

Datenbasierte Analyse und Modellbildung zur Abschätzung  
spezifischer Gefahren des Klimawandels für Straßen  
Methodik und Szenarien

von  
Sina Keller

Juli 2015



**Datenbasierte Analyse und Modellbildung zur Abschätzung  
spezifischer Gefahren des Klimawandels für Straßen**  
Methodik und Szenarien

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

DOKTORIN DER NATURWISSENSCHAFTEN

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Sina Keller

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juli 2015

Referent: Prof. Dr. Joachim Vogt, KIT

Korreferent: Prof. Dr. Andreas Ch. Braun, KIT

Karlsruhe 2015



# Zusammenfassung

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts ergibt sich durch Klimaänderungen eine Zunahme extremer Wetterereignisse. Als Folge resultieren u. a. negative Auswirkungen auf das natürliche, soziale System und System der kritischen Infrastruktur. Aufgrund fragmentarischer Kenntnisse der Effekte auf verschiedene Infrastruktursysteme ergeben sich gewisse Unsicherheiten über die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf diese Infrastruktursysteme. Daher ist es gegenwärtig entscheidend, mögliche Auswirkungen und Folgen des Klimawandels für Infrastruktursysteme zu untersuchen und ausreichend darzulegen. Hierzu werden geeignete Instrumentarien und Methoden benötigt. Mit diesen können die Akteurinnen und Akteure der Fachplanung Gefahren in ihren Disziplinen identifizieren, wahrnehmen und sinnvolle Handlungsnotwendigkeiten ableiten.

In der vorliegenden Arbeit wird ein solches Instrumentarium entwickelt und dargestellt. Ziel dieser Methode stellt die Erfassung und Modellierung klimatischer Gefahren für Straßeninfrastruktur dar. Negative Auswirkungen des Klimawandels und insbesondere Folgen der Zunahme der Wetterextreme werden als Gefahren für Straßeninfrastruktur identifiziert. Zunächst wird mit der Definition des konzeptuellen Forschungsdesigns die wissenschaftlich-strukturelle Grundlage geschaffen, um die Auswirkungen des Klimawandels auf Straßeninfrastruktur aus systemischer Perspektive zu verstehen. In einem konzeptionellen Modell werden klimatische Gefahren definiert und Prozesse des Systems der naturräumlichen Umwelt anhand des mitentwickelten KRITIS-Ansatzes von Atzl und Keller (2013) abgegrenzt und eingeordnet. Glätte, extreme Hitze, extreme Winde und Starkniederschläge sind erfasste und zu operationalisierende klimatische Gefahren. Der entwickelte neuartige Modellansatz dieser Arbeit – das eigentliche Instrumentarium – modelliert und bewertet diese Gefahren. Benötigte Eingangsmerkmale für die Regelbasis des Klassifikationsteiles, die

klimatische Gefahren auf Straßen steuern, sind Lufttemperatur, Belagtemperatur der Straße, Taupunkttemperatur, relative Feuchte und Niederschlag. Fehlende Eingangsmerkmale, wie die Belagtemperatur, werden auf Basis eines Data-Mining-Verfahrens in Form eines multiplen Regressionsansatzes modelliert. Zusammengefasst besteht das Instrumentarium aus zwei Modellen: Einem Data-Mining-Modell zur Parameterschätzung fehlender Eingangsgrößen und einem Ursache-Wirkungsmodell zur Modellierung klimatischer Gefahren auf Straßeninfrastruktur.

Das Instrumentarium wird exemplarisch anhand verfügbarer Daten von Messstationen an Autobahnen in Baden-Württemberg zur Anwendung gebracht. Die Überprüfung der Modelleignung findet durch eine Gefahrenereignisvalidität und eine Betrachtung der Parametersensitivität statt. Die in einigen Gefahrentypen validen Übereinstimmungen der Bewertungsergebnisse zeigen die grundsätzliche Anwendbarkeit des entwickelten Instrumentariums. Vorhandene Abweichungen in den Ergebnissen lassen sich direkt auf vorhandene Defizite in den Datengrundlagen zurückführen.

# Abstract

Since the beginning of the 20<sup>th</sup> century, climate change causes increasingly extreme weather events. Severe impacts on the natural, social system and the system of critical infrastructure result from these changes. On the one hand, the occurring impacts vary on a regional scale. On the other hand, only fragmental knowledge currently exists of the differentiated effects of extreme weather events and climate change on different infrastructure system. These knowledge gaps require the development of adequate instruments and methods to expose the potential impacts of climate change on infrastructure systems. With the application of implemented instruments, stakeholders from different research disciplines are able to identify hazards in their workspace in a first step and derive recommendations based upon.

In this PhD thesis, such an instrument is developed and illustrated. The developed model identifies negative impacts of climate change and increasing extreme weather events on road infrastructure. In the beginning of the PhD thesis, the definition of a systemic research framework establishes a scientific and structural basis to understand the impacts of climate change on road infrastructure. Subsequently, climate hazards are defined based on a conceptual model. The processes, taking place in the natural environment system, are classified by the Atzl and Keller's (2013) CRITIS-framework. Slipperiness, extreme heat events, extreme wind events, and extreme precipitation events represent climate hazards. These are operationalized by parameters as air temperature, road surface temperature, dew point temperature, relative humidity, and precipitation. All these parameters define the model input of the classification system. Missing parameters such as the road surface temperature are modeled in a data mining approach based on a multiple regression model. The developed instrument combines this data mining approach with the modelling of climate hazards on roads.

The implemented approach is exemplarily applied on a dataset of Baden-Württemberg's monitoring stations and climate variables from climate simulations. The applicability of the implemented instrument is corroborated by event validity as well as parameter variability sensitivity analysis. Valid conformity of the valuation results in the modelling of several climate hazard types reflects the principle application of the instrument. Existing divergences of the results can be attributed to deficits in the data base.

# Inhaltsverzeichnis

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Zusammenfassung .....</b>   | <b>i</b>    |
| <b>Abstract.....</b>   | <b>iii</b>  |
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>  | <b>v</b>    |
| <b>Abbildungsverzeichnis.....</b>  | <b>ix</b>   |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>   | <b>xv</b>   |
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>   | <b>xvii</b> |
| <b>1 Motivation und Fragestellungen .....</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 Ausgangslage und Motivation .....  | 2           |
| 1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung .....   | 6           |
| 1.3 Aufbau der Arbeit .....  | 9           |
| <b>2 Forschungsdesign .....</b>  | <b>15</b>   |
| 2.1 Forschungsdesign auf Basis eines systemischen<br>Ansatzes .....  | 16          |
| 2.2 Konzeptuelles Modell zur Analyse der Gefahren des<br>Klimawandels für die Straßeninfrastruktur.....              | 19          |
| <b>3 Diskurs: Natürliche Prozesse, Naturgefahren und<br/>    Naturkatastrophen aus systemischer Perspektive.....</b> | <b>25</b>   |
| 3.1 Von natürlichen Prozessen zu Gefahren und<br>Katastrophen aus systemischer Perspektive.....                      | 26          |
| 3.2 Grundlegende Begrifflichkeiten und ihre Positionierung<br>im Rahmen der vorliegenden Arbeit.....                 | 31          |
| 3.2.1 Differenzierung zwischen ‚Risiko‘ und ‚Gefahr‘ .....   | 32          |
| 3.2.2 Naturgefahren und abgeleitete klimatische Gefahren.....  | 35          |
| 3.2.3 Überblick über den zu erwartenden Klimawandel.....   | 37          |
| 3.3 Identifizierung ‚klimatischer Gefahren‘ für die<br>Straßeninfrastruktur .....                                    | 40          |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>4</b> | <b>Potenzielle Gefahren für die Straßeninfrastruktur unter<br/>Annahme des zu erwartenden Klimawandels.....</b>  | <b>43</b> |
| 4.1      | Stand der Forschung zur Vulnerabilität von<br>Straßeninfrastruktur unter Annahme des zu<br>erwartenden Klimawandels.....                                   | 44        |
| 4.2      | Operationalisierung der potenziellen Gefahren für die<br>Straßeninfrastruktur in einem regelbasierten System:<br>die zu modellierenden Gefahrentypen ..... | 49        |
| <b>5</b> | <b>Modellbildung und Methodik: das datenbasierte Modell .....</b>  | <b>57</b> |
| 5.1      | Das datenbasierte Ursache-Wirkungsmodell zur<br>Modellierung potenzieller klimatischer Gefahren für<br>die Straßeninfrastruktur .....                      | 59        |
| 5.2      | Exkurs I: Die Matlab-Toolbox Gait-CAD .....  | 62        |
| 5.3      | Datengrundlage und -strukturen: die Eingabeparameter<br>für das datenbasierte Modell.....  | 64        |
| 5.3.1    | Datengrundlage: Daten der Klimavariablen und<br>Belagstemperatur .....   | 64        |
| 5.3.2    | Datenstruktur und -aufbereitung.....   | 71        |
| 5.3.3    | Benötigte Datenstruktur zum Einlesen der<br>Eingabedaten.....  | 71        |
| 5.3.4    | Exemplarische Datenaufbereitung der Rohdaten: Daten<br>der Klimavariablen und GMA-Daten Baden-<br>Württembergs.....  | 74        |
| 5.4      | Modell im Modell: Regressionsansatz zur Modellierung<br>der Belagstemperatur .....   | 77        |
| 5.4.1    | Entwurf des Regressionsmodells .....   | 79        |
| 5.4.2    | Anwendung der Regressionsmodelle.....  | 85        |
| 5.4.3    | Diskussion des Regressionsansatzes.....  | 86        |
| 5.5      | Anwendung des datenbasierten Ursache-<br>Wirkungsmodells .....   | 89        |

---

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>6</b>  | <b>Prognose der Gefahrenentwicklung anhand der<br/>Modellergebnisse .....</b>                                      | <b>95</b>  |
| 6.1       | Zukünftige Gefahrenereignisse im Vergleich zum<br>Referenzzeitraum: Modellergebnis I.....                          | 96         |
| 6.2       | Darstellung ausgewählter modellierter Gefahren in<br>Baden-Württemberg: Modellergebnis II.....                     | 109        |
| 6.3       | Zusammenfassung der Modellergebnisse I und II.....   | 136        |
| 6.4       | Prognose der Gefahrenentwicklung anhand eines<br>Vergleich zwischen den GMA-Stationen:<br>Modellergebnis III ..... | 138        |
| 6.5       | Zusammenfassung der Prognose zur<br>Gefahrenentwicklung.....   | 141        |
| <b>7</b>  | <b>Modellvalidierung .....</b>   | <b>147</b> |
| 7.1       | Gefahrenereignisse 2001 bis 2010: Darstellung der<br>Ereignisvalidität .....                                       | 149        |
| 7.1.1     | Fazit: Ereignisvalidität der Gefahrenereignisse im<br>Zeitraum 2001 bis 2010 .....                                 | 160        |
| 7.2       | Exemplarische Analyse der Sensitivität der<br>Gefahrenereignisse.....  | 162        |
| 7.3       | Zusammenfassung der Modellvalidierung.....   | 166        |
| <b>8</b>  | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>  | <b>171</b> |
| 8.1       | Zusammenfassung, Zielerfüllung und Antworten auf<br>die Forschungsfragen .....                                     | 172        |
| 8.2       | Schlussfolgerung und Ausblick .....  | 176        |
|           | <b>Stichwortverzeichnis.....</b>   | <b>181</b> |
| <b>9</b>  | <b>Anhang zu den Daten .....</b>   | <b>183</b> |
| <b>10</b> | <b>Anhang zu ausgewählten implementierten Quellcodes in<br/>Matlab und Gait-CAD.....</b>                           | <b>213</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis .....</b>  | <b>225</b> |



# Abbildungsverzeichnis

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| Abbildung 1.1: | Vereinfachte Darstellung des Forschungsansatzes dieser Arbeit.....  | 8  |
| Abbildung 1.2: | Struktur der Arbeit.....  | 14 |
| Abbildung 2.1: | Systemischer KRITIS-Ansatz.....   | 20 |
| Abbildung 3.1: | Systemische Darstellung von natürlichen Prozessen, Naturgefahren und Naturkatastrophen.....   | 27 |
| Abbildung 4.1: | Konzeptuelle Einordnung der Identifizierung potenzieller Gefahren des zu erwartenden Klimawandels für die Straßeninfrastruktur in den Forschungsansatz der vorliegenden Arbeit..... | 44 |
| Abbildung 5.1: | Konzeptuelle Einordnung des datenbasierten Ursache-Wirkungsmodells in den Forschungsansatz dieser Arbeit.....   | 60 |
| Abbildung 5.2: | Standorte der Glättemeldeanlagen an den Autobahnen in Baden-Württemberg.....  | 70 |
| Abbildung 5.3: | Benötigte Datenstruktur der Datensätze zum Einlesen .....   | 72 |
| Abbildung 5.4: | Beispiel zur grafischen Darstellung einer netcdf-Datei für den Modellzeitraum 2001 bis 2010.....  | 75 |
| Abbildung 5.5: | Überblick über den Ablauf der Belagstemperaturmodellierung in einem Data-Mining-Ansatz .....  | 79 |
| Abbildung 5.6: | Ansicht der Batch-Datei zur Anwendung der Regression bzw. der Berechnung der Regressionsmodelle .....   | 84 |

---

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| Abbildung 5.7:  | Beispiel der Batch-Datei zur Anwendung der Regressions-Modelle auf den Referenzzeitraum 1971 bis 2000 mit Teilung der Daten der Klimavariablen in die einzelnen Jahre ..... | 85  |
| Abbildung 5.8:  | Ansicht der .txt-Datei für die GMA-Station Stuttgart 4 mit den generierten Werten zur Güte des Regressionsmodells.....  | 86  |
| Abbildung 5.9:  | Überblick über den Ablauf des regelbasierten Ursache-Wirkungsmodells .....  | 89  |
| Abbildung 5.10: | Zusammenfassende Übersicht über das entwickelte Instrumentarium.....  | 94  |
| Abbildung 6.1:  | Glättegefahr 1 ‚gefrierender Regen auf kalter Straße‘ im Referenzzeitraum.....  | 111 |
| Abbildung 6.2:  | Glättegefahr 1 ‚gefrierender Regen auf kalter Straße‘ in der nahen Zukunft.....   | 112 |
| Abbildung 6.3:  | Glättegefahr 1 ‚gefrierender Regen auf kalter Straße‘ an der GMA-Station Heidelberg (Autobahn A656) im Referenzzeitraum .....   | 113 |
| Abbildung 6.4:  | Glättegefahr 1 ‚gefrierender Regen auf kalter Straße‘ an der GMA-Station Heidelberg (Autobahn A656) im Referenzzeitraum .....   | 114 |
| Abbildung 6.5:  | Glättegefahr 3A ‚Regen auf warmer Fahrbahn‘ im Referenzzeitraum .....   | 117 |
| Abbildung 6.6:  | Glättegefahr 3A ‚Regen auf warmer Fahrbahn‘ in der nahen Zukunft .....  | 118 |
| Abbildung 6.7:  | Glättegefahr 3A ‚Regen auf warmer Fahrbahn‘ an der GMA-Station AK Stuttgart A (Autobahn A8) im Referenzzeitraum .....   | 119 |
| Abbildung 6.8:  | Glättegefahr 3A ‚Regen auf warmer Fahrbahn‘ an der GMA-Station AK Stuttgart A (Autobahn A8) in der nahen Zukunft .....  | 120 |

|                 |  |     |
|-----------------|--|-----|
| Abbildung 6.9:  | Glättegefahr 4B ‚Niederschlag als Schnee<br>zusammen mit Raureif <sup>c</sup> im Referenzzeitraum.....   | 123 |
| Abbildung 6.10: | Glättegefahr 4B ‚Niederschlag als Schnee<br>zusammen mit Raureif <sup>c</sup> in der nahen Zukunft.....  | 124 |
| Abbildung 6.11: | Glättegefahr 4B ‚Niederschlag als Schnee<br>zusammen mit Raureif <sup>c</sup> an der GMA-Station<br>Horb A (Autobahn A81) im Referenzzeitraum .....  | 125 |
| Abbildung 6.12: | Glättegefahr 4B ‚Niederschlag als Schnee<br>zusammen mit Raureif <sup>c</sup> an der GMA-Station<br>Horb A (Autobahn A81) in der nahen Zukunft ..... | 126 |
| Abbildung 6.13: | ‚Heftiger Starkregen‘ im Referenzzeitraum .....  | 128 |
| Abbildung 6.14: | ‚Heftiger Starkregen‘ in der nahen Zukunft .....   | 129 |
| Abbildung 6.15: | ‚Hitzegefahr III-A‘ im Referenzzeitraum.....   | 131 |
| Abbildung 6.16: | ‚Hitzegefahr III-A‘ in der nahen Zukunft.....  | 132 |
| Abbildung 6.17: | ‚Hitzegefahr III-A‘ an der GMA-Station<br>Stuttgart 4 (Autobahn A8) im Referenzzeitraum .....  | 134 |
| Abbildung 6.18: | ‚Hitzegefahr III-A‘ an der GMA-Station<br>Stuttgart 4 (Autobahn A8) in der nahen Zukunft .....   | 135 |
| Abbildung 6.19: | Autoskalierung der relativen Änderung der<br>‚Glätte 1‘ der nahen Zukunft in Bezug auf den<br>Referenzzeitraum.....                                  | 143 |
| Abbildung 6.20: | Autoskalierung der relativen Änderung der<br>‚Glätte 3A‘ der nahen Zukunft in Bezug auf den<br>Referenzzeitraum.....                                 | 144 |
| Abbildung 6.21: | Autoskalierung der relativen Änderung des<br>‚heftigen Starkregens‘ der nahen Zukunft in<br>Bezug auf den Referenzzeitraum.....                      | 145 |
| Abbildung 6.22: | Autoskalierung der relativen Änderung der<br>‚Hitzegefahr III-A‘ der nahen Zukunft in Bezug<br>auf den Referenzzeitraum.....                         | 146 |

---

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| Abbildung 7.1:  | Scatterplot der modellierten und der gemessenen Belagstemperatur an der GMA-Station Stuttgart 4 (A8) .....  | 151 |
| Abbildung 7.2:  | Ausschnitt der Zeitreihen gemessene und modellierte Belagstemperatur an der GMA-Station Stuttgart 4 (A8) .....  | 152 |
| Abbildung 7.3:  | Ausschnitt der Zeitreihen gemessene und modellierte Lufttemperatur an der GMA-Station Stuttgart 4 (A8).....   | 153 |
| Abbildung 7.4:  | Boxplot der Messstunde der GMA-Stationen in Baden-Württemberg im Zeitraum 2001 bis 2010.....  | 159 |
| Abbildung 7.5:  | Ausschnitt der Belagstemperatur dargestellt durch die modellierte Belagstemperatur +/- den mittleren absoluten Fehler an der GMA-Station Widdern A (A81)..... | 163 |
| Abbildung 7.6:  | Darstellung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse der GMA-Station Widdern A (A81) im Referenzzeitraum.....   | 168 |
| Abbildung 7.7:  | Darstellung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse der GMA-Station Widdern A (A81) in der nahen Zukunft.....  | 168 |
| Abbildung 7.8:  | Darstellung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse der GMA-Station Sulmtal A (A6) im Referenzzeitraum.....  | 169 |
| Abbildung 7.9:  | Darstellung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse der GMA-Station Sulmtal A (A6) in der nahen Zukunft.....   | 169 |
| Abbildung 7.10: | Darstellung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse der GMA-Station Weigenbachtal (A81) im Referenzzeitraum.....                                     | 170 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 7.11: Darstellung der Parametersensitivität der<br>Gefahrenereignisse der GMA-Station<br>Weigenbachtal (A81) in der nahen Zukunft ..... | 170 |
| Abbildung 8.1: Gesamtübersicht über den Forschungsansatz<br>dieser Arbeit .....   | 172 |



# Tabellenverzeichnis

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Tabelle 3.1: | Auswahl an Definitionen des Terminus ‚Risiko‘ .....  | 34  |
| Tabelle 3.2: | Vier Typen von Naturgefahren.....  | 36  |
| Tabelle 3.3: | Überblick über die projizierten Klimaänderungen .....  | 38  |
| Tabelle 3.4: | Zusammenfassung der vier RCP-Szenarien .....   | 40  |
| Tabelle 4.1: | Überblick zum Stand der Forschung zur<br>Vulnerabilität der Straßeninfrastruktur gegenüber<br>dem projizierten Klimawandel, bezogen auf den<br>exemplarischen Untersuchungsraum Baden-<br>Württemberg..... | 48  |
| Tabelle 4.2: | Potenzielle Gefahren: Klassifikation, Definition<br>und Ursache .....  | 54  |
| Tabelle 5.1: | Eigenschaften der Datensätze aus den<br>Klimasimulationen der drei Zeiträume.....  | 67  |
| Tabelle 5.2: | Regelbasiertes System der Darstellung von<br>Gefahrtypen .....   | 91  |
| Tabelle 6.1: | Vergleich der Glättegefahren zwischen dem<br>Referenzzeitraum und der nahen Zukunft .....  | 103 |
| Tabelle 6.2: | Vergleich der Starkniederschlag- und<br>Hitzegefahren zwischen dem Referenzzeitraum<br>und der nahen Zukunft.....  | 105 |
| Tabelle 6.3: | Vergleich der Windgefahren zwischen dem<br>Referenzzeitraum und der nahen Zukunft .....  | 107 |
| Tabelle 7.1: | Überblick über die Ergebnisse der<br>Gefahrenereignisvalidität im Modellzeitraum<br>2001 bis 2010 .....  | 155 |
| Tabelle 9.1: | Beschreibung der Glättemeldeanlage in Baden-<br>Württemberg.....   | 183 |
| Tabelle 9.2: | Merkmals- bzw. Variablenliste für die<br>datenbasierte Modellierung .....  | 185 |

---

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Tabelle 9.3:  | Berechnete Polynom-Regressionsmodelle der GMA-Stationen durch die Klimamerkmale .....  | 187 |
| Tabelle 9.4:  | Berechnete Polynom-Regressionsmodelle der GMA-Stationen durch die Klimamerkmale und die gemessene Lufttemperatur an der jeweiligen GMA-Station ..... | 195 |
| Tabelle 9.5:  | Klasseneinteilung des Vergleichs der Glättegefahren zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft .....  | 203 |
| Tabelle 9.6:  | Klasseneinteilung des Vergleichs der Gefahr durch Starkregenereignisse zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft .....                     | 204 |
| Tabelle 9.7:  | Klasseneinteilung des Vergleichs der Hitzegefahr zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft .....   | 204 |
| Tabelle 9.8:  | Klasseneinteilung des Vergleichs der Hitzegefahr zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft .....   | 205 |
| Tabelle 9.9:  | Simulierte Ereignisse der Glättegefahren für den Zeitraum 2001 bis 2010.....   | 206 |
| Tabelle 9.10: | Simulierte Ereignisse der Hitzegefahr für den Zeitraum 2001 bis 2010.....  | 210 |

# Abkürzungsverzeichnis

|        |  |
|--------|--|
| BASt   | Bundesanstalt für Straßenwesen   |
| BBK    | Bundesamt für Bevölkerungsschutz und<br>Katastrophenhilfe                                |
| Bft    | Beaufortskala  |
| CAD    | Computer Aided Design  |
| DAS    | Deutsche Anpassungsstrategie   |
| DWD    | Deutscher Wetterdienst   |
| ESRI   | Environmental System Research Institute  |
| IAI    | Institut für Angewandte Informatik des Karlsruher<br>Instituts für Technologie           |
| IMK    | Institut für Meteorologie und Klimaforschung des<br>Karlsruher Instituts für Technologie |
| IPCC   | Intergovernmental Panel on Climate Change  |
| KIT    | Karlsruher Institut für Technologie  |
| RCP    | Representative Concentration Pathways  |
| RWIS   | Road Weather Information System  |
| SWIS   | Straßenwetterinformationssystem  |
| UNDP   | United Nations Development Programme   |
| UNISDR | The United Nations Office for Disaster Risk Reduction                                    |
| WBGU   | Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale<br>Umweltveränderungen             |



# 1 Motivation und Fragestellungen

*„The severity of climate impacts on infrastructures will vary across the EU [...]. Long- and medium [sic!] term climate trends [...] and an inherently rising frequency of extreme weather events impact differently from site to site. [...] Therefore, adapting infrastructure usually requires a complex, site-based analysis of different trends and impact patterns. [...] Climate change will also affect the environmental and social system around infrastructure assets and their interactions with these systems.“*

*(European Commission, 2013, S. 6 f.)*

Die Veränderungen der Klimaparameter und die Zunahme extremer Wetterereignisse in der nördlichen Hemisphäre seit Beginn des 20. Jahrhunderts weisen auf den rezenten Klimawandel hin. Die Europäische Kommission (2013) thematisiert in ihrem ‚Commission Staff Working Document‘ die gravierenden, negativen Auswirkungen des Klimawandels durch eine Zunahme der Wetterextreme.

Die regionalen Auswirkungen des Klimawandels sowie der Effekte auf differente Branchen, Sektoren und Gesellschaften bereitet aufgrund fragmentarischer Kenntnisse ebendieser Unsicherheit. Um Klarheit zu erlangen, werden detaillierte Analysen der Auswirkungen des Klimawandels in differenten Disziplinen angestrebt und durchgeführt.

## 1.1 Ausgangslage und Motivation

Der Klimawandel ist zu einer Herausforderung auf internationaler und nationaler Ebene geworden. Die Minimierung des Klimawandels durch die Reduzierung der Treibhausgasemissionen konstituiert eine dieser Herausforderungen (IPCC, 2014, S. 1458). Nicht nur die Minderung der Treibhausgasemissionen, sondern auch die strategische Anpassung an die Veränderungen der Klimaparameter sowie Wetterextreme und der Umgang mit daraus resultierenden Folgen sind hierbei von Belang. Im Rahmen dieser Klimawandelanpassung ist es erforderlich, die zukünftigen Entwicklungsszenarien der Klimaparameter und Extremereignisse zu errechnen und zu verstehen, denn letztlich basieren auf diesen Modellen verschiedene mögliche Folgen des Klimawandels und der Wetterextreme, welche nicht erst bei ihrem Auftreten erkannt und eingedämmt werden sollten.

Nach dem fünften Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ist die globale mittlere Land- und Oberflächentemperatur in dem Zeitraum von 1880 bis 2012 um 0,85 Kelvin angestiegen (IPCC, 2014, S. 37). In der nördlichen Hemisphäre hat der Niederschlag seit 1901 zugenommen und Veränderungen einiger Extremwetter- und Klimaereignisse hinsichtlich der Häufigkeit und Ausprägung sind seit 1950 zu beobachten (IPCC, 2014, S. 5). Verglichen mit dem Referenzzeitraum von 1990 bis 2000 und basierend auf den vom IPCC dargelegten SRES-Szenarien, welche u. a. die künftigen Treibhausgasemissionen, die zukünftige demografische und wirtschaftliche Entwicklung sowie den sozialen und technischen Hintergrund in verschiedenen Entwicklungen fokussieren, wird in Deutschland z. B. in der nahen Zukunft 2021 bis 2050 ein Anstieg der Lufttemperatur um zwei bis vier Kelvin erwartet (WBGU, 2009).

Der Klimawandel wirkt sich auf das natürliche sowie das soziale System aus und stellt je nach Art und Ausmaß der Wirkung eine Bedrohung für

diese Systeme dar (Parry et al., 2007, S. 976). Nach dem KRITIS-Framework von Atzl & Keller (2013), welches in Kapitel 2.2 (S. 19 ff.) erläutert wird, wirkt der Klimawandel als ein Prozess der naturräumlichen Umwelt bzw. des natürlichen Systems. Jenes System inkludiert u. a. die Bestandteile Topografie, Klimatologie, Geomorphologie, Boden und Vegetation. Die soziale Umwelt bzw. das soziale System umfasst regulierende Handlungen, Akteure und Strukturen sowie die menschliche Gesellschaft. Auch das Infrastruktursystem – das dritte System des KRITIS-Frameworks – ist von negativen Auswirkungen des Klimawandels betroffen (Keller & Atzl, 2014, S. 229). Insbesondere die kritische Infrastruktur trägt ein erhöhtes Risiko, von negativen Auswirkungen des Klimawandels getroffen zu werden (European Commission, 2008, §§ 2(a)).

Kritische Infrastruktur im systemischen Ansatz umfasst sämtliche technischen und organisatorischen Strukturen, welche von Relevanz sind, um die Funktionen in der sozialen Umwelt aufrechtzuerhalten (Atzl & Keller, 2013, S. 31). Sie könnte in einem Fall von negativer Wirkung durch den Klimawandel ihre Funktion bedingt aufrechterhalten oder dysfunktional werden, was durch Kaskadeneffekte wiederum Auswirkungen auf das soziale System und andere Infrastruktursystem hätte. Eine kritische Infrastruktur, welche die Funktionalität des sozialen mit gewährleistet stellt die Straßeninfrastruktur als ein Bestandteil der Verkehrsinfrastruktur dar.

Negative Auswirkungen des Klimawandels ergeben sich insbesondere durch „extreme Wetterlagen, [...] Schnee, Eis, Nebel, Hagel, Hitzewellen, Stürme, Hoch- und Niedrigwasser in Flüssen oder auch Starkregen [...]“ (Deutsche Bundesregierung, 2008, S. 37). Lang anhaltende Hitze, um ein Beispiel für ein Ereignis zu nennen, kann Straßen schaden. Sie weicht den Fahrbahnbelag vermehrt auf – so können Spurrillen entstehen. Mit einer prognostizierten Zunahme der zukünftigen Lufttemperatur erhöht sich auch dieses Risiko. Verschiedene Formen von Niederschlägen können auf Straßen zu erhöhter Unfallgefahr führen (Koetse & Rietveld, 2009, S. 37).

Die Straßennutzung wird durch Sperrungen und Teilsperren eingeschränkt. Diese Einschränkung tritt – wie im Beispiel des Extremniederschlags im Juni 2013 in Baden-Württemberg – sehr zeitnah nach dem Starkregenereignis auf und dauert über das Ereignis hinaus an (Keller & Atzl, 2014). Zudem ziehen Kaskadeneffekte Auswirkungen auf weitere Straßen und andere Infrastrukturen nach sich. Betroffen sind letztlich die eigentliche Infrastruktur, ihre Nutzung und in der weiteren Konsequenz ihre Funktionsfähigkeit. Eine eingeschränkte Funktionsfähigkeit der Infrastruktur oder ihr Ausfall bedingt negative Einflüsse auf das soziale System.

Um die Resilienz der vorhandenen und zukünftigen Straßeninfrastruktur gegenüber dem Klimawandel und den resultierenden Folgen der Zunahme der Wetterextreme zu stärken, sind schon heute Anpassungsmaßnahmen erforderlich. Zum einen muss die bereits existierende Straßeninfrastruktur klimaresistenter gestaltet werden. Zum anderen kann der Bau neuer Straßeninfrastruktur durch die Analyse des Standorts, der Bauweise und der vorgesehenen Nutzung an die prognostizierte zukünftige klimatische Entwicklung angepasst werden (European Commission, 2013, S. 14). Überdies werden die aus einem wissenschaftlichen Kontext abgeleiteten Prämissen und Optionen für Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel von den Akteurinnen und Akteuren der Fach- und Raumplanung umgesetzt, sofern sie als notwendige Aufgabe wahrgenommen oder in gesetzlicher ‚Auflage‘ manifest werden.

Gegenwärtig ist entscheidend, mögliche Auswirkungen des Klimawandels für Infrastruktursysteme zu untersuchen und ausreichend darzulegen, damit die entsprechenden Akteurinnen und Akteure Probleme und Risiken in ihren Bereichen wahrnehmen, um sinnvolle Handlungsnotwendigkeiten ableiten zu können.

Vor diesem Hintergrund hat die Verfasserin von 2012 bis 2015 am Institut für Städtebau und Landesplanung des Karlsruher Instituts für Technologie

am Forschungsprojekt ‚KLIMOPASS-AKLIM – Entwicklung modellhafter Klimawandel-Anpassungsstrategien Kritischer Infrastruktur in der Region Stuttgart‘ mitgearbeitet. In diesem von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg finanzierten Forschungsvorhaben wurde der in dieser Arbeit vorgestellte methodische Beitrag als ein Teil des interdisziplinären Modellansatzes<sup>1</sup> zur Untersuchung der Veränderungen von Gefahren für Verkehrsinfrastruktur vorgestellt. Der Schwerpunkt bestand in der Entwicklung eines Instrumentariums zur Bewertung zukünftiger klimatischer Gefahren für die Verkehrsinfrastruktur und die Ableitung exemplarischer Anpassungsstrategien und -maßnahmen.

---

<sup>1</sup> Der planerisch-sozialwissenschaftliche Ansatz aus KLIMOPASS-AKLIM wird in einem weiteren Dissertationsprojekt für Infrastruktur in Baden-Württemberg betrachtet (vgl. Dissertation von Atzl, A.).

## 1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit soll das in KLIMOPASS-AKLIM genutzte Instrumentarium entwickelt, dargestellt und exemplarisch angewandt werden. Eruiert werden soll, welche Methode und Strategie geeignet sind, um die klimatischen Gefahren und Risiken für die Straßeninfrastruktur zu erfassen sowie zu modellieren und welche Auswirkungen des Klimawandels auf Straßeninfrastruktur<sup>2</sup> anhand der entwickelten Methode identifiziert werden können.

Die zentrale, übergeordnete Forschungsfrage lautet:

- Welcher methodische Untersuchungsansatz ist geeignet, um klimatische Gefahren<sup>3</sup> als Folgen von zunehmenden Wetterextremen für die Straßeninfrastruktur zu modellieren?

Zunächst gilt es, das Forschungsdesign der vorliegenden Arbeit zu definieren.

- Wie können die Untersuchungsobjekte, die Forschungsfragen und die Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit aus systemischer Perspektive dargestellt, abgegrenzt und analysiert werden?

Die Basis für die methodische Umsetzung ist eine weitere vorangehende Ableitung der Forschungsfrage in ein konzeptuelles Modell. Hierzu sind folgende Forschungsfragen zu klären.

- Wie können die Faktoren Gefahren bzw. Risiken aus systemischer Perspektive definiert werden?
- Wie können natürlicher Prozess, Naturgefahr und Naturkatastrophe systemisch voneinander abgegrenzt und eingeordnet werden?

---

<sup>2</sup> Mit dem Begriff Straßeninfrastruktur sind alle Autobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen sowie Kreis- und kommunale Straßen gemeint.

<sup>3</sup> Der Begriff klimatische Gefahr bezeichnet in der vorliegenden Arbeit eine Gefahr, welche aus der Veränderung der Wetterextreme folgt. Die Veränderung der Wetterextreme wiederum resultiert aus der Klimaänderung. In Kapitel 3.2.2 (S. 35) wird der Begriff klimatische Gefahr erläutert.

- Welche klimatischen Gefahren bestehen für die Straßeninfrastruktur, wie können diese konzeptionell erfasst und operationalisiert werden?
- Wie ändern sich klimatische Gefahren für die Straßeninfrastruktur durch den Klimawandel?

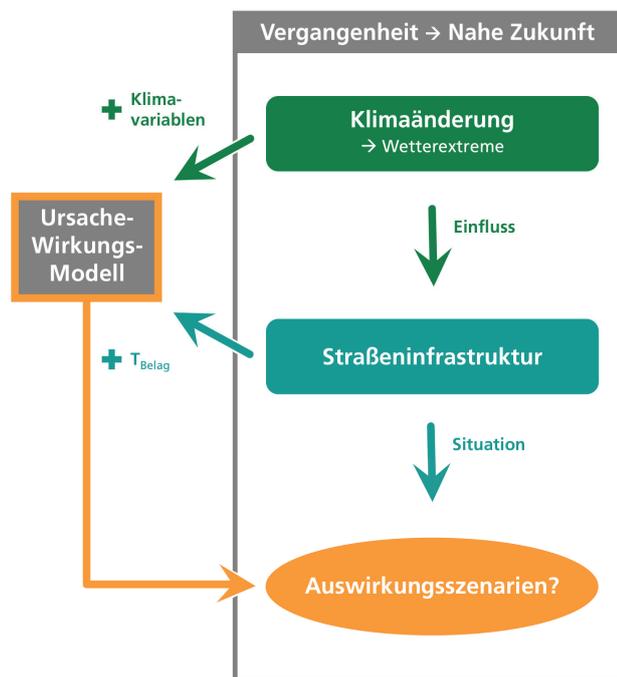
Die Veränderung der klimatischen Gefahren für die Straßeninfrastruktur durch den Klimawandel und die daraus resultierenden Risiken bzw. Gefahren sollen in einem datenbasierten Modell quantitativ erfasst und bewertet werden. Hierfür ist die Ausarbeitung eines Konzepts, einer Methodik und eines datenbasierten Modells erforderlich. Folgende spezifizierte Forschungsfragen lassen sich ableiten:

- Wie können die Veränderungen der klimatischen Gefahren und der Klimawandel quantitativ analysiert werden?
- Mit welchem methodischen Untersuchungsansatz können die benötigten Daten optimal bearbeitet werden?
- Wie können fehlende Eingangsgrößen des datenbasierten Modells im Rahmen gegebener Unsicherheiten in der Datenbasis abgeleitet werden?

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit kann aus den genannten Forschungsfragen konkludiert werden. Das primäre Ziel besteht in der Erstellung eines methodischen Instrumentariums durch ein geeignetes Konzept sowie die methodische Umsetzung und Modellierung des Instrumentariums, um die klimatischen Gefahren für die Straßeninfrastruktur und die Gefahrenveränderung (Risiko) durch den Klimawandel zu analysieren.

Abbildung 1.1 stellt das vereinfachte Konzept des Forschungsansatzes der vorliegenden Arbeit einführend dar. Das datenbasierte Ursache-Wirkungsmodell zur Analyse klimatischer Gefahren hinsichtlich Straßeninfrastruktur (Instrumentarium) wird nach seiner Implementierung auf zwei

Zeiträume von jeweils 30 Jahren angewendet. Es beruht auf Daten zu einzelnen Klimaparametern sowie zur Belagstemperatur. Da die Belagstemperatur der Straßen für die beiden Zeiträume oftmals nicht verfügbar ist, wird der Gefahrenmodellierung ein Regressionsmodell vorgeschaltet. Durch die Anwendung des Ursache-Wirkungsmodells (in der Grafik durch einen orangefarbenen Pfeil visualisiert), können die Veränderungen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Straßeninfrastruktur zwischen einem knapp 30-jährigen Zeitraum in der Vergangenheit – 1971 bis 2000 – und einem knapp 30-jährigen Zeitraum in der nahen Zukunft – 2021 bis 2050 – verglichen werden. Die Veränderungen der Auswirkungen resultieren aus den Veränderungen der klimatischen Gefahren für die Straßeninfrastruktur.



**Abbildung 1.1: Vereinfachte Darstellung des Forschungsansatzes dieser Arbeit**

Eigene Darstellung

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Um die zuvor genannten Ziele zu erreichen, müssen sukzessive verschiedene Fragestellungen bearbeitet werden. Abbildung 1.2 illustriert die Strukturierung der vorliegenden Arbeit. In dieser werden die einzelnen Kapitel anhand der zugehörigen Fragestellungen und damit konnektierten Untersuchungsobjekte dargelegt. Jedes Kapitel bringt ein eigenes Teilergebnis hervor, auf welchem das gesamtheitliche Konzept weiter aufbaut. Die Teilergebnisse werden (so möglich) durch die Detaillierung der Abbildung 1.1 des vereinfachten Konzepts des Forschungsansatzes visualisiert.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in einen theoretischen Teil zur Darstellung der zentralen Forschungsfragen sowie der klimatischen Gefahren in einem systemischen Ansatz (vgl. Kapitel 2, 3 und 4) und einen methodischen Teil zur Datenanalyse und Modellbildung der klimatischen Gefahren auf Straßeninfrastrukturen (vgl. Kapitel 5, 6 und 7).

Zu Beginn der Arbeit werden die Risiken bzw. die Gefahren des Klimawandels für die Straßeninfrastruktur dargestellt. In einem Forschungsdesign, welches auf einem systemischen Ansatz basiert, werden die Auswirkungen des Klimawandels ausgehend von dem System der natürlichen Umwelt für Infrastrukturen und soziale Systeme in Form eines konzeptuellen Modells dargelegt, definiert und beschrieben.

Das Forschungsdesign aus Kapitel 2 bietet für die theoretische Darlegung der klimatischen Gefahren als Prozesse des Systems der natürlichen Umwelt und deren Wirkung auf Infrastrukturen sowie das soziale System die theoretische Grundlage.

Kapitel 3 dient dazu, die konzeptuelle Modellierung der klimatischen Gefahren für Straßeninfrastrukturen darzustellen. Es inkludiert die Klassifizierung von natürlichen Prozessen, Naturgefahren und Naturkatastrophen

durch die Überschreitung von Systemgrenzen. Des Weiteren findet eine Differenzierung der Termini Risiko und Gefahr statt.

In Kapitel 4 werden klimatische Gefahren für die Straßeninfrastruktur anhand der bis April 2015 ausgewerteten Literatur identifiziert und operationalisiert.

Kapitel 5 thematisiert die zentrale Methode anhand eines implementierten Instrumentariums – das Ursache-Wirkungsmodell. Der Fokus ruht auf der Darstellung der Ursache-Wirkungszusammenhänge und der Modellierung von Belagtemperaturen auf Straßen anhand eines Data-Miningansatzes sowie auf den Zusammenhängen zwischen klimatischen Eingabeparametern und resultierenden Gefahren auf Straßen.

Im Rahmen von Kapitel 6 erfolgt eine praktische Anwendung des Ursache-Wirkungsmodells am Beispiel von Autobahnen in Baden-Württemberg. Die Modellergebnisse beschreiben die Auswirkungen der klimatischen Gefahren auf den Autobahnen in Baden-Württemberg und schildern einen Ausblick hinsichtlich potenziellen Veränderungen dieser Gefahren durch den Klimawandel. Ausgewählte Ergebnisse sind durch Karten und Grafiken visualisiert.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der quantitativen Modellierung diskutiert. Das Ursache-Wirkungsmodell, welches in Kapitel 5 implementiert worden ist, soll diskutiert und validiert werden. Anhand der Analyse der Validität der Gefahrenereignismodellierung und Parametersensitivität des datenbasierten Ursache-Wirkungsmodells bezüglich der Änderungen der Belagtemperatur kann ein Verständnis für die in Kapitel 6 dargelegten Ergebnisse gewonnen werden. Die Stärken und Schwächen des Modellbildungsansatzes sind erkennbar.

Kapitel 8 rundet die vorliegende Arbeit mit einem Resümee zum entwickelten Modellansatz und Forschungsdesign ab. Das Kapitel schließt mit einer Überprüfung der Ziele der vorliegenden Arbeit, einem Ausblick

auf die Übertragbarkeit des Forschungsansatzes auf andere Straßentypen sowie räumliche Einheiten und den erweiterbaren Anwendungsmöglichkeiten des Forschungsansatzes.

Der Anhang enthält Darstellungen zu den genutzten Daten und die gerechneten Regressionsmodelle (vgl. Kapitel 9, S. 183 ff.). Zudem ist es möglich, die Rechnungen und Programmierteile<sup>4</sup> der Methodik, angepasst an den Umfang der vorliegenden Arbeit, nachzuvollziehen (vgl. Kapitel 10, S. 213).

---

<sup>4</sup> Die Programmteile in Kapitel 6 sind syntaktisch korrekt dargestellt und funktionstüchtig. Allerdings handelt es sich um ausgewählte Beispiele. Auf die Darstellung aller Programmteile wird verzichtet, da die benötigte Datengrundlage nicht frei zugänglich ist.

## 1 Motivation und Ausgangslage

Fragestellungen

- Was ist der Hintergrund dieser Arbeit?
- Was sind die Ziele, die verfolgt werden?

⇒ Definition der Forschungsziele

---

## 2 Forschungsdesign

Fragestellung

- Wie können die Untersuchungsgegenstände, die Forschungsfragen und die Zielsetzungen dieser Arbeit aus systemischer Perspektive dargestellt, abgegrenzt und analysiert werden?

Untersuchungsobjekte

- Stand der Forschung
- Definition von System und Modell

⇒ Konzeptuelles Modell und Forschungsdesign

---

## 3 Diskurs: Natürliche Prozesse, Naturgefahren und Naturkatastrophen aus systemischer Perspektive

Fragestellungen

- Wie können Gefahren aus systemischer Perspektive definiert werden?
- Wie können die Faktoren natürlicher Prozess, Naturgefahr und Naturkatastrophe systemisch voneinander abgegrenzt und eingeordnet werden?

Untersuchungsobjekte

- Definition von Gefahr sowie Naturgefahr

⇒ Darlegung und Einordnung der grundlegenden Begriffe dieser Arbeit

---

## 4 Potenzielle Gefahren für die Straßeninfrastruktur unter Annahme des zu erwartenden Klimawandels

Fragestellungen

- Welche klimatischen Gefahren können anhand der Literatur für die Straßeninfrastruktur identifiziert werden?
- Welche potenziellen Gefahren des Klimawandels lassen sich anhand der Literatur operationalisieren?

Untersuchungsobjekte

- Klimatische Gefahren und ihre Auswirkungen auf Straßeninfrastruktur
- Klassifikator für klimatische Gefahren

⇒ Konzeptuelles Modell (Erweiterung) und Operationalisierung

---

## 5 Modellbildung und Methodik: das datenbasierte Modell

---

### Fragestellungen

- Wie können die Veränderungen der klimatischen Gefahren durch den Klimawandel quantitativ analysiert werden?
- Wie können fehlende Belagstemperaturen von Straßen über einen datenbasierten Ansatz im Rahmen gegebener Unsicherheiten in der Datenbasis modelliert werden?

### Untersuchungsobjekte

- Modell des Ursache-Wirkungsmodells
- Modellierung abgeleiteter Informationen (Klassifikatoren)
- Data-Mining-Ansatz eines Regressionsmodells

⇒ Methoden und datenbasiertes Modell

---

## 6 Prognose der Gefahrenentwicklung anhand der Modellergebnisse

---

### Fragestellungen

- Wie verändern sich die klimatischen Gefahren durch den Klimawandel?
- Wie lässt sich die Veränderung ermitteln?

### Untersuchungsobjekte

- Exemplarische Anwendung des datenbasierten Ursache-Wirkungsmodells auf Autobahnen in Baden-Württemberg und zwei Zeiträume
- Vergleichsanalyse und Bewertung des Änderungssignals

⇒ Prognose der Gefahrenentwicklung und mögliche Zukunftsanforderungen

---

## 7 Modellvalidierung

---

### Fragestellungen

- Wie valide sind die Ergebnisse der Modellberechnung der Gefahrenereignisse?
- Wie gestaltet sich die Parametersensitivität der Gefahrenereignisse im Hinblick auf eine modellierte Belagstemperatur?

### Untersuchungsobjekte

- Validierung der Gefahrenereignisse
- Diskussion der Parametersensitivität

⇒ Validierung des datenbasierten Modells

---

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Fragestellungen

- Welche Fragen können mit den entwickelten Methoden und Modellen dieser Arbeit beantwortet werden?
- Welcher weitere Forschungsbedarf resultiert daraus?

Untersuchungsobjekte

- Zielerfüllung
- Übertragbarkeit
- Offene Fragen
- Forschungsbedarf
- Schlussfolgerungen

⇒ Übergeordnete Konsequenzen

---

### **Abbildung 1.2: Struktur der Arbeit**

Eigene Darstellung

## 2 Forschungsdesign

*„Eine substanzielle Systemdefinition ist unmöglich. Wenn man von einem ‚System‘ spricht, meint man eine bestimmte Darstellung, mit der man einen gewissen Teil der Wirklichkeit abbildet. [...] Unter einem ‚System‘ verstehe ich die Form, in der beliebige Gegenstände der Wirklichkeit zu beschreiben und zu erklären sind.“*

*(Ropohl, 2012, S. 51)*

Der Formulierung Ropohls (2012) folgend, muss in einem ersten Schritt der Untersuchungsgegenstand erfasst werden, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Straßeninfrastruktur systemisch zu verstehen. In diesem Kontext wird von den nicht-relevanten Eigenschaften eines Systems abstrahiert

Der Klimawandel wirkt sich in der Realität auf die Straßeninfrastruktur und die Gesellschaft aus. Diese Auswirkungen auf die Straßeninfrastruktur, die soziale sowie naturräumliche Umwelt und die Zusammenhänge sowie Wechselwirkungen zwischen ebendiesen Faktoren werden innerhalb dieses Kapitels in einem konzeptuellen Modellansatz dargestellt, systemisch abgegrenzt und analysiert.

Aus einer Vielzahl von Wissenschaftsdisziplinen können differente Ansätze zur Modellierung entwickelt werden. Die Modellierung beinhaltet im Allgemeinen eine individuelle Abstraktion der Wirklichkeit in einem konzeptuellen Modell. Im ersten Teil des Kapitels 2 wird der Ansatz zur Modellierung, welcher die Basis für der KRITIS-Ansatz von Atzl und Keller (2012) bildet, skizziert (vgl. Abschnitt 2.1).

Inhalt des Kapitels 2

In einem zweiten Abschnitt wird der interdisziplinäre, gesamtheitliche KRITIS-Ansatz – ausgerichtet an der Forschungsperspektive der vorliegenden Arbeit – beschrieben. Letztlich wird dieses konzeptuelle Modell

weiter abstrahiert, sodass eine Definition der klimatischen Gefahren aus systemischer Perspektive in Kapitel 3 (S. 25 ff.) definiert werden kann.

## 2.1 Forschungsdesign auf Basis eines systemischen Ansatzes

Modell- und  
Systembegriff

Jedes Modell ist eine Abstraktion der Realität und beinhaltet die für die Fragestellung und das gesamtheitliche System wesentlichen „Phänomene oder Gegebenheiten“ (Ropohl, 2012, S. 15). Die Realität oder Wirklichkeit besteht aus objektiv existierenden Gegebenheiten. Diese müssen nicht zwangsläufig durch Menschen erfassbar sein (Ropohl, 2012, S. 235). Das Modell hingegen ist ein Abbild der Wirklichkeit, wie diese vom „modellbildenden“ Menschen theoretisch konstruiert und abstrahiert werden kann (Ropohl, 2012, S. 233). Als System wird in diesem Zusammenhang das theoretische Modell mit den beinhalteten Objekten sowie ihren Wechselwirkungen benannt. Systeme sind folglich „Modelle von Ganzheiten“ (Ropohl, 2012, S. 54). Die Systemabgrenzung bestimmt, welche Untersuchungsgegenstände der Wirklichkeit fokussiert werden. Die Teile der Realität, welche nicht zum Modell gehören, stellen die Umgebung des Systems dar (Ropohl, 2012, S. 15). Während des Modellierungsprozesses bzw. der Systemabgrenzung findet neben der Abstraktion der Realität in einem konzeptuellen Modell zwangsweise eine Reduktion auf die für die Fragestellung relevanten und datentechnisch erfassbaren Parameter und Wechselwirkungen des Systems statt. Alle Modelle sind nach Stachowiak (1972, S. 131 ff.) durch drei Hauptmerkmale charakterisiert und werden zur zusammenfassenden Beschreibung eines Modells im Sinne der vorliegenden Arbeit aufgelistet:

- (1) Modelle bilden die Wirklichkeit ab oder repräsentieren einen Teil der Wirklichkeit. Stachowiak (1972, S. 131) bezeichnet dieses Charakteristikum als „Abbildungsmerkmal“.

- (2) Modelle beinhalten Objekte (sog. Attribute) und Prozesse, welche für die Fragestellung relevant erscheinen. Diese Relevanz ist durch die Modellerschafferin und den Modellerschaffer sowie die Modellbenutzerin und den Modellbenutzer deklariert. Stachowiak (1972, S. 132) bezeichnet dieses Charakteristikum als „Verkürzungsmerkmal“.
- (3) „Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet“ (Stachowiak, 1973, S. 132). Sie können Subjekte und / oder über einen bestimmten Zeitraum die Realität ersetzen sowie definierte Abläufe, Prozesse oder Operationen substituieren und vereinfacht darlegen. Stachowiak (1972, S. 132) fasst diese Charakteristika als „pragmatisches Merkmal“ auf.

Von Bertalanffy (1973, S. 30) beschreibt die moderne Wissenschaft durch voranschreitende Spezialisierung in Form einer Vielzahl an Disziplinen, durch die Nutzung von großen Datenmengen sowie durch die Anwendung komplexer Techniken und Strukturen in dem jeweiligen Forschungsgebiet. Für die Konstruktion und Bauweise eines Modells nach den drei Hauptmerkmalen Stachowiaks (1973) und die Interpretation der Ergebnisse ergibt sich eine Abhängigkeit von Forscherin oder Forscher, Forschungsgebiet und Perspektive (Hartmann, 2005, S. 1). Einen gemeinsamen Kern der Ansätze zur Modellierung bzw. Definition der Systeme, der Gesetze sowie Vorgänge erkennt von Bertalanffy jedoch in allen Wissenschaftsbereichen (Bertalanffy, 1973, S. 32). Alle Gemeinsamkeiten können nach von Bertalanffys Idee und Vorbild in einem Forschungsansatz der allgemeinen Systemtheorie zusammengefasst werden. Hierbei können Systeme als Modelle im Denken der Forscherin und des Forschers aufgefasst werden (Ropohl, 2012, S. 53).

Die allgemeine Systemtheorie gewährt somit eine Verwendungsvielfalt von universalen Prinzipien, welche in unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen Anwendung finden (vgl. Rapoport, 1986). Genutzt wird dieser Ansatz z. B. in der Psychologie, der Philosophie, den Ingenieurwissenschaften,

Allgemeine  
Systemtheorie

der Soziologie, der Ökonomie und der Mathematik (vgl. hierzu Bertalanffy, 1973; Ashby, 1956; Ropohl, 2012; Luhmann & Baecker, 2004; Boulding, 1956; Rapoport, 1986).

Von Bertalanffy (1973, S. 32) definiert das Ziel der ‚General System Theory‘ (allgemeine Systemtheorie) in der Formulierung und Ableitung von allgemeinen Prinzipien, welche für alle Systeme gelten sollten. Er gilt durch die erste detaillierte Beschreibung des Ansatzes der allgemeinen Systemtheorie als Begründer bzw. (Weiter-)Entwickler ebendieser Theorie. Aufgrund der Vielzahl an Wissenschaften, welche die allgemeine Systemtheorie integrieren, sind in den jeweiligen Fachrichtungen und der fachspezifischen Literatur verschiedene Verwendungs- und Anwendungsbezüge existent. Allen gemein ist, dass die allgemeine Systemtheorie genutzt wird, um komplexe Fragestellung systemisch zu modellieren (Ropohl, 2012). Zugelassen wird hierbei sowohl die analytische Methodik als auch die konzeptuelle Methodik (Ropohl, 2012, S. 24). Die Fragestellung determiniert das zu erstellende Modell und den Zweck der Modellierung (Töllner, 2009, S. 5). Mit der allgemeinen Systemtheorie, wie von Bertalanffy (1973) und Ropohl (2012) sie interpretieren, wird ein modelltheoretischer Ansatz als wissenschaftliches Werkzeug eingesetzt. Durch Axiome, Ableitungen und terminierte Regeln, wie die Definition eines Modells nach Stachowiak (1973), können Systeme bzw. Modelle systematisch und methodisch konstruiert werden.

‚Anwendung‘ der  
allgemeinen System-  
theorie in dieser Arbeit

Zur Analyse der Veränderungen klimatischer Gefahren im Kontext des Klimawandels sowie der Darstellung von Auswirkungen auf die Straßeninfrastruktur wird zunächst eine Abstraktion des Untersuchungsproblems in einem konzeptuellen, systemischen Ansatz benötigt. Die komplexe Thematik soll in überschaubare und somit eine endliche Menge an sukzessiv überprüfbareren Schritten zerlegt werden. Prozesse und Wechselwirkungen innerhalb der Systemgrenzen müssen beschrieben und auf die Relevanz der Fragestellung hin expliziert werden.

Eine Zerlegung in ein konzeptuelles Systemmodell und in ein quantifizierbares Ursache-Wirkungsmodell kann die vorhandene Komplexität in einem Modellansatz reduzieren. Die Kombination der beiden Modelle bzw. Systemansätze prädestiniert die Nutzung des Ansatzes der allgemeinen Systemtheorie nach dem Vorbild von Stachowiak (1973) und Ropohl (2012). Die Abstraktion und Reduktion der Fragestellungen in einem konzeptuellen Modell wird im folgenden Abschnitt 2.2 dargestellt. Das vorzustellende konzeptuelle Modell umfasst eine spezifische für die Fragestellung ausgelegte Sammlung von Prinzipien und Regeln.

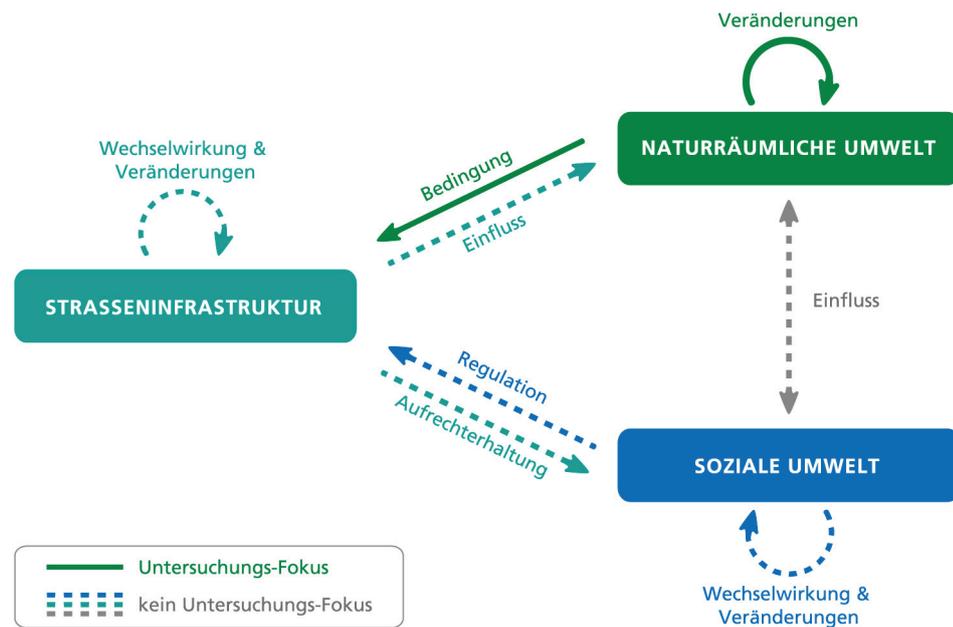
## 2.2 Konzeptuelles Modell zur Analyse der Gefahren des Klimawandels für die Straßeninfrastruktur

Der in Abbildung 2.1 dargestellte konzeptuelle Modellansatz ist ein Ergebnis der Systemabgrenzung und -beschreibung mit dem Ziel, Untersuchungsobjekte zu definieren und zu erfassen, welche für die Analyse der Abschätzung klimatischer Gefahren für die Straßeninfrastruktur und daraus resultierende Auswirkungen auf das naturräumliche System und das soziale System wesentlich sind. Dieses konzeptuelle Modell bildet in der dargestellten systemischen Perspektive mehr Objekte, Prozesse und damit verbundene Systeme ab als für die Modellbildung der Fragestellung der vorliegenden Arbeit benötigt werden.

In dem konzeptuellen Ansatz der vorliegenden Arbeit erfolgt zunächst eine ganzheitliche Betrachtung des KRITIS-Ansatzes. Hierdurch ergibt sich ein theoretisches Verständnis des Modellausschnitts, welcher in der vorliegenden Arbeit genutzt wird. Zugleich kann der Abstraktions- und Reduktionsgrad des systemischen Ansatzes von der Wirklichkeit erfasst werden:

Dem Abbildungs- und Verkürzungsmerkmal von Stachowiak (1973) folgend, existieren in der Wirklichkeit mehr und komplexere Beziehungsgeflechte als im systemischen Ansatz (vgl. Abbildung 2.1) dargestellt sind.

Systemischer  
KRITIS-Ansatz nach  
Atzl & Keller (2013)



**Abbildung 2.1: Systemischer KRITIS-Ansatz**

Eigene Darstellung in Anlehnung an Atzl & Keller (2013)

Die funktionale Abbildung der Wirklichkeit durch den systemischen Ansatz in veränderter Form des KRITIS-Ansatzes von Atzl & Keller (2013) benennt als Systembestandteile des Modells drei Systeme – die naturräumliche Umwelt, die Straßeninfrastruktur und die soziale Umwelt. Diese drei Systeme wirken über verschiedenartige Prozesse wechselseitig aufeinander. Kausale Prozesse sind durch gerichtete, farblich zu unterscheidende Pfeile gekennzeichnet. Sie repräsentieren Ursache-Wirkungsbeziehungen, welche durch die jeweils anderen Systeme entstehen können. Die Farbe der Pfeile wird anhand des Ursprungs der Ursache, die sich aus einem der Systeme ergibt, bestimmt. Die drei Systeme beinhalten Prozesse, die Veränderungen innerhalb des jeweiligen Systems hervorrufen können. Diese Veränderungen und Wechselwirkungen beruhen ebenfalls auf Ursache-Wirkungsbeziehungen, verbleiben jedoch in einem System. Das heißt, die kausale Ursache geht aus dem System, welches die induzierte Wirkung beinhaltet, selbst hervor. Grafisch dargestellt werden sie durch die kreisförmigen, farblich divergenten Pfeile.

Die Betrachtung der verschiedenen Verknüpfungen, Prozesse und Wechselwirkungen beginnt in dem Zusammenhang der vorliegenden Arbeit bei der naturräumlichen Umwelt. Denn der Klimawandel als ein Objekt der Analyse und als ausschlaggebender Faktor hinsichtlich des Umfangs der Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen Gefahren bzw. Risiken zunehmender Wetterereignisse und deren Auswirkung auf die Straßeninfrastruktur stellt einen Bestandteil bzw. Prozess der naturräumlichen Umwelt dar. Prozesse, welche in der naturräumlichen Umwelt ablaufen, sind oftmals von Menschen beeinflusst (Becker, Jahn & Hummel, 2006). Dies trifft auch auf den Klimawandel zu, der eine natürliche und eine anthropogene Komponente aufweist. In Abbildung 2.1 (S. 20) sind die für diese Fragestellung zu untersuchenden Prozesse anhand durchgezogener Pfeile oder Linien gekennzeichnet. Die verbleibenden Prozesse, Änderungen und Wechselwirkungen im KRITIS-Ansatz stellen aus systemischer Perspektive die Umgebung des Systems dar und werden nicht modelliert.

Die naturräumliche Umwelt besteht aus den Objekten oder Komponenten Topografie, Klima, Geomorphologie, Boden und Vegetation. Jede Komponente ist wiederum aufgebaut aus weiteren Elementen. Im Falle des Klimas können solche Elemente aus Luftdruck, Lufttemperatur in zwei Metern Höhe, Luftfeuchtigkeit, Bewölkungsgrad und Niederschlagsmenge sowie -typ bestehen (Keller & Atzl, 2014, S. 228). Die Kombination der einzelnen Klimaelemente bezeichnet das für einen geografischen Ort oder eine Region spezifische Klima (vgl. Keller & Atzl, 2014; Temesgen, Mohammed & Korme, 2001; Burton, Kates & White, 1993; Gares, Sherman & Nordstrom, 1994). Die Elemente des Systems naturräumliche Umwelt beschreiben Mitchell et al. (1989) als voneinander abhängig. Veränderungen eines oder mehrerer Elemente wirken sich direkt auf andere aus (Minciardi et al., 2006). Eine Veränderung der naturräumlichen Umwelt zeichnet sich durch die Änderung der Struktur und des Zustands dieser aus. Veränderungen treten in einem zeitlichen und in einem räumlichen Verlauf auf. Massey (1999, S. 264) spricht in diesem Kontext von der

System der naturräumlichen Umwelt

„space-time“ als einem Objekt, das zeitliche und räumliche Veränderungen erfasst.

Prozesse in der natur-  
räumlichen Umwelt und  
deren Auswirkungen

Diese können sowohl positive als auch negative Effekte umschließen (Keller & Atzl, 2014; White, Kates & Burton, 2001). Einige Prozesse der naturräumlichen Umwelt überschreiten die Systemgrenze. Sie wirken auf die beiden anderen Systeme. Auf Modellebene wird dies durch den grünen zur Straßeninfrastruktur gerichteten Pfeil ‚Bedingung‘ und den grauen Pfeil ‚Einfluss‘ zwischen sozialer Umwelt und naturräumlicher Umwelt illustriert. Natürliche Prozesse – als Prozesse mit Ursprung in der naturräumlichen Umwelt – können negativen Einfluss auf die Straßeninfrastruktur und die soziale Umwelt haben. Sie stellen eine Bedrohung bzw. Gefahr mit Risiko dar. Im schlimmsten Fall können sie zu einer Katastrophe werden (vgl. hierzu Kapitel 3.1, S. 26 ff.). Klimaveränderungen können u. a. negative Folgen für den Transportsektor, wie bspw. Straßeninfrastruktur, nach sich ziehen (Peterson et al., 2008, S. 1). Schäden an der Straßenoberfläche und vermehrte Wartungskosten resultieren oftmals aus extremen Lufttemperaturen. Überflutung von Straßen wird durch steigende Niederschlagsintensitäten und -vorkommnisse verursacht. Edwards (1999) benennt, neben den Schäden an der Straßeninfrastruktur selbst, eine Störung des Straßenverkehrsflusses durch die Veränderung der Wetterextreme. Für Autofahrerinnen und Autofahrer stellen Aquaplaning-Risiken mit einem Wasserfilm auf der Fahrbahnoberfläche stellenweise gefährliche Bedingungen bis hin zum Verlust der Fahrzeugkontrolle dar (Keller & Atzl, 2014, S. 229).

Systemische Definition  
der kritischen  
Infrastruktur

Der systemische KRITIS-Ansatz im Original von Atzl & Keller (2013) identifiziert die Prozesse und Wechselwirkungen zwischen den drei Systemen – kritische Infrastruktur, naturräumliche Umwelt und soziale Umwelt (vgl. Atzl & Keller, 2013, S. 31 ff.). Definitionen von kritischer Infrastruktur variieren abhängig von dem wissenschaftlichen und geographischen Kontext. Einen Überblick über drei spezifische Definitionen sowie

Eigenschaften der kritischen Infrastruktur geben Atzl & Keller (2013, S. 30).

Kritische Infrastruktur, zu der Straßeninfrastruktur gehört, beinhaltet im systemischen Ansatz der vorliegenden Dissertation technische und organisatorische Strukturen, welche relevant sind, um die Funktionen der sozialen Umwelt zu erhalten (Atzl & Keller, 2013, S. 31). Aus diesem Grund bedeuten negative Auswirkungen für das System der kritischen Infrastruktur fast simultan negative Auswirkungen für die soziale Umwelt. Das System kritische Infrastruktur ist charakterisiert von Wechselwirkungen zwischen einzelnen Infrastruktursektoren und -komponenten (Rinaldi et al., 2001, S. 12).

Zwischen einer Infrastruktur und einer anderen existieren Kaskadeneffekte. Diese Effekte repräsentieren den komplexen Systemcharakter des Systems kritische Infrastruktur (Rinaldi et al., 2001). Nach Utne et al. (2011) sind Verbindungen zwischen Infrastrukturen durch physische, virtuelle, logische und geografische Strukturen charakterisiert. Indirekte sowie direkte Effekte zwischen Infrastrukturkomponenten und Infrastruktursektoren entstehen durch Änderungen in einer Infrastrukturkomponente oder innerhalb eines Infrastruktursektors (Wang et al., 2012).

Der vorliegende Forschungsansatz konzentriert sich modellhaft auf die Straßeninfrastruktur als kritische Infrastruktur. Unter Straßeninfrastruktur wird nach dem KRITIS-Ansatz ein System verstanden (Wang et al., 2012; Utne et al., 2011; Rinaldi et al., 2001). Systemkomponenten stellen die differenten Straßentypen in Baden-Württemberg dar. Hierzu gehören Autobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen sowie Kreis- und kommunale Straßen. Die physischen Bedingungen des Systems Straßeninfrastruktur werden durch Systemgrenzen-überschreitende Prozesse der naturräumlichen Umwelt definiert. Der Bau, Betrieb und die Weiterentwicklung von

System der Straßen-  
infrastruktur als eine  
kritische Infrastruktur

Straßeninfrastruktur werden u. a. auf diese Weise mitbestimmt. Das System Straßeninfrastruktur wird durch Handlungen, Akteure und Strukturen der sozialen Umwelt reguliert.

System der  
sozialen Umwelt

Regulationsprozesse von Infrastruktursystemen bzw. im vorliegenden Fall von Straßeninfrastruktur erfolgen als systemübergreifende Prozesse – ausgehend von der sozialen Umwelt. Infrastrukturplanerinnen und Infrastrukturplaner sowie Infrastrukturbetreiberinnen und Infrastrukturbetreiber sind Teil der sozialen Umwelt. Regulationsprozesse bestehen aus formalen und informalen Methoden (vgl. Atzl & Keller, 2013). Raumplanung und Regulation sind als normative Prozesse zu verstehen (Moss, 2011). Die Zielsetzung, welche diesen Prozessen zugrunde liegt, beruht auf politischen und sozialen Prozessen (Fürst, 2011). Eine Ausführung der Prozesse und Veränderungen innerhalb des Systems soziale Umwelt formulieren Atzl & Keller (2013) in einem ‚systemic approach for the analysis of infrastructure-specific vulnerability‘. Hierbei wird insbesondere die Beziehung zwischen kritischer Infrastruktur und sozialer Umwelt erörtert.

### 3 Diskurs: Natürliche Prozesse, Naturgefahren und Naturkatastrophen aus systemischer Perspektive

*„The concept of natural hazard implies a conflict between natural and social systems. Events that occur in the natural system become hazards when threaten to impinge on human resources.“*

*(Sherman & Nordstrom, 1994, S. 264)*

Sherman et al. (1994, S. 264) beschreiben die Zusammenhänge bei der Entstehung von Naturgefahren (engl. *natural hazards*): Naturgefahren entstehen durch Prozesse im System der naturräumlichen Umwelt, die sich negativ auf das System der sozialen Umwelt und der kritischen Infrastruktur auswirken.

In Abschnitt 3.1 werden Gefahren aus systemischer Perspektive betrachtet. Hierbei findet eine Definition von natürlichem Prozess (*natural process*), Naturgefahr (*natural hazard*) und Naturkatastrophe (*natural disaster*) anhand des konzeptuellen Modells aus Kapitel 2.2 (S. 19 ff.) sowie existierender Ansätze statt. In dem Modell wird somit der Ausschnitt zwischen der naturräumlichen Umwelt, den Auswirkungen dieser auf Straßeninfrastruktur und die potenziellen Folge in der Straßeninfrastruktur betrachtet.

Abschnitt 3.2 expliziert grundlegende Begrifflichkeiten im Rahmen dieser Arbeit. Die Differenzierung zwischen Risiko und Gefahr, die in der Literatur vorzufindenden Abgrenzungen des Begriffs der Naturgefahr und ein kurzer Überblick zu projizierten Klimaänderungen werden erläutert.

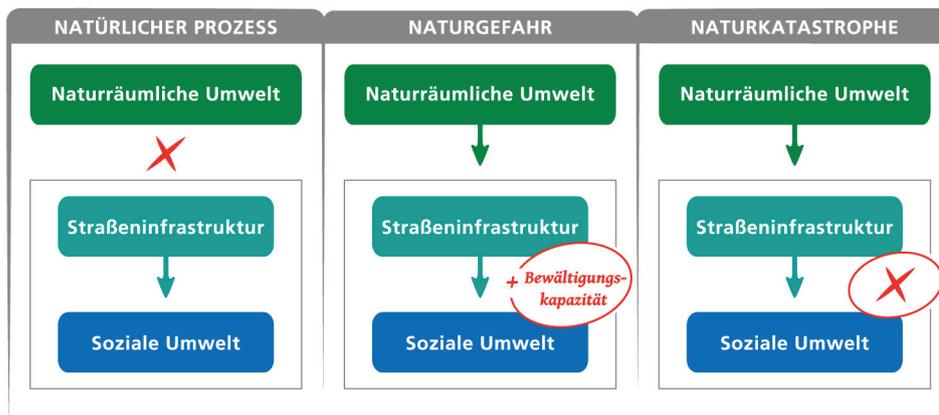
Kapitel 3 behandelt folglich einen weiteren Aspekt des konzeptuellen Rahmens und bildet die Vorstufe der Identifizierung potenzieller Gefahren für die Straßeninfrastruktur durch den Klimawandel. Dieses Kapitel lässt durch die Definition und Erläuterung wesentlicher Begrifflichkeiten einen gemeinsamen Verständnishorizont entstehen.

Inhalt des  
Kapitels 3

### 3.1 Von natürlichen Prozessen zu Gefahren und Katastrophen aus systemischer Perspektive

Veränderungen innerhalb des Systems der naturräumlichen Umwelt führen nicht sofort und determinierend zu Naturgefahren oder Naturkatastrophen. Vielmehr entstehen Katastrophen in der sozialen Umwelt und teilweise im System der kritischen Infrastruktur. Gekennzeichnet sind Katastrophen in der sozialen Umwelt durch ihre negative Wirkung auf eine Gesellschaft. In der naturräumlichen Umwelt existieren somit keine Katastrophen und der Begriff der Naturkatastrophe sollte nicht diesbezüglich missverstanden werden (vgl. Felgentreff & Glade, 2008).

Natürliche Prozesse, welche die Grenzen des Systems naturräumliche Umwelt überschreiten, beeinflussen jegliche Systeme, welche für die anthropogene Gesellschaft wesentlich sind (Keller & Atzl, 2014, S. 229). Die grünen Pfeile in der mittleren und rechten Box der Abbildung 3.1 (S. 27) zeigen diese Systemüberschreitung auf. Wie Geipel (2001, S. 31) postuliert, hängt „das Schadenspotential eines Hochwassers [...] von unreflektierten Bauleitplänen, von verletzlicher Gebäudestruktur, unvorsichtiger Verkehrslinienführung, unbedachter Landnutzung und mangelhafter Gesetzgebung und Verwaltung“ ab. Ereignisse der naturräumlichen Umwelt – Naturereignisse – werden folglich nur unter spezifischen Bedingungen zu einer Gefahr oder einer Katastrophe (Alcántara-Ayala, 2002; Plate & Merz, 1993).



**Abbildung 3.1: Systemische Darstellung von natürlichen Prozessen, Naturgefahren und Naturkatastrophen**

Eigene Darstellung in Anlehnung an Keller und Atzl (2014, S. 229)

Der grüne Pfeil symbolisiert die Auswirkungen von Prozessen der natürlichen Umwelt auf die beiden anderen Systeme. Der türkisfarbene Pfeil symbolisiert die Aufrechterhaltung sozialer Funktionen durch kritische Infrastruktur, hier beispielhaft der Straßeninfrastruktur.

Nach Abbildung 3.1 werden natürliche Prozesse als neutral betrachtet, wenn sie auf das System der naturräumlichen Umwelt beschränkt sind oder ihre Auswirkungen auf die beiden anderen Systeme als vernachlässigbar, ggfs. mit geringem Aufwand, betrachtet werden. Natürliche Prozesse stellen keine Bedrohung, Gefahr oder Risiko für die Gesellschaft und die Infrastruktur dar, da sie ausschließlich in der naturräumlichen Umwelt entstehen und in dieser wirken. Sie können anthropogene und natürliche Ursachen haben. Oftmals, wie z. B. im Falle des Klimawandels, sind diese Ursachenquellen schwierig zu differenzieren. Obwohl anthropogene Einflüsse sich auf natürliche Prozesse auswirken können (vgl. Abbildung 2.1, S. 20), werden natürliche Prozesse als Bestandteil der naturräumlichen Umwelt betrachtet und sind aus physischen Elementen aufgebaut (Keller & Atzl, 2014; Gares et al., 1994; Sherman & Nordstrom, 1994). Unabhängig davon, ob er natürlichen oder anthropogenen Ursprungs ist, ist der Klimawandel im systemischen KRITIS-Framework als ein Prozess der naturräumlichen Umwelt zu betrachten und verändert diese.

Natürliche Prozesse

- Naturgefahr   Überschreiten natürliche Prozesse die Systemgrenze der naturräumlichen Umwelt und wirken sich negativ auf die soziale Umwelt sowie die Infrastruktur aus, entstehen Gefahren für diese beiden Systeme (Eiser et al., 2012; Temesgen et al., 2001). In Hinblick auf den Klimawandel entstehen folglich Auswirkungen auf andere Systeme, wenn der Klimawandel als Prozess die Systemgrenzen der naturräumlichen Umwelt überschreitet (Keller & Atzl, 2014). Markau (2003, S. 40 f.) beschreibt dieses Phänomen als „Paradoxon“. Denn der Einfluss der sozialen Umwelt und der Infrastruktur auf die naturräumliche Umwelt und die Nutzung dieser führen letztlich zur Entstehung einer Gefahr in der sozialen Umwelt. Eine Naturgefahr kann nach dem ‚Special Report‘ des IPCC (2012, S. 31) dergestalt entstehen, dass die Systeme kritische Infrastruktur und soziale Umwelt Ereignissen der natürlichen Umwelt ausgesetzt sind und diesen gegenüber eine Anfälligkeit aufweisen.
- Exposition    ‚Ausgesetzt sein‘ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Systeme, wie die kritische Infrastruktur, aufgrund ihrer Lage nachteilig durch lokal wirkende Ereignisse der natürlichen Umwelt geschädigt werden können (IPCC, 2012, S. 32; UNDP, 2004, S. 97).
- Vulnerabilität   Der Begriff der ‚Anfälligkeit‘ bzw. ‚Vulnerabilität‘ bezieht sich im Allgemeinen auf die Verletzlichkeit eines Systems gegenüber einem Risiko (Atzl & Keller, 2013). Im Rahmen des KRITIS-Ansatzes stellt die Anfälligkeit der (Sub-)Systeme naturräumliche Umwelt, kritische Infrastruktur – hier die Komponente Straßeninfrastruktur – und soziale Umwelt die Anfälligkeit dieser drei Systeme gegenüber den negativen Auswirkungen des Klimawandels und der damit verbundenen Zunahme der Wetterextreme sowie deren Folgewirkung dar. Sie kann als Gradmesser für die Empfindlichkeit eines Systems gegenüber einer Naturgefahr herangezogen werden (IPCC, 2012, S. 32). Eine Darstellung der wesentlichen Konzepte bezüglich der Vulnerabilität der sozialen Umwelt in Bezug auf spezifische Infrastrukturen geben z. B. Cutter et al. (2003), Fekete (2009) sowie Atzl und Keller (2013). Vulnerabilität ist kontext- und objektabhängig. Innerhalb

der Vulnerabilitätsforschung existieren differente Ansätze, wie Vulnerabilität betrachtet, bewertet und definiert werden kann. Birkmann et al. (2011) stellen in ihrer Studie verschiedene Vulnerabilitätskonzepte im Kontext von ‚Vulnerabilitäts- und Bewältigungspotenzialen‘ bei Naturgefahren vor (BBK, 2011, S. 22 ff.). Cutter (1996, S. 530) merkt an, dass *„vulnerability still means different things to different people“*. Vulnerabilität wird in aktuellen Forschungsansätzen nicht nur als Anfälligkeit verstanden. Isoliert betrachtet, lässt sich aus dem Faktor ‚Anfälligkeit‘ keine ausreichende Aussage für ein System ableiten. Die Kombination aus der Anfälligkeit eines Systems, seiner Bewältigungskapazität sowie seiner Exposition in Bezug auf ein Ereignis müssen ebenso in Betracht gezogen werden wie die potenziellen jeweiligen Veränderungen dieser Aspekte (vgl. KRITIS-Konzept von Lenz, 2009).

Bis zu einem bestimmten Ausmaß kann die kritische Infrastruktur die Gefahr kompensieren, die von einem natürlichen Ereignis, wie z. B. einem Wetterereignis und dessen negativen Folgen, ausgeht. Ähnlich verhält es sich mit dem Einfluss einer Gefahr auf die soziale Umwelt. Dieses System ist in der Lage, negative Einwirkungen bis zu einem bestimmtem Grad zu bewältigen. Die individuelle Bewältigungskapazität hängt hierbei von normativen Prozessen und Regulationen in der sozialen Umwelt ab (Atzl & Keller, 2013). Die Bewältigungskapazität der Systeme kritische Infrastruktur und soziale Umwelt verringert bzw. steigert die Anfälligkeit eines Systems gegenüber negativen Auswirkungen. Die Bewältigungskapazität ist je nach betrachteter Infrastrukturkomponente unterschiedlich stark ausgeprägt und verteilt (BBK, 2011, S. 16).

Bewältigungskapazität

Der mittlere Kasten in Abbildung 3.1 (S. 27) illustriert die systemische Beziehung zwischen der natürlichen Umwelt und den beiden anderen Systemen. Die Kapazität sowohl der Straßeninfrastruktur als Beispiel einer kritischen Infrastruktur als auch der sozialen Umwelt, mit den Auswirkungen einer Naturgefahr fertig zu werden (Bewältigungskapazität), wird durch einen roten Kreis dargestellt.

Naturkatastrophe

Wird die Funktionalität der sozialen Umwelt oder der kritischen Infrastruktur schwerwiegend und negativ durch eine Naturgefahr beeinflusst, wird die Naturgefahr zu einer Naturkatastrophe (IPCC, 2012). Naturkatastrophen entstehen, wenn die soziale Umwelt und die Infrastruktursysteme eine Naturgefahr nicht bewältigen können (Keller & Atzl, 2014, S. 230). Trifft diese Störung auf das System der kritischen Infrastruktur zu, kann diese ihre Aufgabe der Aufrechterhaltung gesellschaftlicher und sozialer Prozesse nicht mehr erfüllen. Letztlich wirkt sich ein Prozess, wie der Klimawandel, unter diesen Umständen ebenfalls negativ auf das soziale System aus. Katastrophen können insofern entstehen, wenn eine Gefahr für ein System mit einer Anfälligkeit des Systems korreliert (Sobiech, 2013; Temesgen et al., 2001). Die Ursache für eine Naturkatastrophe ist ein natürlicher Prozess, welcher auf ein anfälliges System wirkt (Felgentreff & Glade, 2008; Plate & Merz, 1993; Mitchell et al., 1989). Die fehlende Bewältigungskapazität wird in dem rechten Kasten der Abbildung 3.1 (S. 27) durch ein rotes Kreuz dargestellt.

Die deutsche Bundesregierung (2011, S. 17) benennt mit dem Begriff ‚Verletzbarkeitsparadox‘ eine Eigenschaft, welche in einigen technologisch fortgeschrittenen Staaten vorhanden ist. In Deutschland herrscht eine relativ hohe Verlässlichkeit der Infrastruktursysteme. Dies führt dazu, dass von technischer wie sozialer Seite eine Verlässlichkeit erwartet wird. Infrastruktursysteme müssen funktionieren und die Nutzerinnen sowie Nutzer sind an längere Ausfälle nicht gewöhnt (Lorenz, 2010). Durch diese Gewohnheit sowie durch die Erfahrung und Erwartung der Verlässlichkeit verringert sich individuell und auch gesellschaftlich die Kapazität, mit unerwarteten Ausfällen oder Störungen umgehen zu können (Deutscher Bundestag, 2011).

Nach dem zugrunde liegenden KRITIS-Ansatz ist Anpassung an den Klimawandel zu verstehen als:

Anpassung aus einer systemischen Perspektive

- a. Die Verringerung der Vulnerabilität der naturräumlichen Umwelt, in der klimatische Veränderungen ablaufen, gegenüber der kritischen Infrastruktur sowie der sozialen Umwelt in Bezug auf die potenziellen Folgen des Klimawandels;
- b. die Erhaltung und Förderung der Bewältigungskapazität der einzelnen Systeme durch individuelle Anpassungsmaßnahmen bzw. Anpassungsstrategien.

### 3.2 Grundlegende Begrifflichkeiten und ihre Positionierung im Rahmen der vorliegenden Arbeit

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Begrifflichkeiten – natürlicher Prozess, Naturgefahr, Naturkatastrophe sowie Exposition, Vulnerabilität und Bewältigungskapazität – anhand eines konzeptuellen Forschungsmodells erläutert. Fachtermini werden je nach Forschungshintergrund und Wissenschaftsdisziplin unterschiedlich definiert, hergeleitet und genutzt. Dieser Abschnitt dient der Beschreibung weiterer grundlegender Begrifflichkeiten, die in der vorliegenden Arbeit genutzt werden.

Im konzeptuellen Modell dieser Arbeit wurde bisher der Terminus der ‚Gefahr‘ als Oberbegriff für Ereignisse und Prozesse in der naturräumlichen Umwelt verwendet, die sich auf eine Infrastruktur auswirken. Im Rahmen dieser Arbeit sollen die ‚spezifischen Risiken des Klimawandels‘ auf Straßeninfrastruktur thematisiert werden. Die Begriffe des Risikos und der Gefahr hängen kausal zusammen. Daher sind dieser Zusammenhang sowie eine Differenzierung der beiden Begriffe für das Verständnis der Gefahrenmodellierung in einem datenbasierten Modell unabdingbar.

### 3.2.1 Differenzierung zwischen ‚Risiko‘ und ‚Gefahr‘

Risiko und Gefahr

‚Gefahr‘ und ‚Risiko‘ werden als Begriffe im täglichen Sprachgebrauch häufig synonym verwendet. Im wissenschaftlichen Kontext sind die beiden Begrifflichkeiten zu unterscheiden. Ein einheitliches Verständnis der Termini ‚Gefahr‘ und ‚Risiko‘ existiert in der Wissenschaft nicht. Vielmehr sind die Definitionen abhängig von Wissenschaftsbereichen. Deutlich wird diese Abhängigkeit in Tabelle 3.1. Dargestellt sind ausgewählte Risiko-Definitionen nach Cutter (1996), dem Abschlussbericht der deutschen Risikokommission (2003), dem UNDP (2004), Carreño (2007), Bründl (2009) und Birkmann (2010). Allen Definitionen und Ansätzen gemein ist, dass eine Gefahr und eine Vulnerabilität des Objekts, auf welches die Gefahr wirkt, das Risiko mitdefinieren. Die weiteren Aspekte dieser Definitionen und Ansätze sind unterschiedlich stark gewichtet.

Die Wahrscheinlichkeit eines eintretenden Schadens an einem Objekt ergibt sich aus einem Risiko. Luhmann (1991, S. 30) beschreibt weiter, dass ein Risiko eine Entscheidung beinhaltet. Ein Risiko stellt ein „abstraktes Phänomen“ dar (Lenz, 2009, S. 36). In der Abschätzung zukünftiger Schäden existiert eine gewisse Unsicherheit.

Der Schaden kann auf zwei Arten entstehen: Einerseits kann er aus einer Entscheidung herrühren. Nach Luhmann (1991, S. 31) wird in diesem Fall von Risiko gesprochen. Andererseits kann der Schaden aus externen Ursachen heraus entstehen. Tritt dieser Fall ein, dann spricht Luhmann (1991) von einer Gefahr. Eine Gefahr geht einem Risiko voraus. Ein Risiko beinhaltet Unsicherheit, Entscheidungen und die Möglichkeit eines Schadens für ein Objekt bzw. System. Gefahren bezeichnen hier Naturgefahren (vgl. Kapitel 3.1, S. 26), deren Gefahrenquelle stets die naturräumliche Umwelt ist.

In der vorliegenden Arbeit werden Naturgefahren identifiziert, die keine Entscheidung hinsichtlich eines Untersuchungsobjekts oder Systems bein-

halten und daher nicht als Risiko im Sinne einer Risikoanalyse zu verstehen sind. Die Risikoanalyse umfasst die Identifizierung, Abschätzung, Bewertung und das Management von Risiken (vgl. Bloetzer, 1998; Markau, 2003; Wisner et al., 2004). Eine Gefahr kann folglich als eine Komponente eines Risikos interpretiert werden. Ohne Gefahr für ein System wird dieses keinem Risiko ausgesetzt und nicht geschädigt.

Lenz (2009, S. 37) erläutert, dass „ein Risikoelement [...] von potentiellen Gefahren bedroht“ wird. Im Fall der kritischen Infrastruktur repräsentiert bspw. die Straßeninfrastruktur als eine Infrastrukturkomponente des Transportsektors ein solches Risikoelement. Trifft eine Gefahr räumlich und zeitlich auf eine Straßeninfrastruktur (vgl. Exposition) kommt es zu deren Gefährdung.

**Tabelle 3.1: Auswahl an Definitionen des Terminus ‚Risiko‘**

Eigene Darstellung

| Definition des Terminus ‚Risiko‘   | Quelle                   |
|--|--------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• ‚hazard-of-place‘-Ansatz</li> <li>• Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Gefahr</li> <li>• Beinhaltet zwei Bereiche:<br/>Potenzielle Risikoursache und Kontextabhängigkeit des Risikos</li> </ul>  | (Cutter, 1996)           |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Soziologische, rechtliche, ökonomische, mathematische, toxikologische und epidemiologische Erklärung</li> <li>• Qualitative und bzw. oder quantitative Eigenschaft eines Schadens bzgl. Eintreffens und Schadenswirkung</li> </ul>  | (Risikokommission, 2003) |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausdruck über die Gleichung<br/>‚Risiko = Gefahr x Vulnerabilität‘</li> <li>• Wahrscheinlichkeit der Schädigung durch eine Gefahr und den vulnerablen Zustand eines Objekts/Systems</li> </ul>  | (UNDP, 2004)             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ganzheitlicher Ansatz zur Bewertung von urbanem Risiko basierend auf Cardonas Modell<br/>(<i>multi-hazard evaluation</i>)</li> <li>• Funktion aus potenzieller physischer Zerstörung und einem sog. ‚Impact‘-Faktor</li> <li>• Physische Zerstörung beinhaltet Exposition und Anfälligkeit gegenüber einer Gefahr</li> <li>• ‚Impact‘-Faktor beinhaltet Indikatoren zur Bemessung der sozialen und ökonomischen Zerbrechlichkeit sowie die Bewältigungskapazität</li> </ul> | (Carreño et al., 2007)   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Häufigkeit bzw. Jährlichkeit eines gefährlichen Ereignisses</li> <li>• Schadensausmaß definiert durch Anzahl der Personen und Sachwerte, die dem gefährlichen Ereignis ausgesetzt sind</li> </ul>   | (Bründl, 2009)           |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• ‚BBC-Framework‘</li> <li>• Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Gefahr kombiniert mit den negativen Auswirkung</li> <li>• Negative Auswirkungen hängen von der Verwundbarkeit des Systems ab</li> </ul> <p>Das Risiko ist damit als Funktion aus Gefahr und Verwundbarkeit definiert.</p>  | (Birkmann et al., 2010)  |

### 3.2.2 Naturgefahren und abgeleitete klimatische Gefahren

In der Literatur existiert eine Vielzahl hinsichtlich der unterschiedlichen Klassifizierungen von Naturgefahren. Abhängig vom jeweiligen wissenschaftlichen Kontext werden Kriterien, wie Intensität, Geschwindigkeit des Ablaufs der Naturgefahr, Dauer sowie Ausmaß an Verlusten und Schäden an Infrastruktur, für eine Klassifizierung angelegt.

Naturgefahren  
verschiedenen Ursprungs

Natürliche Prozesse und ihre potenziellen gefährdenden Wirkungen können in differente Prozesse unterteilt werden. Eigenschaften dieser Prozess-typen sind zugrunde liegende physische Prozesse und Prinzipien (Gebhardt, 2007, S. 1034). In der Internationalen Strategie der Vereinten Nationen zur Reduzierung von Katastrophen (engl. *International Strategy for Disaster Reduction* (UNISDR)) werden Naturgefahren nach hydrometeorologischem, geologischem und biologischem Ursprung klassifiziert (UNISDR, 2004). Hydrometeorologische Naturgefahren entstehen aus Prozessen in der Atmosphäre und Hydrosphäre. Smith (2013) unterteilt hydrometeorologische Gefahren weiter in atmosphärische und hydrologische Gefahren (Smith, 2013, Part I). Er differenziert daher zwischen vier Typen von Naturgefahren: geologische, atmosphärische, hydrologische und biologische Naturgefahren. Tabelle 3.2 umfasst eine kurze Erläuterung der vier Gefahrentypen.

**Tabelle 3.2: Vier Typen von Naturgefahren**

Eigene Darstellung

| Gefahrentyp           | Erläuterung   |
|-----------------------|---|
| Geologische Gefahr    | Geologische Gefahren entstehen durch endogene, tektonische oder exogene Prozesse (UNISDR, 2004, S. 39). Beispiele für geologische Gefahren sind u. a. Erdbeben, Massenbewegungen und Hangrutschungen.   |
| Atmosphärische Gefahr | Atmosphärische Gefahren beinhalten Gefahren, welche durch atmosphärische Prozesse entstehen können (Gebhardt, 2007, S. 1034). Beispiele für atmosphärische Gefahren sind u. a. Stürme, extreme Temperaturen und Niederschläge.  |
| Hydrologische Gefahr  | Hydrologische Gefahren beinhalten Gefahren, die durch extreme Ereignisse in Verbindung mit dem Auftreten, der Bewegung und Verbreitung von Wasser entstehen. Beispiele für hydrologische Gefahren sind u. a. Überschwemmungen und hydrologische Dürren.               |
| Biologische Gefahr    | Biologische Gefahren beinhalten Prozesse, wie Seuchen organischen Ursprungs oder Epidemien, verursacht durch Tiere und Pflanzen (UNISDR, 2004, S. 39). Mikroorganismen, Toxine und bioaktive Substanzen können ebenfalls als Ursache für biologische Gefahren gelten. |

Verständnis bzgl. klimatischer Gefahren

In der Beschreibung der Gefahren (vgl. Tabelle 3.2) sind u. a. Gefahren definiert, welche durch klimatische Prozesse induziert werden. Im Zuge des projizierten Klimawandels verändert sich die vergangene und gegenwärtige Klimasituation. Hydrologische und geologische Gefahren sind zu Teilen durch Klimafaktoren beeinflusst. Die Muster und Eigenschaften dieser sowie der atmosphärischen bzw. meteorologischen Gefahren werden sich demnach in ihrem Auftreten, Ausmaß und ihrer Auswirkung ändern.

Auf dem Hintergrund der Bewertung der Gefahren für die Straßeninfrastruktur durch den Klimawandel besteht die Notwendigkeit, Wissen über die Veränderungen dieser Gefahren zu schöpfen. In dem Betrachtungsansatz der vorliegenden Arbeit werden die Veränderungen der Klimaparameter in Betrachtung gezogen. Alle induzierten Gefahren, die als Folge des Klimawandels und daraus resultierender Änderungen der Klimaparameter entstehen können, werden unter dem Begriff ‚klimatische Gefahren‘ gruppiert. Das Klimasystem repräsentiert ein Subsystem der naturräumlichen Umwelt. Für die weitere Modellierung wird das System

der naturräumlichen Umwelt verkürzt auf Prozesse des Klimasystems, die Klimaparameter umfassen, die Zunahme der Wetterereignisse mit einer Gefahr für die Straßeninfrastruktur und den Klimawandel abstrahiert abbilden.

### 3.2.3 Überblick über den zu erwartenden Klimawandel

Der Klimawandel erzeugt potenzielle Gefahren, u. a. für Infrastruktursysteme. Der IPCC (2012, S. 248) bezeichnet in seiner Sonderausgabe zu Extremereignissen wetter- und klimabezogene Gefahren als eine große Gefahr für Infrastruktursysteme. Städtische Regionen sind laut diesem Bericht u. a. durch ihr ausgeprägtes Infrastrukturnetzwerk besonders durch die Folgen der Zunahme der Wetterextremereignisse betroffen (IPCC, 2012, S. 249).

Klimawandel

Der Begriff der ‚Klima-‘ sowie ‚Wetterextreme‘<sup>5</sup> bzw. der ‚Extremereignisse‘ bezieht sich auf das Auftreten einer Klima- oder Wettervariable über bzw. unter einem Schwellenwert<sup>6</sup> in der Nähe des oberen bzw. unteren Wertebereichs einer Variablen (IPCC, 2012, Kapitel 3.1.2).

Der ‚Klimawandel‘ benennt die Änderung des Klimas in Mittelwert und / oder seine Variabilität in einem Betrachtungszeitraum bzgl. eines Referenzzeitraums (IPCC, 2014, S. 1450). Die Veränderung der mittleren Varianz und der Häufigkeitsverteilung können zu Veränderungen der Häufigkeit, Intensität, des räumlichen Auftretens sowie der Dauer von Extremereignissen führen (IPCC, 2012, S. 7). Basierend auf den Szenarien und Aussagen der Arbeitsgruppe I des IPCC (2014) ergeben sich eine Erwärmung der Erdatmosphäre und weitere Änderungen des Klimasystems.

---

<sup>5</sup> Die Differenzierung zwischen extremem Klima- und Wetterereignis orientiert sich nach der Dauer des Ereignisses. Während ein Wetterextrem zeitlich begrenzt an einem Tag andauern kann, finden extreme Klimaereignisse vornehmlich in einem längeren Zeitraum statt.

<sup>6</sup> In einem weiteren Ansatz können Extremereignisse bezüglich der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens definiert werden. Hierbei handelt es sich um eine Darstellung der statistischen Häufigkeit von definierten Werten in einem spezifischen Zeitraum. Für die weitere Modellierung bietet der Ansatz über die Definition von Schwellenwerten der Klimaparameter eine geeignetere Handhabung.

Die Modellrechnungen des IPCC werden im wissenschaftlichen Kontext überwiegend anerkannt und bilden die Grundlage für politische Entscheidungen zur Klimawandelanpassung wie auch -verringering. Allerdings sei an dieser Stelle angemerkt, dass einige Autorinnen und Autoren, wie z. B. Green et al. (2009), die Annahmen zu den Modellberechnungen und die daraus abgeleiteten Ergebnisse für politische Leitlinien kritisieren.

In der folgenden Tabelle sind einige generelle Aspekte des Klimawandels mit Konfidenzabschätzung der möglichen Änderung nach dem IPCC (2014) aggregiert.

**Tabelle 3.3: Überblick über die projizierten Klimaänderungen**

Zusammenfassung wesentlicher Aspekte des Klimawandels nach IPCC (2014)

**Projizierte Veränderungen des Klimasystems  
im Zeitraum 2081 bis 2100 zu dem Referenzzeitraum 1986 bis 2005**

Die Oberflächentemperatur der Erde wird im Laufe des 21. Jahrhunderts ansteigen. Dies zeigen alle Emissionsszenarien als Ergebnis. Die Temperaturzunahme kann wahrscheinlich<sup>7</sup> bis zu 2 K betragen.

Die Zunahme und längere Andauer von Hitzewellen wird als sehr wahrscheinlich eingeschätzt.

Die Niederschlagsänderung wird nicht einheitlich sein. In den mittleren Breiten der Nordhalbkugel hat die Niederschlagsmenge über den Landflächen seit 1901 zugenommen. In den Mittelbreiten wird der durchschnittliche Jahresniederschlag als wahrscheinlich prognostiziert.

Die Stärke und zunehmende Frequenz von extremen Niederschlagsereignissen wird als sehr wahrscheinlich eingeschätzt. Diese Ausprägung variiert regional.

Die Zunahme von Dürren gilt als sicher. In Europa trifft dies insbesondere die südlichen Länder.

Die mittlere Temperatur der Weltmeere steigt an und diese werden zunehmend saurer. Die globale Durchschnittshöhe des Meeresspiegels steigt an.

Das globale Gletschervolumen wird voraussichtlich abnehmen. Ausgenommen von dieser Projektion sind die Antarktis und das Grönland-Eisschild. Das RCP2.6 projiziert eine Abnahme zwischen 15 und 55 %; das RCP8.5 variierte zwischen einer Abnahme von 35 und 85 %.

---

<sup>7</sup> Die Darstellung der Werte der Wahrscheinlichkeiten, die die Begriffe „sehr wahrscheinlichen“, „wahrscheinlichen“ sowie „sicheren“ definieren, finden sich bei IPCC (2014, S. 36).

Die möglichen Veränderungen des Klimasystems basieren auf den Szenarien der sogenannten ‚Repräsentativen Konzentrationspfade‘ (engl. *Representative Concentration Pathways* (RCP)). Diese ersetzen die im dritten und vierten Sachstandsbericht des IPCC genutzten SRES-Szenarien. Die RCP-Szenarien sind anhand der publizierten wissenschaftlichen Literatur ausgewählt und nicht eigens durch das IPCC entwickelt worden.

Überblick über die  
RCP-Szenarien

Genutzt werden im aktuellen IPCC-Bericht von 2013 / 2014 vier Szenarien RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 und RCP2.6 (vgl. Moss et al., 2010; IPCC, 2014, Annex III). Ansatzpunkte für die vier Szenarien bilden die Treibhausgaskonzentration sowie der Strahlungsantrieb und nicht die Entwicklung der sozio-ökonomischen Faktoren wie bei den SRES-Szenarien. Der Strahlungsantrieb der RCP-Szenarien ergibt sich aus der Periode 1850 bis 2100. Die Treibhausgasemission im Jahr 2100 wird auf die vorindustrielle Treibhausgasemission im Jahr 1850 bezogen. Die Szenarientwicklung wird in Tabelle 3.4 für die jeweiligen RCP-Szenarien zusammengefasst. Die vier RCP-Szenarien repräsentieren jeweils eines von mehreren möglichen Szenarien, die zu einem bestimmten Strahlungsantrieb führen.

**Tabelle 3.4: Zusammenfassung der vier RCP-Szenarien**

Basierend auf IPCC (2014); Moss et al. (2010) sowie Imbery &amp; Plagemann (2011)

| RCP-Szenario | Szenarientwicklung <sup>8</sup>  |
|--------------|--|
| RCP2.6       | In diesem Peak-Szenario steigen die Treibhausgasemissionen auf circa 490 ppm bis 2100 und bleiben danach konstant. Die Strahlung liegt bei etwa 3 W/m <sup>2</sup> vor dem Jahr 2100. Nach 2100 geht sie zurück. Das RCP2.6-Szenario ist vergleichbar mit dem E1-Szenario aus dem dritten und vierten Sachstandsbericht des IPCC. Es handelt sich um ein politisches Szenario: Die Emissionen der globalen Erwärmung überschreiten 2 K im Jahr 2100 nicht. |
| RCP4.5       | Die RCP4.5- und RCP6.0-Szenarien sind zwei moderate Stabilisierungskonzentrationspfade. Der Strahlungsantrieb stabilisiert sich auf ungefähr 4,5 und 6,0 W/m <sup>2</sup> nach dem Jahr 2100, ähnlich dem B1-Szenario (RCP4.5) und dem A1B-Szenario (RCP6.0).  |
| RCP6.0       |  |
| RCP8.5       | Das RCP8.5 ähnelt dem A2-Szenario. Es folgt einem Konzentrationspfad mit einem Strahlungsantrieb größer als 8,5 W/m <sup>2</sup> im Jahr 2100. Nach 2100 nimmt die Strahlung über einen gewissen Zeitraum weiter zu. Sie bleibt bis etwa 2300 auf hohem Niveau.  |

### 3.3 Identifizierung ‚klimatischer Gefahren‘ für die Straßeninfrastruktur

Die Identifizierung der ‚spezifischen Risiken des Klimawandels‘ bezieht sich systemisch betrachtet letztlich auf die Identifizierung der Gefahren, die durch den Klimawandel bzw. durch die Zunahme der Extremereignisse – errechnet durch das Überschreiten der Schwellenwerte der klimatischen Parameter – hervorgerufen wurden. Nach Lenz (2009, S. 69) ist die Identifizierung von Gefahren ein erster Schritt in einem Gesamtkonzept, welches sich mit der Reduzierung und dem Management jeglicher Risiken für die soziale Umwelt und die Infrastruktur beschäftigt. Diese Gefahren wirken auf die Straßeninfrastruktur. Kombinationen verschiedener Klimaparameter führen zu Prozessen in der naturräumlichen Umwelt. Durch die jeweilige Exposition einer Straßeninfrastrukturkomponente, wie bspw. die Lage einer Straße, ergibt sich zwangsläufig eine Wirkung, sofern die Prozesse die Systemgrenze überschreiten und aufgrund ihrer Intensität und

<sup>8</sup> Eine detaillierte Darstellung der RCP-Szenarien auch im Vergleich zu den SRES-Szenarien findet sich bei IPCC (2014, S. 147 ff.).

Häufigkeit als extrem eingestuft werden können. Inwiefern Gefahren zu Katastrophen werden können, wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet. Fokussiert wird jedoch, welche durch klimatische Prozesse induzierte Gefahren für Straßeninfrastrukturen entstehen können. Diese Prozesse beziehen den Klimawandel mit ein. Folglich werden Naturgefahren entstehend im Subsystem Klima der naturräumlichen Umwelt näher taxiert.



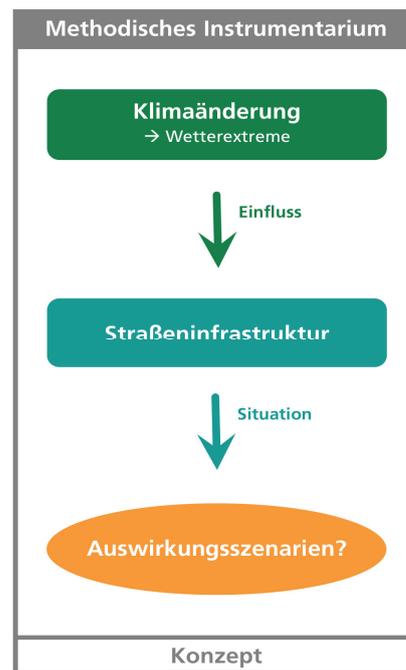
## 4 Potenzielle Gefahren für die Straßeninfrastruktur unter Annahme des zu erwartenden Klimawandels

Im folgenden Kapitel wird die in der vorliegenden Arbeit für das datengetriebene Ursache-Wirkungsmodell verwendete Klassifikation der klimatischen Gefahren erläutert. In Abbildung 4.1 wird die Vorgehensweise, welche diesem Kapitel zugrunde liegt, schematisch zusammengefasst.

Zunächst werden anhand der gegenwärtigen Literatur die potenziellen klimatischen Gefahren für die Straßeninfrastruktur aufbereitet und eingeordnet. Der Fokus ruht hierbei auf der Identifizierung negativer Auswirkungen durch Überschreitung definierter Schwellenwerte der Klimaparameter. Abbildung 4.1 illustriert diesen Einfluss des Klimasystems bzw. einer Klimasituation auf die Straßeninfrastruktur durch einen gerichteten grünen Pfeil.

Inhalt des Kapitels 4

Der anschließende Abschnitt 4.2 beschreibt die Operationalisierung, welche für das datengetriebene Ursache-Wirkungsmodell als Eingabeparameter dient.



**Abbildung 4.1: Konzeptuelle Einordnung der Identifizierung potenzieller Gefahren des zu erwartenden Klimawandels für die Straßeninfrastruktur in den Forschungsansatz der vorliegenden Arbeit**

Eigene Darstellung

#### 4.1 Stand der Forschung zur Vulnerabilität von Straßeninfrastruktur unter Annahme des zu erwartenden Klimawandels

Negative Folgen für die Straßeninfrastruktur werden durch Extreme in Wetter und Klima erzeugt. Extreme Fälle von Schnee, Eis, Nebel, Hagel, Hitze, Stürmen, Hoch- und Niedrigwasser in Flüssen sowie Starkregen führen u. a. zu Behinderungen im Bereich der Straßeninfrastruktur. Die Veränderungen der Wetterextreme ziehen erhebliche Auswirkungen auf die Straßeninfrastruktur nach sich (Peterson et al., 2008). Diese Auswirkungen können die Nutzung der Straßeninfrastruktur, das Straßennetz selbst, die Funktionsfähigkeit der Infrastruktur und in weiterer Konsequenz auch das soziale System betreffen. Gegenwärtig (Juni 2015) gibt es für die Bundesrepublik Deutschland keine detailliert indikatorbasierte

publizierte Darstellung der Vulnerabilität der Straßeninfrastruktur gegenüber dem Klimawandel.

Die Forschungsprojekte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) thematisieren jedoch aufbauend auf dem Handlungsfeld ‚Verkehr und Verkehrsinfrastruktur‘ der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) seit 2011 eine auf mehrere Projekte umgelegte ‚Adaption der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel‘ (Auerbach et al, 2014). Ziel dieser Studie ist es, die Vulnerabilität der Straßeninfrastruktur gegenüber dem Klimawandel zu analysieren und zu verringern. Zentrale Untersuchungsfelder sind die Anpassung der Entwässerungsstrukturen an starke, in kurzem Zeitraum fallende Niederschläge und die Anpassung von Straßenbelägen an die zunehmende Hitze durch modifizierte Baustoffe (Auerbach et al., 2014, S. 2). Die Ergebnisse dieser Studien sind noch nicht publiziert und können somit nicht als Referenz angeführt werden.

Im Bereich der straßeninfrastrukturbezogenen Vulnerabilitätsforschung sind international, insbesondere in den USA, einige Studien und Berichte mit Ergebnissen publiziert worden (vgl. z. B. Transportation Research Board und Savonis et al.). Tabelle 4.1 fasst die potenziellen Folgen des projizierten Klimawandels auf Straßeninfrastruktur anhand der gegenwärtigen internationalen Literatur zusammen. Die Folgen des Klimawandels werden mit Blick auf die Straßeninfrastruktur selbst dargestellt. Beispielsweise liefert Pillat (2014, Kap. 2) eine detaillierte und aktuelle Darstellung des Zusammenhangs zwischen Wetter und Verkehrsaufkommen.

Hitze und potenzielle  
Auswirkungen

Lang anhaltende Hitze mit hohen Lufttemperaturen führt zu hohen Fahrbahnbelagstemperaturen (im Folgenden kurz: Belagstemperaturen), infolge derer der Fahrbahnbelag aufgeweicht wird und Spurrillen entstehen können. (Deutsche Bundesregierung, 2008; Savonis et al., 2008; Peterson et al., 2008). Verstärkt werden derartige Effekte durch die allgemein zunehmende Nutzung der Straßeninfrastruktur und die Erhöhung des Schwerlastverkehrs<sup>9</sup>. Savonis et al. (2008) geben zudem an, dass insbesondere bei Stahl- und Betonbrücken bei Überschreitung der spezifischen Auslegungstemperatur des Trägers, welche sie zwischen 46 °C und 53 °C verorten, Schäden am Belag auftreten können.

Starkregenereignisse,  
lang andauernde  
Niederschläge,  
verschiedene  
Niederschlagsformen und  
ihre potenziellen  
Auswirkungen

Die Gefahr von Überschwemmungen auf Straßen und in Tunneln resultiert aus einer Überlastung der verbauten Drainagesysteme (Transportation Research Board, 2008). Lang andauernde Niederschläge sowie Starkregenereignisse erhöhen die Gefahr von Erdbeben. Teilsperren, Sperrungen und verschlechterte Fahrbedingungen können die Straßeninfrastrukturnutzung einschränken (Keller & Atzl, 2014; Andrey et al., 2003). So können Starkregenereignisse z. B. die Fahrsicherheit beeinträchtigen, wobei sich Einschränkungen auf einem Straßentransekt stets auch negativ auf die Nutzung anderer anliegender Straßentransekte und Infrastruktursysteme auswirken. Andrey et al. (2003) stellen fest, dass sich das Kollisionsrisiko auf Straßen erhöht, wenn die Niederschlagsmenge zunimmt und führen dies auf Glätte, Schnee und hohe Niederschlagsmengen zurück (vgl. auch Dalziell & Nicholson, 2001).

---

<sup>9</sup> An dieser Stelle bleibt anzumerken, dass hinsichtlich einer gesamtheitlichen Bewertung potenzieller Gefahren des Klimawandels auf Straßeninfrastruktur auch Aspekte, wie die Zunahme der Straßennutzung und die Zunahme der Nutzungsdauer der Straßen, relevant sind. Im Rahmen dieser Arbeit begrenzt sich der Fokus jedoch auf die klimatischen Gefahren und deren Operationalisierung in einem Modell. Das konzeptuelle Modell wird folglich weiter abstrahiert, verkürzt und auf die Fragstellung zugeschnitten. In weiteren Forschungsvorhaben ist das Einbinden von Indikatoren der zuvor genannten Aspekte an den Ansatz dieser Arbeit umsetzbar (vgl. Kapitel 8, S. 171 ff.).

Stürme können potenziell Schäden an Infrastruktursystemen verursachen. Im Bereich der Straßeninfrastruktur können bei starken Sturmereignissen z. B. Verkehrsschilder oder Brücken geschädigt werden (Edwards, 1999). Sturmereignisse ab 10 Bft können Bäume entwurzeln, die auf die Straße fallen können. Die Sicherheit der Straßeninfrastruktur verringert sich durch derartige Ereignisse, ihre Nutzung wird in solchen Fällen eingeschränkt oder komplett verhindert.

Stürme und potenzielle  
Auswirkungen

**Tabelle 4.1: Überblick zum Stand der Forschung zur Vulnerabilität der Straßeninfrastruktur gegenüber dem projizierten Klimawandel, bezogen auf den exemplarischen Untersuchungsraum Baden-Württemberg**

Eigene Darstellung basierend auf den aufgeführten Referenzen

| Quelle(n)  | Potenzieller projizierter Klimawandel<br>→ Klimasituation | Potenzielle Auswirkungen auf Straßeninfrastruktur<br>→ Situation   |
|--|---|--|
| Transportation Research Board (2008)<br>Savonis et al. (2008)<br>Peterson et al. (2008)<br>Koetse & Rietveld (2009)<br>New York Academy of Sciences (2010)<br>Hoffmann & Rotter (2011)<br>Trinks, Hiete, Comes & Schultmann (2012) | Zunahme der Anzahl von heißen Tagen <sup>10</sup>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Material- und Strukturschäden</li> <li>• Verformungen an Straßenbelägen, z. B. Spurrillen</li> <li>• TRB (2008, S. 177): Schäden am Asphalt<sup>11</sup> in Form von Aufweichungen und Verflüssigung ab einer Lufttemperatur &gt; 32 °C</li> <li>• Savonis et al. (2008, S. 4 ff.): Potenzielle Schäden am Belag sowie Stahl- und Betonbrücken<sup>12</sup> bei Überschreitung der Auslegungstemperatur des Trägers von 46 °C bis 53 °C</li> <li>• Gefahr für Verkehrssicherheit</li> </ul> |
| Hoffmann & Rotter (2011)   | Abnahme der Anzahl der Frosttage <sup>13</sup>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potenziell weniger Straßenschäden</li> </ul>  |
| Zebisch et al. (2005)<br>Transportation Research Board (2008)<br>Pillat (2014)   | Zunahme der Starkregenereignisse <sup>14</sup>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhte Gefahr von Überschwemmungen</li> <li>• Erhöhte Gefahr für Erdbeben können zu Teilsperren, Sperrungen und Zerstörungen führen</li> <li>• Herabsinken der Fahrsicherheit führt zu erhöhtem Kollisionsrisiko</li> </ul>  |
| Zebisch et al. (2005)<br>Transportation Research Board (2008)  | Zunahme von starken Stürmen <sup>15</sup>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potenzielle Schäden an Verkehrsschildern und Brücken können zur Minderung der Sicherheit der Straßeninfrastruktur führen</li> <li>• Erhöhtes Risiko für umstürzende Bäume</li> </ul>  |

<sup>10</sup> Ein heißer Tag bezeichnet einen Tag, an dem die maximale Lufttemperatur in zwei Metern Höhe größer gleich 32 °C beträgt (DWD, 2015e).

<sup>11</sup> Die Asphaltmischung wird nicht weiter spezifiziert.

<sup>12</sup> Analog zur Asphaltmischung werden die Stahl- und Betonmischungen nicht weiter spezifiziert.

<sup>13</sup> Ein Frosttag bezeichnet einen Tag, an dem die minimale Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunkts liegt (DWD, 2015e).

<sup>14</sup> Erläuterung erfolgt in Tabelle 4.2 (S. 54).

<sup>15</sup> Erläuterung erfolgt in Tabelle 4.2 (S. 54).

## 4.2 Operationalisierung der potenziellen Gefahren für die Straßeninfrastruktur in einem regelbasierten System: die zu modellierenden Gefahrentypen

Im Rahmen der Entwicklung von möglichen Maßnahmen zur Anpassung von Straßeninfrastruktur an den Klimawandel müssen die Auswirkungen des Klimawandels auf Straßeninfrastruktur ableitbar in Form von Prognosen dargestellt werden. Potenzielle Gefahren müssen für eine spätere Analyse und Bewertung identifiziert werden. Die Messbarkeit der Sensitivität der Straßeninfrastruktur gegenüber klimatischen Einflüssen anhand spezifischer Indikatoren wird durch tägliche Schwankungen der meteorologischen Parameter und des Auftretens von Extremereignissen in Kombination mit dem überlagernden Klima erschwert (Jaroszweski, 2010, S. 331).

Dennoch erfordert die Einbindung der klimatischen Gefahren in ein Ursache-Wirkungsmodell eine Operationalisierung der aufgeführten klimatischen Veränderungen und der potenziellen Auswirkungen auf Straßeninfrastruktur. Ein Ursache-Wirkungsmodell basiert – vereinfacht skizziert – auf einer Eingabe von spezifisch quantifizierbaren Parametern und der Ausgabe von potenziellen Gefahren auf Straßen. Dementsprechend wird in diesem Abschnitt eine Grundlage für die weitere datenbasierte Modellierung formuliert: Die potenziellen Gefahren für die Straßeninfrastruktur werden anhand einer literaturbasierten Operationalisierung – spezifischer Eingabeparameter – definiert, um ein regelbasiertes System für diese Gefahren ableiten zu können. Geklärt wird folglich, welche Eingabeparameter für die Modellierung benötigt werden.

Regelbasiertes System  
der klimatischen  
Gefahren für  
Straßeninfrastruktur

Die Definition der Klassifikatoren als Eingabeparameter für das Ursache-Wirkungsmodell muss sich an einem Untersuchungsraum orientieren, für welchen dementsprechend die möglichen klimabedingten Gefahren für Straßen exemplarisch modelliert und dargestellt werden. Die Auswahl dieser Gefahren wird anhand der ausgewerteten Literatur in Abschnitt 4.1 (S. 44 ff.) bestimmt. Da das entwickelte Instrumentarium exemplarisch auf Baden-Württemberg angewandt wird, orientiert sich die Auswahl der Schwellenwerte in dieser Phase an diesem Untersuchungsraum.

Verständnis eines  
Klassifikators

Klimatische Gefahren werden anhand der Ähnlichkeit ihrer Auswirkungen auf Straßeninfrastruktur und anhand ihrer klimatischen Parameter, welche sowohl einzeln als auch in Kombination die klimatische Gefahr verursachen, klassifiziert. Die Funktionsweise des Klassifikators in einem regelbasierten System ist mit einer definierten Implikation gleichzusetzen. Folgendes Beispiel erläutert die Funktionsweise:

**WENN** Regen als Niederschlag auftritt **UND** die Lufttemperatur über 0 °C ist **UND** die Belagstemperatur der Straße kleiner gleich 0 °C ist, **DANN** liegt (nach Norrman, 2000) eine potenzielle Gefahr für die Straße / die Straßenbenutzung durch ‚gefrierenden Regen auf kalter Straße‘ vor.

Gefahrentyp und  
Gefahrenereignis

Klimatische Gefahren mit ähnlichem Ursache-Wirkungsverlauf werden in einem Gefahrentyp (kurz: Gefahr) gruppiert. Tritt eine Gefahr, wie z. B. ein Hitzeereignis ein, wird in diesem Zusammenhang von einem Gefahrenereignis gesprochen.

Tabelle 4.2 bietet einen Überblick über die potenziellen Gefahren. Hierbei sind vier Gefahrentypen unterscheidbar: Glätte, Starkregen, Hitze und Wind. Die Ausprägungen der klimatischen Parameter sind bei Starkregen, Hitze und Wind als Extremereignisse nach der zitierten Literatur festgelegt.

Norrman (2000) hat ein Expertensystem zur Klassifizierung verschiedener Glättetypen auf Straßen anhand ihrer spezifischen Kombination klimatischer Parameter entwickelt. Er lehnt seine Idee zu einer standardisierten Klassifikation von Straßenglätten an eine erste Studie von Lindqvist in diesem Bereich aus dem Jahr 1979 an (vgl. Lindqvist, 1979). Die divergenten Glättetypen sind auf die größten Straßen in Schweden angewendet sowie empirisch überprüft und nachmodelliert worden. Norrman (2000) unterscheidet zwischen primären und sekundären Glättetypen: Primäre Glättetypen sind direkt auf klimatische Parameter und folglich auf das Wetter bezogen, während sekundäre Glättetypen einer Kombination aus Wetter, Verkehr und Wartungsarbeiten entspringen.

Gefahrentypen:  
Glättegefahr

Die zentralen Klassifikationen des regelbasierten Systems beinhalten Niederschlags- und Belagstemperaturparameter. Erforderliche Parameter, um die Glättetypen zu identifizieren, sind Daten aus einem Straßenwetterinformationssystem (engl. *„road weather information system“*) wie Belagstemperatur, Lufttemperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit und Niederschlag. Nach Norrman (2000) wird die Straßenglätte in diesem Kontext als Ereignis definiert, welches auftritt, wenn der Straßenoberflächen-Reibungskoeffizient unter 0,25 sinkt.

Für die vorliegende Arbeit werden sechs unterschiedliche primäre Glättetypen anhand der in Tabelle 4.2 angegebenen Eingabeparameter als Klassifikatoren für Glättegefahren auf Straßen modelliert. Die Auswahl erfolgt anhand des einschätzbaren Auftretens von Kombination aus den verschiedenen Klimaparametern in einem entsprechenden Untersuchungsgebiet. Aufgenommen werden diejenigen Glättegefahrenstypen, welche als klimatische Eingabeparameter in das regelbasierte System eingehen können.

Gefahrentyp: Extreme  
Hitzeereignisse

Gefahren für die Straßeninfrastruktur, die aus extremer Hitze resultieren können, sind in Tabelle 4.1 (S. 48) erläutert. Das National Research Council der Vereinigten Staaten deklariert ab einer Lufttemperatur über 32 °C eine erhöhte Gefahr für die Straßeninfrastruktur (Transportation Research Board, 2008, S. 117). Dieser Schwellenwert richtet sich nach der Definition eines Hitzetags in den USA. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert in Deutschland einen heißen Tag als Tag, an dem die Lufttemperatur einmal im Verlauf eines Tages über 30 °C ansteigt (vgl. Deutscher Klimaatlas des DWD, 2015a). Aus diesem Grund werden die Gefahren eines Hitzeereignisses anhand beider Schwellenwerte separat modelliert.

Die maximale Auslegungstemperatur für jegliche Straßenbeläge sowie Stahl- und Betonbrücken liegt nach Savonis et al. (2008) zwischen einer Lufttemperatur von 45 °C bzw. 53 °C. Der geringere Schwellenwert von 45 °C wird als Eingabeparameter für eine potenzielle Hitzegefahr II angenommen (Savonis et al., 2008, S. 4-11). Die Schwellenwerte von Savonis et al. dienen als Orientierung. Die maximale Auslegungstemperatur einer Straßeninfrastruktur hängt u. a. von ihrer Konstruktion ab. Für Deutschland konnte keine Orientierung an spezifischen Auslegungstemperaturen als Vergleichswert genutzt werden. Eine Anpassung des Klassifikators für Hitzegefahr ist mit geeigneten Schwellenwerten erreichbar.

Gefahrentypen:  
Starkniederschlag

Die Klassifikation der Starkniederschläge orientiert sich an den ‚Warnkriterien für Unwetterwarnungen‘ des DWD (DWD). Dieser definiert Schwellenwerte für die jeweiligen Ausprägungen eines Starkregenereignisses (vgl. DWD, 2015a). Die Schwellenwerte werden durch den in einer Stunde gefallenen Niederschlag in Form von Regen in der Einheit Liter pro Quadratmeter definiert. Zur Unterscheidung wird in der vorliegenden Arbeit ein Starkregenereignis mit über 25 Liter pro Quadratmeter als ‚heftig‘ und ein Ereignis mit über 40 Liter pro Quadratmeter als ‚sehr heftig‘ bezeichnet. Starkniederschlagsereignisse können auf Straßen zu Aquaplaning-Gefahr und Überschwemmungen führen. Auch das Anschwellen

kleiner Bäche und Flüsse kann bspw. lokale kleinräumige Überflutungen von Straßen verursachen.

Anhand der Windwarnskala des DWD findet die Klassifikation der Starkwindereignisse statt (DWD, 2015d). Bei einem ‚Sturmereignis‘ können abbrechende Äste der Bäume, welche auf die Straße fallen, eine potenzielle Gefahr für die Straßeninfrastruktur darstellen. Schwere Verwüstungen und Schäden an der Straßeninfrastruktur können bei ‚Orkanen‘ entstehen.

Gefahrentypen:  
Extreme Windereignisse

**Tabelle 4.2: Potenzielle Gefahren: Klassifikation, Definition und Ursache**

Eigene Darstellung anhand der in Tabelle 4.3 zitierten Literatur.

Die farbliche Kennzeichnung der Gefahrentypen wird auch in den folgenden Gefahrenkarten und Gefahrenabbildungen beibehalten.

**Gefahrentyp: Glätte**

Klassifikation der Glättetypen nach Norrman (2000)

|   |  |
|---|--|
| 1. Gefrierender Regen auf kalter Straßenoberfläche                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niederschlag in Form von Regen</li> <li>• Lufttemperatur <math>&gt; 0\text{ °C}</math></li> <li>• Belagstemperatur der Straße <math>\leq 0\text{ °C}</math></li> </ul>  |
| 2. Niederschlag als Regen / Schnee auf gefrorener Straßenoberfläche | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niederschlag in Form von Regen oder Schnee</li> <li>• Lufttemperatur <math>\leq 0\text{ °C}</math></li> <li>• Belagstemperatur der Straße <math>\leq 0\text{ °C}</math></li> </ul>  |
| 3. Niederschlag als Regen / Schnee auf warmer Straßenoberfläche     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niederschlag in Form von Regen oder Schnee</li> <li>• Lufttemperatur <math>\leq 0\text{ °C}</math></li> <li>• Belagstemperatur der Straße <math>&gt; 0\text{ °C}</math></li> </ul>  |
| 4. Niederschlag als Regen / Schnee zusammen mit Raureif             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niederschlag in Form von Regen oder Schnee</li> <li>• Lufttemperatur <math>\leq 0\text{ °C}</math></li> <li>• Belagstemperatur der Straße <math>\leq 0\text{ °C}</math></li> <li>• Taupunkttemperatur <math>&gt;</math> Belagstemperatur der Straße</li> </ul>  |
| 5. Raureif und geringe Sichtweite                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Niederschlag</li> <li>• Belagstemperatur der Straße <math>\leq 0\text{ °C}</math></li> <li>• Taupunkttemperatur <math>&gt;</math> Belagstemperatur der Straße</li> <li>• Relative Feuchte der Luft <math>&gt; 94\%</math></li> </ul>   |
| 6. Gefrierender Tau mit nachfolgendem Raureif                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Niederschlag in zwei aufeinanderfolgenden Stunden</li> <li>• Belagstemperatur der Straße wechselt innerhalb von zwei Stunden von <math>&gt; 0\text{ °C}</math> zu <math>\leq 0\text{ °C}</math></li> <li>• Taupunkttemperatur <math>&gt;</math> Belagstemperatur der Straße für mindestens zwei Stunden</li> </ul> |

**Gefahrentyp: Starkregen (Extremereignis)**

Klassifikation der Starkregentypen nach DWD (2015c)

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| 7. Starkregen               | Regen mit $10\text{-}25\text{ l/m}^2$ in 1 h |
| 8. Heftiger Starkregen      | Regen mit $> 25\text{ l/m}^2$ in 1 h         |
| 9. Sehr heftiger Starkregen | Regen $> 40\text{ l/m}^2$ in 1 h             |

### Gefahrenart: Hitzegefahr (Extremereignis)

Klassifikation der Hitzegefahren nach Transportation Research Board (2008, S. 117), Savonis et al. (2008, S. 4 f.) und DWD (2015b)

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 10. Potenzielle Hitzeschäden I   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lufttemperatur &gt; 30 °C mindestens 1 h / Tag (D-Wert)</li> <li>• Lufttemperatur &gt; 32 °C mindestens 1 h / Tag (US-Wert)</li> </ul> |
| 11. Potenzielle Hitzeschäden II  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Belagstemperatur &gt; Auslegungstemperatur</li> <li>• Hier angenommen: Belagstemperatur &gt; 46 °C</li> </ul>                          |
| 12. Potenzielle Hitzeschäden III | Kombination aus Belagstemperatur > 46 °C und Lufttemperatur > 30 °C (32 °C)   |

### Gefahrenart: Wind (Extremereignis)

Klassifikation der Windtypen nach DWD (2015d)

|  |  |
|--|--|
| 13. Starker Wind (Beaufortgrad 6)        | Windgeschwindigkeit in etwa 10 Metern Höhe beträgt 11 bis 13 m/s |
| 14. Steifer Wind (Beaufortgrad 7)        | Windgeschwindigkeit in etwa 10 Metern Höhe beträgt 14 bis 17 m/s |
| 15. Stürmischer Wind (Beaufortgrad 8)    | Windgeschwindigkeit in etwa 10 Metern Höhe beträgt 18 bis 20 m/s |
| 16. Sturm (Beaufortgrad 9)               | Windgeschwindigkeit in etwa 10 Metern Höhe beträgt 21 bis 24 m/s |
| 17. Schwerer Sturm (Beaufortgrad 10)     | Windgeschwindigkeit in etwa 10 Metern Höhe beträgt 25 bis 28 m/s |
| 18. Orkanartiger Sturm (Beaufortgrad 11) | Windgeschwindigkeit in etwa 10 Metern Höhe beträgt 29 bis 32 m/s |
| 19. Orkan (Beaufortgrad 12)              | Windgeschwindigkeit in etwa 10 Metern Höhe beträgt $\geq$ 33 m/s |



## 5 Modellbildung und Methodik: das datenbasierte Modell

*„KDD<sup>16</sup> is the nontrivial process of identifying valid, novel, potentially useful, and ultimately understandable patterns in data.“*

*(Fayyad et al., 1996, S. 40 f.).*

Gegenstand des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten datenbasierten Ursache-Wirkungsmodells ist die Modellierung der potenziellen klimatischen Gefahren für die Straßeninfrastruktur. Modelliert werden Situationen bzw. Muster, welche auf Straßeninfrastruktur zu den potenziellen Gefahren, die in Kapitel 4.2 (S. 49 ff.) anhand der Literatur identifiziert worden sind, führen können.

Kapitel 5 beantwortet somit die zentrale Fragestellung: ‚Welcher methodische Untersuchungsansatz ist geeignet, um klimatische Gefahren als Folgen von zunehmenden Wetterextremen für die Straßeninfrastruktur zu modellieren?‘ In diesem Rahmen wird das datenbasierte Modell vorgestellt, welches durch ein zugrunde liegendes regelbasiertes System – das Ursache-Wirkungsmodell – automatisiert Gefahrenereignisse modelliert. Sofern Eingabeparameter für dieses Instrumentarium nicht vorliegen, werden diese durch ein weiteres integriertes Modell abgeleitet.

Jeder Modellierungsschritt wurde automatisiert umgesetzt. Die vollständige Automatisierung von der Dateneingabe bis hin zur Gefahrenausgabe kann über eine entsprechende Batch-Datei erreicht werden.

---

<sup>16</sup> Anmerkung: ‚KDD‘ bezeichnet ‚Knowledge Discovery in Databases‘. Weitere Erläuterungen zu dieser Thematik finden sich in Abschnitt 5.4 (S. 76 ff.).

Abschnitt 5.1 befasst sich mit der Grundidee eines datenbasierten Ursache-Wirkungsmodells, das auf der regelbasierten Klassifizierung aus Kapitel 4.2 (S. 49) basiert. Nach einem kurzen Überblick über das Modell wird das schrittweise Vorgehen bei der Implementierung des Modells dargestellt. Hierdurch werden die Funktionsweise und die Konzeption des neu entwickelten Modells nachvollziehbar. Das Modell findet letztlich eine exemplarische Anwendung auf Daten aus GMA-Stationen (Glättemeldeanlagen) von Autobahnen in Baden-Württemberg.

Die der datenbasierten Modellierung zugrunde liegende Software wird in einem Exkurs in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Grundlage eines datenbasierten Modells ist die Eingabe von Daten. Die erforderlichen Daten werden in Abschnitt 5.3 beschrieben. Zentrale Parameter für die Modellierung potenzieller Gefahren sind Klimaparameter und Belagstemperaturen von Straßen (vgl. Kapitel 4, S. 43 ff.).

Sofern die Belagstemperaturen für ausgewählte Orte (Stationen der Glättemeldeanlagen) einer Straße fehlen, müssen diese in einem geeigneten Modellansatz modelliert werden. Diese Parameterschätzung erfolgt in der vorliegenden Arbeit durch einen Data-Mining-Ansatz. Das ‚Modell im Modell‘ – die entwickelte Parameterschätzung – wird in Abschnitt 5.4 erörtert und anhand von Gütemaßen bewertet.

In Abschnitt 5.5 findet eine Anwendung des kompletten Modellansatzes auf das regelbasierte System – das eigentliche Ursache-Wirkungsmodell – statt. Dieses regelbasierte System entsteht aus der Operationalisierung der potenziellen Gefahren für die Straßeninfrastruktur in Prädikatenlogik, so dass Prämissen und Konklusion (zusammengefasst in der Regelbasis) umgesetzt werden können. Entsprechende Schritte zum Ablauf des Modells werden anhand von Daten der Autobahnen in Baden-Württemberg und Klimavariablen exemplarisch erläutert.

## 5.1 Das datenbasierte Ursache-Wirkungsmodell zur Modellierung potenzieller klimatischer Gefahren für die Straßeninfrastruktur

Der nun folgende Abschnitt dient als einführende Beschreibung zu dem entwickelten datenbasierten Ursache-Wirkungsmodell. Die genutzten Daten, angewandten Regeln, zu schätzenden Parameter sowie die Implementierung werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

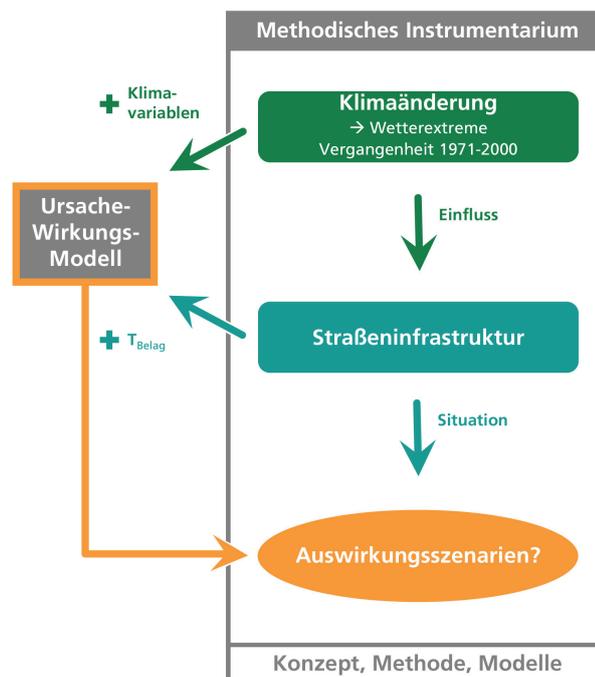
Das datenbasierte Modell zur Darstellung der klimatischen Gefahren auf Straßeninfrastruktur ist in das konzeptuelle Modell dieser Arbeit integriert. Abbildung 5.1 illustriert die Ankopplung des Ursache-Wirkungsmodells an das bestehende Konzept dieser Arbeit. Wie in Kapitel 4 (S. 43 ff.) dargestellt wird, entstehen potenzielle klimatische Gefahren für die Straßeninfrastruktur durch definierte Werte spezifischer Klimaparameter sowie durch eine Kombination aus Klimaparametern untereinander und / oder Belagtemperaturen einer Straße. Belagtemperaturen einer Straße sowie Daten zu Klimavariablen fließen somit als Eingabeparameter in das Ursache-Wirkungsmodell ein.

Überblick über das datenbasierte Ursache-Wirkungsmodell

Ein (technisches) Ziel des Modellansatzes dieser Arbeit besteht darin, dass bei entsprechender Datenaufbereitung eine nahezu vollständig automatisierte Generierung potenzieller Gefahren für einen spezifischen Bereich auf einer konkreten Straße ablaufen kann. Sofern alle benötigten Daten in das Modell eingespeist sind, generiert dieses für jede Station, von der Eingabeparameter der Belagstemperatur entweder vorliegen oder in einem weiteren Modell geschätzt werden, einen Überblick zu potenziellen auftretenden Gefahren nach Tabelle 4.2 (S. 54).

Die Datenausgabe ist charakterisiert durch Werte, ob ein Ereignis in einer Stunde stattfinden kann (Wert = 1) oder ausbleibt (Wert = 0). Dies bedeutet, dass neben der räumlich punktuellen Darstellung eine zeitliche Dimension des Punkts auf der Straße modelliert wird. Über die Betrachtung eines

längeren Zeitraums eines Straßenpunkts können alle eintretenden Ereignisse eines Gefahrentyps aufsummiert dargestellt werden, sodass potenzielle Auswirkungsszenarien auf der Straße abgeleitet werden können.



**Abbildung 5.1: Konzeptuelle Einordnung des datenbasierten Ursache-Wirkungsmodells in den Forschungsansatz dieser Arbeit**

Eigene Darstellung

In der vorliegenden Arbeit wird das datengetriebene Modell auf zwei Zeiträume – 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050 – exemplarisch angewandt, um die modellierten Gefahrentypen und deren Ereignisse vergleichen zu können (vgl. Kapitel 6, S. 95 ff.). Der Vergleich lässt Rückschlüsse auf potenzielle Änderungen der Gefahren im Kontext des Klimawandels zu.

Eine Herausforderung, welcher in einem weiteren Modell begegnet werden muss, ergibt sich aus dem Fehlen der Belagstemperaturen für die beiden entsprechenden Zeiträume. Daher wurde das datengetriebene Ursache-Wirkungsmodell mit einem zusätzlichen Modell verknüpft.

In diesem gekoppelten Modell können über einen Data-Mining-Ansatz (hier: Regressionsansatz) fehlende Belagstemperaturen in einer Parameterschätzung modelliert werden.

Das datenbasierte Modell der vorliegenden Arbeit benötigt folglich:

- a) Klimaparameter und Belagstemperaturen gemessen an bzw. geschätzt für eine Stelle bzw. Station auf einer Straße (Eingabedaten),
- b) sofern keine Belagstemperaturen vorliegen, eine Koppelung an das Modell, das die Belagstemperaturen aus vorhanden Klimaparametern ableiten bzw. strukturelle Zusammenhänge zwischen Klimaparameter und Belagstemperatur erkennen und modellieren kann (Parameterschätzung),
- c) einen nahezu vollständig automatisch ablaufenden Prozess zur Generierung potenzieller Gefahren und einer entsprechenden Datenspeicherung (Automatisierung und Datenausgabe), sowie
- d) ein Programmpaket (Implementierung), das für die Analyse großer Datenmengen mit einer hohen zeitlichen Auflösung und die erforderliche Visualisierung geeignet ist.

Die standardisierte und automatisierte Umsetzung der Schritte a) bis d) erfolgte im Rahmen des Dissertationsprojekts bis auf einige Aspekte der Visualisierung potenzieller Gefahren in Karten<sup>17</sup> mit der Software-Plattform Matlab und der Matlab-Toolbox Gait-CAD.

---

<sup>17</sup> Die Visualisierung der potenziellen Gefahren erfolgte im Geographischen Informationssystem ArcGIS 10.2.2 von ESRI Inc.

Der folgende Abschnitt führt einen Exkurs ein: Die Matlab-Toolbox-Gait-CAD wird in kompakter Form in Hinblick auf ihren Nutzen und ihre Funktionalität vorgestellt.

## 5.2 Exkurs I: Die Matlab-Toolbox Gait-CAD

Entwicklung und Aufbau  
der Toolbox Gait-CAD

Die Matlab-Toolbox Gait-CAD wurde 2001 am Karlsruher Institut für Technologie im Institut für Angewandte Informatik (IAI) (ehemals Forschungszentrum Karlsruhe) entwickelt. Gait-CAD ist eine offene Entwicklungsplattform, die insbesondere für Data-Mining-Algorithmen spezifiziert ist (vgl. Burmeister et al., 2008). Die Spezifikation der Data-Mining-Algorithmen in Zusammenhang mit einer Zeitreihenanalyse und einem Regressionsansatz ist in der vorliegenden Arbeit für die Parameterschätzung der fehlenden Belagstemperaturen erforderlich. Daher fällt die Wahl einer entsprechenden Software auf Gait-CAD (vgl. hierzu Abschnitt 5.4, S. 77). Gait-CAD setzt Matlab voraus und greift, ohne eine Insellösung zu benötigen, auf integrierte Matlab Toolboxes, wie z. B. die ‚statistics‘ Toolbox oder die ‚fuzzy logic‘ Toolbox zurück (Mikut et al., 2008). Gait-CAD steht als freie Software (open source) in einer deutschen und englischen Version zur Verfügung. In der Modellierung dieser Arbeit wurden Matlab R2014a und Gait-CAD Version 1.8 genutzt. Gegenwärtig (Juni 2015) existiert die Gait-CAD Version 1.9 für die Software-Plattform Matlab R2014b. Die Matlab-Skripte, Makros und BATCH-Dateien, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit programmiert wurden, funktionieren in der neuesten Version, sofern die benötigten geschriebenen Plug-Ins explizit eingeladen werden. Gait-CAD findet in verschiedenen Bereichen, wie der Analyse von Anlagen in der thermischen Abfallbehandlung, der Medizintechnik sowie der Steuerung- und Regelungstechnik Anwendung (vgl. Mikut, 2009; Burmeister et al., 2008).

Gait-CAD bietet eine vollständige grafische Benutzeroberfläche und erlaubt gleichzeitig Funktionen und Variablen über die Kommandozeile von Matlab aufzurufen und zu erreichen. Daten müssen in einem speziellen Datenformat vorliegen, damit sie in Gait-CAD eingeladen werden können. Das Dateiformat enthält eine binäre Matlab-Datei und die benötigten definierten Variablen (Burmeister et al., 2008). Die für die Modellierung im Rahmen dieser Arbeit benötigten Daten wurden in Matlab entsprechend aufbereitet, sodass sie mithilfe eines Matlab-Skripts direkt in ein Gait-CAD Projekt überführt werden konnten (vgl. Abschnitt 5.3, S. 64).

Kompakte Einführung in die Funktionsweise von Gait-CAD

Aufgrund des ausgedehnten Funktionsumfangs von Gait-CAD wird auf eine allgemeine Beschreibung der Methoden, Funktionen, Plug-Ins und Projekte verzichtet. Die angewandten Methoden und Funktionen für die Klassifikation der Gefahren und den Data-Mining-Ansatz zur Parameterschätzung der Belagtemperatur werden in den jeweiligen Abschnitten erläutert. Den Funktionsumfang von Gait-CAD beschreibt u. a. das Handbuch von Mikut et al. (2013).

## 5.3 Datengrundlage und -strukturen: die Eingabeparameter für das datenbasierte Modell

Den Ausgangspunkt für einen datenbasierten Ansatz bildet ein (näher zu definierender) spezifisch aufbereiteter Datensatz. Als Eingabeparameter für das datenbasierte Modell dieser Arbeit sind zwei grundlegende Datentypen notwendig: Daten der Klimavariablen<sup>18</sup> und Belagstemperaturen der Straßen. Die beiden Datentypen bedingen auch in Kombination bei einer definierten Annahme von Werten ein Gefahrenergebnis (vgl. Abschnitt 4.2, S. 49 ff und Abschnitt 5.5, S. 89 f.). Die Daten müssen hierbei zeitlich aufgelöst im Stundenformat vorliegen.

Im Abschnitt 5.3.1 werden die beiden Datentypen beschrieben. Abschnitt 5.3.2 erläutert die entsprechende Aufbereitung der Daten, damit diese in das Programm eingespeist und aus den Eingabeparametern anhand der beschreibenden Gefahrenklassifikation die potenziellen Gefahrentypen-Straßen generiert werden können.

### 5.3.1 Datengrundlage: Daten der Klimavariablen und Belagstemperatur

Daten der Klimavariablen

Die Daten der Klimavariablen, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Modellierung genutzt worden sind, sind in drei verschiedene Zeiträume zu unterteilen: Daten der Klimaparameter aus dem 30-jährigen Referenzzeitraum 1971 bis 2000, Daten der Klimaparameter aus einem 10-jährigen Zeitraum der sehr nahen Vergangenheit vom gegenwärtigen Zeitpunkt aus gesehen (Juni 2015) und Daten der Klimaparameter für die nahe Zukunft 2021 bis 2050.

---

<sup>18</sup> In diesem Zusammenhang werden die Daten zur Darstellung der Klimaelemente Temperatur, Niederschlag, Bewölkungsgrad etc. als Klimavariablen bezeichnet.

Alle Daten stammen aus Klimasimulationen des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).<sup>19</sup> Es handelt sich um Simulationsdaten aus dem Modell COSMO-CLM, einem Gitterpunktmodell mit dynamischem Downscaling für eine regionale Klimamodellierung. Das regionale Klimamodell COSMO-CLM inkludiert ein Atmosphären- und Bodenmodell (IMK & Süddeutsches Klimabüro, 2014, S. 18). Regionale und lokale klimatische Bedingungen werden für ausgewählte Zeiträume abgebildet (vgl. IMK & Süddeutsches Klimabüro, 2014). Diese Datensätze weisen eine räumliche Auflösung von Sieben-Kilometer-Rastern und eine zeitliche Auflösung von einer bis drei Zeitstunden auf. Ein Gitterpunkt stellt in der räumlichen Auflösung folglich ein 7 x 7 Kilometer großes Gebiet als ein Raster dar. Die Gitterpunkte decken in den vorliegenden exemplarischen Rasterdatensätzen die räumliche Fläche Baden-Württembergs ab.

Der 30-jährige Referenzzeitraum 1971 bis 2000 sowie der Zeitraum der nahen Zukunft 2021 bis 2050 beinhalten Daten der Klimavariablen, die mit dem Modellantrieb ECHAM 6 berechnet worden sind. Die Erstellung der ‚klimatischen Leitplanken‘ für Baden-Württemberg aus einem Ensemble-Ansatz beruht u. a. auf einer von 24 Klimaprojektionen, bei denen das ECHAM5-Globalmodell als Vorläufer des ECHAM6-Modells genutzt wurde (vgl. Wagner, 2013b). Die Emissionsszenarien der beiden 30-jährigen Zeiträume unterscheiden sich: Während der Datensatz der Vergangenheit auf dem SRES Szenario 20C basiert, liegt dem Datensatz der nahen Zukunft das RCP8.5 als aktuelles IPCC-Emissionsszenario zugrunde (vgl. Kapitel 3.2.3, S. 37). Da die Trends der beiden Emissionsszenarien auf ähnlichen Annahmen beruhen und den gleichen Antriebsdatensatz beinhalten, sind die beiden Datensätze grundsätzlich vergleichbar (IMK, 2014b, S. 11). In der vorliegenden Arbeit werden die

Eigenschaften der  
Daten  
1971 bis 2000 sowie  
2021 bis 2050

<sup>19</sup> Für eine weitere Beschreibung der drei Datensätze sei an dieser Stelle auf „das Handbuch über Klimasimulationsdaten“ des IMK (KIT), welches online unter <http://www.eskp.de/das-klima-auf-den-gitterpunkt-gebracht/> zur Verfügung steht, verwiesen (vgl. Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) und Süddeutsches Klimabüro (2014)).

beiden Datensätze exemplarisch genutzt, um die Gefahren für die Straßeninfrastruktur in Baden-Württemberg während der zwei 30-jährigen Zeiträume zu modellieren. Die beiden Datensätze der Klimavariablen beschreiben letztlich eine mögliche Klimaänderung und Ausprägung der Klimaparameter.

Eigenschaften der  
Daten  
2001 bis 2010

Neben den Daten der Klimavariablen der zwei 30-jährigen Zeiträume sind die Daten des Zeitraums 2001 bis 2010 erforderlich. Dieser Zeitraum stellt einen nahezu 10-jährigen Zeitraum dar, welcher fast direkt an den Referenzzeitraum von 1971 bis 2000 anschließt. Diese Daten fließen in den Data-Mining-Ansatz zur Modellierung der Belagtemperaturen der Straßen für die beiden anderen Zeiträume ein, da für diese keine gemessenen Belagtemperaturen als Eingangsgröße zur Verfügung stehen (vgl. Abschnitt 5.4, S. 7). Die Daten von 2001 bis 2010 stammen aus dem ERA-Reanalyse-Datensatz des IMK. Die Eigenschaften der Reanalyse-Daten sind vergleichbar mit denen der beiden anderen Datensätze. Die Vergleichbarkeit ist ein erforderlicher Aspekt, damit der errechnete Modellsatz für die Belagtemperatur-Modellierung anhand der Daten aus dem Zeitraum 2001 bis 2010 auf die beiden Vergleichszeiträume übertragen werden kann.

Tabelle 5.1 fasst die wesentlichen Eigenschaften der Datensätze der Klimavariablen in einer Übersicht zusammen.

**Tabelle 5.1: Eigenschaften der Datensätze aus den Klimasimulationen der drei Zeiträume**

Eigene Darstellung mit Angabe der Datenquellen

| Antrieb                           | Emissions-szenario | Startdatum      | Enddatum         | Anzahl und Einheit der Zeitschritte |
|-----------------------------------|--------------------|-----------------|------------------|-------------------------------------|
| <b>1971 bis 2000 (IMK, 2014a)</b> |                    |                 |                  |                                     |
| ECHAM 6 (COSMO)                   | 20C                | 01.01.1971 0:00 | 31.12.2000 23:00 | 262 992 Stunden                     |
| <b>2000 bis 2010 (IMK, 2014c)</b> |                    |                 |                  |                                     |
| ERA Interim (COSMO)               | —                  | 01.01.2001 0:00 | 31.12.2010 23:00 | 96 431 Stunden                      |
| <b>2021 bis 2050 (IMK, 2014b)</b> |                    |                 |                  |                                     |
| ECHAM 6 (COSMO)                   | RCP 8.5            | 01.01.2021 0:00 | 31.12.2050 23:00 | 262 968 Stunden                     |

Die Belagtemperaturen der Straßen stellen den zweiten Teil an Eingangsgrößen für die Gefahren-Modellierung dar. Belagtemperaturen werden aufgelöst als Punkt-Daten (sog. Vektordaten) gespeichert. Gemessen werden sie von Sensoren, die abhängig vom Sensortyp in verschiedenen Tiefen des Fahrbahnbelags verbaut sind. Der Großteil der Sensoren misst die ‚Oberflächenbelagstemperatur‘ in circa vier Zentimetern Tiefe in der obersten Straßendeckschicht.

Belagtemperaturen aus  
Glättemeldeanlagen

Die von den Glättemeldeanlagen aufgezeichneten Parameter umfassen die Belags-, die Lufttemperatur und den Straßenzustand am jeweiligen Standort. Die Messwerte des Straßenzustands geben Aufschluss über den Zustand des Straßenbelags durch die Merkmale ‚nass‘, ‚feucht‘ oder ‚trocken‘. Glättemeldeanlagen zeichnen Daten i. A. über den Verlauf eines

Jahres auf. Seit Mitte der 1990er-Jahre werden sie vorrangig auf Autobahnen, seltener auf Bundesstraßen und vereinzelt auf Landesstraßen verbaut.

Die verbauten GMA messen und speichern seit 2001 die genannten Merkmale im Stundenverlauf. Die Daten zur Belagstemperatur, welche in dieser Arbeit genutzt werden, stammen aus GMA in Baden-Württemberg, die mindestens seit 2001 Daten aufzeichnen. Einige der neueren Stationen, die seit 2013 oder 2014 Daten messen, werden nicht berücksichtigt, da für die Modellierung Daten mit einem annähernd 10-jährigen Messezeitraum erforderlich sind. Dieses zwingende Kriterium ergibt sich insbesondere durch die erheblichen Datenlücken, welche fast alle Datensätze aufweisen. Fehlende Daten resultieren aus Datenlücken in der Luft- und Belagstemperatur der GMA über einige Sommermonate des Zeitraums 2001 bis 2010. Die Straßenzustände sind bei keiner der verbauten Stationen in Baden-Württemberg zu keinem Messzeitpunkt aufgezeichnet worden und werden somit in der Modellierung nicht berücksichtigt.

Einen detaillierten Überblick über die Eigenschaften der GMA in Baden-Württemberg aggregiert Tabelle 9.1 (S. 183). Aufgelistet sind die Messstationen an den jeweiligen Autobahntransekten, die Streckenmerkmale mit Streckenlage sowie Streckenbelag, Streckentyp, Höhe in Metern über dem Meeresspiegel und Messezeitraum von 01.01.2001 0:00 Uhr bis 31.12.2010 23:00 Uhr (entsprechend 87 647 Messstunden). Die erste Spalte der Tabelle zeigt die Stationen der Glättemeldeanlage. Um eine leichtere Orientierung zu gewährleisten, sind die Messstationen nach Autobahntransekten in einer Süd-Nord-Reihung aufgelistet, beginnend bei der südlichsten GMA-Station in Baden-Württemberg auf der A5 und endend bei der nördlichsten GMA-Station auf der A96. Anschließend werden die von Westen nach Osten verlaufenden Autobahntransekten aufgelistet.

Die Abbildung 5.2 auf der nachfolgenden Seite visualisiert die Standorte der GMA in Baden-Württemberg und führt einige der genannten Merkmale aus Tabelle 9.1 auf. Hierdurch können neben der geografischen Lage der GMA-Station auch deren Eigenschaften zusammenfassend betrachtet werden.

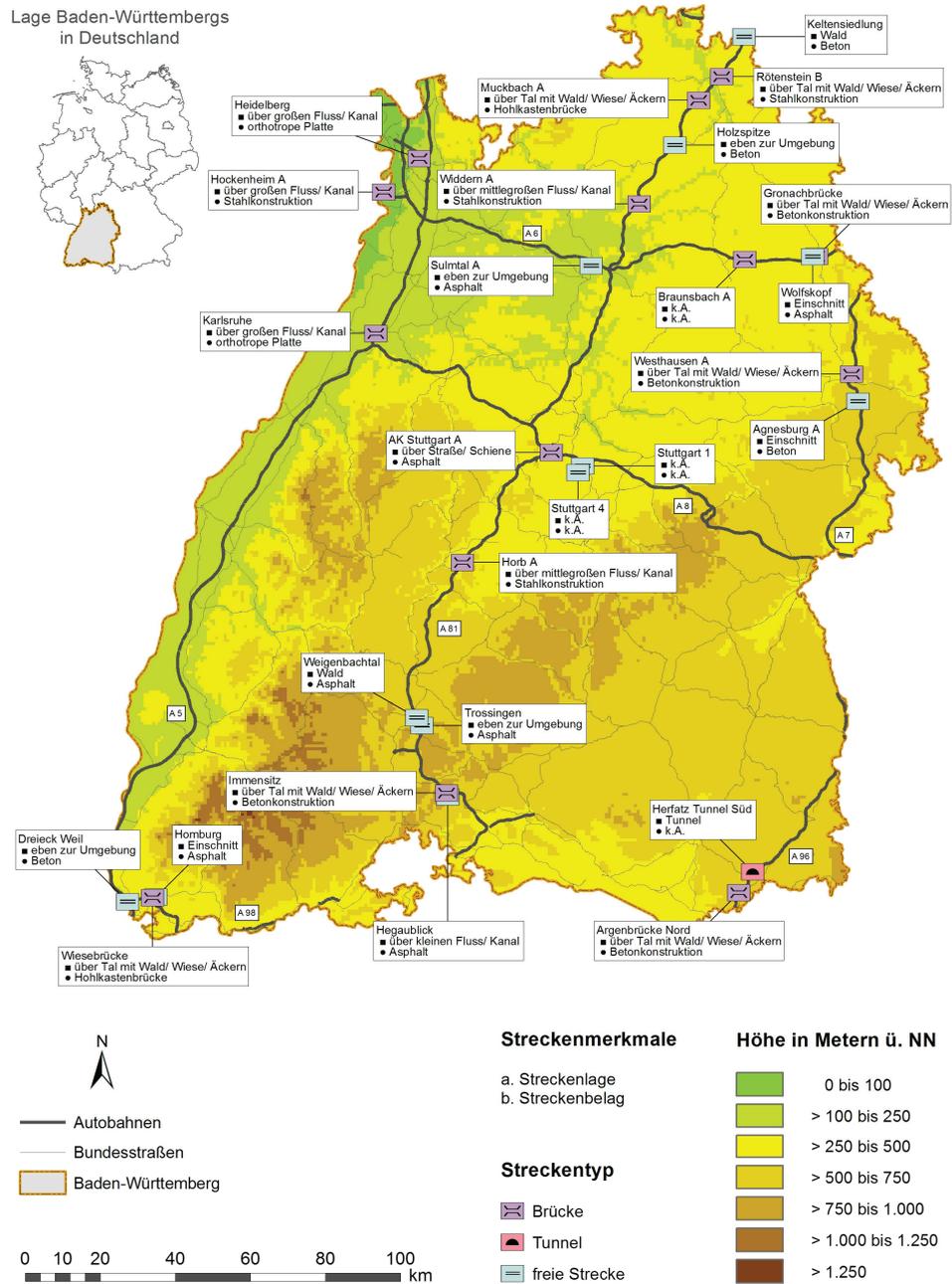


Abbildung 5.2: Standorte der Glättmeldeanlagen an den Autobahnen in Baden-Württemberg

Eigene Karte basierend auf den Datensätzen: DWD (2014) und ESRI (2005)

### 5.3.2 Datenstruktur und -aufbereitung

Unabhängig von den exemplarisch genutzten Eingabeparametern der Daten der Klimavariablen und der Belagstemperatur muss der Eingabedatensatz insgesamt in einer spezifischen Datenstruktur vorliegen. Ist dies der Fall, kann das implementierte Modell schrittweise die Gefahrenereignisse an den einzelnen Stationen berechnen.

### 5.3.3 Benötigte Datenstruktur zum Einlesen der Eingabedaten

Grundlage eines datenbasierten Modells – wie das in dieser Arbeit angewandte Ursache-Wirkungsmodell – ist der Datensatz. Im Zusammenhang mit großen Datensätzen, welche auf unterschiedlichen Parametern basieren, wird im Bereich der angewandten Informatik von Merkmalen gesprochen (vgl. z. B. Mikut, 2009). In der vorliegenden Arbeit wird eine Differenzierung zwischen zwei Arten von Datensätzen vorgenommen.

Datenstruktur der  
Eingabedaten für das  
Ursache-Wirkungsmodell

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, kann der Fall eintreten, dass keine Belagstemperaturen für Straßenpunkte – die GMA-Stationen – vorliegen. Dann muss die Modellierung dieser Belagstemperaturen in einem Data-Mining-Ansatz (vgl. Abschnitt 5.4, S. 77 ff.) vorgeschaltet werden. Der Datensatz für diesen vorgeschalteten Modellierungsteil wird abkürzend als Datensatz A bezeichnet. Die Parameterschätzung wird nun entsprechend auf die anderen Zeiträume angewendet. Für diese Anwendung werden die Merkmale der Ausgangsgrößen der beiden 30-jährigen Zeiträume entsprechend aufbereitet. Die Datenaufbereitung für das regelbasierte System der Gefahrenmodellierung wird abkürzend als Datensatz B bezeichnet.

Datensatz A für den  
Data-Mining-Ansatz zur  
Parameterschätzung  
fehlender  
Belagtemperaturen

Der Rohdatensatz aus den Klimasimulationen besteht aus den 14 Merkmalen (Klimavariablen) Lufttemperatur in zwei Metern Höhe, Regen, Schnee, relative Feuchte in zwei Metern Höhe, Taupunkttemperatur in zwei Metern Höhe, Bewölkungsgrad, direkte und indirekte Strahlung, Wind in Bezug auf die U- und V-Komponente in zehn Metern Höhe, Bodenwasser und -temperatur. Hinzu kommen im Datensatz A die Daten aus den Glättemeldeanlagen. Diese beinhalten die gemessene Lufttemperatur in zwei Metern Höhe sowie die gemessene Belagstemperatur der jeweiligen GMA-Station. Entsprechend dem angewendeten Schätzverfahren (Data-Mining-Ansatz) wird die Struktur des Datensatzes zu Beginn der Modellierung angepasst.

Eingelesen werden die aufbereiteten Daten in eine Matrix  $X$ . Der Datensatz A bildet für jede Station den Lerndatensatz für den Data-Mining-Ansatz<sup>20</sup>. Die aufgenommenen Klimavariablen werden in  $N$  Zeilen mit jeweils  $M$  Merkmalen in den Spalten dargestellt. Die Belagstemperatur wird als Zielgröße in Form eines Spaltenvektors  $\mathbf{y}$  gespeichert. Die Zeilen von  $X$  und  $\mathbf{y}$  stellen die Merkmalsausprägungen in einem Zeitschritt dar. Somit ist die Anzahl der Zeilen von  $X_k$  mit  $k = 1, \dots, 14$  und  $\mathbf{y}$  gleich.

$$X := \begin{bmatrix} X_1 [1] & \cdots & X_{14} [1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_n [n] & \cdots & X_{14} [n] \end{bmatrix} \quad \mathbf{y} := \begin{bmatrix} y [1] \\ \vdots \\ y [n] \end{bmatrix}$$

**Abbildung 5.3: Benötigte Datenstruktur der Datensätze zum Einlesen**

Eigene Darstellung

Abbildung 5.3 illustriert den Aufbau der Matrix  $X$  und des Vektors  $\mathbf{y}$ . Zudem werden die Merkmale, die in den Spalten der Matrix abgespeichert

<sup>20</sup> Bei 27 GMA-Stationen ergeben sich jeweils 27 Datensätze A und B, denn jede Station wird individuell modelliert.

sind, in der Variablenliste der Tabelle 9.2 (S. 185 f.) erläutert. In der Tabelle befinden sich darüber hinaus alle Variablen mit den entsprechenden Merkmalseinheiten und ihren Abkürzungen, welche bei der Modellierung in den Programmcodes genutzt werden. Die letzte Spalte erläutert, in welchem Datensatz die Merkmale eingesetzt werden. Für die weitere Datenanalyse ist die entsprechende Reihenfolge der Spalten wesentlich, damit die automatisierten Programmschritte fehlerlos ablaufen können.

Es wird eine Projektdatei erzeugt, in der die jeweiligen Merkmale der Rohdaten mit den entsprechenden Abtastpunkten (z. B. Messzeitpunkten) abgespeichert werden. Der Matlab Quellcode, welcher diesen Programmschritt in der vorliegenden Arbeit umgesetzt hat, befindet sich als gekürzter Auszug im Anhang 10 (vgl. Quellcode 10.1, S. 213).

Die Datensätze aus den Klimasimulationen für die beiden 30-jährigen Zeiträume 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050 werden entsprechend dem Datensatz A in die Spalten der Matrix  $X$  geschrieben (vgl. Abbildung 5.3). Der Unterschied besteht im Fehlen des Spaltenvektors  $y$ , denn die Belagstemperatur für diese beiden Zeiträume fehlt und wird anhand eines Regressionsmodells (Data-Mining-Ansatz) modelliert. Der Aufbau des Programmteils zum Einlesen der Daten ist durch leichte Modifikation des Quellcodes 10.1 (S. 213) zu erreichen. Das für die Modellierung der Gefahren an den einzelnen Stationen erforderliche Merkmal der Belagstemperatur wird nach deren Modellierung durch das Makro `,apply_regression_model_klima.makrog‘` (vgl. Quellcode 10.4, S. 219) hinzugefügt.

Datensatz B für die  
regelbasierte  
Modellierung

Datensatz B bezeichnet die Datenstruktur, welche vorliegt, wenn ausschließlich die Daten der Klimavariablen eines spezifischen geografischen Punkts eingelesen werden. Die geografischen Koordinaten sind durch die Lage der jeweiligen GMA-Stationen definiert.

### 5.3.4 Exemplarische Datenaufbereitung der Rohdaten: Daten der Klimavariablen und GMA-Daten Baden- Württembergs

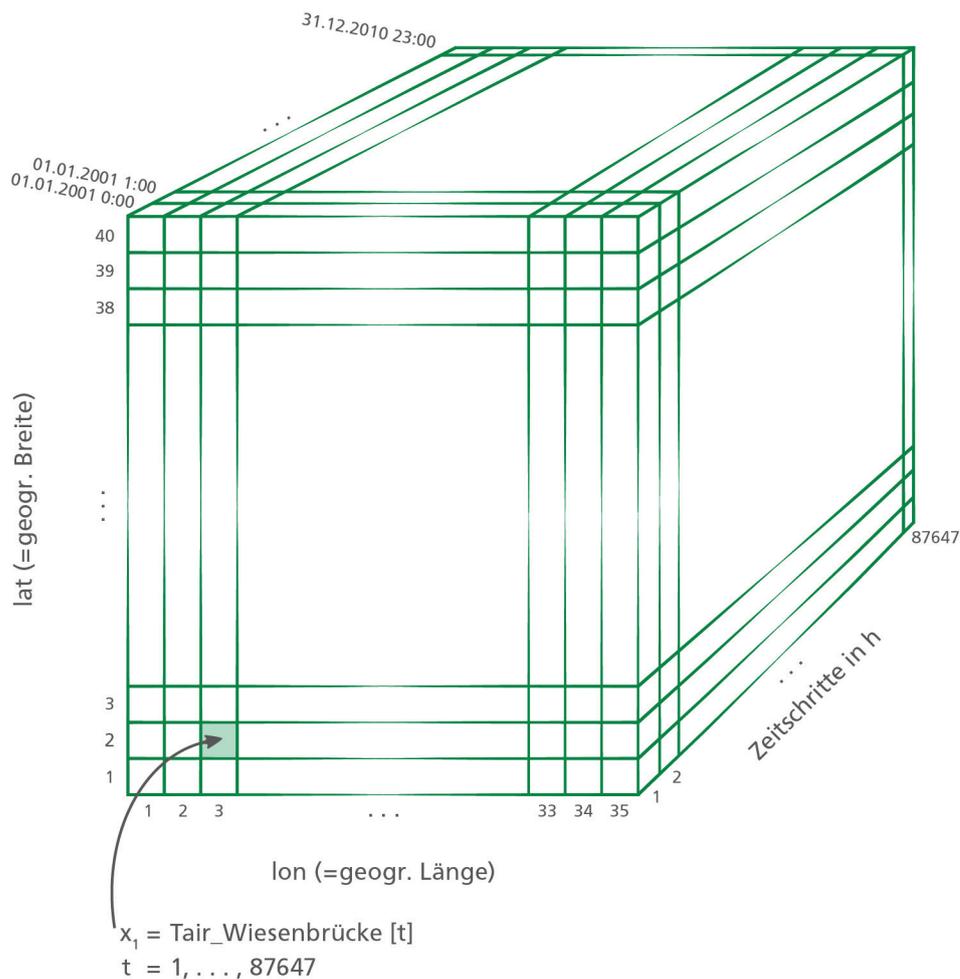
Anhand der Datenstruktur des Beispieldatensatzes wird erläutert, wie die Daten aufzubereiten sind, damit diese in einer Matrix bzw. einem Spaltenvektor – wie zuvor beschrieben – abgespeichert werden können. Im Folgenden wird gekürzt ausgeführt, wie aus den Messdaten der Glättemeldeanlagen und den Daten des IMKs die Datensätze A und B entstehen.

Aufbereitung der  
Daten aus den Klima-  
simulationen

Die Daten aus den Simulationen (Datensätze IMK, 2014a; IMK, 2014b und IMK, 2014c) der drei Zeiträume liegen – wie ein Großteil der zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Klimadaten – im netcdf-Format<sup>21</sup> vor. Netcdf-Dateien bestehen aus zwei Teilen: einer Kopfzeile, die den Variablennamen, die Variablendimension etc. enthält, sowie dem folgenden Hauptteil mit den Daten. Um die Daten der einzelnen Variablen auslesen zu können, wird zunächst die Kopfzeile benötigt. Hieraus können alle notwendigen Informationen abgeleitet werden, bevor die Daten ausgelesen sind. Abbildung 5.4 illustriert den Aufbau einer netcdf-Datei für das Merkmal Lufttemperatur in zwei Metern Höhe für die GMA-Station Wiesebrücke in Baden-Württemberg.

---

<sup>21</sup> Informationen zum netcdf-Format sind unter <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/> zu finden. (Juni 2015)



**Abbildung 5.4:** Beispiel zur grafischen Darstellung einer netcdf-Datei für den Modellzeitraum 2001 bis 2010

Eigene Darstellung

Mithilfe des Quellcodes 10.2 (S. 215) kann die Lufttemperatur für einen definierten Gitterpunkt über eine entsprechende Zeitspanne der hintereinanderliegenden Werte in einem Spaltenvektor abgespeichert werden. Das Auslesen sämtlicher Klimaparameter aus den entsprechenden netcdf-Dateien für die benötigten GMA-Stationen kann anhand eines Skripts automatisiert ablaufen. Die Klimavariablen einer GMA-Station werden für die drei Zeiträume in jeweils drei entsprechend benannte Matrizen abgespeichert, z. B.  $X_{\text{Klima}_{\text{present}}}$  als Name für die Matrix der Klimamerkmale des Zeitraums 2001 bis 2010.

Aufbereitung der  
GMA-Daten<sup>22</sup>

Die Daten aus den GMA-Stationen – in dem vorliegenden Fall Daten aus Baden-Württemberg – sind oftmals gekennzeichnet durch das Fehlen von Messungen der Luft- und Belagstemperaturen über stellenweise mehrere Tage bis Monate des Zeitraums 2001 bis 2010. Die Daten zur Lufttemperatur in zwei Metern Höhe und zur Belagstemperatur der 27 Stationen liegen als Datenliste-Datei \*.lst vor. Informationen, wie Datum, Uhrzeit, Stations-ID, Stationsname, Werte der Lufttemperatur sowie Werte der Belagstemperatur, sind abgespeichert. Fehlende Werte werden durch den Wert ‚-999‘ gekennzeichnet. Technisch bedingte Unterbrechungen der GMA Messungen sind in Form von Zeitsprüngen ablesbar. Bei der Analyse durchlaufen die Daten der Belagstemperatur die analogen Zeitschritte wie die Daten der Klimavariablen. Daher werden die Daten zu dem Modellzeitraum 2001 bis 2010 mit den Zeitschritten der Messungen an GMA-Stationen verglichen. In die weitere Berechnung gehen ausschließlich Zeitabschnitte ein, für welche vollständige Datensätze bestehen.

Liegen die Daten wie in Abbildung 5.3 (S. 72) vor, beginnt der nächste Schritt – die Modellierung des fehlenden Merkmals der Belagstemperatur für den Referenzzeitraum sowie den Zeitraum der nahen Zukunft. Wird das regelbasierte System des Ursache-Wirkungsmodells auf einen Zeitraum angewendet, für welchen das Merkmal Belagstemperatur gemessen vorliegt, kann der in Abschnitt 5.4 beschriebene Data-Mining-Ansatz übersprungen werden.

---

<sup>22</sup> Diese Aufbereitung ist lediglich für den Lerndatensatz, der für die Parameterschätzung der Belagstemperaturen in den anderen Zeiträumen als eine Eingabevariable fungiert, notwendig. Für die exemplarische Anwendung auf die Autobahnen in Baden-Württemberg liegt der Lerndatensatz im Modellzeitraum 2001 bis 2010 vor.

## 5.4 Modell im Modell: Regressionsansatz zur Modellierung der Belagstemperatur

Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung in Form von stündlichen Messwerten der benötigten Daten aus den Klimasimulationen und Belagstemperaturen wird ein Ansatz benötigt, welcher funktionale Zusammenhänge in großen Daten modellieren kann. Die Wahl im Rahmen der vorliegenden Modellierung fiel auf den Data-Mining-Ansatz. In diesem Kontext werden Problemstellung und Verfahren zusammengefasst, die in großen Datenmengen nach strukturellen, funktionellen und unbekanntem Zusammenhängen suchen (vgl. Mikut, 2009, S. 27 ff.). Weiterführende Literatur zu Data-Mining-Verfahren bieten Fayyad et al. (1996) ‚From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases‘, welche die Data-Mining-Definition, die dieses Kapitel einleitet, geprägt haben. Sie integriert Datenselektion, Vorverarbeitung, Transformation, Interpretation und Evaluierung als Prozessschritte in einen Data-Mining-Ansatz.

Eingangsvariablen sind als Merkmale zu verstehen und werden als wesentliche Eingangsgrößen für den Modellansatz charakterisiert. In Bezug auf die Modellierung der Belagstemperatur werden alle vorhandenen Klimaparameter als potenzielle Merkmale interpretiert. Folglich wird nach einem funktionalen Zusammenhang gesucht, welcher anhand ausgewählter Klimamerkmale die Belagstemperaturen der einzelnen GMA-Stationen modellieren kann.

Eingangsvariablen  
entsprechen Merkmalen

In Modellen zur Prognose von Belagtemperaturen und -zuständen, wie dem SWIS in Deutschland und dem METRo in Canada (vgl. Jacobs & Raatz, 1996; Crevier & Delage, 2001), werden u. a. Daten aus Klimasimulationen als Eingabeparameter zur Modellierung genutzt. Das vom DWD 1992 / 1993 eingeführte Straßenwetterinformationssystem (SWIS) erzeugt auf Basis eines Energiebilanzmodells für einzelne Messstationen Vorhersagen des Straßenzustands und der Belagstemperatur. Anhand dessen werden Ergebnisse zur Vorhersage für ein ganzes Gebiet abgeleitet (Jacobs & Raatz, 1996). Das SWIS beruht auf einem RWIS (*„road weather information system“*), das im United Kingdom Met. Office entwickelt worden ist. Das zugrunde liegende Energiebilanzmodell benötigt neben den Klimaparametern an einer Station weitere Anfangswerte, wie den Straßenzustand, die Belagstemperatur und den regulären Verkehr. Diese Anfangswerte werden genutzt, um die Belagstemperatur und den Straßenzustand für einen zukünftigen Tag in Dreistundenschritten fortzuschreiben.

Nach einem ähnlichen Prinzip funktioniert das METRo-Modell in Kanada (*„Model of Environment and Temperature of Roads in Canada“*). Es wird in Kanada eingesetzt, um Straßenzustände an spezifischen Stellen vorherzusagen (Crevier & Delage, 2001). In diesem physischen Modell werden die Belagstemperaturen und daraus die Belagszustände modelliert. Hierbei werden u. a. Klimaparameter als Eingangsgrößen benötigt.

Angelehnt an diese beiden kurz beschriebenen Modelle orientiert sich die Auswahl der Klimavariablen als Eingangsgrößen für den Data-Mining-Ansatz der vorliegenden Arbeit. Zudem werden Daten genutzt, die für den Zeitraum 2001 bis 2010 in kleinstmöglicher räumlicher und zeitlicher Auflösung zur Verfügung stehen. Das datenbasierte Modell dieser Arbeit zielt auf einen vereinfachten Ansatz zur Parameterschätzung der Belagstemperatur, der mit geeigneten Methoden entwickelt wird, ab.

### 5.4.1 Entwurf des Regressionsmodells

Abbildung 5.5 vermittelt einen schematischen Überblick über den Ablauf der Modellierung der Belagstemperatur in dem implementierten Data-Mining-Ansatz. Die der Nutzung dieses Ansatzes zugrunde liegende Idee besteht darin, dass über einen automatisierten Programmablauf ein funktionaler Zusammenhang zwischen den zur Verfügung stehenden Klimaparametern und der Belagstemperatur an einer Station hergestellt wird. Die Umsetzung erfolgt durch einen Regressionsansatz für jede Station. Das heißt, für die Parameterschätzung der Belagstemperaturen wird für jede Station ein eigenes Regressionsmodell entwickelt und verwendet. Insgesamt existieren in der Data-Mining-Modellphase 27 spezifische Modelle für die Belagstemperaturschätzung.

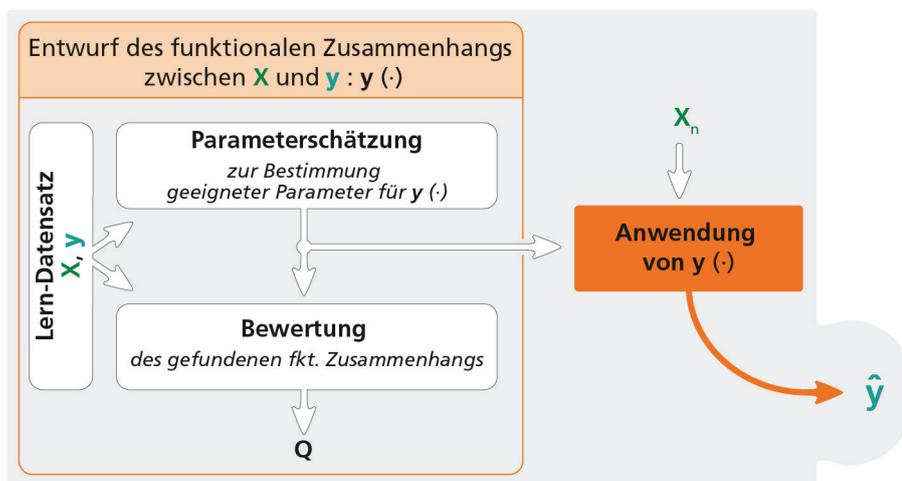


Abbildung 5.5: Überblick über den Ablauf der Belagstemperaturmodellierung in einem Data-Mining-Ansatz

Eigene Darstellung in Anlehnung an Mikut (2009, S. 33)

Lerndatensatz  
 $X$  und  $y$

Der Lerndatensatz besteht aus der Matrix  $X$  der Klimamerkmale und der Zielvariablen Belagstemperatur  $y$  (Spaltenvektor)<sup>23</sup>, für die während der Entwurfsphase im Data-Mining-Ansatz ein geeigneter Ersatz  $\hat{y}$  gefunden werden soll. Sind die Daten des Lerndatensatzes eingelesen, werden diese in einem nächsten Schritt für den Entwurf des Data-Mining-Ansatzes vorbereitet. Während dieser Vorbereitungsphase werden folgende Schritte in Form von Makros für alle GMA-Stationen automatisch durchgeführt:

- a) Die fehlenden Werte der Belagstemperatur werden für den entsprechenden Zeitpunkt in allen Merkmalen gelöscht.
- b) Die Daten der Belagstemperatur enthalten weitere fehlerhafte Werte, welche z. B. durch Fehler der Sensoren bei den Messungen entstehen. Diese sog. Artefakte werden ausgewählt<sup>24</sup> und ebenfalls wie in Schritt a) bearbeitet.
- c) Die Daten werden in Zeitreihen-Projekte umgewandelt.

Entwurf des funktionalen  
 Zusammenhangs  
 zwischen  $X$  und  $y$ :  
 Der **Regressionsansatz**

Sind diese vorbereitenden Programmschritte erfüllt, findet der Entwurf des Regressionsansatzes statt. Der gewählte Ansatz basiert auf einer multiplen Regression (Mehrfachregression) zur Parameterschätzung der Belagstemperatur. Die Belagstemperatur wird von mehreren Merkmalen (Klimaparametern) beeinflusst.

Der Regressionsansatz des Data-Mining-Konzepts lässt sich als funktionaler Zusammenhang für die skalare Ausgangsgröße Belagstemperatur  $y$  wie folgt darstellen:

**Gleichung (5.1):**

$$\hat{y} = f(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{a}})$$

mit  $x_k$  als erklärende Variable (spezifische Klimamerkmale), wobei  $k = 1, \dots, 14$  und dem Parametersatz  $\hat{\mathbf{a}}$ , der für einen geeigneten funktionalen Zusammenhang ausgewählt wird.

---

<sup>23</sup> Spaltenvektoren werden klein geschrieben und fett dargestellt.

<sup>24</sup> Die Identifikation von Artefakten erfolgt über Abstandsbetrachtung in Scatterplots.

Gleichung (5.1) beschreibt das Regressionsproblem in einer allgemeinen Form. Für die Berechnung des Zusammenhangs ist diese Form nicht geeignet und muss für eine numerische Optimierung entsprechend umgeformt werden.

Mikut (2009, S. 215) schlägt eine Umformung in ein parameterlineares Regressionsproblem vor. Der Vorteil des linearen Regressionsansatzes besteht in der leichteren Bestimmung der Parameter  $\hat{a}_i$  bzw. Minimierung des Fehlers über die in dieser Arbeit genutzte klassische ‚*least square method*‘ (dt. Methode der kleinsten Quadrate).

Der Regressionsansatz der vorliegenden Arbeit beruht auf einem parameterlinearen Polynomansatz, bei dem die Funktion  $f(x)$  durch geeignete Suchstrategien dargestellt wird<sup>25</sup>.

Gelöst wird folglich:

**Gleichung (5.2):**

$$\hat{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x})^T \cdot \hat{\mathbf{a}}.$$

Die zugelassenen Polynomwerte  $1, x_k, x_k^2, x_k^3$  und  $x_k^4$  entsprechen den zugelassenen Merkmalen (hier: Klimavariablen  $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{14}$ ) und werden dann in eine Matrix  $F$  mit der Dimension  $(N, s_f)$  geschrieben. Abgespeichert werden die Parameter im Spaltenvektor  $\hat{\mathbf{a}}$ , welcher  $s_f$ -dimensional ist.

Gesucht ist die Kombination aus Merkmalen, die den kleinsten quadratischen Fehler beinhaltet. Das Bewertungsmaß  $Q$  wird durch die Summe der Fehler-Quadrate ausgedrückt.

Bewertungsmaß  $Q$   
des parameterlinearen  
Regressionszusammenhangs

<sup>25</sup> Die entsprechenden Ansätze zur Umformung können bei Mikut (2009, S. 216) nachvollzogen werden. Die Notation orientiert sich entsprechend an der Notation von Mikut (2009), der die Anwendung eines Regressionsansatzes in Gait-CAD beschreibt.

**Gleichung (5.3)**

$$Q = (\mathbf{d}_{\text{Euklid}}(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}))^2 = \sum_{n=1}^N (\mathbf{y}[n] - \hat{\mathbf{y}}[n])^2 = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T \cdot (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})$$

Der mittlere quadratische Fehler wird hier durch die euklidische Distanz errechnet. Das Ziel des Regressionsansatzes besteht darin, den mittleren quadratischen Fehler zu minimieren. Unter Nutzung der Matrix  $F$  und des Parametersatzes  $\hat{\mathbf{a}}$  kann die Gleichung (5.2) umgeformt und in die Formel des Bewertungsmaßes, Gleichung (5.3), eingesetzt werden.

Hieraus folgt:

**Gleichung (5.4):**

$$Q = (\mathbf{y} - \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{a}})^T \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{a}}) \rightarrow \min \hat{\mathbf{a}}$$

Letztlich ergibt sich als Gleichung zur Lösung des parameterlinearen Optimierungsproblems die Gleichung 5.5.

**Gleichung (5.5):**

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F})^{-1} \cdot \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{y}$$

mit  $\mathbf{y}$  = Vektor der gemessenen Belagtemperatur und der Matrix  $F$ , die die Polynomkoeffizienten enthält.

Ein eindeutiges Ergebnis liegt dann vor, wenn die Matrix  $F$  mindestens  $s_f$  lineare unabhängige Spalten und Zeilen enthält (Ausschalten der Multikollinearität). Dies bedeutet folglich, dass  $s_f$  lineare unabhängige Datentupel und Merkmale (hier: Klimaparameter) vorhanden sein müssen.

Im Regressionsansatz dieser Arbeit wird ein linearer Polynomansatz gewählt, der Polynome bis zum Grad vier zulässt. Validierungsrechnungen haben gezeigt, dass Polynome vom Grad  $\geq 4$  keine Verbesserung hervor-

bringen. Gesucht sind die Merkmale, welche den kleinsten mittleren Fehler bedingen. Somit wird der mittlere absolute Fehler zwischen der geschätzten Belagstemperatur und der gemessenen Belagstemperatur durch eine geeignete Wahl der Polynomkoeffizienten und Merkmale minimiert.

Implementiert wird dieses Optimierungsproblem über eine schrittweise Vorwärtsselektion. Die schrittweise Vorwärtsselektion hält den besten gefundenen Term fest, bewahrt somit alle ausgewählten Terme und sucht weitere dazu, bis der Grad des Polynoms ausgefüllt ist bzw. der Fehler minimiert. Die errechneten multiplen linearen Zusammenhänge zwischen den Klimaparametern (Merkmalen) und der Belagstemperatur sind als Polynome für jede GMA-Station in Tabelle 9.3 (S. 187) aufgelistet.

Die aufbereiteten Daten liegen in einem Projekt als Zeitreihendaten vor. Das parameterlineare Optimierungsproblem wird über einen Programmschritt abgewickelt. Dieser Programmteil analysiert die Daten in Zeitreihen, legt als Abtastpunkte die jeweiligen Stundenwerte fest, lässt die einzelnen Merkmale filtern / glätten und erzeugt daraus weitere Merkmale. Die Merkmalsbezeichnung für die gefilterten Merkmale lautet ‚\_IIR‘.

Daraufhin wird die Regression als Makro angewendet und die modellierte Belagstemperatur als weitere Variable in die Projektdatei der jeweiligen Station hinzugefügt. Gleichzeitig werden Werte für das Bewertungsmaß  $Q$  als Text-Datei in den Projektordner geschrieben.

Anwendung des  
Regressionsansatzes zur  
Parameterschätzung der  
Belagstemperatur

Die geschilderten Schritte laufen über den Aufruf einer Batch-Datei, die aus Makros besteht, automatisch für alle Projekte der einzelnen GMA-Stationen ab. Das Makro der Regression (bez. mit ‚regression\_ts.makrog‘) kann unter Quellcode 10.3 (S. 216 ff.) eingesehen werden.

```
...\timeseriesprojects  
set_timescale.makrog  
filter_ts.makrog  
regression_ts.makrog
```

**Abbildung 5.6: Ansicht der Batch-Datei zur Anwendung der Regression bzw. der Berechnung der Regressionsmodelle**

Eigene Darstellung

Die errechneten Regressionspolynome für die jeweiligen GMA-Stationen befinden sich in Tabelle 9.3 (S. 187). Die Belagstemperatur jeder GMA-Station wird in einem individuellen Regressionsmodell geschätzt. Hierdurch werden die Eigenschaften, wie die Streckenlage, der Streckenbelag, der Streckentyp und die vorherrschenden Klimabedingungen, soweit diese in den Daten entsprechend inkludiert sind, berücksichtigt.

Die Polynome des Regressionsmodells beinhalten vier Merkmale, die den funktionalen Zusammenhang optimal darstellen. Der Großteil der Regressionsmodelle umfasst als Merkmale des Regressionspolynoms die indirekte, abwärts gerichtete kurzwellige Strahlung an der Oberfläche, die direkte, abwärts gerichtete kurzwellige Strahlung an der Oberfläche, die Bodentemperatur und die Taupunkttemperatur. Die Merkmale werden vor allem in ihrer geglätteten Parameterform in den Modellen genutzt. Zudem finden sich bei einigen Polynomen die Lufttemperatur, der IIR-gefilterte Bewölkungsgrad und das Bodenwasser als Variablen.

In Tabelle 9.3 (S. 187 ff.) sind zusätzlich der mittlere absolute Fehler, der sich aus dem Mittelwert des Betrags der Differenz von gemessener und geschätzter Belagstemperatur errechnet, der Korrelationskoeffizient  $r_{y,\hat{y}}$

aus wahren Wert und Schätzwert sowie das Bestimmtheitsmaß  $R^2(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}})$  angegeben.

#### 5.4.2 Anwendung der Regressionsmodelle

Nachdem die Daten aus den Klimasimulationen des Referenzzeitraums 1971 bis 2000 und der nahen Zukunft 2021 bis 2050 analog zum Abschnitt 5.3.2 (S. 71 f.) aufbereitet worden sind, können diese ebenfalls in einer Datei abgespeichert werden. Die Klimavariablen der jeweiligen GMA-Stationen und der beiden Zeiträume werden aus den separaten Dateien geladen und konvertiert. Der Inhalt dieser Konvertierung besteht aus einem Filter-Makro, der Spaltung der Zeitreihe-Daten in die jeweiligen Jahre des Zeitraums und der Anwendung des entsprechenden Regressionsmodells.

Auf die beiden 30-jährigen Daten der Klimavariablen wird für jede GMA-Station das entsprechende Regressionsmodell angewendet. In den Zwischenschritten des Programms existieren für die Spaltung der Zeitreihen in die Jahre je nach 30-jährigem Zeitraum differente Makros. Die Batch-Datei für den vergangenen Referenzzeitraum 1971 bis 2000 ist in Abbildung 5.7 mit den zugehörigen Makros dargestellt.

```
T:\gaitcad_data\timeseriesprojects_klimadaten
filter_ts.makrog
add_311270.makrog
apply_regression_model_klima.makrog
```

**Abbildung 5.7: Beispiel der Batch-Datei zur Anwendung der Regressions-Modelle auf den Referenzzeitraum 1971 bis 2000 mit Teilung der Daten der Klimavariablen in die einzelnen Jahre**

Eigene Darstellung

Das zentrale Makro zur Generierung des benötigten Merkmals Belagstemperatur für den Referenzzeitraum 1971 bis 2000 ist im Anhang 1 angefügt (vgl. Quellcode 10.4, S. 219). Die Programmschritte im Zeitraum der nahen Zukunft 2021 bis 2050 laufen analog ab und die entsprechenden Batch-Dateien, Makros und Programmschritte können angepasst werden.

### 5.4.3 Diskussion des Regressionsansatzes

Die Bewertung des Regressionsansatzes erfolgt u. a. über die Berechnung verschiedener Gütemaße. Diese Berechnung wird als Ergebnis nach Ablauf des Regressions-Makros (vgl. Quellcode 10.3 S. 216) in eine Text-Datei geschrieben.

Abbildung 5.8 visualisiert die berechneten Werte zur Bewertung der Güte des Regressionsmodells, in diesem Fall für die GMA-Station Stuttgart 4.

```
Güte der Regression:  
Mittlerer absoluter Fehler: 3.22476  
Güteverbesserung des mittleren absoluten Fehlers zur Trivial  
schätzung (0-1): 0.707636  
Korrelationskoeffizient wahrer wert und Schätzung: 0.940107  
Bestimmtheitsmaß R^2 wahrer wert und Schätzung: 0.883801
```

**Abbildung 5.8: Ansicht der .txt-Datei für die GMA-Station Stuttgart 4 mit den generierten Werten zur Güte des Regressionsmodells**

Eigene Darstellung

Für die Validierung der Regressionsmodelle für die unterschiedlichen 27 GMA-Stationen werden drei verschiedene Gütemaße in der Tabelle 9.3 (S. 187 ff.) angegeben, welche zur Bewertung herangezogen werden.

Bestimmtheitsmaß  $R^2$

Das Bestimmtheitsmaß  $R^2(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}})$  beschreibt, wie gut sich die Modellgleichung an die Belagstemperaturdaten anpasst. Wenn die Residuen Null sind, stimmen die modellierten (abgeschätzten) Belagstemperaturen mit den gemessenen Werten überein.

Der (empirische) Korrelationskoeffizient  $r_{y,\hat{y}}$  beschreibt eine lineare Regression zwischen der gemessenen Belagstemperatur  $y$  und der geschätzten Belagstemperatur  $\hat{y}$  und nimmt Werte zwischen minus Eins und Eins an. Für jedes Regressionsmodell fasst Tabelle 9.3 (S. 187) zusätzlich noch die Verbesserung des Korrelationskoeffizienten bei Hinzukommen eines weiteren Merkmals zusammen. Diese Verbesserung ist in der letzten Zeile unter dem jeweiligen Polynom aufgelistet.

Empirischer Korrelationskoeffizient

Als dritter Wert in Tabelle 9.3 (S. 187 ff.) wird der mittlere absolute Fehler aufgeführt. Dieser berechnet sich aus dem arithmetischen Mittel des Betrags der Differenz aus der gemessenen und der geschätzten Belagstemperatur der jeweiligen Station.

Mittlerer absoluter Fehler

Die einzelnen Bewertungsmaße können in Tabelle 9.3 (S. 187 ff.) betrachtet werden. Die existierenden Messausfälle bedeuten für die jeweiligen Regressions-Polynome eine Verschlechterung der Güte. Zudem kann anhand der mittleren absoluten Fehler konkludiert werden, dass die Daten der Klimasimulationen, welche auf ein kleinstmögliches Gitter interpoliert sind, möglicherweise die klimatischen Bedingungen der GMA-Stationen nicht ausreichend exakt darstellen.

Tabelle 9.4 (S. 195 ff.) beinhaltet die Berechnung der Regressionsmodelle der GMA-Stationen unter Zulassung der Lufttemperatur, welche an der Station im Zeitraum 2001 bis 2010 gemessen worden ist. Für alle Stationen ist eine Verbesserung der Gütemaße zu erreichen. Die Regressionsmodelle greifen fast sämtlich auch in gefilterter Version auf die gemessene Lufttemperatur, zurück. Als weiteres Merkmal nutzen die Regressionspolynome zudem die gefilterte und ungefilterte V-Komponente des Winds. Die Regressionsmodelle in Tabelle 9.4 (S. 195 ff.) können als Hilfe zur Interpretation der Güte der Regressionsmodell genutzt werden, welche letztlich zur Schätzung, zum Vergleich und zur Interpretation der Belagstemperatur dienen.

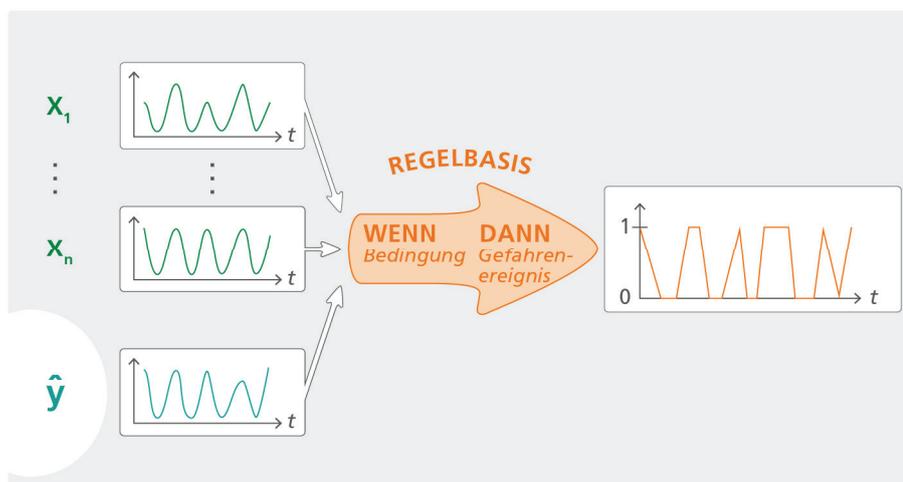
Exemplarische  
Diskussion von  
errechneten Regressions-  
modellen an  
GMA-Stationen

Das Regressionsmodell der GMA-Station Stuttgart 4 stellt eines der besten dar.  $R^2(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}})$  beträgt 0,879061,  $r_{\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}}$  liegt bei 0,940107 und der mittlere absolute Fehler ist 3,22476 Kelvin. Die GMA-Stationen Karlsruhe und Dreieck Weil stellen die GMA-Stationen mit den unzureichendsten Regressionsmodellen dar. Ihre Bestimmtheitsmaße liegen im Bereich von 0,6. Bei allen weiteren Stationen liegen die Bestimmtheitsmaße der Regressionsmodelle in einem zufriedenstellenden Bereich oberhalb von 0,8.

Trotz eines Bias der geschätzten Belagstemperaturen aus den Regressionsmodellen können die beiden 30-jährigen Zeiträume im Hinblick auf ihre Gefahrenentwicklung verglichen werden. Der Bias wird in beiden Zeiträumen bei den Belagstemperaturen im Rahmen der Gefahrenmodellierung enthalten sein. Absolute Aussagen, dass genau zu einer spezifischen Zeitstunde ein Gefahrenereignis stattgefunden hat bzw. stattfinden wird, sind nicht möglich und sollten dementsprechend auch nicht modelliert werden. Ein Vergleich der Veränderungen der Gefahrenereignisse kann jedoch mit den Regressionsmodellen zur Schätzung der Belagstemperatur sowie den genutzten Daten aus Klimasimulationen modelliert und analysiert werden. Eine zusätzliche Analyse zur Abschätzung der Parametersensitivität der Gefahrenmodellierung wird in Kapitel 7 (vgl. Abschnitt 7.2) erfolgen. Diese hilft, abzuschätzen, wie sich die Gefahrenverteilung verändert, wenn die Belagstemperatur einer Station sich in der Spanne des mittleren absoluten Fehlers bewegt.

## 5.5 Anwendung des datenbasierten Ursache-Wirkungsmodells

Die für das regelbasierte System benötigten Variablen werden in einem Programmschritt aus den Merkmalen, welche die Belagstemperatur und die Klimavariablen definieren, generiert. Mit der Implementierung von Plug-Ins können die entsprechenden Schwellenwerte, welche den jeweiligen Gefahrentyp definieren, erzeugt werden.



**Abbildung 5.9: Überblick über den Ablauf des regelbasierten Ursache-Wirkungsmodells**

Eigene Darstellung

Abbildung 5.9 illustriert den Ablauf des zentralen Gefahrenereignis modellierenden, regelbasierten Systems des Ursache-Wirkungsmodells.

Die verschiedenen Merkmale, wie modellierte Belagstemperatur (hier:  $\hat{y}$ ) und Klimaparameter (hier:  $x_1, \dots, x_{14}$ ), gehen als Eingangsgrößen in die Regelbasis ein. Nimmt ein Merkmal, welches eine Eingangsgröße für einen Gefahrentyp definiert (vgl. Tabelle 5.2 S. 91), einen Wert in einem Wertebereich an, welcher für die Gefahrentypisierung herangezogen wird, wird die Zeiteinheit mit dem Wert 1 bewertet. Ansonsten erhält das Merkmal für die Zeiteinheit den Wert 0. Die Zeiteinheit der Daten beträgt eine

Stunde. Jedes Merkmal, welches in der Definition eines Gefahrentyps auftritt und den definierten Wert in einer Stunde annimmt bzw. überschreitet, wird mit dem binären Wert 1 codiert. Die Kombination aller in einer Stunde vorkommenden Merkmale, welche einen Gefahrentyp definieren, impliziert das Vorkommen des Gefahrenereignisses in dieser Stunde.

Das Ergebnis nach Auswertung der Regelbasis zeigt den jeweiligen Gefahrentyp im Zeitverlauf (über die entsprechenden Abtastpunkte) in binärer Form auf. Hierbei gilt, dass ein Gefahrenereignis in einer Zeiteinheit bei Eintreten der entsprechenden Kombinationen aus den Merkmalsausprägungen mit 1 bewertet wird und somit stattfindet.

Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über die benötigten Merkmale und Merkmalsausprägungen, also die Eingangsparameter, welche einen Gefahrentyp steuern und schafft somit eine Nachvollziehbarkeit der Arbeitsschritte des Ursache-Wirkungsmodells. Dargestellt sind die Kombinationen der Merkmalsausprägungen in Form von Operatoren der Prädikatenlogik. Diese bildet u. a. die Basis für ein regelbasiertes System. Über Plug-Ins, welche auf die bedingenden Zeitreihen angewendet werden, können die Zeitreihen in binäre Werte transformiert werden. Die Vorwärtsverkettung der Bedingungen erzeugt ein Gefahrenereignis. Ein großer Vorteil des regelbasierten Ursache-Wirkungsmodells besteht in der leichten Erweiterbarkeit. Zusätzliche Regeln für weitere Gefahrentypen können eingefügt sowie bestehende Regeln modifiziert werden.

**Tabelle 5.2: Regelbasiertes System der Darstellung von Gefahrentypen**

$Rain_{Tot}$  = Niederschlag als Regen,  $Snow_{Tot}$  = Niederschlag als Schnee,  $Prec(t)$  = Niederschlag als Regen oder Schnee,  $T_{Air}$  = Lufttemperatur in 2 m Höhe,  $T_{Street}$  = Belagtemperatur,  $relHum$  = relative Feuchte,  $TD$  = Taupunkttemperatur und  $t$  = Zeit in Stunden

| Bezeichnung des Gefahrenereignisses | Regelbasis mit WENN <i>Bedingung(en)</i> DANN <i>Gefahrenereignis</i> |
|-------------------------------------|---|
|-------------------------------------|---|

**Gefahrentyp: Glätte und Parametrisierung des Klassifikators**

|   |  |
|---|--|
| 1. Gefrierender Regen auf kalter Straßenoberfläche                | $Rain_{Tot}(t) \text{ ja} \wedge T_{Air}(t) > 0 \wedge T_{Street}(t) \leq 0 \Rightarrow \text{Glätte 1}$   |
| 2. Niederschlag als Regen/Schnee auf gefrorener Straßenoberfläche | $Rain_{Tot}(t) \text{ ja} \wedge T_{Air}(t) \leq 0 \wedge T_{Street}(t) \leq 0 \Rightarrow \text{Glätte 2A}$<br>$Snow_{Tot}(t) \text{ ja} \wedge T_{Air}(t) \leq 0 \wedge T_{Street}(t) \leq 0 \Rightarrow \text{Glätte 2B}$   |
| 3. Niederschlag als Regen/Schnee auf warmer Straßenoberfläche     | $Rain_{Tot}(t) \text{ ja} \wedge T_{Air}(t) \leq 0 \wedge T_{Street}(t) > 0 \Rightarrow \text{Glätte 3A}$<br>$Snow_{Tot}(t) \text{ ja} \wedge T_{Air}(t) \leq 0 \wedge T_{Street}(t) > 0 \Rightarrow \text{Glätte 3B}$   |
| 4. Niederschlag als Regen/Schnee zusammen mit Raureif             | $Rain_{Tot}(t) \text{ ja} \wedge T_{Air}(t) \leq 0 \wedge T_{Street}(t) \leq 0 \wedge$<br>$TD(t) > T_{Street}(t) \Rightarrow \text{Glätte 4A}$<br>$Snow_{Tot}(t) \text{ ja} \wedge T_{Air}(t) \leq 0 \wedge T_{Street}(t) \leq 0 \wedge$<br>$TD(t) > T_{Street}(t) \Rightarrow \text{Glätte 4B}$ |
| 5. Raureif und geringe Sichtweite                                 | $Prec(t) \text{ nein} \wedge T_{Street}(t) \leq 0 \wedge TD(t) > T_{Street}(t)$<br>$\wedge relHum(t) > 94 \Rightarrow \text{Glätte 5}$   |
| 6. Gefrierender Tau mit nachfolgendem Raureif                     | $Prec(t-1) \text{ nein} \wedge Prec(t) \text{ nein} \wedge T_{Street}(t-1) > 0 \wedge$<br>$T_{Street}(t) \leq 0 \wedge TD(t-1) > T_{Street}(t-1) \wedge TD(t) > T_{Street}(t)$<br>$\Rightarrow \text{Glätte 6}$  |

| Bezeichnung des Gefahrenereignisses | Regelbasis mit WENN <i>Bedingung(en)</i> DANN <i>Gefahrenereignis</i> |
|-------------------------------------|---|
|-------------------------------------|---|

**Gefahrentyp: Starkregen (Extremereignis) und Parametrisierung des Klassifikators**

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| 7. Starkregen               | $Rain_{Tot}(t) \in [10,25] \Rightarrow \text{Starkregen}$          |
| 8. Heftiger Starkregen      | $Rain_{Tot}(t) \in (25,40] \Rightarrow \text{heftiger Starkregen}$ |
| 9. Sehr heftiger Starkregen | $Rain_{Tot}(t) > 40 \Rightarrow \text{sehr heftiger Starkregen}$   |

| Bezeichnung des Gefahrenereignisses | Regelbasis mit<br>WENN <i>Bedingung(en)</i> DANN <i>Gefahrenereignis</i> |
|-------------------------------------|--|
|-------------------------------------|--|

**Gefahrenotyp: Hitzegefahr (Extremereignis) und Parametrisierung des Klassifikators**

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| 10. Potenzielle Hitzeschäden I   | $T_{\text{Air}}(t) > 30 \Rightarrow \text{Hitze I-A}$<br>$T_{\text{Air}}(t) > 32 \Rightarrow \text{Hitze I-B}$   |
| 11. Potenzielle Hitzeschäden II  | $T_{\text{Street}}(t) > 46 \Rightarrow \text{Hitze II}$  |
| 12. Potenzielle Hitzeschäden III | $T_{\text{Air}}(t) > 30 \wedge T_{\text{Street}}(t) > 46 \Rightarrow \text{Hitze III-A}$<br>$T_{\text{Air}}(t) > 32 \wedge T_{\text{Street}}(t) > 46 \Rightarrow \text{Hitze III-B}$ |

| Bezeichnung des Gefahrenereignisses | Regelbasis mit<br>WENN <i>Bedingung(en)</i> DANN <i>Gefahrenereignis</i> |
|-------------------------------------|--|
|-------------------------------------|--|

**Gefahrenotyp: Wind (Extremereignis) und Parametrisierung des Klassifikators**

|   |   |
|---|---|
| 13. Starker Wind<br>(Beaufortgrad 6)        | $\text{Windgeschwindigkeit}(t) \in [11,13] \Rightarrow \text{starker Wind}$       |
| 14. Steifer Wind<br>(Beaufortgrad 7)        | $\text{Windgeschwindigkeit}(t) \in [14,17] \Rightarrow \text{steifer Wind}$       |
| 15. Stürmischer Wind<br>(Beaufortgrad 8)    | $\text{Windgeschwindigkeit}(t) \in [18,20] \Rightarrow \text{stürmischer Wind}$   |
| 16. Sturm<br>(Beaufortgrad 9)               | $\text{Windgeschwindigkeit}(t) \in [21,24] \Rightarrow \text{Sturm}$              |
| 17. Schwerer Sturm<br>(Beaufortgrad 10)     | $\text{Windgeschwindigkeit}(t) \in [25,28] \Rightarrow \text{schwerer Sturm}$     |
| 18. Orkanartiger Sturm<br>(Beaufortgrad 11) | $\text{Windgeschwindigkeit}(t) \in [29,32] \Rightarrow \text{orkanartiger Sturm}$ |
| 19. Orkan<br>(Beaufortgrad 12)              | $\text{Windgeschwindigkeit}(t) \geq 33 \Rightarrow \text{Orkan}$                  |

Die Gefahrenereignisse werden über den jeweiligen 30-jährigen Zeitraum aufsummiert. Ihre Summe ergibt den Wert des Gefahrenotyps innerhalb des 30-jährigen Zeitraums. Für jede GMA-Station werden die Werte als Grafik über jedes der Jahre innerhalb des 30-jährigen Zeitraums visualisiert.

Aufgrund der Vielzahl an Programm-Codes für die verschiedenen Gefahrentypen wird in Quellcode 10.5 (S. 222 f.) die Implementierung des Gefahrentyps Glättegefahr 1 exemplarisch dargestellt. Die jeweilige Implementierung der weiteren Gefahrentypen wird entsprechend mit Makros, Plug-Ins und Batch-Dateien umgesetzt.

Die Gefahrenmodellierung läuft für alle GMA-Stationen automatisch ab, die Ergebnisse werden abgespeichert, sodass eine Analyse der Gefahrenentwicklung zwischen zwei Zeiträumen erfolgen kann. Der Regressionsansatz wird exemplarisch auf die Daten der Klimavariablen und GMA-Daten der Autobahnen Baden-Württembergs des Zeitraums 2001 bis 2010 angewandt.

Die Gefahrenmodellierung – eine Kurzzusammenfassung

Die Regressionsmodelle, die errechnet werden, modellieren die Belagstemperatur für den Referenzzeitraum 1971 bis 2000 und die nahe Zukunft 2021 bis 2050. Daraufhin können die Gefahrenereignisse in beiden Zeiträumen in dem vorgestellten regelbasierten Ursache-Wirkungsmodell für den Zeitraum 1971 bis 2000 und als Prognose-Modell (selbes Modell) für den Zeitraum 2021 bis 2050 errechnet werden. Abbildung 5.10 illustriert diesen Zusammenhang und die übergreifenden Prozesse.

In den Veränderungen der Gefahrenereignisse der einzelnen GMA-Stationen ist der Klimawandel als ‚Eingabegröße‘ in Form der Daten aus den Klimasimulationen vorhanden und eine Analyse sowie Bewertung der Gefahrenänderung können erfolgen.

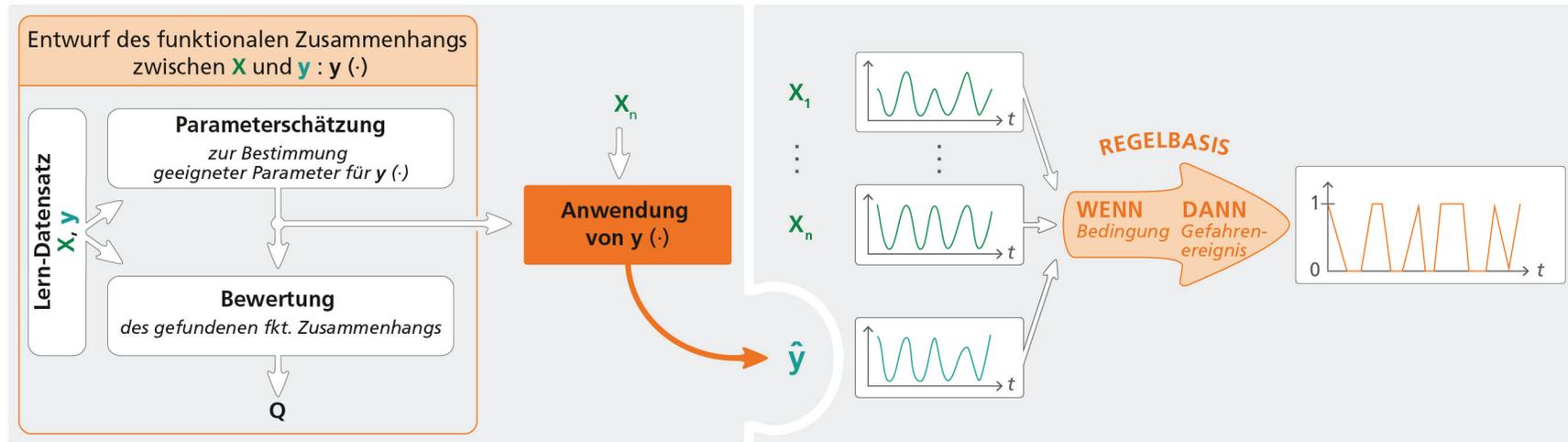


Abbildung 5.10: Zusammenfassende Übersicht über das entwickelte Instrumentarium

## 6 Prognose der Gefahrenentwicklung anhand der Modellergebnisse

Durch die Modellierung der Gefahren anhand eines Datensatzes aus Baden-Württemberg kann ausschließlich exemplarisch für diese Daten eine Prognose der Gefahrenentwicklung aufgestellt werden.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse der Modellierung der Gefahrenentwicklung zusammen. Abschnitt 6.1 stellt die Gefahrenentwicklung zwischen den beiden zuvor genannten Zeiträumen als Prognose der Modelldaten tabellarisch dar.

Inhalt des Kapitels 6

In Abschnitt 6.2. werden die Veränderungen einiger ausgewählter Gefahrentypen über die beiden Zeiträume dargelegt. Detailliert dargestellt werden zudem Modellergebnisse an einzelnen GMA-Stationen. Ausgewählte GMA-Stationen charakterisieren sich durch eine Zu- bzw. Abnahme der Modelldaten zwischen den beiden 30-jährigen Zeiträumen in einzelnen Gefahrentypen.

Abschnitt 6.3 rekapituliert zusammenfassend beide vorherigen Abschnitte. An Abschnitt 6.4 wird die relative Änderung der modellierten Gefahrenereignisse der nahen Zukunft bezogen auf den Referenzzeitraum für alle GMA-Stationen Baden-Württembergs autoskaliert. Eine vergleichende Darstellung der Gefahren an allen GMA-Stationen wird in Karten illustriert.

Bei den vorliegenden Ergebnissen ist eine exakte quantitative Berechnung der Irrtumswahrscheinlichkeit aufgrund von Unsicherheiten in der Zuverlässigkeit der Eingangsdaten nicht durchgeführt worden. Die Ergebnisse der exemplarischen Anwendung auf die Datensätze in Baden-Württemberg sind schwerpunktmäßig deskriptiv diskutiert worden.

Bemerkung der Verfasserin zu der Darstellung der Ergebnisse im ‚Testlauf‘ des Ursache-Wirkungsmodells

Hierbei handelt es sich um die Darstellung der Gefahr und nicht um die Errechnung eines Risikos mit zusätzlicher Eintrittswahrscheinlichkeit. Analog verhält es sich mit der Analyse der Gefahrenentwicklung an einer spezifischen Station. Der zentrale Fokus der Arbeit ruht auf der Entwicklung und Darstellung der Modelle.

## 6.1 Zukünftige Gefahrenereignisse im Vergleich zum Referenzzeitraum: Modellergebnis I

Beschreibung der Tabellen zum ‚Vergleich der Gefahren zwischen Referenzzeitraum und naher Zukunft‘

Die Tabellen 6.1 bis 6.3 (S. 103 ff.) stellen den Vergleich der in Kapitel 4.2 (S. 49 ff.) aufgeführten Gefahrentypen für Autobahnen an den GMA-Stationen in Baden-Württemberg dar. Die erste Spalte beinhaltet die Stationen der Glättemeldeanlagen mit dem zugehörigen Autobahntrassekt. Die Reihenfolge der Auflistung beruht analog zu Kapitel 5 auf dem Verlauf der Autobahnen von Norden nach Süden und Westen nach Osten. Die weiteren Spalten der Tabelle listen die den Gefahrentypen zugeordneten Gefahren auf.

Für jede Station wird ein Änderungssignal der Gefahren aus den jeweiligen Modellwerten der Gefahr im Referenzzeitraum und den Modellwerten der nahen Zukunft errechnet und durch einen Pfeil symbolisiert. Ein nach oben gerichteter Pfeil ↗ symbolisiert eine Zunahme der Häufigkeit des Ereignisses einer bestimmten Gefahr aus dem Referenzzeitraum 1971 bis 2000 bis zum Zeitraum der nahen Zukunft 2021 bis 2050. Die Zunahme der Häufigkeit errechnet sich aus dem Vergleich der Modellwerte in dem gesamten 30-jährigen Zeitraum. Die Stärke der Zunahme der Häufigkeit einer einzelnen Gefahr an den GMA-Stationen wird durch die Anzahl der Pfeile repräsentiert.

Ein nach unten gerichteter Pfeil ↘ zeigt eine abnehmende Häufigkeit der Gefahrenereignisse im zukünftigen Zeitraum, verglichen mit dem vergangenen Referenzzeitraum. Die Stärke der Abnahme wird ebenfalls durch die Anzahl der nach unten gerichteten Pfeile illustriert.

Ein horizontal ausgerichteter Pfeil  $\leftrightarrow$  deutet auf keine bzw. eine lediglich marginale Veränderung in der Anzahl der Gefahrenereignisse zwischen den beiden 30-jährigen Zeiträumen hin. Ausbleibende Gefahrenereignisse in der Modellsimulation sind durch einen horizontalen Pfeil mit hochgestellter Null  $\leftrightarrow^0$  gekennzeichnet. Dies trifft z. B. auf die Gefahren ‚Stürmischer Wind‘, ‚Sturm‘, ‚Schwerer Sturm‘, ‚Orkanartiger Sturm‘ und ‚Orkan‘ zu (vgl. Tabelle 6.3, S. 107). Die Gefahrenereignisse werden in der Einheit ‚Ereignis findet in einer Zeitstunde statt (binärer Wert 1)‘ oder ‚Ereignis bleibt aus (binärer Wert 0)‘ modelliert. Das Ergebnis der Aufsummierung aller Stundenwerte stellt die Anzahl der aufgetretenen Gefahrenereignisse innerhalb eines Jahres dar. Das Ergebnis der Aufsummierung aller innerhalb eines Jahres auftretenden Gefahrenereignisse über den gesamten 30-jährigen Zeitraum ergibt die Summe der Gefahrenereignisse in diesem Zeitraum.

Für jede Gefahr wird eine definierte Klasseneinteilung errechnet (vgl. Tabelle 9.5 bis 9.7, S. 203 ff.). Die Einteilung der Gefahrenveränderung an den jeweiligen GMA-Stationen erfolgt anhand von äquidistanten Klassen. Die Klassengrenzen berechnen sich für jede Gefahr eines Gefahrentyps individuell über den maximalen und minimalen Wert der Veränderung der Gefahr zwischen den beiden Zeiträumen über die Gesamtheit der GMA-Stationen. Die Spanne der negativen Werte, d. h. einer Abnahme der Gefahrenereignisse in der nahen Zukunft, entspricht der Spanne der positiven Werte und insofern einer Zunahme der Gefahrenereignisse in der nahen Zukunft. Die Klassifikation der maximalen Abnahmen und Zunahmen wird durch die im Betrag größten Werte bestimmt. Nimmt bspw. an einer GMA-Station eine Gefahr isoliert betrachtet um 1 000 Gefahrenereignisse zu und eine andere Station verzeichnet bei der gleichen Gefahr eine Abnahme von 10 000 Ereignissen in der nahen Zukunft, dann orientiert sich die Einteilung nach Stärke der Zu- und Abnahme an dem größeren Differenzwert.

Diese Vorgehensweise bei der Klasseneinteilung muss bei der Interpretation insbesondere der Gefahrenveränderung des Gefahrentyps Glätte berücksichtigt werden. Bei den Glättegefahren gibt es aufgrund der unterschiedlichen Lage der GMA-Stationen erhebliche Spannbreiten in der Häufigkeit der Gefahrenereignisse. In solchen Fällen bietet es sich an, die Gefahrenereignisse in Karten zu visualisieren und die Wertänderungen zwischen den beiden 30-jährigen Zeiträumen stationsspezifisch, folglich regional, zu betrachten (vgl. Abschnitt 6.2, S. 109 ff.). Die Beschreibung der Gefahrenveränderungen anhand der Tabellen 6.1 bis 6.3 stellt einen generellen Trend der Entwicklung der Gefahrentypen für Baden-Württemberg dar. Diese Interpretation ist zwar stationsgetreu, gilt jedoch vor dem Hintergrund der Klassifizierung einer Gefahr nicht spezifisch für jede GMA-Station.

Gefahrenprognose des  
Gefahrentyps Glätte

Tabelle 6.1 fasst die Veränderung des Gefahrentyps Glätte zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft zusammen. Für den Gefahrentyp Glätte ist kein genereller Trend in der Veränderung abzuleiten. Die einzelnen Glättegefahren verhalten sich hinsichtlich ihrer Veränderung bzw. ihres Gleichbleibens unterschiedlich.

Die Glättegefahren mit der Niederschlagsform ‚Schnee‘ (vgl. Glättegefahr 2B, 3B und 4B) zeigen für die nahe Zukunft einen tendenziell abnehmenden Trend. ‚Schnee auf gefrorener Fahrbahn‘ (Glättegefahr 2B) nimmt an allen GMA-Stationen in Baden-Württemberg in der nahen Zukunft ab. Diese Abnahme findet sich auch bei ‚Schnee auf warmer Fahrbahn‘ (Glättegefahr 3B). Die Abnahme der Glätteereignisse 3B ist bei einem großen Teil der GMA-Stationen stark bis sehr stark. Im Zeitraum der nahen Zukunft tritt folglich eine Abnahme der Kombinationen Schneefall, Lufttemperatur und Belagstemperatur kleiner gleich Null Grad Celsius sowie Schneefall in Verbindung mit Lufttemperatur kleiner gleich Null Grad Celsius und Belagstemperatur der Straße größer Null Grad Celsius ein.

Im Fall der Glättegefahr 4B ‚Schnee zusammen mit Raureif‘ lässt sich kein genereller Trend einer zu- oder abnehmenden Häufigkeit erkennen. Einige GMA-Stationen verzeichnen eine Zunahme der Gefahrenereignisse der Glättegefahr 4B, während andere durch eine abnehmende bis sehr stark abnehmende Häufigkeit (vgl. GMA-Station Weigenbachtal auf der A81) gekennzeichnet sind. Die Stärke der Zunahmen lassen sich aufgrund der großen Spannbreite der Werte im Bereich der Abnahme nicht ausreichend klassifizieren. Dies kann jedoch in Abschnitt 6.2 mit der Betrachtung der Karten der Gefahr 4B in den beiden 30-jährigen Zeiträumen detaillierter analysiert werden.

Die Glättegefahr 1 ‚gefrierender Regen auf kalter Straßenoberfläche‘ zeigt keinen erkennbaren Trend bezüglich der zu- und abnehmenden Häufigkeit des Auftretens in der nahen Zukunft. Die Werte der abnehmenden Häufigkeit sind jedoch stärker ausgeprägt als die Werte der zunehmenden Häufigkeit.

Das Glätteereignis 2A ‚Regen auf gefrorener Straßenoberfläche‘ nimmt bei etwa zwei Drittel der GMA-Stationen zu, während das verbleibende Drittel der GMA-Stationen eine abnehmende Häufigkeit verzeichnet.

Eine starke bis sehr starke Zunahme verzeichnen die GMA-Stationen bei dem Glätteereignis 3A ‚Regen auf gefrorener Fahrbahnoberfläche‘. Dieser Trend beruht auf der Zunahme der Kombination von Stunden mit Regenfällen, Stunden mit Lufttemperatur kleiner gleich Null Grad Celsius und Stunden mit Belagstemperatur über Null Grad Celsius im Zeitraum der nahen Zukunft.

Ein Viertel der GMA-Stationen ist durch eine Abnahme des Gefahrenereignisses ‚Regen zusammen mit Raureif‘ (Glättegefahr 4A) charakterisiert. Zwei Stationen zeigen keine Veränderung dieser Gefahrenereignisse. Die übrigen Stationen weisen eine Zunahme, einige sogar eine starke Zunahme dieses Gefahrensubtyps auf.

Im Hinblick auf das Gefahrenereignis ‚Raureif mit geringer Sichtweite‘ (Glättegefahr 5) zeigen die einzelnen GMA-Stationen ein differenziertes Änderungsverhalten der Ereignisse. Bezüglich der Glätteereignisse ‚Gefrierender Tau mit nachfolgendem Raureif‘ zeigen die meisten GMA-Stationen eine Zunahme der Ereignisse in der nahen Zukunft. Die Spannweite der Zunahmewerte als auch die Zunahmewerte selbst sind stärker (gleichbedeutend mit mehr Pfeilen) als die Abnahmewerte.

Ein Versuch, die GMA-Stationen der Tabelle 6.1 nach ihrer Lage auf den Autobahntransekten zu analysieren, gestaltet sich ambivalent. Die Glättegefahren, welche eine Zu- und Abnahme der Ereignisse bei allen GMA-Stationen verzeichnen, deuten für diese Glättegefahr einen generellen Trend in Baden-Württemberg an.

Die Glättegefahren, deren Ereignisse bei den einzelnen GMA-Stationen unterschiedlich stark zu- bzw. abnehmen, zeigen diese Eigenschaft größtenteils auch bei den GMA-Stationen auf dem gleichen Autobahntransekt. In diesem Fall kann eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Gefahren im Vergleich der Ereignisse der beiden Zeiträume helfen (vgl. Abschnitt 6.2, S. 109 ff.).

Gefahrenprognose des  
Gefahrenstyps  
Starkniederschlag

Tabelle 6.2 (S. 105) stellt die Veränderungen des Gefahrenstyps ‚Starkniederschlag‘ dar. Bis auf wenige Ausnahmen zeigen alle GMA-Stationen in Baden-Württemberg eine Zunahme der Starkregenereignisse (Regen mit 10 bis 24 l/m<sup>2</sup> in 1 h). Insbesondere die GMA-Stationen auf der A6 sowie der A98 deuten auf eine deutliche Zunahme der Starkregenereignisse für die nahe Zukunft hin. Begründet werden kann diese Zunahme durch eine Zunahme der Summe von Starkniederschlägen vom Referenzzeitraum zum Zeitraum der nahen Zukunft in Baden-Württemberg, welche im Mittel alle Klimaprojektion<sup>26</sup> zeigen (Wagner, 2013b).

---

<sup>26</sup> Eingeschätzt wird die Belastbarkeit der Ergebnisse der Projektionen als ‚eingeschränkt zufriedenstellend‘ (Wagner, 2013b).

Die heftigen Starkregenereignisse mit mehr als 25 l/m<sup>2</sup> Niederschlag in einer Stunde nehmen an fast allen GMA-Stationen zu. Bei einigen GMA-Stationen verändern sich die heftigen Starkregenereignisse nicht bzw. gehen sogar zurück.

Bei der Betrachtung der sehr heftigen Starkregenereignisse fällt auf, dass bei 20 der 27 GMA-Stationen dieser Modellierung die Gefahrenereignisse ausbleiben. An den restlichen sieben GMA-Stationen variieren die Gefahrenereignisse zwischen Zu- und Abnahme. Die Zunahme tritt hauptsächlich an den Stationen der in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Autobahntransekten auf. Die GMA-Stationen auf den von West nach Ost verlaufenden Autobahnen, in Zentral- und Ost-Baden-Württemberg gelegen, zeigen eine Abnahme der sehr heftigen Starkniederschläge.

Der Anstieg des Klimaparameters Lufttemperatur wird für den Großteil Baden-Württembergs in jeglichen Szenarien prognostiziert. In Hinblick auf die Veränderung der Hitzegefahren zeigt sich diese Prognose bei der Hitzegefahr I-A und I-B in einer Zunahme bei allen GMA-Stationen, die durch das Merkmal Lufttemperatur modelliert werden. Die zunehmende Veränderung des Klimaparameters Temperatur spiegelt sich somit auch in den Modelldaten gut wider.

Gefahrenprognose des  
Gefahrentyps Hitze

Die Veränderung der Belagstemperatur der nahen Zukunft im Vergleich zum Referenzzeitraum variiert zwischen einer Zu- und Abnahme sowie dem Ausbleiben der Ereignisse ‚Belagstemperatur über 46 Grad Celsius‘. Einen einheitlichen Trend der Zunahme der Hitzegefahr II weisen die GMA-Stationen der A8 und die GMA-Stationen der A6 auf. Lediglich die GMA-Station Gronachbrücke weist eine Abnahme dieses Gefahrenereignisses auf. Da es sich bei dieser GMA-Station um eine Betonbrücke über ein Tal handelt, können hier Kälteeffekte die Belags- und Lufttemperatur abkühlen.

Hitzegefahr III-A und III-B stellen eine Kombination aus den in den Spalten zuvor genannten Hitzegefahren dar. Die GMA-Stationen, an denen die

Ereignisse der Hitzegefahr II in der nahen Zukunft ausbleiben, weisen auch keine Ereignisse der Hitzegefahren III-A und -B auf. Im Hinblick auf die übrigen GMA-Stationen stellt sich bei den meisten GMA-Stationen eine Zunahme der Hitzegefahren III-A und -B ein. Insbesondere die GMA-Stationen der A8 AK Stuttgart A, Stuttgart 1 und 4 weisen über alle Hitzegefahren eine starke Zunahme auf. Gründe hierfür können u. a. die Kessellage des Großraums Stuttgart sowie eine Zunahme der Lufttemperatur in dieser Region in der nahen Zukunft sein (Verband Region Stuttgart, 2008).

Gefahrenprognose des  
Gefahrentyps Wind

Im Modelllauf der Ereignisse ‚Stürmischer Wind‘, ‚Sturm‘, ‚Schwerer Sturm‘, ‚Orkanartiger Sturm‘ und ‚Orkan‘ verdeutlicht Tabelle 6.3 (S. 107), dass für diese mit der genutzten Datengrundlage Gefahrenereignisse ausbleiben. Die Ereignisse ‚Starker Wind‘ weisen bei etwa zwei Drittel der GMA-Stationen einen abnehmenden Trend in der nahen Zukunft auf. Die Stationen mit abnehmender Tendenz der starken Windergebnisse lassen sich regional auf die GMA-Stationen der A5, A96, A6 und A98 eingrenzen. Während bei ungefähr zwei Fünftel der GMA-Stationen die Ereignisse ‚Steifer Wind‘ ausbleiben, zeigt ein Drittel der GMA-Stationen eine Zunahme der steifen Windereignisse in der nahen Zukunft und ein Neuntel eine Abnahme.

**Tabelle 6.1: Vergleich der Glättegefahren zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft**

Eigene Darstellung anhand der Modelldaten

| Autobahntransekt /<br>GMA-Station |                    | Gefahrentyp: Glätte |           |           |           |           |           |           |          |          |
|-----------------------------------|--------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
|                                   |                    | Glätte 1            | Glätte 2A | Glätte 2B | Glätte 3A | Glätte 3B | Glätte 4A | Glätte 4B | Glätte 5 | Glätte 6 |
| A5                                | Karlsruhe          | ↗                   | ↗         | ↘         | ↗↗        | ↘↘        | ↔°        | ↔°        | ↔°       | ↗        |
|                                   | Dreieck Weil       | ↗                   | ↘         | ↘         | ↗         | ↘↘↘       | ↔°        | ↔°        | ↔°       | ↗        |
| A7                                | Westhausen A       | ↔                   | ↗↗        | ↘         | ↗↗↗       | ↘         | ↗         | ↗         | ↗↗       | ↗        |
|                                   | Agnesburg A        | ↘                   | ↗↗        | ↘↘        | ↗↗        | ↘↘↘       | ↗↗        | ↗         | ↗↗↗      | ↗↗↗      |
| A81                               | Keltensiedlung     | ↘↘                  | ↗         | ↘↘        | ↗↗        | ↘         | ↗         | ↘         | ↘↘       | ↘        |
|                                   | Rötenstein B       | ↘↘                  | ↗↗        | ↘↘        | ↗↗        | ↘         | ↗↗        | ↘         | ↘↘↘      | ↗↗       |
|                                   | Muckbach A         | ↘                   | ↘         | ↘↘        | ↗↗↗       | ↘↘        | ↗         | ↘         | ↘↘       | ↘        |
|                                   | Holzspitze         | ↘                   | ↘         | ↘↘        | ↗↗↗       | ↘↘        | ↘         | ↘         | ↘↘↘      | ↘        |
|                                   | Widdern A          | ↘                   | ↗         | ↘↘        | ↗↗        | ↘↘        | ↗         | ↗         | ↗↗       | ↗        |
|                                   | Horb A             | ↗                   | ↗         | ↘↘        | ↗↗        | ↘↘        | ↗         | ↗         | ↗↗       | ↗↗       |
|                                   | Weigenbachtal      | ↘                   | ↗↗↗       | ↘↘↘       | ↗         | ↘         | ↗↗↗       | ↘↘↘       | ↘↘↘      | ↗↗↗      |
|                                   | Trossingen         | ↘                   | ↘         | ↘↘↘       | ↗↗↗       | ↘↘↘       | ↘         | ↘         | ↘        | ↗        |
|                                   | Immensitz          | ↗                   | ↘         | ↘↘↘       | ↗↗↗       | ↘         | ↘         | ↘         | ↘        | ↗        |
| Hegaublick                        | ↘                  | ↘                   | ↘↘↘       | ↗↗↗       | ↘↘        | ↗         | ↘         | ↘↘        | ↗        |          |
| A96                               | Herfatz Tunnel Süd | ↘                   | ↗         | ↘↘        | ↗         | ↘↘↘       | ↗         | ↗         | ↗        | ↗        |
|                                   | Argenbrücke Nord   | ↘                   | ↘         | ↘↘        | ↗↗        | ↘↘        | ↘         | ↘         | ↗        | ↘        |
| A656                              | Heidelberg         | ↗                   | ↘         | ↘         | ↗↗        | ↘↘        | ↘         | ↘         | ↔        | ↗        |

| Autobahntransekt /<br>GMA-Station |                | Gefahrenart: Glätte |           |           |           |           |           |           |          |          |
|-----------------------------------|----------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
|                                   |                | Glätte 1            | Glätte 2A | Glätte 2B | Glätte 3A | Glätte 3B | Glätte 4A | Glätte 4B | Glätte 5 | Glätte 6 |
| A6                                | Sulmtal A      | ↘                   | ↘         | ↘         | ↗↗        | ↘↘        | ↗         | ↗         | ↘        | ↗        |
|                                   | Braunsbach A   | ↗                   | ↗         | ↘↘        | ↗↗        | ↘↘↘       | ↗         | ↗         | ↗↗↗      | ↗        |
|                                   | Wolfskopf      | ↗                   | ↗         | ↘↘        | ↗↗        | ↘↘↘       | ↗         | ↗         | ↗↗       | ↗        |
|                                   | Gronachbrücke  | ↗                   | ↗         | ↘↘        | ↗↗↗       | ↘↘↘       | ↗         | ↗         | ↗↗       | ↗        |
| A8                                | AK Stuttgart A | ↘                   | ↗         | ↘↘        | ↗↗        | ↘         | ↗         | ↗         | ↗↗       | ↗        |
|                                   | Stuttgart 1    | ↘                   | ↗         | ↘↘        | ↗↗        | ↘         | ↗         | ↘         | ↘        | ↗        |
|                                   | Stuttgart 4    | ↘                   | ↗         | ↘↘        | ↗↗        | ↘↘        | ↗         | ↗         | ↗        | ↘        |
| A61                               | Hockenheim A   | ↔                   | ↗         | ↘         | ↗         | ↘         | ↗         | ↗         | ↗        | ↗        |
| A98                               | Homburg        | ↗                   | ↘↘        | ↘↘↘       | ↗↗        | ↘         | ↘         | ↘         | ↘        | ↗        |
|                                   | Wiesebrücke    | ↗                   | ↘         | ↘↘        | ↗         | ↘↘        | ↘         | ↘         | ↔        | ↔        |

Bei den Glättegefahren entspricht das Kürzel ‚A‘ Niederschlag in Form von Regen und ‚B‘ Niederschlag in Form von Schnee.

- |     |  |     |   |
|-----|--|-----|---|
| ↔   | keine bis minimale Veränderung in der Anzahl der Gefahrenereignisse im Vergleich von 1971-2000 und 2021-2050 |     |   |
| ↗   | Zunahme der Gefahren in der nahen Zukunft  | ↘   | Abnahme der Gefahren in der nahen Zukunft             |
| ↗↗  | starke Zunahme der Gefahren in der nahen Zukunft   | ↘↘  | starke Abnahme der Gefahren in der nahen Zukunft      |
| ↗↗↗ | sehr starke Zunahme der Gefahren in der nahen Zukunft  | ↘↘↘ | sehr starke Abnahme der Gefahren in der nahen Zukunft |

**Tabelle 6.2: Vergleich der Starkniederschlag- und Hitzegefahren zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft**

Eigene Darstellung anhand der Modelldaten

| Autobahntransekt / GMA-Station |                    | Gefahrentyp: Starkregen |                     |                          | Gefahrentyp: Hitzegefahr |                 |                |                   |                   |
|--------------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|----------------|-------------------|-------------------|
|                                |                    | Starkregen              | Heftiger Starkregen | Sehr heftiger Starkregen | Hitzegefahr I-A          | Hitzegefahr I-B | Hitzegefahr II | Hitzegefahr III-A | Hitzegefahr III-B |
| A5                             | Karlsruhe          | ↗                       | ↗                   | ↗↗                       | ↗↗                       | ↗↗              | ↔°             | ↔°                | ↔°                |
|                                | Dreieck Weil       | ↗↗↗                     | ↔                   | ↔°                       | ↗                        | ↗               | ↗↗             | ↘                 | ↘                 |
| A7                             | Westhausen A       | ↗↗↗                     | ↗↗↗                 | ↔°                       | ↗                        | ↗               | ↔°             | ↔°                | ↔°                |
|                                | Agnesburg A        | ↗                       | ↗↗                  | ↗                        | ↗                        | ↗               | ↔°             | ↔°                | ↔°                |
| A81                            | Keltensiedlung     | ↗                       | ↗                   | ↔°                       | ↗                        | ↗               | ↔°             | ↔                 | ↔°                |
|                                | Rötenstein B       | ↗                       | ↗↗                  | ↔°                       | ↗                        | ↗               | ↘              | ↗                 | ↔                 |
|                                | Muckbach A         | ↗↗                      | ↗                   | ↗                        | ↗                        | ↗               | ↔°             | ↔°                | ↔°                |
|                                | Holzspitze         | ↗↗↗                     | ↗                   | ↔°                       | ↗                        | ↗               | ↗              | ↔                 | ↔°                |
|                                | Widdern A          | ↗                       | ↔                   | ↔°                       | ↗                        | ↗               | ↗              | ↗                 | ↔                 |
|                                | Horb A             | ↗↗                      | ↗↗                  | ↔°                       | ↗↗                       | ↗↗              | ↗              | ↗                 | ↗↗↗               |
|                                | Weigenbachtal      | ↗                       | ↗                   | ↔°                       | ↗                        | ↗               | ↔°             | ↔°                | ↔°                |
|                                | Trossingen         | ↗                       | ↗                   | ↔°                       | ↗                        | ↗               | ↗              | ↘                 | ↗                 |
|                                | Immensitz          | ↗                       | ↗                   | ↔°                       | ↗                        | ↗               | ↗              | ↘                 | ↔°                |
| Hegaublick                     | ↗                  | ↗                       | ↔°                  | ↗                        | ↗                        | ↗               | ↘              | ↔°                |                   |
| A96                            | Herfatz Tunnel Süd | ↘                       | ↘                   | ↔°                       | ↗                        | ↗↗              | ↔°             | ↔°                | ↔°                |
|                                | Argenbrücke Nord   | ↗                       | ↘                   | ↔°                       | ↗↗                       | ↗↗              | ↗↗             | ↗                 | ↗↗                |
| A656                           | Heidelberg         | ↗                       | ↔                   | ↔°                       | ↗                        | ↗               | ↔°             | ↔°                | ↔°                |

| Autobahntrassekt / GMA-Station |                | Gefahrenartyp: Starkregen |                     |                          | Gefahrenartyp: Hitzegefahr |                 |                |                   |                   |
|--------------------------------|----------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------|----------------|-------------------|-------------------|
|                                |                | Starkregen                | Heftiger Starkregen | Sehr heftiger Starkregen | Hitzegefahr I-A            | Hitzegefahr I-B | Hitzegefahr II | Hitzegefahr III-A | Hitzegefahr III-B |
| A6                             | Sulmtal A      | ↗↗                        | ↘                   | ↔°                       | ↗↗                         | ↗↗              | ↗              | ↗                 | ↗↗                |
|                                | Braunsbach A   | ↗↗                        | ↔                   | ↔°                       | ↗                          | ↗               | ↗              | ↗                 | ↘                 |
|                                | Wolfskopf      | ↗↗                        | ↘↘                  | ↘                        | ↗                          | ↗               | ↗              | ↗                 | ↘                 |
|                                | Gronachbrücke  | ↗↗                        | ↔                   | ↘                        | ↗                          | ↗               | ↘              | ↗                 | ↘                 |
| A8                             | AK Stuttgart A | ↗↗                        | ↔                   | ↔°                       | ↗↗↗                        | ↗↗↗             | ↗              | ↗↗                | ↗↗↗               |
|                                | Stuttgart 1    | ↗↗                        | ↗                   | ↔°                       | ↗↗↗                        | ↗↗↗             | ↗↗             | ↗↗↗               | ↗↗                |
|                                | Stuttgart 4    | ↗↗                        | ↗                   | ↘                        | ↗↗↗                        | ↗↗↗             | ↗↗↗            | ↗↗↗               | ↗↗↗               |
| A61                            | Hockenheim A   | ↘                         | ↔                   | ↗                        | ↗↗                         | ↗               | ↔°             | ↔°                | ↔°                |
| A98                            | Homburg        | ↗↗                        | ↗                   | ↔°                       | ↗                          | ↗               | ↗              | ↘                 | ↘                 |
|                                | Wiesebrücke    | ↗↗                        | ↗                   | ↔°                       | ↗                          | ↗               | ↗              | ↘                 | ↘                 |

- ↔ keine bis minimale Veränderung in der Anzahl der Gefahrenereignisse im Vergleich von 1971-2000 und 2021-2050
- ↔° ausbleibende Gefahrenereignisse und somit keine Veränderung
- ↗ Zunahme der Gefahren in der nahen Zukunft
- ↗↗ starke Zunahme der Gefahren in der nahen Zukunft
- ↗↗↗ sehr starke Zunahme der Gefahren in der nahen Zukunft
- ↘ Abnahme der Gefahren in der nahen Zukunft
- ↘↘ starke Abnahme der Gefahren in der nahen Zukunft
- ↘↘↘ sehr starke Abnahme der Gefahren in der nahen Zukunft

**Tabelle 6.3: Vergleich der Windgefahren zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft**

Eigene Darstellung anhand der Modelldaten

| Autobahntransekt /<br>GMA-Station |                    | Gefahrentyp: Wind (Extremereignis) |                 |                     |       |                  |                       |       |
|-----------------------------------|--------------------|------------------------------------|-----------------|---------------------|-------|------------------|-----------------------|-------|
|                                   |                    | Starker<br>Wind                    | Steifer<br>Wind | Stürmischer<br>Wind | Sturm | Schwere<br>Sturm | Orkanartiger<br>Sturm | Orkan |
| A5                                | Karlsruhe          | ↘                                  | ↗               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Dreieck Weil       | ↘                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
| A7                                | Westhausen A       | ↘↘↘                                | ↘↘↘             | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Agnesburg A        | ↗                                  | ↗               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
| A81                               | Keltensiedlung     | ↗                                  | ↗               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Rötenstein B       | ↘                                  | ↗               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Muckbach A         | ↘                                  | ↗               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Holzspitze         | ↘                                  | ↗↗              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Widdern A          | ↘                                  | ↗               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Horb A             | ↘                                  | ↗               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Weigenbachtal      | ↘                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Trossingen         | ↗                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Immensitz          | ↗                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Hegaublick         | ↗                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
| A96                               | Herfatz Tunnel Süd | ↘                                  | ↘               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Argenbrücke Nord   | ↘                                  | ↘               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
| A656                              | Heidelberg         | ↗                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |

| Autobahntrassekt /<br>GMA-Station |                | Gefahrentyp: Wind (Extremereignis) |                 |                     |       |                  |                       |       |
|-----------------------------------|----------------|------------------------------------|-----------------|---------------------|-------|------------------|-----------------------|-------|
|                                   |                | Starker<br>Wind                    | Steifer<br>Wind | Stürmischer<br>Wind | Sturm | Schwere<br>Sturm | Orkanartiger<br>Sturm | Orkan |
| A6                                | Sulmtal A      | ↘                                  | ↘               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Braunsbach A   | ↘                                  | ↘               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Wolfskopf      | ↘                                  | ↘               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Gronachbrücke  | ↘                                  | ↗               | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
| A8                                | AK Stuttgart A | ↗                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Stuttgart 1    | ↗                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Stuttgart 4    | ↗                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
| A61                               | Hockenheim A   | ↗                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
| A98                               | Homburg        | ↘                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |
|                                   | Wiesebrücke    | ↘                                  | ↔°              | ↔°                  | ↔°    | ↔°               | ↔°                    | ↔°    |

↔ keine bis minimale Veränderung in der Anzahl der Gefahrenereignisse im Vergleich von 1971-2000 und 2021-2050

↔° ausbleibende Gefahrenereignisse und somit keine Veränderung

↗ Zunahme der Gefahren in der nahen Zukunft

↘ Abnahme der Gefahren in der nahen Zukunft

↗↗ starke Zunahme der Gefahren in der nahen Zukunft

↘↘ starke Abnahme der Gefahren in der nahen Zukunft

↗↗↗ sehr starke Zunahme der Gefahren in der nahen Zukunft

↘↘↘ sehr starke Abnahme der Gefahren in der nahen Zukunft

## 6.2 Darstellung ausgewählter modellierter Gefahren in Baden-Württemberg: Modellergebnis II

In diesem Abschnitt der Arbeit wird die Veränderung ausgewählter Gefahren zwischen den beiden 30-jährigen Zeiträumen 1970 bis 2000 und 2021 bis 2050 für die 27 untersuchten GMA-Stationen auf den Autobahnen in Baden-Württemberg eingehender erläutert. Aus den insgesamt 1 458 Gefahrenmodellierungen werden die Gefahren bzw. Gefahrenereignisse ausgewählt und analysiert, welche ein ausgeprägtes Änderungssignal, wie z. B. eine starke Zunahmetendenz zwischen den beiden Zeiträumen, wiedergeben.

Die Glättegefahren nehmen etwa zwei Fünftel der Gefahrenmodellierungen ein und zeigen ein differenziertes Bild in der Veränderung der einzelnen Glättegefahren. Daher repräsentiert der Gefahrentyp Glätte mehrere Glättegefahren. Karten der einzelnen Gefahren visualisieren für jeden der beiden 30-jährigen Zeiträume die Gefahren an den GMA-Stationen in Baden-Württemberg. Eine Veränderung einer Gefahr kann neben dem Wertevergleich der Tabelle 6.1 (S. 103 ff.) anhand des Vergleichs der jeweiligen Karte aus dem entsprechenden Zeitraum für die betrachtende Gefahr entnommen werden.

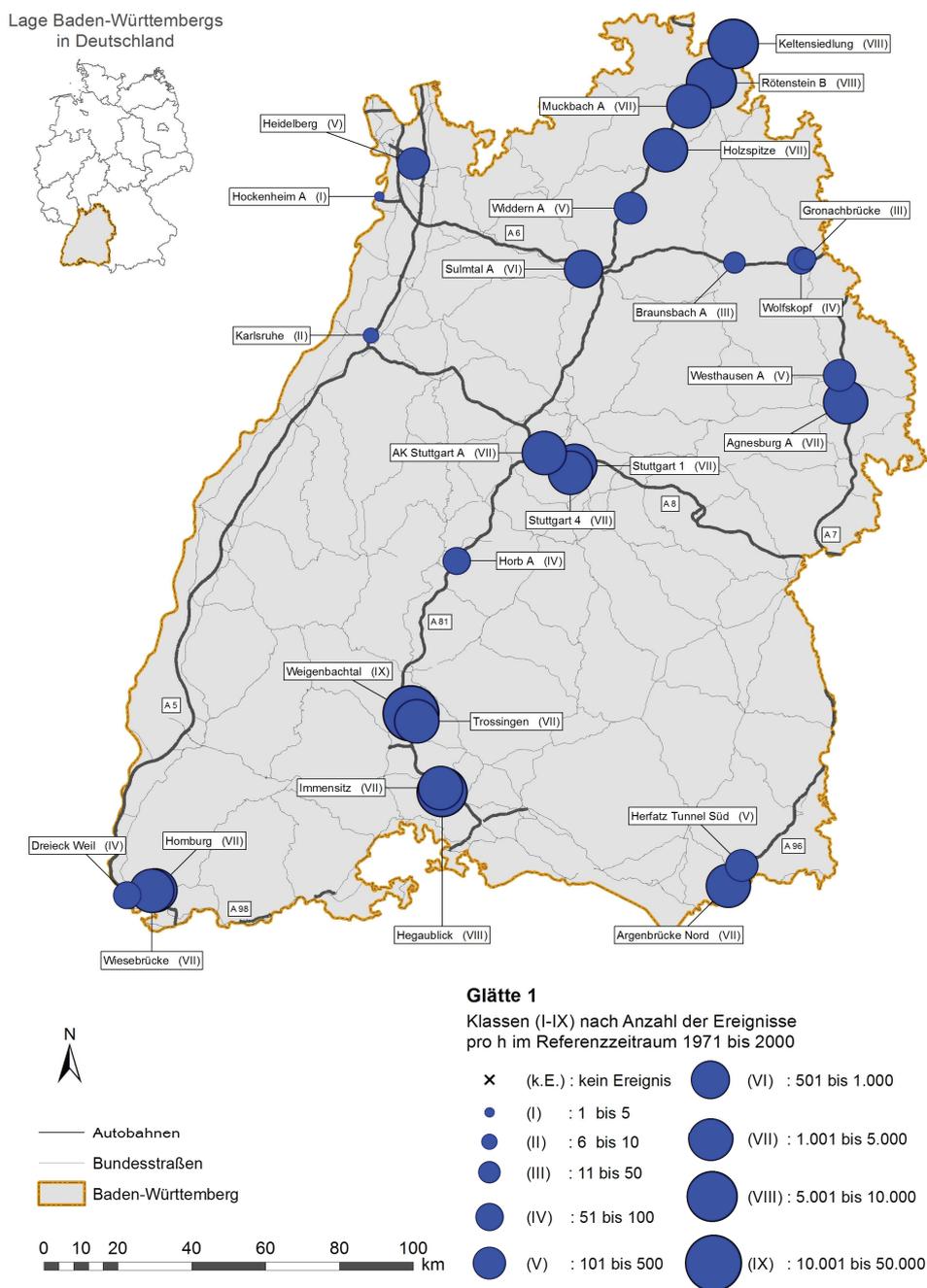
Zudem generiert das datenbasierte Modell für jede der 27 GMA-Stationen und für jeden Gefahrentyp eine Abbildung, in welcher die Gefahrenereignisse für die einzelnen Jahre des betrachteten Zeitraums aufgezeigt werden. Anhand dieser Abbildungen können Muster des Änderungssignals und der Verlauf einer Gefahr während der jeweiligen Jahre 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050 nachvollzogen werden.

Für den planerischen Bereich spielt die Visualisierung von Gefahrenveränderungen in Karten eine wesentliche Rolle. Hierdurch können Entwicklungstrends einer Gefahr raumzeitlich dargestellt werden (vgl. BBSR, 2009).

Gefahrenentwicklung der  
Glätte 1

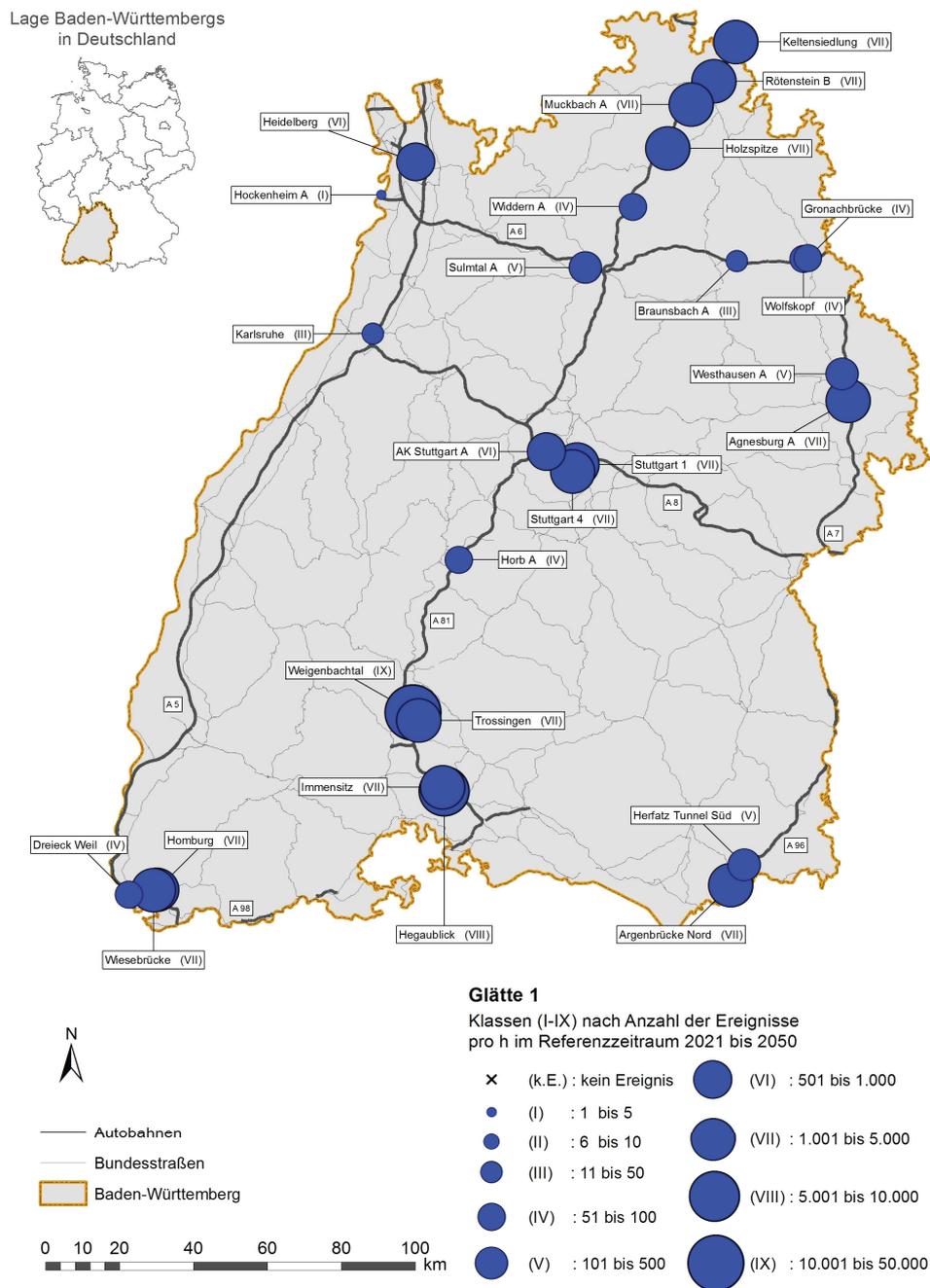
Die Karten in Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 illustrieren die Glättegefahr 1 ‚gefrierender Regen auf kalter Fahrbahn‘ für alle GMA-Stationen auf den Autobahnen in Baden-Württemberg. Das Gefahrenänderungssignal für diesen Glättetyp verhält sich an den einzelnen GMA-Stationen divergent: Während einige südliche GMA-Stationen auf dem Autobahntrasekt A81 eine tendenzielle Abnahme der Gefahrenereignisse verzeichnen, deutet sich an den GMA-Stationen der A5, wie Karlsruhe und Dreieck Weil, sowie der A656 Heidelberg und an den nördlichen GMA-Stationen der A81 (vgl. Widdern, Keltensiedlung und Rötenstein B) eine tendenzielle Zunahme der gefrierenden Glätte an.

Abbildung 6.3 und 6.4 stellen das Muster des Änderungssignals und den Verlauf der Glättegefahr 1 der Jahre 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050 für die GMA-Station Heidelberg auf der A656 dar, die eine Zunahme der Glätteereignisse 1 in der nahen Zukunft in den Modelldaten aufweist. Bei einem Vergleich der beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass die Glättegefahr 1 an der GMA-Station Heidelberg zunimmt. Nicht nur einzelne innerhalb einer Stunde auftretende Gefahrenereignisse nehmen im Zeitraum der nahen Zukunft tendenziell zu, sondern auch die Gesamtzahl der Ereignisse an einem Tag. Dementsprechend vergrößern sich die blau gefüllten Rauten: Die ‚mittlere‘ Größe der Rauten stellt sieben bis zwölf Glätteereignisse an einem Tag dar. Die kleinen Rauten repräsentieren ein bis drei Glätteereignisse an einem Tag. Die Zahl in den runden Klammern definiert die Summe aus allen Gefahrenereignissen eines Jahres. Bezüglich der modellierten Häufigkeit des Auftretens der Gefahrenereignisse der Glätte 1 an der GMA-Station Heidelberg über den Jahresverlauf tritt keine Veränderung zwischen den beiden 30-jährigen Zeiträumen auf.



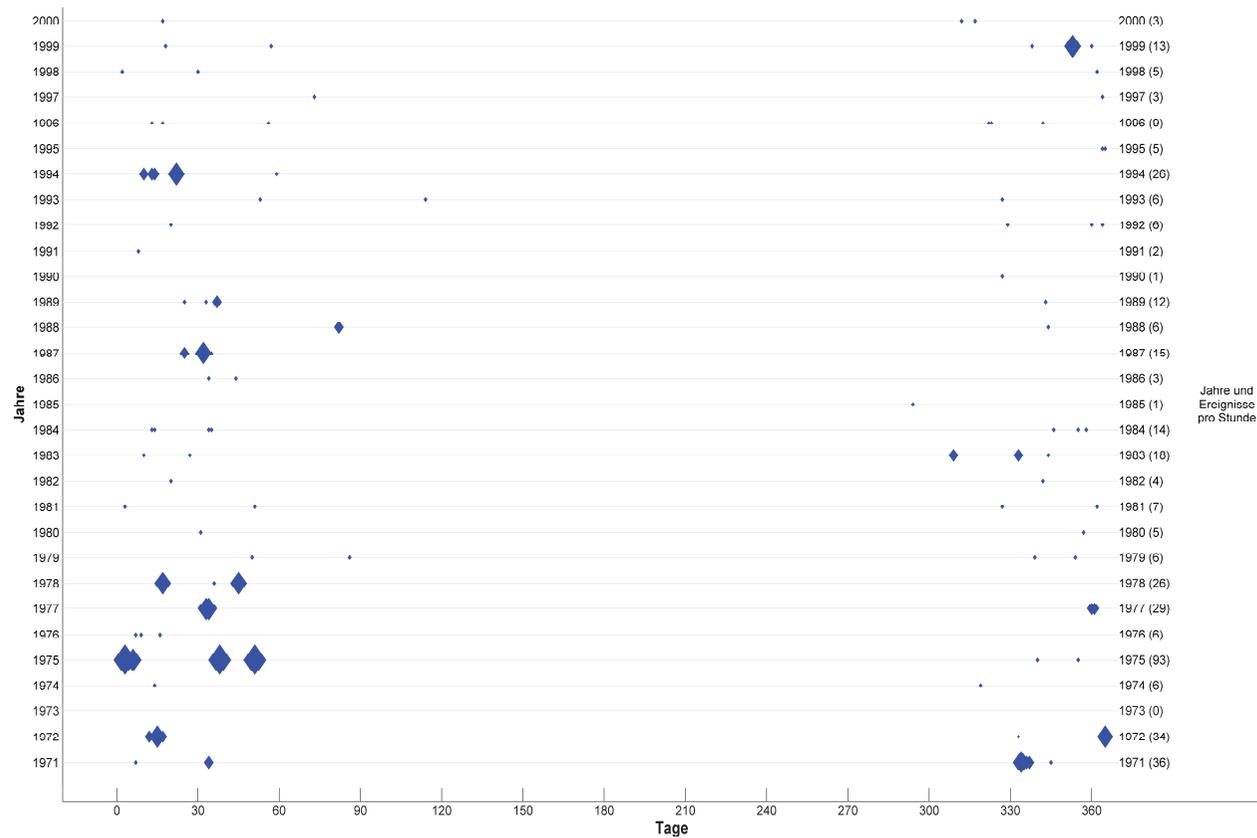
**Abbildung 6.1: Glättegefahr 1 ‚gefrierender Regen auf kalter Straße‘ im Referenzzeitraum**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a); IMK (2014c) und ESRI (2005)



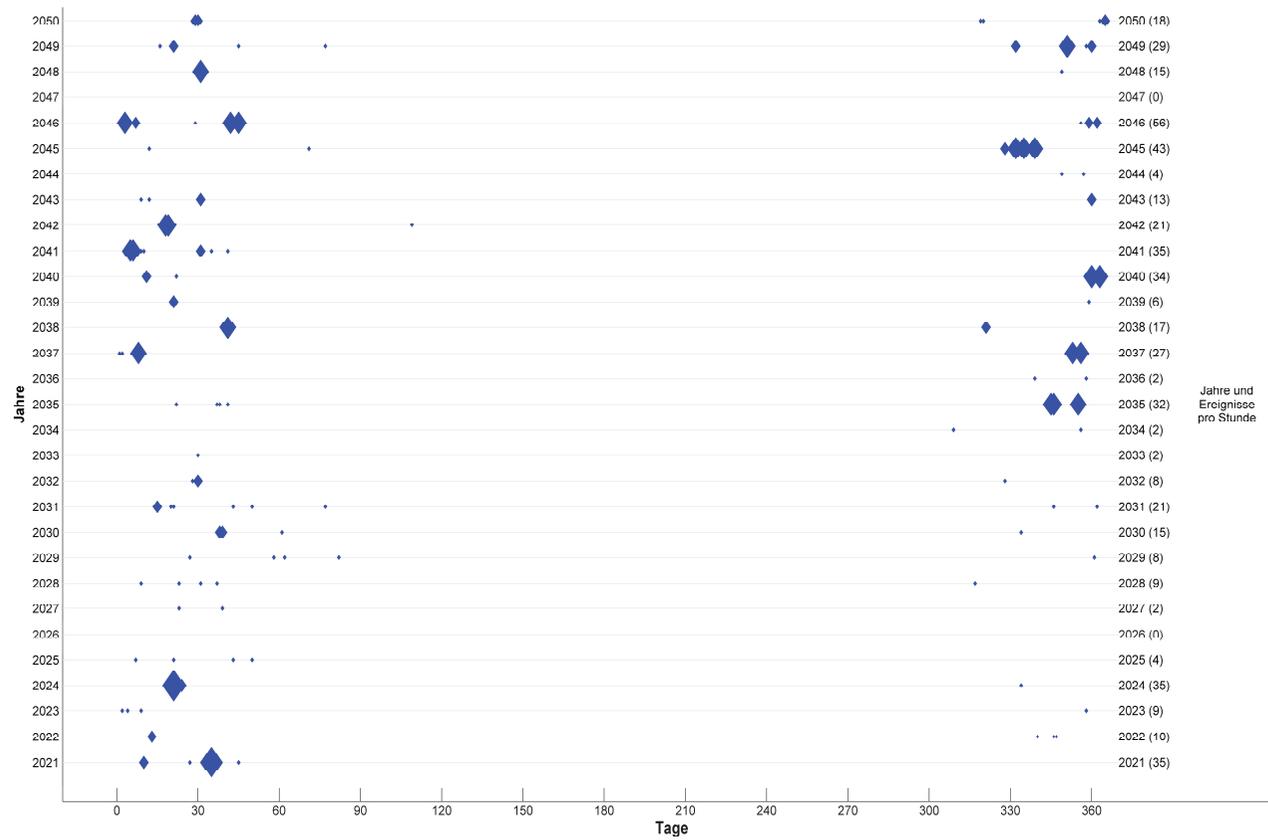
**Abbildung 6.2: Glättegefahr 1 ‚gefrierender Regen auf kalter Straße‘ in der nahen Zukunft**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a); IMK (2014c) und ESRI (2005)



**Abbildung 6.3: Glättefahr 1 ‚gefrierender Regen auf kalter Straße‘ an der GMA-Station Heidelberg (Autobahn A656) im Referenzzeitraum**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a) und IMK (2014c)



**Abbildung 6.4: Glättegefahr 1 ‚gefrierender Regen auf kalter Straße‘ an der GMA-Station Heidelberg (Autobahn A656) im Referenzzeitraum**

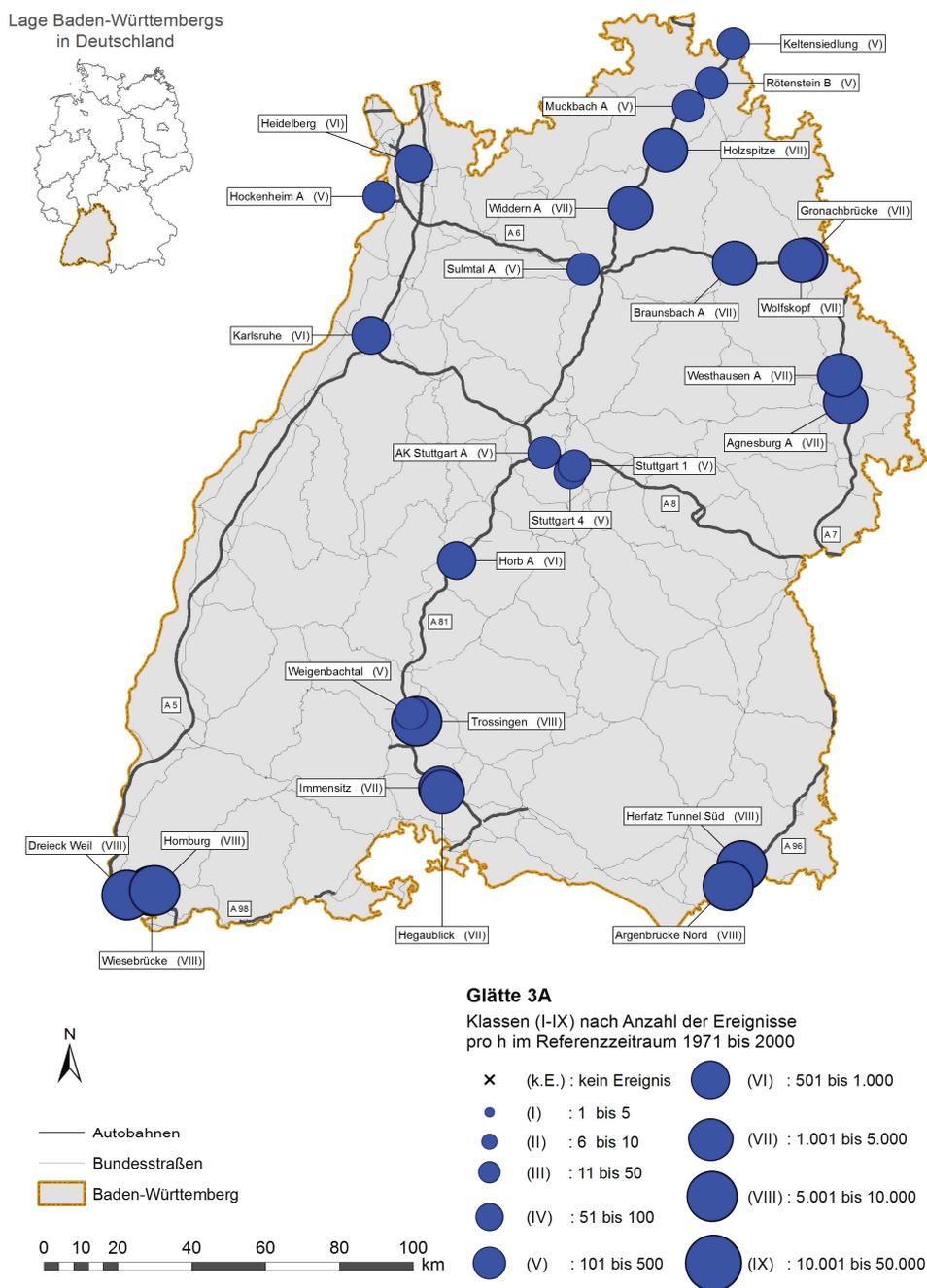
Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014b) und IMK (2014c)

Die Karten der Abbildung 6.5 und 6.6 zeigen die Glättegefahr 3A ‚Regen auf warmer Fahrbahn‘ für die GMA-Stationen in Baden-Württemberg. Die Tendenz in der Zunahme der Ereignisse an allen Stationen ist beim Vergleich der Abbildung 6.5 und 6.6 durch die Zunahme des Durchmessers der Kreiselemente in Abbildung 6.6 zu erkennen. Bestimmte GMA-Stationen weisen einzelne Gefahrenereignisse auf, die Grafikelemente bleiben jedoch gleich (vgl. Tabelle 6.1, S. 103 ff.).

Begründet ist dies durch die Spannweite der Klassengrenze. Die Einteilung der Klassengrenzen ist für alle Gefahrentypen einheitlich definiert. Abbildung 6.7 und 6.8 visualisieren das Muster des Änderungssignals und den Verlauf der Glättegefahr 3A an der GMA-Station AK Stuttgart A am Autobahnkreuz der A8. Die Größe der blauen Rauten nimmt in Abbildung 6.8 deutlich zu; dies entspricht einem tendenziellen Anstiegs der Glätteereignisse der Glätte 3A an einem Tag im Zeitraum der nahen Zukunft. Der Jahresverlauf der modellierten Glätteereignisse bleibt unverändert im Vergleich der beiden 30-jährigen Zeiträume.

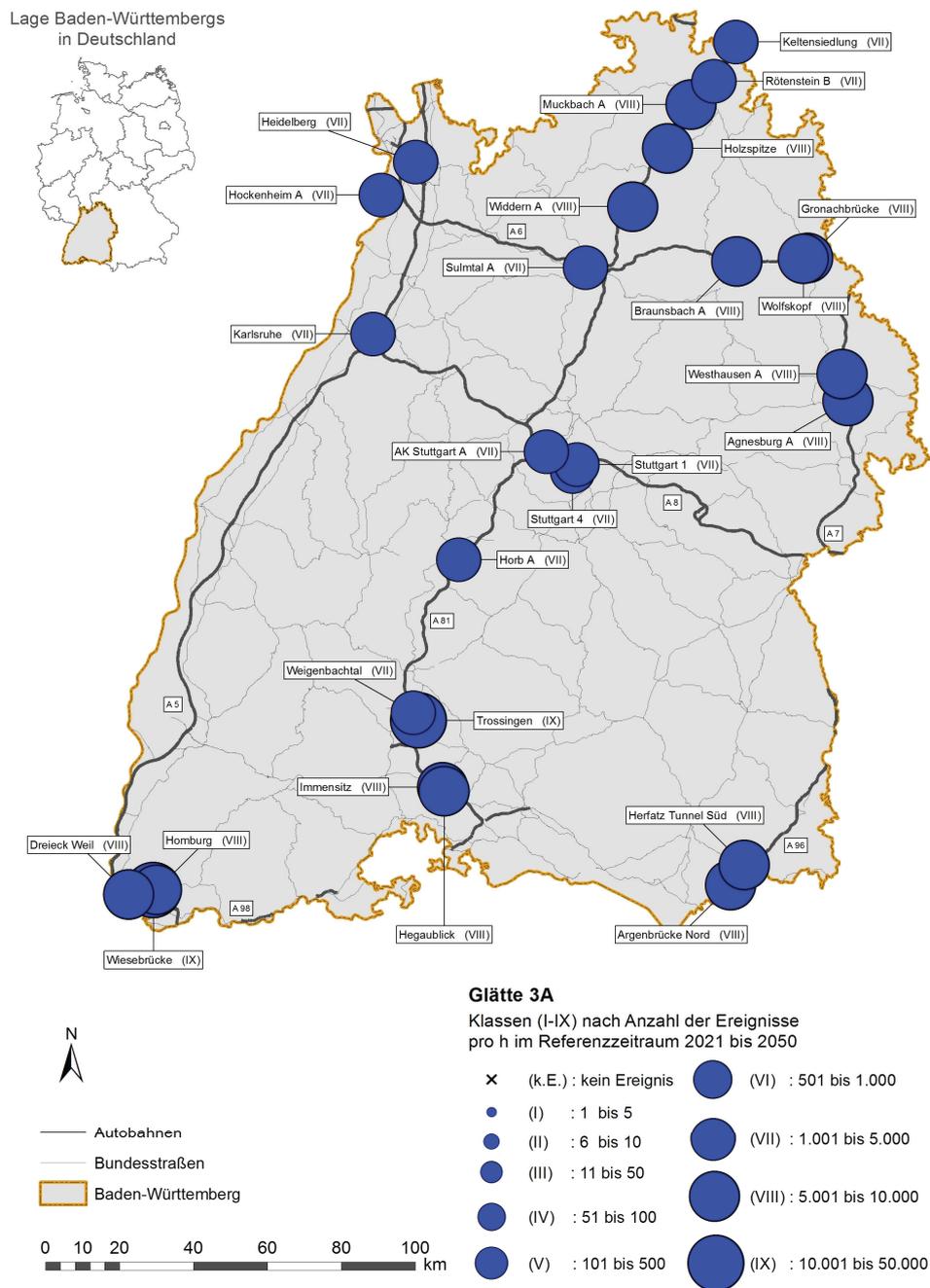
Die deutliche Zunahme der Ereignisse nach 2033 (vgl. Abbildung 6.8) ist unter dem Aspekt der Festlegung von ‚scharfen Schwellenwerten‘ zu diskutieren. Geringere Abweichungen um diese Schwellenwerte, wie z. B. um die 0 °C-Grenze der Belags- und Lufttemperatur, können zu merklichen Veränderungen der Ergebnisse führen. Eine Plausibilitätsbetrachtung über ein engeres Vertrauensintervall verschiedener Größen nach Tabelle 9.9 (S. 206 ff.) zeigt eine Verringerung bis zum Faktor 2,5. Insbesondere im Bereich um die 0 °C zeigt sich die Belastbarkeit der modellierten Belagtemperatur. Eine exaktere Bestimmung kann lediglich auf Basis einer verbesserten Datengrundlage, insbesondere bei den Klimavariablen, erfolgen. Bei der Modellierung von Gefahrenereignissen, in die eine Belagtemperatur um 0 °C eingeht, macht sich eine Abweichung von Modelldaten zu tatsächlichen Werten daher deutlich bemerkbar. Dies zeigt sich auch an den betrachteten GMA-Stationen in der Darstellung der Parametersensitivität (vgl. Abbildung 7.6 bis 7.11, S. 168 ff.). Die Verteilung

der Gefahrenereignisse der drei verschiedenen Eingangsgrößen der Belagstemperatur ist schief. Erkennbar ist jedoch, wenn die Belagstemperatur als Eingangsgröße im Wert zunimmt, nehmen auch die Gefahrenereignisse zu.



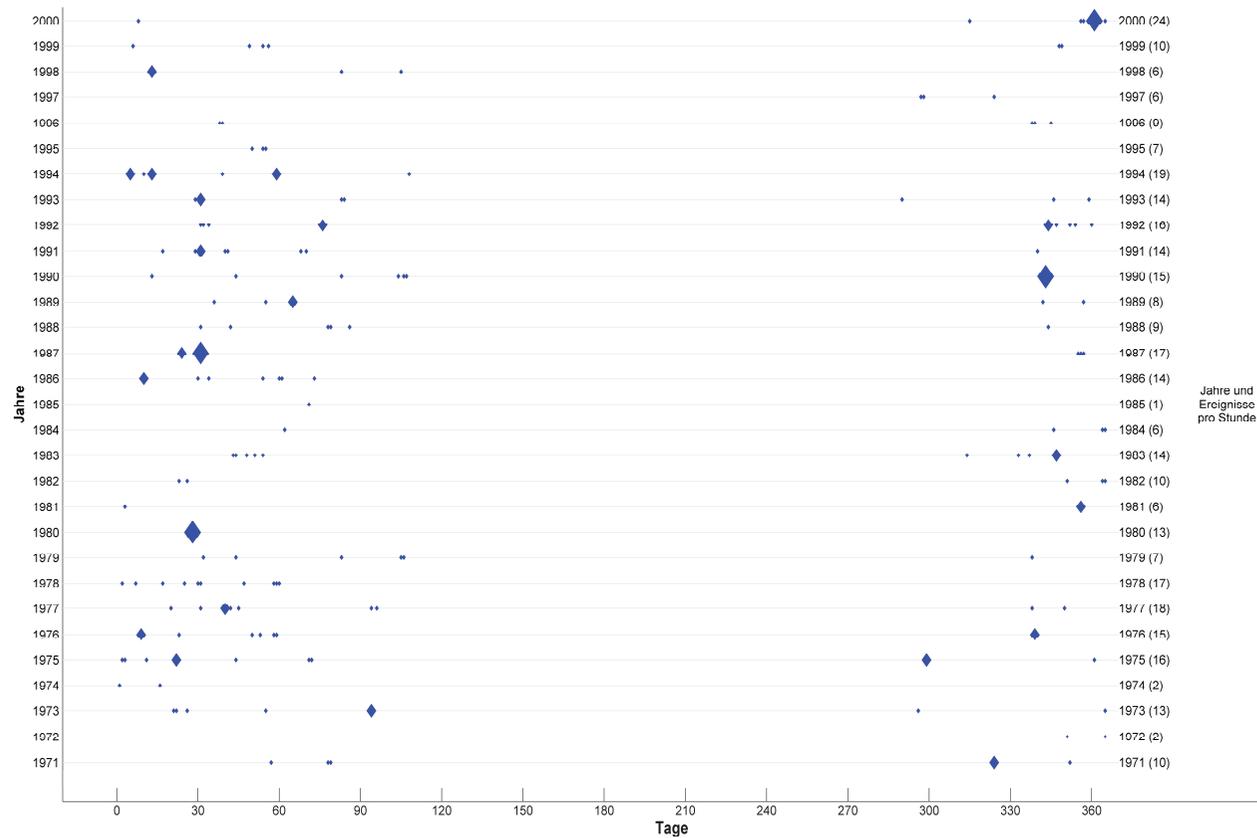
**Abbildung 6.5: Glättegefahr 3A ‚Regen auf warmer Fahrbahn‘ im Referenzzeitraum**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a); IMK (2014c) und ESRI (2005)



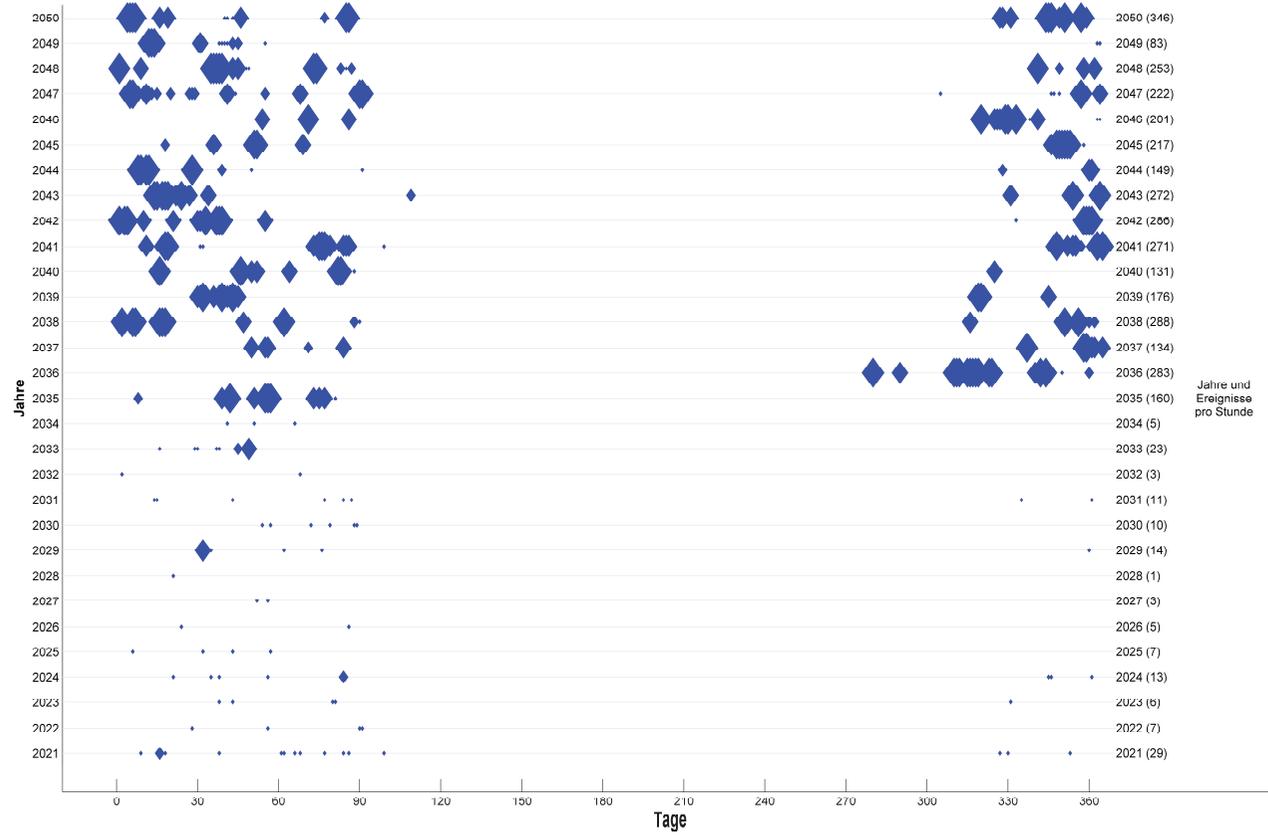
**Abbildung 6.6: Glättegefahr 3A ‚Regen auf warmer Fahrbahn‘ in der nahen Zukunft**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014b); IMK (2014c) und ESRI (2005)



**Abbildung 6.7: Glättegefahr 3A ,Regen auf warmer Fahrbahn‘ an der GMA-Station AK Stuttgart A (Autobahn A8) im Referenzzeitraum**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a) und IMK (2014c)



**Abbildung 6.8: Glättegefahr 3A ‚Regen auf warmer Fahrbahn‘ an der GMA-Station AK Stuttgart A (Autobahn A8) in der nahen Zukunft**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014b) und IMK (2014c)

Der Vergleich der Abbildung 6.9 und 6.10 zeigt keinen generellen Trend der Veränderung der Glättegefahr 4B ‚Niederschlag als Schnee zusammen mit Raureif‘ zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft.

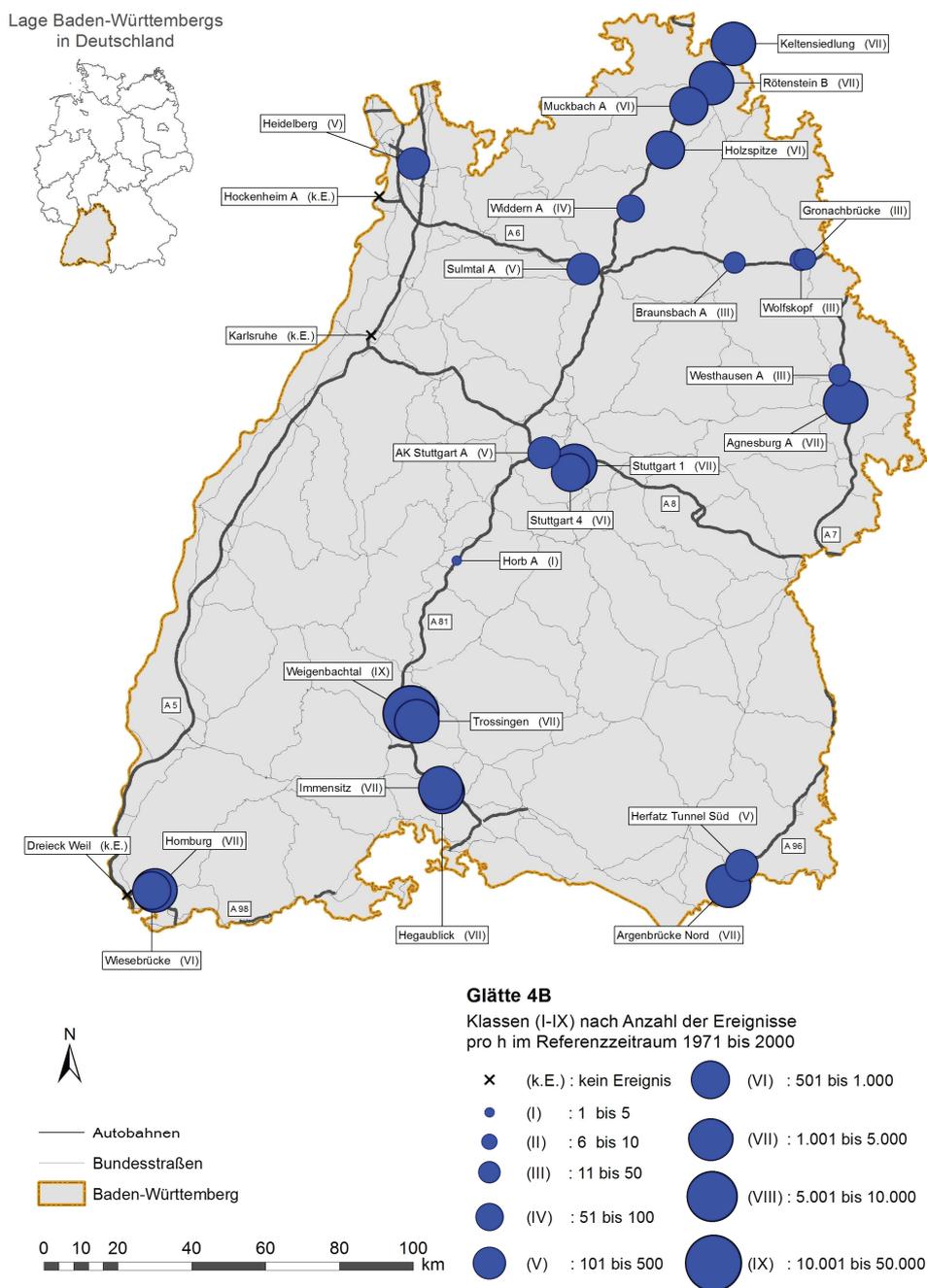
An einigen GMA-Stationen, wie Horb A (A81), Hockenheim A (A61), Braunsbach A, Wolfskopf und Gronachbrücke (alle A6), ist ein deutlicher Trend der Zunahme der Glätteereignisse der Glätte 4B zu konstatieren. Für die Streckenabschnitte zwischen diesen GMA-Stationen auf den Autobahnen A7 und A6 kann eine tendenzielle Zunahme der Glättegefahr 4B abgeleitet werden. Diese Autobahnen befinden sich im regionalen Bereich der höheren Lagen (über 1 000 Meter über NN, vgl. Abbildung 5.2, S. 70) in Baden-Württemberg und weisen mehr Niederschlag in Form von Schnee sowie niedrigere Lufttemperaturen auf (Wagner, 2013b).

Die GMA-Stationen in den südlichen Transekten der A7 zeigen einen abnehmenden Trend dieser Glättegefahr. Die GMA-Stationen Karlsruhe und Dreieck Weil auf der A5 verzeichnen in den beiden 30-jährigen Zeiträumen keine Ereignisse dieses Glättetyps.

Der Vergleich zwischen Abbildung 6.11 und 6.12 stellt auf detaillierte Weise eine starke Zunahme der Glättegefahr 4B für die GMA-Station Horb A auf der Autobahn A 81 dar. Im Referenzzeitraum simuliert das Modell ein Ereignis der Glätte 4B im Winter 2000. Die modellierten Gefahrenereignisse im zukünftigen Zeitraum nehmen in der zweiten Hälfte von 2021 bis 2050 zu.

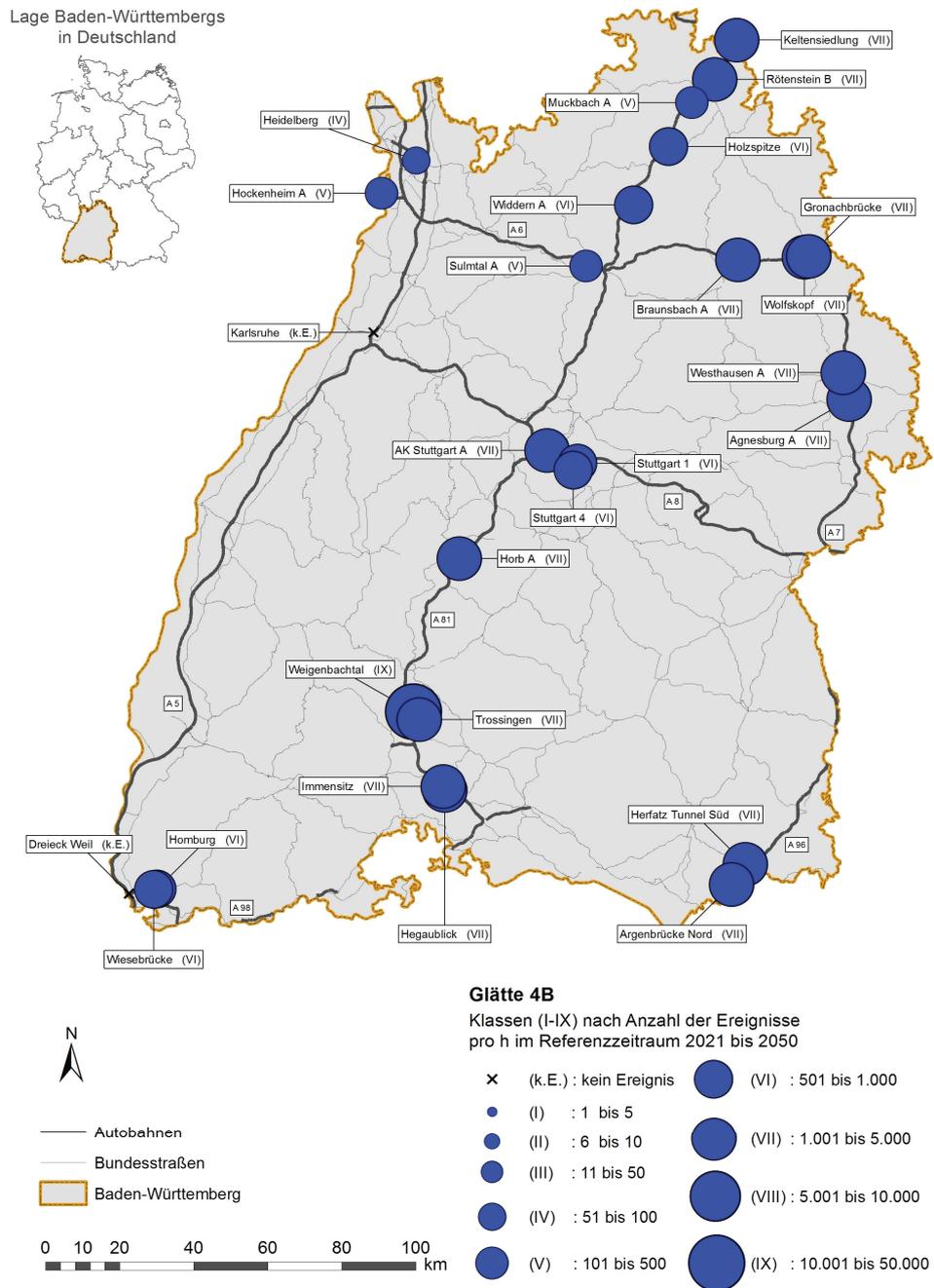
Die starke Zunahme der Ereignisse in der zweiten Hälfte des zukünftigen Zeitraums (vgl. Abbildung 6.12) ist wiederum unter dem Aspekt der Festlegung von ‚scharfen Schwellenwerten‘ zu diskutieren. Geringere Abweichungen um diese Schwellenwerte, wie z. B. um die 0 °C-Grenze der Belags- und Lufttemperatur, können zu merklichen Veränderungen der Ergebnisse führen. Insbesondere im Bereich um die 0 °C zeigt sich die Belastbarkeit der modellierten Belagstemperatur. Bei der Modellierung von Gefahrenereignissen, in die eine Belagstemperatur um 0 °C eingeht, macht

sich eine Abweichung von Modelldaten zu tatsächlichen Werten deutlich bemerkbar (vgl. hierzu Tabelle 9.9, S. 206 ff.). Dies zeigt auch die Verteilung der Gefahrenereignisse der Glättegefahr 4B mit den drei unterschiedlichen Belagstemperaturen als Eingangsmerkmal in der Analyse der Parametersensitivität in Kapitel 7.2 (vgl. Abbildung 7.6 bis 7.11, S. 168 ff.).



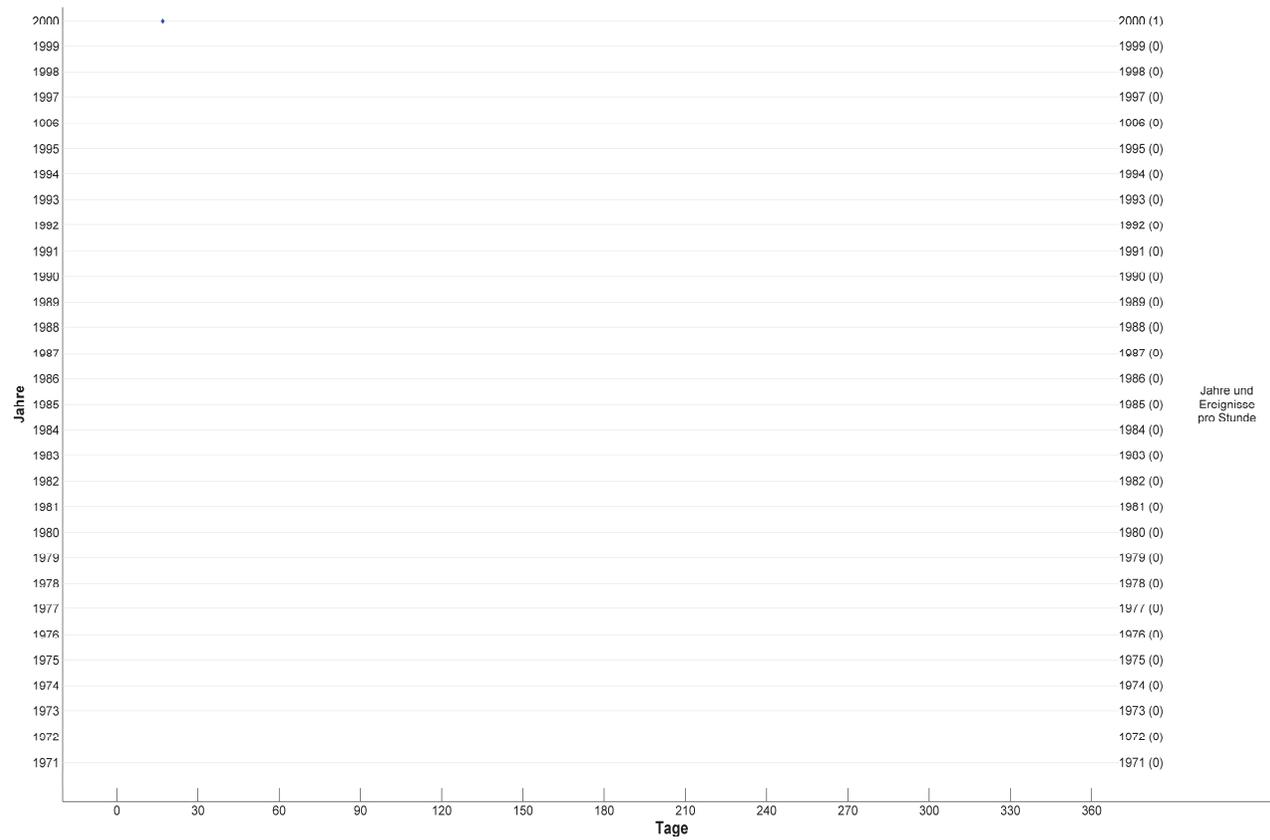
**Abbildung 6.9: Glättegefahr 4B ,Niederschlag als Schnee zusammen mit Raureif' im Referenzzeitraum**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a); IMK (2014c) und ESRI (2005)



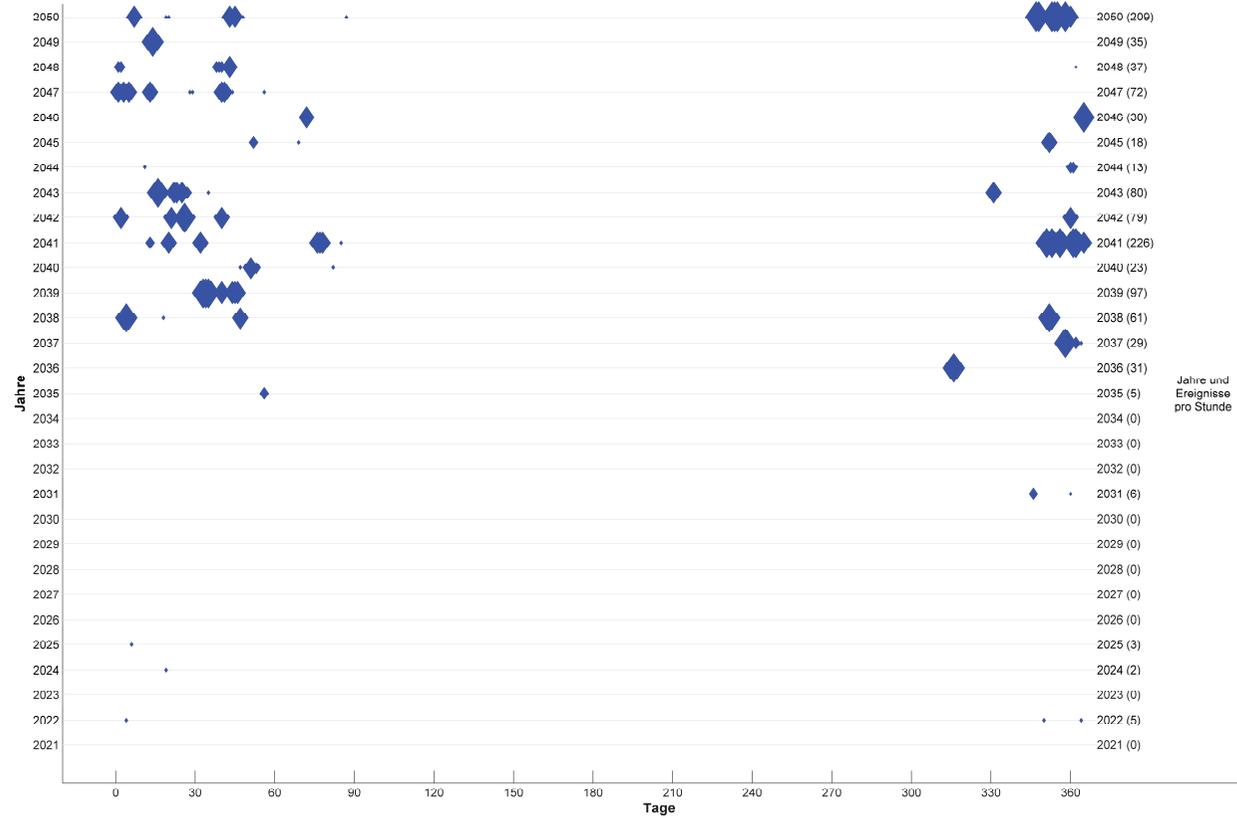
**Abbildung 6.10: Glättefahr 4B ,Niederschlag als Schnee zusammen mit Raureif“ in der nahen Zukunft**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014b); IMK(2014c) und ESRI (2005)



**Abbildung 6.11: Glättefahr 4B ‚Niederschlag als Schnee zusammen mit Raureif‘ an der GMA-Station Horb A (Autobahn A81) im Referenzzeitraum**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a) und IMK (2014c)



**Abbildung 6.12: Glättegefahr 4B ‚Niederschlag als Schnee zusammen mit Raureif‘ an der GMA-Station Horb A (Autobahn A81) in der nahen Zukunft**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014b) und IMK (2014c)

In Bezug auf den Gefahrstyp ‚heftigen Starkregen‘ visualisiert die Abbildung 6.13 den ‚heftigen Starkniederschlag‘ im Referenzzeitraum. Der Gefahrstyp heftiger Starkregen ist insbesondere dadurch geprägt, dass die Veränderung der heftigen Starkniederschlagsereignisse zwischen dem Referenzzeitraum und dem Zeitraum der nahen Zukunft keinen für alle GMA-Stationen Baden-Württembergs einheitlichen Trend aufweist.

Gefahrenentwicklung  
des heftigen Starknieder-  
schlags

An den GMA-Stationen Karlsruhe (A5), Hegaublick (A81), Sulmtal (A6), den GMA-Stationen der A98 Homburg und Wiesebrücke, allen GMA-Stationen der A7, den GMA-Stationen im Süden der A81 Holzspitze, Muchback A und Rönenstein B sowie Horb A ist eine starke Zunahme der ‚heftigen Starkniederschläge‘ in den Modelldaten zu erkennen und auch zukünftig zu erwarten.

Die GMA-Station Wolfskopf im östlichen Bereich der A6 weist in den Simulationen eine Abnahme des Gefahrenereignisses ‚heftiger Starkniederschlag‘ auf. Die restlichen GMA-Stationen in Baden-Württemberg bleiben in den Simulationen in der Anzahl der Gefahrenereignisse im Referenzzeitraum und dem Zeitraum der nahen Zukunft gleich.

Die Folgen heftiger Starkniederschläge in Form von Überschwemmungen auf Straßen oder potenzieller Aquaplaning-Gefahr sind insbesondere an den Stationen zu erwarten, welche durch eine starke Zunahme der ‚heftigen Starkniederschläge‘ geprägt sind. Aussagen zu einer räumlichen Differenzierung sind u. a. aufgrund der räumlichen Unterschiede der ‚heftigen Starkniederschläge‘ an den einzelnen GMA-Stationen nicht für alle Autobahnabschnitte in Baden-Württemberg abzuleiten. Bei einer tendenziellen Zunahme der Starkniederschlagsereignisse an allen GMA-Stationen in den Simulationen wäre eine solche räumliche Ableitung datentechnisch valider begründbar.

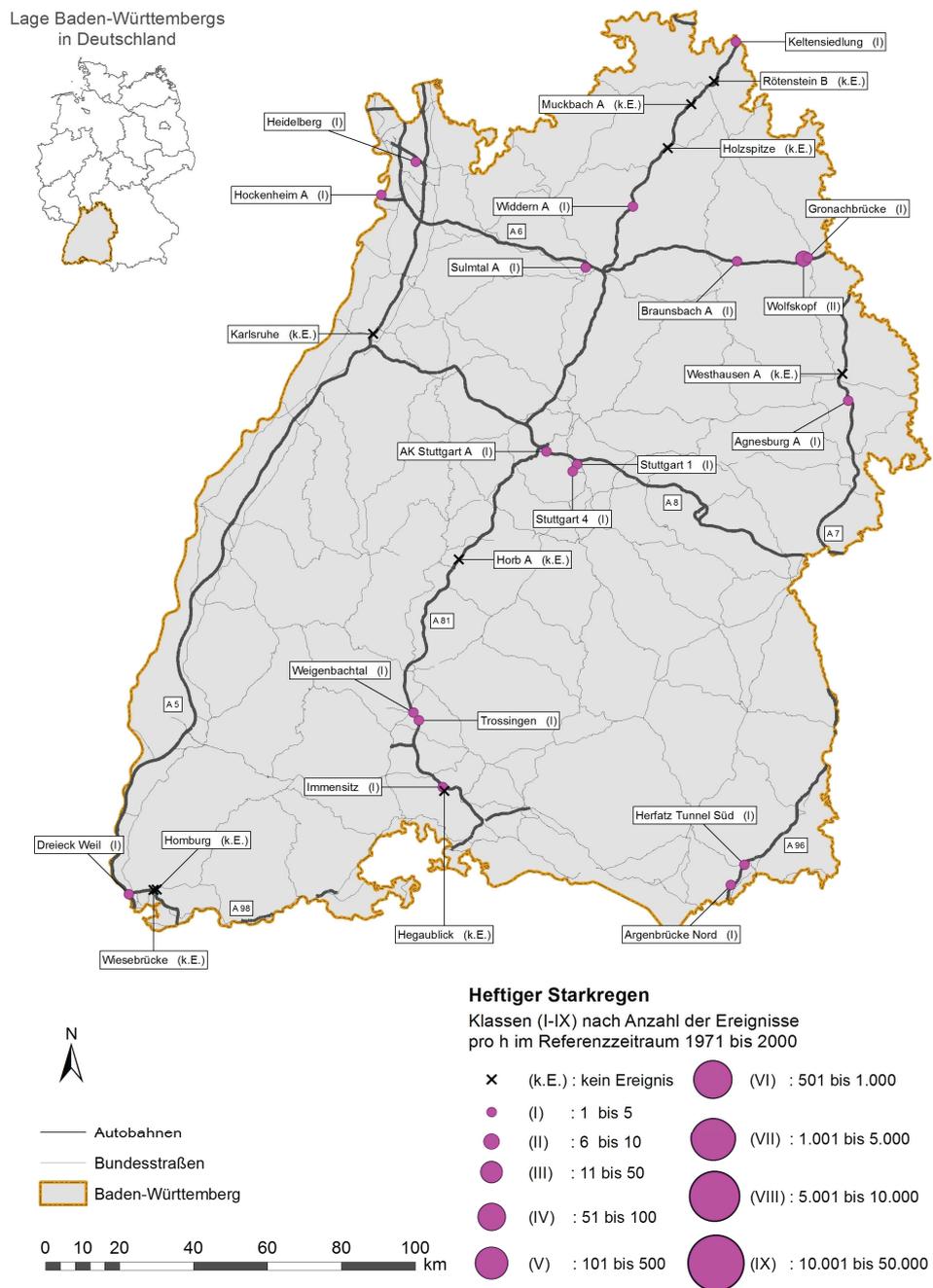


Abbildung 6.13: ‚Heftiger Starkregen‘ im Referenzzeitraum

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen:  
 DWD (2014); IMK (2014a); IMK (2014c) und ESRI (2005)

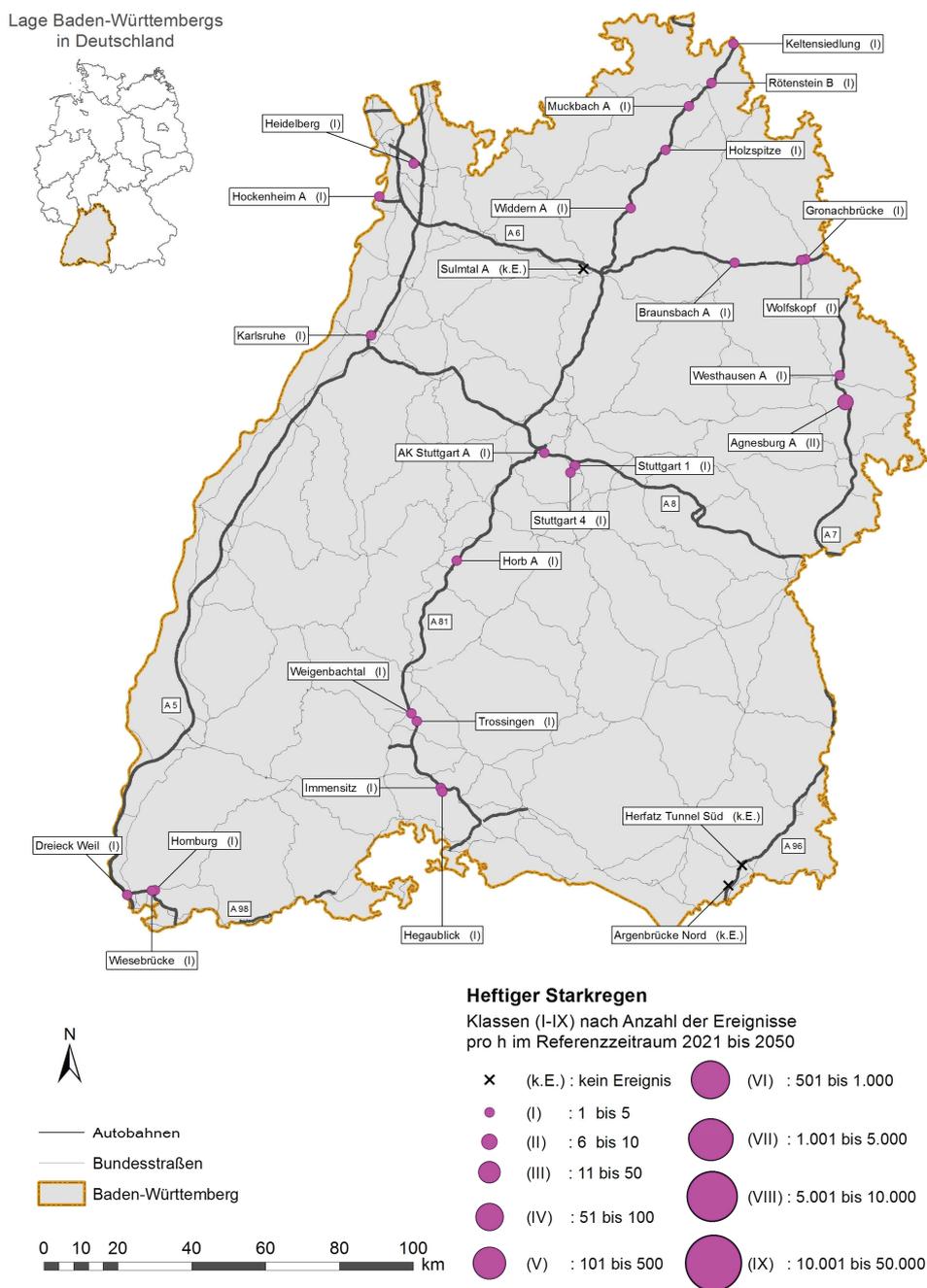


Abbildung 6.14: ‚Heftiger Starkregen‘ in der nahen Zukunft

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014b); IMK (2014c) und ESRI (2005)

Potenzielle Schäden am Belag und an Stahl- und Betonbrücken entstehen – wie in Abschnitt 4.1 (S. 44 ff.) beschrieben – als Folge extremer Hitze in Form von Lufttemperaturen über 32 °C und damit konnektierten hohen Belagtemperaturen über 46 °C (Savonis et al., 2008, S. 4 ff; Transportation Research Board, 2008, S. 117). Detailliert untersucht wird im Folgenden die Kombination aus beiden in der Literatur einzeln genannten Schwellenwerten. Die Kombination aus einer Lufttemperatur über 30 °C und einer Belagtemperatur über 46 °C wird hier bezeichnet als Hitzegefahr III-A. Aufgrund der unscharfen Abgrenzung in der genannten Literatur bezüglich der Schwellenwerte wird die 30 °C-Grenze der Lufttemperatur betrachtet (vgl. Unterschied zwischen Hitzegefahr III-A und B). Auftretende Hitzeereignisse resultieren in extremem Hitzestress für die Straßeninfrastruktur. Mit der prognostizierten Zunahme der Lufttemperatur durch den Klimawandel in Baden-Württemberg ist eine Zunahme des Hitzestresses für die Straßeninfrastruktur an einigen GMA-Stationen zu erwarten.

Bei der Betrachtung der Abbildung 6.15 sowie der Abbildung 6.16 fällt auf, dass die GMA-Stationen um das Autobahnkreuz Stuttgart (A8) wie z. B. AK Stuttgart A, Stuttgart 4 und Stuttgart eine starke Zunahme der Hitzegefahr III-A in der Simulation verzeichnen.

Die GMA-Stationen im nordwestlichen Bereich Baden-Württembergs und im östlichen Bereich der A7 weisen in den Modellsimulationen keine Gefahr von Hitzeereignissen des Typs III-A auf. Insbesondere der Großraum Stuttgart wird durch seine kesselartige Lage zukünftig durch eine Zunahme der Lufttemperatur geprägt sein (vgl. Verband Region Stuttgart, 2008). Die Szenarien der ‚zukünftigen Klimaentwicklung in Baden-Württemberg‘ (2013, S. 132) weisen hingegen für den östlichen Raum Baden-Württembergs auf eine geringe Erwärmung der Lufttemperatur in der nahen Zukunft hin. Diese Tendenz liefert eine mögliche Erklärung für das Ausbleiben der Hitzeereignisse an den GMA-Stationen entlang der A7.

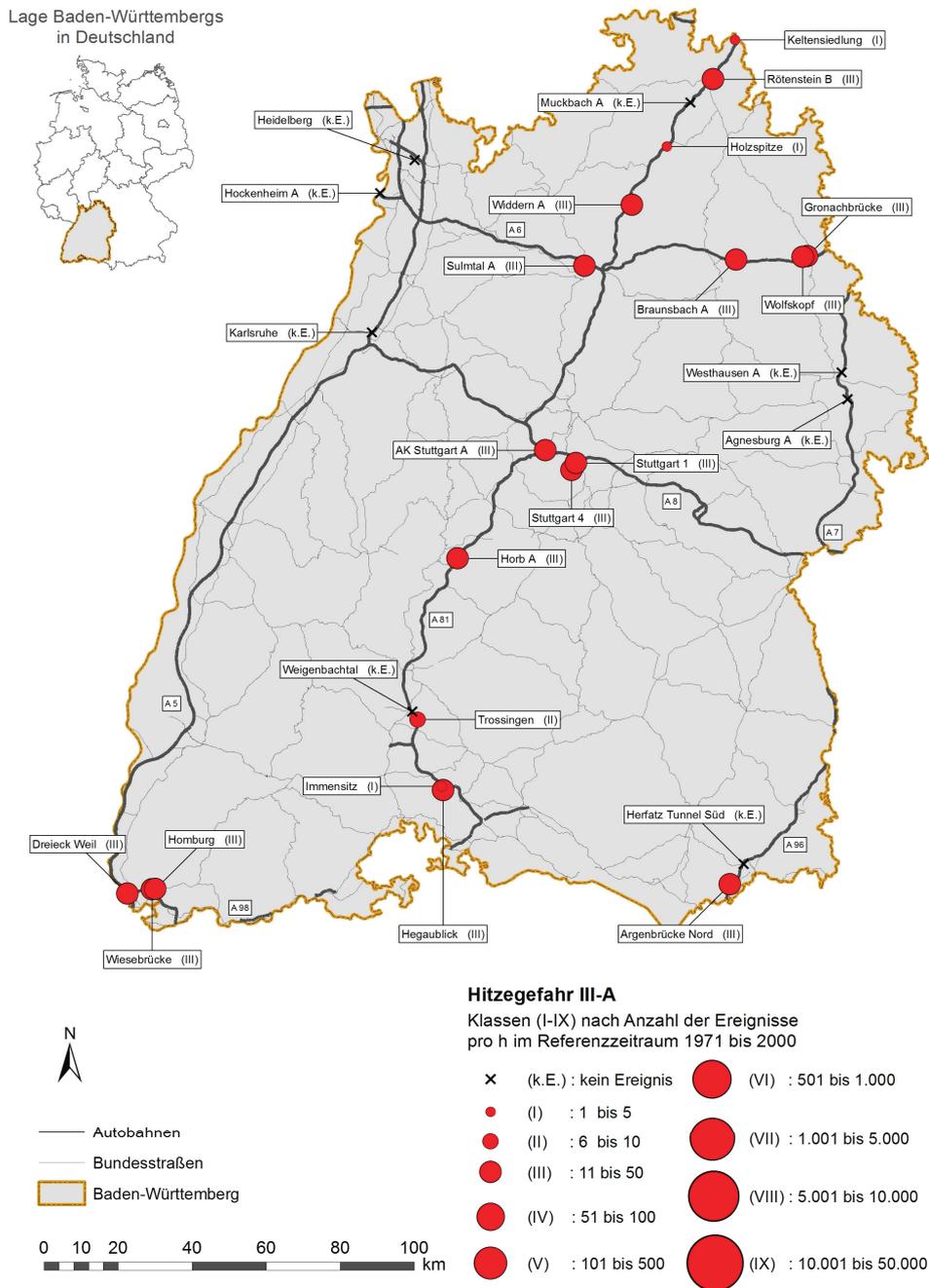


Abbildung 6.15: ‚Hitzegefahr III-A‘ im Referenzzeitraum

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a); IMK (2014c) und ESRI (2005)

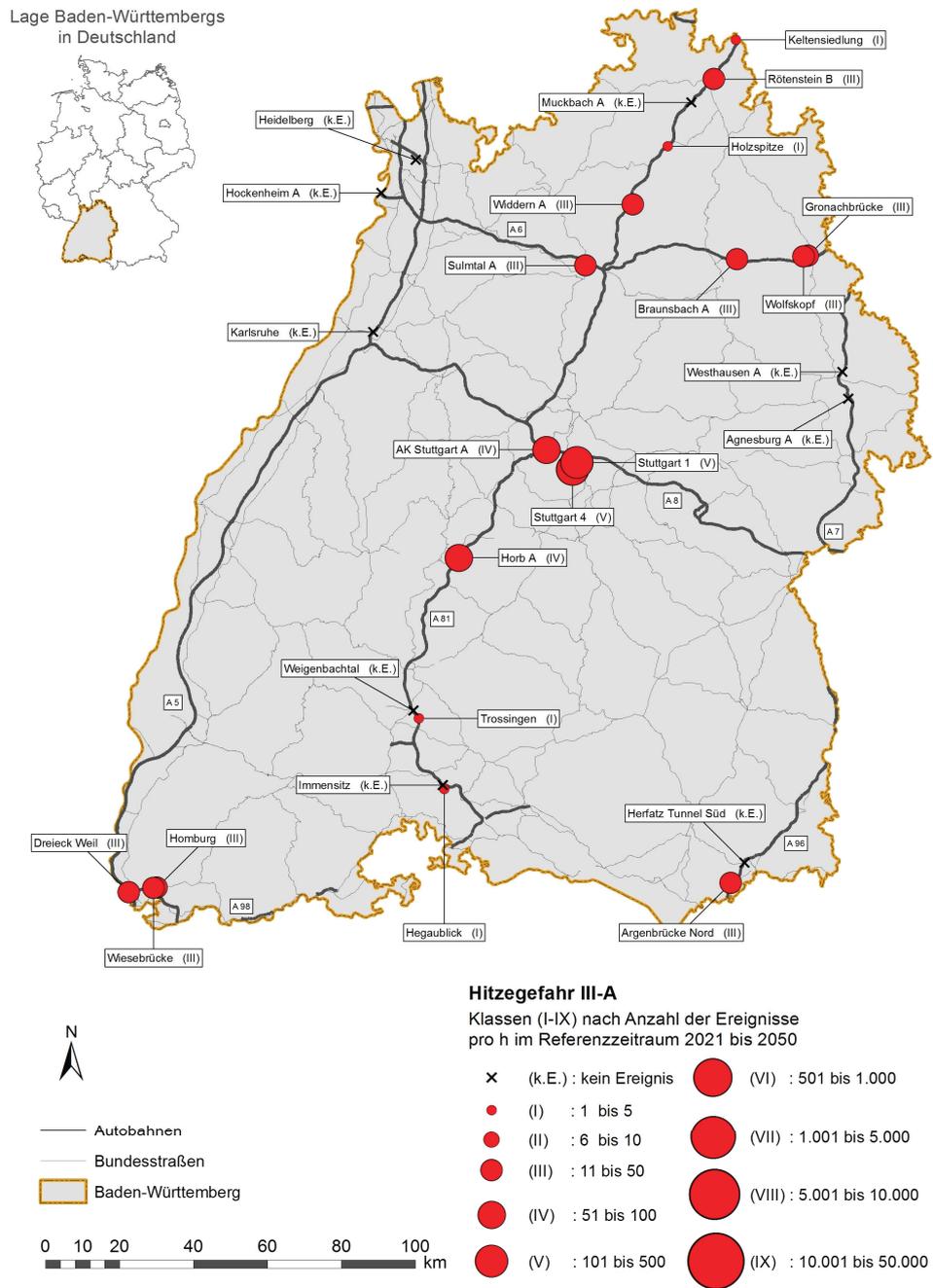


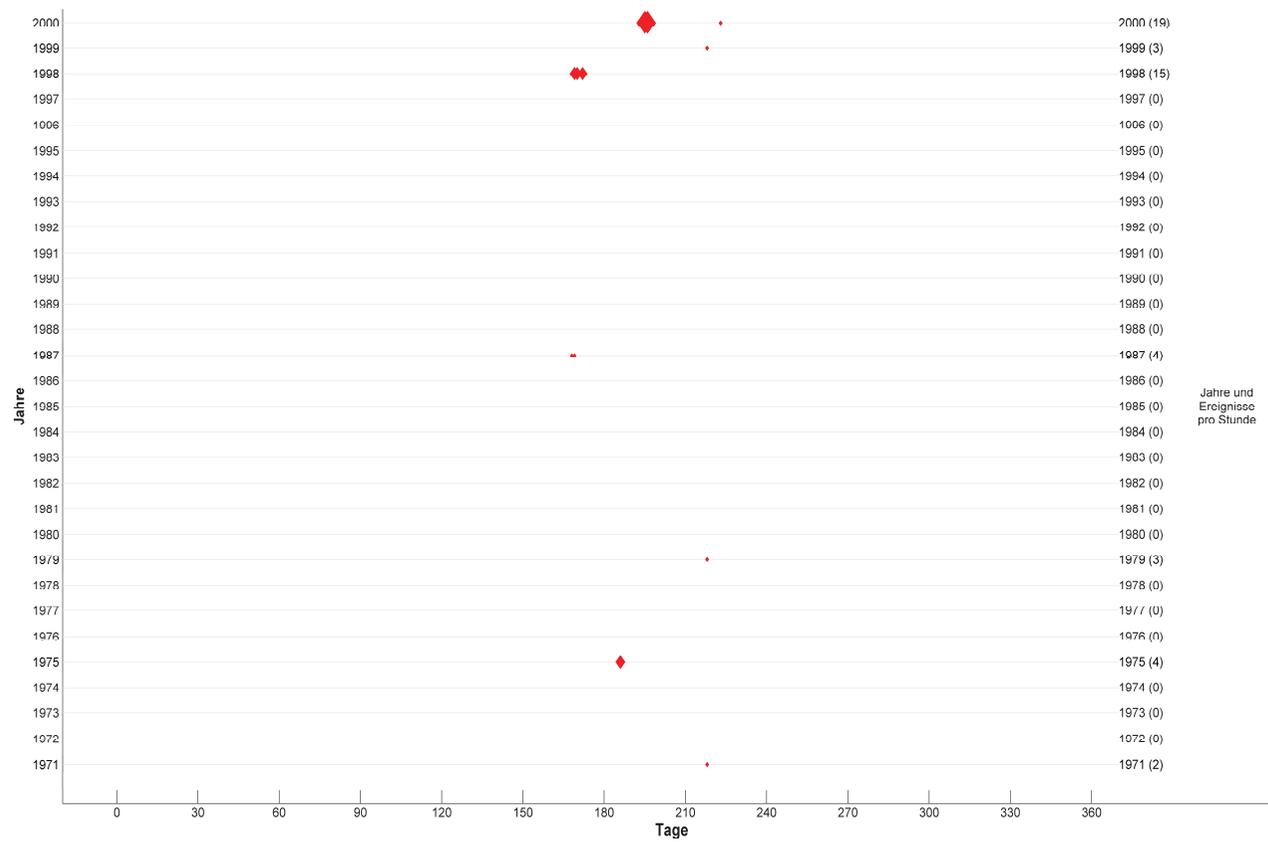
Abbildung 6.16: ‚Hitzegefahr III-A‘ in der nahen Zukunft

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen:  
 DWD (2014); IMK (2014b); IMK (2014c) und ESRI (2005)

Auffallend ist, dass die in der Oberrheinischen Tiefebene gelegenen GMA-Stationen in keinem der beiden Zeiträume ein Gefahrenereignis der ‚Hitzegefahr III-A‘ aufweisen. In der Modellsimulation tritt die Kombination  $T_{\text{Air}}(t) > 30 \wedge T_{\text{Street}}(t) > 46$  nicht zu einem Zeitpunkt auf. Dies ist, wenn die geografische Lage der GMA-Stationen und die nach den Klimaprojektionen erwartete Zunahme der heißen Tage in dieser Region betrachtet werden, demzufolge ein Aspekt der Datengrundlage. Die Ereignisvalidität der Modellvalidierung in Kapitel 7.1 belegt, dass im Fall der Hitzegefahr III-A eine realistischere Einschätzung der Gefahrenereignisse zu erzielen ist, wenn die an der spezifischen GMA-Station gemessene Lufttemperatur statt der aus der Klimasimulation als Eingangsmerkmal genutzt wird (vgl. Tabelle 7.1, S. 155 ff.). Die modellierten Gefahrenereignisse der Hitze III-A liegen deutlich unter denen mit den realen Daten modellierten Ereignissen.

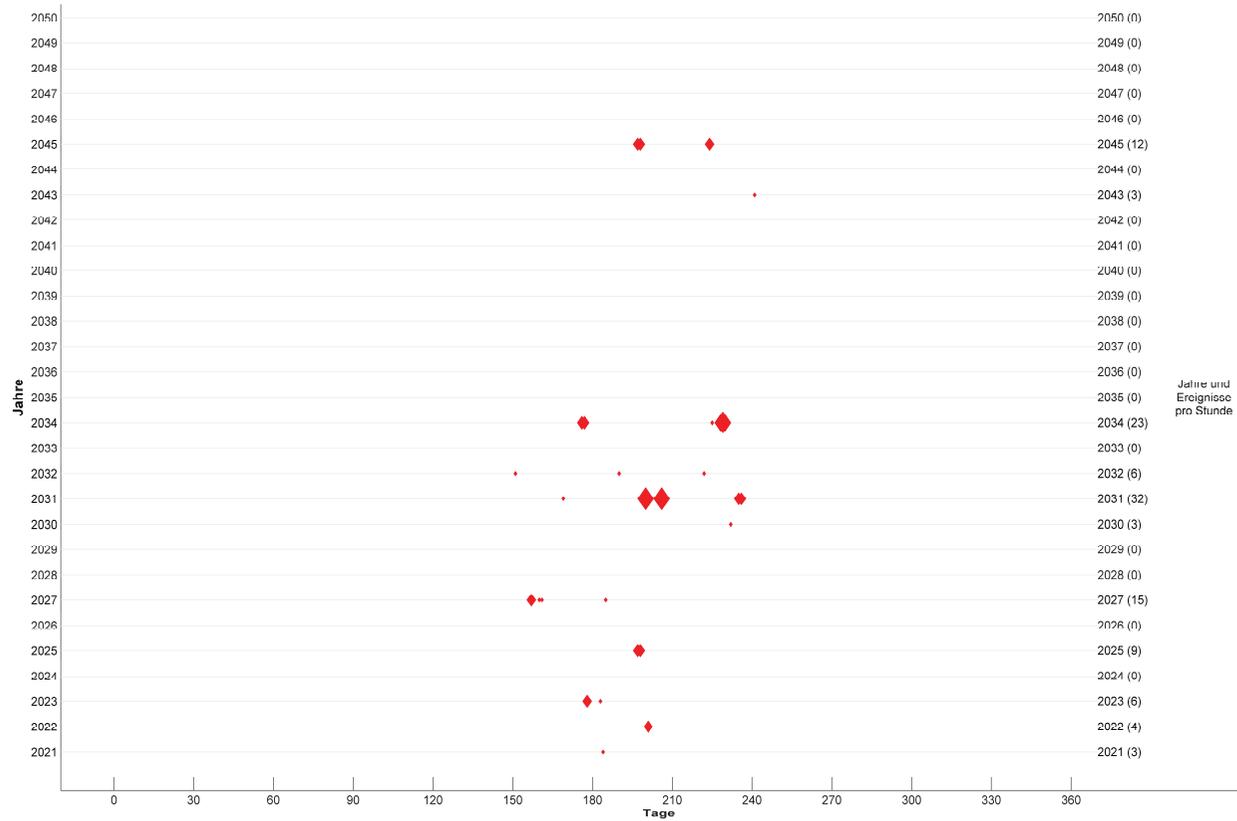
Die GMA-Station Stuttgart 4 zeigt eine tendenziell sehr starke Zunahme der Hitzeereignisse mit Lufttemperatur über 30 °C und eine simulierte Belagstemperatur über 46 °C. Für den Referenzzeitraum 1971 bis 2000 ist ein Großteil der Hitzeereignisse am Ende des 30-jährigen Zeitraums in den Sommertagen angesiedelt (vgl. Abbildung 6.17). Gründe hierfür können in der Temperaturzunahme gegen Ende der 1990er Jahre sowie zu Beginn der 2000er Jahre liegen (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg & Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2012, S. 7 ff.).

Die Simulation der ‚Hitzegefahr III-A‘ für die GMA-Station Stuttgart 4 zeigt eine deutliche Zunahme dieser Ereignisse an den Sommertagen im zukünftigen 30-jährigen Zeitraum 2021 bis 2050. Die Zunahme in den Modelldaten verteilt sich insbesondere auf die dreizehn ersten Jahre des zukünftigen Zeitraums (vgl. Abbildung 6.18).



**Abbildung 6.17: ‚Hitzegefahr III-A‘ an der GMA-Station Stuttgart 4 (Autobahn A8) im Referenzzeitraum**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a) und IMK (2014c)



**Abbildung 6.18: ‚Hitzegefahr III-A‘ an der GMA-Station Stuttgart 4 (Autobahn A8) in der nahen Zukunft**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014b) und IMK (2014c)

## 6.3 Zusammenfassung der Modellergebnisse I und II

Im Überblick aller Gefahren an den GMA-Stationen in Baden-Württemberg lässt sich zusammenfassend resümieren, dass die Simulationsergebnisse eine Zunahme der absoluten Werte der potenziellen Glättegefahren mit Niederschlag in Form von Regen für den zukünftigen Zeitraum belegen.

Im Fall der übrigen Glättegefahren kann kein allgemeiner Trend für alle GMA-Stationen abgeleitet werden. Die Windextreme, welche zu umstürzenden Bäumen und damit Straßensperrungen führen könnten, bleiben in der Modellsimulation aus und sind aus diesem Grund nicht weiter detailliert beschrieben.

Eine potenzielle Zunahme der ‚Hitzegefahren I A und B‘ entsprechend einer Zunahme der Lufttemperatur über 30 °C bzw. 32 °C zeigen die Modelldaten für alle GMA-Stationen in Baden-Württemberg. Die Veränderung der Belagstemperatur über 46 °C variiert hingegen zwischen Zu- und Abnahme sowie Stagnation im Vergleich der beiden Zeiträume. Hierdurch ergibt sich für die Prognose der kombinierten Hitzegefahren ein ähnliches Muster in der Variation der Gefahrenentwicklung.

Die Starkregenereignisse im Bereich von 10 bis 25 Liter pro Quadratmeter zeigen bei der Mehrheit der GMA-Stationen eine deutliche Zunahme für den zukünftigen Zeitraum. Hier kann es je nach Abflussregime auf der entsprechenden Autobahn zu potenziellen Überschwemmungen und Aquaplaning-Gefahr kommen. Eine Analyse des Verhaltens bei Starkniederschlägen auf einigen Autobahnabschnitten müsste bspw. durch Ankopplung eines hydrologischen Modells detailliert modelliert und diskutiert werden.

An dieser Stelle und in diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass es sich bei den Simulationen um Modelldaten handelt. Die genutzten Daten

aus den Klimasimulationen sind für die Modellierung von großräumigen, 7x7 Kilometer Rasterdaten auf Punktdaten der GMA-Stationen abstrahiert worden. Hierbei müssen folglich Differenzen zwischen den kleinräumigen klimatischen Eigenschaften der GMA-Stationen und den Daten der Klimavariablen außer Acht gelassen werden.

Die lückenhafte Aufzeichnung der GMA-Stationen der Autobahnen ergibt weitere Fehler in den Modellen, die datentechnisch nicht zu kompensieren sind und kann somit den globalen Fehler potenzieren. Ableitungen der potenziellen Gefahren auf ganze Gebiete bzw. Transekte auf Autobahnen oder andere Straßentypen sind an dieser Stelle durch potenzielle Tendenzen bedingt möglich. Diese Tendenzen sind jedoch datentechnisch in der Modellierung der vorliegenden Arbeit nicht eingeschlossen und auch nicht thematisiert. Weitere datentechnische Analysen und Modelle können in weiteren Forschungsprojekten auf Grundlage des datenbasierten Modells angeschlossen werden. Mögliche folgende Forschungsfragen werden hierzu im Kapitel 8 (S. 171 ff.) thematisiert.

## 6.4 Prognose der Gefahrenentwicklung anhand eines Vergleichs zwischen den GMA-Stationen: Modellergebnis III

Neben der Veränderung der Gefahrenereignisse an den einzelnen GMA-Stationen in Baden-Württemberg als Vergleich der Gefahrenwerte aus den beiden 30-jährigen Zeiträumen ist der Vergleich der GMA-Stationen untereinander in Bezug auf eine Gefahr von Relevanz. Dieser Vergleich wird anhand einer Auswahl bestimmter Gefahren illustriert. Hierzu wurden die Modelldaten statistisch aufbereitet und in Gefahrenkarten kartografisch visualisiert.

Berechnung der autoskalierten relativen Änderung

Die Abbildungen 6.19 bis 6.22 (S. 143 ff.) stellen ausgewählte Gefahren für alle GMA-Stationen in Baden-Württemberg – eingeteilt in sechs identische Klassen – dar. Die in den Abbildungen visualisierten Werte einer Gefahr an den GMA-Stationen werden berechnet durch:

- a) Die Ermittlung der relativen Änderung des Gefahrenwerts an einer GMA-Station in Baden-Württemberg im Zeitraum der nahen Zukunft bezogen auf den Gefahrenwert des Referenzzeitraums
- b) Um eine Vergleichbarkeit aller relativen Änderungen der Gefahrenwerte an den GMA-Stationen zu schaffen und um die extreme Spannweite dieser Werte zu kompensieren, werden die Gefahrenwerte der GMA-Stationen in Bezug auf ihre Lage in der Verteilung aller relativen Änderungen der Gefahrenwerte charakterisiert. Hierzu werden sämtliche relativen Gefahrenwertänderungen in z-Werte durch die z-Transformation umgerechnet. Die z-Werte erhalten durch die z-Transformation eine Autoskalierung und als Einheit ein Vielfaches der Standardabweichung.
- c) Die Klasseneinteilung erfolgt über die Berechnung der globalen Spannweite der z-Werte aller Gefahren und GMA-Stationen und die Einteilung in sechs äquidistante Klassen.

Die Ergebniskarten der Abbildung 6.19 bis 6.22 stellen somit für jede GMA-Station die Veränderung der Gefahrenereignisse zwischen naher Zukunft und Referenzzeitraum in Bezug auf die Veränderung der entsprechenden Gefahr bei allen GMA-Stationen in Baden-Württemberg und hinsichtlich der relativen Änderungen aller Gefahrentypen dar.

Es wird erörtert, inwieweit eine GMA-Station in Betrachtung aller GMA-Stationen bei einer Gefahr verhältnismäßig eine Abnahme, Zunahme oder Stagnation zwischen den beiden Zeiträumen aufweist. Unter den jeweiligen Abbildungen sind die Standardabweichung der entsprechenden relativen Änderung der Gefahr und das arithmetische Mittel der relativen Änderung angegeben. Diese Werte entsprechen den Daten vor der z-Transformation und dienen als Hintergrundinformation zu den kartografierten z-Werten.

Abbildung 6.19 visualisiert die Autoskalierung der relativen Änderung der Glätteereignisse des Typs 1 ‚Gefrierender Regen auf kalter Fahrbahn‘ in der nahen Zukunft in Bezug zu dem Referenzzeitraum aller GMA-Stationen in Baden-Württemberg. Fast drei Viertel aller GMA-Stationen können im Fall des Glätteereignisses des Typs 1 der Klasse der verhältnismäßig geringen relativen Änderung zwischen der nahen Zukunft und dem Referenzzeitraum zugeordnet werden. AK Stuttgart A, Rötenstein B und Keltensiedlung an der A 8 gelegen sind durch einen erkennbaren Rückgang der Glättegefahren des Typs 1 geprägt. Die Gefährdung durch Glätteereignisse des Typs 1 an diesen Stationen wird den Modelldaten zufolge rückläufig sein.

Autoskalierte relative  
Änderung der Glätte 1

Eine zunehmende Gefährdung durch Glätteereignisse des Typs 1 verzeichnen die GMA-Stationen Karlsruhe (A5), Gronachbrücke (A6) und Braunsbach (A6). Ebendiese Stationen sind durch eine ausgeprägte relative Veränderung der Gefahrenereignisse durch eine Zunahme in der nahen Zukunft gekennzeichnet.

Autoskalierte relative  
Änderung der Glätte 3A

In Bezug auf die Glättegefahr des Typs 3A ‚Niederschlag als Regen auf warmer Fahrbahn‘ illustriert Abbildung 6.20 bezüglich des Referenzzeitraums eine inhomogene autoskalierte relative Änderung dieser Glätteereignisse der nahen Zukunft. Eine abnehmende Gefährdung durch Glätte des Typs 3A zeigen die GMA-Stationen im Süden der A5 und A96 gelegen sowie die GMA-Stationen Trossing (A81), Braunsbach A (A6) und Agnesburg A (A7). Relativ betrachtet, weisen die Stationen im Norden der A5 und an einigen Stationen der A81 eine schwache bis keine Veränderung bei dieser Gefahr auf. Im Bereich des Autobahnkreuzes Stuttgart gelegene GMA-Stationen hingegen werden den Modelldaten zufolge zukünftig vermehrt von Glätteereignissen des Typs 3A betroffen sein.

Autoskalierte relative  
Änderung des heftigen  
Starkniederschlags

In Bezug auf die Ereignisse des heftigen Starkniederschlags zeigt Abbildung 6.21 keine GMA-Stationen, welche eine extreme autoskalierte relative Zunahme aufweisen. Der Großteil der GMA-Stationen präsentiert eine äußerst geringe Veränderung der relativen z-transformierten Änderung der Werte der nahen Zukunft bezogen auf die Werte des Referenzzeitraums.

Nach den Modelldaten steigt die Gefährdung durch heftige Starkniederschläge in der nahen Zukunft an den an der A81 unmittelbar benachbart gelegenen GMA-Stationen Weigenbachtal und Trossingen, an den GMA-Stationen Stuttgart 4 und Stuttgart 1, welche an der A8 ebenfalls regional in einem 10 Kilometerradius angesiedelt sind, sowie in Agnesburg A (A7). Rückläufige Gefahrenereignisse in Bezug auf heftige Starkniederschläge verzeichnen in den Modellläufen die Stationen Sulmtal A und Wolfskopf an der A6.

Autoskalierte relative  
Änderung der Hitzege-  
fahr III-A

Abbildung 6.22 visualisiert die Autoskalierung der relativen Änderung errechnet aus der Hitzegefahr III-A für die GMA-Stationen in Baden-Württemberg. Die Gefährdung an den GMA-Stationen verhält sich in der Bandbreite der auftretenden Klassen analog zu den heftigen Starkniederschlägen.

Eine tendenzielle Zunahme der zukünftigen Gefahrenereignisse weisen die GMA-Stationen in der Nähe des Autobahnkreuzes Stuttgart auf. Die GMA-Stationen Argenbrücke Nord im Süden der A96 und Widdern A im nördlichen Bereich der A81 sind zukünftig durch die Kombination einer Lufttemperatur über 30 °C und einer Belagstemperatur über 46 °C stärker durch Hitzeereignisse gefährdet als im Referenzzeitraum 1971 bis 2000. Auffallend ist, dass die südlichen GMA-Stationen der A5 und der A81 global für alle GMA-Stationen Baden-Württembergs eine relative Abnahme dieser Hitzeereignisse aufweisen. Die restlichen GMA-Stationen zeigen in den Modellsimulationen relativ betrachtet keine ausgeprägte Zu- bzw. Abnahme der Gefahrenereignisse.

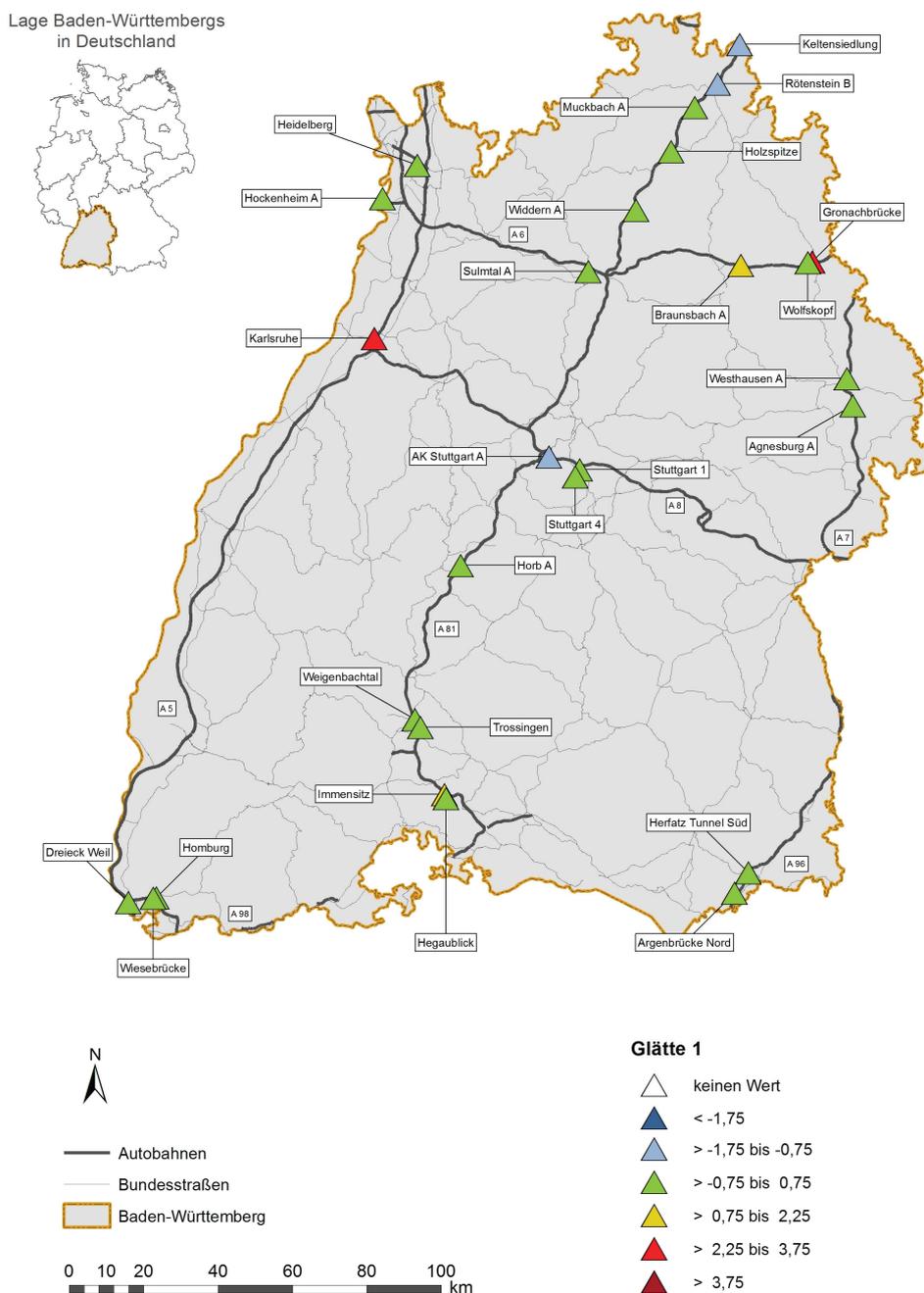
## 6.5 Zusammenfassung der Prognose zur Gefahrenentwicklung

Die Darstellung der autoskalierten relativen Änderungen der Gefahren der nahen Zukunft – bezogen auf den Referenzraum – verdeutlicht in der vorliegenden Arbeit ein Beispiel für eine Ergebnisinterpretation der Modelldaten. Insbesondere für GMA-Stationen, an denen die Gefahrenereignisse zukünftig relativ gesehen stark zunehmen, gilt es, nach Abschätzung entsprechende Maßnahmen abzuleiten. Hierdurch kann die Anpassung an die Gefahrenveränderung und an den Klimawandel bereits zu einem gegenwärtigen Zeitpunkt eingeleitet werden.

Die Darstellung der Ergebnissteile I bis III basiert auf gerechneten Modelldaten und dient als prognostisches Werkzeug für mögliche Szenarien der einzelnen Gefahren, wie und in welchem Ausmaß diese modellierten Gefahren an den jeweiligen GMA-Stationen in der nahen Zukunft auftreten werden. Die Modellierung bezieht sich exklusiv auf die Modellierung der Gefahren für die dargestellten GMA-Stationen Baden-Württembergs.

In Hinblick auf die Interpretation der Ergebnisse zur Prognose der Gefahrenentwicklung mit den Modelldaten ist neben der Gütemaße des Regressionsansatzes eine Validierung der Gefahrenmodellierung interessant.

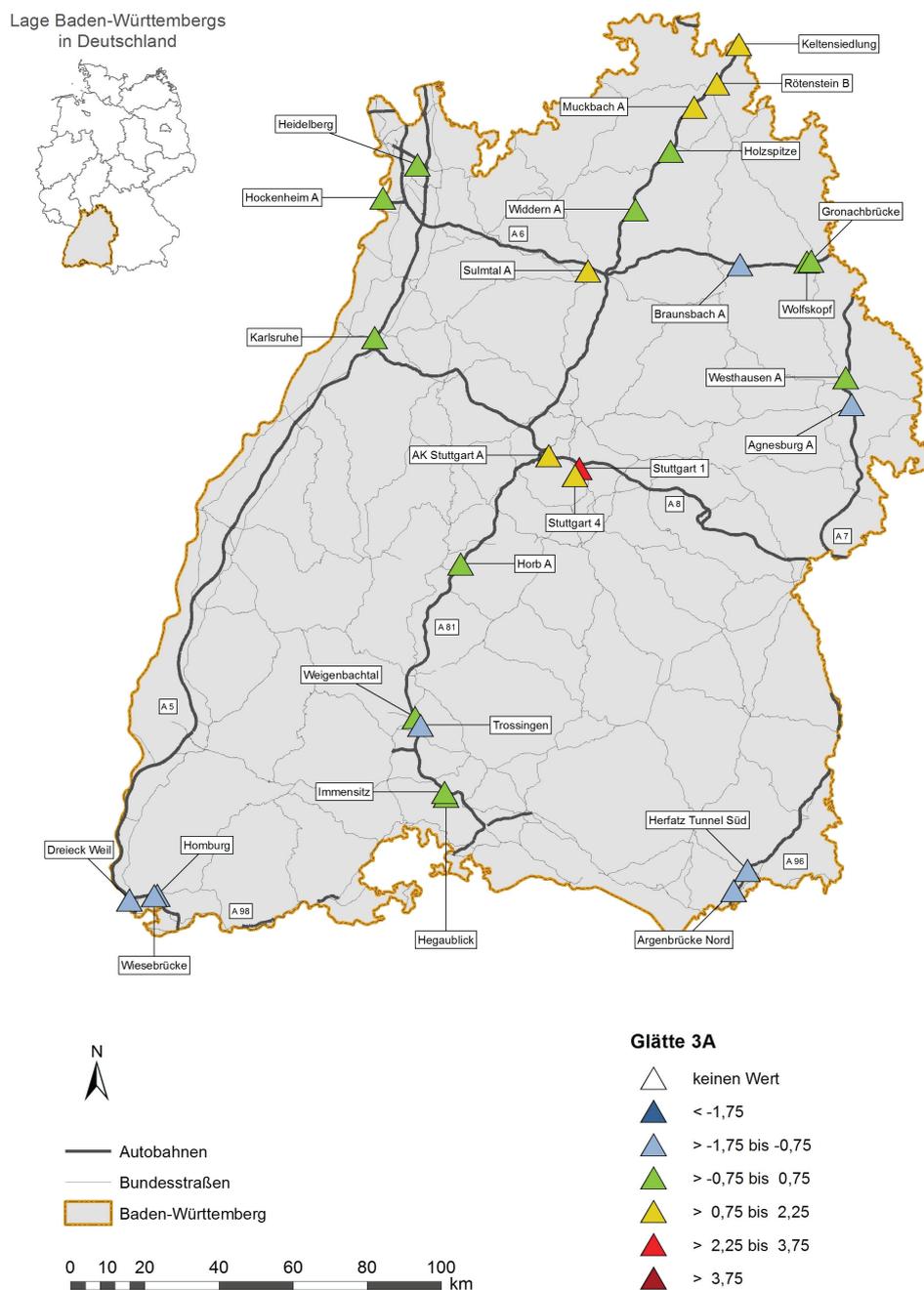
Zu untersuchen bleibt, inwieweit eine Sensitivität hinsichtlich der Gefahrenmodellierung sowie der Parameter vorliegt. Aus dieser Perspektive wird in dem folgenden Kapitel die Gefahrenmodellierung für den Zeitraum betrachtet, für den sowohl gemessene als auch modellierte Werte der Belags- und Lufttemperatur vorliegen – der Zeitraum 2001 bis 2010.



**Abbildung 6.19: Autoskalierung der relativen Änderung der ‚Glätte 1‘ der nahen Zukunft in Bezug auf den Referenzzeitraum**

Standardabweichung  $s = 0,95464523$  und arithmetisches Mittel  $\bar{m} = 0,239119679$  der Ausgangsdaten der relativen Änderung.

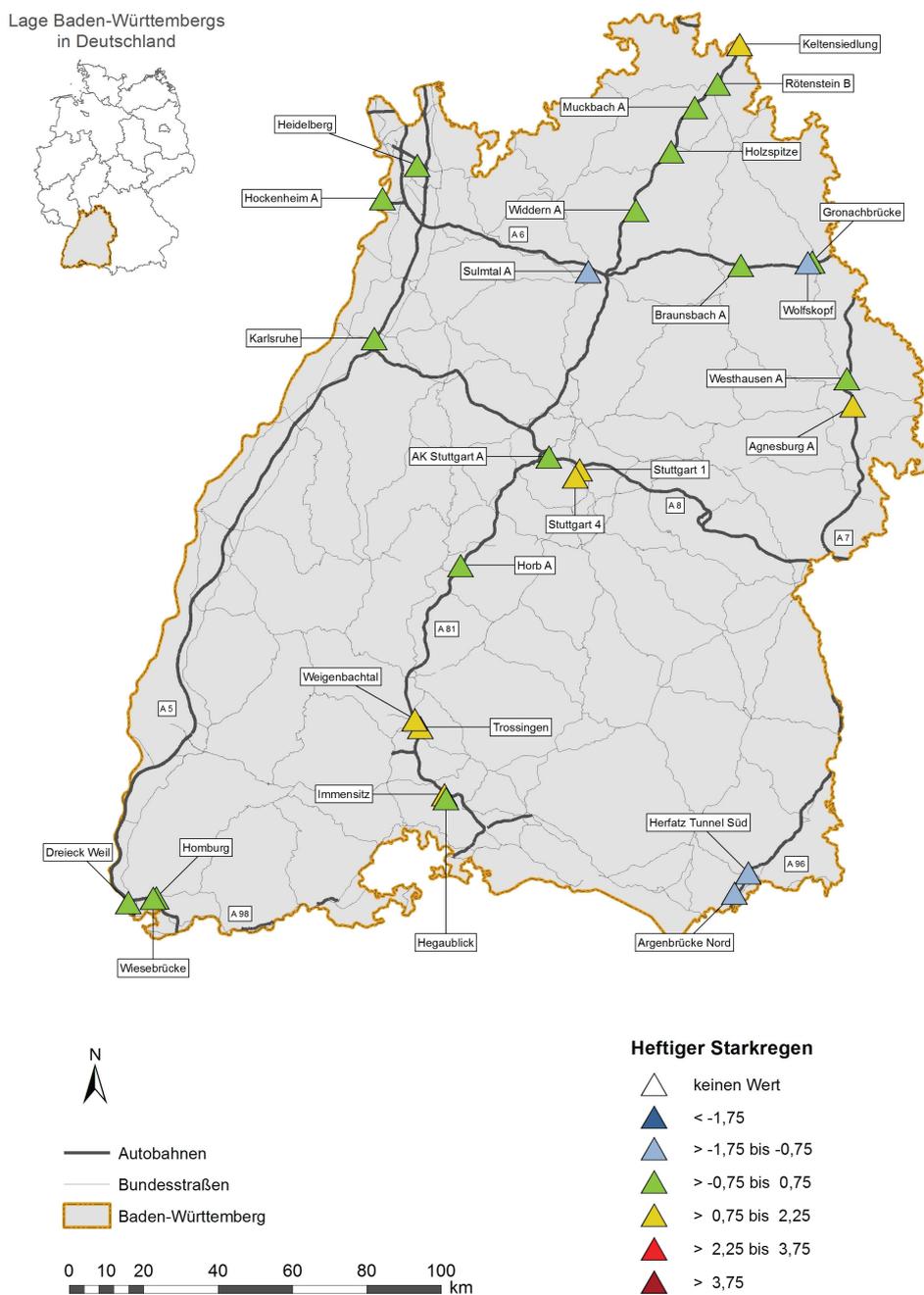
Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a); IMK (2014b); IMK (2014c) und ESRI (2005)



**Abbildung 6.20: Autoskalierung der relativen Änderung der ‚Glätte 3A‘ der nahen Zukunft in Bezug auf den Referenzzeitraum**

Standardabweichung  $s = 4,178305866$  und arithmetisches Mittel  $\bar{m} = 4,658874889$  der Ausgangsdaten der relativen Änderung.

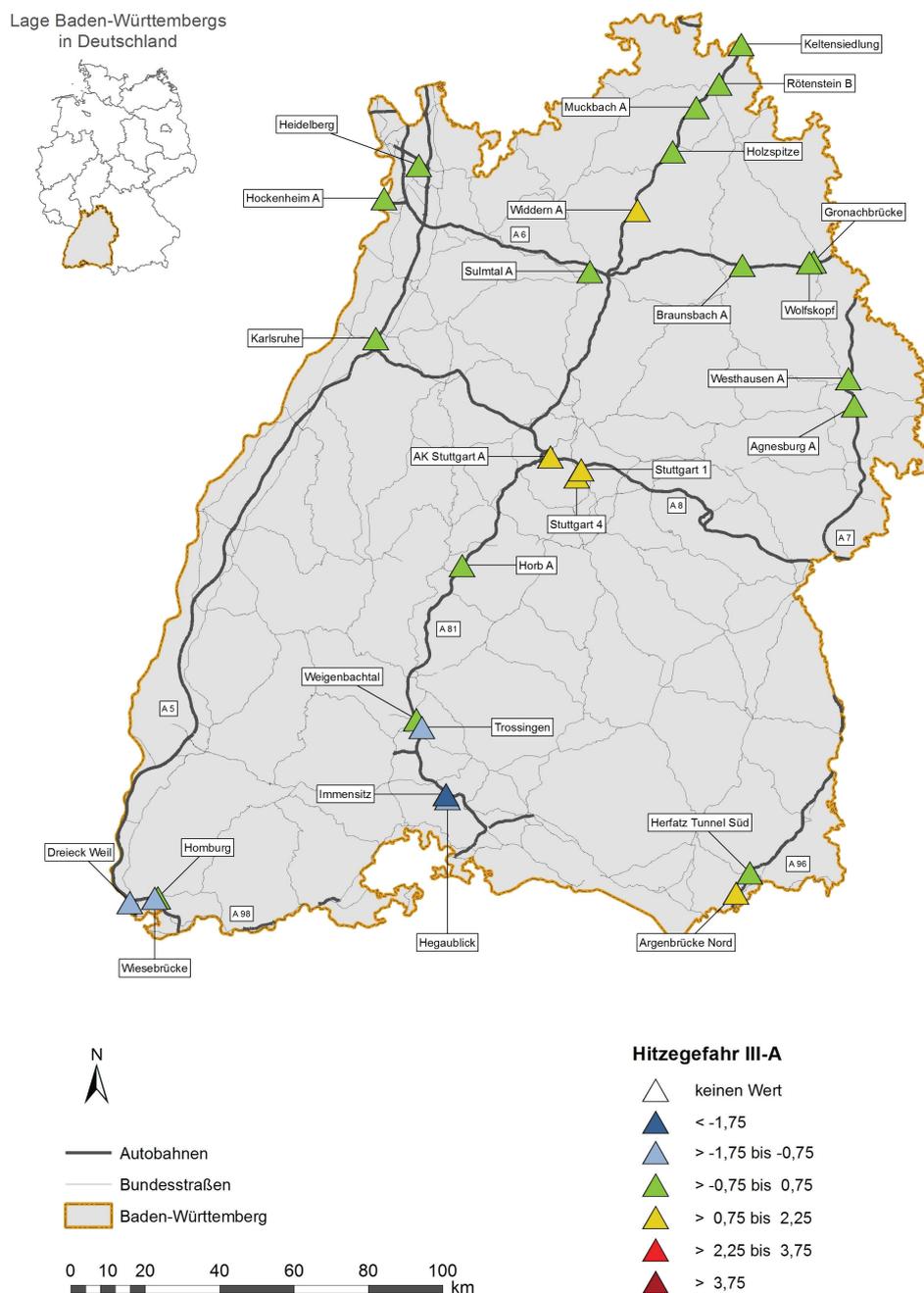
Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a); IMK (2014b); IMK (2014c) und ESRI (2005)



**Abbildung 6.21: Autoskalierung der relativen Änderung des ‚heftigen Starkregens‘ der nahen Zukunft in Bezug auf den Referenzzeitraum**

Standardabweichung  $s = 0,84827869$  und arithmetisches Mittel  $\bar{m} = 0,19047619$  der Ausgangsdaten der relativen Änderung.

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a); IMK (2014b); IMK (2014c) und ESRI (2005)



**Abbildung 6.22: Autoskalierung der relativen Änderung der ‚Hitzegefahr III-A‘ der nahen Zukunft in Bezug auf den Referenzzeitraum**

Standardabweichung  $s = 0,577033584$  und arithmetisches Mittel  $\bar{m} = 0,239227132$  der Ausgangsdaten der relativen Änderung.

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014); IMK (2014a); IMK (2014b); IMK (2014c) und ESRI (2005)

## 7 Modellvalidierung

*„A model should be developed for a specific purpose (or application) and its validity determined with respect to that purpose. If the purpose of a model is to answer a variety of questions, the validity of the model needs to be determined with respect to each question.“*

*(Sargent, 2009, S. 162)*

Der Entwurf von Modellen und ebenfalls die Modellvalidierung hängen zum einen von subjektiven Zielsetzungen und zum anderen vom Zweck der Modellsimulation ab (vgl. Küppers & Lenhard, 2005; Bossel, 2004). Nach Sargent (2009, S. 162) hängt ferner die Vorgehensweise bei der Validierung eines Modells von dessen Zweck ab.

Das in der Arbeit entwickelte Instrumentarium generiert für die zwei 30-jährigen Zeiträume definierte Gefahrenereignisse. Über einen Vergleich der Gefahrenereignisse zwischen den beiden Zeiträumen können Aussagen über die Veränderung der verschiedenen Gefahren und Gefahrentypen im Hinblick auf den Klimawandel aufgestellt werden. Übertragen auf den konzeptuellen Ansatz von Atzl und Keller (2013) ist die Veränderung der Gefahren – in diesem exemplarischen Fall auf die Autobahnen in Baden-Württemberg – eine Folge der Auswirkungen des natürlichen Systems und damit der Veränderung der Komponente Klima.

Um die grundsätzliche Validität sowie die Genauigkeit der Modelldaten festzustellen und zu bewerten, werden in diesem Kapitel neben der Darstellung der Gütemaße des Regressionsansatzes in Abschnitt 5.4.3 (S. 86 ff.) zwei weitere Validierungstechniken verwendet und anhand dieser die Genauigkeit der datenbasierten Modellierung diskutiert.

---

In Abschnitt 7.1 wird das Auftreten der Gefahrenereignisse der simulierten Modelldaten mit dem Auftreten der Gefahrenereignisse des realen Systems verglichen (*event validity* vgl. Sargent, 2009, S. 166). Dieser Vergleich kann lediglich für den Zeitraum 2001 bis 2010 erfolgen. Für diesen Zeitraum liegen durch Messung an GMA-Stationen die Lufttemperatur und die Belagstemperatur – auch wenn erhebliche Datenlücken und Messfehler in den Originaldaten zu finden sind – vor.

Abschnitt 7.2 befasst sich mit einer ‚Sensitivitätsanalyse‘ der Parameter an drei ausgewählten GMA-Stationen in Baden-Württemberg (*parameter variability – sensitivity analysis* vgl. Sargent, 2009, S. 167). Die Parametersensitivität der Gefahrenmodellierung im datenbasierten Modell dieser Arbeit wird anhand der Variabilität der Belagstemperatur analysiert. Wie in Abschnitt 5.4.3 (S. 86 ff.) und in Tabelle 9.3 (S. 187 ff.) erläutert, existiert nach der Parameterschätzung der Belagstemperatur in dem Regressionsansatz ein mittlerer absoluter Fehler zwischen der realen und der modellierten Belagstemperatur. An den GMA-Stationen Widdern A, Wiesenbrücke und Sulmtal A findet eine Überprüfung statt. Es wird geprüft, inwieweit sich die Gefahrenereignisse ändern, wenn die Belagstemperatur um den mittleren absoluten Fehler steigt bzw. abnimmt.

## 7.1 Gefahrenereignisse 2001 bis 2010: Darstellung der Ereignisvalidität

Die simulierten Gefahrenereignisse des Modells werden in einer Ereignisvalidierung in Bezug zu den Gefahrenereignissen des realen Systems gesetzt, um festzustellen, inwieweit sie über den Zeitraum 2001 bis 2010 mit den Gefahrenereignissen, welche anhand der realen Messwerte der GMA-Stationen generiert werden, gleichartig verlaufen.

Für den Zeitraum 2001 bis 2010 liegen sowohl gemessene als auch modellierte Werte der Belagstemperaturen und der Lufttemperaturen an den GMA-Stationen vor. Die Gefahrenmodellierung durch das regelbasierte System findet für jene Gefahren statt, die nach der Regelbasis mindestens die Luft- oder die Belagstemperatur als Eingangsgröße benötigen. Sofern eine Gefahr anhand von Luft- und Belagstemperatur definiert ist, ergeben sich in der Validierungsmodellierung vier Kombinationen. Die modellierten Gefahrenereignisse resultieren aus der Kombination der realen Werte, der Modellwerte, der realen Lufttemperatur und der modellierten Belagstemperatur sowie der modellierten Lufttemperatur und der realen Belagstemperatur. Die modellierte Belagstemperatur stammt aus der Anwendung des Regressionsmodells der entsprechenden Station auf die Daten der Klimavariablen. Die modellierte Lufttemperatur bezeichnet die Lufttemperatur, welche auf den Daten der Reanalyse-Daten des IMKs basiert.

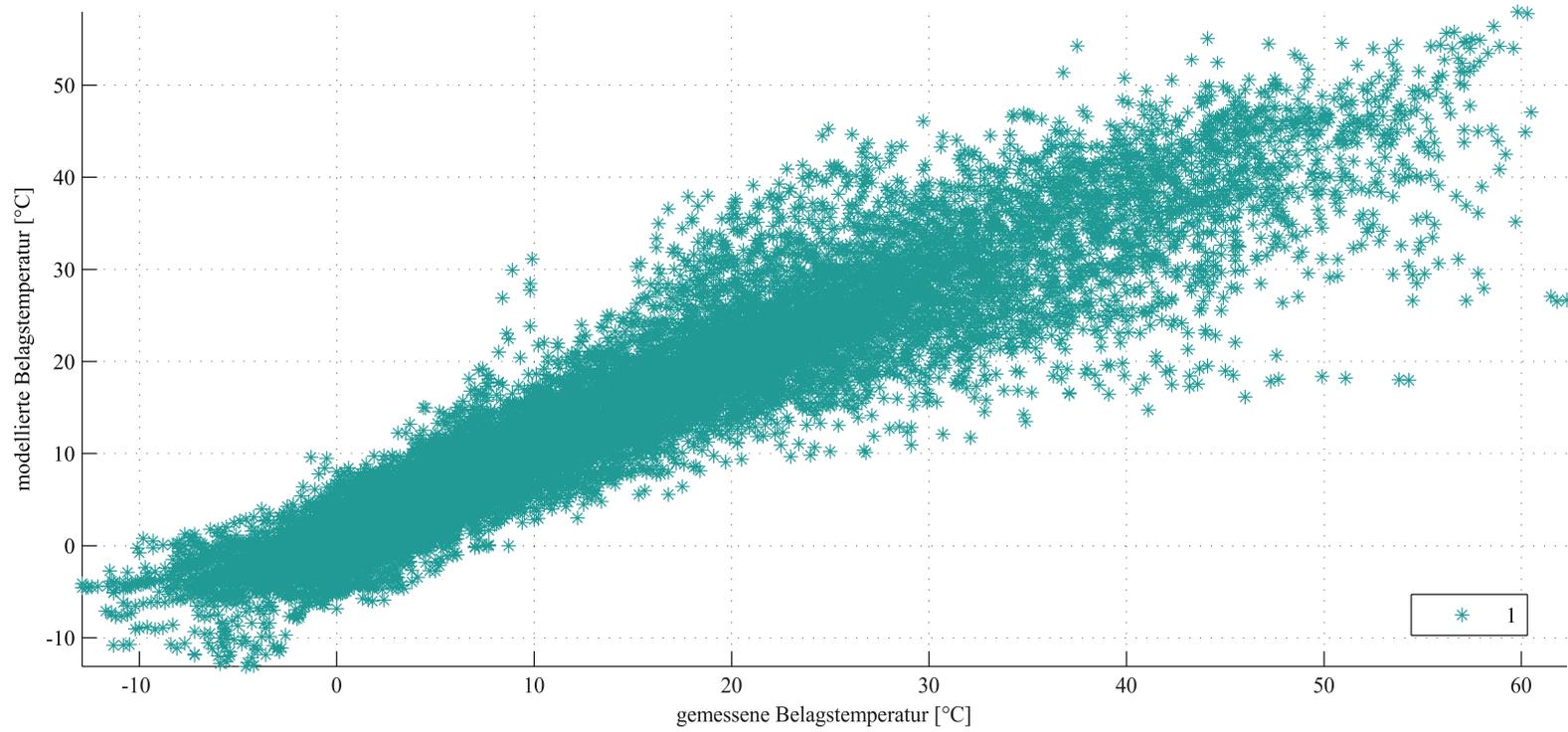
Vorgehensweise der Ereignisvalidität der Gefahrenereignisse

Zu überprüfen ist, ob a) die Modelldaten die Gefahrenmodellierung der realen Daten ausreichend abbilden. Des Weiteren können b) Rückschlüsse gezogen werden, ob die Modelldaten eine Tendenz aufweisen, die realen Gefahrenereignisse zu gering oder zu hoch zu repräsentieren. Durch die Kombination von realen Daten und Modelldaten in der Gefahrensimulation lassen sich c) mögliche Gründe für die potenziellen Tendenzen ableiten.

Zwischen den modellierten und gemessenen Werten der Luft- und Belagtemperatur an den GMA-Stationen sind Abweichungen zu erkennen. Abbildung 7.1 zeigt den Scatterplot der gemessenen und modellierten Belagtemperatur an der GMA-Station Stuttgart 4. Visualisiert wird die Beziehung zwischen den beiden Datensätzen der gemessenen und der anhand des Regressionsansatzes modellierten Belagtemperatur. Die hohe positive Korrelation ( $r_{y,\hat{y}} = 0,940107$ ) zwischen den beiden Datensätzen ist im Scatterplot trotz einiger Artefakte zu erkennen.

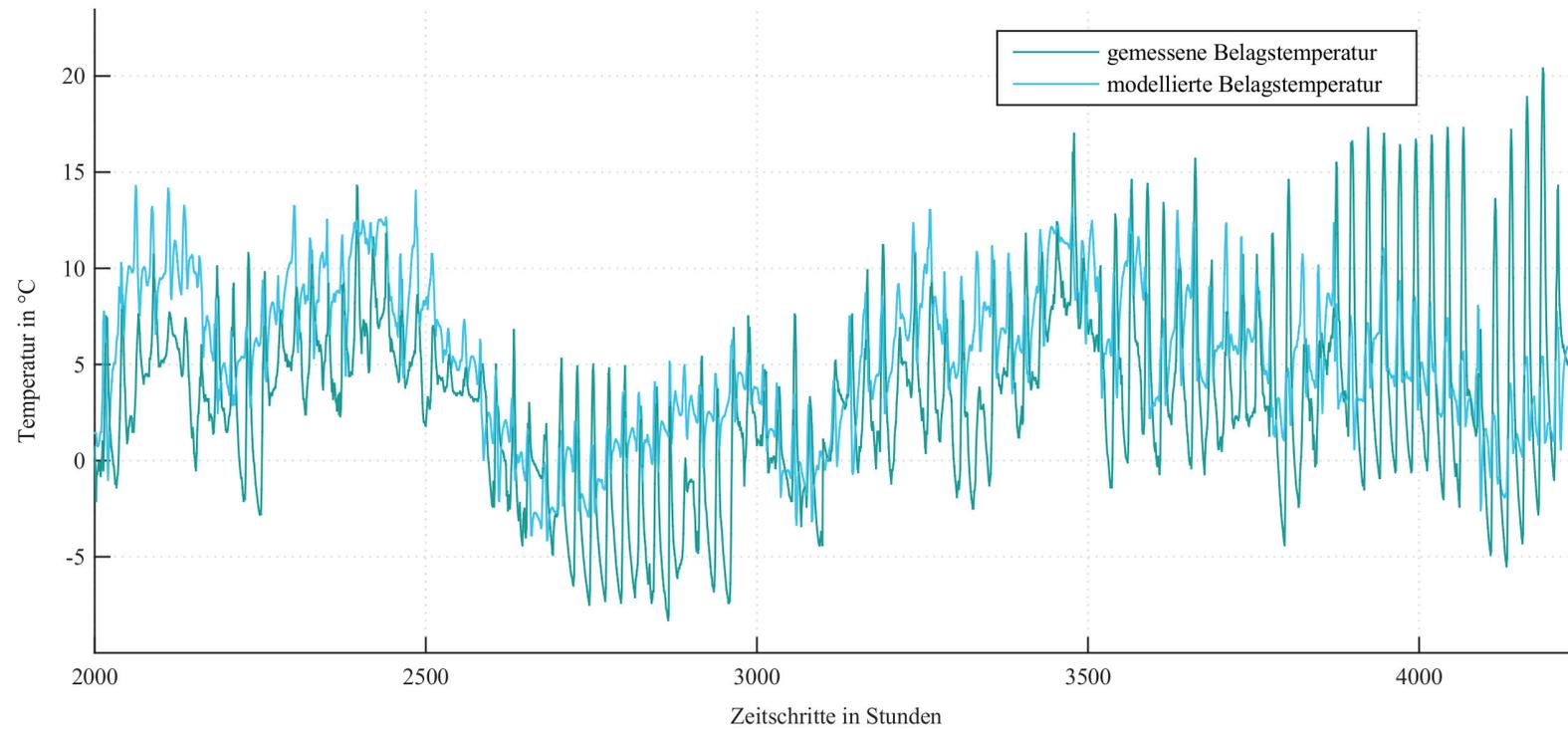
Abbildung 7.2 illustriert einen Ausschnitt des typischen Verlaufs der gemessenen und der modellierten Belagtemperatur an der GMA-Station Stuttgart 4. Diese Abbildung skizziert beispielhaft, wie sich die modellierten und gemessenen Werte an den GMA-Stationen verhalten. Muster und Struktur der gemessenen Belagtemperatur werden entsprechend über die modellierten Werte dargestellt. In einigen Zeitabschnitten sind Abweichungen zwischen den gemessenen und modellierten Werten zu erkennen. Diese Abweichungen zeigen auch die Datensätze der an den Stationen gemessenen Lufttemperaturen in zwei Metern Höhe – verglichen mit den Werten der Lufttemperaturen aus den Klimamodellierungen.

In Abbildung 7.3 ist die gemessene und modellierte Lufttemperatur an der GMA-Station Stuttgart 4 als Beispiel skizziert.



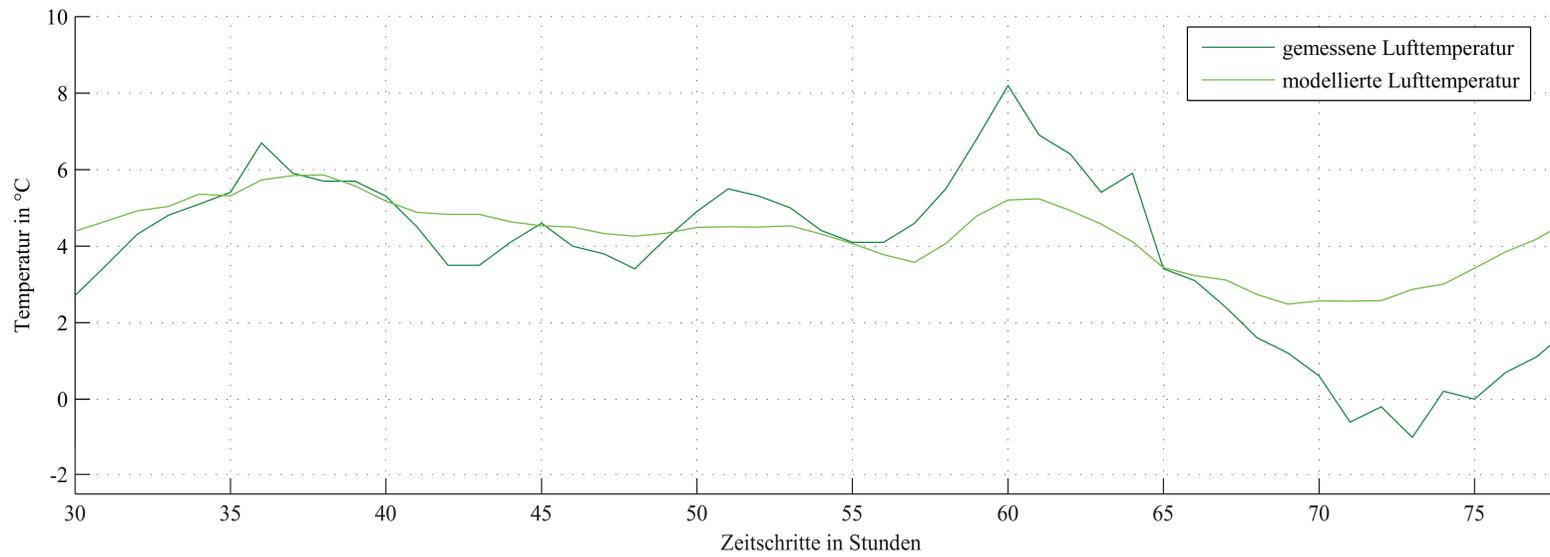
**Abbildung 7.1: Scatterplot der modellierten und der gemessenen Belagtemperatur an der GMA-Station Stuttgart 4 (A8)**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014) und IMK (2014c)



**Abbildung 7.2: Ausschnitt der Zeitreihen gemessene und modellierte Belagstemperatur an der GMA-Station Stuttgart 4 (A8)**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014) und IMK (2014c)



**Abbildung 7.3: Ausschnitt der Zeitreihen gemessene und modellierte Lufttemperatur an der GMA-Station Stuttgart 4 (A8)**

Eigene Darstellung basierend auf den gerechneten Modelldaten und den Datensätzen: DWD (2014) und IMK (2014c)

Durch die Abweichungen zwischen den Modelldaten und den gemessenen Werten der Luft- und Belagstemperatur können Abweichungen in den Ergebnissen der Gefahrenereignissimulation auftreten. Aus diesem Grund wurden verschiedene Kombinationen aus Belags- und Lufttemperaturen im Zeitraum 2001 bis 2010 in das regelbasierte Modell der Gefahrensimulation als Eingangsgröße integriert.

Beschreibung der  
Analyse der  
Ereignisvalidität

Tabelle 9.9 und 9.10 (S. 206) stellen die simulierten Gefahrenereignisse in der Summe der Ereignisse pro Stunde für den Zeitraum 2001 bis 2010 an den einzelnen GMA-Stationen dar. Die modellierten Gefahrenereignisse beziehen sich auf den Zeitraum, den die Datengrundlage zulässt. Dieser variiert zwischen den einzelnen GMA-Stationen entsprechend ihres jeweiligen Aufzeichnungszeitraums (vgl. hierzu letzte Spalte in Tabelle 9.3, S. 187 ff.). Eine direkte vergleichende Analyse zwischen den einzelnen GMA-Stationen und den generierten Gefahrenereignissen ist daher nicht möglich.

Beschreibung der  
Modellläufe der  
Ereignisvalidität

Die vier bzw. zwei Modelldurchläufe sind in den Tabelle 9.9 und 9.10 durch Abkürzungen gekennzeichnet. Die Modellsimulation der Gefahren mit der gemessenen Belags- und Lufttemperatur an der entsprechenden GMA-Station ist mit ‚R‘ gekennzeichnet. ‚M‘ steht für Gefahrenereignisse, die mit Modelldaten generiert worden sind. ‚MR‘ bezeichnet Modelldurchläufe mit einer modellierten Lufttemperatur aus den Daten des IMKs und einer an der jeweiligen GMA-Station gemessenen Belagstemperatur. ‚RM‘ kennzeichnet eine Gefahrenmodellierung mit an den GMA-Stationen gemessenen Lufttemperaturen und anhand des Regressionsansatzes modellierten Belagstemperaturen.

Die maßgeblichen Ergebnisse der Daten aus Tabelle 9.9 bis Tabelle 9.10 sind im Folgenden zusammengefasst.

**Tabelle 7.1: Überblick über die Ergebnisse der Gefahrenereignisvalidität im Modellzeitraum 2001 bis 2010**

**Gefahrenartyp: Glätte**

**Glätte 1: Gefrierender Regen auf kalter Straßenoberfläche**

$$\text{Rain}_{\text{Tot}}(t) \text{ ja} \wedge T_{\text{Air}}(t) > 0 \wedge T_{\text{Street}}(t) \leq 0$$

- Etwa 22 % der Werte der Modellsimulationen des Typs M weisen die geringste Differenz zum Modellauf R auf.
  - Etwa 7 % der Modellläufe mit modellierter Lufttemperatur und gemessener Belagstemperatur liegen mit den Werten am nächsten an den realen Gefahrenwerten.
  - Etwa 70 % der Modellläufe mit realer Lufttemperatur und modellierter Belagstemperatur weichen am geringsten von den realen Gefahrenwerten ab.
  - In der Gesamtbetrachtung aller GMA-Stationen ist kein systemischer Trend in der Gefahrenmodellierung zu erkennen. An einigen Stationen werden die realen Gefahrendaten sehr gut durch die Modelle repräsentiert. An anderen GMA-Stationen zeigt sich eine starke Abweichung.
  - GMA-Stationen, an denen der Modellauf M sehr gut<sup>27</sup> die realen Gefahrenereignisse modelliert, sind: Dreieck Weil (A5), Agnesburg A (A7), Herfatz Tunnel Süd (A96). Die Werte der Messzeiträume an diesen GMA-Stationen befinden sich oberhalb des unteren Quartils aller Messzeiträume der GMA-Stationen in Baden-Württemberg (vgl. Abbildung 7.4)
- ➔ Ambivalente Tendenz in der Darstellung der Gefahrenereignisse der Glätte 1
- ➔ Modellsimulationen mit der modellierten Belagstemperatur repräsentieren verhältnismäßig am besten die anhand der gemessenen Belags- und Lufttemperatur modellierten Gefahrenereignisse

**Glätte 2: Niederschlag als Regen/Schnee auf gefrorener Straßenoberfläche**

$$\text{Rain}_{\text{Tot}}(t) \text{ ja} \wedge T_{\text{Air}}(t) \leq 0 \wedge T_{\text{Street}}(t) \leq 0 \Rightarrow \text{Glätte 2A}$$

$$\text{Snow}_{\text{Tot}}(t) \text{ ja} \wedge T_{\text{Air}}(t) \leq 0 \wedge T_{\text{Street}}(t) \leq 0 \Rightarrow \text{Glätte 2B}$$

**Glätte 2A**

- Etwa 15 % der Modellsimulationen des Typs M der Glätteereignisse reichen am nächsten an die realen Glätteereignisse heran.
  - Etwa 44 % der Modellläufe mit modellierter Lufttemperatur und gemessener Belagstemperatur weisen die geringste Differenz zu den realen Gefahrenereignissen auf.
  - Etwa 41 % der Werte aus der Simulation mit der gemessenen Lufttemperatur und der im Regressionsansatz modellierten Belagstemperatur weichen am geringsten von den realen Gefahrenereignissen ab.
  - Die Werte der Gefahrensimulationen ‚M‘, ‚MR‘ und ‚RM‘ liegen deutlich unter den Werten aus der Modellierung mit der gemessenen Belags- und Lufttemperatur.
- ➔ Systematische Abweichung der Gefahrenmodellierung: Die *modellierten Gefahrenwerte liegen alle deutlich* unter den mit den realen Daten modellierten Ereignissen.
- ➔ Sowohl die absoluten Ereignisse des Referenzzeitraums wie auch der nahen Zukunft werden sehr wahrscheinlich unten den tatsächlich eintretenden bzw. eingetretenen Ereignissen liegen.

<sup>27</sup> Eine sehr gute Repräsentation bezeichnet hierbei eine maximal Abweichung zwischen den Gefahrenereignissen der zu vergleichenden Modellläufe von maximal 10 Ereignissen in einem Messzeitraum.

#### Glätte 2B

- Etwa 48 % der Modellsimulationen des Typs M der Glätteereignisse reichen am nächsten an die realen Glätteereignisse heran.
  - Etwa 44 % der Modellläufe mit modellierter Lufttemperatur und gemessener Belagstemperatur weisen die geringste Differenz zu den realen Gefahrenereignissen auf.
  - Etwa 7 % der Werte aus der Simulation mit der gemessenen Lufttemperatur und der im Regressionsansatz modellierten Belagstemperatur weichen am geringsten von den realen Gefahrenereignissen ab.
  - In der Gesamtbetrachtung aller GMA-Station ist kein systemischer Trend in der Gefahrenmodellierung zu erkennen. Im Vergleich zu den Ereignissen der Glätte 2A werden in allen Simulationsläufen die Werte des Modelllaufs ‚R‘ gut repräsentiert.
  - GMA-Stationen, an denen der Modelllauf M sehr gut<sup>28</sup> die realen Gefahrenereignisse modelliert, sind: Westhausen A (A7), Muckbach A (A81), Heidelberg (A656) und Stuttgart 1 (A8). Dies entspricht etwa 11% der GMA-Stationen.  
Die Werte der Messzeiträume an diesen GMA-Stationen bis auf die GMA-Station Stuttgart 1 befinden sich oberhalb des unteren Quartils aller Messzeiträume der GMA-Stationen in Baden-Württemberg (vgl. Abbildung 7.4)
- Im Vergleich zu den Ereignissen der Glätte 2A werden *in allen Simulationsläufen* die Werte des Modelllaufs ‚R‘ *gut* repräsentiert.
- Die Gefahrenereignisse, die in der Mehrheit die Glätte 2B am besten<sup>29</sup> darstellen, stammen aus dem Modelllauf mit der modellierten Belags- und Lufttemperatur.
- 

#### Glätte 3: Niederschlag als Regen/Schnee auf warmer Straßenoberfläche

$\text{Rain}_{\text{Tot}}(t) \text{ ja} \wedge T_{\text{Air}}(t) \leq 0 \wedge T_{\text{Street}}(t) > 0 \Rightarrow \text{Glätte 3A}$

$\text{Snow}_{\text{Tot}}(t) \text{ ja} \wedge T_{\text{Air}}(t) \leq 0 \wedge T_{\text{Street}}(t) > 0 \Rightarrow \text{Glätte 3B}$

---

#### Glätte 3A

- Etwa 11 % der Modellsimulationen des Typs M der Glätteereignisse reichen am nächsten an die Ergebnisse des Modellaufes ‚R‘ heran.
  - Etwa 74 % der Modellläufe mit modellierter Lufttemperatur und gemessener Belagstemperatur weisen die geringste Differenz zu den realen Gefahrenereignissen auf.
  - Etwa 15 % der Werte aus der Simulation mit der gemessenen Lufttemperatur und der im Regressionsansatz modellierten Belagstemperatur weichen am geringsten von den realen Gefahrenereignissen ab.
- Die *Modellläufe* mit den modellierten Belagstemperaturen bilden die *Werte des Modelllaufs* ‚R‘ *nicht vergleichbar* gut ab wie der Modelllauf mit der modellierten Lufttemperatur und der gemessenen Belagstemperatur. Eine Ausnahme stellt das Modell der GMA-Station Rötenstein an der A 81 dar. Hier entsprechen die Werte des Modelllaufs ‚M‘ exakt den Werten des Modellaufes ‚R‘, das Modell dieser GMA-Station ist im Falle der Glätte 3A dementsprechend deckungsgleich mit den Messdaten.

---

<sup>28</sup> Eine sehr gute Repräsentation bezeichnet hierbei eine maximale Abweichung zwischen den Gefahrenereignissen der zu vergleichenden Modellläufe von maximal 10 Ereignissen in einem Messzeitraum.

<sup>29</sup> ‚Am besten‘ bezieht sich in diesem Fall auf die geringste Differenz zwischen den Werten des Modelllaufes ‚R‘ und den anderen drei Modellläufen.

## Glätte 3B

- Die Werte des Modellaufs ,RM' bilden für alle GMA-Stationen die minimalste Differenz zu den Werten des Modellaufs ,R'.
  - Die Werte des Modellaufes ,RM' liegen systemisch über denen des Modellaufs ,R'.
- ➔ Sowohl die absoluten Ereignisse des Referenzzeitraums als auch der nahen Zukunft werden sehr wahrscheinlich über den tatsächlich eintretenden Ereignissen liegen.

**Glätte 4: Niederschlag als Regen/Schnee zusammen mit Raureif**

$\text{Rain}_{\text{Tot}}(t) \text{ ja} \wedge T_{\text{Air}}(t) \leq 0 \wedge T_{\text{Street}}(t) \leq 0 \wedge \text{TD}(t) > T_{\text{Street}}(t) \Rightarrow \text{Glätte 4A}$

$\text{Snow}_{\text{Tot}}(t) \text{ ja} \wedge T_{\text{Air}}(t) \leq 0 \wedge T_{\text{Street}}(t) \leq 0 \wedge \text{TD}(t) > T_{\text{Street}}(t) \Rightarrow \text{Glätte 4B}$

## Glätte 4A

- Etwa 4 % der Modellsimulationen des Typs M der Glätteereignisse reichen am nächsten an die Ergebnisse des Modellaufes ,R' heran.
- Etwa 55 % der Modellläufe mit modellierter Lufttemperatur und gemessener Belagstemperatur weisen die geringste Differenz zu den realen Gefahrenereignissen auf.
- Etwa 41 % der Werte aus der Simulation mit gemessener Lufttemperatur und im Regressionsansatz modellierter Belagstemperatur weichen am geringsten von den realen Gefahrenereignissen ab.
- In der Gesamtbetrachtung aller GMA-Stationen ist ein systemischer Trend in der Gefahrenmodellierung zu erkennen. Die Werte aus den Modellläufen ,R', ,MR' und ,RM' liegen deutlich unter den Werten aus dem Modellauf ,R'.

## Glätte 4B

- Analoges Erscheinungsbild zur Glätte 3B: Im Falle der Glätte 4B weisen jedoch die Werte des Modellaufs ,MR' für alle GMA-Stationen die minimalste Differenz zu den Werten des Modellaufs ,R' auf.
  - Die Werte des Modellaufes ,MR' liegen systemisch unter denen des Modellaufes ,R'.
- ➔ Systematische Abweichung der Gefahrenmodellierung der Glätte 4A und 4B: Die modellierten Gefahrenwerte liegen alle deutlich unter den mit den realen Daten modellierten Ereignissen.
- ➔ Sowohl die absoluten Ereignisse des Referenzzeitraums als auch der nahen Zukunft werden sehr wahrscheinlich unter den tatsächlich eintretenden bzw. eingetretenen Ereignissen liegen.

**Glätte 5: Raureif und geringe Sichtweite**

$\text{Prec}(t) \text{ nein} \wedge T_{\text{Street}}(t) \leq 0 \wedge \text{TD}(t) > T_{\text{Street}}(t) \wedge \text{relHum}(t) > 94$

- Etwa 40 % der Modelle der GMA-Stationen repräsentieren die Gefahrenereignisse der Glätte 5 im Vergleich der Modellläufe ,R' und ,M' sehr gut.<sup>22</sup> Für die GMA-Stationen Dreieck Weil (A5), Stuttgart 4 (A8) und Wiesebrücke (A98) stimmen die Werte aus den beiden Modellläufen überein.

➔ Glätte 5 wird für zwei Fünftel der GMA-Stationen durch die Modellierung gut dargestellt.

### Glätte 6: Gefrierender Tau mit nachfolgendem Raureif

$$\text{Prec}(t-1) \text{ nein} \wedge \text{Prec}(t) \text{ nein} \wedge T_{\text{Street}}(t-1) > 0 \wedge T_{\text{Street}}(t) \leq 0 \wedge \text{TD}(t-1) > T_{\text{Street}}(t-1) \wedge \text{TD}(t) > T_{\text{Street}}(t)$$

- Etwa 74 % der Modelle der GMA-Stationen repräsentieren die Gefahrenereignisse der Glätte 6 im Vergleich der Modellläufe ‚R‘ und ‚M‘ sehr gut.<sup>22</sup> Für die GMA-Stationen Herfatz Tunnel Süd (A96) stimmen die Werte aus den beiden Modellläufen überein.
- ➔ *Glätte 6* wird für etwa *drei Viertel* der GMA-Stationen durch die Modellierung gut dargestellt.

### Gefahrenstyp: Hitzegefahr (Extremereignis)

#### Potenzielle Hitzeschäden I und II

$$T_{\text{Air}}(t) > 30 \Rightarrow \text{Hitze I-A}$$

$$T_{\text{Air}}(t) > 32 \Rightarrow \text{Hitze I-B}$$

$$T_{\text{Street}}(t) > 46 \Rightarrow \text{Hitze II}$$

Hitze I-A, I-B und II

- Etwa 7 % der Modelle der GMA-Stationen repräsentieren die Gefahrenereignisse der Glätte Hitze I und II im Vergleich der Modellläufe ‚R‘ und ‚M‘ sehr gut.<sup>22</sup>
  - Die Werte des Modelllaufs ‚M‘ liegen systemisch unter denen des Modelllaufs ‚R‘.
- ➔ Systematische Abweichung der Gefahrenmodellierung der Hitze I und II: Die modellierten Gefahrenwerte liegen alle deutlich unter den mit den realen Daten modellierten Ereignissen.
- ➔ Sowohl die absoluten Ereignisse des Referenzzeitraums als auch der nahen Zukunft werden sehr wahrscheinlich unter den tatsächlich eintretenden bzw. eingetretenen Ereignissen liegen.

#### Potenzielle Hitzeschäden III

$$T_{\text{Air}}(t) > 30 \wedge T_{\text{Street}}(t) > 46 \Rightarrow \text{Hitze III-A}$$

$$T_{\text{Air}}(t) > 32 \wedge T_{\text{Street}}(t) > 46 \Rightarrow \text{Hitze III-B}$$

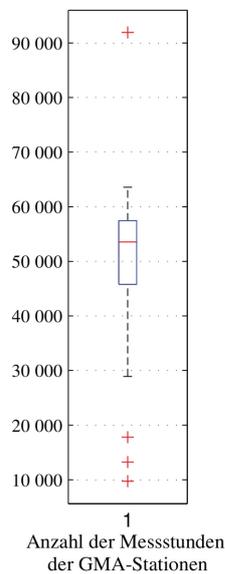
Hitze III-A

- Etwa 25 % der Modellsimulationen des Typs M der Glätteereignisse reichen am nächsten an die Ergebnisse des Modellaufes ‚R‘ heran.
  - Etwa 23 % der Modellläufe mit modellierter Lufttemperatur und gemessener Belagstemperatur weisen die geringste Differenz zu den realen Gefahrenereignissen auf.
  - Etwa 52 % der Werte aus der Simulation mit der gemessenen Lufttemperatur und der im Regressionsansatz modellierten Belagstemperatur weichen am geringsten von den realen Gefahrenereignissen ab.
  - In der Gesamtbetrachtung aller GMA-Stationen ist ein systemischer Trend in der Gefahrenmodellierung zu erkennen. Die Werte aus den Modellläufen ‚R‘, ‚MR‘ und ‚RM‘ liegen deutlich unter den Werten aus dem Modelllauf ‚R‘.
  - Für die GMA-Stationen Karlsruhe (A5) und Herfatz Tunnel Süd (A96) stimmen die Werte aus den beiden Modellläufen überein.
- ➔ Die Gefahrenereignisse, die in der Mehrheit die potenziellen Hitzeschäden III-A am besten<sup>23</sup> darstellen, stammen aus dem Modelllauf mit der *modellierten Belagstemperatur* und der *gemessenen Lufttemperatur*.
- ➔ Systematische Abweichung der Gefahrenmodellierung der Hitze III: Die modellierten Gefahrenwerte liegen *alle deutlich unter den mit den realen Daten* modellierten Ereignissen.

- ➔ Sowohl die absoluten Ereignisse des Referenzzeitraums als auch der nahen Zukunft werden sehr wahrscheinlich unter den tatsächlich eintretenden bzw. eingetretenen Ereignissen liegen.

Hitze III-B

- Etwa 37% der Modellsimulationen des Typs M der Glätteereignisse reichen am nächsten an die Ergebnisse des Modellaufs ‚R‘ heran.
  - Etwa 3% der Modellläufe mit modellierter Lufttemperatur und gemessener Belagstemperatur weisen die geringste Differenz zu den realen Gefahrenereignissen auf.
  - Etwa 60% der Werte aus der Simulation mit der gemessenen Lufttemperatur und der im Regressionsansatz modellierten Belagstemperatur weichen am geringsten von den realen Gefahrenereignissen ab.
  - Im Überblick über alle GMA-Station ist ein systemischer Trend in der Gefahrenmodellierung zu erkennen. Die Werte aus den Modellläufen ‚R‘, ‚MR‘ und ‚RM‘ liegen deutlich unter den Werten des Modellaufs ‚R‘.
  - Für die GMA-Stationen Karlsruhe (A5), Agnesburg A (A7) und Herfatz Tunnel Süd (A96) stimmen die Werte aus den beiden Modellläufen überein.
- ➔ Die Gefahrenereignisse, die in der Mehrheit die potenziellen Hitzeschäden III-B am besten<sup>23</sup> darstellen, stammen aus *dem Modelllauf mit der modellierten Belagstemperatur und der gemessenen Lufttemperatur*.
  - ➔ *Systematische Abweichung der Gefahrenmodellierung der Hitze III*: Die modellierten Gefahrenwerte liegen alle deutlich unter den mit den realen Daten modellierten Ereignissen.
  - ➔ Sowohl die absoluten Ereignisse des Referenzzeitraums wie auch der nahen Zukunft werden sehr wahrscheinlich unter den tatsächlich eintretenden bzw. eingetretenen Ereignissen liegen.



**Abbildung 7.4: Boxplot der Messstunde der GMA-Stationen in Baden-Württemberg im Zeitraum 2001 bis 2010**

Eigene Darstellung basierend auf dem aufbereiteten Datensatz: DWD (2014)

### 7.1.1 Fazit: Ereignisvalidität der Gefahrenereignisse im Zeitraum 2001 bis 2010

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass die Gefahrenereignisse der unterschiedlichen Gefahren für einzelne GMA-Stationen unterschiedlich exakt dargestellt bzw. modelliert werden. Die GMA-Stationen, an denen die Gefahrenereignisse einzelner Gefahren sehr gut modelliert werden, sind Dreieck Weil, Agnesburg A, Herfatz Tunnel Süd sowie Stuttgart 1 und 4. Für diese Stationen sind die Regressionsmodelle von entsprechender Güte. Unter anderem begründet sich dies durch die ausreichenden Messstunden der Belags- und Lufttemperatur an diesen Stationen (vgl. Abbildung 7.4, S. 159 und Tabelle 9.3, S. 187).

Die Glättegefahren 5 und 6 sind gekennzeichnet durch eine gute Abbildung der Gefahrenereignisse anhand der Modelldaten. Die Glättegefahren, welche durch eine Kombination mit Niederschlag in Form von Regen entstehen, werden hingegen durch die Modelldaten stellenweise unzureichend repräsentiert.

Anhand weiterer Datenanalysen ist zu eruieren, wie mögliche Datenfehler sowie einfließende Dynamiken in der Abkühlung der Belagstemperatur durch Niederschlag detaillierter abzubilden sind.

In den Fällen, in denen die Werte des Modelllaufs ‚M‘ bzw. ‚RM‘ gute Ergebnisse im Vergleich zu den Werten des Modelllaufs ‚R‘ aufweisen, sind diese Abweichungen im Rahmen der datenbasierten Modellierung aufgrund der Eingabeparameter zuzuordnen.

Die genutzten Daten zu den Klimaparametern weisen zum einen eine gewisse Unsicherheit in den Werten auf. Zum anderen geben diese Daten die kleinräumigen klimatischen Charakteristika nicht ausreichend wieder, da die Werte auf großräumigeren Rasterdaten basieren. Der Bias der Lufttemperatur, ‚tendenziell kälter zu sein als die gemessenen Messwerte‘, ist an den potenziellen Hitzegefahren durch den Vergleich der verschiedenen

Modellläufe zu erkennen (vgl. Tabelle 9.10, S. 210). Systematisch betrachtet, bilden die Werte aus den Modellläufen ‚M‘ verglichen mit den Werten aus den Modellläufen ‚R‘ eine zu geringe Zahl an Gefahrenereignissen ab.

In Bezug auf die Modellergebnisse des Kapitels 6 tragen die Ergebnisse der Gefahrenereignisvalidierung zu einer realistischen Interpretation bei: Die Gefahrenereignisse der Hitzegefahr sind für den Referenzzeitraum und den Zeitraum der nahen Zukunft – in Werten ausgedrückt – sehr wahrscheinlich zu gering. Anzumerken ist, dass nicht die Darstellung der absoluten Werte in beiden Zeiträumen, sondern der Vergleich der Gefahrenentwicklung zwischen den beiden Zeiträumen wesentlich ist. Unter Beachtung der Tendenzen, welche die Ereignismodellierung mit Modelldaten aufweist, können durchaus die in Kapitel 6 dargestellten Modellergebnisse des Änderungssignals der Gefahren für Autobahnen in Baden-Württemberg als eine signifikante Prognose interpretiert und vor diesem Hintergrund als valide betrachtet werden.

## 7.2 Exemplarische Analyse der Sensitivität der Gefahrenereignisse

Die Parametersensitivität der Gefahrenmodellierung bzw. der Klassifikation des Instrumentariums wird anhand der Belagstemperaturen von drei ausgewählten GMA-Stationen – Widdern A (A81), Sulmtal A (A6) und Weigenbachtal (A81) – diskutiert.

Auswahl der GMA-Stationen für die Sensitivitätsanalyse

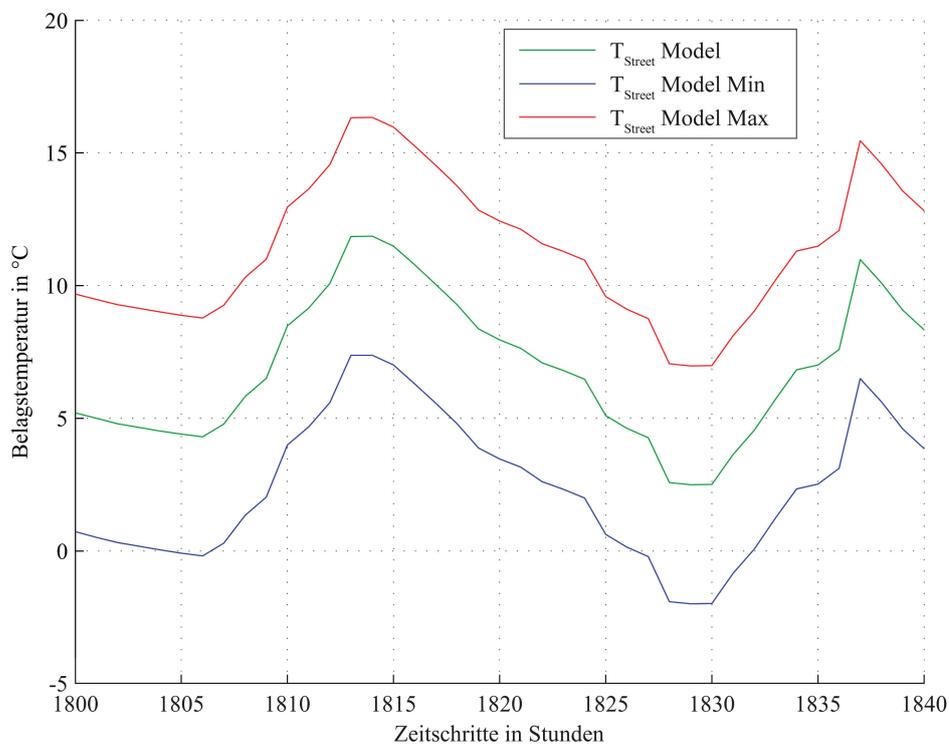
Hierbei manifestiert sich die GMA-Station Widdern A an der A81, bei der für die Modellierung der Belagstemperatur im Regressionsansatz ein großer mittlerer absoluter Fehler im Betrag entsteht ( $\text{mean}(|\hat{y} - y| = 4,48193)$ ), als die Station mit großem mittleren absoluten Fehler im Betrag. Der mittlere absolute Fehler im Betrag, welcher sich aus der Anwendung des Regressionsmodells für die GMA-Station Weigenbachtal (A81) ergibt, stellt einen Wert dar ( $\text{mean}(|\hat{y} - y| = 3,36824)$ ), welcher im mittleren Bereich aller mittleren absoluten Fehler liegt, während das Regressionsmodell der GMA-Station Sulmtal A (A6) einen der geringsten mittleren absoluten Fehler ( $\text{mean}(|\hat{y} - y| = 2,65497)$ ) bei der Modellierung der Belagstemperatur erzeugt.

Beschreibung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse

Diskutiert wird, wie sich die Gefahrenmodellierung für die Gefahren, bei denen die Belagstemperatur als ein Eingangsmerkmal der Regelbasis vorkommt (vgl. Tabelle 5.2, S. 91), verändert, wenn die Gefahrenmodellierung mit a) der modellierten Belagstemperatur, b) der modellierten Belagstemperatur minus mittlerem absolutem Fehler und c) der modellierten Belagstemperatur plus absolutem Fehler stattfindet.

Abbildung 7.5 visualisiert die Spannweite, welche zwischen  $T_{\text{Street Model Min}}$  und  $T_{\text{Street Model Max}}$  herrscht, für einen zeitlichen Ausschnitt der modellierten Belagstemperatur im Jahr 2000 an der GMA-Station Widdern A. Diese Station weist die größte Differenz zwischen  $T_{\text{Street Model Min}}$  und  $T_{\text{Street Model Max}}$  der drei ausgewählten GMA-Stationen auf. Die Beschreibungen der Merkmale  $T_{\text{Street Model Min}}$  und  $T_{\text{Street Model Max}}$

befinden sich unterhalb der Abbildung 7.5 und gelten analog für die beiden weiteren Stationen.



**Abbildung 7.5: Ausschnitt der Belagtemperatur dargestellt durch die modellierte Belagtemperatur +/- den mittleren absoluten Fehler an der GMA-Station Widdern A (A81)**

$T_{\text{Street Model}}$  (grün) entspricht der modellierten Belagtemperatur.

$T_{\text{Street Model Min}}$  (blau) entspricht der modellierten Belagtemperatur minus den mittleren absoluten Fehler an der GMA-Station Widdern A ( $= T_{\text{Street Model}} - 4,48193$ ).

$T_{\text{Street Model Max}}$  (rot) entspricht der modellierten Belagtemperatur plus den mittleren absoluten Fehler an der GMA-Station Widdern A ( $= T_{\text{Street Model}} + 4,48193$ ).

Die Gefahrenmodellierung der Glätteereignisse 1 bis 6 sowie der Hitzegefahren II, III-A und III-B sind für die drei GMA-Stationen mit den jeweils drei differenzierten Werten der Belagtemperaturen – ‚ $T_{\text{Street Model}}$ ‘, ‚ $T_{\text{Street Model Min}}$ ‘ und ‚ $T_{\text{Street Model Max}}$ ‘ – unter Anwendung des datenbasierten Modells der vorliegenden Arbeit erstellt worden. Die weiteren Eingabemerkmale der Gefahrenmodellierung entsprechen den Merkmalen, welche in Kapitel 5 (ab S. 57) erläutert werden.

Die Abbildungen 7.6 bis 7.11 visualisieren für die jeweilige GMA-Station die Parametersensitivität der Gefahrenmodellierung bzw. der Klassifikation in Bezug auf die minimale, maximale und unveränderte modellierte Belagstemperatur. Gegenübergestellt sind die Gefahrenereignisse der beiden Vergleichszeiträume 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050.

Darstellung der  
Sensitivität der  
Gefahrenereignisse in  
Bezug auf den Parameter  
Belagstemperatur

Die Untersuchung der Abweichung in Bezug auf die Gefahrenmodellierungen der Glättegefahren ergibt bei diesen drei exemplarischen Daten, dass die wesentlichen Unterschiede dann vorliegen, wenn Glättegefahren modelliert werden, bei welchen die Belagstemperatur  $\leq 0$  °C als Merkmal integriert ist. Im Vergleich der drei GMA-Stationen zeigt sich, dass die GMA-Station mit dem größten mittleren absoluten Fehler im Betrag (hier: Widdern A) die größte Abweichung zwischen den Gefahrenereignissen von  $T_{\text{Street Model Min}}$  und  $T_{\text{Street Model Max}}$  sowie  $T_{\text{Street Model}}$  aufweist. Bei der Modellierung der Glättegefahr 3A / B liegt der Modelllauf mit  $T_{\text{Street Model Max}}$  in den Werten am höchsten. Hierbei handelt es sich um Gefahrenereignisse mit einer Belagstemperatur  $\geq 0$  °C.

In der Betrachtung der Verteilung der Gefahrenereignisse mit den drei verschiedenen Belagstemperaturen ist für den Gefahrentyp Glätte Folgendes festzustellen:

Glätte 5 und 6 sowie Hitzegefahr III-A und B sind geringfügig sensitiv bezüglich der Parametereingabe. Alle Werte der Gefahrenereignisse aus den Modellläufen  $T_{\text{Street Model Min}}$  und  $T_{\text{Street Model Max}}$  sowie  $T_{\text{Street Model}}$  befinden sich in der Verteilung sehr eng beieinander und weisen daher eine hohe Validität auf. In Bezug auf die Modellierung der Hitzegefahren liegen die Abweichungen in den Gefahrensimulationen geringer auseinander als bei den Glättegefahrensimulationen. Die Sensibilität dieser Gefahrenmodellierung bezüglich der Belagstemperatur ist kaum gegeben. Für die Interpretation der Modellergebnisse lässt sich in Bezug auf die Belagstemperatur als Eingabemerkmal ein hohes Vertrauensmaß bei

diesen Gefahrentypen ableiten. Erklärt werden kann die geringe Abweichung der Ereignis-Modellierungen der Glättegefahr 5 und 6 durch die Regelbasis dieser Gefahren. Hier geht letztlich nur die Belagstemperatur mit dem Schwellenwert unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  als steuernder Parameter ein. In der Regelbasis der weiteren Glättegefahren findet sich die Kombination aus Luft- und Belagstemperatur um den Schwellenwert  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Für die Regelbasis der Hitzegefahr III-A und B werden ebenfalls die beiden Temperaturen als Eingabemerkmale benötigt.

Eine symmetrische Verteilung der Gefahrenmodellierung ergibt sich bei den Glättegefahren 2B und 3B. Die Abweichung zum Bezugspunkt mit der Modellierung der Gefahr anhand der Belagstemperatur  $T_{\text{Street Model}}$  in den beiden anderen Fällen ist in etwa gleich groß. Im Fall der Glättegefahr 2B liegen die maximalen Werte der Gefahrenereignisse im Modelllauf mit  $T_{\text{Street Model Min}}$  vor. Bei Modellierung der Glättegefahr 3B hingegen wird das Maximum durch die Modellierung mit der Eingangsgröße  $T_{\text{Street Model Max}}$  erreicht. Die Werteverteilung der beiden Glättegefahrenereignisse zeigt für alle drei Stationen das gleiche Muster. Abweichungen der modellierten Belagstemperatur im Bereich der  $0^{\circ}\text{C}$ -Grenze stellen bei der Gefahrenmodellierung der Glättegefahren 2B und 3B eine direkte Änderung der Gefahrenereigniswerte dar.

Die Werte aus den übrigen Gefahrenmodellierungen der Glätte 1, 2A, 3A, 4A und 4B mit den drei unterschiedlichen Eingangsmerkmalen der Belagstemperatur streuen sich asymmetrisch und schief um den Wert der Gefahrenmodellierung mit dem  $T_{\text{Street Model}}$ . Dies erschwert die Interpretation des Verhaltens der Gefahrenmodellierung. Eine Aussage, wie sich die Gefahrenmodellierung ändert, wenn z. B. die modellierte Belagstemperatur tendenziell kühler als die tatsächliche Belagstemperatur ist, bleibt bei der gegebenen Datenlage daher nicht bewertbar.

### 7.3 Zusammenfassung der Modellvalidierung

Infolge der Darstellung der Ereignisvalidität, der Sensitivität der Gefahrenmodellierung bei variierender Belagstemperatur sowie der Betrachtung der Gütemaße der individuellen Regressionsmodelle (vgl. Abschnitt 5.4.3, S. 86 und Tabelle 9.3, S. 187) können die Prognosen der Gefahrenentwicklung anhand der Modelldaten in Kapitel 6 (S. 95 ff.) beurteilt werden.

Die Genauigkeit und Validität der Gefahrenmodellierung hängen von den zwei Merkmalen Belags- und Lufttemperatur auf Basis der verfügbaren Daten ab. Diese können in den verschiedenen Modellläufen verändert werden und die Gefahrenereignismodellierung spiegelt die entsprechenden Parameteränderungen wider. Bilden die Daten aus den Klimasimulationen und die Belagstemperatur die individuellen Charakteristika einer GMA-Station gut ab, so zeigt sich dies auch in der Verlässlichkeit der Gefahrenmodellierung und der Validität der Ergebnisse.

Die Darstellung der Gütemaße in Abschnitt 5.5.3 (S. 86) sowie in Tabelle 9.3 (S. 187) bzw. Tabelle 9.4 (S. 195) deuten bereits an, dass die Prognose der Gefahrenereignisse insbesondere für die GMA-Stationen besonders zuverlässig sind, an denen die Gütemaße des Regressionsmodells ausreichend gute Werte annehmen.

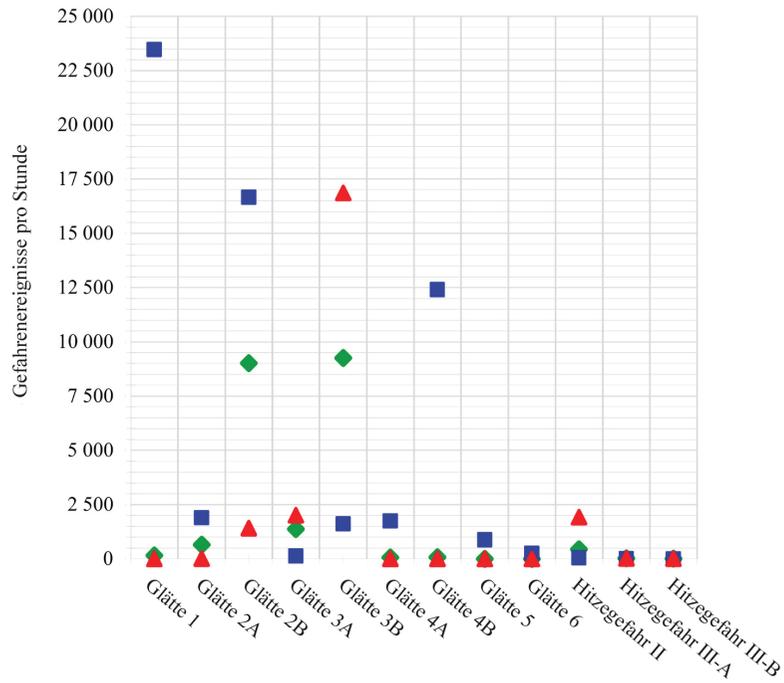
Darüber hinaus hängt die Güte der Regressionsmodelle mit einer ausreichenden Anzahl von Zeitschritten bzw. Messstunden an den GMA-Stationen im Zeitraum 2001 bis 2010 zusammen. Denn je geringer die Messfehler oder fehlenden Messzeiten sind, desto exakter verläuft die Modellierung im Data-Mining-Ansatz. Dies bedeutet andererseits, dass mit zunehmenden Messfehlern größere Abweichungen bei der Gefahrenmodellierung entstehen als sich nach Abschnitt 0 und 7.2 ableiten ließe.

Die Prognoseergebnisse – basierend auf den Modelldaten in Kapitel 6 (S. 95 ff.) – können in Gänze betrachtet als eine mögliche Entwicklung zwischen dem Referenzzeitraum 1971 bis 2000 sowie der nahen Zukunft

2021 bis 2050 bewertet werden. Die Genauigkeit der Werte spezifischer Gefahrenereignisse variiert je nach Gefahrentyp und -ereignis eines Typs sowie je nach GMA-Station und Regressionsmodell (vgl. hierzu die Differenzierung der Gefahrentypen in der Parametersensitivität). Bei hoher Validität kann direkt eine Handlungsempfehlung abgeleitet werden. Bei geringerer Validität kann zumindest der Korridor der minimalen zu den maximalen Werten und den zugehörigen Ergebnissen zur Bewertung herangezogen werden.

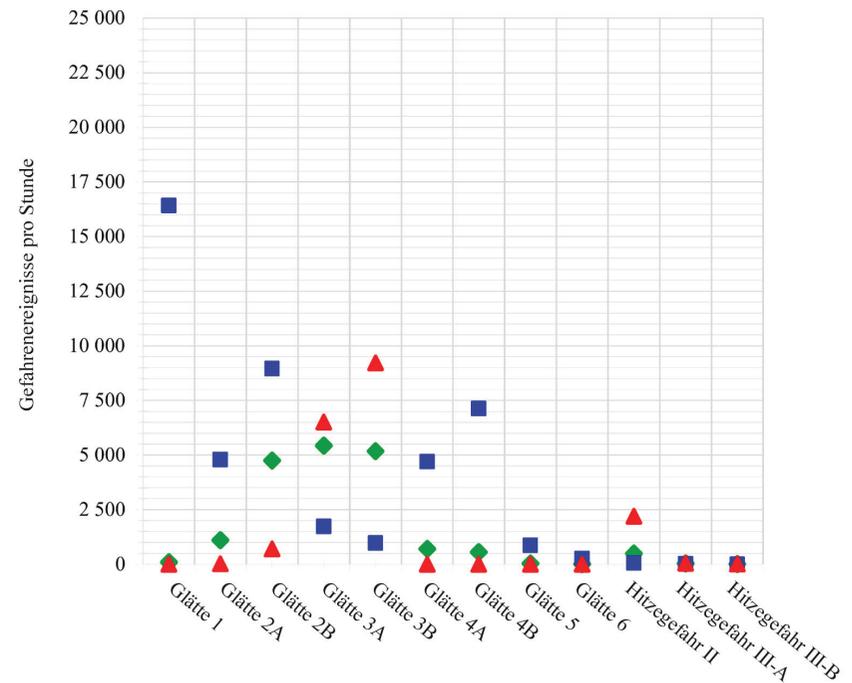
Zukünftig bleibt zu überprüfen, inwieweit eine Prognose der Gefahrenentwicklung auf andere Straßentypen anhand des Modells dieser Arbeit angewandt werden wird, um für ausgewählte Regionen und deren differenzierte Straßentypen Aussagen über Glätte, Hitzegefahr, Starkniederschläge und Wind zu generieren.

Des Weiteren kann die Gefahrenentwicklung mit unterschiedlichen Datensätzen aus Klimasimulationen modelliert werden, um herauszufinden, wie sich die Gefahrenereignisse unter differenter Annahme von Klimaszenarien gestalten. Aus der Betrachtung der Modellergebnisse der unterschiedlichen Modellläufe mit Daten aus verschiedenen Klimamodellen und deren Vergleich könnten wiederum Aussagen auf die Validität des Modells prognostiziert werden, wobei die Güte eines Modellansatzes mit Data-Mining-Verfahren immer mit der Validität der zugrundeliegenden Daten konnektiert ist. Die kombinierte Betrachtung von Modellvalidierung und Prognose der Gefahrenentwicklung anhand der Modelldaten wird in Kapitel 8 (S. 171 ff.) dargelegt.



**Abbildung 7.6: Darstellung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse der GMA-Station Widdern A (A81) im Referenzzeitraum**

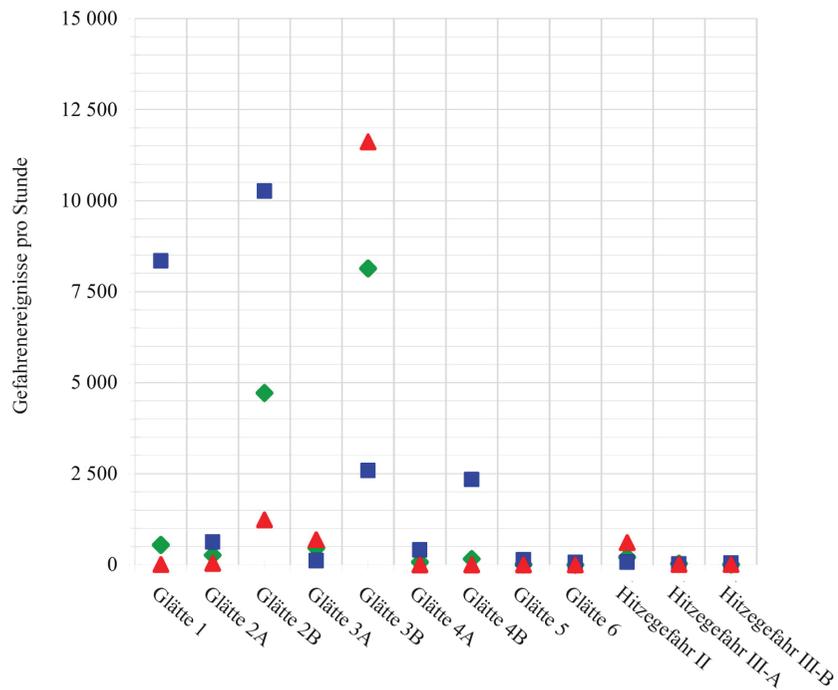
Eigene Darstellung anhand der Modelldaten



**Abbildung 7.7: Darstellung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse der GMA-Station Widdern A (A81) in der nahen Zukunft**

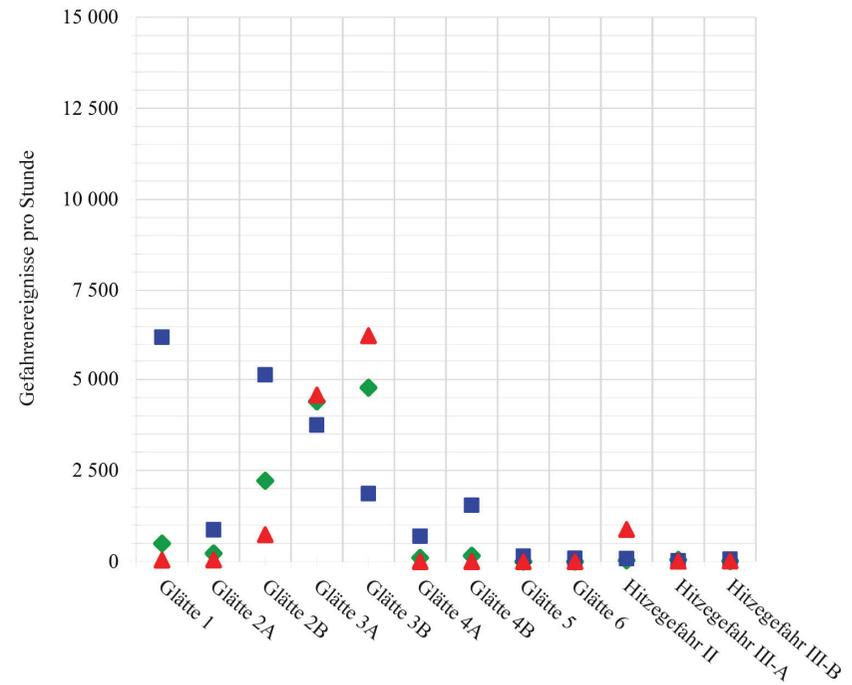
Eigene Darstellung anhand der Modelldaten

◆ Ereignisse mit Tstreet Model    
 ■ Ereignisse mit Tstreet Model Min    
 ▲ Ereignisse mit Tstreet Model Max



**Abbildung 7.8: Darstellung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse der GMA-Station Sulmtal A (A6) im Referenzzeitraum**

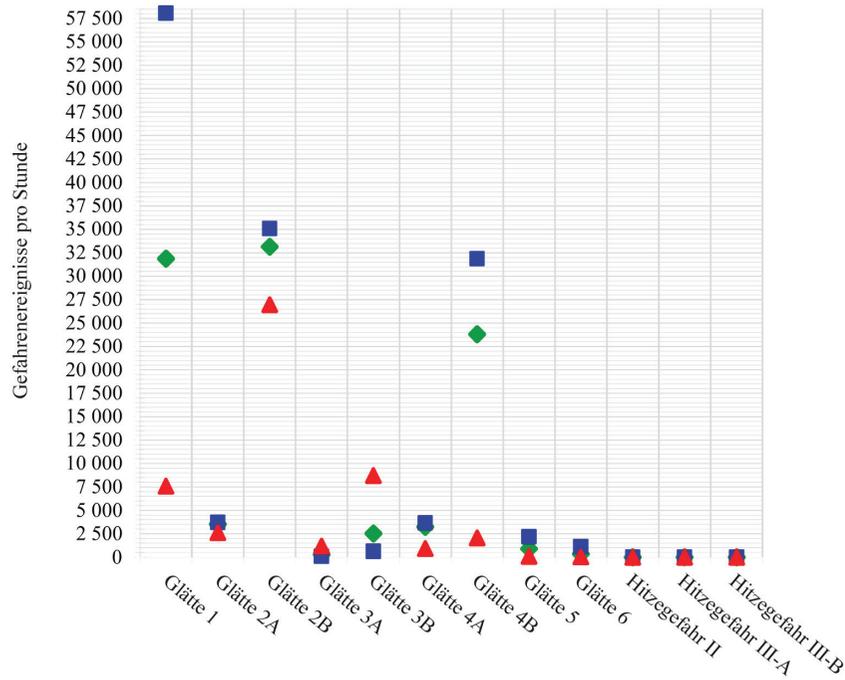
Eigene Darstellung anhand der Modelldaten



**Abbildung 7.9: Darstellung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse der GMA-Station Sulmtal A (A6) in der nahe Zukunft**

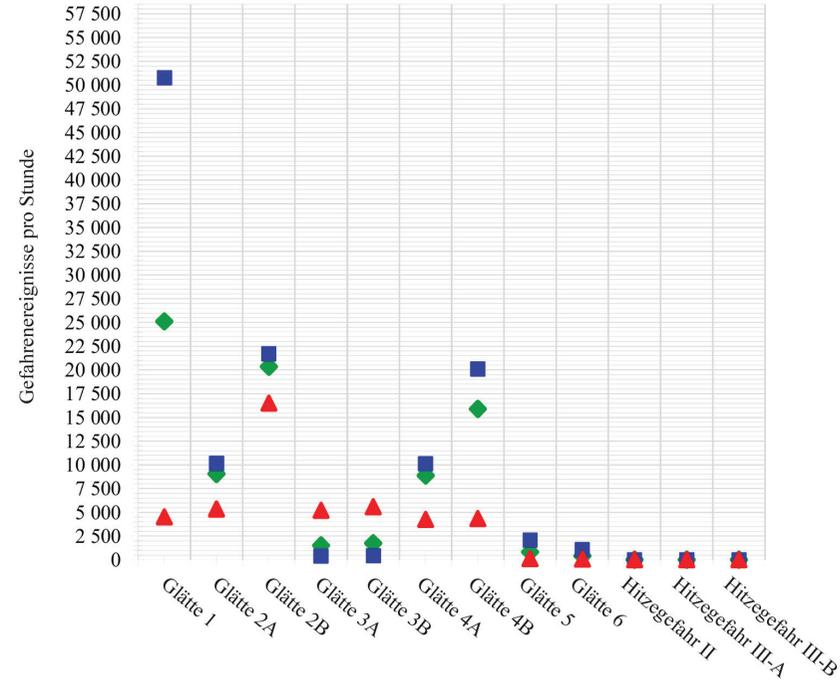
Eigene Darstellung anhand der Modelldaten

◆ Ereignisse mit Tstreet Model    ■ Ereignisse mit Tstreet Model Min    ▲ Ereignisse mit Tstreet Model Max



**Abbildung 7.10: Darstellung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse der GMA-Station Weigenbachtal (A81) im Referenzzeitraum**

Eigene Darstellung anhand der Modelldaten



**Abbildung 7.11: Darstellung der Parametersensitivität der Gefahrenereignisse der GMA-Station Weigenbachtal (A81) in der nahen Zukunft**

Eigene Darstellung anhand der Modelldaten

◆ Ereignisse mit Tstreet Model    
 ■ Ereignisse mit Tstreet Model Min    
 ▲ Ereignisse mit Tstreet Model Max

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

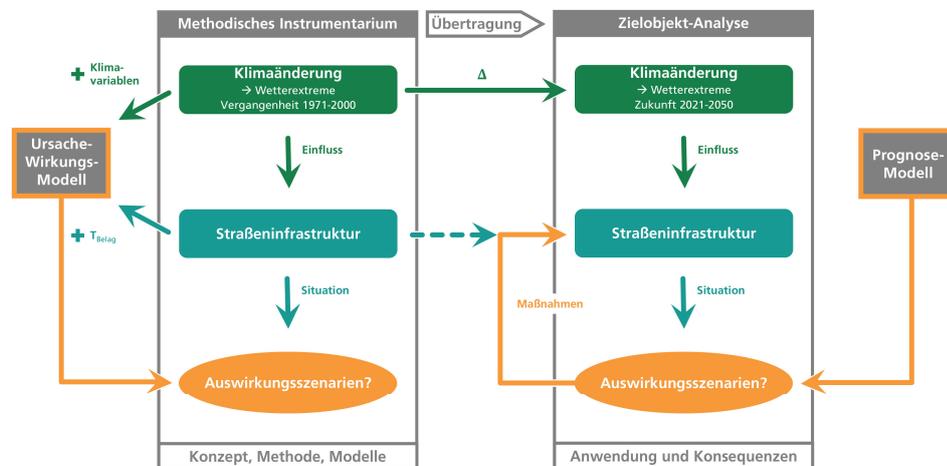
Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Erstellung eines Konzepts und der Realisierung einer „*datenbasierten Analyse und Modellbildung zur Abschätzung spezifischer Risiken des Klimawandels für Straßen*“. Zu Beginn der Modellentwicklung ist aus systemischer Perspektive ein geeigneter Forschungsansatz in einem konzeptuellen Modell entwickelt worden. Daraufhin ist diese Perspektive in einem datenbasierten Modell realisiert worden. Exemplarisch angewandt wird die entwickelte Methodik zur Prognose der Gefahrenentwicklung auf Autobahnen des Bundesfernstraßennetzes in Baden-Württemberg.

Anhand der Forschungsfragen ist die vorliegende Arbeit in einzelne Kapitel gegliedert worden, um systematisch Antworten auf einzelne Forschungsfragen zu formulieren. So ist nach und nach die Struktur und Realisierung des globalen Forschungsansatzes der vorliegenden Arbeit, schematisch in Abbildung 8.1 illustriert, entwickelt worden.

Die Beantwortung der Forschungsfragen ist methodisch vollständig erfolgt, jedoch in der exemplarischen Anwendung nicht in jedem Fall umfassend, da spezifische Frage- und Problemstellungen sowie mögliche Lösungsansätze je nach Wissenschaftsdisziplin und damit konnektierter Perspektive differenziert aufgefasst und beantwortet werden können. Die integrative Modellierung anhand eines systemtheoretischen Ansatzes und des datenbasierten Modells beruht auf einer wissenschaftlichen Perspektive, welche anhand der entsprechenden Literatur erörtert worden ist.

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Antworten auf die in Kapitel 1 formulierten Forschungsfragen zusammengefasst (vgl. Abschnitt 8.1). Die sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit ergebenden offenen Fragen und der daraus resultierende weitere Forschungsbedarf sowie Ansatzpunkte für das entwickelte Modell in der Planungspraxis folgen in einer anschließenden Erläuterung (vgl. Abschnitt 8.2).

Inhalte des Kapitels 8



**Abbildung 8.1: Gesamtübersicht über den Forschungsansatz dieser Arbeit**

Das konzeptuelle und datenbasierte Modell – wie hier zusammenfassend dargestellt – wird abgekürzt als Instrumentarium bezeichnet.

## 8.1 Zusammenfassung, Zielerfüllung und Antworten auf die Forschungsfragen

Die zentrale und übergeordnete Fragestellung in der Einleitung lautet:

- *Welcher methodische Untersuchungsansatz ist notwendig und ausreichend, um klimatische Gefahren für die Straßeninfrastruktur zu modellieren?*

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass anhand einer Aufgliederung der zentralen Forschungsfrage in untergeordnete Fragestellungen eine umfassende Struktur zur Beantwortung der zentralen Fragen als Forschungsansatz aufgebaut werden kann. In einem ersten Schritt wird mit der Definition des konzeptuellen Forschungsdesigns die wissenschaftlich strukturelle Grundlage gebildet, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Straßeninfrastruktur aus systemischer Perspektive zu verstehen.

KRITIS-Ansatz

In dem interdisziplinären konzeptuellen KRITIS-Ansatz von Atzl und Keller (2013), welcher wiederum die differenten Ansätze der Forschung zur kritischen Infrastruktur aufnimmt, werden die Zusammenhänge und

Wechselwirkungen, welche durch die Auswirkungen des Klimawandels auf die Straßeninfrastruktur entstehen, systemisch abgegrenzt. Hieraus ergeben sich verschiedene Ansätze zur Modellierung konzeptueller Modelle. Entsprechend der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird der Ansatz der konzeptuellen Modellierung dieser Arbeit skizziert. Durch eine individuelle Abstraktion der Wirklichkeit in dem konzeptuellen Modell kann eine Begriffsgrundlage für klimatische Gefahren aus systemischer Perspektive geschaffen werden.

Abbildung 8.1 skizziert die Ergebnisse des konzeptuellen Modells in den grauen Kästen. Der Klimawandel als Prozess in der naturräumlichen Umwelt wirkt auf die Straßeninfrastruktur und wird hierdurch bei entsprechender Ausprägung zu einer Naturgefahr. Dieser Zusammenhang führt zu potenziellen Auswirkungen, welche die Straßeninfrastruktur ‚bewältigen‘ muss. Anhand des konzeptuellen Modells werden die Bewältigungskapazität der Straßeninfrastruktur, ihre Vulnerabilität sowie sich auf sie auswirkende Gefahren und Risiken expliziert. Insbesondere bei den grundlegenden Begriffsbestimmungen wird deutlich, dass eine allgemeingültige Definition der Begriffe System, Modell, Risiko sowie Gefahr in der vorliegenden Arbeit erst formuliert werden muss.

Das konzeptuelle Modell kann als theoretische Grundlage genutzt werden, um einen integrativen Ansatz unter Berücksichtigung sozial- und naturwissenschaftlicher Methoden mit dem Fokus auf die Auswirkungen des Klimawandels auf kritische Infrastrukturen zu diskutieren und zu behandeln. Bisher werden interdisziplinäre Ansätze zur Analyse von Problemstellung selten planungspraktisch umgesetzt, dies zeigt auch die Literaturdarstellung in Kapitel 2. Der konzeptuelle KRITIS-Ansatz dieser Arbeit, eingebettet in den Ansatz der allgemeinen Systemtheorie und dessen weitere Abstraktion, bildet die Grundlage für die Klärung der Fragestellungen:

- *Wie können Gefahren bzw. Risiken aus systemischer Perspektive definiert werden?*
- *Wie können die Faktoren natürlicher Prozess, Naturgefahr und Naturkatastrophe systemisch voneinander abgegrenzt und eingeordnet werden?*

Konzeptionelle Erfassung  
und Operationalisierung  
von klimatischen  
Gefahren

Die Frage nach der konzeptionellen Erfassung und Operationalisierung klimatischer Gefahren ergibt sich nach der systemischen Definition anhand einer Analyse der Literatur. Glätte, extreme Hitze, extreme Winde und Starkniederschläge sind klimatische Gefahren. Das konzeptuelle Modell gliedert sich in Anlehnung an das datenbasierte Modell der Gefahrenmodellierung.

Dieses inkludiert die datenbasierte Operationalisierung der klimatischen Gefahren für die Straßeninfrastruktur und beruht auf den Eingabemerkmalen Luft-, Belagstemperatur und Niederschlag. Somit wird die Frage nach der *Operationalisierung der klimatischen Gefahren mithilfe von nötigen Eingabeparametern* und deren bereichsweiser Einordnung geklärt. Zusammenfassend in Abbildung 8.1 als Ursache-Wirkungsmodell bezeichnet, beruht dieses Modell auf einer Regelbasis.

Das datenbasierte  
Ursache-  
Wirkungsmodell und der  
parameterlineare multiple  
Regressionsansatz

Das Ursache-Wirkungsmodell identifiziert Situationen bzw. Muster, welche zu potenziellen Gefahren für die Straßeninfrastruktur führen können. Abbildung 8.1 skizziert die Anbindung des Ursache-Wirkungsmodells an das konzeptuelle Modell. Das Ursache-Wirkungsmodell stellt als theoretische Grundlage zum Verständnis der Fragstellungen in Kombination mit dem konzeptuellen Modell die Lösung für die Problemstellung dar, *welche Methodik angewandt werden kann, um klimatische Gefahren für die Straßeninfrastruktur zu modellieren.*

Die Nutzung eines Data-Mining-Ansatzes zur Parameterschätzung fehlender Straßenbelagstemperaturen als ein Eingabemerkmal des datenbasierten Modells ist ein innovativer Ansatz, welcher gegenwärtig noch nicht realisiert worden ist. Die Arbeit zeigt, wie Daten aus Klimasimulationen,

angetrieben durch Reanalyse-Daten, genutzt werden können, um mit diesen Variablen die Belagstemperaturen über einen parameterlinearen multiplen Regressionsansatz zu modellieren. Dieser Modellteil des entwickelten Instrumentariums löst die Frage, *wie fehlende Eingangsgrößen des datenbasierten Modells im Rahmen gegebener Unsicherheiten der Datenbasis abgeleitet werden können.*

Die Grenzen dieses Ansatzes sind anhand der Gütemaße und der Modellvalidierung dargelegt. Prinzipiell zeigt sich der gewählte Ansatz als eindeutig geeignet, obwohl die verfügbare Datenbasis Unsicherheiten aufweist. Über eine generelle Verbesserung des datenbasierten Modells wird daher im Ausblick diskutiert.

Die exemplarische Anwendung der Modellierung bzw. des entwickelten Instrumentariums dieser Arbeit findet an Daten der Glättemeldeanlagen der Autobahnen und Daten der Klimavariablen Baden-Württembergs statt. Im Rahmen dieser praktischen Umsetzung wird das modulare und aufeinander aufbauende Verfahren demonstriert.

Exemplarische Anwendung an den GMA-Stationen der Autobahnen Baden-Württembergs

In der Übertragung des Ursache-Wirkungsmodells auf eine mögliche Klimasituation in der nahen Zukunft 2021 bis 2050 (‘Prognose-Modell‘ zur ‘Zielobjektanalyse‘ in Abbildung 8.1) können klimatische Gefahren modelliert werden. Der Vergleich der Gefahrenereignisse zwischen dem Referenzzeitraum 1971 bis 2000 und der nahen Zukunft 2021 bis 2050 lässt über die Veränderung der Werte der Anzahl der Gefahrenereignisse Rückschlüsse auf die Veränderung der klimatischen Gefahren für die Straßeninfrastruktur durch den Klimawandel zu.

Prognosemodell als Übertragung des entwickelten Ursache-Wirkungsmodells

Die Modellergebnisse der Prognose der Gefahrenentwicklung an den GMA-Stationen in Baden-Württemberg sind geeignet, eine Orientierung für zukünftige Planungsprozesse zu bieten.

## 8.2 Schlussfolgerung und Ausblick

Die regionalen Auswirkungen des Klimawandels sowie die Effekte auf divergente Branchen, Sektoren und Gesellschaften stehen gegenwärtig als allgemeine Forschungsfragen im Raum. Die Empfehlungen der Europäischen Kommission (2013) umfassen insbesondere die Entwicklung von Strategien zum Umgang mit den Auswirkungen des Klimawandels. Im Bereich der Infrastruktur müssen geeignete Anpassungsmaßnahmen regional differenziert und infrastrukturenspezifisch identifiziert und umgesetzt werden. Dazu notwendige und grundlegende Schritte hierzu können lediglich über eine Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf Infrastruktur bzw. Infrastrukturkomponenten abgeleitet werden.

Nach dem gegenwärtigen Forschungsstand befindet sich die Forschung über Auswirkungen des Klimawandels auf Infrastrukturkomponenten, wie Straßeninfrastruktur und resultierende räumliche Folgen, am Beginn zur Entwicklung der grundlegenden Methoden. Dies ist unter anderem dadurch bedingt, dass neben den Unsicherheiten in den konkreten Auswirkungen des Klimawandels, die Forschungen zum Klimawandel in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen unterschiedlich voranschreiten.

Daher wird in dieser Arbeit ein innovatives, grundlegendes methodisches Instrumentarium aus einem kombinierten konzeptuellen und datenbasierten Modell vorgestellt, welches die Auswirkungen des Klimawandels in Form klimatischer Gefahren für Straßeninfrastrukturen modelliert und auf konkrete Daten anwendbar ist.

Anhand des konzeptuellen Modells kann auch eine Grundlage für ein interdisziplinäres Verständnis von gemeinsam genutzten Fachtermini, die oftmals kontext- und disziplinabhängig unterschiedlich Anwendung finden, erarbeitet werden. Dieses gemeinsame Verständnis von Begrifflichkeiten spielt in Planungsprozessen, an denen Planerinnen und Planer aus unterschiedlichen Bereichen zusammenarbeiten, eine große Rolle.

Die Gefahrenmodellierung und die Darstellung der Modellvalidierung als Prognose der Auswirkungen des Klimawandels auf Straßen- bzw. Autobahnabschnitte / -stationen in den jeweiligen Regionen sind eine direkte Grundlage für die Akteurinnen und Akteure in der Fachplanung. Mit den entsprechenden Gütemaßen und den Gefahrenereignissen der Modelldaten lassen sich potenzielle Änderungen der nahen Zukunft in Hinblick auf die dargestellten Gefahren gegenwärtig bereits erkennen und deren Eintreten interpretieren. Mit dieser Erkenntnis kann ein räumliches Vorsorgekonzept entwickelt und letztlich umgesetzt werden.

Das in dieser Arbeit konzipierte und vorgestellte methodische Instrumentarium ist, wie exemplarisch gezeigt, direkt in der Planungspraxis einsetzbar. Ersichtlich ist, dass es sich hierbei um ein Grundlageninstrumentarium handelt, welches über Modifikationen, wie z. B. eine Implementierung als Webtool anwendungsfreundlicher gestaltet werden kann. Die Basis stellen die standardisierten transparenten Analyseschritte dar, welche zur Generierung von Gefahrenereignissen führen. Entsprechend regionalisierte Karten der Klimafolgen für Straßen in einer spezifischen Region helfen, eine mögliche Einschätzung der zukünftigen oder eben gegenwärtigen Betroffenheit zu visualisieren. Die Modellergebnisse in Karten dargestellt, lassen sich an bestehende Konzepte, wie z. B. den Klimaatlas der Region Stuttgart (Baden-Württemberg), adaptieren.

Das konzeptuelle und datenbasierte Modell dieser Arbeit wurde exemplarisch auf Datensätze der Autobahnen in Baden-Württemberg und Daten aus Klimasimulationen angewandt. Bei entsprechender Datengrundlage kann dieses Instrumentarium auf weitere Straßentypen und Regionen übertragen werden. Die transparente Darstellung und Erläuterung des Kerns des Instrumentariums mit Auszügen aus den Quellcodes erleichtern die individuelle Anpassung und Nutzung des methodischen, datenbasierten Ansatzes.

Um die Anwendung auf weitere Infrastrukturtypen, wie z. B. Schieneninfrastruktur, zu ermöglichen, sind die Regelbasis wie auch die Dateneingabe entsprechend anzupassen. Dies hat über die Definition entsprechender Schwellenwerte, z. B. aus Forschungspublikationen, zu erfolgen. Beispielsweise sind Werte für Hitzegefahren zu definieren. In Hinblick auf die Anwendung auf die verschiedenen Straßentypen ist eine Anpassung der Gefahrenklassifizierung nicht unbedingt nötig. Das Vorhandensein der nötigen Eingangsmerkmale spielt eine zentralere Rolle.

Hieraus lässt sich eine Mindestanforderung an die Datengrundlage sowie die Methodik ableiten, welche die Grenzen eines datenbasierten Ansatzes aufzeigen. Die Ergebnisinterpretation der Gefahrenentwicklung der Straßeninfrastruktur durch den Klimawandel erfolgt anhand getroffener Annahmen in der Modellierung und durch die Auswahl der Datengrundlage. In diesem Zusammenhang konnte nicht aus einer Datengrundlage ausgewählt werden, sondern die Datengrundlage bestimmt – wie häufig bei datenbasierten Ansätzen – bis zu einem gewissen Grade die Anwendungsvielfalt und den Einsatz in einem Modell.

Mit den exemplarisch angewandten Datensätzen und den tatsächlichen Messwerten der Glättemeldeanlagen ergeben sich für die einzelnen Gefahrentypen eine regionale, differenzierte Verteilung der jeweiligen Gefahrenereignisse. Zu erwähnen ist, dass Auftreten und Änderungssignal dieser Gefahrentypen zwischen den zwei zu vergleichenden Zeiträumen 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050 als potenziell mögliches Auftreten bzw. Änderungssignal zu interpretieren sind. Im Falle von Starkniederschlägen betrifft die Annahme in der Regelbasis gegenwärtig den Niederschlag pro Stunde. Eine Koppelung mit einem hydrologischen Modell, um das Abflussverhalten an den Messstationen zu simulieren, würde Aussagen über den Wasserfilm auf der Straße und die resultierende Aqua-Planing-Gefahr erlauben.

Verbessert und aussagekräftiger werden die Ergebnisse des Instrumentariums zudem durch kleinräumigere Daten der Klimavariablen und vor allem durch eine lückenlosere und konsistente Aufzeichnung der Belagstemperaturen der Glättemeldeanlagen. Erreicht werden kann die Verbesserung der Aufzeichnung der Belagstemperaturen durch eine vermehrte Wartung und ein erhöhtes Monitoring.

Mit einer verbesserten Datengrundlage und weiteren Modellläufen anhand zusätzlicher Daten aus Klimasimulationen können Prognosen mit engerem Vertrauensintervall erstellt und dadurch aussagekräftigere Grundlagenforschung im Bereich der Gefahrenanalyse betrieben werden. Des Weiteren könnte durch Daten zur Belagstemperatur, welche bspw. durch Messfahrzeuge aufgenommen werden, die Daten aus den Glättemeldeanlagen ergänzt bzw. ggf. ersetzt werden. Alternativ hierzu ergäbe sich durch eine homogenere wie auch repräsentativere Verteilung der GMA-Stationen eine verbesserte Datengrundlage im Bereich der Belagstemperaturen.

Das vorgestellte Instrumentarium modelliert und simuliert Gefahrenereignisse punktuell an den Glättemeldeanlagen. Ein nächster Schritt in der Modellierung wäre die Ableitung der potenziellen Gefahren für Flächen bzw. Linien (Straßentransekte). In diesem Zusammenhang müssen weitere Modelle angekoppelt werden. Eine Transformation von punktuellen Berechnungen der Gefahrenereignisse zu linienhaften und flächenhaften Betrachtungen kann durch die Definition verschiebbarer Fenster über die punktuellen Berechnungen, wie z. B. Quadrate für Flächen und Rechtecke für Straßenabschnitte, erfolgen. Basierend auf den Parametersensitivitätsanalysen können Segmente mit überwiegenden Zunahmen in den einzelnen punktuellen Berechnungen als relevant für zukünftige Handlungsanforderungen betrachtet werden.

Letztlich können Aussagen über regionale Auswirkungen des Klimawandels in Form von klimatischen Gefahren auf ebendiese Straßen modelliert und vor allem regional abgeleitet werden. Im Bereich der Fachplanung

könnte anhand regional aussagenkräftiger Gefahrenentwicklungen ein Wissenszuwachs bezüglich zu erwartenden Gefahren und damit möglicher Anpassungsmaßnahmen erreicht werden.

Denn Klimafolgen zu bewerten, ist ein Handlungsfeld der Planungsprozesse auf regionaler Ebene. Es ist zu erkennen, dass das entwickelte Instrumentarium die Fachplanungen unterstützen und eine gemeinsame methodische Grundlage schaffen kann. Inwieweit die durch die gegebene Datenlage eingeschränkte Belastbarkeit der Ergebnisse eine Rechtsicherheit für formale Instrumentarien der Raumplanung mit diesem Ansatz gewährleisten kann, bleibt eine Frage der verfügbaren Datenbasis.

Wie anhand der Auswertung der Forschungsergebnisse im Bereich der Implementierung der Bewertung von Klimawandelauswirkungen auf die Straßeninfrastruktur zu erkennen ist, stehen in diesem Forschungsfeld die methodischen Ansätze noch am Beginn. Das vorgestellte und entwickelte Instrumentarium stellt jedoch eine wesentliche Grundlage für ein Bewertungswerkzeug dar. Es kann durch seine Struktur an weitere Modelle in diesem Forschungsfeld angekoppelt und weiterentwickelt werden sowie eine verbesserte Einschätzung der Wirkungen des Klimawandels auf Infrastrukturen aufzeigen.

# Stichwortverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| Allgemeine Systemtheorie .....   | 17  |
| Anpassung (systemische Perspektive) .....  | 31  |
| Belagstemperaturen der GMA-Stationen.....  | 67  |
| Berechnung der autoskalierten relativen Änderung<br>(Beschreibung).....  | 138 |
| Bestimmtheitsmaß $R^2$ (Definition) .....  | 86  |
| Bewältigungskapazität .....  | 29  |
| Datenbasiertes Modell zur Darstellung der klimatischen<br>Gefahren für die Straßeninfrastruktur (Überblick)..... | 59  |
| Datenstruktur der Eingabemerkmale des datenbasierten Modells....   | 71  |
| Ereignisvalidität (Modellvalidierung).....   | 149 |
| Exposition .....   | 28  |
| Gefahrenereignis (Erklärung) .....   | 50  |
| Gefahrentyp (Erklärung).....   | 50  |
| Gefahrentypen Glätte, Starkregen, Hitze und Sturm .....  | 54  |
| GMA-Stationen in Baden-Württemberg.....  | 70  |
| Klassifikation potenzieller Gefahren für die Straßeninfrastruktur ...  | 54  |
| Klassifikation von extremer Hitze .....  | 52  |
| Klassifikation von Glätte .....  | 51  |
| Klassifikation von Starkniederschlag .....   | 52  |
| Klassifikation von Wind .....  | 53  |
| Klassifikator.....   | 50  |
| Klimatische Gefahren .....   | 36  |
| Klimavariablen (Beschreibung der Datensätze) .....   | 64  |
| Klimawandel (Überblick) .....  | 37  |
| Korrelationskoeffizient (Definition).....  | 87  |
| KRITIS-Ansatz nach Atzl & Keller.....  | 20  |
| Merkmalsliste für die datenbasierte Modellierung .....   | 185 |
| Mittlerer absoluter Fehler (Definition) .....  | 87  |

---

|  |     |
|--|-----|
| Modell .....   | 16  |
| Naturgefahr .....  | 28  |
| Naturkatastrophe.....  | 30  |
| Natürliche Prozesse .....  | 27  |
| netcdf-Datei (Aufbau).....   | 75  |
| RCP-Szenarien.....   | 40  |
| Risiko und Gefahr.....   | 32  |
| Sensitivität der Gefahrenereignisse (Modellvalidierung).....   | 162 |
| System .....   | 16  |
| System der kritischen Infrastruktur .....  | 22  |
| System der naturräumlichen Umwelt .....  | 21  |
| System der sozialen Umwelt .....   | 24  |
| System der Straßeninfrastruktur .....  | 23  |
| Toolbox Gait-CAD (kurze Einführung) .....  | 62  |
| Typsierung von Naturgefahren.....  | 35  |
| Vulnerabilität .....   | 28  |
| Vulnerabilität der Straßeninfrastruktur gegenüber dem<br>projizierten Klimawandel in Baden-Württemberg ..... | 48  |

## 9 Anhang zu den Daten

**Tabelle 9.1: Beschreibung der Glättemeldeanlage in Baden-Württemberg**

Eigene Darstellung nach der Datenquelle DWD (2014)

| Autobahntransekt /<br>GMA-Station |                | Streckenmerkmale                          |                        | Strecken-<br>typ | Höhe<br>in<br>Metern<br>über<br>NN | Messzeit-<br>raum<br>(87 674 h) |
|-----------------------------------|----------------|---|------------------------|------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|                                   |                | Strecken-<br>lage                         | Streckenbelag          |                  |                                    |                                 |
| A5                                | Karlsruhe      | über<br>großen<br>Fluss/<br>Kanal         | orthotrope<br>Platte   | Brücke           | 170                                | 01.01.2001-<br>31.01.2010       |
|                                   | Dreieck Weil   | eben zur<br>Umge-<br>bung                 | Beton                  | freie<br>Strecke | 245                                | 01.01.2001-<br>31.01.2010       |
| A7                                | Westhausen A   | über Tal<br>mit Wald/<br>Wiese/<br>Äckern | Betonkon-<br>struktion | Brücke           | 480                                | 01.01.2001-<br>31.01.2010       |
|                                   | Agnesburg A    | Einschnitt                                | Beton                  | freie<br>Strecke | 620                                | 02.01.2001-<br>31.01.2010       |
| A81                               | Keltensiedlung | Wald                                      | Beton                  | freie<br>Strecke | 370                                | 01.01.2001-<br>31.01.2010       |
|                                   | Rötenstein B   | über Tal<br>mit Wald/<br>Wiese/<br>Äckern | Stahlkon-<br>struktion | Brücke           | 300                                | 01.01.2001-<br>31.01.2010       |
|                                   | Muckbach A     | über Tal<br>mit Wald/<br>Wiese/<br>Äckern | Hohlkasten-<br>brücke  | Brücke           | 300                                | 01.01.2001-<br>31.01.2010       |
|                                   | Holzspitze     | eben zur<br>Umge-<br>bung                 | Beton                  | freie<br>Strecke | 370                                | 01.01.2001-<br>31.01.2010       |
|                                   | Widdern A      | über mit-<br>telgroßen<br>Fluss/<br>Kanal | Stahlkon-<br>struktion | Brücke           | 265                                | 01.01.2001-<br>31.01.2010       |
|                                   | Horb A         | über mit-<br>telgroßen<br>Fluss/<br>Kanal | Stahlkon-<br>struktion | Brücke           | 488                                | 01.01.2001 -<br>31.01.2010      |
|                                   | Weigenbachtal  | Wald                                      | Asphalt                | freie<br>Strecke | 703                                | 01.01.2001-<br>31.01.2010       |
|                                   | Trossingen     | eben zur<br>Umge-<br>bung                 | Asphalt                | freie<br>Strecke | 710                                | 01.01.2001-<br>31.01.2010       |

|      |                    |                                |                   |               |     |                       |
|------|--------------------|--------------------------------|-------------------|---------------|-----|-----------------------|
|      | Immensitz          | über Tal mit Wald/Wiese/Äckern | Betonkonstruktion | Brücke        | 740 | 01.01.2001-31.01.2010 |
|      | Hegaublick         | über kleinen Fluss/Kanal       | Asphalt           | freie Strecke | 790 | 01.01.2001-31.01.2010 |
| A 96 | Herfatz Tunnel Süd | k. A.                          | k. A.             | k. A.         | 577 | 01.01.2001-31.01.2010 |
|      | Argenbrücke Nord   | über Tal mit Wald/Wiese/Äckern | Betonkonstruktion | Brücke        | 542 | 01.01.2001-31.01.2010 |

|       |                |                                |                   |               |     |                       |
|-------|----------------|--------------------------------|-------------------|---------------|-----|-----------------------|
| A6    | Sulmtal A      | eben zur Umgebung              | Asphalt           | freie Strecke | 186 | 01.01.2001-31.01.2010 |
|       | Braunsbach A   | k. A.                          | k. A.             | Brücke        | 430 | 01.01.2001-31.01.2010 |
|       | Wolfskopf      | Einschnitt                     | Asphalt           | freie Strecke | 440 | 01.01.2001-31.01.2010 |
|       | Gronachbrücke  | über Tal mit Wald/Wiese/Äckern | Betonkonstruktion | Brücke        | 440 | 01.01.2001-31.01.2010 |
| A 656 | Heidelberg     | über großen Fluss/Kanal        | orthotrope Platte | Brücke        | 109 | 01.01.2001-31.01.2010 |
| A8    | AK Stuttgart A | über Straße/Schiene            | Asphalt           | Brücke        | 505 | 01.01.2001-31.01.2010 |
|       | Stuttgart 1    | k. A.                          | k. A.             | freie Strecke | 385 | 01.01.2001-31.01.2010 |
|       | Stuttgart 4    | k. A.                          | k. A.             | freie Strecke | 363 | 01.01.2001-31.01.2010 |
| A 61  | Hockenheim A   | über großen Fluss/Kanal        | Stahlkonstruktion | Brücke        | 107 | 01.01.2001-31.01.2010 |
| A 98  | Homburg        | Einschnitt                     | Asphalt           | freie Strecke | 345 | 01.01.2001-31.01.2010 |
|       | Wiesebrücke    | über Tal mit Wald/Wiese/Äckern | Hohlkastenbrücke  | Brücke        | 303 | 01.01.2001-31.01.2010 |

**Tabelle 9.2: Merkmals- bzw. Variablenliste für die datenbasierte Modellierung**

Eigene Darstellung

| Merkmal in Bezug auf $X$ und $y$ | Beschreibung  |   | Abkürzung (u. a. für Programmcode und Regressionsmodell) | Datensatz |
|----------------------------------|---|---|--|-----------|
| $X_1$                            | Lufttemperatur gemessen in zwei Metern Höhe in $^{\circ}\text{C}$                                       | Modell-<br>daten aus<br>IMK Si-<br>mulation | $T_{\text{Air}}$   | A und B   |
| $X_2$                            | Regen in mm   |   | $\text{Rain}_{\text{Tot}}$                               | A und B   |
| $X_3$                            | Schnee in mm  |   | $\text{Snow}_{\text{Tot}}$                               | A und B   |
| $X_4$                            | Relative Feuchte gemessen in zwei Metern Höhe in %  |   | $\text{relHum}$  | A und B   |
| $X_5$                            | Direkte, nach unten gerichtete kurzwellige Strahlung an der Oberfläche in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ |   | $\text{ASWDIR}_S$  | A und B   |
| $X_6$                            | Diffuse, nach unten gerichtete kurzwellige Strahlung an der Oberfläche in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ |   | $\text{ASWDIF}_S$  | A und B   |
| $X_7$                            | U-Komponente des Winds gemessen in 10 Metern Höhe in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$                        |   | $\text{Wind}_U$  | A und B   |
| $X_8$                            | V-Komponente des Winds gemessen in 10 Metern Höhe in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$                        |   | $\text{Wind}_V$  | A und B   |
| $X_9$                            | Langwellige, nach unten gerichtete Strahlung an der Oberfläche in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$         |   | $\text{ALWD}_S$  | A und B   |
| $X_{10}$                         | Taupunkt-Temperatur in zwei Metern Höhe in $^{\circ}\text{C}$   |   | $\text{TD}$  | A und B   |
| $X_{11}$                         | Totaler Bewölkungsgrad  |   | $\text{Cloud}$   | A und B   |
| $X_{12}$                         | Bodenwasser in m  |   | $\text{Soil}_{\text{Water}}$                             | A und B   |

|           |  |  |                          |         |
|-----------|--|--|--------------------------|---------|
| $X_{13}$  | Bodentemperatur in °C  |  | $T_{\text{Soil}}$        | A und B |
| $X_{14}$  | Luftdruck in Pa  |  | PressSurf                | A und B |
| $y$       | Belagtemperatur in °C  | Gemessen an den GMA-Stationen                | $T_{\text{Street}}$      | A       |
| $X_0$     | Lufttemperatur an der GMA-Station  |  | $T_{\text{AirStation}}$  | A       |
| $\hat{y}$ | Modellierte Belagtemperatur in °C  | Modelliert/berechnet im Modell dieser Arbeit | $T_{\text{StreetModel}}$ | B       |
| $t$       | Zeit in Stunden [h]  |  |                          | A und B |
|           | Daten der Klimasimulation des Referenzzeitraums 1971 bis 2000  |  | <code>_past</code>       | B       |
|           | Daten der Klimasimulation der nahen Zukunft 2021 bis 2050  |  | <code>_future</code>     | B       |
|           | IIR-Filter (Tiefpassfilter) mit $a = 0,7$ angewendet auf die Daten der Klimavariablen → Wert 1 beinhaltet eine starke Glättung |  | <code>_IIR</code>        | A und B |

**Tabelle 9.3: Berechnete Polynom-Regressionsmodelle der GMA-Stationen durch die Klimamerkmale**

Eigene Darstellung

Aufgelistet sind die jeweiligen GMA-Stationen, das für die jeweilige Station errechnete **Regressionsmodell** und die Länge der Zeitreihe in Stunden sowie das Bestimmtheitsmaß  $R^2(y, \hat{y})$ , der Korrelationskoeffizient  $r_{y, \hat{y}}$ , der mittlere absolute Fehler  $\text{mean}(|\hat{y} - y|)$  in Kelvin und die Verbesserung des Korrelationskoeffizienten durch die Hinzunahme weiterer Merkmale. Die Beschreibung der Merkmale befindet sich in der Variablenliste (vgl. Tabelle 9.2, S. 185f.).  $T_{\text{Street}}$  bezeichnet hier die modellierte Belagstemperatur.

| Autobahntransekt und GMA-Station | Polynom-Regressionsmodell der jeweiligen GMA-Station  | Länge der Zeitreihe (Max. 87647) |
|----------------------------------|---|----------------------------------|
| A5<br>Karlsruhe                  | $T_{\text{Street}}(k) = 1,67709 + 0,518162 \times (T_{\text{Soil}}[k]) + 0,0745372 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[k]) - 0,000138686 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[k])^2 + 0,235351 \times (\text{TD}_{\text{IR}}[k-2])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,636875$ $r_{y, \hat{y}} = 0,798044$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,908590$ $\left( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,757;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,794;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,796;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,798$ | 28904                            |
| A5<br>Dreieck Weil               | $T_{\text{Street}}(k) = 2,30288 + 0,694768 \times (T_{\text{Soil}}[k]) + 0,0605854 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[k]) - 0,0199127 \times (\text{TD}_{\text{IR}}[k-72])^2 + 0,454353 \times (\text{TD}_{\text{IR}}[k])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,679074$ $r_{y, \hat{y}} = 0,824060$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 4,167320$ $\left( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,791;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,814;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,821;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,824$        | 53204                            |

|    |                   |  |       |
|----|-------------------|--|-------|
| A7 | West-<br>hausen A | $T_{\text{Street}}(k) = 0,307889 + 0,505454 \times (T_{\text{Soil}}[k]) + 0,0387875 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[k]) + 0,438448 \times (T_{\text{Air}}[k]) + 2,00842 \times 10^{-05} (\text{ASWDIR}_{\text{SIR}}[k])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,820414$ $r_{y, \hat{y}} = 0,905767$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,961730$ $\left(  r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,869;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,901;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,903;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,906 \right)$ | 52983 |
|    | Agnesburg<br>A    | $T_{\text{Street}}(k) = 2,92233 + 0,840817 \times (T_{\text{Air}}[k]) - 0,0491264 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[k-2]) + 0,0270092 \times (\text{ASWDIFD}_s[k]) + 0,400867 \times (T_{\text{SoilIR}}[k-71])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,641742$ $r_{y, \hat{y}} = 0,801088$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 3,36824$ $\left(  r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,747;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,770;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,784;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,801 \right)$               | 57998 |

|     |                     |  |       |
|-----|---------------------|--|-------|
| A81 | Kelten-<br>siedlung | $T_{Street}(k) = 1,73194 + 0,851043 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0519690 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k] - 2,66394 \times (Cloud_{IRR}[k]) + 0,243266 \times (T_{Air}[k-24]))$<br>$R^2(y, \hat{y}) = 0,865497$<br>$r_{y,\hat{y}} = 0,930321$<br>$mean( \hat{y} - y ) = 2,929810$<br>$( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,890;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,925;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,928;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,930)$                        | 62522 |
|     | Rötenstein<br>B     | $T_{Street}(k) = -1,09805 + 0,552631 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0558209 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k-1]) + 0,554574 \times (T_{Air}[k]) + 3,80262 \times 10^{-05} \times (ASWDIFD_{SIRR}[k])^2$<br>$R^2(y, \hat{y}) = 0,856458$<br>$r_{y,\hat{y}} = 0,92545$<br>$mean( \hat{y} - y ) = 2,73958$<br>$( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,881;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,920;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,923;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,925)$     | 13354 |
|     | Muckbach<br>A       | $T_{Street}(k) = -0,116865 + 0,69621 \times (T_{Soil}[k]) + 0,045247 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k]) + 1,59444 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIRR}[k])^2 + 0,202795 \times (T_{SoilIRR}[k-24])$<br>$R^2(y, \hat{y}) = 0,825063$<br>$r_{y,\hat{y}} = 0,90833$<br>$mean( \hat{y} - y ) = 2,82413$<br>$( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,863;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,903;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,906;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,908)$  | 57460 |
|     | Holzspitze          | $T_{Street}(k) = 0,00562629 + 0,799301 \times (T_{Soil}[k]) + 0,041941 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k]) + 3,21967 \times 10^{-08} \times (ASWDIR_{SIRR}[k])^3 + 0,269239 \times (T_{SoilIRR}[k-24])$<br>$R^2(y, \hat{y}) = 0,8513$<br>$r_{y,\hat{y}} = 0,922659$<br>$mean( \hat{y} - y ) = 2,98611$<br>$( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,891;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,917;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,919;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,923)$ | 54840 |

|                    |  |       |
|--------------------|--|-------|
| Widdern<br>A       | $T_{Street}(k) = 0,443243 + 0,685465 \times (T_{Soil}[k]) + 0,053334 \times (ASWDIFD_{SIIR}[k]) + 0,0072888 \times (T_{SoilSIIR}[k-48])^2 + 0,458421 \times (T_{Air}[k-1])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,667721$ $r_{y,\hat{y}} = 0,817142$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 4,48193$ $\left( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,791;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,814;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,816;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,817$               | 53356 |
| Horb A             | $T_{Street}(k) = 0,39234 + 0,475173 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0488967 \times (ASWDIFD_{SIIR}[k-1]) + 0,61639 \times (T_{Air}[k])^2 + 2,60061 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIIR}[k])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,854243$ $r_{y,\hat{y}} = 0,924253$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 3,15865$ $\left( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,889;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,918;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,921;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,924$  | 91901 |
| Weigen-<br>bachtal | $T_{Street}(k) = -4,33832 + 0,554521 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0445784 \times (ASWDIFD_{SIIR}[k-1]) + 0,483944 \times (T_{Air}[k])^2 + 15,1795 \times (Soil_{Water}[k-24])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,79265$ $r_{y,\hat{y}} = 0,890309$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 3,36824$ $\left( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,849;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,884;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,888;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,890$                 | 53131 |
| Tros-<br>singen    | $T_{Street}(k) = 0,795887 + 0,735797 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0553448 \times (ASWDIFD_{SIIR}[k]) + 0,410506 \times (TD_{IIR}[k-24]) + 3,55649 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIIR}[k])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,859003$ $r_{y,\hat{y}} = 0,926824$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,9745$ $\left( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,876;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,917;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,922;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,927$ | 53526 |

|                          |  |       |
|--------------------------|--|-------|
| Immensitz                | $T_{Street}(k) = -0,145362 + 0,496947 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0507586 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k-1]) - 4,5491 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIRR}[k-1])^2 + 0,524205 \times (TD_{IIR}[k-1])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,845802$ $r_{y, \hat{y}} = 0,919675$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,9725$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,876;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,911;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,913;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,920)$ | 57226 |
| He-<br>gaublick          | $T_{Street}(k) = -0,622231 + 0,256173 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0464728 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k]) + 2,92843 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIRR}[k])^2 + 0,859775 \times (T_{SoilIIR}[k])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,874226$ $r_{y, \hat{y}} = 0,935001$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,90805$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,899;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,927;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,932;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,935)$  | 60234 |
| Herfatz<br>Tunnel<br>Süd | $T_{Street}(k) = 0,336788 + 0,829831 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0476765 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k]) - 0,000547496 \times (T_{Soil}[k])^3 + 0,436317 \times (T_{Air}[k])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,84462$ $r_{y, \hat{y}} = 0,919032$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 3,02436$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,880;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,909;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,915;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,919)$                         | 9751  |
| Argen-<br>brücke<br>Nord | $T_{Street}(k) = 0,0969832 + 0,938283 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0552609 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k]) + 2,16034 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIRR}[k])^2 + 0,29958 \times (TD_{IIR}[k-24])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,854544$ $r_{y, \hat{y}} = 0,924415$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 3,31129$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,882;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,918;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,921;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,924)$   | 63589 |

A96

A6

|                    |  |       |
|--------------------|--|-------|
| Sulmtal A          | $T_{\text{Street}}(\mathbf{k}) = 1,05316 + 0,846144 \times (T_{\text{Soil}}[\mathbf{k}]) + 0,0438857 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[\mathbf{k}]) + 0,220629 \times (T_{\text{Soil}}[\mathbf{k}-48]) + 2,58463 \times 10^{-05} \times (\text{ASWDIR}_{\text{SIR}}[\mathbf{k}])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,877266$ $r_{y, \hat{y}} = 0,936625$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,65497$ $\left(  r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,901;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,931;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,934;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,937 \right)$ | 56604 |
| Brauns-<br>bach A  | $T_{\text{Street}}(\mathbf{k}) = 0,703928 + 0,468449 \times (T_{\text{Soil}}[\mathbf{k}]) + 0,0437141 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[\mathbf{k}]) + 0,66533 \times (T_{\text{Air}}[\mathbf{k}]) + 2,51604 \times 10^{-05} \times (\text{ASWDIR}_{\text{SIR}}[\mathbf{k}])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,871712$ $r_{y, \hat{y}} = 0,933655$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,8697$ $\left(  r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,899;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,926;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,931;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,933 \right)$      | 50965 |
| Wolfskopf          | $T_{\text{Street}}(\mathbf{k}) = 0,496178 + 0,552582 \times (T_{\text{Soil}}[\mathbf{k}]) + 0,0454497 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[\mathbf{k}]) + 0,559377 \times (T_{\text{Air}}[\mathbf{k}]) + 2,46318 \times 10^{-05} \times (\text{ASWDIR}_{\text{SIR}}[\mathbf{k}])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,876646$ $r_{y, \hat{y}} = 0,936294$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,82159$ $\left(  r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,902;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,931;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,934;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,936 \right)$    | 58775 |
| Gronach-<br>brücke | $T_{\text{Street}}(\mathbf{k}) = 0,833006 + 0,528998 \times (T_{\text{Soil}}[\mathbf{k}]) + 0,0478351 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[\mathbf{k}]) + 0,553187 \times (T_{\text{Air}}[\mathbf{k}]) + 2,86757 \times 10^{-05} \times (\text{ASWDIR}_{\text{SIR}}[\mathbf{k}])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,870757$ $r_{y, \hat{y}} = 0,933144$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,81041$ $\left(  r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,891;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,927;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,930;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,933 \right)$    | 44063 |

|          |                   |  |       |
|----------|-------------------|--|-------|
| A<br>656 | Heidel-<br>berg   | $T_{Street}(k) = 0,26584 + 0,928288 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0457298 \times (ASWDIFD_{SIR}[k]) + 1,65222 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIR}[k-1])^2 + 0,000302174 \times (T_{Soil}[k])^3$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,806337$ $r_{y,\hat{y}} = 0,897963$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,85426$ $\left( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,845;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,894;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,896;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,898$ | 57322 |
| A8       | AK<br>Stuttgart A | $T_{Street}(k) = 2,2929 + 0,639406 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0507826 \times (ASWDIFD_{SIR}[k]) - 2,87389 \times (Cloud_{IR}[k]) + 0,494944 \times (T_{Air}[k])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,879061$ $r_{y,\hat{y}} = 0,937583$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,79112$ $\left( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,901;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,931;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,935;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,938$                              | 54124 |
| A8       | Stuttgart 1       | $T_{Street}(k) = 2,44983 + 1,05946 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0569386 \times (ASWDIFD_{SIR}[k]) - 3,27506 \times (Cloud_{IR}[k]) + 0,219328 \times (T_{SoilIR}[k-72])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,872132$ $r_{y,\hat{y}} = 0,93388$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,87641$ $\left( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,890;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,924;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,930;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,934$                         | 13201 |
| A8       | Stuttgart 4       | $T_{Street}(k) = 3,41962 + 1,14174 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0588906 \times (ASWDIFD_{SIR}[k]) - 3,72147 \times (Cloud_{IR}[k]) + 0,198677 \times (T_{SoilIR}[k-72])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,883801$ $r_{y,\hat{y}} = 0,940107$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 3,22476$ $\left( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,902;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,933;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,937;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,940$                        | 17806 |

|     |              |  |       |
|-----|--------------|--|-------|
| A61 | Hockenheim A | $T_{Street}(k) = 0,338012 + 0,239791 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0485858 \times (ASWDIFD_{SIIR}[k-1]) + 0,660476 * (T_{Air}[k]) + 2,21839 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIIR}[k])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,820894$ $r_{y,\hat{y}} = 0,906032$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,91834$ $\left( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,864;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,900;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,904;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,906$       | 40193 |
| A98 | Homburg      | $T_{Street}(k) = 0,0690744 + 0,886772 \times (T_{Soil}[k]) + 0,060999 \times (ASWDIFD_{SIIR}[k]) + 4,0517 \times 10^{-08} * (ASWDIR_{SIIR}[k])^3 + 0,336307 \times (TD_{IIR}[k-2])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,859248$ $r_{y,\hat{y}} = 0,926956$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 3,23531$ $\left( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,881;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,917;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,923;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,928$       | 53674 |
| A98 | Wiesebrücke  | $T_{Street}(k) = 0,579147 + 0,935509 \times (T_{Soil}[k]) + 0,0434014 \times (ASWDIFD_{SIIR}[k]) + 0,278687 \times (T_{Soil}[k-48]) + 3,36633 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIIR}[k])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,844435$ $r_{y,\hat{y}} = 0,918931$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 3,3496$ $\left( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})\right  = 0,881;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})\right  = 0,911;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})\right  = 0,915;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})\right  = 0,919$ | 51612 |

**Tabelle 9.4: Berechnete Polynom-Regressionsmodelle der GMA-Stationen durch die Klimamerkmale und die gemessene Lufttemperatur an der jeweiligen GMA-Station**

Eigene Darstellung

Aufgelistet sind die jeweiligen GMA-Stationen, das für die jeweilige Station errechnete [Regressionsmodell](#) und die Länge der Zeitreihe in Zeitstunden sowie das Bestimmtheitsmaß  $R^2(y, \hat{y})$ , der Korrelationskoeffizient  $r_{y, \hat{y}}$ , der mittlere absolute Fehler  $\text{mean}(|\hat{y} - y|)$  in Kelvin und die Verbesserung des Korrelationskoeffizienten durch die Hinzunahme weiterer Merkmale. Die Beschreibung der Merkmale befindet sich in der Variablenliste (vgl. Tabelle 9.2, S. 185f.).

$T_{\text{Street}}$  bezeichnet hier die modellierte Belagstemperatur.

| Auto-<br>bahntransekt<br>und<br>GMA-Station | Polynom-Regressionsmodell   | Länge<br>der<br>Zeit-<br>reihe<br>(Max.<br>87647) |
|---|---|---|
| A5  | Karlsruhe<br>$T_{\text{Street}}(k) = 0,565639 + 0,837666 \times (T_{\text{AirStation}}[\text{k}]) + 0,0291193 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[\text{k}]) - 0,0045737 \times (T_{\text{AirStationIR}}[\text{k} - 24])^2$ $+ 9,01678 \times 10^{-06} \times (\text{ASWDIR}_{\text{SIR}}[\text{k}])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,698029$ $r_{y, \hat{y}} = 0,835482$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,32966$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,810;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,832;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,834;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,835)$ | 28904   |

|      |                 |  |       |
|------|-----------------|--|-------|
|      | Dreieck Weil    | $T_{Street}(k) = 1,56059 + 0,905586 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0351788 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k]) + 0,0174154 \times (TD_{IIR}[k-72])^2 + 0,011977 \times (T_{Air_S}[k])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,729662$ $r_{y, \hat{y}} = 0,854203$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 3,19315$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,831;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,844;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,851;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,854)$                          | 53204 |
| A7   | Westhausen A    | $T_{Street}(k) = -0,535225 + 0,960835 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0262659 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k]) + 2,53691 \cdot 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIRR}[k])^2 + 0,229752 \times (\text{Wind}_{VIIR}[k-2])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,90118$ $r_{y, \hat{y}} = 0,949272$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,24204$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,927;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,944;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,948;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,949)$ | 52983 |
|      | Agnesburg A     | $T_{Street}(k) = -0,0588325 + 1,07017 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0197853 \times (T_{AirStation}[k])^2 - 0,276725 \times (\text{Wind}_v[k]) - 0,000204017 \times (T_{AirIIR}[k-2])^3$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,930812$ $r_{y, \hat{y}} = 0,964786$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,02273$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,953;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,962;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,964;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,965)$                 | 57998 |
| A 81 | Kelten-siedlung | $T_{Street}(k) = -0,509676 + 0,872304 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0279779 \times (ASWDIR_{SIRR}[k])^2 + 0,0106241 \times (T_{AirStation}[k])^2 + 0,106017 \times (T_{AirStationIIR}[k-72])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,952294$ $r_{y, \hat{y}} = 0,975855$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 1,65228$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,961;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,971;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,975;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,976)$           | 62522 |

|              |   |       |
|--------------|---|-------|
| Rötenstein B | $T_{\text{Street}}(k) = -0,419893 + 1,01715 \times (T_{\text{AirStation}}[k]) + 0,0379013 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIIR}}[k-1]) + 0,479139 \times (T_{\text{Soil}}[k]) - 0,305845 \times (T_{\text{AirStationIR}}[k-2])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,914629$ $r_{y, \hat{y}} = 0,956367$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,16658$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,917;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,944;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,954;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,956)$                         | 13354 |
| Muckbach A   | $T_{\text{Street}}(k) = -1,17891 + 0,267593 \times (T_{\text{Soil}}[k]) + 0,0371225 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIIR}}[k]) + 0,783591 \times (T_{\text{AirStation}}[k]) - 0,305845 \times (T_{\text{AirStationIR}}[k])^3$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,877829$ $r_{y, \hat{y}} = 0,936925$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,31155$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,863;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,903;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,912;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,937)$                           | 57460 |
| Holzspitze   | $T_{\text{Street}}(k) = 0,0383813 + 1,12721 \times (T_{\text{AirStation}}[k]) + 0,0229533 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIIR}}[k]) + 3,09729 \times 10^{-08} * (\text{ASWDIR}_{\text{SIIR}}[k])^3 - 0,173823 \times (\text{Wind}_{\text{VIIR}}[k-2])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,927951$ $r_{y, \hat{y}} = 0,963302$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,04236$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,949;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,958;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,962;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,963)$ | 54840 |
| Widdern A    | $T_{\text{Street}}(k) = -0,314112 + 1,05588 \times (T_{\text{AirStation}}[k]) + 0,0313714 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIIR}}[k]) + 0,0171471 * (T_{\text{Soil}}[k])^2 - 7,7618 \times 10^{-06} \times (T_{\text{AirStationIR}}[k])^4$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,715817$ $r_{y, \hat{y}} = 0,846059$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 3,38666$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,824;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,837;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,843;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,846)$               | 53356 |

|               |  |       |
|---------------|--|-------|
| Horb A        | $T_{\text{Street}}(k) = -0,35452 + 1,03363 \times (T_{\text{AirStation}}[k]) + 0,0360566 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[k]) + 2,63165 \times 10^{-05} \times (\text{ASWDIR}_{\text{SIR}}[k])^2 + 0,00724755 \times (T_{\text{AirStation}}[k])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,951569$ $r_{y, \hat{y}} = 0,975484$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 1,80698$ $\left(  r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,947;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,970;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,974;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,975 \right)$ | 91901 |
| Weigenbachtal | $T_{\text{Street}}(k) = -0,741168 + 0,0333094 \times (T_{\text{AirStation}}[k])^2 + 0,596882 \times (T_{\text{AirStation}}[k]) + 0,000735292 \times (T_{\text{AirStationIR}}[k])^3 + 0,0219061 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[k-2])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,874213$ $r_{y, \hat{y}} = 0,934994$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,58342$ $\left(  r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,881;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,905;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,927;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,935 \right)$             | 53131 |
| Trossingen    | $T_{\text{Street}}(k) = 0,2848 + 0,93283 \times (T_{\text{AirStation}}[k]) + 0,0328918 \times (T_{\text{AirStation}}[k])^2 - 0,000878674 \times (T_{\text{AirStation}}[k])^3 + 0,0271176 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[k])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,921164$ $r_{y, \hat{y}} = 0,959773$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,12148$ $\left(  r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,892;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,937;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,951;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,960 \right)$                     | 53526 |
| Immensitz     | $T_{\text{Street}}(k) = -0,191425 + 0,941065 \times (T_{\text{AirStation}}[k-1]) + 0,0265664 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIR}}[k-1]) + 246811 \times 10^{-05} \times (\text{ASWDIR}_{\text{SIR}}[k-1])^2 + 0,00807947 \times (T_{\text{AirStationIR}}[k])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,925539$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 1,98974$ $\left(  r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,941;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,956;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,960;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,962 \right)$                    | 57226 |

|         |                          |  |       |
|---------|--------------------------|--|-------|
|         | Hegau-<br>blick          | $T_{Street}(k) = 0,0221817 + 1,04989 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0259492 \times (ASWDIFD_{SIR}[k]) - 0,00851518 \times (T_{AirStation}[k])^2 + 1,97196 \times 10^{-08} \times (ASWDIR_{SIR}[k])^3$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,955224$ $r_{y, \hat{y}} = 0,977356$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 1,81162$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,961;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,973;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,976;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,978)$        | 60234 |
| A<br>96 | Herfatz<br>Tunnel Süd    | $T_{Street}(k) = 11,0639 + 1,0535 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0256249 \times (ASWDIFD_{SIR}[k]) - 27,8207 \times (\text{Soil}_{WaterIR}[k]) - 0,0524267 \times (\text{Wind}_{VIR}[k-2])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,928198$ $r_{y, \hat{y}} = 0,96343$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 1,98787$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,947;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,959;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,962;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,963)$                 | 9751  |
|         | Argen-<br>brücke<br>Nord | $T_{Street}(k) = 0,741924 + 1,0457 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0257154 \times (ASWDIFD_{SIR}[k]) + 2,77721 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIR}[k])^2 + 0,0077881 \times (T_{AirStation}[k])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,948345$ $r_{y, \hat{y}} = 0,970079$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,01403$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,952;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,963;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,968;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,970)$           | 63589 |
| A6      | Sulmtal A                | $T_{Street}(k) = 0,0662263 + 0,934075 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0248426 \times (ASWDIFD_{SIR}[k-1]) + 0,00932911 \times (T_{AirStationIR}[k])$ $+ 2,36104 \times 10^{-08} \times (ASWDIR_{SIR}[k-1])^3$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,954713$ $r_{y, \hat{y}} = 0,977094$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 1,65456$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,962;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,971;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,975;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,977)$ | 56604 |

|          |                    |  |       |
|----------|--------------------|--|-------|
|          | Brauns-<br>bach A  | $T_{Street}(k) = -0,385548 + 0,851815 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0334697 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k]) + 0,318402 \times (T_{Soil}[k]) + 1,84286 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIRR}[k-1])^2$<br>$R^2(y, \hat{y}) = 0,932403$<br>$r_{y, \hat{y}} = 0,96561$<br>$mean( \hat{y} - y ) = 1,94438$<br>$( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,934;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,956;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,962;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,966)$                 | 50965 |
|          | Wolfskopf          | $T_{Street}(k) = 0,517915 + 1,04349 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0203088 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k]) + 3,67572 \times 10^{-08} \times (ASWDIR_{SIRR}[k])^3 + 0,00479559 \times (T_{AirStation}[k])^2$<br>$R^2(y, \hat{y}) = 0,975533$<br>$r_{y, \hat{y}} = 0,987691$<br>$mean( \hat{y} - y ) = 1,2784$<br>$( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,978;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,985;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,987;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,988)$           | 58775 |
|          | Gronach-<br>brücke | $T_{Street}(k) = -0,563473 + 1,10435 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0320674 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k]) + 3,32962 \times 10^{-05} \times (ASWDIR_{SIRR}[k])^2 + 0,165255 \times (Wind_{VIR}[k-2])$<br>$R^2(y, \hat{y}) = 0,965057$<br>$r_{y, \hat{y}} = 0,982373$<br>$mean( \hat{y} - y ) = 1,40732$<br>$( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,959;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,978;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,982;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,982)$               | 44063 |
| A<br>656 | Heidelberg         | $T_{Street}(k) = 0,0525001 + 0,78359 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0255738 \times (ASWDIFD_{SIRR}[k]) + 2,74198e-08 \times (ASWDIR_{SIRR}[k-1])^3 - 4,32235 \times 10^{-05} \times (T_{AirStationIR}[k-24])^3$<br>$R^2(y, \hat{y}) = 0,896674$<br>$r_{y, \hat{y}} = 0,946929$<br>$mean( \hat{y} - y ) = 2,32325$<br>$( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,927;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,944;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,946;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,948)$ | 57322 |

|         |                   |  |       |
|---------|-------------------|--|-------|
|         | AK<br>Stuttgart A | $T_{\text{Street}}(k) = -0,103702 + 1,13668 \times (T_{\text{AirStation}}[k]) + 0,0310325 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIRR}}[k]) + 3,30893 \times 10^{-05} \times (\text{ASWDIR}_{\text{SIRR}}[k])^2 - 0,374325 \times (\text{Wind}_{\text{VIIR}}[k-2])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,963465$ $r_{y, \hat{y}} = 0,981563$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 1,48923$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,958;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,975;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,979;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,982)$ | 54124 |
| A8      | Stuttgart 1       | $T_{\text{Street}}(k) = 0,770733 + 0,852674 \times (T_{\text{AirStation}}[k]) + 0,015368 \times (T_{\text{AirStation}}[k])^2 + 0,00011345 \times (\text{ASWDIR}_{\text{SIRR}}[k])^2 + 0,163254 \times (T_{\text{SoiIIR}}[k-72])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,95864$ $r_{y, \hat{y}} = 0,979103$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 1,67458$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,959;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,973;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,977;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,979)$                            | 13201 |
|         | Stuttgart 4       | $T_{\text{Street}}(k) = 0,770733 + 0,852674 \times (T_{\text{AirStation}}[k]) + 0,015368 \times (T_{\text{AirStation}}[k])^2 + 0,00011345 \times (\text{ASWDIR}_{\text{SIRR}}[k])^2 + 0,163254 \times (T_{\text{SoiIIR}}[k-72])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,907935$ $r_{y, \hat{y}} = 0,952856$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,79788$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,902;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,933;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,948;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,953)$                           | 17806 |
| A<br>61 | Hockenheim A      | $T_{\text{Street}}(k) = -1,32511 + 1,07526 \times (T_{\text{AirStation}}[k]) + 0,0328536 \times (\text{ASWDIFD}_{\text{SIRR}}[k]) + 1,35348 \times 10^{-05} \times (\text{ASWDIR}_{\text{S}}[k-2])^2 - 0,123156 * (T_{\text{Air}}[k])$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,908021$ $r_{y, \hat{y}} = 0,952902$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 2,10749$ $( r_{y, \hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,928;  r_{y, \hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,950;  r_{y, \hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,952;  r_{y, \hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,953)$                     | 40193 |

|                  |   |       |
|------------------|---|-------|
| Homburg          | $T_{Street}(k) = +0,0864542 + 0,994015 \times (T_{AirStation}[k-1]) + 0,0309863 \times (ASWDIFD_{SUR}[k]) + 3,2639 \times 10^{-08} \times (ASWDIR_s[k-1])^3$ $+ 0,00775865 \times (T_{AirStation}[k-1])^2$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,945177$ $r_{y,\hat{y}} = 0,972202$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 1,89427$ $( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,948;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,965;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,971;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,972)$ | 53674 |
| Wiese-<br>brücke | $T_{Street}(k) = 0,0794427 + 0,960648 \times (T_{AirStation}[k]) + 0,0231442 \times (ASWDIFD_{SUR}[k]) + 0,0115171 \times (T_{AirStation}[k])^2 + 2,41361 \times 10^{-08} \times (ASWDIR_s[k-1])^3$ $R^2(y, \hat{y}) = 0,945896$ $r_{y,\hat{y}} = 0,972472$ $\text{mean}( \hat{y} - y ) = 1,9493$ $( r_{y,\hat{y}}(1 \text{ Merkmal})  = 0,956;  r_{y,\hat{y}}(2 \text{ Merkmale})  = 0,967;  r_{y,\hat{y}}(3 \text{ Merkmale})  = 0,971;  r_{y,\hat{y}}(4 \text{ Merkmale})  = 0,973)$         | 51612 |

**Tabelle 9.5: Klasseneinteilung des Vergleichs der Glättegefahren zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft**

Für jede Glättegefahr wird eine eigene Klasseneinteilung dargestellt. Diese Klasseneinteilung schließt den Vergleich zwischen den einzelnen Glättegefahren jedoch aus. Die Werte errechnen sich anhand der Differenz zwischen Wert der nahen Zukunft und Wert des Referenzzeitraums. Die Klasseneinteilung erfolgt anhand äquidistanter Klassengrößen.

Eigene Darstellung anhand der Modelldaten

|     | <b>Glätte 1</b> | <b>Glätte 2A</b> | <b>Glätte 2B</b> | <b>Glätte 3A</b> | <b>Glätte 3B</b> |
|-----|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| ↔   | 0               | 0                | 0                | 0                | 0                |
| ↗   | 1 bis 2245      | 1 bis 1846       | 1 bis 4268       | 1 bis 2343       | 1 bis 2683       |
| ↗↗  | 2246 bis 4490   | 1847 bis 3692    | 4269 bis 8536    | 2344 bis 4686    | 2684 bis 5366    |
| ↗↗↗ | 4491 bis 6736   | 3693 bis 5539    | 8537 bis 12804   | 4687 bis 7029    | 5367 bis 8048    |
| ↘   | -1 bis -2245    | -1 bis -1846     | -1 bis -4268     | -1 bis -2343     | -1 bis -2683     |
| ↘↘  | -2246 bis -4490 | -1847 bis -3692  | -4269 bis -8536  | -2344 bis -4686  | -2684 bis -5366  |
| ↘↘↘ | -4491 bis -6736 | -3693 bis -5539  | -8537 bis -12804 | -4687 bis -7029  | -5367 bis -8048  |

|     | <b>Glätte 4A</b> | <b>Glätte 4B</b> | <b>Glätte 5</b> | <b>Glätte 6</b> |
|-----|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| ↔   | 0                | 0                | 0               | 0               |
| ↗   | 1 bis 1877       | 1 bis 2630       | 1 bis 22        | 1 bis 28        |
| ↗↗  | 1878 bis 3754    | 2631 bis 5260    | 23 bis 44       | 29 bis 56       |
| ↗↗↗ | 3755 bis 5632    | 5261 bis 7890    | 44 bis 66       | 57 bis 85       |
| ↘   | -1 bis -1877     | -1 bis -2630     | -1 bis -22      | -1 bis -28      |
| ↘↘  | -1878 bis -3754  | -2631 bis -5260  | -22 bis -44     | -28 bis -56     |
| ↘↘↘ | -3755 bis -5632  | -5261 bis -7890  | -45 bis -66     | -57 bis -85     |

**Tabelle 9.6: Klasseneinteilung des Vergleichs der Gefahr durch Starkregenereignisse zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft**

Für jede Starkregen-Gefahr wird eine eigene Klasseneinteilung dargestellt. Diese Klasseneinteilung schließt den Vergleich zwischen den einzelnen Starkregenereignissen jedoch aus. Die Werte errechnen sich anhand der Differenz zwischen Wert der nahen Zukunft und Wert des Referenzzeitraums. Die Klasseneinteilung erfolgt anhand äquidistanter Klassengrößen.

Eigene Darstellung anhand der Modelldaten

|     | <b>Starkregen</b> | <b>heftiger Starkregen</b> | <b>sehr heftiger Starkregen</b> |
|-----|-------------------|----------------------------|---------------------------------|
| ↔   | 0                 | 0                          | 0                               |
| ↗   | 1 bis 10          | 1 bis 2                    | 1                               |
| ↗↗  | 11 bis 20         | 3 bis 4                    | 2                               |
| ↗↗↗ | 21 bis 31         | ≥ 5                        | ≥ 3                             |
| ↘   | -1 bis -10        | -1 bis -2                  | -1                              |
| ↘↘  | -11 bis -20       | -3 bis -4                  | -2                              |
| ↘↘↘ | -21 bis -31       | ≤ -5                       | ≤ -3                            |

**Tabelle 9.7: Klasseneinteilung des Vergleichs der Hitzegefahr zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft**

Für jede Hitzegefahr wird eine eigene Klasseneinteilung dargestellt. Diese Klasseneinteilung schließt den Vergleich zwischen den einzelnen Hitzegefahren jedoch aus. Die Werte errechnen sich anhand der Differenz zwischen Wert der nahen Zukunft und Wert des Referenzzeitraums. Die Klasseneinteilung erfolgt anhand äquidistanter Klassengrößen.

Eigene Darstellung anhand der Modelldaten

|     | <b>Hitzegefahr I-A</b> | <b>Hitzegefahr I-B</b> | <b>Hitzegefahr II</b> | <b>Hitzegefahr III-A</b> | <b>Hitzegefahr III-B</b> |
|-----|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| ↔   | 0                      | 0                      | 0                     | 0                        | 0                        |
| ↗   | 1 bis 83               | 1 bis 21               | 1 bis 335             | 1 bis 22                 | 1 bis 5                  |
| ↗↗  | 84 bis 166             | 22 bis 42              | 336 bis 670           | 23 bis 44                | 6 bis 10                 |
| ↗↗↗ | 167 bis 249            | 43 bis 62              | 671 bis 1005          | 45 bis 66                | 11 bis 14                |
| ↘   | -1 bis -83             | -1 bis -21             | -1 bis -335           | -1 bis -22               | -1 bis -5                |
| ↘↘  | -84 bis -166           | -22 bis -42            | -336 bis -670         | -23 bis -44              | -6 bis -10               |
| ↘↘↘ | -167 bis -249          | -43 bis -62            | -671 bis -1005        | -45 bis -66              | -11 bis -14              |

**Tabelle 9.8: Klasseneinteilung des Vergleichs der Hitzegefahr zwischen dem Referenzzeitraum und der nahen Zukunft**

Für jede Windgefahr wird eine eigene Klasseneinteilung dargestellt. Diese Klasseneinteilung schließt den Vergleich zwischen den einzelnen Windgefahren jedoch aus. Die Werte errechnen sich anhand der Differenz zwischen Wert der nahen Zukunft und Wert des Referenzzeitraums. Die Klasseneinteilung erfolgt anhand äquidistanter Klassengrößen.

Eigene Darstellung anhand der Modelldaten

|     | <b>Starker Wind</b> | <b>Steifer Wind</b> | <b>Stürmischer Wind</b> | <b>Sturm</b> | <b>Schwere Sturm</b> |
|-----|---------------------|---------------------|-------------------------|--------------|----------------------|
| ↔   | 0                   | 0                   | 0                       | 0            | 0                    |
| ↗   | 1 bis 547           | 1 bis 42            | k. W.                   | k. W.        | k. W.                |
| ↗↗  | 548 bis 1094        | 43 bis 84           | k. W.                   | k. W.        | k. W.                |
| ↗↗↗ | 1095 bis 1640       | 85 bis 125          | k. W.                   | k. W.        | k. W.                |
| ↘   | -1 bis -547         | -1 bis -42          | k. W.                   | k. W.        | k. W.                |
| ↘↘  | -548 bis -1094      | -43 bis -84         | k. W.                   | k. W.        | k. W.                |
| ↘↘↘ | -1095 bis -1640     | -85 bis -125        | k. W.                   | k. W.        | k. W.                |

|     | <b>Orkanartiger Sturm</b> | <b>Orkan</b> |
|-----|---------------------------|--------------|
| ↔   | 0                         | 0            |
| ↗   | k. W.                     | k. W.        |
| ↗↗  | k. W.                     | k. W.        |
| ↗↗↗ | k. W.                     | k. W.        |
| ↘   | k. W.                     | k. W.        |
| ↘↘  | k. W.                     | k. W.        |
| ↘↘↘ | k. W.                     | k. W.        |

**Tabelle 9.9: Simulierte Ereignisse der Glättegefahren für den Zeitraum 2001 bis 2010**

**Modellauf „R“:** gemessene Belags- und Lufttemperatur; **Modellauf „M“:** modellierte Luft- und Belagtemperatur; **Modellauf „MR“:** modellierte Lufttemperatur und gemessene Belagtemperatur; **Modellauf „RM“:** gemessene Lufttemperatur und modellierte Belagtemperatur  
Modellergebnisse basierend auf den Datensätzen: DWD (2014) und IMK (2014c)

| Autobahntrassekt / GMA-Station |                    | Glätte 1 |      |      |      | Glätte 2A |      |      |      |
|--------------------------------|--------------------|----------|------|------|------|-----------|------|------|------|
|                                |                    | R        | M    | MR   | RM   | R         | M    | MR   | RM   |
| A5                             | Karlsruhe          | 103      | 4    | 318  | 10   | 238       | 6    | 29   | 0    |
|                                | Dreieck Weil       | 16       | 15   | 420  | 7    | 599       | 75   | 196  | 82   |
| A7                             | Westhausen A       | 350      | 17   | 815  | 158  | 892       | 387  | 455  | 243  |
|                                | Agnesburg A        | 674      | 662  | 2028 | 644  | 1987      | 436  | 674  | 442  |
| A81                            | Keltensiedlung     | 398      | 1381 | 1420 | 898  | 1183      | 257  | 215  | 685  |
|                                | Rötenstein B       | 99       | 354  | 527  | 167  | 319       | 92   | 66   | 132  |
|                                | Muckbach A         | 379      | 697  | 905  | 619  | 677       | 193  | 165  | 266  |
|                                | Holzspitze         | 166      | 717  | 825  | 620  | 919       | 370  | 301  | 431  |
|                                | Widdern A          | 297      | 54   | 852  | 170  | 838       | 253  | 301  | 132  |
|                                | Horb A             | 178      | 29   | 960  | 59   | 870       | 121  | 106  | 85   |
|                                | Weigenbachtal      | 282      | 0    | 443  | 17   | 306       | 22   | 155  | 5    |
|                                | Trossingen         | 121      | 631  | 906  | 479  | 1361      | 530  | 604  | 651  |
|                                | Immensitz          | 600      | 1033 | 1999 | 777  | 2217      | 928  | 853  | 1158 |
|                                | Hegaublick         | 404      | 1715 | 1516 | 1292 | 1772      | 879  | 697  | 1261 |
| A96                            | Herfatz Tunnel Süd | 51       | 42   | 230  | 39   | 296       | 113  | 133  | 113  |
|                                | Argenbrücke Nord   | 557      | 1146 | 1633 | 957  | 2049      | 1156 | 1070 | 1300 |
| A656                           | Heidelberg         | 723      | 163  | 991  | 298  | 510       | 271  | 265  | 131  |
| A6                             | Sulmtal A          | 73       | 170  | 636  | 146  | 655       | 105  | 96   | 128  |
|                                | Braunsbach A       | 212      | 2    | 520  | 131  | 689       | 255  | 387  | 125  |
|                                | Wolfskopf          | 115      | 17   | 744  | 139  | 972       | 350  | 369  | 222  |
|                                | Gronachbrücke      | 219      | 2    | 563  | 91   | 584       | 178  | 253  | 87   |
| A8                             | AK Stuttgart A     | 246      | 521  | 1023 | 387  | 895       | 191  | 136  | 310  |
|                                | Stuttgart 1        | 71       | 427  | 324  | 311  | 289       | 74   | 51   | 174  |
|                                | Stuttgart 4        | 90       | 313  | 235  | 303  | 180       | 83   | 40   | 90   |
| A61                            | Hockenheim A       | 286      | 2    | 582  | 48   | 376       | 80   | 100  | 32   |
| A98                            | Homburg            | 231      | 661  | 752  | 1152 | 1046      | 1241 | 549  | 717  |
|                                | Wiesebrücke        | 473      | 542  | 1271 | 741  | 1705      | 854  | 939  | 634  |

| Autobahntrassekt /<br>GMA-Station |                    | Glätte 2B |      |      |      | Glätte 3A |      |      |      |
|-----------------------------------|--------------------|-----------|------|------|------|-----------|------|------|------|
|                                   |                    | R         | M    | MR   | RM   | R         | M    | MR   | RM   |
| A5                                | Karlsruhe          | 910       | 333  | 878  | 276  | 105       | 156  | 133  | 345  |
|                                   | Dreieck Weil       | 2373      | 2204 | 2003 | 2012 | 1597      | 1715 | 1582 | 2144 |
| A7                                | Westhausen A       | 4698      | 4695 | 4840 | 3696 | 284       | 577  | 489  | 950  |
|                                   | Agnesburg A        | 7135      | 5883 | 6874 | 4773 | 487       | 1190 | 929  | 2058 |
| A81                               | Keltensiedlung     | 4861      | 4335 | 4406 | 4139 | 396       | 115  | 156  | 922  |
|                                   | Rötenstein B       | 878       | 1143 | 999  | 780  | 39        | 39   | 65   | 227  |
|                                   | Muckbach A         | 3605      | 3558 | 3761 | 2662 | 127       | 144  | 171  | 548  |
|                                   | Holzspitze         | 4247      | 3819 | 3971 | 3323 | 435       | 245  | 292  | 968  |
|                                   | Widdern A          | 3716      | 3349 | 3678 | 2516 | 183       | 508  | 445  | 901  |
|                                   | Horb A             | 4890      | 4551 | 4454 | 3830 | 482       | 119  | 130  | 1299 |
|                                   | Weigenbachtal      | 2510      | 2838 | 3390 | 1614 | 88        | 748  | 614  | 392  |
|                                   | Trossingen         | 6233      | 5225 | 5685 | 4945 | 1050      | 1318 | 1216 | 1801 |
|                                   | Immensitz          | 9035      | 8341 | 8190 | 8051 | 958       | 646  | 697  | 2061 |
|                                   | Hegaublick         | 8480      | 7775 | 7801 | 7500 | 1068      | 472  | 637  | 1630 |
| A96                               | Herfatz Tunnel Süd | 1100      | 988  | 963  | 907  | 219       | 263  | 233  | 415  |
|                                   | Argenbrücke Nord   | 5757      | 4953 | 5236 | 4695 | 1060      | 1859 | 1914 | 1859 |
| A656                              | Heidelberg         | 2279      | 2778 | 3072 | 1573 | 13        | 422  | 416  | 394  |
| A6                                | Sulmtal A          | 2876      | 1811 | 2564 | 1482 | 347       | 156  | 162  | 897  |
|                                   | Braunsbach A       | 3989      | 3822 | 4206 | 3084 | 337       | 783  | 638  | 915  |
|                                   | Wolfskopf          | 5252      | 4955 | 5013 | 4170 | 540       | 650  | 621  | 1315 |
|                                   | Gronachbrücke      | 4073      | 3945 | 4289 | 3053 | 141       | 630  | 541  | 648  |
| A8                                | AK Stuttgart A     | 4400      | 4313 | 3904 | 3817 | 442       | 88   | 138  | 1059 |
|                                   | Stuttgart 1        | 1508      | 1500 | 1366 | 1380 | 164       | 20   | 41   | 292  |
|                                   | Stuttgart 4        | 1188      | 1356 | 1176 | 1012 | 56        | 35   | 72   | 155  |
| A61                               | Hockenheim A       | 1292      | 1273 | 1355 | 768  | 72        | 154  | 129  | 426  |
| A98                               | Homburg            | 3815      | 5051 | 3461 | 3762 | 424       | 1139 | 1801 | 782  |
|                                   | Wiesebrücke        | 4607      | 3742 | 4194 | 2942 | 266       | 1875 | 1768 | 1350 |

| Autobahntransekt /<br>GMA-Station |                    | Glätte 3B |      |      |      | Glätte 4A |     |     |     |
|-----------------------------------|--------------------|-----------|------|------|------|-----------|-----|-----|-----|
|                                   |                    | R         | M    | MR   | RM   | R         | M   | MR  | RM  |
| A5                                | Karlsruhe          | 217       | 1690 | 1131 | 861  | 218       | 0   | 13  | 0   |
|                                   | Dreieck Weil       | 3548      | 4940 | 5050 | 4016 | 418       | 2   | 72  | 2   |
| A7                                | Westhausen A       | 904       | 3587 | 3293 | 1982 | 719       | 6   | 225 | 3   |
|                                   | Agnesburg A        | 910       | 5002 | 3915 | 3329 | 1804      | 233 | 469 | 298 |
| A81                               | Keltensiedlung     | 779       | 2031 | 1895 | 1559 | 1040      | 145 | 117 | 531 |
|                                   | Rötenstein B       | 142       | 486  | 605  | 248  | 296       | 50  | 47  | 98  |
|                                   | Muckbach A         | 427       | 2533 | 2235 | 1398 | 606       | 93  | 96  | 186 |
|                                   | Holzspitze         | 1000      | 2816 | 2515 | 2045 | 762       | 184 | 172 | 272 |
|                                   | Widdern A          | 583       | 3132 | 2729 | 1815 | 739       | 23  | 195 | 22  |
|                                   | Horb A             | 1589      | 3105 | 3104 | 2732 | 778       | 2   | 52  | 4   |
|                                   | Weigenbachtal      | 155       | 6387 | 5758 | 1068 | 247       | 0   | 67  | 0   |
|                                   | Trossingen         | 2168      | 5156 | 4570 | 3583 | 1035      | 232 | 321 | 382 |
|                                   | Immensitz          | 1993      | 3086 | 3118 | 3089 | 1800      | 302 | 510 | 505 |
|                                   | Hegaublick         | 2349      | 3464 | 3336 | 3440 | 1461      | 454 | 415 | 806 |
| A96                               | Herfatz Tunnel Süd | 419       | 739  | 743  | 637  | 178       | 11  | 38  | 25  |
|                                   | Argenbrücke Nord   | 1769      | 4290 | 3913 | 2927 | 1409      | 395 | 495 | 632 |
| A656                              | Heidelberg         | 69        | 2684 | 2314 | 791  | 454       | 25  | 143 | 35  |
| A6                                | Sulmtal A          | 711       | 3214 | 2419 | 2147 | 542       | 37  | 35  | 70  |
|                                   | Braunsbach A       | 946       | 3256 | 2777 | 1913 | 545       | 0   | 206 | 0   |
|                                   | Wolfskopf          | 1375      | 3994 | 3861 | 2529 | 805       | 17  | 209 | 4   |
|                                   | Gronachbrücke      | 659       | 4081 | 3639 | 1730 | 518       | 0   | 148 | 0   |
| A8                                | AK Stuttgart A     | 1201      | 1930 | 2265 | 1863 | 766       | 47  | 72  | 121 |
|                                   | Stuttgart 1        | 359       | 652  | 736  | 537  | 244       | 47  | 31  | 132 |
|                                   | Stuttgart 4        | 232       | 779  | 884  | 448  | 150       | 43  | 22  | 55  |
| A61                               | Hockenheim A       | 170       | 1305 | 1181 | 708  | 327       | 0   | 31  | 0   |
| A98                               | Homburg            | 1267      | 2668 | 4160 | 1406 | 678       | 260 | 185 | 223 |
|                                   | Wiesebrücke        | 669       | 4308 | 3781 | 2372 | 1310      | 169 | 442 | 242 |

| Autobahntransekt /<br>GMA-Station |                    | Glätte 4B |      |      |      | Glätte 5 |    | Glätte 6 |   |
|-----------------------------------|--------------------|-----------|------|------|------|----------|----|----------|---|
|                                   |                    | R         | M    | MR   | RM   | R        | M  | R        | M |
| A5                                | Karlsruhe          | 333       | 0    | 195  | 0    | 7        | 0  | 8        | 1 |
|                                   | Dreieck Weil       | 518       | 16   | 217  | 16   | 0        | 0  | 2        | 0 |
| A7                                | Westhausen A       | 1247      | 12   | 947  | 3    | 31       | 0  | 7        | 0 |
|                                   | Agnesburg A        | 3098      | 1297 | 2312 | 1101 | 77       | 20 | 10       | 8 |
| A81                               | Keltensiedlung     | 1647      | 829  | 1051 | 931  | 76       | 22 | 9        | 0 |
|                                   | Rötenstein B       | 446       | 170  | 386  | 136  | 51       | 17 | 10       | 2 |
|                                   | Muckbach A         | 1157      | 233  | 810  | 204  | 34       | 26 | 8        | 4 |
|                                   | Holzspitze         | 1231      | 363  | 882  | 325  | 51       | 31 | 9        | 3 |
|                                   | Widdern A          | 1452      | 38   | 1126 | 26   | 57       | 0  | 16       | 0 |
|                                   | Horb A             | 1537      | 6    | 994  | 8    | 26       | 0  | 18       | 0 |
|                                   | Weigenbachtal      | 426       | 0    | 284  | 0    | 1        | 0  | 1        | 0 |
|                                   | Trossingen         | 1706      | 605  | 1168 | 625  | 21       | 3  | 2        | 1 |
|                                   | Immensitz          | 3045      | 584  | 2120 | 702  | 85       | 12 | 19       | 2 |
|                                   | Hegaublick         | 2531      | 788  | 1720 | 1014 | 80       | 20 | 13       | 6 |
| A96                               | Herfatz Tunnel Süd | 260       | 15   | 135  | 28   | 1        | 0  | 0        | 0 |
|                                   | Argenbrücke Nord   | 1590      | 570  | 1014 | 664  | 14       | 2  | 23       | 2 |
| A656                              | Heidelberg         | 814       | 34   | 697  | 32   | 35       | 1  | 15       | 0 |
| A6                                | Sulmtal A          | 873       | 83   | 496  | 79   | 8        | 2  | 10       | 0 |
|                                   | Braunsbach A       | 1130      | 8    | 964  | 7    | 35       | 0  | 3        | 0 |
|                                   | Wolfskopf          | 1465      | 28   | 1151 | 6    | 37       | 0  | 6        | 0 |
|                                   | Gronachbrücke      | 1118      | 7    | 928  | 1    | 36       | 0  | 3        | 0 |
| A8                                | AK Stuttgart A     | 1474      | 188  | 960  | 200  | 12       | 3  | 12       | 0 |
|                                   | Stuttgart 1        | 415       | 239  | 275  | 230  | 2        | 0  | 5        | 0 |
|                                   | Stuttgart 4        | 271       | 166  | 191  | 89   | 1        | 1  | 3        | 0 |
| A61                               | Hockenheim A       | 417       | 0    | 230  | 0    | 10       | 0  | 12       | 0 |
| A98                               | Homburg            | 893       | 422  | 435  | 359  | 2        | 4  | 2        | 0 |
|                                   | Wiesebrücke        | 1744      | 280  | 950  | 334  | 7        | 7  | 11       | 3 |

**Tabelle 9.10: Simulierte Ereignisse der Hitzegefahr für den Zeitraum 2001 bis 2010**

**Modellauf „R“:** gemessene Belags- und Lufttemperatur; **Modellauf „M“:** modellierte Luft- und Belagtemperatur; **Modellauf „MR“:** modellierte Lufttemperatur und gemessene Belagtemperatur; **Modellauf „RM“:** gemessene Lufttemperatur und modellierte Belagtemperatur  
Modellergebnisse basierend auf den Datensätzen: DWD (2014) und IMK (2014c)

| Autobahntrassekt / GMA-Station |                    | Hitzegefahr I-A |      | Hitzegefahr I-B |    | Hitzegefahr II |    |
|--------------------------------|--------------------|-----------------|------|-----------------|----|----------------|----|
|                                |                    | R               | M    | R               | M  | R              | M  |
| A5                             | Karlsruhe          | 102             | 98   | 0               | 22 | 245            | 2  |
|                                | Dreieck Weil       | 92              | 1550 | 277             | 72 | 281            | 23 |
| A7                             | Westhausen A       | 102             | 74   | 0               | 40 | 261            | 5  |
|                                | Agnesburg A        | 0               | 118  | 0               | 38 | 48             | 5  |
| A81                            | Keltensiedlung     | 219             | 295  | 21              | 75 | 477            | 16 |
|                                | Rötenstein B       | 3               | 7    | 4               | 0  | 7              | 0  |
|                                | Muckbach A         | 1370            | 80   | 0               | 60 | 1623           | 18 |
|                                | Holzspitze         | 236             | 253  | 32              | 62 | 464            | 18 |
|                                | Widdern A          | 476             | 1460 | 182             | 39 | 775            | 0  |
|                                | Horb A             | 53              | 401  | 189             | 79 | 210            | 28 |
|                                | Weigenbachtal      | 395             | 184  | 0               | 22 | 817            | 0  |
|                                | Trossingen         | 40              | 205  | 64              | 27 | 137            | 4  |
|                                | Immensitz          | 4               | 164  | 11              | 36 | 41             | 4  |
|                                | Hegaublick         | 64              | 230  | 88              | 43 | 215            | 5  |
| A96                            | Herfatz Tunnel Süd | 0               | 0    | 0               | 0  | 0              | 0  |
|                                | Argenbrücke Nord   | 221             | 832  | 335             | 77 | 442            | 9  |
| A656                           | Heidelberg         | 691             | 57   | 0               | 28 | 1122           | 0  |
| A6                             | Sulmtal A          | 336             | 231  | 95              | 83 | 624            | 20 |
|                                | Braunsbach A       | 136             | 269  | 116             | 42 | 277            | 8  |
|                                | Wolfskopf          | 361             | 250  | 131             | 54 | 758            | 14 |
|                                | Gronachbrücke      | 57              | 90   | 45              | 5  | 173            | 0  |
| A8                             | AK Stuttgart A     | 143             | 207  | 60              | 96 | 323            | 39 |
|                                | Stuttgart 1        | 62              | 153  | 42              | 24 | 119            | 9  |
|                                | Stuttgart 4        | 153             | 408  | 206             | 23 | 333            | 10 |
| A61                            | Hockenheim A       | 116             | 76   | 0               | 33 | 275            | 3  |
| A98                            | Homburg            | 115             | 563  | 219             | 38 | 310            | 11 |
|                                | Wiesebrücke        | 161             | 524  | 276             | 36 | 374            | 11 |

| Autobahntrassekt /<br>GMA-Station |                    | Hitzegefahr III-A |    |    |     | Hitzegefahr III-B |    |    |    |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------|----|----|-----|-------------------|----|----|----|
|                                   |                    | R                 | M  | MR | RM  | R                 | M  | MR | RM |
| A5                                | Karlsruhe          | 0                 | 0  | 0  | 0   | 0                 | 0  | 0  | 0  |
|                                   | Dreieck Weil       | 195               | 53 | 51 | 111 | 76                | 21 | 17 | 59 |
| A7                                | Westhausen A       | 46                | 0  | 10 | 0   | 23                | 0  | 1  | 0  |
|                                   | Agnesburg A        | 26                | 0  | 0  | 0   | 0                 | 0  | 0  | 0  |
| A81                               | Keltensiedlung     | 215               | 17 | 40 | 19  | 130               | 9  | 8  | 15 |
|                                   | Rötenstein B       | 5                 | 0  | 0  | 1   | 1                 | 0  | 0  | 0  |
|                                   | Muckbach A         | 33                | 0  | 0  | 0   | 15                | 0  | 0  | 0  |
|                                   | Holzspitze         | 154               | 22 | 39 | 27  | 92                | 11 | 9  | 17 |
|                                   | Widdern A          | 307               | 34 | 34 | 116 | 207               | 0  | 0  | 76 |
|                                   | Horb A             | 140               | 59 | 34 | 52  | 40                | 28 | 7  | 19 |
|                                   | Weigenbachtal      | 160               | 0  | 0  | 0   | 118               | 0  | 0  | 0  |
|                                   | Trossingen         | 89                | 19 | 7  | 32  | 36                | 4  | 0  | 19 |
|                                   | Immensitz          | 28                | 9  | 16 | 4   | 2                 | 1  | 1  | 1  |
|                                   | Hegaublick         | 114               | 27 | 18 | 40  | 40                | 5  | 2  | 9  |
| A96                               | Herfatz Tunnel Süd | 0                 | 0  | 0  | 0   | 0                 | 0  | 0  | 0  |
|                                   | Argenbrücke Nord   | 254               | 69 | 64 | 131 | 108               | 9  | 7  | 61 |
| A656                              | Heidelberg         | 56                | 0  | 0  | 0   | 44                | 0  | 0  | 0  |
| A6                                | Sulmtal A          | 204               | 51 | 54 | 83  | 169               | 16 | 13 | 75 |
|                                   | Braunsbach A       | 124               | 35 | 28 | 62  | 73                | 6  | 3  | 37 |
|                                   | Wolfskopf          | 214               | 44 | 30 | 104 | 149               | 13 | 6  | 77 |
|                                   | Gronachbrücke      | 53                | 4  | 1  | 20  | 22                | 0  | 0  | 11 |
| A8                                | AK Stuttgart A     | 135               | 54 | 56 | 48  | 84                | 33 | 25 | 32 |
|                                   | Stuttgart 1        | 91                | 17 | 22 | 33  | 59                | 8  | 9  | 24 |
|                                   | Stuttgart 4        | 247               | 23 | 22 | 137 | 133               | 10 | 10 | 78 |
| A61                               | Hockenheim A       | 64                | 0  | 2  | 0   | 46                | 0  | 0  | 0  |
| A98                               | Homburg            | 208               | 27 | 22 | 116 | 95                | 9  | 6  | 66 |
|                                   | Wiesebrücke        | 260               | 35 | 26 | 147 | 131               | 11 | 8  | 82 |



# 10 Anhang zu ausgewählten implementierten Quellcodes in Matlab und Gait-CAD

## Quellcode 10.1: Matlab Quellcode zum Einlesen der Rohdaten in Gait-CAD

Gekürzter Quellcode, der die Daten der Klimavariablen, Belagstemperatur und eine Zeitvariable (,time\_present‘) für den Zeitraum 2001 bis 2010 automatisiert aus einer Datei (hier: ,...\rawdata‘) einliest. Anzumerken ist, dass das Einlesen der Daten für die beiden 30-jährigen Zeiträume 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050 analog implementiert werden kann.

```
clear all;close all;
cd(fileparts(which('rawdata2gaitcad')));
rawdatafiles = getsubdir([pwd filesep 'rawdata'],'XY*.mat',1);

for i=1:length(rawdatafiles)
    % Alle in der Datei ...\rawdata vorhandenen *.mat-Dateien werden
    % automatisch eingelesen und in einem Gait-CAD Projekt abgespeichert. Die
    % Gait-CAD Variable, die auch über die Matlab Console aufgerufen werden
    % kann, ist mit „d_org“ benannt.
    fprintf('%s einlesen\n',rawdatafiles(i).name);
    load(rawdatafiles(i).name)
    if exist('X_SulmtalA_Klima_Station','var')
        d_org = [time_present X_SulmtalA_Klima_Station Y_SulmtalA_Tstreet];
    end;

    % Beispiel für eine solche Datei: Eingelesen wird hier der Datensatz A
    % der Station wolfskopf.
    if exist('X_wolfskopf_Klima_Station','var')
        d_org = [time_present X_wolfskopf_Klima_Station
Y_wolfskopf_Tstreet];
    end;

    % Weitere *.mat-Dateien der anderen Stationen werden wegen der
    % Übersichtlichkeit ausgespart.
    if exist('X_kelten_Klima_Station','var')
        d_org = [time_present X_kelten_Klima_Station Y_kelten_Tstreet];
    end;
    % ...
    if exist('X_wiesebruecke_Klima_Station','var')
        d_org = [time_present X_wiesebruecke_Klima_Station
Y_wiesebruecke_Tstreet];
    end;

    d_org = double(d_org);
end;
```

---

```

% Die einzelnen spalten der Matrix X und der Vektor y werden als Merkmale
abgespeichert und entsprechend benannt.
    [temp,filename_gaitcad] = fileparts(rawdatafiles(i).name);
    dorgbez =
char('time','Tair_Station','Tair','RainTot','SnowTot','relHum','ASWDIR_S'
,'ASWDIFD_S','Wind_U','Wind_V','ALWD_S','TD','CloudTot','SoilWater','Tsoi
l','PressSurf','Tstreet','Time_corr','Year','Month','Day','Hour');
    whos
% Die Gait-CAD Projekt-Datei wird erzeugt und abgespeichert.
    try
        generate_new_gaitcad_project([pwd filesep 'rawdata' filesep
filename_gaitcad '.prjz'],[],[],[],d_org,dorgbez,[],[]);
    catch
% Falls ein Fehler durch z. B. eine fehlende Variable entstehen sollte,
wird dies im Matlab Befehlsfenster unter Nennung des entsprechenden
Stationsnamens ausgegeben.
        fprintf('Fehler bei %s\n',rawdatafiles(i).name);
        keyboard;
    end;
    clear X* Y* d_org
end;

```

### Quellcode 10.2: Beispiel für einen Matlab Quellcode zum Auslesen der Lufttemperatur für die GMA-Station Wiesebrücke des 30-jährigen Zeitraums 1971 bis 2000

Dieser Programmcode stellt ein Beispiel dar.

Bei der Implementierung können die Klimaparameter durch den Aufruf eines Skripts gleichzeitig ausgelesen und abgespeichert werden.

```
% Auslesen der Variablen Lufttemperatur aus der netcdf-Datei
„, 'ECHAM6_7kn_Ref_T_2M_AV_1971-2000_MRS_grid.nc“

% Die lon- und lat-Variablen müssen für die entsprechend Station
angepasst werden.

% lon- und lat-werte der Station wiesebrücke. In diesem 7x7km Gitter
liegt die Station.
lon = 4;
lat = 3;

% Oeffnen der netcdf-Datei und Zuweisen des Variablennamens

ncid_Tair = netcdf.open('ECHAM6_7kn_Ref_T_2M_AV_1971-
2000_MRS_grid.nc', 'NC_NOWRITE');

% Schreiben der werte für die spezifische Station in die variable temp
for i= 1:262992

    x = netcdf.getVar(ncid_Tair, 5, [lon lat 0 i-1]);

    temp(i)=x;
end

% Speichern der Lufttempertur in °C
Wiesebruecke_Tair_past = temp'-273;
```

---

### Quellcode 10.3: Makro zur Berechnung der multiplen linearen Regression (Parameterschätzung der Belagstemperatur)

Die Makro-Bezeichnung lautet ‚regression\_ts.makro‘.

```
% Grad des Polynoms wird auf vier festgelegt.
set(gaitfindobj('CE_Regression_GradPolynom'),'string','4');eval(gaitfindobj_callback ('CE_Regression_GradPolynom'));

% auf Existenz von Tair_Station prüfen und bei Bedarf Zeitreihe
extrahieren
ind_station = getfindstr(var_bez,'Tair_Station',1);

if ~isempty(ind_station)

% Auswahl Zeitreihe (ZR), die in das Regressionsmodell als Merkmale
eingehen
% hier:
{'Tair','RainTot','SnowTot','relHum','ASWDIR_S','ASWDIFD_S','Uwind','vwind',
'ALWD_S','Tair IIR 0.7000','RainTot IIR 0.7000','SnowTot IIR
0.7000','relHum IIR 0.7000','ASWDIR_S IIR 0.7000','ASWDIFD_S IIR
0.7000','Uwind IIR 0.7000','vwind IIR 0.7000','ALWD_S IIR 0.7000'}

set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_ZR'),
{'Tair_Station','Tair','RainTot','SnowTot','relHum','ASWDIR_S','ASWDIFD_S',
'wind_U','WInd_V','ALWD_S','TD','CloudTot','SoilWater','Tsoil','PressSurf','Tair_Station IIR 0.7000','Tair IIR 0.7000','RainTot IIR 0.7000','SnowTot IIR 0.7000','relHum IIR 0.7000','ASWDIR_S IIR 0.7000','ASWDIFD_S IIR 0.7000','wind_U IIR 0.7000','WInd_V IIR 0.7000','ALWD_S IIR 0.7000','TD IIR 0.7000','CloudTot IIR 0.7000','SoilWater IIR 0.7000','Tsoil IIR 0.7000','PressSurf IIR 0.7000'});
eval(gaitfindobj_callback ('CE_Auswahl_ZR'));

% Merkmalsauswahl
% {'Ausgewählte Merkmale'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Regression_Merkmalsauswahl'),{'Ausgewählte
Merkmale'});eval(gaitfindobj_callback('CE_Regression_Merkmalsauswahl'));

% Abtastpunkte
set(gaitfindobj('CE_Regression_Abtastpunkte'),'string','-96 -72 -48 -24 -
2 -1 0');eval(gaitfindobj_callback('CE_Regression_Abtastpunkte'));

% Ausgangsgröße, die durch die Regression berechnet werden soll
% {'Tstreet'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Regression_Output'),{'Tstreet'});
eval(gaitfindobj_callback('CE_Regression_Output'));
```

```

%% Regression, Data-Mining, Entwurf und Anwendung
eval(gaitfindobj_callback('MI_Regression_EnAn'));

%% Regression, Ansicht, Koeffizienten Polynom-Modell
eval(gaitfindobj_callback('MI_Anzeige_Koeff_Polynom'));
temp = dir([parameter.projekt.datei
'*_poly.txt']);movefile(temp.name,strepl(temp.name,'_poly','_poly_mit_tst
ation'))

fregl = fopen([parameter.projekt.datei '_regr_mit_tstation.txt'],'wt')
[fitness_corrcoeff,mean_abs_error,fitness_rel_error] =
regression_statistics(regr_plot,fregl);
fclose(fregl);

%% Löschen, Bearbeiten, Doppelte Einzelmerkmale, Zeitreihen und
Ausgangsgrößen
eval(gaitfindobj_callback('MI_Loeschen_doppelt'));
next_function_parameter = [parameter.projekt.datei
'_regr_mit_tstation.regression'];

%% Data-Mining, Datei, Regressionsmodell speichern, damit es später
angewendet werden kann
eval(gaitfindobj_callback('MI_Regression_Export'));

end;

% Regression auf jeden Fall noch einmal ohne Tair_Station, denn dieses
Merkmal existiert für die 30-jährigen Zeiträume nicht.
% Auswahl Zeitreihe (ZR)
%
{'Tair','RainTot','SnowTot','relHum','ASWDIR_S','ASWDIFD_S','Uwind','Vwin
d','ALWD_S','Tair IIR 0.7000','RainTot IIR 0.7000','SnowTot IIR
0.7000','relHum IIR 0.7000','ASWDIR_S IIR 0.7000','ASWDIFD_S IIR
0.7000','Uwind IIR 0.7000','Vwind IIR 0.7000','ALWD_S IIR 0.7000'}

set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_ZR'),{'Tair','RainTot','S
nowTot','relHum','ASWDIR_S','ASWDIFD_S','Wind_U','Wind_V','ALWD_S','TD','
CloudTot','SoilWater','Tsoil','PressSurf','RainTot IIR 0.7000','SnowTot
IIR 0.7000','relHum IIR 0.7000','ASWDIR_S IIR 0.7000','ASWDIFD_S IIR
0.7000','Wind_U IIR 0.7000','Wind_V IIR 0.7000','ALWD_S IIR 0.7000','TD
IIR 0.7000','CloudTot IIR 0.7000','SoilWater IIR 0.7000','Tsoil IIR
0.7000','PressSurf IIR 0.7000'});
eval(gaitfindobj_callback('CE_Auswahl_ZR'));

```

---

```

% Merkmalsauswahl
% {'Ausgewählte Merkmale'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Regression_Merkmalsauswahl'), {'Ausgewählte Merkmale'});
eval(gaitfindobj_callback('CE_Regression_Merkmalsauswahl'))

% Abtastpunkte
set(gaitfindobj('CE_Regression_Abtastpunkte'), 'string', '-96 -72 -48 -24 -2 -1 0'); eval(gaitfindobj_callback('CE_Regression_Abtastpunkte'));

% Ausgangsgröße Regression
% {'Tstreet'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Regression_Output'), {'Tstreet'});
eval(gaitfindobj_callback('CE_Regression_Output'));

%% Regression, Data-Mining, Entwurf und Anwendung
eval(gaitfindobj_callback('MI_Regression_EnAn'));

%% Regression, Ansicht, Koeffizienten Polynom-Modell
eval(gaitfindobj_callback('MI_Anzeige_Koeff_Polynom'));
temp = dir([parameter.projekt.datei
'*_poly.txt']); movefile(temp.name, strrep(temp.name, '_poly', '_poly_ohne_tstation'))
freg = fopen([parameter.projekt.datei '_regr_ohne_tstation.txt'], 'wt')
[fitness_corrcoeff, mean_abs_error, fitness_rel_error] =
regression_statistics(regr_plot, freg);
fclose(freg);

%% Löschen, Bearbeiten, Doppelte Einzelmerkmale, Zeitreihen und
Ausgangsgrößen
eval(gaitfindobj_callback('MI_Loeschen_doppelt'));
next_function_parameter = [parameter.projekt.datei
'_regr_ohne_tstation.regression'];

%% Data-Mining, Datei, Regressionsmodell speichern, damit es später
angewendet werden kann
eval(gaitfindobj_callback('MI_Regression_Export'));

```

#### Quellcode 10.4: Makro zur Anwendung des Regressionsmodells auf den Referenzzeitraum 1971 bis 2000 und Teilung der Daten der Klimavariablen in Jahre

Die Makro-Bezeichnung lautet ‚apply\_regression\_model\_klima.makrog‘.

Das Makro zur Anwendung des Regressionsmodells auf die Klimamerkmale des Zeitraums der nahen Zukunft (2021 bis 2050) kann entsprechend angepasst werden.

```
% Spezifische Regressionsmodell wird auf die zugehörigen „Klimadaten“ der
GMA-Station angewendet
% Hierzu müssen die Stationsnamen in dem aufgerufenen Ordner zerlegt und
an die Regressions-Modelle angepasst werden.
next_function_parameter = strrep([parameter.projekt.pfad filesep
parameter.projekt.datei
'_regr_ohne_tstation.regression'], 'timeseriesprojects_klimadaten', 'timese
riesprojects');
next_function_parameter = strrep(next_function_parameter, 'X_', 'XY_');
next_function_parameter =
strrep(next_function_parameter, '_past_ts', '_Station_ts');

%% Data-Mining, Datei, Regressionsmodell laden
eval(gaitfindobj_callback('MI_Regression_Import'));

% Manueller Hack des Makros um Probleme mit nicht existierenden Variablen
zu lösen
if ~isempty(regr_single)
    regr_single.designed_regression.output = 1;
end;

%% Regression, Data-Mining, Anwendung
eval(gaitfindobj_callback('MI_Regression_Anwendung'))

% Auswahl Zeitreihe (ZR) mit Merkmalen
% {'Year'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_ZR'), {'Year'});
eval(gaitfindobj_callback('CE_Auswahl_ZR'));

% MAKRO AUSWAHLFENSTER Zeitreihe -> Zeitreihe, Zeitreihe ->
Einzelmerkmal...
auswahl.gen=[];
auswahl.gen{1}={'Year'};
auswahl.gen{2}={'Ganze Zeitreihe (0...100%)};
auswahl.gen{3}={'Geschwindigkeit (kausal) (V_kausal)'};
eval(gaitfindobj_callback('MI_Extraktion_ZRZR'));
eval(get(ffigure_handle(size(figure_handle,1),1), 'callback'));

% Auswahl Zeitreihe (ZR)
% {'Year V_kausal'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_ZR'), {'Year V_kausal'});
eval(gaitfindobj_callback('CE_Auswahl_ZR'));
```

```

%% Zeitreihen, Ansicht, Originaldaten
eval(gaitfindobj_callback('MI_Anzeige_ZR_Orig'));

% Auswahl Zeitreihe (ZR)
% {'Hour NSprung'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_ZR'), {'Year
V_kausal'}); eval(gaitfindobj_callback('CE_Auswahl_ZR'));

% Manueller Teil der Programmierung zur Teilung der Zeitreihen in Jahre
next_function_parameter =
[strrep(parameter.projekt.pfad, 'timeseriesprojects_klimadaten', 'timeserie
sprojects_klimadaten_years') filesep parameter.projekt.datei '_years'];
zr_trig.out.offset = [0 8759];

% Benutze die selektierte Zeitreihe als Triggerzeitreihe
zr_trig.out.trig_var = parameter.gui.merkmale_und_klassen.ind_zr;

% Anfang: Diesen Teil nicht ändern
zr_trig.out.quelle = 1;
zr_trig.out.trigger = 1;
zr_trig.var_bez = var_bez;
% Ende

%% Cluster-Verfahren, Data-Mining, Entwurf und Anwendung
eval(gaitfindobj_callback('MI_Extraktion_Teile_ZR'));

%% Auswählen, Bearbeiten, Alle Datentupel
eval(gaitfindobj_callback('MI_Datenauswahl_Alle'));

% Abtastfrequenz Zeitreihe
set(gaitfindobj('CE_Zeitreihen_Abtastfreq'), 'string', '24');
eval(gaitfindobj_callback('CE_Zeitreihen_Abtastfreq'));

% Einheit
% {'pro Tag'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Zeitreihen_Einheit_Abtastfreq'), {
'pro Tag'});
eval(gaitfindobj_callback('CE_Zeitreihen_Einheit_Abtastfreq'));

% Auswahl Zeitreihe (ZR)
%
{'time', 'Tair', 'RainTot', 'SnowTot', 'relHum', 'ASWDIR_S', 'ASWDIFD_S', 'Wind_
U', 'WInd_V', 'ALWD_S', 'TD', 'CloudTot', 'SoilWater', 'Tsoil', 'PressSurf', 'Tim
e_corr', 'Year', 'Month', 'Day', 'Hour', 'y1', 'Tair IIR 0.7000', 'RainTot IIR
0.7000', 'SnowTot IIR 0.7000', 'relHum IIR 0.7000', 'ASWDIR_S IIR
0.7000', 'ASWDIFD_S IIR 0.7000', 'wind_U IIR 0.7000', 'WInd_V IIR
0.7000', 'ALWD_S IIR 0.7000', 'TD IIR 0.7000', 'CloudTot IIR
0.7000', 'SoilWater IIR 0.7000', 'Tsoil IIR 0.7000', 'PressSurf IIR
0.7000', 'Schätzung Regression Tstreet (polynom)', 'Trigger-ZR'}

```

```

set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_ZR'),{'time','Tair','Rain
Tot','SnowTot','relHum','ASWDIR_S','ASWDIFD_S','Wind_U','Wind_V','ALWD_S'
,'TD','CloudTot','Soilwater','Tsoil','PressSurf','Time_corr','Year','Mont
h','Day','Hour','y1','Tair IIR 0.7000','RainTot IIR 0.7000','SnowTot IIR
0.7000','relHum IIR 0.7000','ASWDIR_S IIR 0.7000','ASWDIFD_S IIR
0.7000','wind_U IIR 0.7000','wind_V IIR 0.7000','ALWD_S IIR 0.7000','TD
IIR 0.7000','CloudTot IIR 0.7000','Soilwater IIR 0.7000','Tsoil IIR
0.7000','PressSurf IIR 0.7000','Schätzung Regression Tstreet
(polynom)','Trigger-ZR'});eval(gaitfindobj_callback('CE_Auswahl_ZR'));

% MAKRO AUSWAHLFENSTER Zeitreihe -> Zeitreihe, Zeitreihe ->
Einzelmerkmal...
auswahl.gen=[];
auswahl.gen{1}={'time','Tair','RainTot','SnowTot','relHum','ASWDIR_S','AS
WDIFD_S','wind_U','wind_V','ALWD_S','TD','CloudTot','Soilwater','Tsoil','
PressSurf','Time_corr','Year','Month','Day','Hour','y1','Tair IIR
0.7000','RainTot IIR 0.7000','SnowTot IIR 0.7000','relHum IIR
0.7000','ASWDIR_S IIR 0.7000','ASWDIFD_S IIR 0.7000','wind_U IIR
0.7000','wind_V IIR 0.7000','ALWD_S IIR 0.7000','TD IIR 0.7000','CloudTot
IIR 0.7000','Soilwater IIR 0.7000','Tsoil IIR 0.7000','PressSurf IIR
0.7000','Schätzung Regression Tstreet (polynom)','Trigger-ZR'};
auswahl.gen{2}={'Ganze Zeitreihe (0...100%)};
auswahl.gen{3}={'Maximum (MAX)','Median EM (MEDIAN)','Minimum
(MIN)','Mittelwert EM (MEAN)};
eval(gaitfindobj_callback('MI_Extraktion_ZRZR'));
eval(get(figure_handle(size(figure_handle,1),1),'callback'));

% Auswahl Einzelmerkmal (EM)
% {'MEDIAN ZR Year'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_EM'),{'MEDIAN ZR
Year'});eval(gaitfindobj_callback('CE_Auswahl_EM'));

% Alle werte
set(gaitfindobj('CE_EM_Ausgangs_Alle'),'value',1);eval(gaitfindobj_callba
ck('CE_EM_Ausgangs_Alle'));

%% Umwandeln, Bearbeiten, Ausgewählte Einzelmerkmale -> Ausgangsgrößen
eval(gaitfindobj_callback('MI_EM_Klasse'));
bez_code = strrep_gaitcad_variable(bez_code,'MEDIAN ZR ','');aktparawin

% Auswahl Ausgangsgröße
% {'MEDIAN ZR Year'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_Ausgangsgroesse'),{'Year'
});
eval(gaitfindobj_callback('CE_Auswahl_Ausgangsgroesse'));

next_function_parameter = parameter.projekt.datei;
saveprj_g;

```

---

### Quellcode 10.5: Makro zur Klassifikation der Glättegefahr 1

Dieses Makro stellte ein Beispiel dar, wie die Gefahrenklassifikation implementiert wird. Die anderen Gefahren können analog implementiert werden.

```
% Erstellt Glätte 1:
Niederschlag (Regen/Glätte) auf gefrorener Straßenoberfläche

% Alle bisherigen Plug-Ins werden gelöscht
eval(gaitfindobj_callback('CE_PlugListDelAll'));

% Alle löschen
set(gaitfindobj('CE_Edit_Auswahl_Plugins'),'string','22');eval(gaitfindobj_
j_callback('CE_Edit_Auswahl_Plugins'));

% Auswahl Plugins
% {'Addition mehrerer Zeitreihen (ADDZR)': Zeitreihen, die benötigt
werden in der Regelbasis des Gefahrtyps werden addiert

set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_Plugins',{'Addition
mehrerer Zeitreihen (ADDZR)'});
eval(gaitfindobj_callback('CE_Auswahl_Plugins'));

% Alle löschen
eval(gaitfindobj_callback('CE_PlugListDelAll'));

% Auswahl Plugins
% {'Addition mehrerer Zeitreihen (ADDZR)'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_Plugins',{'Addition
mehrerer Zeitreihen (ADDZR)'});
eval(gaitfindobj_callback('CE_Auswahl_Plugins'));

% Hinzufügen
eval(gaitfindobj_callback('CE_PlugListAdd'));

% MAKRO AUSWAHLFENSTER Zeitreihe -> Zeitreihe, Zeitreihe -> Einzelmerkmal
(Plugin-Sequenz)...
benötigte Prämissen: RainTot(t) ja  $\wedge$  Tair(t) > 0  $\wedge$  Tstreet(t)  $\leq$  0
auswahl.ausgkombi=[];
auswahl.ausgkombi{1}={'Tair > 0','RainTot ja','Tstreet Model  $\leq$  0'};
auswahl.ausgkombi{2}={'Ganze Zeitreihe (0...100%)'};
eval(gaitfindobj_callback('MI_Extraktion_ZRZR_Kombi'));
eval(get(figure_handle(size(figure_handle,1),1),'callback'));

% Alle löschen
eval(gaitfindobj_callback('CE_PlugListDelAll'));
```

```

% Umbenennen von 'Tair > 0  ADD RainTot ja ADD Tstreet Model <= 0'
var_bez = strrep_gaitcad_variable(var_bez,'Tair > 0  ADD RainTot ja ADD
Tstreet Model <= 0','TS Glaette 1');aktparawin;

% Datei, Projekt speichern
eval(gaitfindobj_callback('MI_Speichern'));

% Auslesen der Ereignisse von Glaette 1
set(gaitfindobj('CE_Edit_Auswahl_Plugins'),'string','58');
eval(gaitfindobj_callback('CE_Edit_Auswahl_Plugins'));

% Auswahl Plugins
% {'wert größer Schwellwert (THRES)'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_Plugins',{'wert größer
Schwellwert (THRES)'}));
eval(gaitfindobj_callback('CE_Auswahl_Plugins'));

% Hinzufügen
eval(gaitfindobj_callback('CE_PlugListAdd'));

% Plugin-Parameter:
set(gaitfindobj('CE_Auswahl_PluginsCommandLine'),'string','2');eval(gaitf
indobj_callback('CE_Auswahl_PluginsCommandLine'));

% Ausgewählte Plugin-Sequenz → Auslesen der Ereignisse für Glätte 1
% {'wert größer Schwellwert (THRES)'}
set_textauswahl_listbox(gaitfindobj('CE_Auswahl_PluginsList',{'wert
größer Schwellwert
(THRES)'}));eval(gaitfindobj_callback('CE_Auswahl_PluginsList'));

% MAKRO AUSWAHLFENSTER Zeitreihe -> Zeitreihe, Zeitreihe -> Einzelmerkmal
(Plugin-Sequenz)...
auswahl.ausgkombi=[];
auswahl.ausgkombi{1}={'TS Glaette 1'};
auswahl.ausgkombi{2}={'Ganze Zeitreihe (0...100%)'};
eval(gaitfindobj_callback('MI_Extraktion_ZRZR_Kombi'));

% Grafik wird aus den Ergebnissen generiert
eval(get(figure_handle(size(figure_handle,1),1),'callback'));

% Alle löschen
eval(gaitfindobj_callback('CE_PlugListDelAll'));

% Umbenennen von 'TS Glaette 1 THRES>2'
var_bez = strrep_gaitcad_variable(var_bez,'TS Glaette 1 THRES>2','Events
Glaette 1');aktparawin;

% Datei, Projekt speichern
%eval(gaitfindobj_callback('MI_Speichern'));

```



# Literaturverzeichnis

- Alcántara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47 (2-4), 107–124.
- Andrey, J., Mills, B., Leahy, M. & Suggett, J. (2003). Weather as a Chronic Hazard for Road Transportation in Canadian Cities. *Natural Hazards*, 28 (2-3), 319–343. Verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1022934225431> (Juni 2015)
- Ashby, W. (1956). *An introduction to cybernetics*. London: Chapman & Hall.
- Atzl, A. & Keller, S. (2013). A systemic approach for the analysis of infrastructure-specific social vulnerability. In S. L. Cutter & C. Corendea (Hrsg.), *From Social Vulnerability to Resilience: Measuring Progress toward Disaster Risk Reduction* (UNU-SOURCE, 17/2013, S. 27–43). Bonn: UNU-EHS. Verfügbar unter <http://www.ehs.unu.edu/file/get/11051.pdf> (Juni 2015)
- Auerbach, M., Hermann, C. & Krieger, B. (2014). *Klimawandel und Straßenverkehrsinfrastruktur*. Verfügbar unter <http://www.vsvi-hessen.de/download/20140122/vsvi20140122auerbach.pdf> (Juni 2015)
- Becker, E., Jahn, T. & Hummel, D. (2006). 3.1 Gesellschaftliche Naturverhältnisse. In E. Becker & T. Jahn (Hrsg.), *Soziale Ökologie. Grundzüge einer Wissenschaft von den gesellschaftlichen Naturverhältnissen* (S. 174–197). Frankfurt/ New York: Campus Verlag.
- Bertalanffy, L. v. (1973). *General system theory* (4. Aufl.). New York: Braziller.
- Birkmann, J., Bach, C., Guhl, S., Witting, M., Welle, T. & Schmude, M. (2010). *State of the Art der Forschung zur Verwundbarkeit Kritischer Infrastrukturen am Beispiel Strom/Stromausfall* (Schriftenreihe Öffentliche Sicherheit, Bd. 2). Berlin: Forschungsforum Öffentliche Sicherheit. Zugriff am 10.10.12. Verfügbar unter [http://www.sicherheit-forschung.de/schriftenreihe/sr\\_v\\_v/sr\\_2.pdf](http://www.sicherheit-forschung.de/schriftenreihe/sr_v_v/sr_2.pdf) (Juni 2015)
- Bloetzer, W. (1998). *Klimaänderungen und Naturgefahren in der Raumplanung: Methodische Ansätze und Fallbeispiele. Synthesebericht NFP 31 [im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms Klimaänderungen und Naturkatastrophen, NFP 31]*. Zürich: vdf, Hochschulverl. an der ETH.
- Bossel, H. (2004). *Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Norderstedt: Books on Demand.
- Boulding, K. E. (1956). General systems theory: The skeleton of science. *Management Science* (2), 197–2008.
- Brodbeck, M. (2012). Klima und Hangkinematik am Beispiel der Großschollenrutschung „Wildenberger Hang“ (BAB A 81, nördlich Heilbronn). *bast Straßenbau* (S 76), 78–86. Verfügbar unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2012/576/pdf/S76b.pdf> (Juni 2015)
- Bründl, M. (2009). *Risikokonzept für Naturgefahren – Leitfaden. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT*, Bern. Zugriff am 28.01.2013. Verfügbar unter [http://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/planat\\_pdf/alle\\_2012/2006-2010/PLANAT\\_2009\\_-\\_Risikokonzept\\_fuer\\_Naturgefahren.pdf](http://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/planat_pdf/alle_2012/2006-2010/PLANAT_2009_-_Risikokonzept_fuer_Naturgefahren.pdf)
- BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe) (Hrsg.). (2011). *Indikatoren zur Abschätzung von Vulnerabilität und Bewältigungspotenzialen am Beispiel von wasserbezogenen Naturgefahren in urbanen Räumen* (Forschung im Bevölkerungsschutz, Bd. 13). Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Kata-

---

strophenhilfe. Verfügbar unter [http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/PublikationenForschung/FiB\\_Band13.pdf;jsessionid=3465C6759D7368163E850BA2B6E24567.1\\_cid346?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/PublikationenForschung/FiB_Band13.pdf;jsessionid=3465C6759D7368163E850BA2B6E24567.1_cid346?__blob=publicationFile) (Juni 2015)

- BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung). (2009). *Kartographische Visualisierung in der Raumplanung* (10/11) (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Hrsg.). Verfügbar unter [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/IzR/2009/10\\_11/Inhalt/inhalt.html?nn=422250](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/IzR/2009/10_11/Inhalt/inhalt.html?nn=422250) (Juni 2015)
- Bundesregierung. (2011). *Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Verfügbar unter [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/aktionsplan\\_anpassung\\_klimawandel\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/aktionsplan_anpassung_klimawandel_bf.pdf) (Juni 2015)
- Burmeister, O., Reischl, M., Bretthauer, G. & Mikut, R. (2008). Data-Mining-Analysen mit der Matlab-Toolbox Gait-CAD (Data Mining Analyses with the Matlab Toolbox Gait-CAD). *At – Automatisierungstechnik*, 56 (7/2008), 381–389.
- Burton, I., Kates, R. W. & White, G. F. (1993). *The environment as hazard* (2. Aufl.). New York: Guilford Press.
- Carreño, M.-L., Cardona, O. D. & Barbat, A. H. (2007). Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach. *Natural Hazards*, 40 (1), 137–172.
- Crevier, L.-P. & Delage, Y. (2001). METRo: A New Model for Road-Condition Forecasting in Canada. *Journal of Applied Meteorology*, 40 (11), 2026–2037.
- Cutter, S. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, 20 (4), 529–539.
- Cutter, S., Boruff, B. J. & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*, 84 (2), 243–261.
- Dalziell, E. & Nicholson, A. (2001). Risk and Impact of Natural Hazards on a Road Network. *Journal of Transportation Engineering*, 127 (2), 159–166.
- Deutsche Bundesregierung. (2008). *Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel* (Die Deutsche Bundesregierung, Hrsg.). Verfügbar unter [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf) (Juni 2015)
- Deutscher Bundestag. (2011, 27. April). *TA-Projekt: Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung. Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung* (Deutscher Bundestag, Hrsg.) (Drucksache 17/5672). Berlin: Deutscher Bundestag.
- Deutscher Wetterdienst (DWD). (2014). *GMA Daten Baden-Württemberg* (Datensatz).
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Deutscher Wetterdienst (DWD), Hrsg.). (2015a). *Deutscher Klimaatlas. Allgemein - Erläuterungen*. Verfügbar unter [http://www.dwd.de/sid\\_p1SxJGQLQWVPpCwmzyRtpNID-nWy79tMSHSDcrgyLnFGk1Y2nKyLT!-1296595954!91321253!1418121419729/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=P30200537501343712813218&T183001737501343714049653gsbDocument-Path=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima\\_\\_Umwelt%2FKlimaatlas%2FErl\\_\\_Allgemein%2Ferlaeuterungen\\_dargestellte-groessen\\_\\_node.html%3F\\_\\_nnn%3Dtrue](http://www.dwd.de/sid_p1SxJGQLQWVPpCwmzyRtpNID-nWy79tMSHSDcrgyLnFGk1Y2nKyLT!-1296595954!91321253!1418121419729/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=P30200537501343712813218&T183001737501343714049653gsbDocument-Path=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimaatlas%2FErl__Allgemein%2Ferlaeuterungen_dargestellte-groessen__node.html%3F__nnn%3Dtrue) (Juni 2015)

- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Deutscher Wetterdienst (DWD), Hrsg.). (2015b). *Warnkriterien für Hitzewarnungen des DWD*. Zugriff am 12.02.2015. Verfügbar unter <http://www.wettergefahren.de/warnungen/hitzewarnungen.html> (Juni 2015)
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Deutscher Wetterdienst (DWD), Hrsg.). (2015c). *Warnkriterien für Unwetterwarnungen des DWD*. Zugriff am 12.02.2015. Verfügbar unter <http://www.wettergefahren.de/warnungen/unwetterkriterien.html> (Juni 2015)
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Deutscher Wetterdienst (DWD), Hrsg.). (2015d). *Warnungen - Windwarnskala*. Zugriff am 12.02.2015. Verfügbar unter <http://www.wettergefahren.de/warnungen/windwarnskala.html> (Juni 2015)
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Deutscher Wetterdienst, Hrsg.). (2015e). *Wetterlexikon*. Verfügbar unter <http://www.dwd.de/lexikon> (Juni 2015)
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (Deutscher Wetterdienst (DWD), Hrsg.) (2015 f.). *Warnkriterien für Unwetterwarnungen des DWD*. Verfügbar unter <http://www.wettergefahren.de/warnungen/unwetterkriterien.html> (Juni 2015)
- Edwards, J. B. (1999). The temporal distribution of road accidents in adverse weather. *Meteorological Applications*, 6 (1), 59–68.
- Eiser, J. R., Bostrom, A., Burton, I., Johnston, D. M., McClure, J., Paton, D. et al. (2012). Risk interpretation and action: A conceptual framework for responses to natural hazards. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 1 (1), 5–16. Verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420912000040> (Juni 2015)
- ESRI. (2005). *Data and Maps Dataset* (Datensatz).
- European Commission. (2008). Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection. *Official Journal of the European Union* (L 345), 75–82. Verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:345:0075:0082:EN:PDF> (Juni 2015)
- European Commission. (2013). *Adapting infrastructure to climate change. Commission staff working document*. An EU Strategy on adaptation to climate change (European Commission, Hrsg.) (SWD (2013) 137 final), Brüssel.
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G. & Smith, P. (1996). From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. *AI Magazine* (17), 37–54. Verfügbar unter <http://www.csd.uwo.ca/faculty/ling/cs435/fayyad.pdf> (Juni 2015)
- Fekete, A. (2009). *Assessment of Social Vulnerability for River-Floods in Germany*. Inaugural-Dissertation, Rheinische Friedrichs-Wilhelm-Universität. Bonn. Verfügbar unter <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2010/2004/2004.pdf> (Juni 2015)
- Felgentreff, C. & Glade, T. (2008). *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Fürst, D. (2011). Politik und Verwaltung im Wandel. In Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.), *Grundriss der Raumordnung und Raumentwicklung* (S. 46–73). Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung.
- Gares, P. A., Sherman, D. J. & Nordstrom, K. F. (1994). Geomorphology and natural hazards. *Geomorphology*, 10 (1–4), 1–18. Verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0169555X94900043> (Juni 2015)
- Gebhardt, H. (Hrsg.). (2007). *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie* (1. Aufl.). München: Elsevier, Spektrum, Akad. Verl.

- 
- Gebhardt, H. (2008). *Geographie Baden-Württembergs. Raum, Entwicklung, Regionen* (Schriften zur politischen Landeskunde Baden-Württembergs, Bd. 36). Stuttgart: Kohlhammer.
- Geipel, R. (2001). Zukünftige Naturrisiken in ihrem sozialen Umfeld. In *Schriftenreihe des Deutschen Komitees für Katastrophenvorsorge e.V.* (Bd. 22, S. 31–41).
- Green, K. C., Armstrong, J. S. & Soon, W. (2009). Validation of Climate Change Forecasting for Public Policy Decision Making. *International Journal of Forecasting*, 25 (4), 826–832.
- Gruehn, D., Greiving, S., Rannow, S., Fleischhauer, M. & Meyer, B. C. (2010). *Klimawandel als Handlungsfeld der Raumordnung. Ergebnisse der Vorstudie zu den Modellvorhaben „Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel“* (Forschungen, Bd. 144). Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/692302721> (Juni 2015)
- Hartmann, S. (2005). *The World as a Process: Simulations in the Natural and Social Sciences*. Verfügbar unter <http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/2412>
- Hoffmann, E. & Rotter, M. (2011). *Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels - Verkehrsinfrastruktur* (Dialog zur Klimaanpassung: Verkehrsinfrastruktur).
- Imbery, F. & Plagemann, S. (Deutscher Wetterdienst (DWD), Hrsg.). (2011). *Die neuen RCP-Szenarien für den 5. IPCC Sachstandsbericht*. Verfügbar unter [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_page-La-bel=P28600135211305704860354&T179000135211305705199450gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FHomepage%2FKlimawandel%2FKlimawandel\\_Emissionsszenarien\\_node.html%3F\\_nnn%3Dtrue](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_page-La-bel=P28600135211305704860354&T179000135211305705199450gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FHomepage%2FKlimawandel%2FKlimawandel_Emissionsszenarien_node.html%3F_nnn%3Dtrue) (Juni 2015)
- Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK). (2014a). *Klimadaten Referenzzeitraum 1971 bis 2000*. COMOS Daten angetrieben mit ECHAM 6 / MPIOM (Datensatz).
- Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK). (2014b). *Klimadaten Zukunftszeitraum 2021 bis 2050*. COSMO Daten angetrieben mit ECHAM 6 / MPIOM (Datensatz).
- Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK). (2014c). *Klimadaten Zeitraum 2000 bis 2010*. ERA Reanalysedaten (Datensatz).
- Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMK) & Süddeutsches Klimabüro. (2014). *Das Klima auf den Gitterpunkt gebracht. Ein Handbuch über Klimasimulationsdaten* (Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) (KIT) & Süddeutsches Klimabüro, Hrsg.). Verfügbar unter <http://www.eskp.de/das-klima-auf-den-gitterpunkt-gebracht/> (Juni 2015)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. Verfügbar unter [http://www.ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-All\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-All_FINAL.pdf) (Juni 2015)
- Jacobs, W. & Raatz, W. E. (1996). Forecasting road-surface temperatures for different site characteristics. *Meteorological Applications*, 3 (3), 243–256.

- Jaroszweski, D. (University of Birmingham Research Archive, Hrsg.). (2010). *Climate Change and Road Freight Safety: Impacts and Opportunities*.
- Keller, S. & Atzl, A. (2014). Mapping Natural Hazard Impacts on Road Infrastructure – The Extreme Precipitation in Baden-Württemberg, Germany, June 2013. *International Journal of Disaster Risk Science*, 5 (3), 227–241. Verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/s13753-014-0026-1> (Juni 2015)
- Koetse, M. J. & Rietveld, P. (2009). The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14 (3), 205–221.
- Küppers, G. & Lenhard, J. (2005). Validation of Simulation: Patterns in the Social and Natural Sciences. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 8 (4). Verfügbar unter <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/3.html> (Juni 2015)
- Lenz, S. (2009). *Vulnerabilität Kritischer Infrastrukturen* (Forschung im Bevölkerungsschutz, Bd. 4). Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. Verfügbar unter [http://www.schutzkommission.de/SubSites/SK/DE/Publikationen/Zivilschutzforschung/Forschung-im-Bevoelkerungsschutz/DownloadsFiB/Band-4\\_Neu.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.schutzkommission.de/SubSites/SK/DE/Publikationen/Zivilschutzforschung/Forschung-im-Bevoelkerungsschutz/DownloadsFiB/Band-4_Neu.pdf?__blob=publicationFile) (Juni 2015)
- Lenz, S. (2011). Geodaten für Bevölkerungsschutz. *Bevölkerungsschutz* (1), 9–13.
- Lindqvist, S. (1979). *Studies of slipperiness on roads* (GUNI report 12), Department of Physical Geography.
- Lorenz, D. F. (2010). *Kritische Infrastrukturen aus Sicht der Bevölkerung* (Schriftenreihe Sicherheit, Bd. 3). Berlin: Freie Universität Berlin.
- Luhmann, N. (1991). *Soziologie des Risikos*. Berlin: W. de Gruyter.
- Luhmann, N. & Baecker, D. (2004). *Einführung in die Systemtheorie* (2. Aufl.). Heidelberg: Carl-Auer-Systeme-Verlag.
- Markau, H.-J. (2003). *Risikobetrachtung von Naturgefahren. Analyse, Bewertung und Management des Risikos von Naturgefahren am Beispiel der sturmflutgefährdeten Küstenniederungen Schleswig-Holsteins*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität. Kiel.
- Massey, D. (1999). Space-Time, 'Science' and the Relationship between Physical Geography and Human Geography. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 24 (3), 261–276. Verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/623127> (Juni 2015)
- Mikut, R. (2009). Data Mining. In der Medizin und Medizintechnik. *Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik / Automatisierungstechnik*, 22.
- Mikut, R., Burmeister, O., Braun, S. & Reischl, M. (2008). The open source MATLAB toolbox Gait-CAD and its application to bioelectric signal.
- Mikut, R., Loose, T., Burmeister, O., Stegmaier, J., Braun, S., Bartschat, A. et al. (2013). *Die MATLAB-Toolbox Gait-CAD. Kurzdokumentation* (Version 1.8): Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Informatik (IAI).
- Minciardi, R., Sacile, R. & Trasforini, E. (2006). Assessing the efficiency and the criticality of the elements belonging to a complex territorial system subject to natural hazards. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6 (1), 21–32. Verfügbar unter <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/21/2006/> (Juni 2015)
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg & Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.). (2012). *Klimawandel in Baden-Württemberg. Fakten, Folgen, Perspektiven* (2. Aufl.). Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg.

---

Verfügbar unter [http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/67972/klimawandel\\_in\\_baden\\_wuerttemberg.pdf?command=downloadContent&filename=klimawandel\\_in\\_baden\\_wuerttemberg.pdf](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/67972/klimawandel_in_baden_wuerttemberg.pdf?command=downloadContent&filename=klimawandel_in_baden_wuerttemberg.pdf) (Juni 2015)

- Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg. (2010). *Generalverkehrsplan Baden-Württemberg 2010* (Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr, Hrsg.), Stuttgart.
- Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg. (2013). *Erhaltungsmanagement an den Bundes- und Landesstraßen in Baden-Württemberg. Presseinformationen zur Landespressekonferenz am 27. März 2013* (Ministerium für Verkehrs und Infrastruktur Baden-Württemberg, Hrsg.).
- Mitchell, J. K., Devine, N. & Jagger, K. (1989). A Contextual Model of Natural Hazard. *Geographical Review*, 79 (4), 391–409.  
Verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/215114> (Juni 2015)
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, Detlef P et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463 (7282), 747–756.
- Moss, T. (2011). Planung technischer Infrastruktur für die Raumentwicklung: Ansprüche und Herausforderungen in Deutschland. In H.-P. Tietz & T. Hühner (Hrsg.), *Zukunftsfähige Infrastruktur und Raumentwicklung. Handlungserfordernisse für Ver- und Entsorgungssysteme* (S. 73-94). Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung.
- New York Academy of Sciences (Hrsg.). (2010) New York City Panel on Climate Change 2010 Report. *ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES*. New York: New York Academy of Sciences.
- Norrman, J. (2000). Slipperiness on roads - an expert system classification. *Meteorological Applications*, 7 (1), 27–36.
- Parry, M., Canziani, O., Palutikof, J., van der Linden, P. & Hanson, C. (2007). *Climate Change 2007 Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge/ New York: Cambridge University Press.  
Verfügbar unter [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg2\\_report\\_impacts\\_adaptation\\_and\\_vulnerability.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg2_report_impacts_adaptation_and_vulnerability.htm) (Juni 2015)
- Peterson, T., McGuirk, M., Houston, T., Horvitz, A. & Wehner, M. (2008). *Climate Variability and Change with Implications for Transportation*. Washington: Transportation Research Board of the National Academies. Verfügbar unter <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr290Many.pdf>
- Pillat, J. (2014). *Methoden zur Analyse und Prognose des Verkehrsaufkommens unter Berücksichtigung des Wetters auf Autobahnen* (Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Bd. 49). Stuttgart: Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart.
- Plate, E. J. & Merz, B. (1993). *Naturkatastrophen und Katastrophenvorbeugung. Bericht des Wissenschaftlichen Beirats der DFG für das Deutsche Komitee für die „International Decade for Natural Disaster Reduction“ (IDNDR)*. Weinheim: VCH.
- Rapoport, A. (1986). *General system theory. Essential concepts & applications* (Cybernetics and systems series). Tunbridge Wells: Abacus Press.
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P. & Kelly, T. K. (2001). Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine* (December 2001), 11-25.

- Risikokommission. (Juni, 2003). *ad hoc-Kommission „Neuordnung der Verfahren und Strukturen zur Risikobewertung und Standardsetzung im gesundheitlichen Umweltschutz der Bundesrepublik Deutschland“*. Abschlussbericht (Risikokommission, Hrsg.).
- Ropohl, G. (2012). *Allgemeine Systemtheorie. Einführung in transdisziplinäres Denken* (1. Aufl.). Berlin: edition sigma.
- Sargent, R. (2009). Validation and verification of simulation models. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 162–176.
- Savonis, M., Burkett, V. & Potter, J. (2008). *Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase I. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research* (Savonis, M., Burkett, V. & Potter, J., Hrsg.).
- Sherman, D. J. & Nordstrom, K. F. (1994). Hazards of Wind-Blown Sand and Coastal Sand Drifts: A Review. *Journal of Coastal Research*, 263–275. Verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/25735603> (Juni 2015)
- Smith, K. (2013). *Environmental hazards. Assessing risk and reducing disaster* (6. Aufl.). New York: Routledge (E-Book Version).
- Sobiech, C. (2013). *Agent-based Simulation of Vulnerability Dynamics. A Case Study of the German North Sea Coast*. Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer-Verlag.
- Temesgen, B., Mohammed, M. & Korme, T. (2001). Natural hazard assessment using GIS and remote sensing methods, with particular reference to the landslides in the Wondogenet Area, Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 26 (9), 665–675. Verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464191701000654> (Juni 2015)
- Töllner, A. (2009). Modelle und Modellierung. In G. Bandow & H. H. Holzmüller (Hrsg.), „*Das ist gar kein Modell!*“ (S. 3–21). Gabler. Verfügbar unter [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-8484-5\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-8484-5_1) (Juni 2015)
- Transportation Research Board (TRB). (2008). *Potential impacts of climate change on US transportation* (Special report des National Research Council, Transportation Research Board, 290).
- Trinks, C., Hiete, M., Comes, T. & Schultmann, F. (2012). Extreme weather events and road and rail transportation in Germany. *International Journal of Emergency Management*, 8 (3), 207.
- UNISDR. (2004). *Living with risk. A global review of disaster reduction initiatives*. New York [u. a.]: United Nations.
- UNDP (United Nations Development Programme). (2004). *Reducing disaster risk. A challenge for development*. New York: United Nations Development Programme, Bureau for Crisis Prevention and Recovery.
- Utne, I. B., Hokstad, P. & Vatn, J. (2011). A method for risk modeling of interdependencies in critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 96 (6), 671–678. Verfügbar unter <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832010002620> (Juni 2015)
- Verband Region Stuttgart. (2008). *Klimaatlas Region Stuttgart*.
- Wagner, A. (2013a). *Zukünftige Klimaentwicklungen in Baden-Württemberg. Perspektiven aus regionalen Klimamodellen* (Kurzfassung). Karlsruhe: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.

- 
- Wagner, A. (2013b). *Zukünftige Klimaentwicklungen in Baden-Württemberg. Perspektiven aus regionalen Klimamodellen* (Langfassung.). Karlsruhe: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.
- Wang, S., Hong, L. & Chen, X. (2012). Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems: A methodological framework. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391 (11), 3323-3335. Verfügbar unter <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437111009794> (Juni 2015)
- White, G. F., Kates, R. W. & Burton, I. (2001). Knowing better and losing even more: the use of knowledge in hazards management. *Environmental Hazards* (3), 81–92.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. & Davis, I. (2004). *At risk. Natural hazards, people's vulnerability, and disasters* (2. Aufl.). London, New York: Routledge.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). (2009). *Climate change: why 2° C?* (Factsheet / Englische Ausgabe, No. 2). Berlin: WBGU.
- Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U. & Cramer, W. (2005). *Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme*. Dessau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2947.pdf> (Juni 2015)