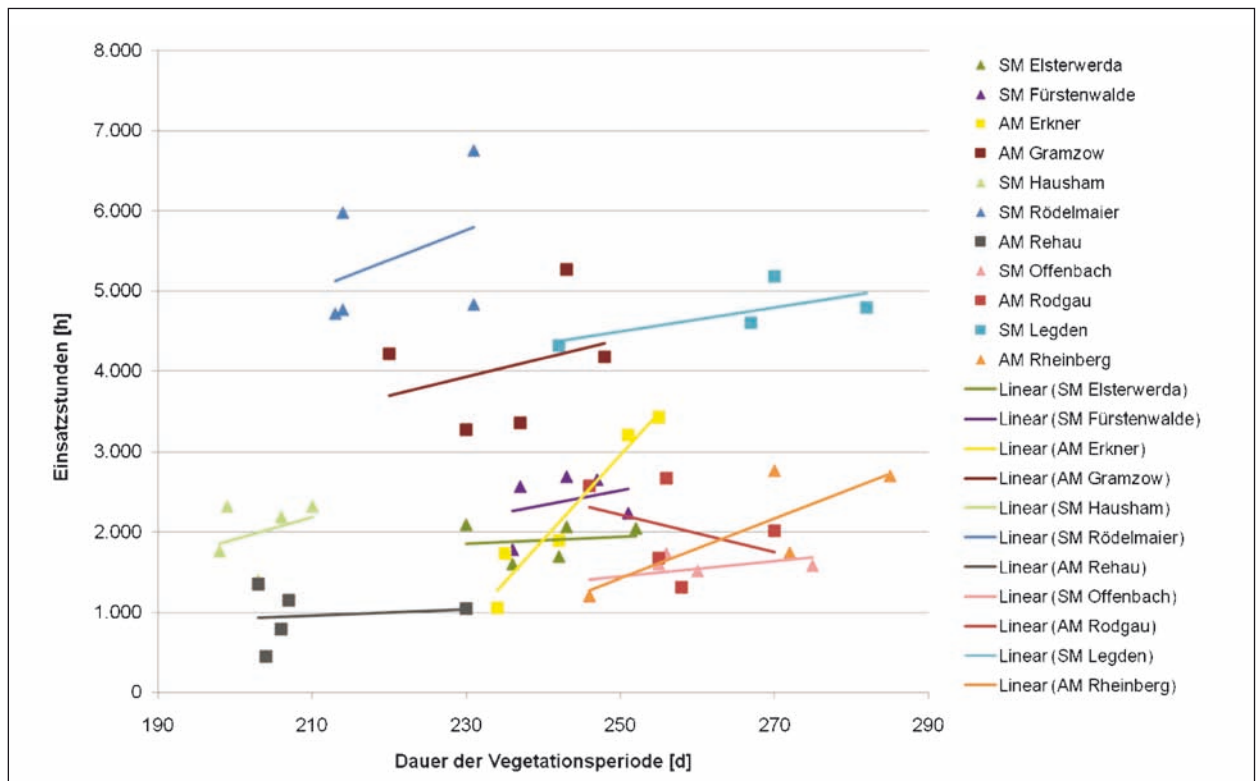


Bild 20: Korrelation der jährlichen Einsatzstunden für die Grünpflege im Intensivbereich mit der jährlichen Dauer der Vegetationsperiode

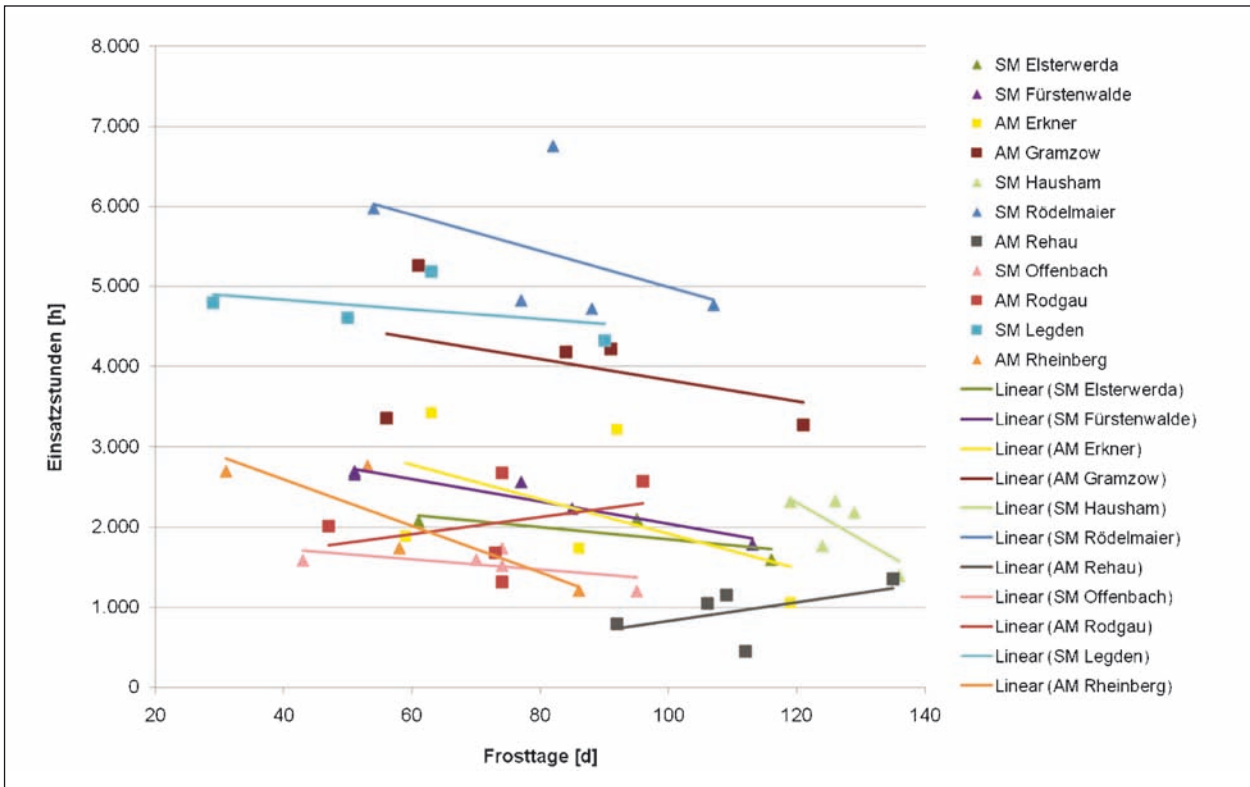


Bild 21: Korrelation der jährlichen Einsatzstunden für die Grasmahd im Intensivbereich mit der jährlichen Anzahl der Frosttage

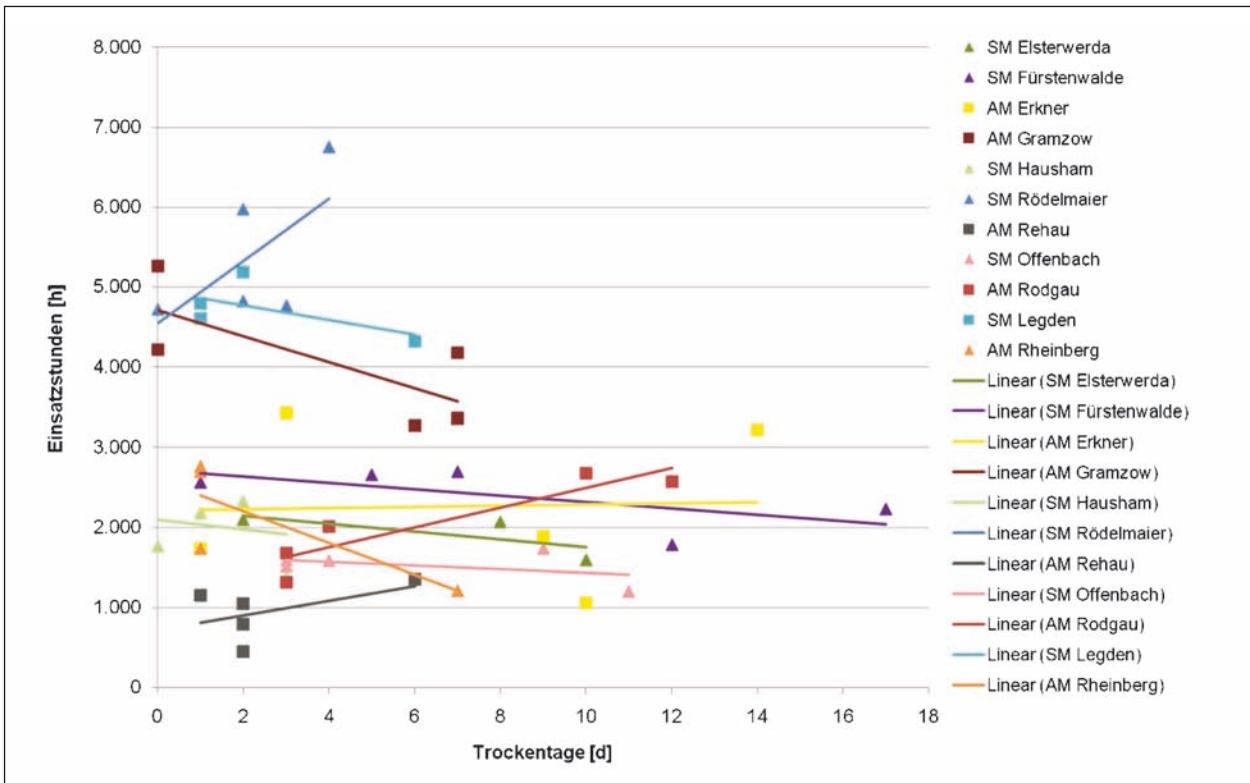


Bild 22: Korrelation der jährlichen Personeneinsatzstunden für die Grünpflege im Intensivbereich mit der jährlichen Anzahl der Trockentage

war auch der Fremdleistungsumfang. Nur in der AM Rehau wurden geringe Eigenleistungen durch höhere Fremdleistungen kompensiert, dies erklärt den zum Teil widersprüchlichen Trend und die geringe Korrelation zwischen den gebuchten Personeneinsatzstunden und den Klimaparametern.

Die Korrelationsanalyse ergab keinen klaren Zusammenhang zwischen den Personeneinsatzstunden und den angesetzten vegetationsbestimmenden Parametern. Zum einen fallen die ermittelten Trends in den Meistereien häufig unterschiedlich aus. Zum anderen weichen auch die jährlichen Werte der Meistereien stark vom angenommenen linearen Zusammenhang zwischen Personeneinsatzstunden und jeweiligem Klimaparameter ab, sodass die Regression nur sehr gering ist. Bei den beiden Klimaparametern „Tage mit $T_{mit} > 10\text{ °C}$ “ sowie „Tage mit Niederschlag und $T_{mit} > 10\text{ °C}$ “ sind die Trends bei allen Meistereien außer der AM Rehau identisch sowie die Korrelationen am höchsten. Umso höher die Anzahl der vegetationsfördernden Tage ist, desto mehr Einsatzstunden wurden für die Grünpflege im Intensivbereich erbracht. Wenn neben der Temperatur auch der Niederschlag als weiterer vegetationsfördernder Parameter betrachtet wird, ist insgesamt zwar eine höhere Korrelation erkennbar, allerdings gibt es auch Meistereien, bei denen die Korrelation dann deutlich geringer ist (s. Tabelle 6). Daher werden beide

Meisterei	Korrelationskoeffizient für die Anzahl der Tage mit $T_{mit} > 10\text{ °C}$	Korrelationskoeffizient für die Anzahl der Tage mit Niederschlag und $T_{mit} > 10\text{ °C}$
SM Elsterwerda	0,6255	0,1221
SM Fürstenwalde	0,3002	0,3475
AM Erkner	0,4830	0,8795
AM Gramzow	0,2070	0,8568
SM Hausham	0,7086	0,4176
SM Rödelmaier	0,2828	0,4839
SM Offenbach	0,4943	0,5341
AM Rodgau	0,0072	0,2011
SM Legden	0,9270	0,8617
AM Rheinberg	0,0644	0,0887
Mittelwert	0,3832	0,4593

Tab. 5: Korrelationskoeffizienten je Meisterei für die linearen Trendfunktionen auf Basis der Klimaparameter „Anzahl der Tage mit $T_{mit} > 10\text{ °C}$ “ sowie „Anzahl der Tage mit $T_{mit} > 10\text{ °C}$ und Niederschlag“

Parameter für die Bewertung der Veränderungen bei der Grünpflege aufgrund des Klimawandels betrachtet.

Aus den vorliegenden Daten ist insgesamt keine signifikante Abhängigkeit des Aufwandes für die Grünpflege im Intensivbereich von der Witterung zu erkennen. Möglicherweise sind die Differenzen in der Witterung in dem betrachteten Zeitraum zu gering, um den Aufwand signifikant, z. B. durch eine zusätzliche Mahd, zu beeinflussen. Möglich ist auch, dass der Mähaufwand in den Meistereien stärker durch andere Parameter, wie die Verfügbarkeit von Personal, Fahrzeugen und Geräten, die Verkehrssituation oder den Umfang anderer Tätigkeiten beeinflusst wird. Weiterhin kann es sein, dass ein stärkeres Wachstum nicht unmittelbar zu einer häufigeren Grasmahd führt, da ggf. auch eine etwas schlechtere Mähqualität in Kauf genommen werden kann.

3.3.3 Winterdienst

Wichtigster Leistungsbereich, für den ein Abhängigkeit des Leistungsumfanges von der Witterung zu vermuten ist, ist der Winterdienst. Im Rahmen des FE-Vorhabens wurden die Einsatzstunden bei Räum- und Streueinsätzen sowie der Salzverbrauch auf ihre Witterungsabhängigkeit untersucht. Für die Korrelationsanalyse wurden vier Klimaparameter definiert, die als ausschlaggebend für den erforderlichen Aufwand im Bereich der Räum und Streueinsätze sowie der notwendigen Salzmenge im Winterdienst anzusehen sind. Die Klimaparameter wurden aus den von BADEL [2011] entwickelten Streuszenarien abgeleitet.

1. Monatssumme der Neuschneehöhe [cm]:
Eine hohe Summe an Neuschnee ist ein Maß für den Aufwand bei Räum- und Streueinsätzen.
2. Monatliche Anzahl der Schneefalltage [d] (Neuschneehöhe $> 0\text{ cm}$):
Eine hohe Anzahl an Tagen mit Schneefall ist ein Maß für den Aufwand bei Räum- und Streueinsätzen.
3. Monatliche Anzahl der Glatteis- oder Eisglättetage [d] (Tagesminimum der Lufttemperatur $\leq 0\text{ °C}$ und Tagessumme des Niederschlags $> 0\text{ mm}$ sowie Neuschneehöhe = 0 cm):
Eine hohe Anzahl an Tagen mit Glatteis oder Eisglätte ist ein Maß für den Aufwand bei Streueinsätzen.

4. Monatliche Anzahl der Reifglättetage [d] (Tagesminimum der Lufttemperatur ≤ 0 °C und Tagessumme des Niederschlags = 0 mm sowie relative Luftfeuchtigkeit > 90 %):

Eine hohe Anzahl an Tagen mit Reifglätte ist ein Maß für den Aufwand bei Streueinsätzen.

Eine Analyse auf der Basis von Tageswerten, ähnlich wie sie durch BADEL [2011] für die Ermittlung des täglichen Streustoffbedarfs durchgeführt wurde, ergab vielfach widersprüchliche Aussagen. Ursache hierfür kann die unterschiedliche Zuordnung der Klimaparameter einerseits sowie der Einsatzstunden und Salzverbräuche andererseits zum jeweiligen Tag sein. Weiterhin können Präventiveinsätze auch bereits am vorherigen Tag erfolgen, Räum- und Streueinsätze sind häufig aber auch noch am Folgetag erforderlich. Auch eine differenzierte Betrachtung der Räum-, Streueinsätze in Korrelation zu den Parametern Neuschneehöhe und Tage mit Schneefall einerseits sowie der reinen Streueinsätze in Korrelation zu den Tagen mit Glatteis, Eisglätte oder Reifglätte andererseits führte häufig zu nicht plausiblen Ergebnissen. Daher werden die Korrelationsanalysen auf Monatsbasis sowie für alle Winterdienstleistungen zusammengefasst durchgeführt.

Räum- und Streueinsätze

Die genannten Parameter wurden mit den angefallenen Personeneinsatzstunden im Bereich der

Räum- und Streueinsätze für die Jahre 2006 bis 2010 auf Korrelationen untersucht. Dafür wurde ein lineares Modell vom Typ

$$\text{Theoretische Einsatzstunden} = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d \cdot x_4 + e$$

angesetzt. Die Variablen x_1 bis x_4 sind die oben angegebenen Witterungsparameter. Für jede Meisterei wurden auf Grundlage der erfassten Einsatzstunden die Parameter a bis e so bestimmt, dass die Summe der Abweichungen zwischen erfassten und theoretischen Einsatzstunden pro Monat minimal ist (Methode der kleinsten Fehlerquadrate) sowie die Gesamtsummen über den Betrachtungszeitraum identisch sind. Somit ergeben sich je Meisterei unterschiedliche Parameter a bis e, sodass unterschiedliche Netzlängen, Netzstrukturen, Einsatzstrategien der Meistereien die Korrelation nicht beeinflussen. In Tabelle 7 sind die Parameter a bis e sowie die Korrelationskoeffizienten je Meisterei zusammengestellt. Im Anhang 5 sind die Ergebnisse der linearen Korrelation als Vergleich von erfassten und theoretischen Einsatzstunden je Monat für jede Meisterei veranschaulicht.

Die Korrelationskoeffizienten zeigen eine sehr hohe Übereinstimmung von erfassten und theoretischen Einsatzstunden (s. Tabelle 7). Daraus lässt sich ableiten, dass zwischen der vorherrschenden Witterung und dem Aufwand in Bereich der Räum- und Streueinsätze ein unmittelbarer Zusammenhang besteht.

Meisterei	a [h/cm] Einsatz-h/ Neuschneehöhe	b [h/d] Einsatz-h/ Schneefalltag	c [h/d] Einsatz-h/ Glatteis- oder Eisglättetag	d [h/d] Einsatz-h/ Reifglättetag	e [h/Mon] Einsatz-h/ fix	Korrelations- koeffizient
SM Elsterwerda	0,00	100,63	17,06	17,06	32,58	0,9377
SM Fürstenwalde	21,56	5,63	24,87	16,56	0,00	0,9302
AM Erkner	8,99	106,17	24,31	24,31	0,00	0,9281
AM Gramzow	0,00	114,18	20,06	20,06	15,58	0,9463
SM Hausham	1,60	30,60	31,54	31,54	62,23	0,8343
SM Rödelmaier	17,78	55,55	43,75	43,75	35,02	0,9435
AM Rehau	8,07	80,83	44,00	27,02	25,78	0,9219
AM Ulm-Dornstadt	6,99	84,63	13,32	13,32	0,00	0,8373
SM Offenbach	7,97	61,86	14,15	14,15	103,46	0,8814
AM Rodgau	17,64	144,50	13,42	13,42	199,32	0,8661
SM Legden	50,03	0,00	22,54	22,54	0,00	0,9780
AM Rheinberg	0,00	98,81	36,91	36,91	0,00	0,9197
Mittelwert	11,72	73,62	25,50	23,39	39,50	0,9104

Tab. 7: Theoretische Einsatzstunden im Winterdienst je Klimaparameter sowie Korrelationskoeffizienten je Meisterei

Auffallend ist jedoch, dass der Einfluss der einzelnen Witterungsparameter auf die Personaleinsatzstunden in den Meistereien sehr unterschiedlich ist. Beispielsweise hat die Neuschneehöhe in zwei Meistereien in Brandenburg keinen Einfluss, dort ist die Abhängigkeit von den Schneetagen höher. In den Meistereien in Hessen ist der Einfluss des witterungsunabhängigen Basisparameters e relativ hoch, dieser ist ein Maß für Einsatzstunden, die nicht unmittelbar durch die anderen Parameter erfasst werden. Auch ist der Aufwand bei Glatteis- oder Eisglättetagen und Reifglättetagen in den Meistereien unterschiedlich gewichtet: Zum Teil sind die Einsatzstunden gleich, zum Teil ist der Aufwand für Glatteis- oder Eisglättetage höher. Ein höherer Aufwand bei Reifglätte- als bei Glatteis- oder Eisglättetagen wurde im Rahmen der linearen Regressionsrechnung über eine vorgegebene Nebenbedingung ausgeschlossen.

Aufgrund dieser Korrelationsergebnisse wurde in einem weiteren Schritt eine Korrelation über alle Meistereien durchgeführt, bei der für alle Meistereien das Verhältnis der Parameter a bis e zueinander identisch ist. Grundlage dieses Ansatzes ist die Überlegung, dass die Meistereienabhängigkeit des Aufwandes infolge Netzgröße, -struktur etc. bei allen Einsatzarten identisch ist. Hierdurch konnte die Korrelation aber nicht verbessert werden, sondern wurde deutlich geringer, sodass sich daraus ableiten lässt, dass der Einfluss der Witterungsparameter auf die Einsatzstunden

meistereispezifisch und abhängig von der Einsatzart ist.

Des Weiteren wurden, wie auch schon bei der baulichen Unterhaltung und bei der Grünpflege, die gebuchten Fremdleistungen im Bereich der Räum- und Streueinsätze betrachtet. Daten zu Fremdleistungen im bedeutsamen Umfang liegen von den Straßenmeistereien Hausham, Rödelmaier und Legden sowie der Autobahnmeisterei Rehau vor. Allerdings korreliert dort der Umfang der Fremdleistungen mit dem erfassten Personalaufwand, sodass der Einfluss der Witterung auf die Fremdleistung nicht verfälscht wird (siehe Anhang 6).

Salzverbrauch

Dieselbe Systematik wie bei den Einsatzstunden wurde auch angewendet, um den Einfluss des Klimawandels auf den Salzverbrauch abschätzen zu können. Die vier ausgewählten Klimaparameter Neuschneehöhe, Schneefalltag, Glatteis- oder Eisglättetag sowie Reifglättetag wurden ebenfalls mit den erfassten Salzverbräuchen auf Monatsbasis für die Jahre 2006 bis 2010 auf Korrelationen untersucht. Dafür wurde das gleiche lineare Modell wie zur Ermittlung der theoretischen Einsatzstunden angewendet, allerdings wurden andere Parameter a bis e auf Grundlage der erfassten Salzverbräuche bestimmt. Die für jede Meisterei berechneten Parameter a bis e sowie die Korrelationskoeffizienten sind in Tabelle 8 aufgelistet. Im Anhang 5 sind die

Meisterei	a [t/cm] Verbrauch-t/ Neuschnee- höhe	b [t/d] Verbrauch-t/ Schneefalltag	c [t/d] Verbrauch-t/ Glatteis- oder Eisglättetag	d [t/d] Verbrauch-t/ Reifglättetag	e [t/Mon] Verbrauch-t/ fix	Korrelations- koeffizient
SM Elsterwerda	4,02	32,31	1,87	1,87	0,00	0,9628
SM Fürstenwalde	5,78	10,45	13,66	13,66	0,00	0,6829
AM Erkner	17,31	34,30	18,02	13,18	0,00	0,9681
AM Gramzow	7,05	43,52	10,57	1,58	2,06	0,9551
SM Hausham	6,66	67,99	0,00	0,00	0,00	0,8486
SM Rödelmaier	28,07	38,10	55,57	55,57	0,00	0,9167
AM Rehau	9,12	121,04	4,39	0,00	0,00	0,9458
AM Ulm-Dornstadt	27,57	82,75	0,00	0,00	0,00	0,8039
SM Offenbach	17,55	33,50	4,27	4,27	0,00	0,9374
AM Rodgau	6,26	126,91	0,00	0,00	108,43	0,7648
SM Legden	22,81	21,61	32,93	32,93	0,52	0,9320
AM Rheinberg	35,84	0,00	27,66	27,66	0,00	0,9400
Mittelwert	15,67	51,04	14,08	12,56	9,25	0,8882

Tab. 8: Theoretische Salzverbräuche je Klimaparameter sowie Korrelationskoeffizienten je Meisterei

Ergebnisse der linearen Korrelation als Vergleich von theoretischen und erfassten Verbräuchen je Monat für jede Meisterei veranschaulicht.

Die Korrelationskoeffizienten der theoretischen und erfassten Verbräuche zeigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Witterung und dem Salzverbrauch (s. Tabelle 8). Die SM Fürstenwalde sowie die AM Rodgau sind die einzigen Meistereien, bei denen nur relativ geringe Korrelationskoeffizienten von 0,6829 und 0,7648 erreicht wurden.

Wie auch schon bei den Personeneinsatzstunden ist der Einfluss der einzelnen Witterungsparameter auf den Salzverbrauch in den jeweiligen Meistereien unterschiedlich. Auffallend ist, dass beispielsweise bei den beiden Meistereien in Brandenburg die Neuschneehöhe zwar bei den Personeneinsatzstunden keinen Einfluss hat, jedoch die Abhängigkeit bei den Salzverbräuchen vorhanden ist. Bis auf die AM Rodgau ist der Einfluss des witterungsunabhängigen Basisparameters e relativ gering. Der spezifische Verbrauch bei Glatteis- oder Eisglätte- und Reifglättetagen in der SM Rödelmaier ist deutlich höher als in den anderen Meistereien.

Zusammenfassend wird deutlich, dass sowohl die Einsatzstunden als auch der Salzverbrauch mithilfe der linearen Modelle aus den erfassten Witterungsparametern auf Monatsbasis abgeleitet werden können. Somit ist es möglich, bei Projektion dieser Witterungsparameter den Einfluss des Klimawandels auf diese beiden wesentlichen Kenngrößen des Winterdienstes abzuschätzen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich aus den für die linearen Modelle ermittelten Korrelationskoeffizienten keine Aussagesicherheiten im mathematischen Sinne ableiten lassen, da die Eingangsgrößen Neuschneehöhe und Anzahl Schneefalltage nicht unabhängig voneinander sind.

4 Klimaprojektionen bis 2080

4.1 Modell- und Szenarienauswahl zur Szenarienbildung für die Klimaprojektionen

Für dieses Forschungsvorhaben wurde das regionale statistische Klimamodell STARS (Statistical Analogue Resampling Scheme) ausgewählt. Dieses erzeugt fundierte, räumlich wie zeitlich hoch aufgelöste Abschätzungen regionaler Klimaentwicklungen. Eine wichtige Besonderheit des Ver-

fahrens ist, dass die Simulationsreihen lediglich durch ein vorgegebenes lineares Temperaturregime (etwa Mittelwert und Zunahme über die Simulationsperiode) beschränkt werden. Die Simulationsreihen werden dabei aus vergangenen Beobachtungen der Beobachtungsperiode zusammengesetzt, und zwar so, dass die Neuaneinanderreihung der Beobachtungen eine Temperaturreihe ergibt, die dem vorgegebenen Temperaturregime (Trend) entspricht. Da die Beobachtungen außer der Temperatur auch alle anderen erfassten Messgrößen (Niederschlag usw.) enthalten und diese bei der Neuaneinanderreihung mitgeführt werden, enthalten die Simulationsreihen (Realisierungen) alle beobachteten Messgrößen in physikalisch konsistenten Kombinationen. Das gleiche gilt für die Konsistenz der räumlichen Verteilungen, da die Reihenfolge der Neuaneinanderreihung an allen Stationen die gleiche ist. Heuristische Kriterien stellen außerdem sicher, dass die Simulationsreihen realistische Jahresgänge und Erhaltungsneigungen aufweisen. Stochastische Elemente des Verfahrens ermöglichen die Erzeugung ganzer Simulationsensembles, wodurch die Bandbreite möglicher Klimaentwicklungen zu dem vorgegebenen Temperaturregime untersucht werden kann.

Das Strukturschema für das Modell ist in Bild 23 dokumentiert. Verschiedene Prüfverfahren zeigen, dass das Modell sehr gut in der Lage ist, die beobachtete Klimatologie einer Region zu reproduzieren. Die Übereinstimmung beschränkt sich dabei nicht auf einfache Statistiken wie langjährige Mittel, sondern schließt Extremereignisse (z. B. Starkniederschläge) ebenso wie Andauerereignisse (Hitzeperioden) ein. Der Vergleich mit einem ähnlichen Experiment eines dynamischen Modells zeigt, dass der statistische Ansatz eine erheblich bessere Übereinstimmung mit den Beobachtungen erbringt [ORLOWSKY et al. 2008]. Durch seine Konstruktion und eine effiziente Programmierung erlaubt dieses Verfahren, schnell zu hoch aufgelösten Abschätzungen regionaler Klimaentwicklungen zu gelangen, die als fundierter Ausgangspunkt für Klimafolgeuntersuchungen dienen können. Eine genaue Modellbeschreibung findet sich u. a. bei WERNER/GERSTENGARBE [1997] und ORLOWSKY et al. [2008].

Im Strukturplan in Bild 23 wird die Vorgehensweise des statistischen Ansatzes zur regionalen Klimamodellierung schematisch skizziert. Ausgehend von meteorologischen Beobachtungsreihen, z. B. DWD Klimastationen, mit täglicher Auflösung werden

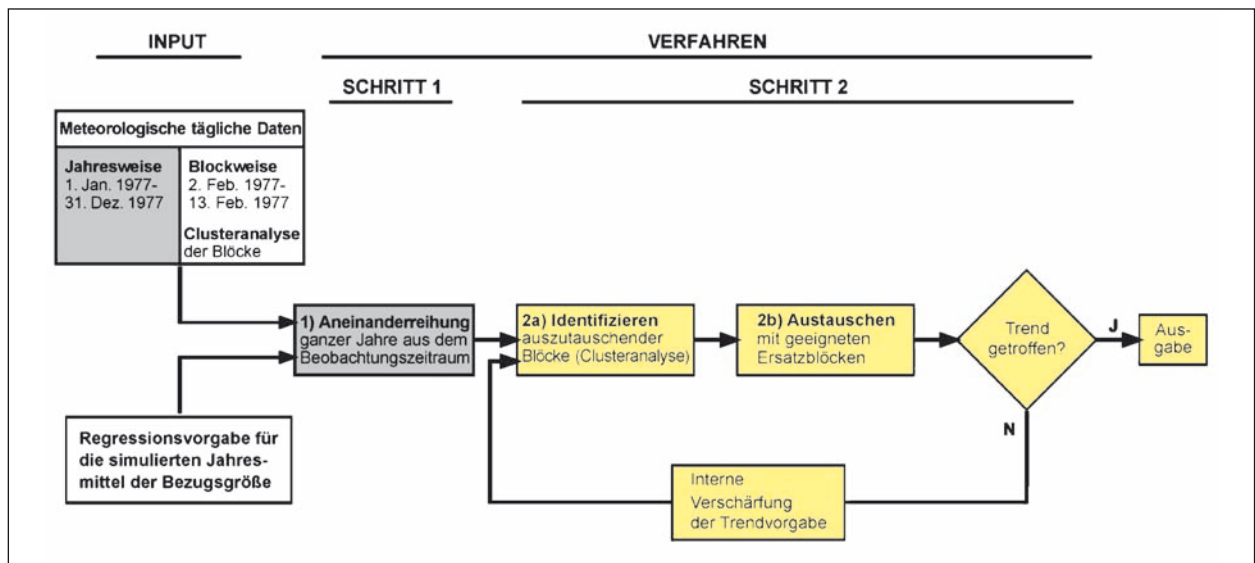


Bild 23: Strukturplan für das statistische Regionalmodell STARS [PIK Copyright 2013]

Langzeitmittel der Temperatur (T_{mit}) für jeden verfügbaren Stationsgitterpunkt ermittelt und einer räumlichen Clusteranalyse unterworfen. Diese hat das Ziel Daten zu reduzieren und die repräsentativen Stationen jeder Clusterklasse zu ermitteln, an denen die systematische Neusortierung der jeweiligen Beobachtungsreihe vorgenommen wird. Für Deutschland erwiesen sich fünf Referenzstationen als vollkommen ausreichend, um die einzelnen regionalen Temperaturregime abzubilden.

Für die Projektion der Beobachtungen in die Zukunft (bis 2100) wird an jedem dieser repräsentativen Gitterpunkte der lineare Temperaturtrend aus den globalen Klimamodellen vorgegeben. Die Auswahl bzgl. des zugrunde gelegten Szenarios sowie des verwendeten Globalmodells entspricht in etwa der mittleren Ausprägung des Hochemissionsszenarios RCP8.5.

Die jeweiligen Zeitreihen der Jahresmittelwerte der Temperatur aus der Vergangenheit (1951-2010) werden nun im 1. Schritt so umsortiert, dass sie dem neuen Temperaturtrend (2006-2100) in erster Näherung entsprechen. Zur Optimierung erfolgt im 2. Schritt ein Austausch von Blöcken der Länge von 12 Tagen. Für die Ersetzung kommen nur die Blöcke infrage, die sich um den gleichen Tag des Jahres herum (± 20 Tage) befinden. Aus welchem Jahr der neue Block gezogen wird, ist dabei unbedeutend. Am Ende werden jedem Simulationstag der Zukunft die Werte eines entsprechenden Datums der Vergangenheit zugeordnet. Je mehr repräsentative Stationen berücksichtigt werden müssen, desto schwieriger ist es, einen neusortierten Daten-

ersatz zu erhalten. Alle übrigen Stationen werden entsprechend der ermittelten Datumszuordnung umsortiert. Bei der Neuordnung werden auch die übrigen Klimaparameter mitgeführt. Unter Vorgabe einer Toleranz ist es mit diesem statistischen Verfahren möglich, eine Vielzahl von möglichen Realisierungen zu generieren. Man erhält schließlich ein Ensemble von Simulationen, welches eine mögliche Projektion für die Zukunft darstellt. Statistische Aussagen zu Bandbreiten und Unsicherheiten können daraus abgeleitet werden.

Das Modell ist prinzipiell in der Lage, für jedes Szenarium beliebig viele Realisierungen zu berechnen. Dabei versteht man unter einer Realisierung die Berechnung eines Szenarienlaufs. Sollen für ein Szenarium mehrere Realisierungen berechnet werden, wird die Abfolge der Daten über eine Monte-Carlo-Simulation variiert, ohne dass dabei die Vorgaben verändert werden. Auf diese Art und Weise erhält man beliebig viele zufällig erzeugte Realisierungen für das vorgegebene Szenarium. Damit ist es möglich, Aussagen zur Schwankungsbreite der durch das Modell erzeugten Ergebnisse zu machen.

4.2 Projektion der für den Straßenbetriebsdienst relevanten Klimaparameter

Als Klimaprojektionen wurden die mit dem STARS-Modell bis in das Jahr 2080 auf Tageswertbasis berechneten 100 Realisierungen des RCP8.5-Szenarios verwendet. Der angegebene Temperatur-

trend beträgt 4 °K bis 2100. Als Ist-Klima wurde die 20-jährige Beobachtungsperiode 1991 bis 2010 verwendet, und die Klimaprojektionen mit drei 20-jährigen Zeitperioden 2011 bis 2030, 2031 bis 2050 und 2061 bis 2080 im Vergleich zu dem Zeitraum 1991 bis 2010 ausgewertet.

(Primärparameter X) auf der Basis der den Meistereien zugeordneten Stationen (siehe Anhang 3) folgendermaßen berechnet:

$$EX_{k, iy, im, id, i} = \sum_{s=1}^{NS_k} X_{s, iy, im, id, i} / NS_k$$

mit

EX Tagesmittelwert für Parameter X

X Primärparameter X

i Parameternummer

k Meistereinummer (von 1 bis 12)

s Stationsnummer

iy, im, id Datum (Jahr, Monat, Tag)

NS_k Anzahl der Stationen innerhalb der Meisterei

Aus den gemittelten primären meteorologischen Parametern wurden die in Kapitel 3.3 benannten sekundären Parameter (Y) für die einzelnen Meistereien berechnet.

Für diese Parameter wurden für die 20-jährige Perioden

- 1991 bis 2010 (Beobachtungen),
- 2011 bis 2030; 2031 bis 2050 und 2061 bis 2080 (jeweils 100 Realisierungen für RCP8.5),

die Mittelwerte wie folgt berechnet:

$$EY_{k, i, ir, j} = \sum_{iy=1}^{20} \sum_{n=1}^{NP} Y_{k, i, ir, j, iy, n} / NP / 20$$

mit

EY Periodenmittelwert für Parameter Y

Y Sekundärparameter Y

j Periodenummer

(1 = 1991 bis 2010, 2 = 2011 bis 2030,

3 = 2031 bis 2050, 4 = 2061 bis 2080)

iy Jahresnummer innerhalb der 20-jährigen Zeitperiode j

NP Länge der analysierenden Saison innerhalb des Jahres

ir Nummer der Realisierung (von 1 bis 100)

Um die Unsicherheit des statistischen Modells abzuschätzen, wurden die Streuungen der 100 Realisierungen für die drei zukünftigen Zeitperioden mit diesem Ansatz berechnet:

$$S_{k, i, j} = \sqrt{\sum_{ir=1,100} (EY_{k, i, j, ir} - \overline{EY_{k, i, j}})^2 / 100}$$

mit

$\overline{EY_{k, i, j}}$ Mittelwert aus 100 Realisierungen für die entsprechende Periode j

$EY_{k, i, j, ir}$ Periodenmittelwert für Sekundärparameter Y der Realisierung ir

$S_{k, i, j}$ Standardabweichung

Die Streuungen wurden verwendet, um die Signifikanz der Änderungen der drei Projektionen gegenüber dem Ist-Klima abzuschätzen. Unter der Annahme, dass die 20-jährigen Mittelwerte der einzelnen Realisierungen normal verteilt sind, liegen im Bereich ± 1 Sigma 68 % der Mittelwerte und im Bereich ± 2 Sigma 95 % der Mittelwerte.

Liegen die Differenzen zwischen dem Mittelwert der Periode „EY“ und dem Mittelwert der Periode 1991 bis 2010 innerhalb des Bereiches ± 1 Sigma, kann man die Änderungen als nicht signifikant definieren. Liegen die Änderungen außerhalb der ± 1 -Sigma-Schwelle sind diese als signifikant anzunehmen, oberhalb der ± 2 -Sigma-Schwelle als sehr signifikant.

Der Schwerpunkt der Analyse der zukünftigen Klimaverhältnisse wurde auf die ersten zwei Zeitperioden 2011 bis 2030 und 2031 bis 2050 gelegt weil die Unsicherheit der Szenarienergebnisse mit zunehmender Entfernung vom Ist-Zustand deutlich zunimmt. Die Periode 2061 bis 2080 wurde nur sporadisch in die Auswertung einbezogen. Generell wurden die Mittelwerte der 12 Meistereien analysiert und nur in besonderen Fällen die Werte der einzelnen Meistereien betrachtet.

In Tabelle 9 bis Tabelle 14 sind der gegenwärtige Klimazustand und die zukünftigen Änderungen der drei wichtigsten sekundären Klimaparameter: T_{max} , T_{min} und Niederschlag, für den Winterzeitraum (Dezember bis Februar) und den Sommerzeitraum (Juni bis August) dargestellt.

Meisterei	Absolute Werte [°C]							Differenz zu 1991 bis 2010 [K]		
	1991 bis 2010	2011 bis 2030		2031 bis 2050		2061 bis 2080		2011 bis 2030	2031 bis 2050	2061 bis 2080
		Wert	σ	Wert	σ	Wert	σ			
SM Elsterwerda	3,9	4,1	0,4	5,6	0,4	7,3	0,3	0,2	1,7	3,4
SM Fürstenwalde	3,4	3,5	0,3	5,0	0,4	6,7	0,3	0,1	1,6	3,3
AM Erkner	3,5	3,6	0,3	5,1	0,4	6,8	0,3	0,1	1,6	3,3
AM Gramzow	3,1	3,2	0,3	4,6	0,4	6,2	0,3	0,1	1,5	3,1
SM Hausham	3,6	4,1	0,3	5,4	0,3	7,2	0,3	0,5	1,8	3,6
SM Rödelmaier	3,2	3,1	0,3	4,5	0,4	6,2	0,3	-0,1	1,3	3,0
AM Rehau	2,0	2,1	0,3	3,5	0,4	5,2	0,3	0,1	1,5	3,2
AM Ulm-Dornstadt	2,5	2,5	0,3	4,0	0,4	5,8	0,3	0,0	1,5	3,3
SM Offenbach	5,3	5,3	0,3	6,7	0,4	8,4	0,3	0,0	1,4	3,1
AM Rodgau	5,3	5,3	0,3	6,7	0,4	8,4	0,3	0,0	1,4	3,1
SM Legden	5,3	5,6	0,3	6,8	0,3	8,3	0,3	0,3	1,5	3,0
AM Rheinberg	5,8	6,1	0,3	7,3	0,3	8,8	0,3	0,3	1,5	3,0
Mittelwert	3,9	4,0	0,3	5,4	0,4	7,1	0,3	0,1	1,5	3,2

Tab. 9: Tagesmaximum der Lufttemperatur im Winter, 20-jährige Mittelwerte und Differenzen gegenüber 1991 bis 2010

Meisterei	Absolute Werte [°C]							Differenz zu 1991 bis 2010 [K]		
	1991 bis 2010	2011 bis 2030		2031 bis 2050		2061 bis 2080		2011 bis 2030	2031 bis 2050	2061 bis 2080
		Wert	σ	Wert	σ	Wert	σ			
SM Elsterwerda	-2,0	-1,7	0,4	-0,3	0,4	1,1	0,3	0,3	1,7	3,1
SM Fürstenwalde	-1,9	-1,6	0,3	-0,3	0,4	1,1	0,3	0,3	1,6	3,0
AM Erkner	-2,1	-1,9	0,3	-0,6	0,4	0,8	0,3	0,2	1,5	2,9
AM Gramzow	-1,9	-1,8	0,4	-0,4	0,4	0,9	0,3	0,1	1,5	2,8
SM Hausham	-4,1	-3,9	0,3	-2,6	0,3	-1,3	0,3	0,2	1,5	2,8
SM Rödelmaier	-2,7	-2,4	0,3	-1,1	0,4	0,2	0,3	0,3	1,6	2,9
AM Rehau	-3,2	-3,0	0,3	-1,7	0,4	-0,2	0,3	0,2	1,5	3,0
AM Ulm-Dornstadt	-3,0	-2,8	0,3	-1,5	0,3	-0,1	0,3	0,2	1,5	2,9
SM Offenbach	-0,4	0,0	0,3	1,2	0,3	2,5	0,3	0,4	1,6	2,9
AM Rodgau	-0,5	-0,1	0,3	1,2	0,3	2,5	0,3	0,4	1,7	3,0
SM Legden	0,4	0,7	0,3	1,9	0,3	3,1	0,3	0,3	1,5	2,7
AM Rheinberg	0,8	1,0	0,3	2,2	0,3	3,4	0,2	0,2	1,4	2,6
Mittelwert	-1,7	-1,5	0,3	-0,2	0,4	1,2	0,3	0,2	1,5	2,9

Tab. 10: Tagesminimum der Lufttemperatur im Winter, 20-jährige Mittelwerte und Differenzen gegenüber 1991 bis 2010

Meisterei	Absolute Werte [mm]							Differenz zu 1991 bis 2010 [mm]		
	1991 bis 2010	2011 bis 2030		2031 bis 2050		2061 bis 2080		2011 bis 2030	2031 bis 2050	2061 bis 2080
		Wert	σ	Wert	σ	Wert	σ			
SM Elsterwerda	1,4	1,5	0,1	1,6	0,1	1,8	0,1	0,1	0,2	0,4
SM Fürstenwalde	1,4	1,5	0,1	1,7	0,1	1,8	0,1	0,1	0,3	0,4
AM Erkner	1,4	1,6	0,1	1,7	0,1	1,9	0,1	0,2	0,3	0,5
AM Gramzow	1,2	1,3	0,1	1,5	0,1	1,6	0,1	0,1	0,3	0,4
SM Hausham	3,5	4,0	0,2	4,1	0,2	4,2	0,3	0,5	0,6	0,7
SM Rödelmaier	2,3	2,4	0,1	2,6	0,2	2,9	0,2	0,1	0,3	0,6
AM Rehau	1,9	2,1	0,1	2,2	0,1	2,4	0,1	0,2	0,3	0,5
AM Ulm-Dornstadt	2,1	2,2	0,1	2,2	0,1	2,3	0,1	0,1	0,1	0,2
SM Offenbach	1,8	1,9	0,1	2,0	0,1	2,2	0,2	0,1	0,2	0,4
AM Rodgau	1,8	1,9	0,1	2,1	0,1	2,3	0,2	0,1	0,3	0,5
SM Legden	2,4	2,5	0,1	2,8	0,2	3,1	0,2	0,1	0,4	0,7
AM Rheinberg	2,2	2,3	0,1	2,5	0,1	2,7	0,1	0,1	0,3	0,5
Mittelwert	1,9	2,1	0,1	2,3	0,1	2,4	0,1	0,2	0,4	0,5

Tab. 11: Tagessumme des Niederschlags im Winter, 20-jährige Mittelwerte und Differenzen gegenüber 1991 bis 2010

Meisterei	Absolute Werte [°C]							Differenz zu 1991 bis 2010 [K]		
	1991 bis 2010	2011 bis 2030		2031 bis 2050		2061 bis 2080		2011 bis 2030	2031 bis 2050	2061 bis 2080
		Wert	σ	Wert	σ	Wert	σ			
SM Elsterwerda	24,1	24,0	0,2	25,1	0,2	26,3	0,2	-0,1	1,0	2,2
SM Fürstenwalde	23,9	23,8	0,2	24,9	0,2	26,0	0,2	-0,1	1,0	2,1
AM Erkner	23,8	23,7	0,2	24,8	0,2	26,0	0,2	-0,1	1,0	2,2
AM Gramzow	23,0	23,0	0,2	24,0	0,2	25,0	0,2	0,0	1,0	2,0
SM Hausham	22,0	21,9	0,2	23,0	0,2	24,2	0,2	-0,1	1,0	2,2
SM Rödelmaier	23,3	23,1	0,3	24,3	0,2	25,7	0,2	-0,2	1,0	2,4
AM Rehau	21,8	21,7	0,2	22,8	0,2	24,1	0,2	-0,1	1,0	2,3
AM Ulm-Dornstadt	21,9	21,8	0,2	22,9	0,2	24,2	0,2	-0,1	1,0	2,3
SM Offenbach	24,6	24,6	0,3	25,8	0,2	27,2	0,2	0,0	1,2	2,6
AM Rodgau	24,6	24,5	0,3	25,7	0,2	27,1	0,2	-0,1	1,1	2,5
SM Legden	22,6	22,4	0,2	23,5	0,2	24,7	0,2	-0,2	0,9	2,1
AM Rheinberg	23,1	23,0	0,2	24,1	0,2	25,3	0,2	-0,1	1,0	2,2
Mittelwert	23,2	23,1	0,2	24,3	0,2	25,5	0,2	-0,1	1,1	2,3

Tab. 12: Tagesmaximum der Lufttemperatur im Sommer, 20-jährige Mittelwerte und Differenzen gegenüber 1991 bis 2010

Meisterei	Absolute Werte [°C]							Differenz zu 1991 bis 2010 [K]		
	1991 bis 2010	2011 bis 2030		2031 bis 2050		2061 bis 2080		2011 bis 2030	2031 bis 2050	2061 bis 2080
		Wert	σ	Wert	σ	Wert	σ			
SM Elsterwerda	12,5	12,0	0,1	12,4	0,1	12,8	0,1	-0,5	-0,1	0,3
SM Fürstenwalde	13,3	13,0	0,2	13,6	0,1	14,2	0,2	-0,3	0,3	0,9
AM Erkner	12,8	12,4	0,2	13,0	0,1	13,6	0,1	-0,4	0,2	0,8
AM Gramzow	12,5	12,1	0,2	12,6	0,1	13,0	0,2	-0,4	0,1	0,5
SM Hausham	11,3	10,8	0,1	11,5	0,1	12,2	0,1	-0,5	0,2	0,9
SM Rödelmaier	11,0	10,8	0,2	11,4	0,1	12,0	0,1	-0,2	0,4	1,0
AM Rehau	11,0	10,8	0,2	11,4	0,1	12,0	0,1	-0,2	0,4	1,0
AM Ulm-Dornstadt	12,0	11,5	0,2	12,2	0,1	13,0	0,1	-0,5	0,2	1,0
SM Offenbach	13,8	13,4	0,2	14,1	0,1	14,8	0,2	-0,4	0,3	1,0
AM Rodgau	13,7	13,4	0,2	14,0	0,1	14,7	0,2	-0,3	0,3	1,0
SM Legden	12,9	12,7	0,2	13,3	0,1	14,0	0,1	-0,2	0,4	1,1
AM Rheinberg	12,9	12,8	0,1	13,5	0,1	14,2	0,1	-0,1	0,6	1,3
Mittelwert	12,5	12,1	0,2	12,8	0,1	13,4	0,1	-0,4	0,3	0,9

Tab. 13: Tagesminimum der Lufttemperatur im Sommer, 20-jährige Mittelwerte und Differenzen gegenüber 1991 bis 2010

Meisterei	Absolute Werte [mm]							Differenz zu 1991 bis 2010 [mm]		
	1991 bis 2010	2011 bis 2030		2031 bis 2050		2061 bis 2080		2011 bis 2030	2031 bis 2050	2061 bis 2080
		Wert	σ	Wert	σ	Wert	σ			
SM Elsterwerda	2,2	1,9	0,1	1,7	0,1	1,5	0,1	-0,3	-0,5	-0,7
SM Fürstenwalde	2,0	1,7	0,1	1,5	0,1	1,2	0,1	-0,3	-0,5	-0,8
AM Erkner	2,0	1,8	0,1	1,6	0,1	1,3	0,1	-0,2	-0,4	-0,7
AM Gramzow	2,0	1,8	0,1	1,6	0,1	1,3	0,1	-0,2	-0,4	-0,7
SM Hausham	6,9	6,5	0,2	5,9	0,3	5,0	0,3	-0,4	-1,0	-1,9
SM Rödelmaier	2,1	2,1	0,1	1,9	0,1	1,7	0,1	0,0	-0,2	-0,4
AM Rehau	2,6	2,4	0,1	2,2	0,1	1,9	0,1	-0,2	-0,4	-0,7
AM Ulm-Dornstadt	3,0	2,9	0,1	2,7	0,1	2,4	0,2	-0,1	-0,3	-0,6
SM Offenbach	2,1	2,0	0,1	1,8	0,1	1,6	0,1	-0,1	-0,3	-0,5
AM Rodgau	2,1	2,0	0,1	1,9	0,1	1,6	0,1	-0,1	-0,2	-0,5
SM Legden	2,5	2,3	0,1	2,1	0,1	1,8	0,1	-0,2	-0,4	-0,7
AM Rheinberg	2,4	2,2	0,1	2,1	0,1	1,8	0,1	-0,2	-0,3	-0,6
Mittelwert	2,6	2,5	0,1	2,2	0,1	1,9	0,1	-0,1	-0,4	-0,7

Tab. 14: Tagessumme des Niederschlags im Sommer, 20-jährige Mittelwerte und Differenzen gegenüber 1991 bis 2010

Die Mittelwerte für 12 Meistereien zeigen im Winter für die Maximum- und die Minimumtemperaturen in der ersten Periode 2011 bis 2030 eine leichte Temperatursteigerung ($T_{\max} +0,1 \text{ °K}$, $T_{\min} +0,2 \text{ °K}$), welche im Bereich ± 1 Sigma liegt, also als nicht signifikant einzustufen ist. Für die zweite Periode 2031 bis 2050 beträgt die Temperaturzunahme schon $1,5 \text{ °K}$ für die beiden Parameter, was außerhalb des Bereiches von 2 Sigma liegt und dementsprechend als sehr signifikant definiert werden kann. Für die dritte Periode 2061 bis 2080 beträgt die Temperaturzunahme $3,2 \text{ °K}$ bei T_{\max} und $2,9 \text{ °K}$ bei T_{\min} . Auch für diese Periode ist somit eine starke Signifikanz hinsichtlich der mittleren Temperaturänderung bezogen auf den Beobachtungszeitraum zu verzeichnen.

Im Sommer sind die Temperaturänderungen in der ersten Periode 2011 bis 2030 leicht negativ. Bei T_{\max} betragen die Änderungen $-0,1 \text{ °K}$ was bei einer Streuung von $0,2 \text{ °K}$ nicht signifikant ist. Bei T_{\min} sind die Änderungen mit $-0,4 \text{ °K}$ deutlich größer und liegen im Bereich von 2 Sigma. Für die zweite Periode 2031 bis 2050 sind die Änderungen von beiden Parametern positiv und signifikant (beide liegen außerhalb ± 3 -Sigma-Schwelle). Die Temperaturzunahme von T_{\max} ist fast viermal so groß wie bei T_{\min} ($+1,1 \text{ °K}$ zu $+0,3 \text{ °K}$). In der dritten Periode 2061 bis 2080 betragen die Änderungen $2,3 \text{ °K}$ und $0,9 \text{ °K}$.

Bei dem Niederschlag sind im Winter die Änderungen generell für alle drei Projektionen positiv und im Sommer negativ. Im Winter betragen die Änderungen für die drei Projektionen $+10 \%$, $+21 \%$ und $+26 \%$. Die Werte liegen alle außerhalb des 2-Sigma-Bereichs. Im Sommer beträgt die Abnahme für den ersten Zeitraum -5% . Dieser Wert liegt an der unteren Grenze zum 1-Sigma-Bereich. Für den zweiten und dritten Zeitraum liegen die Werte bei -15% und -27% , und befinden sich damit außerhalb des 3-Sigma-Bereichs.

Im Folgenden werden die, aufgrund des bisher diskutierten Trendverhaltens der primären Parameter Temperatur und Niederschlag entstehenden Auswirkungen auf die sekundären meteorologischen Parameter diskutiert. Die Ergebnisse für alle Parameter sind je Meisterei in grafischer und tabellarischer Form in Anhang 7 bis 10 zusammengestellt. Für die Klimaparameter, die für den Winterdienst charakteristisch sind, enthält Anhang 19 Übersichtskarten, in denen die regionalen Unterschiede dargestellt sind. Die Mittelwerte über alle Meistereien

mit dem Sigma-Bereich sind nachfolgend im Bericht dargestellt.

4.2.1 Bauliche Unterhaltung

Für die bauliche Unterhaltung wurden aus den modellierten primären meteorologischen Parametern sechs für den Straßenbetriebsdienst relevante sekundäre Klimaparameter (s. Kapitel 3.3.1) berechnet und analysiert.

Für die Tagesminima im ersten Quartal des Jahres (s. Bild 24) zeigen die Analysen der Mittelwerte keine Änderungen zwischen dem gegenwärtigen Zustand und dem Zeitraum 2011 bis 2030. Der Zeitraum 2031 bis 2050 weist einen Temperaturanstieg von $1,1 \text{ °K}$ auf. Damit liegen diese Änderungen weit außerhalb des 2-Sigma-Bereichs und sind entsprechend sehr signifikant. Der dritte Zeitraum 2061 bis 2080 weist eine noch deutlichere Temperaturerhöhung von $2,5 \text{ °K}$ auf, die ebenfalls hochsignifikant ist.

Die nach Meistereien differenzierte Betrachtung der Entwicklung des Tagesminimums der Lufttemperatur (Januar bis März) ist in Anhang 7 dargestellt. Im Zeitraum 1991 bis 2010 liegt dieser Wert bei acht Meistereien unter dem Gefrierpunkt, nur die Werte der Meistereien in Hessen und Nordrhein-Westfalen bewegen sich über der Nullgradgrenze. Bis 2030 verändert sich dies nicht, bis 2050 wird sich die minimale Temperatur im ersten Quartal bei den zwei Straßenmeistereien in Brandenburg nicht mehr im negativen Bereich bewegen. Aufgrund des weiteren Temperaturanstiegs bis 2080 liegt in der letzten projizierten Periode das Mittel von T_{\min} nur noch bei der SM Hausham unter dem Gefrierpunkt.

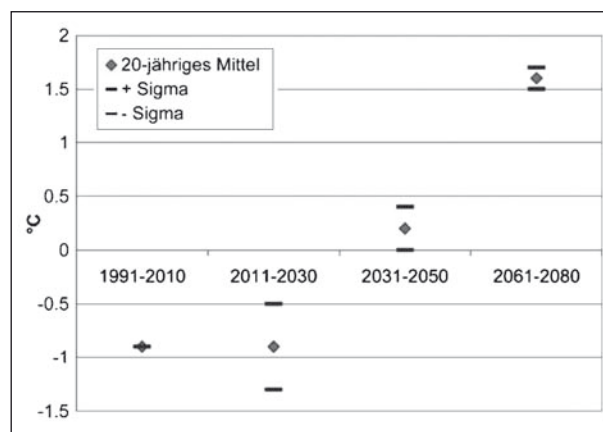


Bild 24: Mittel des Tagesminimums der Lufttemperatur von Januar bis März für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

Regionale Unterschiede in der Entwicklung sind nur gering, der Temperaturanstieg in Nordrhein-Westfalen wird etwas geringer sein als in den anderen Regionen.

Die Projektion der Anzahl an Eistagen ($T_{\max} < 0\text{ °C}$) (s. Bild 25) zeigt keine wesentlichen Änderungen in den Jahren 2011 bis 2030. In der Periode 2031 bis 2050 reduziert sich die Anzahl der Eistage im Mittel um 4,5 Tage (35 %). In der Periode 2061 bis 2080 reduziert sich die Anzahl der Eistage um 67 %.

Die nach Meistereien differenzierte Betrachtung der Entwicklung der Eistage ist in Anhang 7 dargestellt. Generell variieren bei den einzelnen Meistereien die absoluten Werte, während der prozentuale Anteil ungefähr gleich bleibt. Während sich bis 2030 keine wesentlichen Veränderungen in der ersten Periode abzeichnen, sind vom Rückgang bis 2050 vor allem die Meistereien im Voralpengebiet stärker betroffen. In der letzten Periode ist der Rückgang vor allem bei den Meistereien in Hessen und Nordrhein-Westfalen sowie bei den Straßenmeistereien Elsterwerda und Hausham gegenüber dem Betrachtungszeitraum überdurchschnittlich.

Bei den Tagen mit Schwankungen der Lufttemperatur von mehr als 10 °C und einem Tagesminimum unter dem Gefrierpunkt (s. Bild 26) kann eine Abnahme von im Mittel 0,9 Tagen (9 %) in der zweiten Periode und 1,9 Tagen (20 %) in der dritten Periode festgestellt werden. Fast bei allen Meistereien sind diese Tendenzen zu beobachten. Nur bei der AM Gramzow und der SM Legden sind die Änderungen zu 1991 bis 2010 positiv, allerdings mit einer Tendenz zur Abnahme der positiven Änderungen.

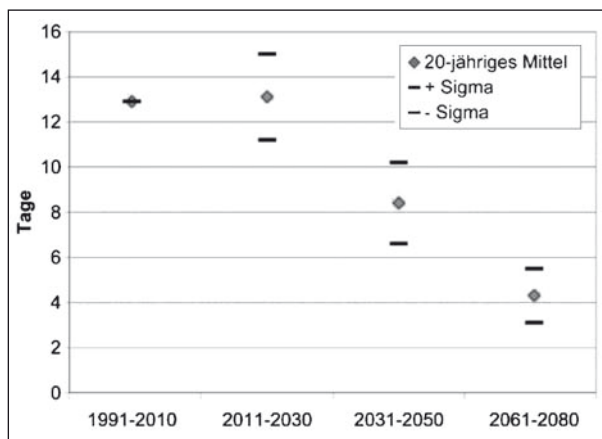


Bild 25: Gemittelte Anzahl der Eistage von Januar bis März für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

Bei den sommerlichen Maxima der Lufttemperatur (s. Bild 27) gibt es im ersten Zeitraum (2011 bis 2030) keine signifikanten Änderungen. Der zweite Zeitraum (2031 bis 2050) weist eine Temperaturerhöhung von 1,1 K auf und der dritte (2061 bis 2080) eine von 2,3 K (beide sehr signifikant). Bei allen Meistereien liegen die Änderungen im gleichen Bereich.

Der kombinierte Parameter (Tage mit $T_{\max} \geq 25\text{ °C}$ und Sonnenscheindauer $\geq 6\text{ h}$) (s. Bild 28) zeigt im ersten Zeitraum keine signifikante Änderungen. Dagegen ist der zweite Zeitraum durch einen sehr signifikanten Anstieg von fast 8 Tagen (27 %) charakterisiert. Bei den einzelnen Meistereien schwanken im ersten Zeitraum die Änderungen zwischen -2,9 Tagen (-11 %) in Hausham, bis zu +1,8 Tage (+5 %) in Rodgau. Die Anzahl der heiß-sonnigen Tage steigt im dritten Zeitraum von 28,7 auf 46 (61 %). Alle Meistereien zeigen für diesen Zeitraum die gleichen Tendenzen.

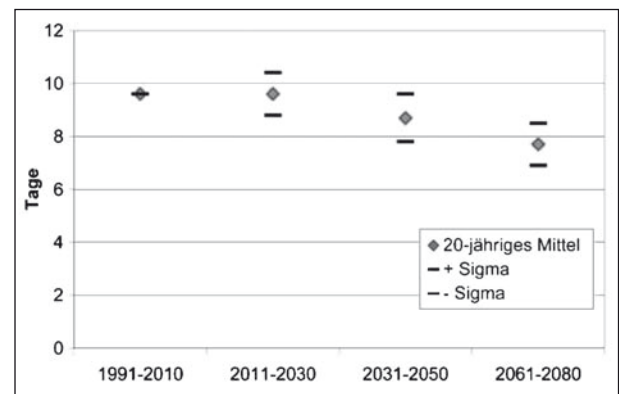


Bild 26: Gemittelte Anzahl der Tage mit großen Temperaturschwankungen im Tagesverlauf im Zeitraum Januar bis März für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

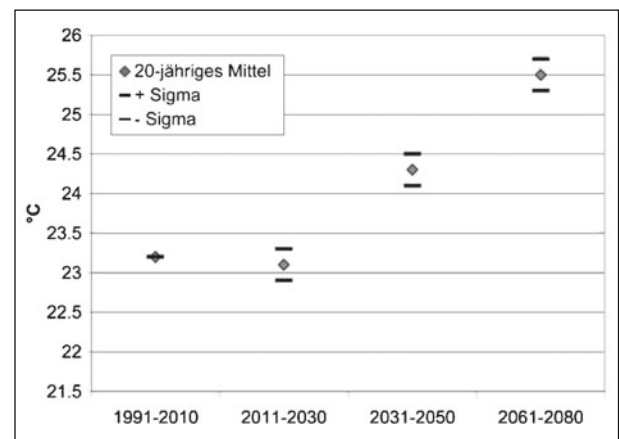


Bild 27: Mittel des Tagesmaximums der Lufttemperatur von Juni bis August für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

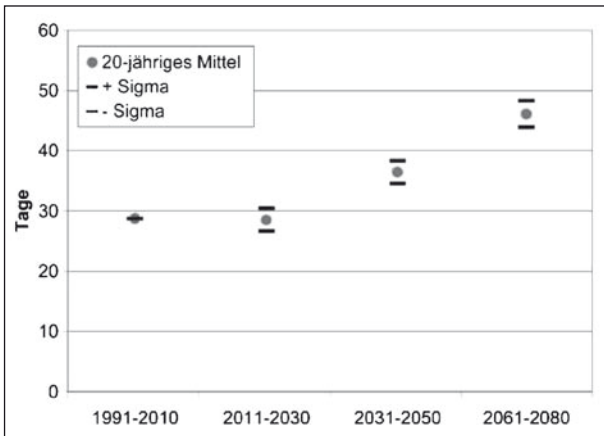


Bild 28: Gemittelte Anzahl der Tage mit Tagesmaximum der Lufttemperatur $\geq 25\text{ °C}$ und Sonnenscheindauer $> 6\text{ h}$ von Juni bis August für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

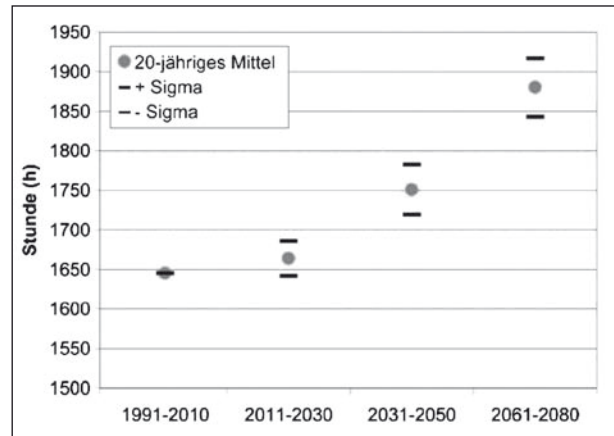


Bild 30: Gemittelte jährliche Sonnenscheindauer für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

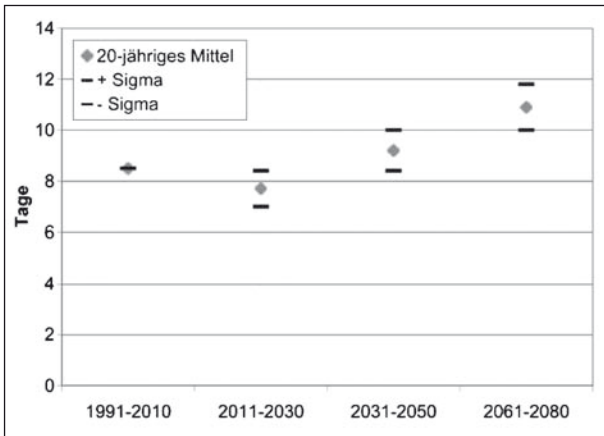


Bild 29: Gemittelte maximale Andauer der Tage mit Tagesmaximum der Lufttemperatur $\geq 25\text{ °C}$ und Sonnenscheindauer $> 6\text{ h}$ von Juni bis August für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

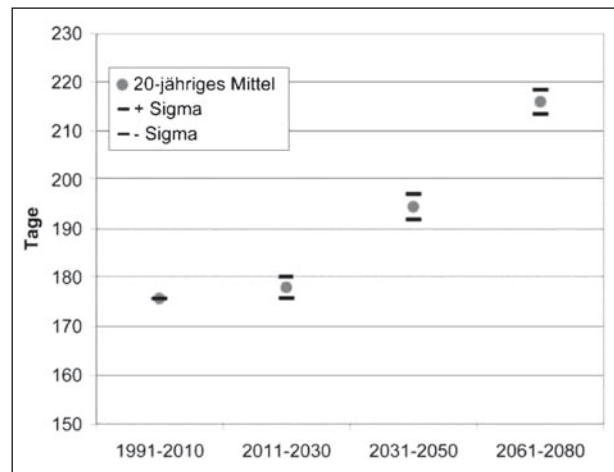


Bild 31: Gemittelte jährliche Anzahl der Tage mit Tagesmittel der Lufttemperatur $> 10\text{ °C}$ für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

Die maximale Andauer von Sommertagen (s. Bild 29) geht im ersten Zeitraum in allen Meistereien zurück. Am stärksten ausgeprägt ist dieser Rückgang bei der AM Gramzow mit 2 Tagen (21 %). Im zweiten und dritten Zeitabschnitt setzen sich positive Änderungen mit 0,7 bzw. 2,4 Tagen (8 % und 28 %) durch.

4.2.2 Grünpflege

Für die Grünpflege wurden aus den modellierten primären meteorologischen Parametern sechs für den Straßenbetriebsdienst relevante sekundäre Klimaparameter (s. Kapitel 3.3.2) berechnet und analysiert:

Die jährliche Sonnenscheindauer (s. Bild 30) zeigt in der ersten Zeitperiode 2011 bis 2030 im Durch-

schnitt eine leichte Steigerung von etwa 19 Stunden (~1 %). Bei den einzelnen Meistereien (s. Anhang 8) variieren die Änderungen zwischen -42 Stunden (-3 %, bei der AM Rehau) bis +66 Stunden (+4 % bei der AM Ulm-Dornstadt). Die Werte liegen außerhalb des ± 2 -Sigma-Bereiches und sind somit als signifikant zu erkennen. In der zweiten und dritten Periode ist der Zuwachs der Sonnenscheindauer viel höher: 6 % und 14 % und signifikant für alle Meistereien.

Bei der jährlichen Anzahl der Tage mit einem Tagesmittel der Lufttemperatur über 10 °C (s. Bild 31) zeigen alle Meistereien eine kontinuierliche Erhöhung der Anzahl dieser Tage. In der erste Zeitperiode beträgt die Zunahme im Durchschnitt 2,3 Tage (+1 %), was außerhalb des 1-Sigma-Bereichs liegt. Allerdings liegt die Schwankungsbreite zwischen 1,3 (SM Elsterwerda und Legden) und 4,5 Tagen (AM Rehau) (s. Anhang 8). Bei der zwei-

ten und dritten Periode beträgt die Zunahme 18 bzw. 40 Tage (11 % bzw. 23 %). Die Werte der einzelnen Meistereien liegen alle im gleichen Bereich, wobei tendenziell für die höheren Lagen etwas stärkere Zuwächse projiziert werden.

Bei der jährlichen Summe der Tage mit Niederschlag und einer mittleren Lufttemperatur $> 10\text{ °C}$ ist in der ersten Zeitperiode eine Reduzierung und dann ein Anstieg der Mittelwerte zu beobachten (s. Bild 32). Die stärksten Abnahmen in der ersten Periode zeigen die Meistereien Elsterwerda und Rodgau (-6 %). In der zweiten Periode sind im Mittel nur geringe Änderungen zu verzeichnen (101,3 Tage in den Jahren 1991 bis 2010 zu 101,9 Tage in den Jahren 2031 bis 2050). Von den 12 Meistereien zeigt die eine Hälfte, vor allem Meistereien im Flachland, eine Reduzierung und die andere Hälfte eine Zunahme der „warm-feuchten“ Tage. In der dritten Periode zeigt nur ein Viertel der Meistereien, und zwar die Meistereien in Brandenburg, negative Änderungen (s. Anhang 8), während ansonsten die vegetationsfreundlichen Tage um 3 bis 13 % zunehmen.

Die Dauer der Vegetationsperiode, d. h. die jährliche Summe der Tage mit einer Tagesmitteltemperatur $T_{\text{mit}} \geq 5\text{ °C}$ an mindestens 5 aufeinander folgenden Tagen (s. auch Kapitel 3.2.2) zeigt im Durchschnitt in der ersten Zeitperiode eine leichte, nicht signifikante Zunahme von 1,2 Tagen (s. Bild 33). Fast bei allen Meistereien ist die gleiche Tendenz zu beobachten. Die zweite und dritte Zeitperiode zeigt eine deutliche Verlängerung der Vegetationsperiode um etwa 21 Tage (9 %) bzw. 45 Tage (20 %). Bei allen Meistereien sind die Änderungen signifikant und in der gleichen Größenordnung (s. Anhang 8).

Bei der jährlichen Summe der Frosttage ($T_{\text{min}} < 0\text{ °C}$) (s. Bild 34) ist bei allen Meistereien eine deutliche Tendenz zur Abnahme zu sehen. Im Durchschnitt reduziert sich die Summe der Frosttage von 84 Tagen in den Jahren 1991 bis 2010 um 5 % in der ersten, 26 % in der zweiten und 47 % in der dritten Periode.

Bei der jährlichen Summe von trocken-heißen Tagen (Niederschlag = 0,0 mm und $T_{\text{max}} \geq 30\text{ °C}$) (Bild 35) ist in der ersten Zeitperiode keine Änderung zu sehen. In der zweiten Periode weisen alle Meistereien positive Änderungen auf, die im Durchschnitt 2,4 Tage (52 %) betragen. Dieses Ereignis bleibt trotzdem relativ selten (maximal 13 Tage pro

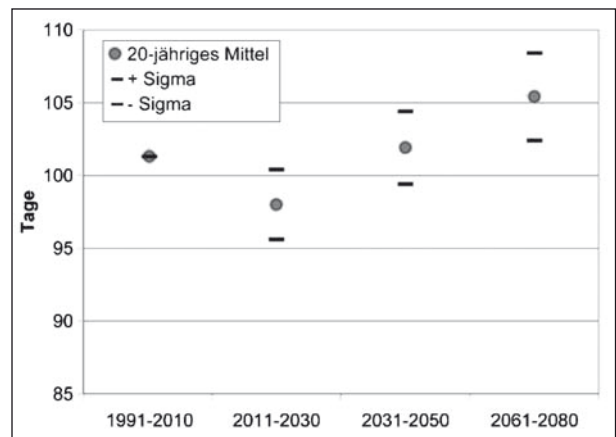


Bild 32: Gemittelte jährliche Anzahl der Tage mit Tagessumme des Niederschlags $> 0\text{ mm}$ und Tagesmittel der Lufttemperatur $> 10\text{ °C}$ für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

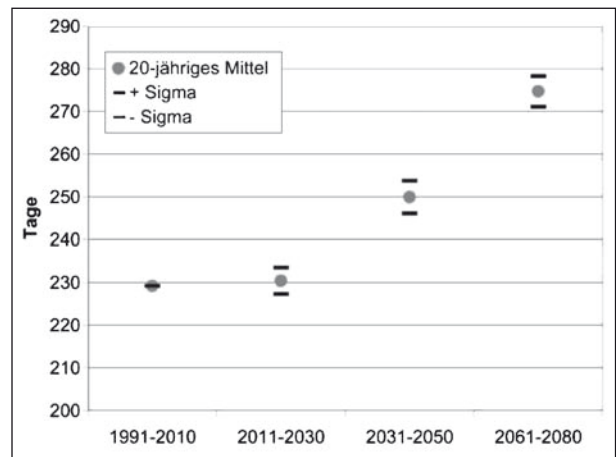


Bild 33: Gemittelte jährliche Dauer der Vegetationsperiode für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

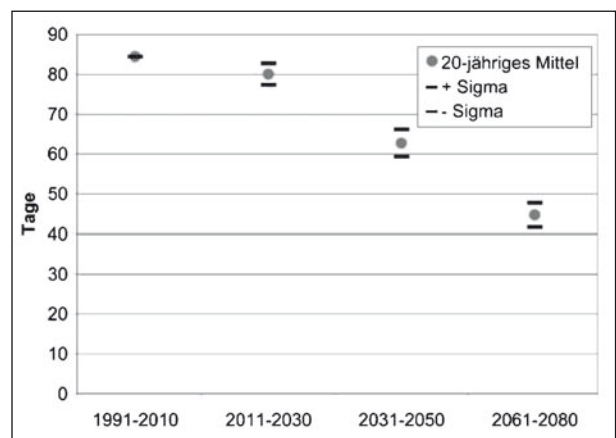


Bild 34: Gemittelte jährliche Anzahl der Frosttage für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

Jahr in Offenbach). In der dritten projizierten Periode ist die Anzahl der Ereignisse mehr als doppelt so hoch wie in der Beobachtungsperiode (+139 %).

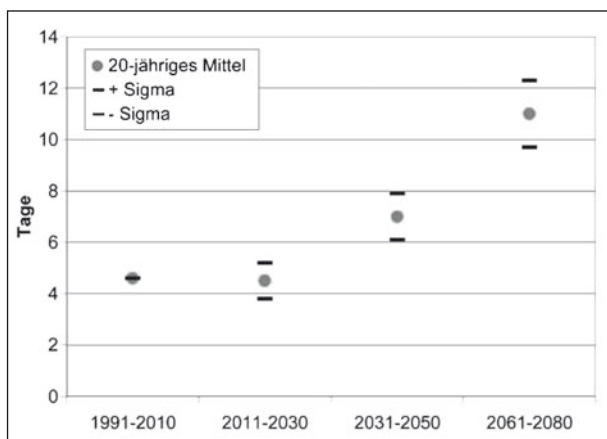


Bild 35: Gemittelte jährliche Anzahl der Trockentage für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

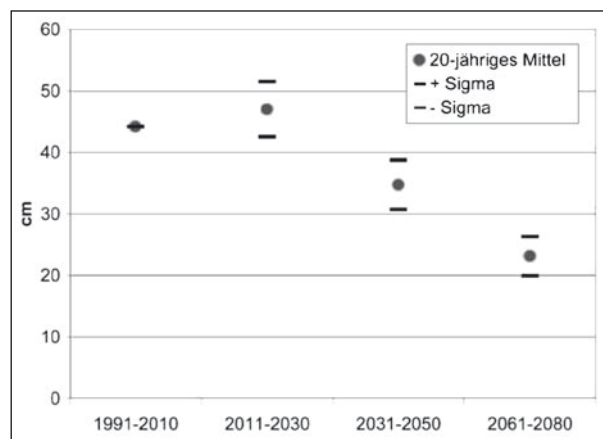


Bild 36: Gemittelte Monatssumme der Neuschneehöhe für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

4.2.3 Winterdienst

Es wurden vier für den Winterdienst relevante Klimaparameter (s. Kapitel 3.3.3) auf Basis der primären meteorologischen Parameter berechnet und analysiert.

Die Neuschneehöhe (addiert über das Jahr) (s. Bild 36) zeigt eine Zunahme in den Jahren 2011 bis 2030 und eine Abnahme in den Jahren 2031 bis 2050 und 2061 bis 2080. In der Periode 2011 bis 2030 liegen die Änderungen bei acht Meistereien innerhalb des Bereiches von ± 1 Sigma und können deshalb als nicht signifikant klassifiziert werden (s. Anhang 9). Die gemittelte Änderung der Schneehöhe beträgt +2,8 cm. Die mittlere Reduzierung der Schneehöhe in der Periode 2031 bis 2050 beträgt 9,5 cm bezogen auf die 44,2 cm der Periode 1991 bis 2010 (-22 %). Bei allen Meistereien liegen die Änderungen außerhalb des ± 1 -Sigma-Bereiches und sind somit signifikant. In der Periode 2061 bis 2080 reduziert sich die Neuschneehöhe um 48 %.

Bei der Analyse der Anzahl der Schneefalltage (s. Bild 37) zeigt sich in der Periode 2011 bis 2030 ein über alle Meistereien gemittelter Anstieg von 18,7 auf 22,2 Tage (19 %). Mit Ausnahme von drei Meistereien (Offenbach, Rodgau und Legden) sind die Änderungen signifikant. Die Periode 2031 bis 2050 zeigt eine Abnahme der Schneetage von 18,7 auf 16,2 Tage (-13 %). Mit Ausnahme der Meistereien Erkner und Rehau sind die Änderungen signifikant. In der Periode 2061 bis 2080 beträgt die Abnahme durchschnittlich 43 %. Für die Anzahl der Tage mit Schneefall sind somit ähnliche Entwicklungen wie für die Summe der Neuschneehöhe projiziert worden.

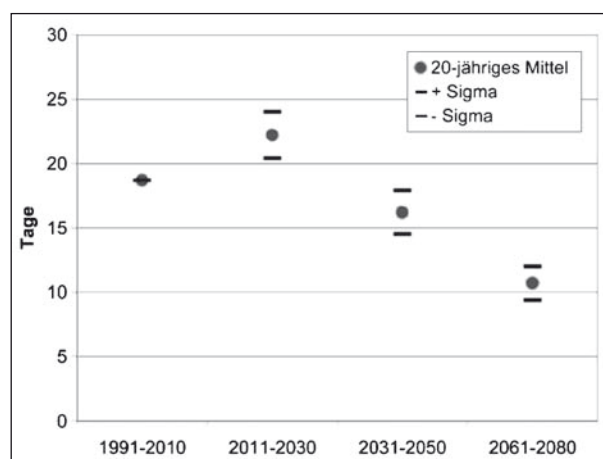


Bild 37: Gemittelte monatliche Anzahl der Schneefalltage für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

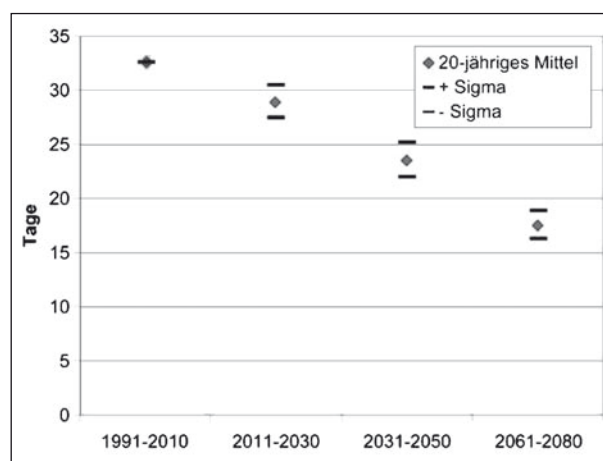


Bild 38: Gemittelte monatliche Anzahl der Glatteis- oder Eisglättetage für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

Bei den Tagen mit Glatteis (s. Bild 38) ist für alle Perioden eine deutliche Abnahme zu beobachten. Die Änderungen bei allen Meistereien und Zeitpe-

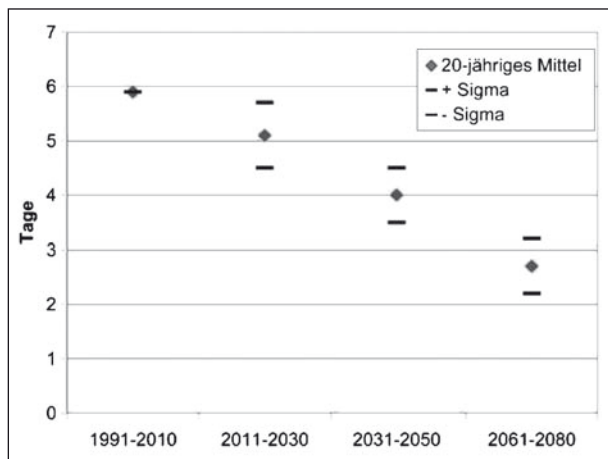


Bild 39: Gemittelte monatliche Anzahl der Reifglättetage für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

riden sind negativ und signifikant (mindestens außerhalb des Bereiches von ± 2 -Sigma). In der ersten Zeitperiode reduziert sich die Anzahl der Glatteistage im Durchschnitt um 11 %, in der zweiten um 28 % und in der dritten um 47 %.

Tage mit Reifglätte (s. Bild 39 und Anhang 9) sind in der Beobachtungsperiode etwa fünf Mal seltener zu beobachten als die Tage mit Glatteis. Fast alle Meistereien zeigen aber auch für diesen Parameter in allen drei Zukunftsperioden eine signifikante Abnahme der Anzahl der Tage mit Reifglätte. In der ersten Periode reduziert sich die Anzahl der Tage mit Reifglätte um durchschnittlich 13 %, in der zweiten um 32 % und in der dritten um 54 %. Nur für die Meistereien Ulm-Dornstadt und Rodgau wird für die Periode 2011 bis 2030 eine Zunahme der Reifglättetage projiziert, die allerdings für die AM Rodgau nicht signifikant ist.

4.2.4 Extremwetterereignisse

Als Charakteristika der extremen Witterung wurden aufgrund der Erkenntnisse aus der Literaturanalyse, aber vor allem aus den Workshops und Einzelinterviews folgende 10 sekundäre Klimaparameter berechnet und analysiert. Zum Teil führen diese Witterungssituationen nicht unmittelbar zu Auswirkungen für den Straßenbetriebsdienst; sie sind jedoch Indikatoren für entsprechende Witterungslagen, bei denen mit zunehmenden relevanten Witterungsereignissen zu rechnen ist.

Niederschlag

- Anzahl der Tage mit Starkniederschlag [d] (> 10 mm pro Tag) mit Unterscheidung in Sommer und Winter,
- Anzahl der Tage mit Extremniederschlag [d] (> 25 mm pro Tag) mit Unterscheidung in Sommer und Winter,
- Anzahl der Trockenperioden [d] (Niederschlag $\leq 0,1$ mm an mindestens 10 aufeinander folgenden Tagen),
- Anzahl der Dauerregenperioden [d] (Niederschlag > 0,5 mm an mindestens 5 aufeinander folgenden Tagen),
- Anzahl der Dauerschneeperioden [d] (Neuschneehöhe > 0 cm an mindestens 3 aufeinander folgenden Tagen),
- Anzahl der Tage mit Lawinengefahr [d] (Schneedeckenhöhe > 40 cm an mindestens 3 aufeinander folgenden Tagen); nur für die SM Hausham.

Lufttemperatur

- Anzahl der heißen Tage [d] (Tagesmaximum der Lufttemperatur > 30 °C),
- Anzahl der Dauerfrostperioden [d] (Tagesminimum der Lufttemperatur < 0 °C an mindestens 10 aufeinander folgenden Tagen).

Wind

- Anzahl der Sturmtage [d] (Maximum der Windgeschwindigkeit > 15 m/s)

Kombinierter Parameter

- Anzahl der Tage mit Schneeverwehungen [d] (mittlere Windgeschwindigkeit > 4 m/s und Schneedeckenhöhe > 0,1 cm)

Bei den Tagen mit Starkniederschlag (Niederschlag > 10 mm/Tag) (s. Bild 40) zeigt sich im Durchschnitt eine Tendenz zu einer leichten Abnahme, von 19,9 Tagen pro Jahr im Zeitraum 1991 bis 2010 auf 18,3 Tage pro Jahr im Zeitraum 2061 bis 2080. Bei der getrennten Analyse von Sommer- und Wintersaison ist im Sommer eine Abnahme des Ereignisses zu sehen (von 6,8 Tage 1991 bis 2010 bis auf 5,1 Tage pro Sommer 2061 bis 2080). Im Winter ist in den Perioden 2031 bis 2050 und 2061 bis 2080 eine leichte Zunahme des Ereignisses zu beobachten (von

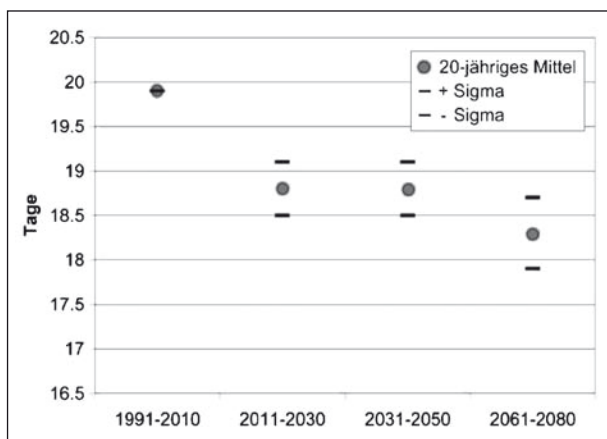


Bild 40: Gemittelte Anzahl der Tage mit Starkniederschlag für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

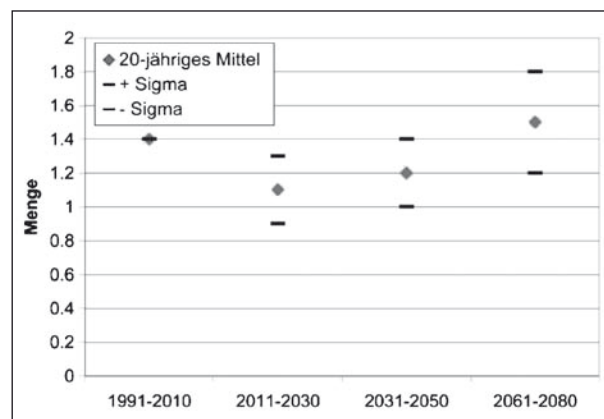


Bild 42: Gemittelte Anzahl der Trockenperioden für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

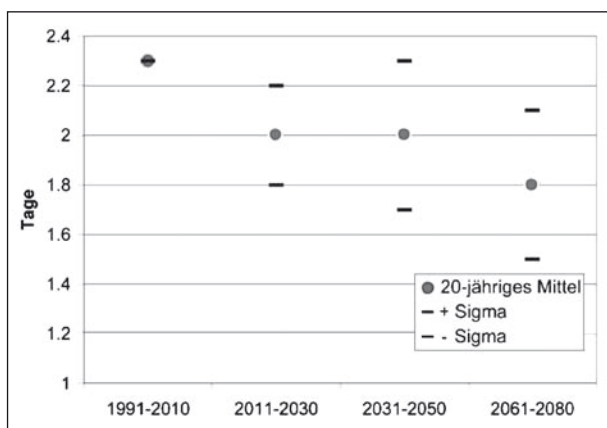


Bild 41: Gemittelte Anzahl der Tage mit Extremniederschlag für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

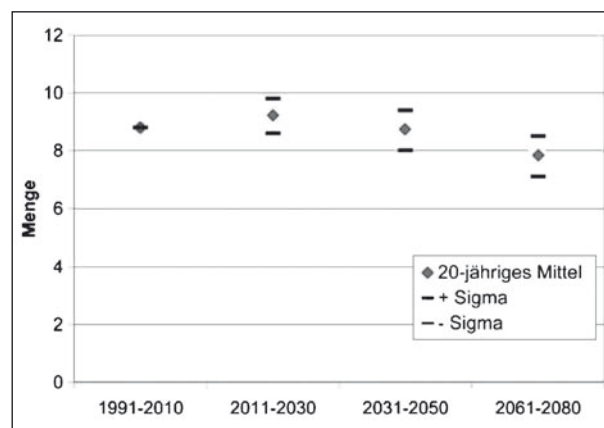


Bild 43: Gemittelte Anzahl der Dauerregenperioden für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

3,8 Tage 1991 bis 2010 auf 4,2 und 4,7 Tage pro Winter).

Bei den Tagen mit Extremniederschlag (Niederschlag > 25 mm/Tag) (s. Bild 41) zeigt sich im Durchschnitt eine dem Starkniederschlag ähnliche Abnahme der Häufigkeit des Ereignisses von 2,3 Tagen pro Jahr 1991 bis 2010 auf 1,8 Tage pro Jahr 2061 bis 2080. Die saisonale Analyse zeigt eine Reduzierung der Häufigkeit im Sommer von 1,1 Tagen pro Jahr 1991 bis 2010 auf 0,7 Tage pro Jahr 2061 bis 2080 (dies entspricht einer Abnahme von 18 %, 28 % und 36 %). Im Winter sind keine deutlichen Tendenzen zu sehen.

Bei der Anzahl der Trockenperioden (mindestens 10 Tage ohne Niederschlag) (s. Bild 42) zeigt sich die stärkste Reduzierung der Häufigkeit in der ersten Periode 2011 bis 2030: von 1,4 pro Jahr 1991 bis 2010 auf 1,1 Trockenperioden pro Jahr 2011 bis 2030. Das entspricht einer Abnahme von 21 %. In

der zweiten Periode 2031 bis 2050 ist die Tendenz der Abnahme etwas schwächer. Sie beträgt 14 %, wobei nur 7 Meistereien mit negativen Tendenzen zu verzeichnen sind (s. Anhang 10). In der Periode 2061 bis 2080 sind keine eindeutigen Tendenzen feststellbar.

Die Anzahl der Perioden mit Dauerregen (mindestens 5 Tage mit Niederschlag über 0,5 mm/Tag) (s. Bild 43) zeigt im Durchschnitt eine leichte, nicht signifikante Steigerung in der Zeitperiode 2011 bis 2030 auf 9,2 Perioden pro Jahr, gegenüber 8,8 in der Beobachtungsperiode. Fünf Meistereien zeigen dabei Abnahmen und sieben Meistereien eine Zunahme dieses Ereignisses. In der zweiten Periode sind Tendenzen nur schwach ausgeprägt. In der dritten Periode zeigen acht Meistereien eine signifikante Reduzierung der Dauerregenperioden.

Die Anzahl der Perioden mit Dauerschnee (mindestens 3 Tage mit Neuschnee) (s. Bild 44) zeigt im

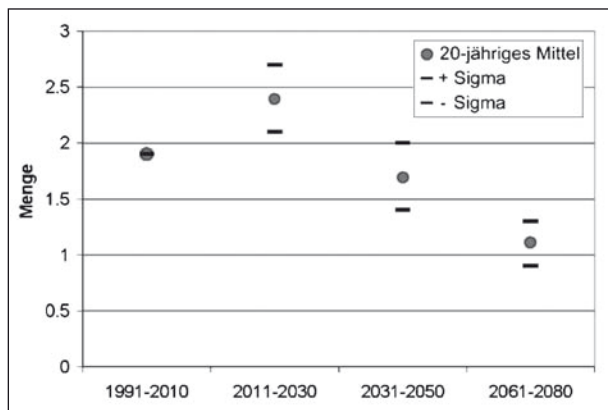


Bild 44: Gemittelte Anzahl der Dauerschneeperioden für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

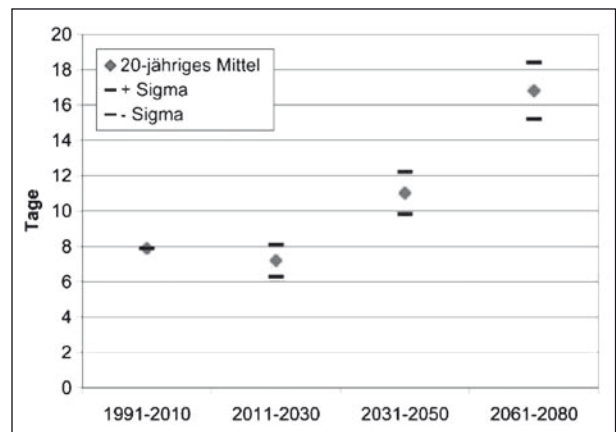


Bild 46: Gemittelte Anzahl der heißen Tagen für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

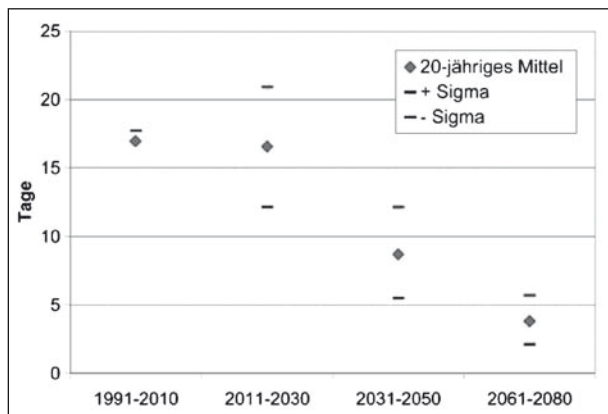


Bild 45: Gemittelte Anzahl der Tage mit Lawinengefahr bei der SM Hausham für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

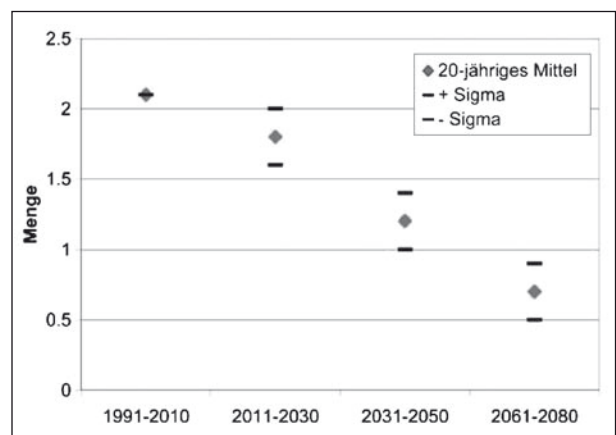


Bild 47: Gemittelte Anzahl der Dauerfrostperioden für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

Durchschnitt eine leichte signifikante Steigerung in der Zeitperiode 2011 bis 2030 auf 2,4 Perioden pro Jahr, gegenüber 1,9 in der Beobachtungsperiode. Elf Meistereien weisen dabei eine Zunahme des Ereignisses auf. In der zweiten Periode ist eine leichte, nicht signifikante Reduzierung der Tendenzen zu beobachten. In der dritten Periode zeigen zehn Meistereien eine signifikante Reduzierung der Anzahl der Dauerschneeperioden.

Die Zahl der Tage mit Lawinengefahr für die SM Hausham (s. Bild 45) reduziert sich leicht von 17 Tage auf 16,6 Tage pro Jahr in der ersten Szenarienperiode. In der zweiten Periode halbiert sich die Zahl der Lawinen gefährdenden Witterungssituationen; in der dritten Periode reduziert sie sich sogar um insgesamt 77 %.

Die durchschnittliche Zahl an heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) (s. Bild 46) zeigt in der Periode 2011 bis 2030 einen leichten Rückgang der Häufigkeit von 7,9 auf 7,2 Tage pro Jahr (entspricht etwa 9 %). Bei zehn von zwölf Meistereien treten negative Ände-

rungen auf, wobei die meisten Änderungen innerhalb des ± 1 -Sigma-Bereichs liegen, also nicht signifikant sind. Die Änderungen in der Periode 2031 bis 2050 fallen deutlicher aus. Im Durchschnitt steigt die Zahl heißer Tage bezogen auf 1991 bis 2010 von 7,9 auf 11,0 (39 %) an. Bei neun Meistereien liegen die Änderungen außerhalb des Bereiches der 2-Sigma-Schwelle, sind also sehr signifikant. Nur bei der Meisterei Hausham ist eine leichte, nicht signifikante Reduzierung der Zahl von heißen Tagen zu beobachten. In der dritten Periode 2061 bis 2080 verdoppelt sich im Durchschnitt die Zahl an heißen Tagen.

Die Anzahl der Dauerfrostperioden (mindestens 10 Tage mit $T_{\min} < 0,0 \text{ °C}$) (s. Bild 47) reduziert sich kontinuierlich, und zwar von 2,1 Perioden pro Jahr in der Beobachtungsperiode 1991 bis 2010 auf 1,8; 1,2 bzw. 0,7 Perioden in den drei Szenarienzeiträumen. Das entspricht einer Reduktion um 14 %, 43 % bzw. 67 %.

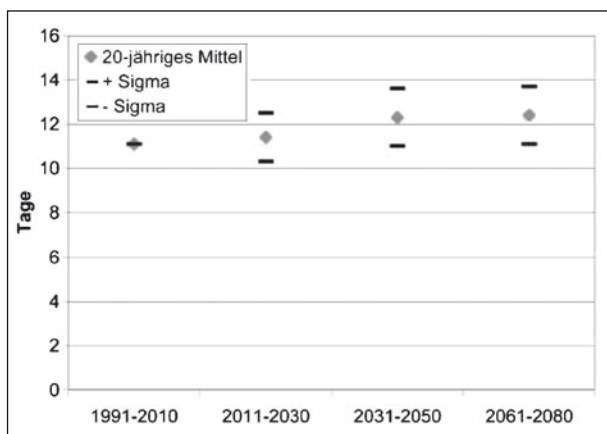


Bild 48: Gemittelte Anzahl der Sturmtage für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

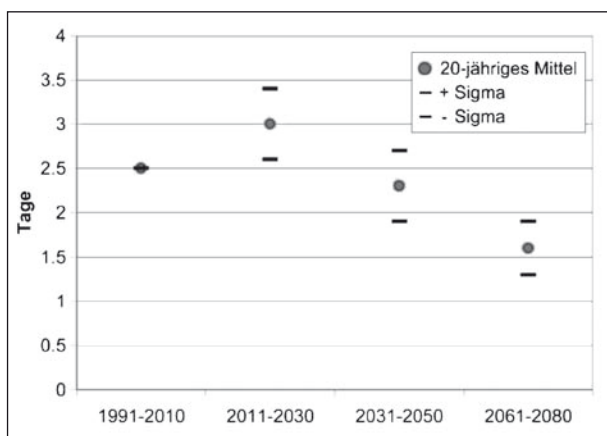


Bild 49: Gemittelte jährliche Anzahl der Tage mit Schneeverwehungen für den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

Die Anzahl an Sturmtagen (Tage mit Windspitzen $> 15 \text{ m/s}$) (s. Bild 48) nimmt in der gesamten Szenarienperiode zwischen 2011 und 2080 kontinuierlich zu, in den Jahren 2011 bis 2030 um 0,3, 2031 bis 2050 um 1,2 und 2061 bis 2080 um 1,3 Tage pro Jahr bezogen auf die 11,1 Tage im Beobachtungszeitraum 1991 bis 2010. Fast alle Änderungen liegen innerhalb des ± 1 -Sigma-Bereichs und sind also nicht signifikant, obwohl die Tendenzen eine Steigerung der Häufigkeit des Ereignisses zeigen.

Die Anzahl der Tage mit Schneeverwehungen (s. Bild 49) zeigt im Durchschnitt eine leichte, nicht signifikante Steigerung in der Zeitperiode 2011 bis 2030 auf 3,0 Tage pro Jahr, gegenüber 2,5 in der Beobachtungsperiode. Signifikant ist der Anstieg nur bei vier Meistereien. Auffallend ist der sehr starke Anstieg in der AM Rehau, wo diese Tage sich mehr als verdoppeln werden (s. Anhang 10). In der zweiten Periode sind keine signifikanten Tendenzen erkennbar. In der dritten Periode tritt bei sieben

Meistereien eine signifikante Reduzierung der Anzahl der Dauerschneeperioden auf. Im Durchschnitt reduziert sich die Zahl der Schneeverwehungstage von 2,5 auf 1,6. Nur in der AM Rehau sind die Änderungen in allen drei Perioden signifikant positiv.

4.3 Zusammenfassende Analyse

Die Analyse des gegenwärtigen Klimazustandes und der zukünftigen Änderungen der drei wichtigsten Klimaparameter, T_{\max} , T_{\min} und Niederschlag zeigt eine stärkere Erhöhung der Temperaturen im Winter im Vergleich zum Sommer.

Im Winter steigen die beiden Temperaturen ungefähr gleich an. In der ersten Szenarienperiode (2011 bis 2030) sind die Steigerungen meistens nicht signifikant. In der zweiten Periode betragen die gemittelten Änderungen $+1,5 \text{ °K}$, und in der dritten etwa $+3 \text{ °K}$ und sind somit signifikant. Die Sommertemperaturen weisen in der ersten Periode 2011 bis 2030 sogar einen Rückgang im Vergleich zu den Jahren 1991 bis 2010 auf, der bei T_{\min} ein Wert von $0,4 \text{ °K}$ erreicht und signifikant ist. In der zweiten und dritten Periode erhöht sich die Temperatur.

Beim Niederschlag ist in allen drei Zeitperioden eine Zunahme der Niederschlagsmenge im Winter und eine Abnahme im Sommer zu beobachten. Im Winter betragen die Änderungen für die drei Perioden 10 %, 21 % und $+26 \%$ (Alle Änderungen liegen außerhalb des ± 2 -Sigma-Bereichs). Im Sommer beträgt die Abnahme 5 % (Der Wert liegt an der Grenze zum ± 1 -Sigma-Bereich) für die Periode 2011 bis 2030, sowie 15 % bzw. 27 % für die beiden anderen Perioden. Diese liegen außerhalb des ± 3 -Sigma-Bereichs.

Bauliche Unterhaltung

Bei den für die kalte Jahreszeit (Januar bis März) ausgewählten Parametern (T_{\min} , Summe von Eistagen, Tage mit großen Temperaturschwankungen) traten in der Periode 2011 bis 2030 keine oder nur leichte nicht signifikante Änderungen auf. In der Zeitperiode 2031 bis 2050 sind die Änderungen schon deutlicher ausgeprägt. Die Minimumtemperatur steigt im Durchschnitt um $1,1 \text{ °K}$ an. Die Zahl der Eistage reduziert sich von 12,9 auf 8,4 Tage pro Jahr (35 %) und die Zahl der Tage mit großen Temperaturschwankungen reduziert sich von 9,6 Tage auf 8,7 Tage pro Jahr (9 %).

Bei den die warme Jahreszeit charakterisierenden Parametern (T_{\max} , Summe der Tage mit $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$ und Sonnenscheindauer $> 6 \text{ h}$, sowie die maximale Andauer dieser Ereignisse) ist in der Periode 2011 bis 2030 bei den ersten zwei Parametern nur eine leichte nicht signifikante Reduzierung zu sehen. Die maximale Andauer von „warmen Tagen“ reduziert sich im Durchschnitt von 8,5 Tage auf 7,7 Tage (10 %, signifikant bei sieben Meistereien). In der zweiten Periode sind alle Änderungen positiv und signifikant. Die für die dritte Periode berechneten Charakteristika wiederholen die Tendenzen der zweiten Periode in verstärkter Form.

Grünpflege

Über den gesamten Szenarienzeitraum ist eine Zunahme der Anzahl der Sonnenscheinstunden pro Jahr zu beobachten. Gleichzeitig verlängert sich die Vegetationsperiode kontinuierlich.

In der ersten Periode 2011 bis 2030 beträgt im Durchschnitt die Zunahme der Sonnenscheindauer 18 h (1 %), während sich die Vegetationsperiode nur geringfügig verlängert. In der zweiten Periode zeigen sich bei beiden Charakteristika schon wesentliche Veränderungen, die Sonnenscheinstunden steigen um 105 h an und die Vegetationsperiode verlängert sich um 20 Tage (6 % bzw. 9 %).

Ähnlich verändern sich die jährliche Summe der Tage mit $T_{\text{mit}} > 10 \text{ °C}$, und die jährliche Summe von heiß-trockenen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$ und kein Niederschlag). In der ersten Periode sind keine oder nur schwache Änderungen zu beobachten, während eine deutliche Steigerung der Häufigkeit dieser Ereignisse in der zweiten Periode um 11 % bzw. 52 % zu verzeichnen ist. Am deutlichsten fallen die Anstiege in der dritten Periode aus. Sie betragen 14 %, 20 %, 23 % bzw. 139 % für die jeweiligen Parameter.

Der kombinierte Parameter, jährliche Summe der Tage mit Niederschlag bei $T_{\text{mit}} > 10 \text{ °C}$, zeigt eine Reduzierung der Anzahl dieser Tage in der ersten Periode 2011 bis 2030 von 101 Tagen auf 98 Tage (~3 %). Die stärkste Reduzierung der Anzahl an Tagen dieses Ereignisses zeigen die Meistereien Elsterwerda, Gramzow und Rodgau. In der zweiten Periode beträgt die mittlere Änderung weniger als ein Prozent, wobei die Hälfte der Meistereien eine Zunahme und die andere Hälfte eine Abnahme an „feucht-warmen“ Tagen aufwies. In der dritten Periode beträgt der mittlere Anstieg etwa 4 %, wobei

allerdings bei einem Drittel der Meistereien eine Abnahme zu verzeichnen ist.

Die jährliche Anzahl an Frosttagen (Tage mit $T_{\min} < 0 \text{ °C}$) reduziert sich kontinuierlich von 84 Tagen in der Beobachtungsperiode auf 80 Tage in der ersten Periode (5 %), auf 63 (26 %) in der zweiten und auf 45 Tage (26 %) in der dritten Periode. Dabei weisen alle Meistereien diesen negativen Trend auf.

Winterdienst

Die Häufigkeit der Tage mit Glatteis und Reifglätte zeigte eine kontinuierliche Abnahme bei allen Meistereien. Die Häufigkeit der Glatteistage reduziert sich von 31 Tage pro Jahr (1991 bis 2010) auf 29 in der Periode 2011 bis 2030 (11 %) und auf 24 in der Periode 2031 bis 2050 (28 %). Alle Änderungen sind für alle Meistereien signifikant. Die Häufigkeit der Tage mit Reifglätte reduziert sich von 6 Tage pro Jahr auf 5 Tage in der ersten Periode (13 %). Diese Änderung ist allerdings nicht bei allen Meistereien signifikant. In der zweiten Periode beträgt die Reduzierung 32 % und ist für alle Meistereien signifikant. In der dritten Periode betragen die Abnahmen entsprechend 46 % und 54 % und sind ebenfalls für alle Meistereien signifikant.

Bei der Häufigkeit der Tage mit Schneefall ist in der ersten Periode eine durchschnittliche Zunahme um 19 % zu beobachten. Positiv sind die Änderungen bei allen Meistereien, aber nur bei sieben Meistereien signifikant. In der zweiten Periode ist eine Reduzierung der Schneetage um 13 % zu verzeichnen die bei acht Meistereien signifikant ist. Die Neuschneehöhe zeigt die gleichen Tendenzen: Anstieg in der ersten Periode und Abnahme in der zweiten und dritten Periode. Der durchschnittliche Anstieg beträgt in der ersten Periode etwa 6 % (drei Meistereien zeigen eine Reduzierung der Schneehöhe). In der zweiten Periode reduziert sich die Schneehöhe um im Mittel 22 % bei allen Meistereien. In der dritten Periode betragen die Abnahmen der Tage mit Schneefall bzw. der Neuschneehöhe 43 % bzw. 48 %.

Extremwetterereignisse

Bei den Tagen mit Starkniederschlag (Niederschlag $> 10 \text{ mm/Tag}$) ist zwischen dem Beobachtungszeitraum und dem Szenarienzeitraum 2061 bis 2080 im Durchschnitt eine leichte Abnahme des Ereignisses von 19,9 Tagen pro Jahr auf 18,3 Tage pro Jahr zu verzeichnen. Analysiert man Sommer und Winter

getrennt, ist im Sommer eine Abnahme der Starkniederschlagsereignisse von 6,8 Tagen (1991 bis 2010) auf 5,1 Tage (2061 bis 2080) zu beobachten. Im Winter gibt es in den Perioden 2031 bis 2050 und 2061 bis 2080 eine leichte Zunahme der Starkniederschläge von 3,8 Tagen 1991 bis 2010 auf 4,2 bzw. 4,7 Tage pro Winter.

Bei den Tagen mit Extremniederschlag (Niederschlag > 25 mm/Tag) zeigt sich im Durchschnitt eine dem Starkniederschlag ähnliche Abnahme der Häufigkeit des Ereignisses, von 2,3 Tagen pro Jahr (1991 bis 2010) auf 1,8 Tage pro Jahr (2061 bis 2080). Im Sommer reduziert sich die Häufigkeit von 1,1 Tagen pro Jahr (1991 bis 2010) auf 0,7 Tage pro Jahr (2061 bis 2080). Im Winter sind keine deutlichen Tendenzen zu sehen.

Dauerregen (5 Tage mit Niederschlag > 0,5 mm), Dauerschnee (3 Tage mit Neuschnee) und Tage mit Schneeverwehungen ($W_{mit} > 4$ m/s und Neuschnee) zeigen ähnliche zeitliche Änderungen:

- eine leichte Zunahme der Häufigkeit der Ereignisse in der ersten Periode (4 %, 25 % bzw. 20 %),
- sehr schwache negative Änderungen in der zweiten Periode (1 %, 10 % bzw. 8 %),
- stärkere Reduzierung in der dritten Periode (11 %, 42 % bzw. 36 %).

Die Häufigkeit von heißen Tagen nimmt um etwa 10 % in der ersten Szenariensperiode leicht ab, in der zweiten und dritten dagegen deutlich zu (40 %, bzw. 112 %).

Bei der Anzahl der Sturmtage ist ein kontinuierlicher Anstieg in allen drei Szenariensperioden zu betrachten (3 %, 11 % bzw. 12 %). Die Tage mit Dauerfrost und Lawinengefahr nehmen kontinuierlich ab (14 %, 43 % bzw. 67 % für Dauerfrost und 2 %, 41 % bzw. 76 % für die Lawinengefahr).

Vergleich der Projektionen mit anderen Klimasimulationen

Die berechneten Ergebnisse decken sich qualitativ mit früheren Simulationen globaler bzw. regionaler Klimamodelle, welche im ENSEMBLES-Projekt vorgestellt wurden [van der LINDEN/MITCHELL 2009]. Hier wurden auf der Basis des CMIP3 Ensembles durch eine dynamische Regionalisierung Projektionen für das zukünftige Klima in Europa durchgeführt. Diese zeigen, dass dem all-

gemeinen Anstieg der Temperatur eine starke dekadische Variabilität überlagert ist. Das ist vor allem in der ersten Hälfte des Simulationszeitraums bis 2100 der Fall. Zeitscheiben mit einer leichten Abkühlung sind auch darin sichtbar und begründen sich auf mögliche Phasenübergänge, die mit einer Klimaerwärmung einhergehen. Die zusätzliche Energie im Strahlungshaushalt der Atmosphäre ist nicht direkt an eine Temperaturerhöhung gekoppelt, da durch die Aufnahme von mehr Wasserdampf des Systems ein Teil dieser Energie entzogen wird. Das Gleiche gilt für das Schmelzen des Arktischen Meereises.

Während die Modelle sich weitestgehend darüber einig sind, dass der Jahresniederschlag in Nordeuropa zunimmt und in Südeuropa abnimmt, sind die Modellunsicherheiten für Mitteleuropa und Deutschland enorm. Folglich ist es äußerst schwierig verlässliche Aussagen zu formulieren.

Änderungen der Intensität und Häufigkeit von Wetterextremen (z. B. lokale Starkniederschläge und Trockenperioden) sind die Indikatoren, welche auf ein zunehmend chaotischeres Wettergeschehen hindeuten. Statistisch betrachtet wird die Niederschlagsverteilung flacher und breiter. Das heißt, während der Jahresniederschlag abnimmt, steigt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Trockenperioden und Starkniederschlägen. Folglich gehören Realisierungen mit einer trockeneren Zukunft zu einem möglichen Szenario für Deutschland. Regional kann diese Tendenz unterschiedliche Ausprägungen annehmen.

Die Ergebnisse aus dem hier zugrunde liegenden statistischen Ansatz zur regionalen Klimaprojektion für Deutschland zeigen, dass Starkniederschläge in Deutschland nicht zunehmen. Dieses Ergebnis deckt sich nicht mit den Erfahrungen aus der dynamischen Klimamodellierung und den Beobachtungen der jüngsten Vergangenheit. Da dem Algorithmus zur systematischen Umsortierung vergangener Beobachtungsreihen lediglich ein mögliches Temperaturregime aus den Globalmodellen vorgegeben wird, der den beobachteten Trend weit überschreitet ohne dabei neue lokale Extreme zu erzeugen, kann es zu dieser Entwicklung kommen. Die weitere Modellentwicklung sieht vor, dies schrittweise zu verbessern und in Modellvergleichen zu verifizieren.

5 Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst

5.1 Methodik und Untersuchungsumfang

Die Klimaprojektionen für die drei projizierten Perioden (2011-2030, 2031-2050, 2061-2080) gegenüber dem Betrachtungszeitraum (1991-2010) (s. Kapitel 4.2.4) wurden auf den Straßenbetriebsdienst übertragen, indem auf Basis der in Kapitel 3.3 dargestellten Witterungsabhängigkeiten mithilfe von linearen Modellen Einsatzstunden für die Periode 1991 bis 2010 rückgerechnet bzw. für die künftigen Perioden bis 2080 projiziert wurden (s. Bild 50).

Es ist zu berücksichtigen, dass für die Beseitigung von Frostschäden sowie die Grünpflege insgesamt nur geringe Korrelationen zwischen Witterung und Einsatzstunden bestehen, sodass keine abgesicherten Aussagen, sondern nur Tendenzen abgeleitet werden können (s. Kapitel 5.2 und 5.3). Im

Winterdienst hingegen können aufgrund des unmittelbaren Witterungszusammenhangs quantitative Aussagen getroffen werden (s. Kapitel 5.4).

Darüber hinaus wurden für Extremwetterereignisse mithilfe der Literaturanalyse, der Workshops sowie von Interviews mit den Meistereileitern aussagekräftige Klimaparameter bestimmt, die ebenfalls projiziert wurden (s. Kapitel 4.2.4). Extremwetterereignisse treten vielfach nur selten und ggf. auch räumlich nur sehr begrenzt auf. Gleichzeitig wird der Aufwand für den Straßenbetriebsdienst nicht nur durch die Ausprägung des Extremwetterereignisses, sondern auch durch weitere Randbedingungen, wie Zeitpunkt, Verkehrsbelastung, Zustand der betroffenen Anlagen etc., stark beeinflusst, sodass eine verallgemeinernde Quantifizierung des Aufwandes infolge von Extremwetterereignissen nicht möglich ist. Somit kann auch der Einfluss von Veränderungen bei den Extremwetterereignissen infolge des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst nicht quantitativ, sondern nur qualitativ beschrieben werden. In Kapitel 5.5 werden die

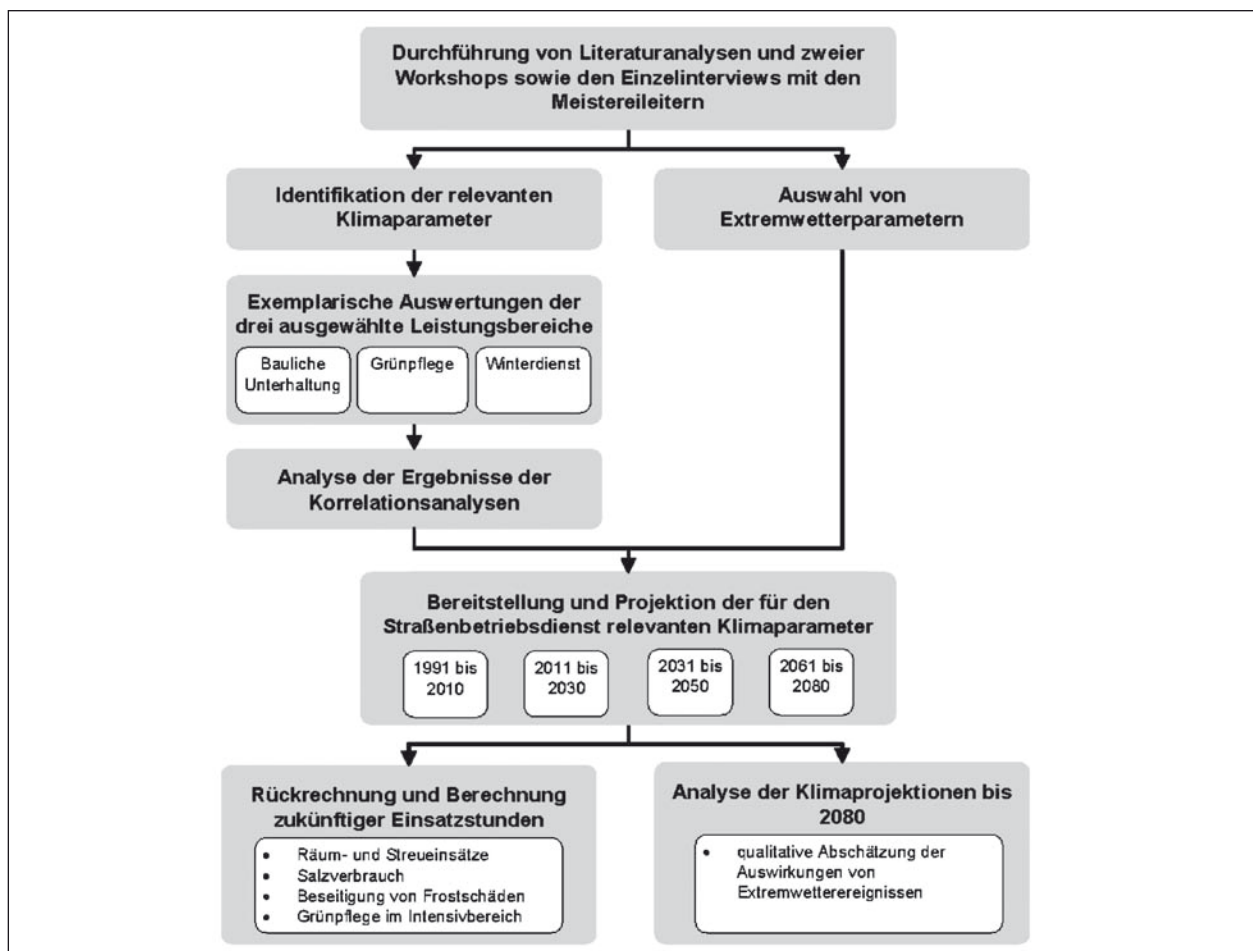


Bild 50: Angewandte Methodik zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst

Projektionen der Klimaparameter, die Extremwetterereignisse charakterisieren, hinsichtlich ihrer möglichen Auswirkungen auf den Straßenbetriebsdienst bewertet. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das angewandte Modell zur Klimaprojektion nur bedingt zur Prognose künftiger extremer Witterungsereignisse geeignet ist, da systembedingt keine neuen Extremwerte erzeugt werden.

5.2 Aufwand infolge von Frostschäden

Bei der Analyse der Witterungsabhängigkeit bei der Behebung von Frostschäden konnte nur ein Trend, jedoch keine statistisch abgesicherte Korrelation identifiziert werden, was auf weitere witterungsunabhängige Einflussfaktoren schließen lässt (s. Kapitel 3.3.1). Für zwei Parameter, die mittlere minimale Lufttemperatur sowie die Anzahl der Eistage, jeweils im Zeitraum Januar bis März, ist bei der Mehrzahl der Meistereien ein Trend (s. Bild 11 und Bild 12) erkennbar.

Über die Trendlinien konnten bei den Korrelationsanalysen (s. Kapitel 3.3.1), die Abhängigkeiten zwi-

schen den Personeneinsatzstunden und den jeweiligen Witterungsparametern identifiziert werden. Mithilfe der tatsächlichen und projizierten Klimadaten über die vier Perioden und den Resultaten der Korrelationsanalysen wurden für die zwei betrachteten Witterungsparameter Einsatzstunden je Meisterei prognostiziert. Diese Projektionen wurden zwar für alle Meistereien (s. Anhang 11 und Anhang 12) durchgeführt, nachfolgend werden jedoch nur die Meistereien betrachtet, für die die Korrelation zwischen Einsatzstunden und Witterungsparameter über 50 % liegt (s. Tabelle 5).

Betrachtet man die Abhängigkeit von der mittleren minimalen Lufttemperatur (s. Bild 51), wird deutlich, dass für den Zeitraum 2011 bis 2030 keine signifikante Änderung bei der Behebung von Frostschäden zu erwarten ist, da sich dieser Witterungsparameter kaum ändert. Erst in der nächsten Periode ist ein signifikanter Rückgang bei allen Meistereien von durchschnittlich ca. 100 h (entspricht -28 %) zu verzeichnen. In der letzten projizierten Periode bis 2080 gibt es einen Rückgang von durchschnittlich -64 % gegenüber dem Betrachtungszeitraum 1991 bis 2010. Im Flachland kann sich der Aufwand infolge von Frostschäden sogar um bis zu 84 %

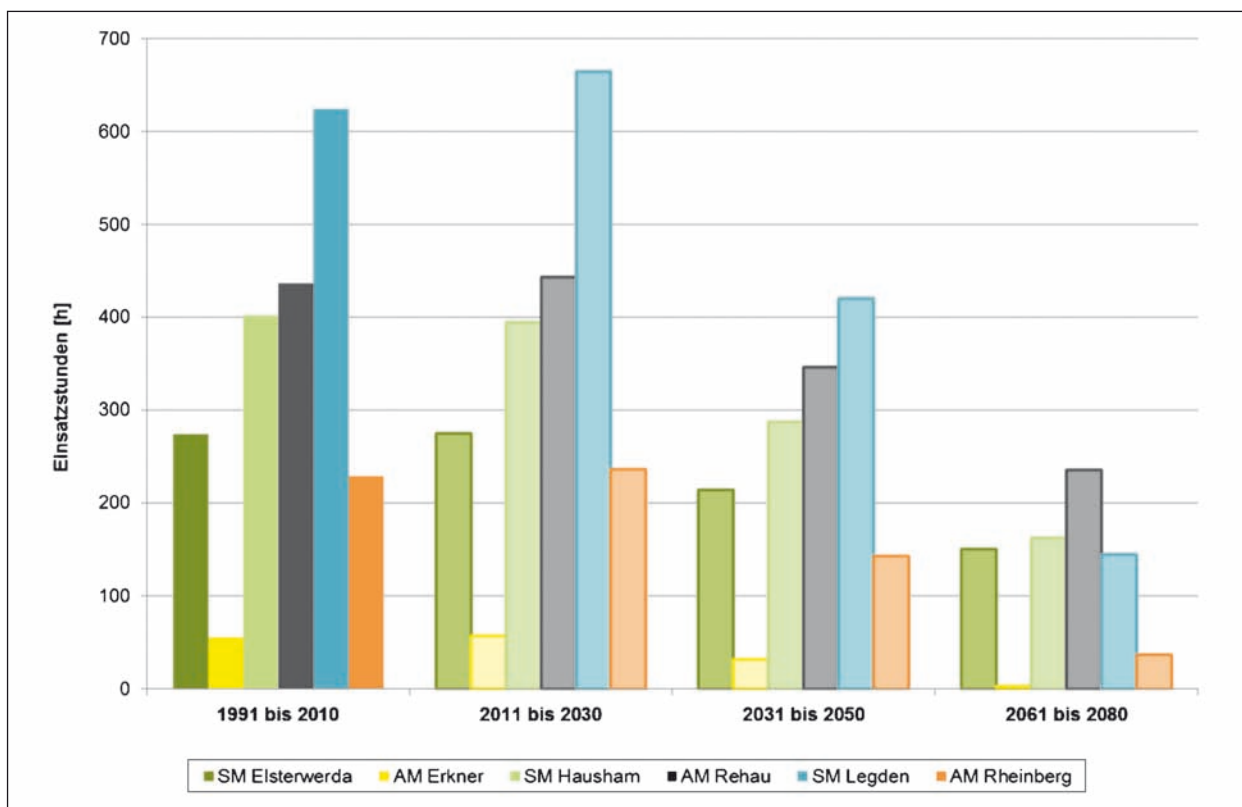


Bild 51: Rückgerechnete und prognostizierte Einsatzstunden für die Aufwendungen infolge von Frostschäden in Abhängigkeit der mittleren minimalen Lufttemperatur im Zeitraum Januar bis März gemittelt über den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume für die Meistereien mit Korrelationen über 50 %

(AM Rheinberg) reduzieren. In Anhang 13 sind die Entwicklungen der Einsatzstunden für die sechs Meistereien detaillierter dargestellt.

Alternativ ist auch für die Anzahl der Eistage ein Trend erkennbar, dass diese maßgebend für den Aufwand infolge Frostschäden sind. Die Entwicklung der projizierten Einsatzstunden in Abhängigkeit dieses Witterungsparameters ist in Bild 52 dargestellt. Analog zum ersten betrachteten Witterungsparameter ist auch bei diesem Parameter kein eindeutiger Trend erkennbar. In der ersten projizierten Periode 2011 bis 2030 nehmen bei der SM Elsterwerda und der AM Rehau die Aufwendungen geringfügig ab. Bei den anderen Meistereien ist tendenziell eine leichte Zunahme von bis zu 10 % zu verzeichnen. Wie auch schon bei der Korrelation mit der mittleren minimalen Lufttemperatur ist in der zweiten projizierten Periode ein signifikanter Rückgang um durchschnittlich 20 % gegenüber der Ausgangsperiode festzustellen. In der Periode 2061 bis 2080 gehen die prognostizierten Aufwendungen für die Beseitigung der Frostschäden um 40 % zurück, im Rhein-Main-Gebiet ist die Abnahme mit maximal etwa 70 % am größten.

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden durchgeführten Projektionen zur Abschätzung der Entwicklung der Frostschäden miteinander, wird deutlich, dass bei beiden zugrunde gelegten Witterungsparametern insgesamt der Trend erkennbar ist, dass in der ersten Periode bis 2030 keine signifikante Änderung der Frostschäden zu erwarten ist. Ab 2031 ist jedoch davon auszugehen, dass der Aufwand zur Beseitigung der Frostschäden signifikant abnehmen wird; bis 2080 kann er sich im Mittel halbieren. Allerdings sind diese Prognosen aufgrund der geringen Korrelation zwischen Witterungsparameter und Personalaufwand sowie auch der großen Spannweite in der Klimaprojektion nur mit geringer statistischer Aussagesicherheit möglich.

Diese geringe Aussagesicherheit in der Projektion der Einsatzstunden wird auch darin deutlich, dass die Korrelation mit den beiden Klimaparametern nicht in allen Meistereien gleichartig ausfällt. Da sich auch keine unmittelbaren regionalen oder anderen meistereispezifischen Zusammenhänge aus den durchgeführten Analysen ableiten lassen, können die rechnerisch ermittelten Unterschiede zwischen den Meistereien auch zufällig sein. Regionale Differenzierungen sind daher nicht möglich.

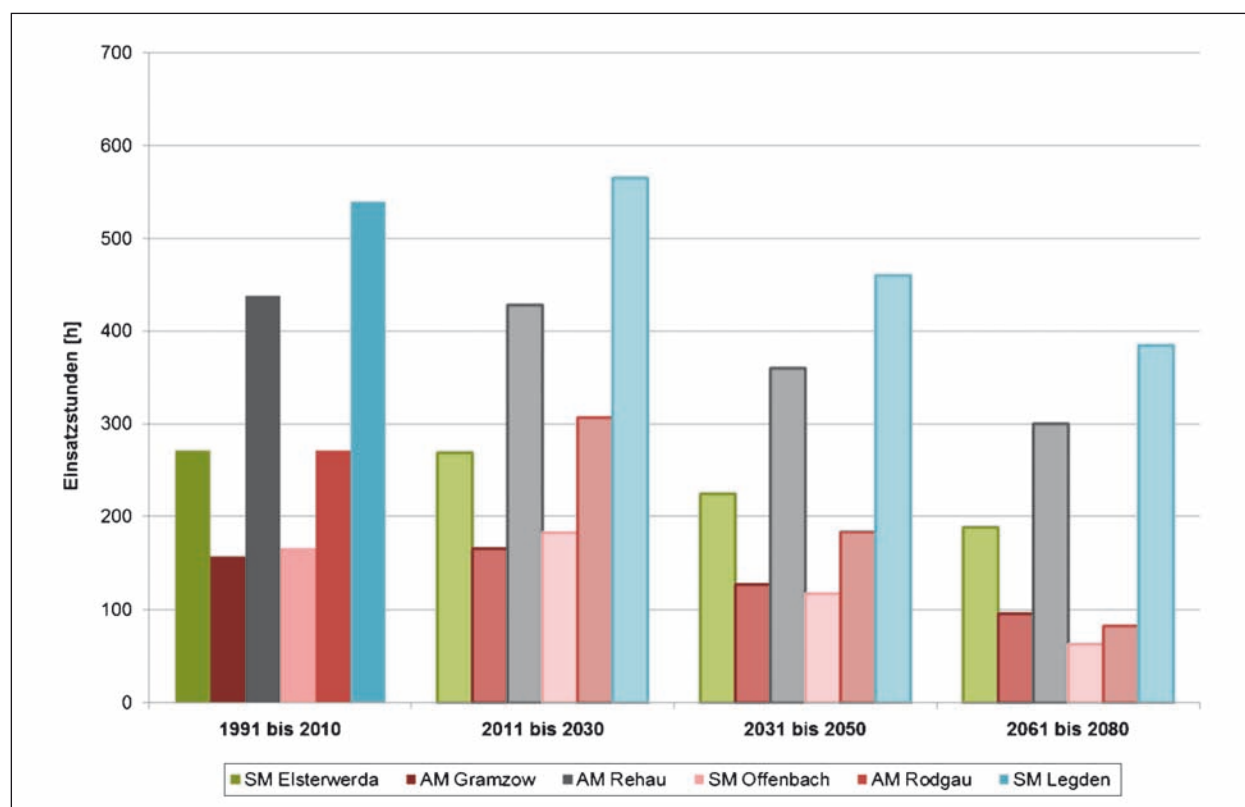


Bild 52: Rückgerechnete und prognostizierte Einsatzstunden für die Aufwendungen infolge von Frostschäden in Abhängigkeit der Anzahl der Eistage im Zeitraum Januar bis März gemittelt über den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume für die Meistereien mit Korrelationen über 50 %

Die Projektion macht deutlich, dass der personelle Aufwand für die Beseitigung von Frostschäden zwar deutlich abnehmen wird, dass der Klimawandel jedoch für diese Leistung des Straßenbetriebsdienstes nicht die einzige Einflussgröße ist. Vielmehr spielen auch Verkehrsbelastung sowie Bauweise und Erhaltungszustand des zu betreuenden Streckennetzes eine entscheidende Rolle. Daher kann aus den Analysen nicht der Schluss gezogen werden, dass infolge der globalen Erwärmung die frostbeständigen Bauweisen langfristig eine geringere Bedeutung haben. Alleine die große Spannweite bei der Projektion der Klimadaten und daraus abgeleitet der prognostizierten Einsatzstunden (s. Anhang 13) macht deutlich, dass auch zukünftig Frostschäden größeren Umfangs auftreten können, wenn der Straßenaufbau nicht den technischen Standards entspricht.

5.3 Grünpflege im Intensivbereich

Wie auch schon bei der baulichen Unterhaltung ergaben die Korrelationsanalysen keine klaren Zusammenhänge zwischen den Personeneinsatzstunden und den vegetationsbestimmenden Parametern. Ursache hierfür kann vor allem sein, dass der Aufwand für die Mäharbeiten entscheidend von der Mähhäufigkeit bestimmt wird, diese aber im Intensivbereich nur bei erheblichen Witterungsschwankungen angepasst werden muss. Die Untersuchungen zum Witterungseinfluss (s. Kapitel 3.3.2) haben für zwei Witterungsparameter, einerseits die Anzahl der Tage mit $T_{mit} > 10\text{ °C}$ sowie andererseits die Anzahl der Tage mit Niederschlag und $T_{mit} > 10\text{ °C}$, gleichartige Trends und die höchsten Korrelationen zu den Einsatzstunden in der Grünpflege erkennen lassen (s. Bild 18 und Bild 19).

Wie auch bei der baulichen Unterhaltung konnte über die Trendlinien (s. Kapitel 3.3.2), die Abhängigkeit zwischen Aufwand für die Grünpflege und Witterung festgestellt werden. Deshalb wurden auch hier die gleiche Methodik wie bei der Berechnung der prognostizierten Einsatzstunden für die Beseitigung von Frostschäden (s. Kapitel 5.2) angewendet. Die Trendfunktionen für alle Meistereien, außer für die AM Ulm-Dornstadt, bei der die Einsatzstunden für die Grünpflege aufgrund von Geräteausfällen nicht repräsentativ waren, sowie für die AM Rehau, bei der ein geringer Eigenleistungsanteil durch Fremdvergaben kompensiert wurde, sind in Anhang 14 zusammengestellt. Die hiermit projizierten Einsatzstunden für die Mäharbeiten im

Intensivbereich enthält für alle Meistereien Anhang 15. Nachfolgend werden nur die Meistereien mit einer Korrelation von über 50 % zwischen Einsatzstunden und Witterungsparameter betrachtet. Bei Betrachtung des Parameters Anzahl der Tage mit $T_{mit} > 10\text{ °C}$ konnte nur bei drei Straßenmeistereien diese höhere Korrelation identifiziert werden. Wenn auch der Niederschlag in der Korrelation berücksichtigt wird, ist für je zwei Autobahn- und Straßenmeistereien eine deutliche Korrelation erkennbar. (s. Tabelle 6).

Für die erste durchgeführte Projektion (s. Bild 53) wird deutlich, dass die Einsatzstunden analog der Verlängerung der Vegetationsperiode zunehmen. Dieser Anstieg ist in der Periode bis 2030 nur gering, in den beiden weiteren Perioden bis 2080 ist er jedoch ausgeprägter. Vor allem in der SM Hausham wird sich der Grünpflegeaufwand nach diesem Modellansatz um ca. 50 % bis 2080 erhöhen. Dies lässt sich vor allem auf die bisher sehr kurze Vegetationsperiode aufgrund der Höhenlage zurückführen, die sich aufgrund des globalen Temperaturanstiegs deutlich verlängern wird. Tendenziell wird sich der Aufwand in den Meistereien in Hessen und Nordrhein-Westfalen nicht so stark erhöhen wie bei den Meistereien in Brandenburg und Bayern.

Die prognostizierten Einsatzstunden in Abhängigkeit der Anzahl der Tage mit Niederschlag und $T_{mit} > 10\text{ °C}$ zeigen jedoch ein anderes Bild als die erste durchgeführte Projektion. Insgesamt ist die Veränderung weitaus geringer und liegt unter 10 %. Es ist teilweise mit einem Rückgang, teilweise mit einem leichten Anstieg der Grünpflegearbeiten zu rechnen. Dies liegt vor allem daran, dass sich auch der Witterungsparameter nicht einheitlich in den verschiedenen Meistereien entwickeln wird, da es zwar zum einen wärmer wird, zum anderen aber auch trockener, was sich in der kombinierten Betrachtung weitgehend ausgleicht.

Die beiden Projektionen wurden zwar für alle Meistereien berechnet (s. Anhang 15), abgesicherte Aussagen können allerdings aufgrund der geringen Korrelationen und zum Teil unterschiedlicher Ergebnisse nicht getroffen werden. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass Mäharbeiten nicht nur witterungsabhängig durchgeführt werden, sondern auch von anderen Faktoren abhängen. Weiterhin zeigt sich, dass sich die beiden maßgebenden Witterungsparameter für die Vegetationsperiode, nämlich die Anzahl der Tage mit $T_{mit} > 10\text{ °C}$ und die Tage mit Niederschlag bei

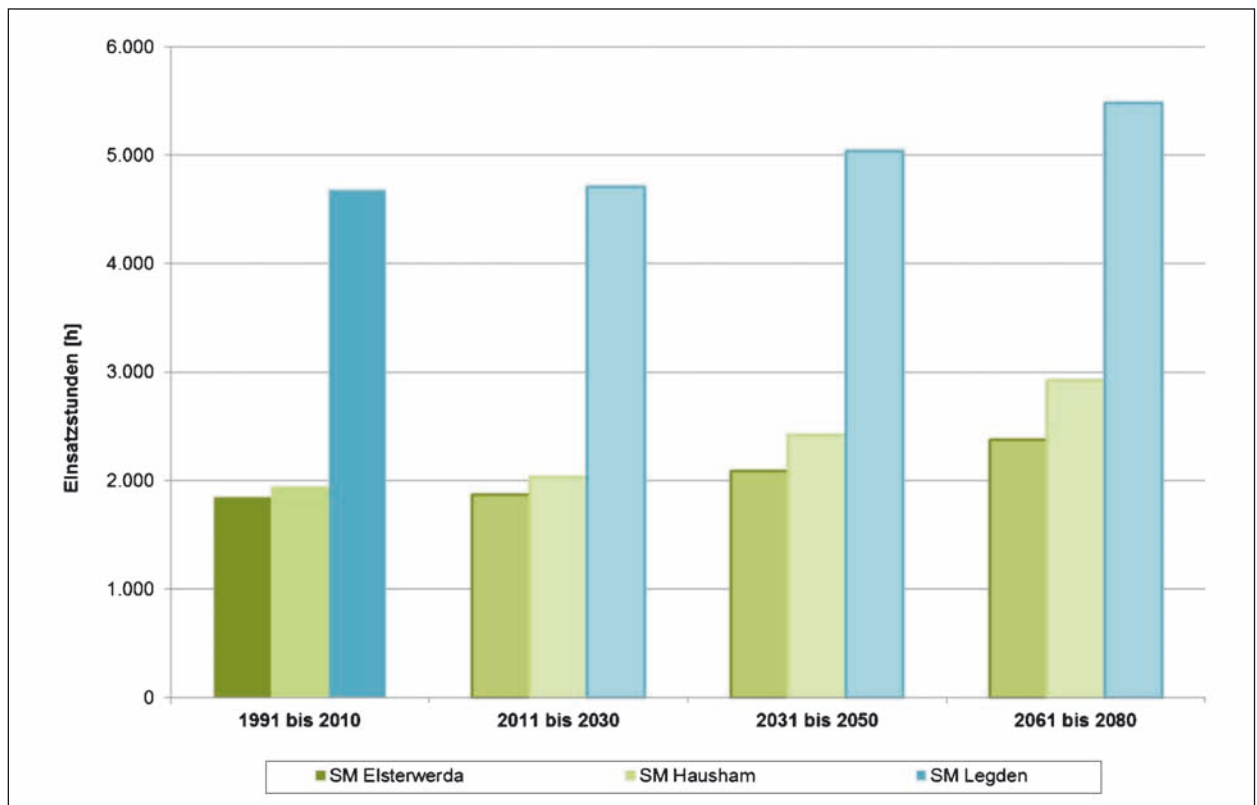


Bild 53: Rückgerechnete und projizierte Einsatzstunden für die Grünpflege im Intensivbereich in Abhängigkeit der Anzahl der Tage mit $T_{mit} > 10$ °C gemittelt über den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume für die Meistereien mit Korrelationen über 50 %

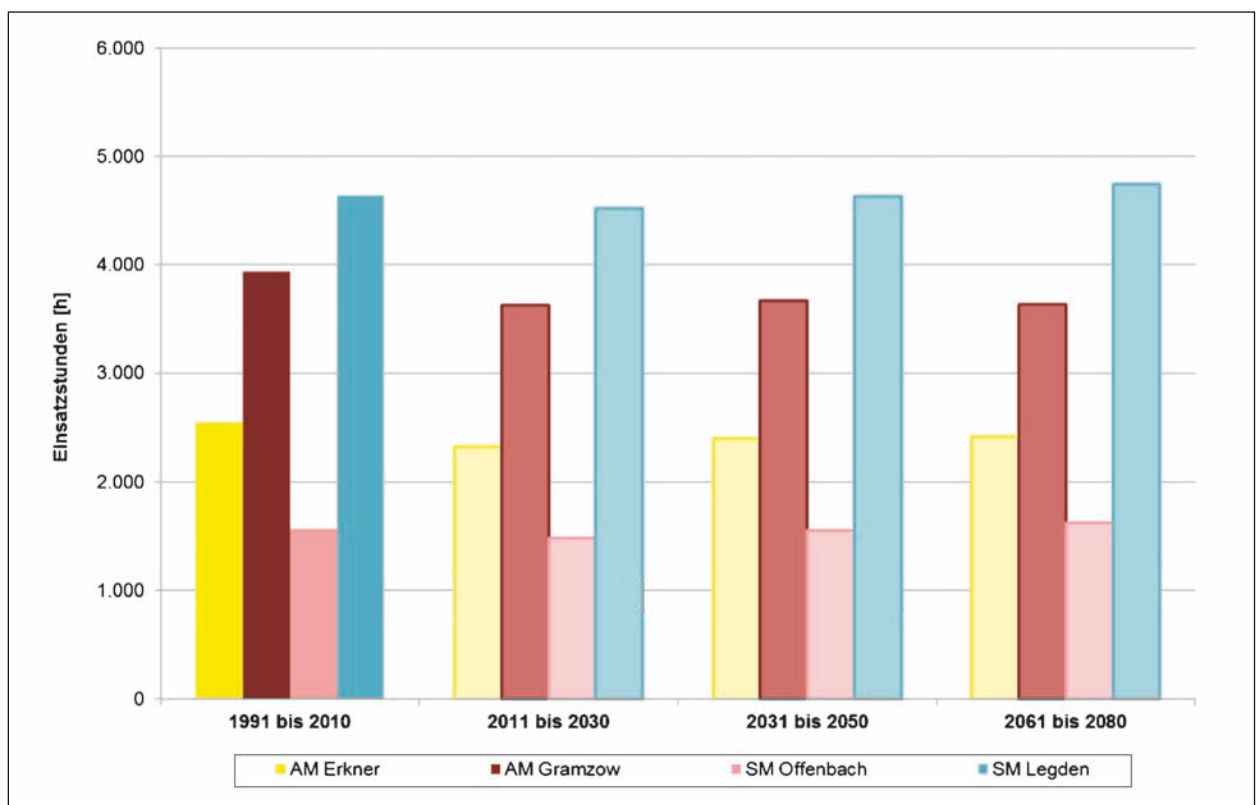


Bild 54: Rückgerechnete und projizierte Einsatzstunden für die Grünpflege im Intensivbereich in Abhängigkeit der Anzahl der Tage mit Niederschlag und $T_{mit} > 10$ °C gemittelt über den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume für die Meistereien mit Korrelationen über 50 %

dieser Temperatur, gegenläufig entwickeln werden: Während die warmen Tage zunehmen werden, wird der Niederschlag in der Vegetationsperiode eher abnehmen. Somit können die beiden durchgeführten Projektionen als untere und obere Abschätzung der voraussichtlichen Entwicklung betrachtet werden.

In der ersten Periode bis 2030 wird sich der Grünpflegeaufwand nicht signifikant ändern, im Flachland ist eher mit einem leichten Rückgang, in höheren Lagen eher mit einem leichten Anstieg zu rechnen. Ab 2030 zeigt sich dann gegenüber der Ausgangsperiode 1991 bis 2010 eine Zunahme von durchschnittlich 15 % bis 2050 und ca. 32 % bis 2080, wenn nur die Temperatur maßgebend ist, da die Anzahl der warmen Tage stark zunimmt. Bei zusätzlicher Berücksichtigung des geringer werdenden Niederschlags ist hingegen insgesamt mit einer weitgehenden Stagnation des Aufwandes zu rechnen. Nur für die Meistereien in höheren Lagen ist auch hierbei eine Zunahme des Grünpflegeaufwandes um 5 bis 10 % bis 2050 sowie 10 bis 20 % bis 2080 projiziert worden. Somit wird sich der Grünpflegeaufwand bis 2030 nicht signifikant ändern, während anschließend durch die stärkere Erwärmung tendenziell mit besseren Wachstumsbedingungen zu rechnen ist – dies insbesondere in den höheren Lagen, da dort der Rückgang der Niederschläge nicht so deutlich ausfällt wie im Flachland. Diese besseren Wachstumsbedingungen führen vor allem dann zu einem höherem Mäh Aufwand, der in einer Größenordnung von 1.000 Stunden pro Jahr liegen kann, wenn hierdurch im Intensivbereich eine zusätzliche Mahd erforderlich wird.

5.4 Winterdienst

Anders als bei den Aufwendungen infolge von Frostschäden sowie den Grünpflegearbeiten im Intensivbereich ist der Winterdienst unmittelbar von der Witterung abhängig, sodass sowohl bei den Aufwendungen für Räum- und Streueinsätze als auch bei den Salzverbräuchen bei allen Meistereien ein hohe Korrelation zu den zugrunde liegenden Witterungsparametern vorliegt (s. Tabelle 7). Mithilfe des linearen Modells (s. Kapitel 3.3.3) wurden die identifizierten Parameter

- Summe Neuschneehöhe,
- Anzahl der Schneefalltage,
- Anzahl der Glatteistage,

- Anzahl der Reifglättetage

bei der Projektion der Einsatzstunden und der Salzverbräuche berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Projektionen sind in Anhang 18 differenziert für jede Meisterei dargestellt, wobei neben der mittleren Projektion auch die maximale bzw. minimale Projektion aufgrund der 100 durchgeführten Realisierungen für die Klimaparameter dargestellt sind. Bild 55 und Bild 56 zeigen die mittleren Einsatzstunden und Salzverbräuche je betrachteter Periode für jede Meisterei, die Daten hierzu sind in Anhang 17 tabellarisch zusammengestellt.

In der ersten Periode bis 2030 nehmen die Einsatzstunden zunächst um durchschnittlich 9,2 % (s. Bild 55) zu. In den weiteren Perioden ist hingegen ein deutlicher Rückgang der Einsatzstunden zu erwarten, dieser liegt für die Periode 2031 bis 2050 bei durchschnittlich 16 % und für die Periode 2061 bis 2080 bei durchschnittlich 40 % gegenüber der Ausgangsperiode von 1991 bis 2010. Maßgebend für diese Projektion ist die Entwicklung der Klimaparameter Neuschneehöhe und Anzahl der Schneetage, die ebenfalls für die Periode bis 2030 zunehmen, bevor sie dann signifikant zurückgehen (s. Kapitel 4.2.3). Die Anzahl der Tage mit Glatteis und Reifglätte, die bereits in der Periode bis 2030 deutlich abnehmen wird, ist für den Winterdienstaufwand und Salzverbrauch insgesamt hingegen sekundär.

Absolut können diese Entwicklungen zu einer Zunahme der Einsatzstunden bis 2030 in einer Größenordnung von 200 bis 700 Stunden je Meisterei und Jahr führen, während dann der Rückgang bis 2030 200 bis 800 Stunden und bis 2080 vielfach deutlich über 1.000 Einsatzstunden liegen wird.

Signifikante Einflüsse der regionalen Lage auf diese Entwicklung sind nicht erkennbar. Der Umstand, dass in den Meistereien im Flachland tendenziell mehr Einsätze bei Glatteis und Reifglätte erforderlich sind als in den Höhenlagen, spiegelt sich in den Projektionen nur teilweise wider. Beispielsweise ist bei den Straßenmeistereien Fürstenwalde und Legden schon bis 2030 eine minimale Reduktion der Einsatzstunden zu erwarten, während für die beiden Meistereien im Rhein-Main-Gebiet (SM Offenbach und AM Rodgau) mit einer Zunahme um über 10 % für diesen Zeitraum zu rechnen ist. Für die weiteren Perioden bis 2080 ist der

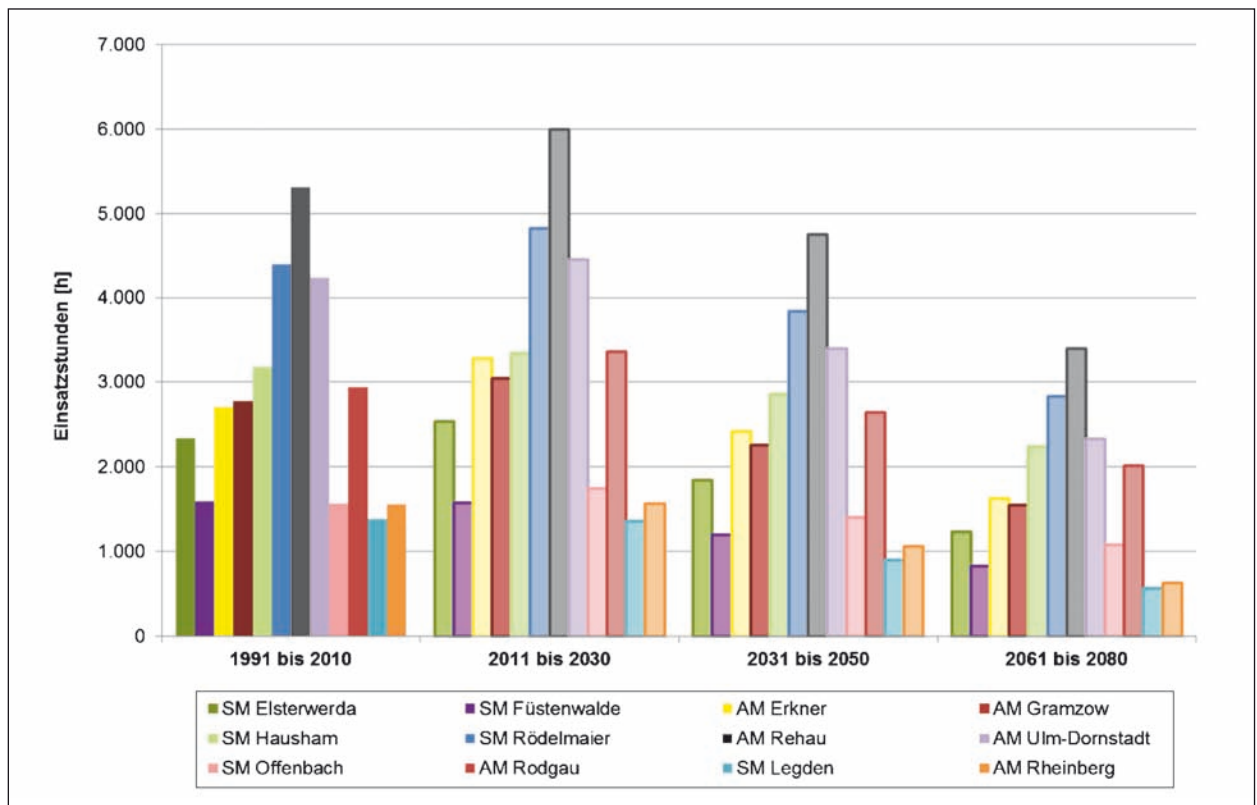


Bild 55: Rückgerechnete und prognostizierte Einsatzstunden für die Räum- und Streueinsätze gemittelt über den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

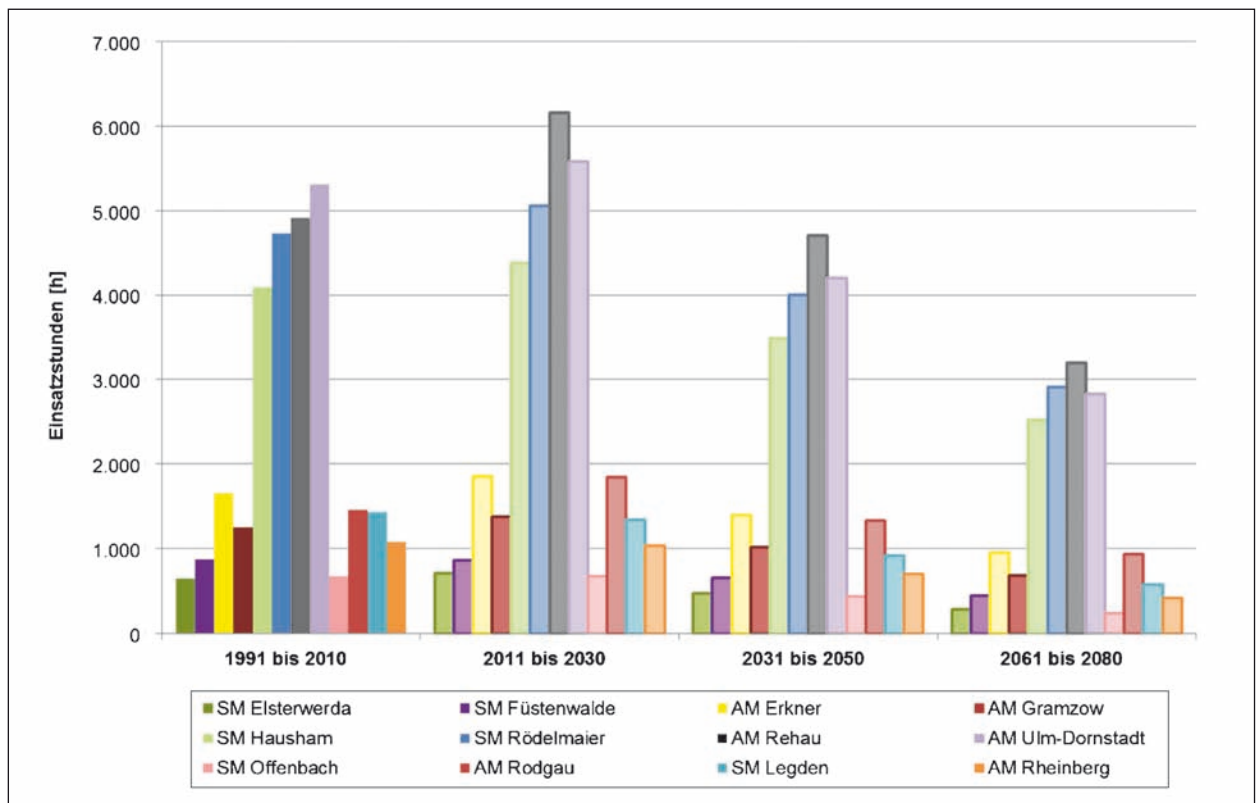


Bild 56: Rückgerechnete und prognostizierte Salzverbräuche gemittelt über den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

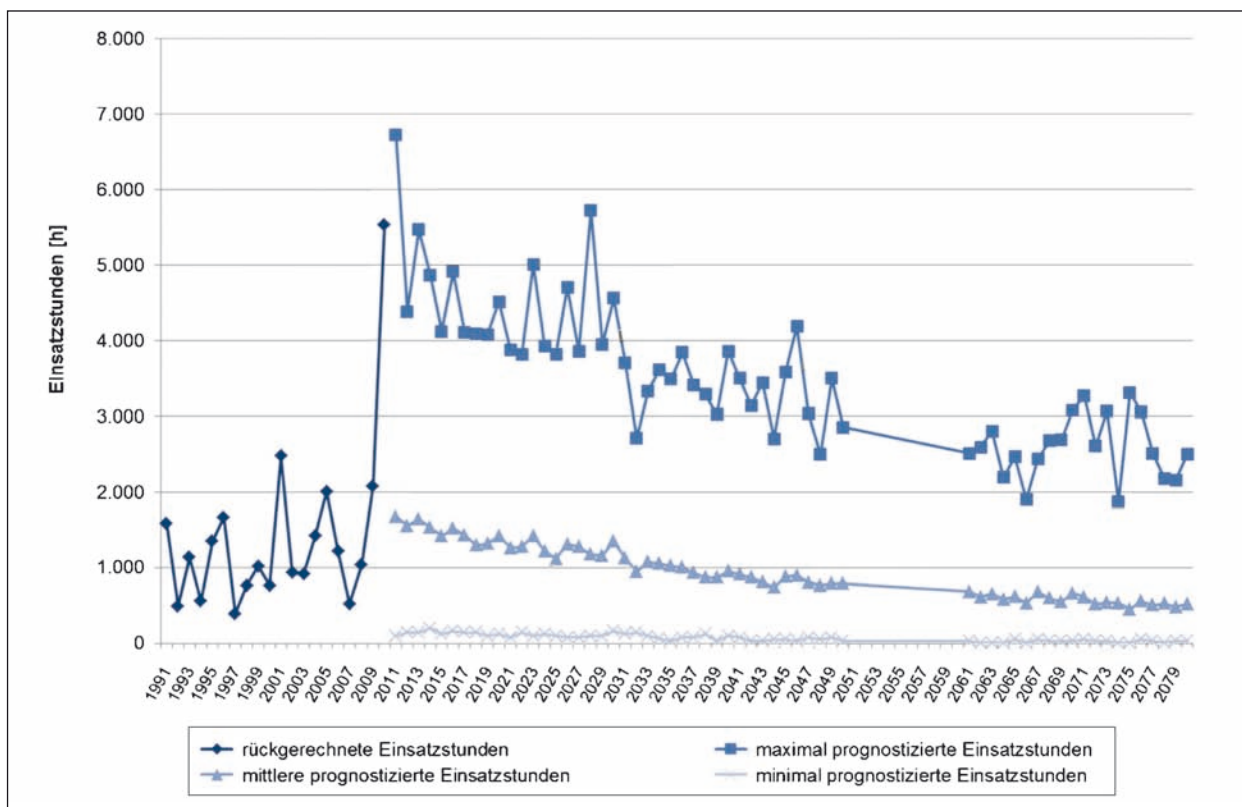


Bild 57: Entwicklung der prognostizierten Einsatzstunden für Räum- und Streueinsätze in der SM Legden (Mittelwert, Maximum und Minimum aus 100 Realisierungen der Klimaprojektion)

Rückgang der Einsatzstunden teilweise nach Höhenlage differenzierbar. Für die vier Meistereien im Mittelgebirge bzw. Voralpengebiet liegt der Rückgang bei durchschnittlich 36 % bis 2080 gegenüber 45 % für die Meistereien im Flachland. Auffallend ist auch, dass der geringste Rückgang für die SM Hausham projiziert wurde. Somit ist davon auszugehen, dass im Flachland der Klimawandel zu einer etwas stärkeren Abnahme des Winterdienstes insgesamt führt als in höheren Lagen, was mit der deutlicheren Entwicklung der Klimaparameter, die für Eis- und Reifglätte maßgebend sind, erklärt werden kann.

Weitgehend analog zu den Einsatzstunden für Räum- und Streueinsätze wird sich auch der mittlere Salzverbrauch entwickeln (s. Bild 56). Hier liegt die Zunahme bis 2030 bei durchschnittlich knapp 10 %, während die Abnahme in den darauffolgenden Perioden mit 17 % bis 2050 bzw. 43 % bis 2080 etwas höher als bei den Einsatzstunden ausfällt. Auch der Einfluss der Höhenlage der Meistereien auf die Entwicklung des Salzverbrauchs ist ähnlich: Bis 2080 ist für die vier Meistereien in Höhenlage ein Rückgang von knapp 40 % projiziert worden, während er in den Meistereien im Flachland bei 51 % liegen wird.

Wie bereits heute werden auch in Zukunft Winterdienstaufwand und Salzverbrauch in den einzelnen Wintern stark variieren. Bild 57 und Bild 58 zeigen exemplarisch für die SM Legden die Bandbreite der prognostizierten Einsatzstunden und Salzverbräuche, die sich ergeben, wenn man die Extremwerte der 100 durchgeführten Realisierungen der Klimaprojektion zugrunde legt. Diese Bandbreite ist in den anderen untersuchten Meistereien ähnlich (siehe Anhang 18). Es wird deutlich, dass der extreme Winter 2010 noch innerhalb dieser Bandbreite liegt und dass somit die Bandbreite des Prognosemodells auch diesen abdeckt. Sowohl bei den Einsatzstunden als auch den Salzverbräuchen können Spitzenbelastungen, wie sie 2010 in vielen Regionen Deutschlands aufgetreten sind, auch weiterhin möglich sein. Darüber hinausgehende Werte werden jedoch nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auftreten. Das Risiko hierfür wird langfristig abnehmen.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass der Umfang des Winterdienstes gleichermaßen wie der Salzverbrauch zunächst bis 2030 um knapp 10 % zunehmen wird, allerdings ist danach mit einem massiven Rückgang ($\bar{\emptyset}$ 16 % bis 2050) ($\bar{\emptyset}$ 40 % bis 2080) zu rechnen. Tendenziell ist

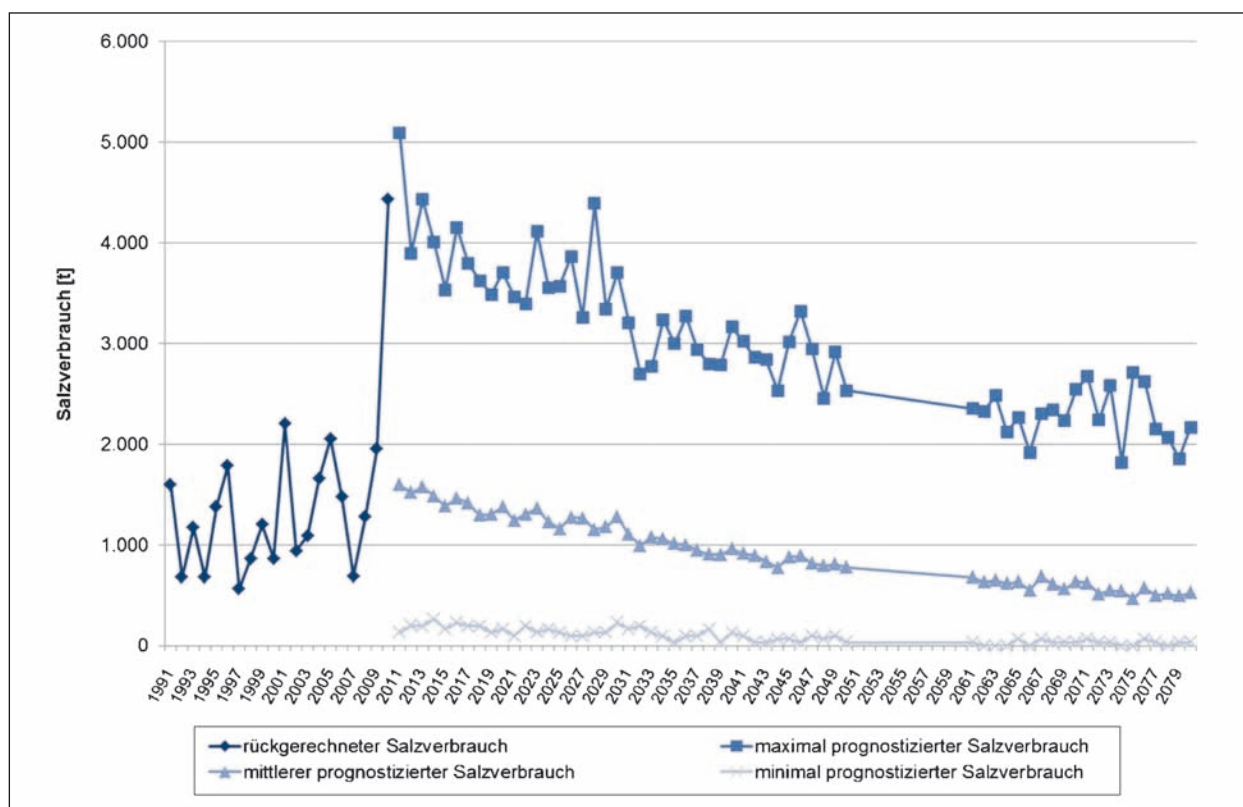


Bild 58: Entwicklung des prognostizierten Salzverbrauchs in der SM Legden (Mittelwert, Maximum und Minimum aus 100 Realisierungen der Klimaprojektion)

davon auszugehen, dass der langfristige Rückgang bei Meistereien im Flachland etwas stärker ausgeprägt sein wird als bei den Meistereien in den Höhenlagen. Trotz der durchschnittlichen Zunahme von Einsatzstunden und Salzverbrauch in der Periode bis 2030 wird die Wahrscheinlichkeit und Ausprägung extremer Witterungsperioden bis 2030 nicht signifikant zunehmen. Sie entsprechen in etwa dem Winter 2010, der in vielen Regionen Deutschlands zu einem extremem Winterdienstumfang führte. Somit ist bis 2030 infolge des zusätzlichen Aufwandes und Salzverbrauchs mit zusätzlichen Kosten für den Winterdienst zu rechnen. Wenn heute ausreichende Ressourcen (Personal, Fahrzeuge und Geräte) vorhanden sind, dann sind in der Regel keine zusätzlichen Ressourcen zur Abdeckung des zusätzlichen Aufwandes erforderlich, ihre Auslastung steigt aber. Ebenso geben die Ergebnisse keine Hinweise, dass die baulichen Anlagen für die Streustofflagerung anzupassen sind. Ausstattung und Dimensionierung der Salzlagerkapazitäten orientieren sich eher an Auslastungsspitzen bei extremen Witterungslagen als an mittleren Verbräuchen. Wie die Projektionen zeigen, ist eine Ausstattung und Salzlagerkapazität, die auf Basis des Winters 2010 oder vergleichbarer extremer Winter dimensioniert ist, in der Regel auch für die

maximalen zu erwartenden Winterereignisse bis 2030 ausreichend.

5.5 Auswirkungen von Extremwetterereignissen

Extreme Witterungsereignisse können sich unterschiedlich auf den Betriebsdienst auswirken (s. Kapitel 3.2): Zum einen werden zusätzliche Kontrollen, z. B. nach Starkregen oder Sturm, notwendig sowie Reinigungs- und Aufräumarbeiten erforderlich. Zum anderen treten Schäden an Fahrbahnen, Bauwerken und Ausstattung nur bei extremen Witterungssituationen, z. B. Hitze auf (s. Bild 59), bei denen durch den Straßenbetriebsdienst dann ggf. verkehrssichernde Maßnahmen durchzuführen sind. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Durchführung von Arbeiten des Straßenbetriebsdienstes ggf. beeinträchtigt werden.

Hitzeperioden

Aus der durchgeführten Klimaprojektion ist abzuleiten, dass die Anzahl der heißen Tage ($T_{\max} > 30 \text{ °C}$) bis 2030 leicht zurückgehen wird, wobei dieser Rückgang vielfach nicht signifikant ist. Ab

2030 nehmen die heißen Tage dann signifikant zu, und zwar um durchschnittlich 3,1 Tage bis 2050 und um 8,9 Tage bis 2080 (s. Anhang 10). Ähnlich wird sich ein weiterer Parameter entwickeln, und zwar die Anzahl der Tage mit Temperaturen über 25 °C und einer Sonnenscheindauer von mindestens 6 h, der insbesondere für eine starke Erwärmung der Fahrbahnen und daraus resultierende Schäden von Bedeutung ist (s. Bild 60). Für die Periode von 2010 bis 2030 ist hier ein durchschnittlicher Rückgang um ca. 9 % zu verzeichnen, der dann bis 2050 kom-



Bild 59: Hitzeschaden (Blow-up) auf der A93 in Niederbayern im Juni 2013 [NEFZGER 2013]

pensiert ist und bis 2080 durch eine Zunahme dieser Tage um durchschnittlich 30 % gegenüber dem Zeitraum 1991 bis 2010 abgelöst wird. Die beiden Meistereien im Rhein-Main-Gebiet sind von dieser Zunahme am meisten betroffen.

Aus dem langfristigen Anstieg dieser beider Parameter kann langfristig auf vermehrte Hitzeschäden an Fahrbahnen, wie den genannten Blow-up an Betonfahrbahnen, aber auch Spurrinnen an Asphaltfahrbahnen geschlossen werden. Bis 2050 ist hierbei jedoch mit keiner signifikanten Zunahme zu rechnen. Der Mehraufwand für den Straßenbetriebsdienst ist jedoch nur begrenzt, da diese Schäden im Zuge von Erhaltungsmaßnahmen beseitigt werden. Durch den Betriebsdienst sind jedoch ggf. zusätzliche Kontrollfahrten sowie verkehrsregelnde Maßnahmen zu erbringen. Beispielsweise wird bei entsprechender Witterung die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Betonfahrbahnen durch die bayerische Straßenbauverwaltung auf 80 km/h beschränkt, um die Unfallfolgen eines Blow-ups für die Verkehrsteilnehmer zu reduzieren. Weiterhin werden zusätzliche Kontrollfahrten durchgeführt, um Abplatzungen an den Fugenkanten als Indikator für einen bevorstehenden Blow-up frühzeitig erkennen zu können. Aber

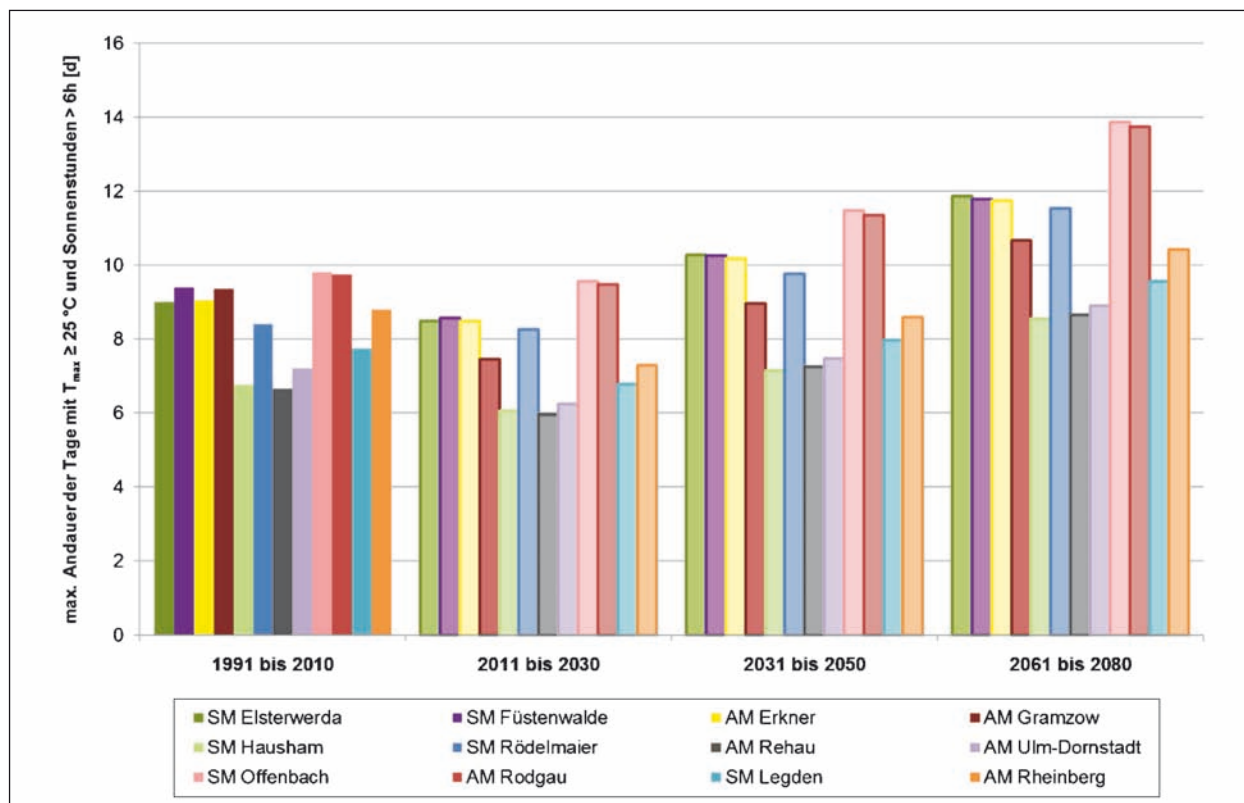


Bild 60: Maximale Andauer von heißen und sonnenreichen Perioden gemittelt über den Beobachtungszeitraum und die projizierten Zeiträume

auch auf Asphaltfahrbahnen steigt bei solchen Witterungslagen die Gefahr von Spurrinnen. Auch diese werden nicht durch den Straßenbetriebsdienst beseitigt, haben aber ggf. verkehrsregelnde Maßnahmen zur Folge.

Des Weiteren kann die Zunahme der Hitzeperioden ab 2030 zu einer Reduktion der Geräteleistung durch vermehrt notwendige Abkühlzeiten und zu vermehrten Ausfällen von z. B. Mähgeräten infolge überhitzter Luftfilter führen. Ebenso kann die Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter bei Hitzeperioden beeinträchtigt werden. Um diese negativen Folgen zu reduzieren, kann beispielsweise die Verlegung von Arbeiten in die kühleren Tagesrandzeiten sinnvoll sein, so wie es bereits heute in einzelnen Meistereien in Absprache mit den Mitarbeitern erfolgt.

In Hitzeperioden kann es auch zu einem verstärkten Ausfall elektronischer Verkehrszeichen kommen, was zusätzliche Wartungs- und Reparaturarbeiten zur Folge haben kann. Weiterhin sind die Gehölze bei Hitzeperioden anfälliger für Schädlinge, woraus vermehrte Aufwendungen in der Gehölzpflege resultieren können.

Trocken- und Dauerregenperioden

Die Projektion von Trockenperioden, d. h. Perioden von mindestens 10 Tagen ohne Niederschlag, bzw. Dauerregenperioden, d. h. Perioden von mindestens 5 Tagen mit einem Niederschlag größer 0,5 mm, spiegelt einen leichten Anstieg der Niederschläge bis 2030 und danach einen Rückgang der Niederschläge insgesamt wider (s. Kapitel 4.2.4). Somit werden die Trockenperioden bis 2030 um durchschnittlich 20 % zurückgehen und danach in einer Größenordnung von 10 % ansteigen. Die Dauerregenperioden hingegen werden sich bis 2050 kaum verändern, danach ist eine Abnahme von ca. 10 % projiziert. Die hieraus resultierenden Auswirkungen auf den Betriebsdienst sind insgesamt vermutlich nur gering, auch wenn diese Wetterereignisse im Einzelfall erhebliche Aufwendungen nach sich ziehen können.

Infolge Trockenperioden können u. a. folgende Arbeiten durch den Straßenbetriebsdienst erforderlich sein:

- vermehrte Gehölzpflege infolge der stärkeren Ausbreitung von Schädlingen,
- Bewässerung von Anpflanzungen, in erster Linie bei Neupflanzungen,

- Befüllung von Rückhaltebecken, um einen Dauerstau zur Erhaltung von Flora und Fauna zu gewährleisten,
- Kehr- und Reinigungsarbeiten bei Staubverwehungen von angrenzenden landwirtschaftlichen Flächen,
- Absperrarbeiten bei Wald- und Vegetationsbränden.

Dauerregenereignisse verursachen vor allem Hochwasser, die Absperrarbeiten im jeweiligen Straßenabschnitt notwendig machen. Durch lang anhaltende Regenfälle aufgeweichte Böden können auch zu Hang- oder Böschungsrutschungen führen, die ebenfalls zusätzliche Absperrmaßnahmen, aber auch Aufräum- und Reinigungsarbeiten nach sich ziehen. Auch der Reinigungsaufwand an Verkehrsflächen und der Straßenausstattung ist infolge von Dauerregenperioden höher einzustufen. Die Aufwendungen nach einem extremen Dauerregenereignis sind sehr unterschiedlich, können aber durchaus über 100 Mannstunden in einer Meisterei betragen.

Weitere Extremwetterereignisse

Die Projektionen der weiteren Klimaparameter, die Extremwetterereignisse charakterisieren, wie Tage mit Extremniederschlag, Sturmtage, Dauerfrostperioden oder Tage mit Schneeverwehungen, zeigen vielfach eher eine Abnahme dieser Extremwetterereignisse (s. Kapitel 4.2.4). Da diese Entwicklungen zum Teil im Widerspruch zu anderen Klimaprojektionen stehen, können keine zuverlässigen Aussagen zu den Auswirkungen auf den Straßenbetriebsdienst getroffen werden. Es wird deutlich, dass sich wie bereits erwähnt mit dem angewandten Prognosemodell Extremwetterereignisse nur schlecht prognostizieren lassen, sodass genauere Untersuchungen nach Vorliegen der Berechnungsergebnisse mit den erforderlichen dynamischen Klimamodellen auf Basis der aktualisierten Szenariendaten sinnvoll sind.

Zusammenfassend können aus diesen Extremwetterereignissen im Wesentlichen folgende Auswirkungen für den Straßenbetriebsdienst resultieren:

- Einsatz von rotierenden Schneeräumgeräten zur Beseitigung von Schneeverwehungen und zur Beseitigung von Randwällen bei dauerhaftem Schneefall,

- Kontrollfahrten und Aufräumarbeiten nach Sturmereignissen und Starkniederschlägen, insbesondere in waldreichen Gebieten aber auch z. B. bei Wildschutzzäunen sowie hieraus resultierende Reinigungsarbeiten der Entwässerungseinrichtungen.

6 Optimierung des Betriebsdienstes zur Minimierung des Schadstoffausstoßes durch den Verkehr

Neben der Analyse, wie sich der Klimawandel auf den Straßenbetriebsdienst auswirkt, ist es auch Ziel des FE-Vorhabens, abzuschätzen, inwieweit der Straßenbetriebsdienst optimiert werden kann, um die Emission der klimabeeinflussenden Schadstoffe zu minimieren. Hierfür werden auf Grundlage pauschalierter Ansätze die Schadstoffemissionen abgeschätzt, die durch den Straßenbetriebsdienst hervorgerufen werden. Im Wesentlichen sind dies die Emissionen der Betriebsdienstfahrzeuge sowie zum anderen zusätzliche Emissionen durch den Kfz-Verkehr infolge Verkehrsbehinderungen, die durch Arbeiten des Straßenbetriebsdienstes verursacht werden. Verkehrsbehinderungen mit Staus infolge des Betriebsdienstes treten im Wesentlichen auf den Autobahnen auf, im nachgeordneten Netz sind sie meist vernachlässigbar. In Relation zu den Emissionen des Verkehrs insgesamt lassen sich dann die Potenziale zur Minimierung des Schadstoffausstoßes abschätzen, die durch eine Optimierung des Betriebsdienstes vorhanden sind.

Darüber hinaus kann aber auch die Qualität des Straßenbetriebsdienstes Auswirkungen auf den Verkehr haben. Beispielsweise kann ein unzureichender Winterdienst zu Verkehrsbehinderungen führen, die je nach Ausprägung ein Kraftstoffmeherverbrauch und somit zusätzliche Schadstoffemissionen zur Folge haben. Es ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass die Verkehrsleistung bei winterlichen Straßenverhältnissen insgesamt sinkt. Quantitative Aussagen hierzu sind aufgrund fehlender Daten nicht möglich. Allerdings ist davon auszugehen, dass diese Auswirkungen eher gering sind, da sie nur bei besonderen Witterungssituationen und dann auch nur in Teilnetzen auftreten.

Bewertungsgrundlage

Die Bewertung der Schadstoffemissionen erfolgt gemäß DIN EN 16258 [2013] „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr), Ausgabe 2013“. Hiernach sind neben CO₂ weitere Treibhausgase zu berücksichtigen, deren Treibhausgaspotenzial über Äquivalenzfaktoren berücksichtigt wird. Als Kenngröße wird das Kohlendioxid-Äquivalent (CO₂e) angesetzt. Neben den Emissionen während des unmittelbaren Transportprozesses infolge Kraftstoffverbrennung werden auch die Emissionen berücksichtigt, die bei Förderung, Transport, Aufbereitung und Umwandlung des Energieträgers auftreten (Well-to-Wheel-Bewertung) [DIN 2013].

Gemäß Anhang 1 der DIN EN 16258 [2013] können folgende spezifische Emissionsfaktoren in Abhängigkeit des Treibstoffverbrauchs angesetzt werden:

- Dieselmotorkraftstoff (mit 5 % Biodiesel):
3,17 kg CO₂e/l,
- Ottomotorkraftstoff (mit 5 % Ethanol):
2,80 kg CO₂e/l.

Auf eine differenzierte Berücksichtigung unterschiedlicher Kraftstoffsorten wird verzichtet, da zum einen hierzu differenzierte Angaben zur Fahrzeugausstattung erforderlich wären, zum anderen die Emissionen von Kraftstoff ohne Biodiesel- bzw. Ethanolanteil nur 2 bis 3 % höher liegen [DIN 2013].

CO₂e-Emissionen durch Fahrzeuge des Straßenbetriebsdienstes

Auf Grundlage stichprobenhaft vorliegender Kraftstoffverbrauchsdaten kann davon ausgegangen werden, dass der Dieserverbrauch in einer Straßenmeisterei bei ca. 60.000 l pro Jahr liegt. Für Autobahnmeistereien mit größerem Fuhrpark werden 90.000 l pro Jahr angesetzt, da zwar einerseits mehr Lkw in einer Autobahnmeisterei vorhanden sind, diese aber andererseits vielfach zur Absicherung eingesetzt werden, bei der der Kraftstoffverbrauch nur gering ist. Der Verbrauch an Ottomotorkraftstoff wird vernachlässigt.

Gemäß PORWOLLIK [2013] gibt es in Deutschland 583 Straßen- und 185 Autobahnmeistereien. Der Gesamtverbrauch der Betriebsdienstfahrzeuge liegt damit in einer Größenordnung von ca. 50 Mio l

Diesel pro Jahr. Hierbei unberücksichtigt sind die Verbräuche der Fahrzeuge privater Dienstleister, die z. B. im Winterdienst oder auf Konzessionsstrecken eingesetzt werden. Setzt man für diese Fahrzeuge einen pauschalen Zuschlag von 20 % an, so liegt der Jahresverbrauch bei ca. 60 Mio. l Diesel pro Jahr. Mithilfe des spezifische Emissionsfaktors von 3,17 kg CO₂e/l Diesel kann somit von einer Gesamtemission durch die Fahrzeuge des Straßenbetriebsdienstes in einer Größenordnung von 190.000 t CO₂e ausgegangen werden.

CO₂e-Emissionen durch Verkehrsbehinderungen auf Autobahnen infolge des Straßenbetriebsdienstes

Der Einfluss von Verkehrsbehinderungen auf den Kraftstoffverbrauch ist äußerst komplex. Zu berücksichtigen sind hierbei u. a. folgende Aspekte:

- Verkehrsbehinderungen führen in der Regel nicht zu vollständigen Stillstand, sondern zum Fahren mit stark reduzierter Geschwindigkeit.
- Eine reduzierte Geschwindigkeit kann sich auch emissionsmindernd, d. h. positiv auswirken, wenn man eine Reduktion von beispielsweise der Richtgeschwindigkeit von 130 km/h auf ca. 80 km/h ansetzt. Erst bei geringeren Geschwindigkeiten nimmt der Kraftstoffverbrauch zu.
- Infolge der Verkehrsbehinderungen kommt es zu zahlreichen Anfahr- und Beschleunigungsvorgängen, die mit erhöhten Emissionen verbunden sind.
- Arbeitsstellen des Betriebsdienstes auf Autobahnen führen nur bei hohen Verkehrsmengen und Fahrstreifenreduktion zu signifikanten Verkehrsbehinderungen. Ihr Umfang ist daher stark von Verkehrsbelastungen, vorhandenen Querschnitten und Zeitraum der Arbeiten abhängig.

Um dennoch eine Abschätzung der Gesamtemissionen vornehmen zu können, wird der Zeitverlust infolge Arbeitsstellen kürzerer Dauer (AkD) zugrunde gelegt, der im Rahmen veröffentlichter Untersuchungen abgeschätzt wurde. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass dieser Zeitverlust vollständig durch Fahrzeugstillstand mit Motor im Leerlauf verursacht wird und ansonsten das Fahrverhalten nicht beeinflusst wird.

Nach LISTL et al. [2007] liegt die Summe der Stauzeiten im bundesdeutschen Autobahnnetz bei

insgesamt ca. 144 Mio Stunden pro Jahr. Hiervon entfallen ca. 10 % auf Lkw und 90 % auf Pkw. Der Anteil der Stautunden infolge von Arbeitsstellen kann mit ca. 35 %, d. h. 50 Mio. Stunden abgeschätzt werden, wobei nicht nach Arbeitsstellen kürzerer und längerer Dauer differenziert wird. Die Staukosten durch Zeitverluste infolge aller Arbeitsstellen betragen ca. 1,26 Mrd. EUR/a.

STÖCKERT [2001] hatte in einer umfangreichen Untersuchung die Kosten für die Zeitverluste bei AkD mit umgerechnet 1,1 Mrd. EUR pro Jahr quantifiziert. Ein direkter Vergleich dieser Kennzahlen ist aufgrund der unterschiedlichen Betrachtungszeiträume und den damit einhergehenden Änderungen der Verkehrsmengen, Ausbaustände und betrieblich-organisatorischer Maßnahmen zur Optimierung des Verkehrsflusses bei AkD nicht möglich. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der Zeitverluste von 50 Mio. Stunden infolge AkD auftreten, sodass diese als obere Abschätzung herangezogen werden.

Der Kraftstoffverbrauch von Pkw im Leerlauf kann auf Grundlage von Herstellerangaben mit ca. 0,7 l/h angesetzt werden. Für Lkw ist er u. a. aufgrund zusätzlicher Aggregate differenzierter zu betrachten; als Mittelwert werden 2,5 l/h angesetzt. Für die 45 Mio. Stautunden der Pkw beträgt der zusätzliche Kraftstoffverbrauch somit 31,5 Mio. l, für die Lkw sind bei 5 Mio. Stautunden 12,5 Mio. l anzusetzen. Überschlägig kann davon ausgegangen werden, dass die Hälfte der Pkw Dieselmotoren benötigt, sodass der Mehrverbrauch 15,8 Mio. l Ottokraftstoff und 28,2 Mio. l Dieselmotoren beträgt. Mithilfe der spezifischen Emissionsfaktoren von 2,80 kg CO₂e/l Ottokraftstoff und 3,17 kg CO₂e/l Diesel kann die CO₂e-Emission infolge AkD mit insgesamt ca. 135.000 t CO₂e abgeschätzt werden.

CO₂e-Emissionen durch den Verkehr insgesamt

Der Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr betrug 2010 37,9 Mrd. l Diesel und 28,6 Mrd. l Ottokraftstoff [BMVBS 2012]. Hieraus resultieren bundesweit ca. 200 Mio t CO₂e-Emissionen, wenn man die spezifischen Emissionsfaktoren wie oben ansetzt.

Somit liegt der Anteil der CO₂e-Emissionen durch die Fahrzeuge des Straßenbetriebsdienstes bei knapp 1 % der gesamten Emissionen durch den Straßenverkehr. Die durch Verkehrsbehinderungen infolge des Straßenbetriebsdienstes verursachten 135.000 t CO₂e haben einen weiteren Anteil von

ca. 0,7 % an den Gesamtemissionen. Es wird deutlich, dass der Anteil der durch den Straßenbetriebsdienst verursachten Emissionen sehr gering ist und dass somit auch nur ein sehr geringer Beitrag an der Minderung der Emissionen insgesamt möglich ist.

Unabhängig hiervon sind jedoch unterschiedliche Maßnahmen möglich, die die Emissionen reduzieren. Mit ihnen sind nicht nur ökologische Vorteile, sondern auch weitere betriebs- und volkswirtschaftliche Vorteile verbunden. Die Reduktion der CO₂e-Emissionen sollte bei der Bewertung dieser Optimierungsmaßnahmen zusätzlich berücksichtigt werden.

Zur Reduktion der Emissionen der Betriebsdienstfahrzeuge können folgende Maßnahmen beitragen:

- Einsatz von Fahrzeugen mit neuester Abgas-technologie. Diese sollte im Rahmen von Neu- und Ersatzbeschaffungen berücksichtigt werden, hierüber hinausgehende Investitionen erscheinen jedoch nicht zweckmäßig.
- Optimierung des Kraftstoffverbrauchs bei Transport- und Einsatzfahrten sowie dem Einsatz von An- und Aufbaugeräten. Hiermit verbunden sind unmittelbare Kosteneinsparungen, sodass sich zusätzliche Investitionen hierfür auch betriebswirtschaftlich amortisieren können. Schulungen zur kraftstoffoptimierten Fahrweise und den optimierten Einsatz von Geräteträgern sind in diesem Zusammenhang zu empfehlen.
- Optimierung der Einsätze im Betriebsdienst durch bedarfsgerechten Einsatz von Fahrzeugen und Geräteträgern, Leerwegeminimierung bei der Routenplanung, z. B. im Winterdienst sowie die rein bedarfsorientierte Aufgabenerfüllung insgesamt im Sinne einer wirtschaftlichkeitsorientierten Steuerung des Straßenbetriebsdienstes.

Zur Minimierung der Verkehrsbehinderungen infolge AkD auf Autobahnen wurden in der Vergangenheit umfangreiche Untersuchungen durchgeführt [ROOS et al. 2006]. Hierbei hat sich gezeigt, dass u. a. folgende Maßnahmen hohes Potenzial zur Stauminimierung haben, sodass sie durch zahlreiche Straßenbauverwaltungen vermehrt zum Einsatz kommen:

- Verlegung der Arbeiten in verkehrsarme Zeiten (Tagesrandzeiten, Nacht, Wochenende),

- Mitnutzung des Standstreifens bei Arbeiten am Mittelstreifen, um eine Fahrstreifenreduktion zu vermeiden,
- Absicherung mit Verschwenkung: Auch bei Sperrung des rechten Fahrstreifens wird der linke Fahrstreifen eingezogen und der Verkehr anschließend verschwenkt, da die Leistungsfähigkeit an der Engstelle hierbei größer ist als bei Einzug des rechten Fahrstreifens,
- Bündelung von Arbeitsstellen, um die Anzahl der Eingriffe in den Verkehrsraum zu minimieren,
- Arbeitsunterbrechung bei beginnender Staubil-dung, um lang anhaltende Staus zu vermeiden.

Welche Maßnahmen unter welchen Randbedingungen sinnvoll sind, hängt u. a. von der Verkehrsbelastung, der Linienführung, den Fahrbahnquerschnitten, den durchzuführenden Arbeiten und den verfügbaren Fahrzeug-, Geräte- und Personalressourcen ab [ROOS et al. 2006].

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zielsetzung des FE-Vorhabens „Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst“ ist die Abschätzung der Wechselwirkungen zwischen Klimawandel und Straßenbetriebsdienst. Hierfür wurden in einem ersten Schritt die Einflüsse der Witterung auf den Straßenbetriebsdienst analysiert, bevor dann in der weiteren Bearbeitung die künftige Entwicklung der maßgebenden Witterungsparameter unter Berücksichtigung des Klimawandels berechnet und daraus abgeleitet Aussagen zum Einfluss des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst getroffen werden können. Ergänzend wurde im FE-Vorhaben auch abgeschätzt, inwieweit der Straßenbetriebsdienst optimiert werden kann, um die Emission der klimabeeinflussenden Schadstoffe zu minimieren.

Außer für den Winterdienst wurden in der Vergangenheit keine weitergehenden Untersuchungen zum Einfluss der Witterung auf den Straßenbetriebsdienst durchgeführt. Zwar ist die Kausalität auch in vielen anderen Leistungsbereichen sicherlich gegeben, allerdings sind die Einflussgrößen weder identifiziert noch quantifiziert. Für den Winterdienst gibt es unterschiedliche Winterindizes, aus denen sich in Abhängigkeit der Witterungspa-

parameter, wie Neuschneehöhe, Frosttage etc., Aufwand oder Salzverbrauch ableiten und dann mit erfassten Daten vergleichen lassen.

Aufgrund des Klimawandels ist für Deutschland mit einem Anstieg der mittleren Temperatur um ca. 1 K bis 2050 und um weitere 3 K bis 2100 zu rechnen. Dieser Anstieg wird jedoch regional unterschiedlich ausgeprägt sein und auch jahreszeitlich unterschiedlich ausfallen. Darüber hinaus werden sich neben der Temperatur Niederschlag, Wind und andere meteorologische Parameter infolge des globalen Klimawandels regional ändern.

Es ist davon auszugehen, dass es Auswirkungen auf die Straßeninfrastruktur insgesamt geben wird. Hierzu laufende oder abgeschlossene Untersuchungen haben vor allem Einflüsse auf den Straßenaufbau und die Ingenieurbauwerke, die Entwässerungseinrichtungen, die Erdbauwerke und die elektrotechnische Ausstattung identifiziert. Hieraus resultieren geänderte Anforderungen an Planung, Dimensionierung und Bau. Allerdings kann insbesondere im vorhandenen Straßennetz auch der Straßenbetriebsdienst betroffen sein. Darüber hinaus sind von den Auswirkungen ggf. häufigerer und heftigerer Unwetter vor allem Kontroll-, Wartungs- und Reinigungsleistungen betroffen.

Einfluss der Witterung auf die Leistungen des Straßenbetriebsdienstes

Um die Einflüsse der Witterung auf den Straßenbetriebsdienst analysieren zu können, wurden für je sechs Autobahn- und Straßenmeistereien die Personaleinsatzstunden der Jahre 2006 bis 2010 als wesentliches Maß für den Aufwand leistungsbezogen ausgewertet und den Messdaten der für die Meistereinetze relevanten Klimastationen gegenübergestellt. Die Meistereien in den Bundesländern Brandenburg, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Bayern und Baden-Württemberg sind repräsentativ für unterschiedliche Klimagebiete, Topografien und verkehrliche Randbedingungen.

Für das Forschungsvorhaben wurden exemplarisch drei Leistungen bzw. Leistungsbereiche ausgewählt, für die eine Korrelation zwischen Witterung und Aufwand zu vermuten ist: Schäden an Fahrbahnen beseitigen, Grasmahd im Intensivbereich sowie der Winterdienst (Einsatzstunden und Salzverbrauch). Darüber hinaus wurden weitere Leistungen auf Grundlage von Literaturanalyse, zwei Expertenworkshops sowie den Einzelinterviews mit

den Meistereileitern identifiziert, für die jedoch eine geringere Korrelation zu vermuten ist, da sie nur vereinzelt erforderlich sind oder der Witterungseinfluss leicht durch andere Einflussgrößen überlagert werden kann. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass neben dem Aufwand auch der Leistungserstellungsprozess selbst durch die Witterung beeinflusst werden kann.

Bei der Leistung „Schäden an Fahrbahnen beseitigen“ ist die Tendenz erkennbar, dass bei geringeren Tagesminima der Lufttemperatur und bei einer höheren Anzahl an Eistagen in den Wintermonaten, d. h. bei kälteren Wintern, vermehrt Personaleinsatzstunden auf dieser Leistung verbucht werden. Allerdings ist die Korrelation sehr gering, sodass eine statistisch abgesicherte Quantifizierung dieses Einflusses nicht möglich ist. Ein Einfluss von Frost-Tau-Wechseln war mit den verfügbaren Tageswerten zur Witterungssituation nicht erkennbar. Für Witterungssituationen, die im Sommer zu Hitzeschäden an der Fahrbahn führen, lassen sich hingegen keine Auswirkungen auf den Leistungsumfang erkennen.

Der Umfang der Mäharbeiten im Intensivbereich wird ebenfalls nicht signifikant durch die Witterung beeinflusst. Weder Lufttemperatur, Dauer der Vegetationsperiode noch Niederschlagsintensität beeinflussen die Personaleinsatzstunden so stark, dass abgesicherte Aussagen möglich sind. Es ist zu vermuten, dass nur extreme Witterungsverläufe das Wachstum so stark beeinflussen, dass der Umfang der Grünpflege angepasst werden muss. Weiterhin kann ggf. auch zeitweise eine schlechtere Mähqualität in Kauf genommen werden, solange die Verkehrssicherheit nicht unmittelbar beeinträchtigt ist.

Im Winterdienst wurde hingegen eine hohe Korrelation der Einsatzstunden für Räum- und Streueinsätze sowie für den Salzverbrauch in Abhängigkeit der Neuschneehöhe sowie der Anzahl der Tage mit Schneefall, Glatteis oder Eisglätte sowie Reifglätte ermittelt. Allerdings ist diese Korrelation nur meistereispezifisch gegeben, eine bundesweit einheitliche Quantifizierung ist nicht möglich. Dies bestätigt andere Untersuchungen, z. B. aus der Schweiz, in der Winterindizes ebenfalls nur mit einer regionalen Gültigkeit ermittelt wurden. Die ermittelten Einflussparameter lassen sich nutzen, um den künftigen Winterdienstaufwand und die benötigten Ressourcen in Abhängigkeit des Klimas abschätzen zu können.

Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst

Die Klimaparameter, die für den Straßenbetriebsdienst maßgebend sind, wurden für die Perioden 2011 bis 2030, 2031 bis 2050 sowie 2061 bis 2080 projiziert und mit den gemessenen Werten der Periode 1991 bis 2010 verglichen. Diese Projektion erfolgte mithilfe des Berechnungsmodells STARS, mit dem bei vertretbarem Rechenaufwand regional differenzierte Daten für jede Meisterei ermittelt werden können. Allerdings ist es bei diesem Rechenmodell nicht möglich, neue Extremwerte für die Klimaparameter zu erzeugen, da die Projektion durch systematische Umsortierung vergangener Beobachtungsreihen basierend auf einem möglichen Temperaturregime aus vorliegenden Globalmodellen erfolgt. In erster Linie wirkt sich dies auf die Projektion von Extremwetterereignissen aus, für die mit STARS geringere Zunahmen als mit anderen Klimasimulationen ermittelt wurden. Dies macht deutlich, dass in einem weiteren Schritt zur Verbesserung der Projektion von Extremwetterereignissen die Modelle weiter verbessert werden sollten.

Bis 2030 zeigt die Klimaprojektion nur geringe Änderungen der Lufttemperatur. Erst in den weiteren Perioden ist mit einem deutlichen Anstieg zu rechnen, im Winter nehmen die Temperaturen bis 2080 um ca. 3 °K zu. Im Sommer ist der Temperaturanstieg geringer ausgeprägt, das Tagesmaximum steigt um gut 2 °K, das Tagesminimum hingegen nur um 1 °K. Die Niederschläge werden in allen Zeitperioden im Winter zu- und im Sommer abnehmen. Regionale Unterschiede dieser Entwicklungen sind nur schwach ausgeprägt. Allerdings führt die Zunahme der Niederschläge im Winter bis 2030 in den Regionen mit niedrigeren Lufttemperaturen (Mittelgebirgslage, Voralpengebiet etc.) zu mehr Schneefall als in den milderen Regionen.

Für den Straßenbetriebsdienst werden sich die Aufwendungen infolge von Frostschäden bis 2030 kaum verändern. Erst danach wird es aufgrund der deutlichen Erwärmung zu einem signifikanten Rückgang der Frostschäden und damit verbunden auch der Aufwendungen für den Straßenbetriebsdienst kommen. Aufgrund der geringen Korrelation zwischen Aufwands- und Klimadaten sowie der geringen regionalen Differenzierung bei der Klimaentwicklung lassen sich keine regionalen Unterschiede zwischen den Meistereien erkennen. Da neben der Witterung vor allem auch Verkehrsbelastung, Dimensionierung des Straßenaufbaus und Erhal-

tungszustand für das Auftreten von Frostschäden maßgebend sind, können auch langfristig weiterhin Frostschäden größeren Umfanges auftreten, wenn Straßen nicht frostsicher dimensioniert sind oder sich in einem schlechten Erhaltungszustand befinden.

Auch beim Aufwand für die Grasmahd kann keine abgesicherte Aussage über die Veränderungen aufgrund des Klimawandels getroffen werden, da es zwar zum einen wärmer wird und damit die Dauer der Vegetationsperiode zunimmt, zum anderen aber die Niederschläge im Sommer zurückgehen und damit die Vegetationsperiode insgesamt trockener wird. Bis 2030 wird sich der Aufwand für die Grasmahd nicht signifikant ändern, erst in den darauffolgenden Perioden ist mit einer Zunahme zu rechnen. Tendenziell wird diese Zunahme in höheren Lagen stärker ausfallen, da sich insbesondere hier die Vegetationsperiode verlängert und gleichzeitig der Rückgang der Niederschläge geringer ist als im Flachland. Eine Quantifizierung der Veränderungen ist jedoch nicht möglich, da der Aufwand für die Grasmahd nicht direkt proportional mit der Witterung verläuft, sondern vor allem dann signifikant ansteigt, wenn aufgrund der Witterung ein zusätzlicher Mähzyklus erforderlich ist. Die Mähhäufigkeit wird jedoch nicht nur durch das beschleunigte Wachstum, sondern auch durch betrieblich-organisatorische Randbedingungen geprägt. Langfristig ist damit zu rechnen, dass häufiger eine zusätzliche Mahd im Intensivbereich notwendig wird, wofür ggf. auch zusätzliche Ressourcen notwendig werden.

Für den Winterdienst führen die stagnierenden Temperaturen bei gleichzeitigem Anstieg der Niederschläge in den Wintermonaten bis 2030 zu einer Zunahme bei Einsatzstunden und Salzverbrauch um etwa 10 %. In den nachfolgenden Perioden ist mit einer deutlichen Reduktion der Einsatzstunden sowie der erforderlichen Salzmenge um durchschnittlich 16 % bis 2050 und um 40 % bis 2080 gegenüber dem Vergleichszeitraum 1991 bis 2010 zu rechnen. Dies lässt sich gleichermaßen auf den Rückgang der Schneefall-, Glatteis-, Eisglätte- und Reifglättetage um bis zu 50 % zurückführen. Tendenziell ist davon auszugehen, dass der langfristige Rückgang bei Meistereien im Flachland etwas stärker ausgeprägt sein wird als bei den Meistereien in den Höhenlagen, da im Flachland die Perioden, in denen überhaupt kein Winterdienst erforderlich ist, deutlich zunehmen werden.

Die durchgeführten 100 Realisierungen der Klimaprojektion zeigen auch für die Zukunft, dass der Umfang des Winterdienstes von Jahr zu Jahr sehr starken Schwankungen unterliegt. Somit kann es auch bei einer langfristigen durchschnittlichen Abnahme durchaus extreme Witterungsverläufe wie 2010 geben. Die Projektion bis 2030 macht deutlich, dass zwar im Durchschnitt mit ca. 10 % höherem Aufwand zu rechnen ist, was zu einem entsprechenden Mittelmehrbedarf führt. Allerdings ist nicht mit einer signifikanten Zunahme extremer Witterungsverläufe wie im Winter 2010 zu rechnen, sodass keine unmittelbaren Auswirkungen auf die erforderlichen Ressourcen (Personal, Fahrzeuge und Geräte) sowie die verfügbaren Salzlagerstätten erkennbar sind. Ihre Dimensionierung orientiert sich an den Auslastungsspitzen und weniger an den durchschnittlichen Aufwendungen.

Die Entwicklung extremer Witterungsereignisse (Sturm, Starkniederschlag, Dauerregen, Hitze- und Trockenperioden) sowie ihre Auswirkungen auf den Umfang des Straßenbetriebsdienst lassen sich derzeit nicht quantifizieren. Generell ist davon auszugehen, dass im Einzelfall mit diesen Witterungsereignissen zwar erhebliche Aufwendungen verbunden sein können, diese sich aber insgesamt nicht signifikant auf das Aufgabenspektrum des Betriebsdienstes auswirken werden. Infolge extremer Witterungsereignisse sind durch den Betriebsdienst insbesondere Kontrollleistungen, Absicherungen sowie Reinigungs- und Aufräumarbeiten durchzuführen. Die Beseitigung umfangreicherer Schäden erfolgt in der Regel nicht durch den Betriebsdienst sondern im Rahmen von Erhaltungsmaßnahmen. Daneben können sich extreme Witterungsperioden auch auf die Arbeitsbedingungen auswirken, auf die jedoch durch geeignete Maßnahmen, wie Verlegung von Arbeitszeiten und andere organisatorische Maßnahmen kurzfristig reagiert werden kann.

In diesem FE-Vorhaben wurden erstmals detailliert Klimafolgen für den Straßenbetriebsdienst untersucht und dargestellt. Allerdings gibt es Verbesserungsansätze, welche in zukünftigen Untersuchungen dieser Art berücksichtigt werden sollten. Das betrifft zum einen die Kombination von dynamischen und statistischen regionalen Klimamodellen, andererseits wäre eine Ausweitung auf mehr Straßen- und Autobahnmeistereien in Deutschland anzustreben. Periodisch könnten Aktualisierungen vorgenommen werden, die sowohl dem Stand der Wissenschaft entsprechen als auch die

Veränderungen im Aufgabenspektrum oder der Organisation der Meistereien berücksichtigen.

Optimierung des Betriebsdienstes zur Minimierung des Schadstoffausstoßes durch den Verkehr

Bei den Schadstoffemissionen, die durch den Straßenbetriebsdienst hervorgerufen werden, sind zum einen die Emissionen der Betriebsdienstfahrzeuge und zum anderen zusätzliche Emissionen durch den Kfz-Verkehr infolge Verkehrsbehinderungen, die durch Arbeiten des Straßenbetriebsdienstes verursacht werden, zu berücksichtigen. Ihr Umfang ist jedoch, verglichen mit den Gesamtemissionen durch den Straßenverkehr, gering. Für die Fahrzeuge des Betriebsdienstes wurde ein Anteil von knapp 1 ‰ und für die zusätzlichen Emissionen des Kfz-Verkehrs infolge Verkehrsbehinderungen ein Anteil von ca. 0,7 ‰ ermittelt.

Maßnahmen, die zu einer Reduktion des Schadstoffausstoßes beitragen, sind jedoch trotz des geringen Anteils vielfach zu empfehlen, da mit ihnen noch weitere Vorteile verbunden sind. Zur Reduktion der Emissionen der Betriebsdienstfahrzeuge tragen neben dem Einsatz schadstoffoptimierter Fahrzeuge vor allem betriebliche Maßnahmen bei, mit denen in der Regel auch unmittelbare betriebswirtschaftliche Einsparungen zu erzielen sind, wie Schulung der Fahrer, Optimierung der Einsatzplanung oder Anpassung des Aufgabenspektrums. Ebenso sind die Maßnahmen zur Reduktion der Verkehrsbehinderungen zu empfehlen, da neben dem Schadstoffausstoß volkswirtschaftliche Nachteile infolge von Reisezeitverlusten reduziert werden. Hierzu zählen insbesondere die Verlagerung von Arbeiten in nicht staugefährdete Zeitfenster sowie die Optimierung der Arbeitsstellenplanung und -absicherung.

Ausblick für den Straßenbetriebsdienst

Die Untersuchungen im Rahmen des FE-Vorhabens lassen erkennen, dass unmittelbar keine erheblichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst zu erwarten sind. Im Wesentlichen sind jedoch folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Der mittlere Winterdienstaufwand wird um ca. 10 % bis 2030 zunehmen; danach ist ein deutlicher Rückgang zu erwarten. Dementsprechend werden zunächst auch die Winterdienst-

kosten und die Auslastung der Ressourcen zu nehmen.

- Die Wahrscheinlichkeit für extreme winterliche Witterungsverläufe wie 2010 verändert sich nicht signifikant, sodass bei heute ausreichender Ausstattung i. d. R. keine Erhöhung der verfügbaren Ressourcen notwendig ist.
- Ein Rückgang der Aufwendungen infolge von Frostschäden ist erst langfristig zu erwarten, sodass ein frostsicherer Straßenaufbau entsprechend den geltenden technischen Standards nach wie vor zu empfehlen ist.
- Infolge besserer Wachstumsbedingungen ist langfristig häufiger mit einer zusätzlichen Mahd im Intensivbereich zu rechnen; bis 2030 wird dies jedoch nur vereinzelt erforderlich sein.
- Die Projektion von Extremwetterereignissen kann mithilfe dynamischer Rechenmodelle noch verbessert werden und sollte daher bei Vorliegen entsprechender Daten aus Globalmodellen angepasst werden. Derzeit ist jedoch zumindest für die Periode bis 2030 nicht mit erheblichen Änderungen extremer Witterungsverläufe zu rechnen, sodass sich der Umfang der Kontroll-, Absicherungs-, Reinigungs- und Aufräumarbeiten vorerst nicht signifikant ändern wird.
- Veränderungen des Klimas, insbesondere die tendenzielle Zunahme von Hitze- und Trockenperioden, können sich auf die Arbeits- und Einsatzbedingungen auswirken. Sie sind jedoch voraussichtlich nur moderat ausgeprägt, sodass auf sie flexibel reagiert werden kann.

8 Literatur

- BADEL, H.: Ein neues Modell für einen Winter-Index zur Abschätzung und Bewertung des Salzverbrauches. In: Kolloquium Straßenbetrieb 2011, FGSV Verlag GmbH, Köln 2011
- BASSt – Bundesanstalt für Straßenwesen: Klimawandel. Auf den Seiten der BASSt. URL: http://www.BASSt.de/cIn_030/nn_171352/DE/Aufgaben/abteilung-s/referat-s1/klimawandel/klimawandel.html. Abgerufen am 19. September 2012
- BATCHGEO: Karten Adressen/Koordinaten suchen. Auf den Seiten von: batchgeo. URL: <http://batchgeo.com/de/> Abgerufen am 26. November 2012
- BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesstraßen, Version 1.1, Bonn 2004
- BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Verkehr in Zahlen 2011/2012. DVV Media Group GmbH. Hamburg 2012
- BÖHM, U.; KÜCKEN, M.; AHRENS, W.; BLOCK, A.; HAUFFE, D.; KEULER, K.; ROCKEL, B.; WILL, A.: CCLM – the Climate Version of LM: Brief Description and long-term Applications. In: COSMO Newsletter, Vol. 6, p. 225-235, 2006
- BORN, K.; LUDWIG, P.; PINTO, J. G.: Wind gust estimation for Mid-European winter storms: towards a probabilistic view. University of Cologne – Institute for Geophysics and Meteorology, Köln 2012
- BREITENSTEIN, J.: Zusammenhang zwischen Winterlichkeit und Salzverbrauch auf Bundesstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 18, Bergisch Gladbach 1995
- CHAUMONT, D.; BROWN, R.: Analysis of regional climate model stimulations of transport-related climate indices over southern Quebec. In: XIII Winterdienskongress 2010, Quebec (Canada) 2010
- CULP, M.; PISANO, P.; KLEIN, F.: Federal Highway Administration's development of a strategy to address adaptation to climate change. In: XIII Winterdienskongress 2010, Quebec (Canada) 2010
- DIN – Deutsches Institut für Normung e. V.: Winterdienstausrüstung – Straßenzustands- und Wetterinformationssysteme, DIN EN 15518, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011
- DIN – Deutsches Institut für Normung e. V.: Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr), DIN EN 16258, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2013
- DURTH, W.; HANKE, H.: Handbuch: Straßenwinterdienst, Kirchbaum Verlag, Bonn 2004
- DWD – Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon – Vegetationsperiode. URL: <http://www.dwd.de/lexikon>. Abgerufen am 07. 01 2013

- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst auf Straßen, Teil: Reinigung von Straßen außerhalb von Ortsdurchfahrten. FGSV 390/2, FGSV-Verlag, Köln 1999
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung (RAS-Ew). FGSV-Verlag, Köln 2005
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt für den Straßenbetriebsdienst, Teil: Grünpflege. FGSV 390/1, FGSV-Verlag, Köln 2006
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt für den Winterdienst auf Straßen. FGSV 416, FGSV-Verlag, Köln 2010
- FORMAYER, H.; HAAS, P.; HOFSTÄTTER, M.; RADANOVICS, S.; KROMP-KOLB, H.: Räumliche und zeitlich hochaufgelöste Temperaturszenarien für Wien und ausgewählte Analysen bezüglich Adaptionstrategien, 1. Teil des Berichts. Institut für Meteorologie – Universität für Bodenkultur, Wien (Österreich) 2007
- GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.: Herausforderung Klimawandel: Antworten und Forderungen der deutschen Versicherer, Berlin 2011
- GERSTENGARBE, F.-W.; WERNER, P. C.; ÖSTERLE, H.; PARDOWITZ, T.; BURGHOFF, O.: Winter storm- and summer thunderstorm-related loss events with regard to climate change in Germany. *Theor. Appl. Climatol.*, Published online: 15 February 2013, DOI.10.1007/s00704-013-0843-y 2013
- HACKL, J.: Neue Ansätze zur Organisation der Streckenwartung. In: Kolloquium Straßenbetrieb 2009, FGSV Verlag GmbH, Köln 2009
- HANKE, H.: Salzmengen-Management – Schlussfolgerungen aus zwei strengen Winterperioden. In: Kolloquium Straßenbetrieb 2011, FGSV Verlag GmbH, Köln 2011
- HEGER, T.: Zur Vorhersagbarkeit biologischer Invasionen: Entwicklung und Anwendung eines Modells zur Analyse der Invasion gebietsfremder Arten. In: *Neobiota* Nr. 4, S. 197, Berlin 2004
- Helmholtz Gemeinschaft: Regionaler Klimaatlas Deutschland. Auf den Seiten von: Helmholtz Gemeinschaft – Regionale Klimabüros. URL: <http://www.regionaler-klimaatlas.de/> Abgerufen am 03. Dezember 2012
- HUDEECZ, A.: Climate Change Adaptation – A Report on Climate Change Adaptation Measures for Low Volume Roads in the Northern Periphery – the ROAD EX “Implementing Accessibility” Project. 2012
- KASANG, D.: Hamburger Bildungsserver. URL: <http://bildungsserver.hamburg.de/zukuenftige-antriebskraefte/2081498/emissionen-artikel.html>. Abgerufen am 14. Januar 2013
- KÄSE, H.: Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mithilfe komplexer Kennziffern. In: *Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR*, Nr. 94, Akademie-Verlag, Berlin 1969
- KRIEGER, J.: Strategiepapier zur Anpassung der Straßeninfrastruktur an die Folgen des Klimawandels Bundesanstalt für Straßenwesen, unveröffentlicht, Bergisch Gladbach 2009
- LASCH, P.; BADECK, F.; SUCKOW, F.; LINDNER, M.; MOHR, P.: Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg. In: *Forest Ecology and Management* 207, p. 59-74, 2005
- LASCH, P.; BADECK, F. W.; SUCKOW, F.; LINDNER, M.; MOHR, P.: Klimafolgen für Wälder. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e. V., im Rahmen der Konferenz „Klimafolgen für Deutschland“ an der Humboldt-Universität, Berlin 2012
- LISTL, G.; OTTO, J. C.; ZACKOR, H.: Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Heft V 161, Bergisch Gladbach 2007
- MÄDER, C.: Klimaänderung – Wichtige Erkenntnisse aus dem 4. Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen der Vereinten Nationen (IPCC). *Umweltbundesamt, Fachgebiet I 2.1, Dessau* 2009
- MCSWEENEY, C. F.; JONES, R. G.; BOOTH, B. B.: Selecting Ensemble Members to Provide Regional Climate Change Information. In: *Journal of Climate*, Vol. 25, p. 7100-7121, 2011

- MEINSHAUSEN, M.; SMITH, S. J.; CALVIN, K.; DANIEL, J. S.; KAINUMA, M. L.; LAMARQUE, J.-F.; MATSUMOTO, K.; MONTZKA, S. A.; RAPER, S. C.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; VELDEERS, G. J.; VUUREN, D. P.: The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their extension from 1765 to 2500. In: *Climatic Change (Special Issue on RCPs)*, 2011
- NAKICENOVIC, N.; SWART, R.: *Special Report on Emissions Scenarios (SRES)*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge (UK) 2000
- NEFZGER, A.: Explodierender Beton – Bisweilen bersten Autobahnen unter der Sommerhitze. In: *FAZ – Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 24. Juli 2013, Frankfurt 2013
- NORLANDER, H.: What Impact will climate change have on roads in sweden and how to deal with it. In: *XIII Winterdienskongress 2010, Quebec (Canada)* 2010
- ORLOWSKY, B.; GERSTENGARBE, F.-W.; WERNER, P.: A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. In: *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 92, No. 3-4, p. 209-223, 2008
- ÖSTERLE, H.: Reconstruction of daily global radiation for past years for use in agricultural models. In: *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 26, No. 3, p. 253-256, 2001
- ÖSTERLE, H.; WERNER, P.-C.; GERSTENGARBE, F.-W.: Qualitätsprüfung, Ergänzung und Homogenisierung der täglichen Datenreihen in Deutschland, 1951-2003: ein neuer Datensatz im Rahmen der 7. Deutschen Klimatagung, München 2006
- PIARC – World Road Association: *Snow and ice data book 2010*, Paris (Frankreich) 2010
- PIK – Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e. V.: *Klimawandel wird Wasserhaushalt im Elbegebiet stark verändern*. Pressemitteilung 12.10.2009, Potsdam 2009
- PIK – Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.: *GLOWA-Elbe: Auswirkungen des globalen Wandels auf Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet*. URL: <http://www.glowa-elbe.de>, Abgerufen am 2. Mai 2013 (a)
- PIK – Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) e. V.: *KlimafolgenOnline*. URL: <http://www.klimafolgenonline.com/> Abgerufen am 2. Mai 2013 (b)
- PORWOLLIK, J.: Teil I: Straßenbetriebsdienst. In: *Der Elsner 2013 – Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen*, Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Dieburg 2013
- ROOS, R.; HESS, R.; NORKAUER, A.; ZIMMERMANN, M.; ZACKOR, H.; OTTO, J. C.: *Planung und Organisation von Arbeitsstellen kürzerer Dauer an Bundesautobahnen*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 143, Bergisch Gladbach 2006
- ROTTER, M.; HOFFMANN, D. E.; WELP, P. D.: *Anpassung an den Klimawandel – Verkehr (Bd. Themenblatt: Anpassung an Klimaänderung in Deutschland)*. Umweltbundesamt, Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung, 2011
- RUESS, B.: Indikator der Winterlichkeit: Die Korrelation der Winterlichkeit und der Kosten des Winterdienstes für das Nationalstrassennetz. In: *Strasse und Verkehr*, Nr. 11, 2004
- RUOTOISTENMAKI, A.; MAKELA, O.; SIPILA, J.; VALKEISENMAKI, A.; SAVOLAINEN, S.; JYLHA, K.; VENALAINEN, A.; LAAPAS, M.: *The effect of climate change on the routine and periodic maintenance of roads*. Report 8/2009, Finnra – Finnish Road Administration, Helsinki (Finnland) 2009
- SCHIPPER, D. H.: *Globale Ursachen – Regionale Folgen: Künftige Entwicklung des Winterwetters in Deutschland*. In: *Kolloquium Straßenbetrieb 2011*, FGSV Verlag GmbH, Köln 2011
- STÖCKERT, R.: *Auswirkungen von Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufs*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Nr. 457, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2001
- TEGETHOF, U.: *Klimawandel – Anpassungsstrategien für die Straßenverkehrsinfrastruktur*. In: *Straße und Autobahn*, Heft 2/2011, S. 89-93, 2011
- UPPALA, S. M.; KÄLLBERG, P. W.; SIMMONS, A. J.; ANDRAE, U.; Da COSTA BECHTOLD, V.;

FIORINO, M.; GIBSON, J. K.; HASELER, J.;
HERNANDEZ, A.; KELLY, G. A.; LI, X.; ONOGI,
K.; SAARINEN, S.; SOKKA, N.; ALLAN, R. P.;
ANDERSSON, E.; ARPE, K.; BALMASEDA, M.
A.: The ERA-40 re-analysis. Quarterly Journal of
the Royal Meteorological Society, Part B, Vol.
131, No. 612, p. 2961-3211, 2005

van der LINDEN, P.; MITCHELL, J. F. B.:
ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts:
Summary of research and results from the
ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre,
FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 160, 2009

WERNER, P.; GERSTENGARBE, F.-W.: Proposal
for the development of climate scenarios. In:
Climate Research, Vol. 8, No. 3, p. 171-182,
1997

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2013

V 220: Maßnahmen zur Bewältigung der besonderen psychischen Belastung des Straßenbetriebsdienstpersonals – Pilotstudie
Pöpping, Pollack, Müller € 16,00

V 221: Bemessungsverkehrsstärken auf einbahnigen Landstraßen
Arnold, Kluth, Ziegler, Thomas € 18,50

V 222: Aktualisierung des MLuS 02 – Erstellung der RLuS
Düring, Flassak, Nitzsche, Sörgel, Dünnebeil, Rehberger € 19,50

V 223: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2010
Fitschen, Nordmann € 16,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 224: Prüfung und Bewertung von Schutzeinrichtungen der Aufenthaltstufe H4b für den Einsatz auf Brücken – Teil 1 und 2
Bergerhausen, Klostermeier, Klöckner, Kübler € 19,00

V 225: Neue Technik für den Straßenbetriebsdienst – Teil 1: Neue Informations- und Kommunikationstechniken
Teil 2: Autonomes Fahren für den Straßenbetriebsdienst
Holldorb, Häusler, Träger € 21,50

V 226: Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Landstraßen
Maier, Berger, Schüller, Heine € 18,00

V 227: Radpotenziale im Stadtverkehr
Baier, Schuckließ, Jachtmann, Diegmann, Mahlau, Gässler € 17,00

V 228: Sicherheitskenngrößen für den Radverkehr
Baier, Göbbels, Klemps-Kohnen € 15,50

V 229: Straßenverkehrszählungen (SVZ) mit mobilen Mess-Systemen
Schmidt, Frenken, Hellebrandt, Regniet, Mahmoudi € 20,50

V 230: Verkehrsadaptive Netzsteuerungen
Hohmann, Giuliani, Wietholt € 16,50

V 231: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2011
Fitschen, Nordmann € 28,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 232: Reflexkörper und Griffigkeitsmittel in Nachstreumittelgemischen für Markierungssysteme
Recknagel, Eichler, Koch, Proske, Huth € 23,50

V 233: Straßenverkehrszählung 2010 – Ergebnisse
Lensing € 16,00

V 234: Straßenverkehrszählung 2010 – Methodik
Lensing € 17,50

2014

V 235: Dynamische Messung der Nachtsichtbarkeit von Fahrbahnmarkierungen bei Nässe
Drewes, Laumer, Sick, Auer, Zehntner € 16,00

V 236: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2012
Fitschen, Nordmann € 28,50
Die Ergebnisdateien sind auch als CD erhältlich oder können außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 237: Monitoring von Grünbrücken – Arbeitshilfe für den Nachweis der Wirksamkeit von Grünbrücken für die Wiedervernetzung im Rahmen der KP II – Maßnahmen
Bund-Länder Arbeitskreis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden. Der Anhang ist interaktiv. Das heißt er kann ausgefüllt und gespeichert werden.

V 238: Optimierung der Arbeitsprozesse im Straßenbetriebsdienst – Sommerdienst
Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00

V 239: Dynamische Messung der Griffigkeit von Fahrbahnmarkierungen
Steinauer, Oeser, Kemper, Schacht, Klein € 16,00

V 240: Minikreisverkehre – Ableitung ihrer Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen
Baier, Leu, Klemps-Kohnen, Reinartz, Maier, Schmotz € 23,50

V 241: Rastanlagen an BAB – Verbesserung der Auslastung und Erhöhung der Kapazität durch Telematiksysteme
Kleine, Lehmann, Lohoff, Rittershaus € 16,50

V 242: Bordsteinkanten mit einheitlicher Bordhöhe und Bodenindikatoren an Überquerungsstellen
Boenke, Grossmann, Piazzolla, Rebstock, Herrnsdorf, Pfeil € 20,00

V 243: Nutzen und Kosten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen über den gesamten Lebenszyklus
Balmberger, Maibach, Schüller, Dahl, Schäfer € 17,50

V 244: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2013
Fitschen, Nordmann € 28,50

V 245: Überprüfung der Befahrbarkeit innerörtlicher Knotenpunkte mit Fahrzeugen des Schwerlastverkehrs
Friedrich, Hoffmann, Axer, Niemeier, Tengen, Adams, Santel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 246: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen
Kathmann, Roggendorf, Kemper, Baier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 247: Befahrbarkeit plangleicher Knotenpunkte mit Lang-Lkw
Lippold, Schemmel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 248: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw – Grundlagenermittlung
Burg, Röhling
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

V 249: Auswirkungen von Querschnittsgestaltung und längsgerichteten Markierungen auf das Fahrverhalten auf Landstraßen
Schlag, Voigt, Lippold, Enzfelder
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

- V 250: **Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen mit Lang-Lkw**
Lippold, Schemmel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 251: **Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen von Straßenumgestaltungen nach dem „Shared Space“-Gedanken**
Baier, Engelen, Klemps-Kohnen, Reinartz € 18,50
- V 252: **Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen**
Gündra, Barron, Henrichs, Jäger, Höfle, Marx, Peters, Reimer, Zipf € 15,00
- V 253: **Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit und den Ablauf des Verkehrs in Arbeitsstellen**
Baier, Kemper
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 254: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw**
Wellner, Uhlig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 255: **Überholen und Räumen – Auswirkungen auf Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf durch Lang-Lkw**
Zimmermann, Riffel, Roos
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 256: **Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagenteile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Voraussetzung eines umfassenden Asset Managements**
Zander, Birbaum, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 257: **Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen**
Ohm, Fiedler, Zimmermann, Kraxenberger, Maier Hantschel, Otto € 18,00
- V 258: **Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten**
Holldorb, Streich, Uhlig, Schäufele € 18,00
- V 259: **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/> heruntergeladen werden.
- V 260: **Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst**
Hausmann € 15,50
- V 261: **Nutzung von Radwegen in Gegenrichtung - Sicherheitsverbesserungen**
Alrutz, Bohle, Busek € 16,50
- V 262: **Verkehrstechnische Optimierung des Linksabbiegens vom nachgeordneten Straßennetz auf die Autobahn zur Vermeidung von Falschfahrten**
Maier, Pohle, Schmotz, Nirschl, Erbsmehl € 16,00
- V 263: **Verkehrstechnische Bemessung von Landstraßen – Weiterentwicklung der Verfahren**
Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff In Vorbereitung
- V 264: **Qualitätsstufenkonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen**
Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 17,00
- V 265: **Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken**
Bark, Kutschera, Resnikow, Baier, Schuckließ
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden
- V 266: **Verfahren zur Bewertung der Verkehrs- und Angebotsqualität von Hauptverkehrsstraßen**
Baier, Hartkopf € 14,50
- V 267: **Analyse der Einflüsse von zusätzlichen Textanzeigen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen**
Hartz, Saighani, Eng, Deml, Barby
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 268: **Motorradunfälle – Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur**
Hegewald, Fürneisen, Tautz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

- V 269: **Identifikation von unfallauffälligen Stellen motorisierter Zweiradfahrer innerhalb geschlossener Ortschaften**
Pohle, Maier € 16,50
- V 270: **Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (KliBet)**
Holldorb, Rumpel, Biberach, Gerstengarbe, Österle, Hoffmann € 17,50

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. + (0)421/3 69 03-53 · Fax + (0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de