



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Strassen ASTRA

Dokumentation

Ausgabe 2015 V1.00

Strassenwetterszenarien (SWSZ)

Definitionen und Analysen aus dem Pilotprojekt SWSZ

ASTRA 86214

ASTRA OFROU USTRA UVIAS

Impressum

Autore(n)/Arbeitsgruppe

Wyss Martin	(ASTRA)
Keller Urs	(MeteoSchweiz)
Bättig Daniel	(BFH Burgdorf)
Mori Urs	(BFH Burgdorf)
Eggimann Simon	(Simeg)
Ruess Beatrice	(RUS AG)

Herausgeber

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abteilung Strassennetze N
Standards und Sicherheit der Infrastruktur SSI
3003 Bern

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von www.astra.admin.ch herunter geladen werden.

© ASTRA 2015

Abdruck - ausser für kommerzielle Nutzung - unter Angabe der Quelle gestattet.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	2
	Inhaltsverzeichnis	3
1	Einleitung	5
1.1	Zweck	5
1.2	Geltungsbereich	5
1.3	Adressat	5
1.4	Inkrafttreten und Änderungen	5
2	Ausgangslage.....	6
2.1	Strassenwetterszenarien (SWSZ).....	6
2.2	Strassenwetter-Regionen.....	8
2.3	Meteo-Referenzstationen.....	8
2.4	Inputparameter und Sonden-Ausrüstung.....	9
3	Prognosealgorithmen	11
3.1	Das Energiebilanzmodell der MeteoSchweiz (RFT)	11
3.2	Szenarium 1: Gefrierender Regen oder Eisregen.....	12
3.3	Szenarium 3: Schneefall mit Kälteeinbruch	12
3.4	Szenarium 4: Nassschnee – beginnend mit Regen oder Schneeregen.....	13
3.5	Szenarium 8: Frost – Klare Nacht mit Bodenfrost, Blitzfrost.....	13
3.6	Szenarium 10: Nächtliche Abkühlung nach Tauwetter	14
3.7	Szenarium 11: Raureif in Verbindung mit Nebel, gefrierendem Nebel	15
4	Kritische Strassenzustände, Leerfahrten und potentielle Schäden	16
4.1	Die kritischen Strassenzustände.....	16
4.2	Die Fehler- oder Richtigraten	18
5	Statistische Auswertungen	22
5.1	Knutwilerhöhe (ZELUKH), kurze Vorwarnzeit.....	22
5.2	Knutwilerhöhe (ZELUKH), lange Vorwarnzeit.....	25
5.3	Stänglematt (ZELUST), kurze Vorwarnzeit.....	26
5.4	Stänglematt (ZELUST), lange Vorwarnzeit.....	27
5.5	Die Richtig- oder Fehlerraten der einzelnen Szenarien	28
6	Kurzzusammenfassung.....	30
	Glossar	31
	Literaturverzeichnis	32
	Auflistung der Änderungen.....	33

1 Einleitung

1.1 Zweck

Diese Dokumentation Strassenwetterszenarien (SWSZ) enthält Definitionen zu den Strassenwetterszenarien und eine erste Analyse zu den Resultaten aus dem Winter 2014/2015 vom Pilotprojekt SWSZ.

Das „Wetter“ ist ein Prozess beim Winterdiensteinsatz auf den Nationalstrassen. Der Prozess dient dazu, Synergien für die Wetterinformationen des Winterdiensts und für das Verkehrsmanagement zu nutzen. In der Dokumentation ASTRA 86211, Entscheidungsfindung und Auswertung bei Winterdiensteinsätzen (2014 V1.00) [9] sind dazu Abläufe und Strassenwetterszenarien (SWSZ), die zu kritischen Strassenzuständen führen, definiert worden. In diesem Bericht werden diese SWSZ operationell definiert. Die SWSZ werden an drei Regionen getestet und es werden die Trefferquoten der Prognosen ermittelt.

1.2 Geltungsbereich

In der FA-BM (Fachapplikation Baustellenmanagement) Modul Meteo kommen die Strassenwetterszenarien zum Einsatz. Diese werden in der ersten Phase vom Pilotprojekt SWSZ durch die Berner Fachhochschule Burgdorf (BFH Burgdorf) an die VMZ-CH geliefert. Die MeteoSchweiz wird diese später in ihr Produkteportfolio übernehmen.

Die Ausführungen in diesem Bericht gelten für kritische Strassenzustände während des Winterdienstes für das Nationalstrassennetz. Von den 12 SWSZ wurden in der ersten Phase vom Pilotprojekt 6 modelliert. Die Definition der SWSZ ist im Merkblatt ASTRA 26010-01020, Wetter (2014 V1.00) [7] enthalten.

1.3 Adressat

Diese Dokumentation Strassenwetterszenarien (SWSZ) richtet sich an alle Interessierten und Betroffenen vom Teilprodukt Winterdienst, d.h. an Mitarbeitende im Winterdienst, an Meteorologen und Benutzer von Nationalstrassen. Es zeigt auf wie die SWSZ modelliert wurden und deren Fehler- respektive Richtigraten. Es hilft auch bei der FA-BM (Fachapplikation Baustellenmanagement) Modul Meteo das Fachwissen für die SWSZ zu vertiefen oder zu schulen.

1.4 Inkrafttreten und Änderungen

Die Dokumentation tritt am 01.10.2015 in Kraft. Die Auflistung der Änderungen ist auf Seite 33.

2 Ausgangslage

Die Nationalstrassen der Schweiz weisen eine hohe Verkehrsdichte auf. Störungen im Normalbetrieb, wie Verkehrsüberlastungen oder Unfälle, führen zu unerwünschten Staus und Verzögerungen. Störungen im Verkehrsablauf treten auch auf, falls Fahrstreifen wegen Unterhaltsarbeiten oder Witterungseinflüssen unzugänglich sind. Die Erwartungen an den betrieblichen Unterhalt sind dabei im Winter besonders hoch. Fahrbahnen, die mit Schnee und Eis bedeckt sind, erhöhen die Unfallgefahr und verlängern die Reisezeit. Trotz ständig verbesserten Methoden und Vorhersagen ist der Winterdienst stark von der Beurteilung durch den Menschen abhängig. Daher ist das Bestreben vorhanden, den betrieblichen Unterhalt der Nationalstrassen im Winter mit Konzepten des Risikomanagements und Standardisierungen zu verbessern und effizienter zu gestalten. In der Dokumentation ASTRA 86211, Entscheidungsfindung und Auswertung bei Winterdiensteinsätzen (2014 V1.00) [9] sind dazu Abläufe im Winterdienst definiert worden, die auf Strassenwetterszenarien (SWSZ) basieren. Dies erlaubt es, die in der Richtlinie erwähnten Prozesse praktisch umzusetzen und ein effizienteres Risikomanagement beim Winterdienst durchzuführen. In diesem Kapitel werden die erwähnten SWSZ vorgestellt, und die Regionen erläutert, für welche Prognosen zu den SWSZ berechnet werden sollen.

2.1 Strassenwetterszenarien (SWSZ)

Die Strassenwetter Regionsprognosen werden seit über 20 Jahren durch die MeteoSchweiz an die Gebietseinheiten, respektive an die Werkhöfe geliefert und sollen jetzt durch die SWSZ abgelöst werden. Mit der Dokumentation ASTRA 86211, Entscheidungsfindung und Auswertung bei Winterdiensteinsätzen (2014 V1.00) [9] werden die Wettervorhersagen vereinheitlicht und mit der ASTRA Fachapplikation FA-BM abgeglichen. Das „Wetter“ ist dabei ein Prozess beim Winterdiensteinsatz auf den Nationalstrassen. Der Prozess dient dazu, Synergien für die Wetterinformationen des Winterdiensts und für das Verkehrsmanagement zu nutzen. Mit Hilfe einer Vereinheitlichung dieses Prozesses können Schulungen auf standardisierten Vorgaben aufgebaut werden. Bei der standardisierten Lagebeurteilung (Merkblatt ASTRA 26010-01060, Lagebeurteilung (2014 V1.00) [8]) für den Winterdiensteinsatzleiter kann ein messbares Risikomanagement aufgestellt werden. Diese Strassenwetterszenarien sind ein neues Produkt der MeteoSchweiz, erstellt in Zusammenarbeit mit dem ASTRA. Sie beruhen auf Meteorologie- und auf Strassendaten. Sie lauten wie folgt:

Nr.	Beschreibung	Winterglätte	Niederschlag	Priorität
0	Kein definiertes Szenarium / Keine Winterglätte	keine	---	13
1	Gefrierender Regen oder Eisregen Terminologie COST344 [4] Eisregen: Niederschlag, bei dem die Regentropfen eine Temperatur unter 0°C haben. Terminologie COST344 Gefrierender Regen: Regen, der bei Oberflächentemperaturen unter 0°C sofort gefriert und zu grossflächigem Glatteis führt.	Glatteis	Mit	1
2	Kalter Schneefall Temperaturen Luft und Fahrbahn dauernd unter Null.	Schnee-glätte	Mit	4
3	Schneefall mit Kälteeinbruch. Dieses Szenario ist die Fortsetzung von Nassschnee, wenn mit/nach dem Schneefall eine massive Abkühlung erfolgt (Markante Kaltfront).	Schnee-glätte	Mit	3

4	Nassschnee Beginnend mit Regen oder Schneeregen.	Schneematsch	Mit	5
5	Schneeverwehung ohne Schneefall. Terminologie COST344 Schneeverwehung, Schneewehe oder Schneeverfrachtung: Durch Wind bewegter Schnee, der sich in Schneewehen ansammelt.	Schneeglätte	Ohne	11
6	Industrieschnee – Nebeldecke, Inversion Terminologie COST344 Inversion: Eine kalte Grundschicht mit darüber liegender wärmerer Luft.	Schneeglätte	Mit	12
7	Unterkühlter Nieselregen aus Nebel/Hochnebel. Terminologie COST344 Nieselregen: Sprühregen, feiner Regen, Nebelregen.	Glatteis	Mit	2
8	Frost – Klare Nacht mit Bodenfrost, Blitzfrost. Terminologie COST344 Frost: Fahrbahntemperatur tiefer als die Taupunkttemperatur führt zu Reifdeposition. Terminologie COST344 Blitzfrost: Die rasche Bildung von Reifglätte in den frühen Morgenstunden (um Sonnenaufgang).	Reifglätte	Ohne	6
9	Aufklaren nach Regen (nasse Strassen). Terminologie COST344 Niederschlag: Oberbegriff für aus der Atmosphäre in flüssiger oder fester Form auf die Erde fallendes Wasser.	Eisglätte	Ohne	8
10	Nächtliche Abkühlung nach Tauwetter. Terminologie COST344 Tauwetter, Auftauen: Abschmelzen von Schnee oder Eis aufgrund einer Erhöhung der Temperatur.	Eisglätte	Ohne	9
11	Raureif in Verbindung mit Nebel, gefrierender Nebel. Terminologie COST344 Raureif, Reif: Kühlt sich die Oberfläche zum Beispiel durch nächtliche Ausstrahlung unter den Taupunkt ab, deponiert sich der Wasserdampf der Luft am Erdboden oder an Gegenständen, indem sich schuppen- oder nadelförmige weisse Eiskristalle anlagern. Terminologie COST344 Gefrierender Nebel: Unterkühlte Nebeltröpfchen, die beim Kontakt mit hervorstehenden Objekten gefrieren und einen Überzug aus Reif oder Eis bilden.	Reifglätte oder Glatteis	Ohne	7
12	Wärmeeinbruch Föhnwinde (Erwärmung der Luft aber nicht der Strasse). Terminologie COST344 Föhn: Ein Sonderfall eines Fallwindes ist der warme Föhn im Voralpenvorland: beim Übersteigen des Gebirges kommt es auf der Luvseite zum Ausregnen und auf der Leeseite beim Absteigen zur Erwärmung der Luftmasse.	Glatteis	Ohne	10

Jedem Szenario wird eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 0% - 100% zugeordnet. Die Intervention wird in einer Handlungsempfehlung definiert, die abhängt vom Szenariotyp und von der örtlichen Strecke und kann zum Beispiel bei Eisregen mit sehr tiefen Eintrittswahrscheinlichkeiten ausgelöst werden. Weiter wird für jedes Szenarium die Eintrittswahrscheinlichkeit für 6 Zeitperioden berechnet: 0-1h / 1h-2h / 2h- 3h / 3h-4h / 4h-5h / 5h-6h. Die Gefahrenstufe von jedem Szenarium wird über eine Priorität geregelt. Diese Lösung ermöglicht es später einfache Anpassungen oder individuelle Prioritäten zu programmieren. Die Szenarien sollen später ebenfalls in die SNV-Normierung einfließen.

Für den Testbetrieb im Winter 2014/15 wurden Prognosen für die Szenarien 1, 3, 4, 8, 10 und 11 gerechnet. Dies deckt ein breites Spektrum von verschiedenen gefährlichen Strassensituationen ab.

2.2 Strassenwetter-Regionen

Die MeteoSchweiz hat im Rahmen der Vereinheitlichung der Wetterprognosen für die Nationalstrasse die Strassenwetterregionen neu definiert. Die Auswahl der Strassenwetterregionen nimmt Rücksicht auf klimatische Bedingungen, es sind aber keine Klimaregionen. Die folgende Abbildung zeigt diese Regionen:



Für den Testbetrieb im Winter 2014/15 wurden Prognosen für die Regionen 43, 47 und 49 gerechnet. Damit wird ein grosser und repräsentativer Teil des Mittellands abgedeckt, der ein hohes Verkehrsaufkommen auf den Nationalstrassen hat.

2.3 Meteo-Referenzstationen

Das ASTRA stellt der MeteoSchweiz die Daten von ca. 150 Meteostationen aus den über 500 GFS-Stationen der Nationalstrasse im 10 Minutentakt zur Verfügung, damit die Meteoalarme und Prognosen zu den Strassenwetterszenarien gerechnet werden können. Diese Daten dienen der MeteoSchweiz auch zur Kontrolle der eigenen Prognosen, sowie zur Herstellung der Produkte für das ASTRA.

Die Strassenwetterszenarien werden pro Meteostation gerechnet. Daraus ergeben sich dann Prognosen für die Strassenwetterszenarien pro Strassenwetterregion.

Für den Testbetrieb im Winter 2014/15 wurden Prognosen für die folgende Meteorostationen gerechnet:

- Region 43: Kirchberg (BOBEKB), Niederbipp (BOSONB), Teufelsbrücke (BO-SOTB);
- Region 47: Kiesen (BOBEKI);
- Region 49: Stänglematten (ZELUST), Knuttwilerhöhe (ZELUKH), Bibersee (ZHSTH).

Die erwähnten Meteorostationen decken die Regionen 43, 47 und 49 vollständig ab. Die Stationen bilden auch verschiedene Strassensituationen ab: Brücken, Nebelgebiete, tiefe und höhere Regionen.

2.4 Inputparameter und Sonden-Ausrüstung

Um die Strassenwetterszenarien prognostizieren können, werden Modelle benutzt, die Messwerte aus den Strassensonden brauchen. Diese sind für die Szenarien 1, 3, 4, 8, 10 und 11:

Messwert	Name	Strassenwetterszenarium
Strassentemperatur Oberfläche	sprroute_trssurs0	1, 3, 4, 8, 10, 11
Bodentemperatur in 7 cm Tiefe	sprroute_tso007s0	1, 3, 4, 8, 10, 11
Neuschneehöhe seit 06:00 UTC	sprroute_hns000a0	10
Sichtweite	sprroute_vhoauts0	11
Schneefallintensität		11
Schneehöhe neben der Strasse		10

Die folgende Tabelle zeigt die Messwerte der Strassensonden, die benutzt werden können, um erfolgte, kritische Strassensituationen nachträglich evaluieren zu können. Diese ermöglichen die Prognosequalität der Szenarien zu messen.

Messwert	Name	Strassenwetterszenarium
Strassentemperatur Oberfläche	sprroute_trssurs0	1, 3, 4, 8, 10, 11
Sichtweite	sprroute_vhoauts0	11
Schneefallintensität	sprroute_rsks0s0	1, 3, 4
Surface State	sprroute_estrfs0	1, 3, 4, 8, 10, 11
Intensität Niederschlag	sprroute_riicd0s0?	1, 3, 4
Gefrierpunkt		1, 3, 4, 8, 10, 11

Um Prognosen zu den Strassenwetterszenarien zu rechnen, werden Prognosedaten aus dem COSMO- und INCA-Modell der MeteoSchweiz benötigt. Die folgende Tabelle zeigt die benötigten Parameter für die Szenarien 1, 3, 4, 8, 10 und 11:

Inputparameter	Name
Globalstrahlung	cosmo_108020
Diffuser Teil der Globalstrahlung	cosmo_108064
Strahlungsbilanz	cosmo_108045
Lufttemperatur	cosmo_108002
Taupunkttemperatur	cosmo_108008
Bewölkungsgrad total	cosmo_108046
Bewölkungsgrad high	cosmo_108047
Bewölkungsgrad medium	cosmo_108048
Bewölkungsgrad low	cosmo_108049
Wind zonal	cosmo_108050
Wind meridional	cosmo_108051
Schneeanteil	cosmo_108043
Regenmenge	cosmo_108023
Schneemenge	cosmo_108023
Niederschlagsrate	Inca_RR
Temperaturprofil 1	cosmo_108071
Temperaturprofil 2	cosmo_108070
Schneefallgrenze	cosmo_108059
Lufttemperatur 5 cm	Inca_TG
Luftfeuchtigkeit	cosmo_108014
Wind zonal 1000 m.ü.M.	cosmo_108072
Wind meridional 1000 m.ü.M.	cosmo_108073

3 Prognosealgorithmen

Jeder Algorithmus für ein Wetterszenarium ist modular aufgebaut. Der Aufbau eines Algorithmus wird im Folgenden mit Grafiken dargestellt. Unterschieden wird dabei von wichtigen und weniger wichtigen Modulen. Die wichtigen Module sind grafisch hervorgehoben (ausgezogener Rahmen). Fehlen die Outputs der wichtigen Module, so kann für das entsprechende Wetterszenarium keine Prognose gerechnet werden. Die Resultate der einzelnen Module sind Wahrscheinlichkeiten, Bayes-Faktoren (Chancen) oder physikalische Grössen. Um mit Bayes-Faktoren rechnen zu können, braucht man den Begriff der Chance. Mit Chancen lassen sich Wahrscheinlichkeiten anders ausdrücken. So entspricht einer Wahrscheinlichkeit von 0,8 eine Chance von 80:20, 8:2 oder 4:1. An die Verkehrsmanagementzentrale in Luzern (VMZ-CH) werden Wahrscheinlichkeiten für die SWSZ, auf eine Kommastelle gerundet, übermittelt.

3.1 Das Energiebilanzmodell der MeteoSchweiz (RFT)

Das Energiebilanzmodell der MeteoSchweiz (auch RFT Road Forecast Tool genannt), berechnet Prognosen für die Strassenoberflächentemperatur T_0 und die programmierten Schichtenhöhen an Regen, Schnee und Eis (bzw. Frost) auf einer Strasse. Entwickelt wurde das Modell von L. Zraggen von der MeteoSchweiz und der Berner Fachhochschule. Das RFT spielt eine zentrale Rolle, um die Strassenszenarien zu berechnen. Im Folgenden wird daher das RFT kurz erklärt.

Um die Strassentemperatur T_0 und den Strassenzustand zu rechnen, braucht man:

- Startwerte für die Temperatur $T(x,0)$ in Tiefe x zum Zeitpunkt 0 des Bodens;
- Randbedingungen der Temperatur $T(100,t)$ in 100 cm Tiefe für das Prognosefenster $0 \leq t \leq 360$ Minuten;
- Den Bodenwärmefluss WF_{Boden} auf der Strassenoberfläche während des Prognosefensters $0 \leq t \leq 360$ Minuten.

Die Temperatur $T_0(t) = T(0,t)$ der Strassenoberfläche zum Prognosezeitpunkt t bestimmt sich mit der Wärmetransportgleichung, einer linearen partiellen Differenzialgleichung 2. Ordnung und der Randbedingung über den Bodenwärmefluss auf der Strassenoberfläche. Die partielle Differenzialgleichung wird diskretisiert und so numerisch gelöst. Der Bodenwärmefluss bestimmt sich aus prognostizierten Strahlungsparametern mit dem COSMO- und/oder dem INCA-Modell. Er berechnet sich wie folgt:

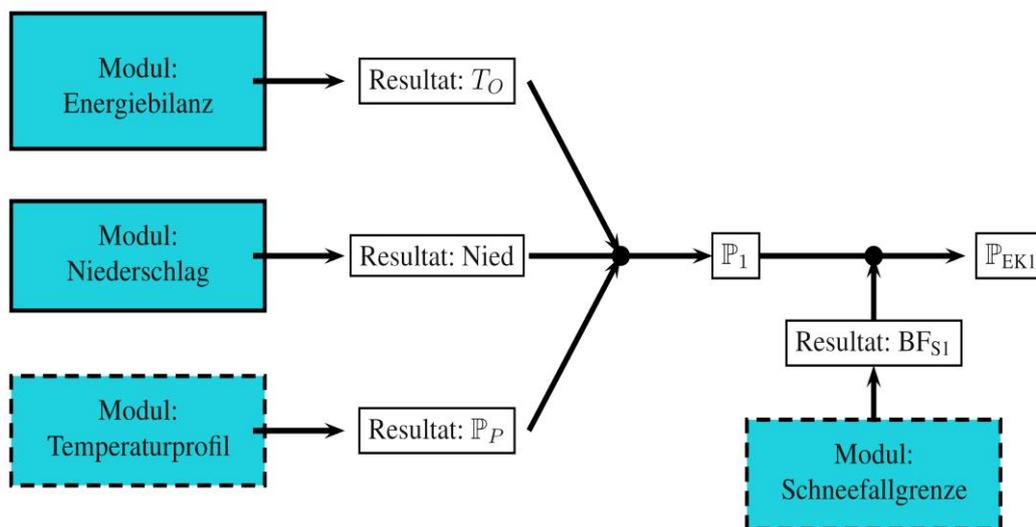
$$WF_{Boden} = N - S - L + E_R + E_S + E_E + E_P + E_{korr}$$

Hier ist N die Netto-Strahlung, S der sensible Wärmefluss, L der latente Wärmefluss und E_R , E_S , E_E und E_P die Energie-Einträge bei Niederschlag auf die Strasse (auf Grund von Regen, Schnee, Eis und Phasenumwandlung). Der Energiesummand E_{Rkorr} erfasst Schmelz- und Gefrierprozesse. Der Einfluss von Salz auf der Strasse wird dabei aber nicht modelliert. Um die Energieeinträge zu rechnen, braucht man die prognostizierte Lufttemperatur, die prognostizierte Regenmenge und die prognostizierte Schneemenge. Diese Parameter finden sich im COSMO-Modell. Mit den Energieeinträgen werden auch die Schnee-, Regen- und Eisreservoirs auf der Strasse gerechnet. Zu Beginn jeder Rechnung werden diese Reservoirs jeweils auf Null gesetzt.

Details zu den Energieeinträgen und zur Berechnung der Reservoirs finden sich im Bericht zum Energiebilanzmodell der Berner Fachhochschule (siehe [3] und [4]).

3.2 Szenarium 1: Gefrierender Regen oder Eisregen

Der Algorithmus, der die Wahrscheinlichkeit P_{EK1} des Szenariums 1 für ein Zeitfenster berechnet, besteht aus vier Inputmodulen. Zwei davon sind wichtige Module (Energiebilanz und Niederschlag). Ihre Resultate müssen vorhanden sein, um die Wahrscheinlichkeit P_{EK1} zu berechnen. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau, wie diese Wahrscheinlichkeit berechnet wird:



Aus dem Energiebilanzmodell wird die Strassenoberflächentemperatur T_O prognostiziert. Diese Temperatur muss kleiner als Null sein, dass eventueller Niederschlag auf der Strasse gefrieren kann.

Das Modul Niederschlag berechnet das Regenrisiko und aus dem Modul des Temperaturprofils wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass der Niederschlag als Regen auf die Strasse fällt. Diese drei Wahrscheinlichkeiten werden benutzt, um daraus die Wahrscheinlichkeit P_1 zu bestimmen.

Das Modul „Schneefallgrenze“ berechnet zusätzlich die Wahrscheinlichkeit, dass die Schneefallgrenze oberhalb der Strassenstrecke ist. Eine Bedingung die nötig ist, damit der Niederschlag nicht als Schnee, sondern als Regen auf die Strasse fällt.

Die Details der Modellierung finden sich im Bericht [1].

3.3 Szenarium 3: Schneefall mit Kälteeinbruch

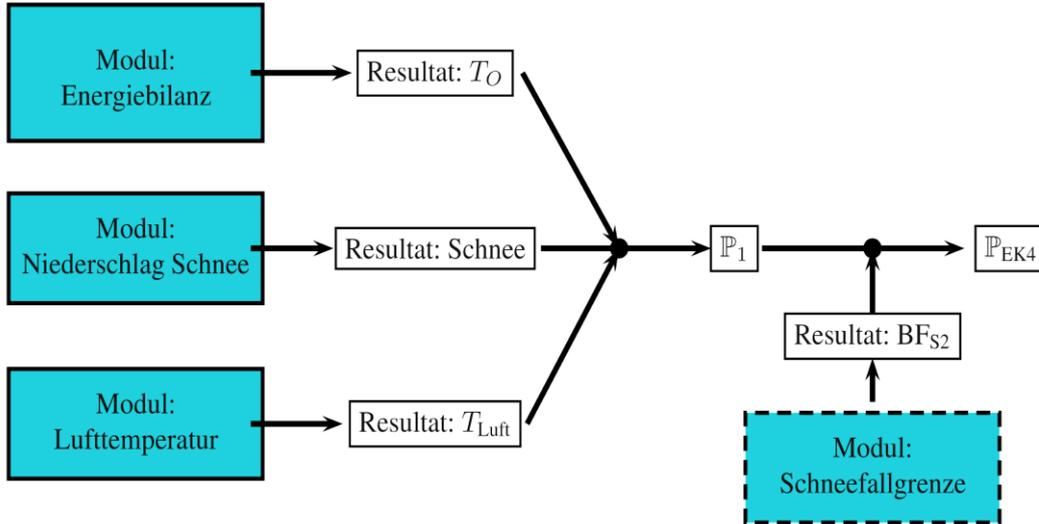
Das Szenarium 3 ist eine Fortsetzung des Szenariums 4. Damit das Szenarium 3 eintritt, muss das Szenarium 4 in den letzten 60 bis 120 Minuten eingetreten sein. Die Wahrscheinlichkeit P_{EK3} , dass das Szenarium 3 eintritt, wird über eine bedingte Wahrscheinlichkeit mit Bezug auf das Szenarium 4 gerechnet. Bei der Rechnung wird dabei mit einem Bayes-Faktor BF gearbeitet. Er verstärkt oder schwächt die Chance des Szenariums 3 in Funktion der Chance des Szenariums 4. Er lautet:

- $BF = 0$, falls die Strassenoberflächentemperatur grösser als -0.7°C ist;
- $BF = 1$, falls die Strassenoberflächentemperatur kleiner als -0.7°C ist;
- $BF = 2$, falls die Strassenoberflächentemperatur kleiner als -0.7°C ist und die Schneefallgrenze oder die Lufttemperatur abnimmt;
- $BF = 2$, falls die Strassenoberflächentemperatur kleiner als -0.7°C ist, die Schneefallgrenze und die Lufttemperatur abnehmen.

Ist etwa $BF = 2$, so ist die Chance, dass das Szenarium 3 stattfindet, gleich zweimal der Chance des Szenarium 4.

3.4 Szenarium 4: Nassschnee – beginnend mit Regen oder Schneeregen

Der Algorithmus, der die Wahrscheinlichkeit P_{EK4} des Szenariums 4 für ein Zeitfenster berechnet, besteht aus vier Inputmodulen. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Algorithmus:



Aus dem Energiebilanzmodell wird die Strassenoberflächentemperatur T_O prognostiziert. Diese darf nicht zu tief sein, damit Nassschnee auf der Strasse liegen kann.

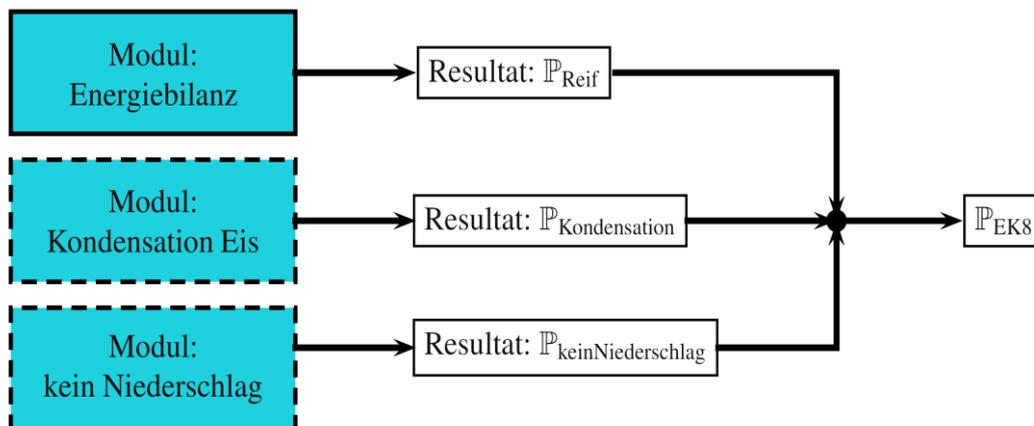
Das Modul „Niederschlag Schnee“ berechnet das Risiko von Schneefall und aus dem Modul „Lufttemperatur“ wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass die Lufttemperatur größer als -1°C ist.

Die drei Wahrscheinlichkeiten werden benutzt, um daraus die Wahrscheinlichkeit P_1 zu bestimmen. Das Modul „Schneefallgrenze“ berechnet zusätzlich die Wahrscheinlichkeit, dass die Schneefallgrenze unterhalb der Strassenstrecke ist.

Die Details der Modellierung finden sich im Bericht [1].

3.5 Szenarium 8: Frost – Klare Nacht mit Bodenfrost, Blitzfrost

Der Algorithmus, der die Wahrscheinlichkeit P_{EK8} des Szenariums 8 für ein Zeitfenster berechnet, besteht aus drei Inputmodulen. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau zur Rechnung des Szenariums 8:



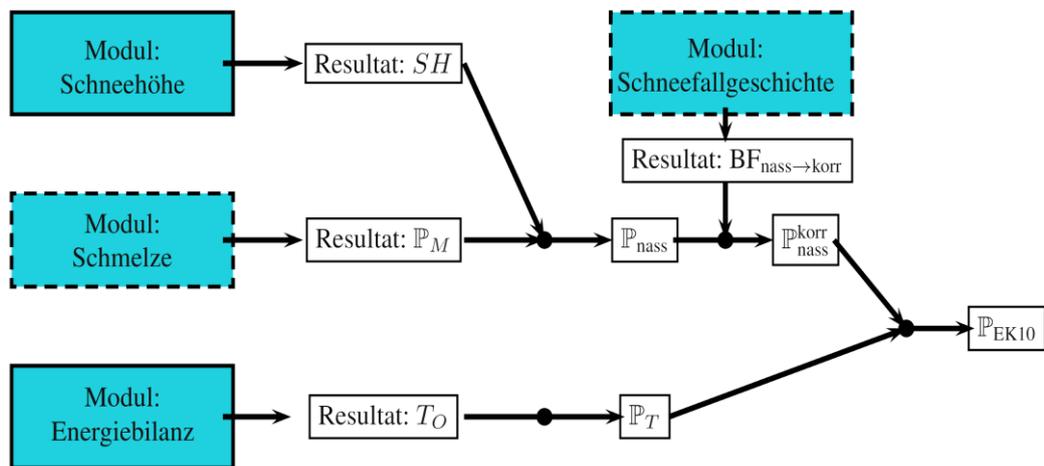
Das Modul Energiebilanz prognostiziert die Dicke des Reifs auf der Strassenoberfläche. Dies ist das vom Energiebilanzmodell gerechnete Eisreservoir. Eine Eiskecke von etwa 0.2 mm oder höher bewirkt eine hohe Wahrscheinlichkeit von Frost auf der Strasse.

Das Modul „Kondensation Eis“ prognostiziert, ob das Eis auf Grund von Kondensation entstanden ist (eine Bedingung für Frost). Betrachtet werden dazu die Oberflächentemperatur der Strasse und ihr Verhältnis zur Taupunkttemperatur. Mit dem Modul „Niederschlag“ wird überprüft, dass kein Niederschlag prognostiziert wird, und daher das Eisreservoir nicht durch Niederschlag entsteht.

Die Details der Modellierung finden sich im Bericht [1].

3.6 Szenarium 10: Nächtliche Abkühlung nach Tauwetter

Der Algorithmus, der die Wahrscheinlichkeit P_{EK10} des Szenariums 10 für ein Zeitfenster berechnet, besteht aus drei Inputmodulen. Die Resultate zweier Module (Oberflächentemperatur und Schneehöhe) müssen vorhanden sein, um die genannte Wahrscheinlichkeit zu berechnen. Hier der Aufbau zur Rechnung der Prognose:



Damit das Szenarium 10 eintritt muss Schnee neben der Strasse liegen. Mit dem Modul „Schneehöhe“ wird dies ermittelt. Die Schneehöhe kann aus den SMN-Stationen bestimmt werden. Um die Schneehöhe bei den Strassensonden zu bestimmen, muss diese aus den benachbarten SMN-Stationen durch lineare Interpolation auf die Höhe berechnet werden. Am besten ist die Schneehöhenmessung direkt durch die Strassenstation. Dies könnte in einer späteren Phase erfasst werden.

Mit dem Modul „Schmelze“ wird mit Hilfe des Energiebilanzmodells die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass der liegende Schnee neben der Strasse schmelzen kann. Dies wird mit einer logistischen Regression über die Schmelze M getan. Die Schmelze M berechnet sich mit der Gleichung.

$$M = N + S + L$$

Dabei ist N die Nettostrahlung, S der sensible Wärmefluss und L der latente Wärmefluss. Schneeschmelze findet statt, wenn $M \geq 0$ ist.

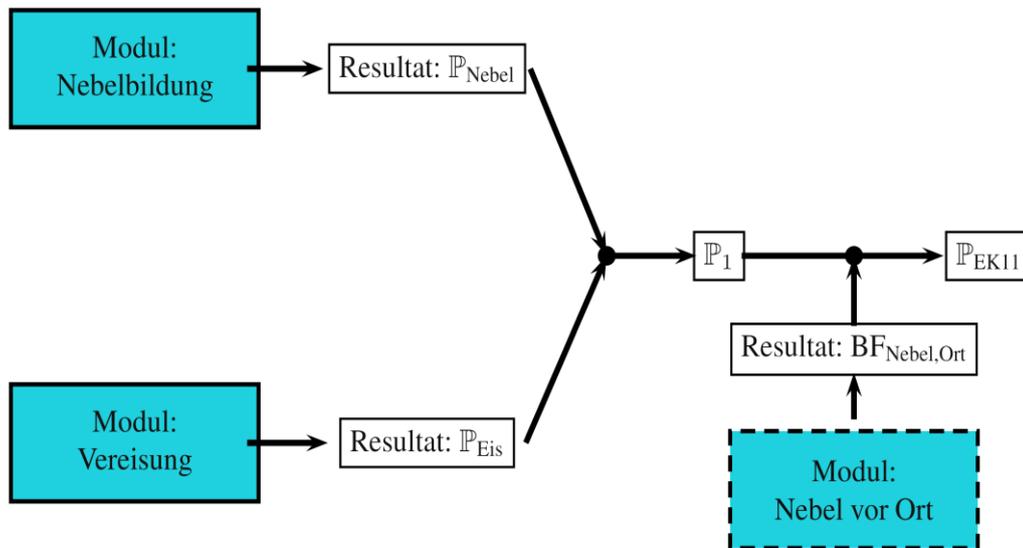
Aus den beiden Modulen wird die Wahrscheinlichkeit P_{nass} gerechnet, dass die Strasse nass wird. Das Modul „Schneefallgeschichte“ bestimmt den Schneefall in den letzten 24 Stunden vor dem Prognosezeitpunkt. Ein möglicher Schneefall erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass geschmolzener Schnee auf die Strasse gelangen kann. Mit Hilfe des Moduls aus dem Energiebilanzmodell (Modul „Energiebilanz“) wird dann die Wahrscheinlichkeit ermittelt, dass die Temperatur der Strassenoberfläche unter Null fällt. Dies ist notwendig, damit die Nässe auf der Strasse gefriert und ein kritischer Strassenzustand entstehen kann.

Die Details der Modellierung finden sich im Bericht [1].

3.7 Szenarium 11: Raureif in Verbindung mit Nebel, gefrierendem Nebel

Um Prognosen für dieses Szenarium zu rechnen, ist es wichtig, dass in Zukunft alle Referenzstrassenstationen mit Sichtweitemessgeräten ausgestattet sind. Dies erlaubt es, ob Nebel vor Ort vorhanden ist und kurzzeitige Prognosen zu machen, ob sich der Nebel verstärkt oder auflöst. Damit kann auf schnell ändernde lokale Phänomene besser Rücksicht genommen werden.

Der Algorithmus, der die Wahrscheinlichkeit P_{EK11} des Szenariums 11 berechnet, besteht aus drei Inputmodulen. Die Resultate zweier Module (Nebelbildung und Vereisung) müssen vorhanden sein, um diese Wahrscheinlichkeit zu berechnen. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau der Prognoserechnung:



Dieses Modul „Nebelbildung“ prognostiziert die Wahrscheinlichkeit, dass Nebel gebildet wird. Diese Prognose ist aber schwierig, da viele Prädikatoren eine Rolle spielen. Ideal wäre es, mit dem troposphärischen Grenzschichtmodell (TGM) zu arbeiten. Dieses Modell befindet sich aber noch in Entwicklung. Bis zu seinem Einsatz, wird daher die Prognose der Nebelbildung mit bewährten ad-hoc Parametern aus dem Strassenglätte-Prognose-System (siehe [2]) gerechnet, das während zweier Winter im Kanton Bern eingesetzt wurde. Die Wahrscheinlichkeit von Nebel wird mit der Prognose zur Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit auf 1000 m.ü.M. und der Nebelgrenze gerechnet.

Das Modul „Vereisung“ berechnet die Wahrscheinlichkeit, dass vorhandener Nebel auf der Strasse vereisen oder deponiert werden kann. Dazu muss einerseits die Lufttemperatur grösser als die Strassenoberflächentemperatur sein. Zudem muss die Strassenoberflächentemperatur kleiner als null sein.

Das Modul „Nebel vor Ort“ versucht herauszufinden, ob sich an der Strasse schon Nebel gebildet hat oder am Entstehen ist. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass in den nächsten 6 Stunden weiter Nebel vor Ort vorhanden ist. Der vorhandene Nebel vor Ort wird aus den Sichtkameras der Stationen bestimmt. Zudem wird mit der Schneeeintensität kontrolliert, dass eine gemessene geringe Sichtweite nicht wegen Schneefalls erfolgt.

Die Details der Modellierung finden sich im Bericht [1].

4 Kritische Strassenzustände, Leerfahrten und potentielle Schäden

Ausgangslage für die statistische Überprüfung bilden einerseits die kritischen Strassensituationen der Testperioden des Winters 2014/15, die in 10-15 Minuten-Zeitintervallen erfasst wurden, und andererseits die Resultate des Prognosesystems. Für die Analyse der verschiedenen Mess- und Prognosedaten wurde ein entsprechendes Software-Tool entwickelt, welches im Folgenden als Dataviewer bezeichnet wird. Der Dataviewer erlaubt es, für jede Sonde Daten aus einem gewählten Zeitfenster aufzurufen und grafisch darzustellen.

4.1 Die kritischen Strassenzustände

Die kritischen Zustände der Strassen wegen winterlicher Gegebenheiten werden mit verschiedenen Mittel (Strassensonden, MeteoSchweiz-Prognosen, Sichtweitenkameras) wie folgt direkt und teilweise indirekt bestimmt:

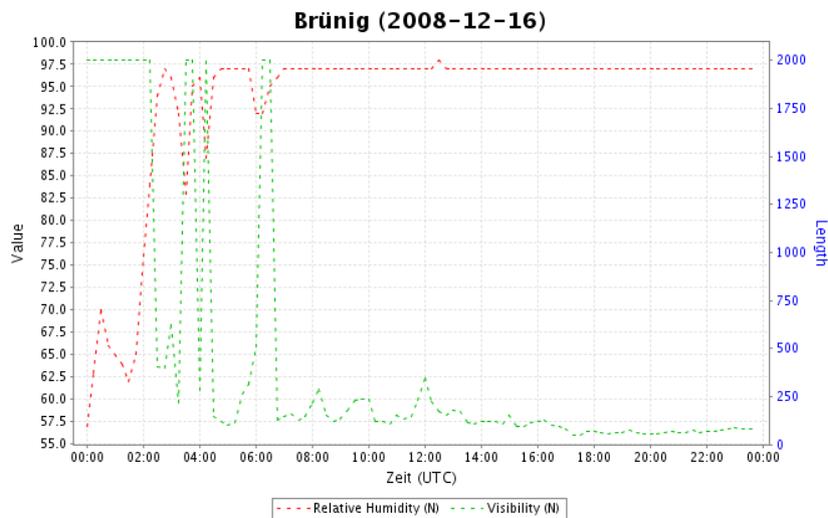
- **Szenarium 1 (Gefrierender Regen oder Eisregen, Blitzeis):** Dieser Fall ist mit dem DataViewer, den Daten aus der MeteoSchweiz und den Sonden überprüfbar. Die Voraussetzung ist eine Strasse unter der Gefriertemperatur. Eine Warmfront mit Niederschlag in Form von Regen fällt dann auf die Strasse und führt zu Glatteis.
- **Szenarium 3 (Schneefall mit Kälteeinbruch):** Wetterfronten lassen sich mit dem DataViewer (Precipitation State, Surface State „Snow“) und mit den Kameras bestimmen. Dieser Fall ist mit dem Dataviewer und den Aufzeichnungen aus der MeteoSchweiz überprüfbar: Strassentemperatur unter Null, Niederschlag, Front mit Schneefall.
- **Szenarium 4 (Nassschnee - beginnend mit Regen oder Schneeregen):** Dieser Fall ist ähnlich wie das Szenarium 3 detektierbar. Die Temperatur der Strasse hat einen Nulldurchgang, und Niederschlag ist vorhanden und die Schneefallgrenze sinkt unterhalb der Strassenhöhe.
- **Szenarium 8 (Frost -- klare Nacht mit Bodenfrost, Blitzfrost):** Die am schwierigsten zu detektierende Situation ist die eintretende Reifglätte. Reifglätte ist ein meist ein langsamer Prozess, der manchmal Stunden benötigt, um sich zu bilden. Eine direkte Detektion mit den Strassensonden ist nur schwer möglich, da der Alarmstatus „Frost“ nicht zuverlässig arbeitet und nicht bei allen Sonden vorhanden ist. Weiter ist dieser Prozess sehr empfindlich gegenüber der Salzmenge auf der Strasse, die schwierig zu messen ist. Daher ist es anhand der Daten aus den Sonden schwierig zu sagen, ob sich wirklich Frost auf der Strasse aufgebaut hat (und falls ja, ab welchem Zeitpunkt). Andere vorhandene Mittel, die zur Detektion von Reifglätte helfen, sind Kameras. Hat sich Reifglätte während der Nacht aufgebaut, dann kann sie teilweise in der Umgebung der Strasse (beispielsweise auf Sträuchern, Leitplanken, Pannestreifen) sichtbar sein. Die folgende Grafik zeigt eine Frostsituation bei Brienz aus dem Jahr 2009:



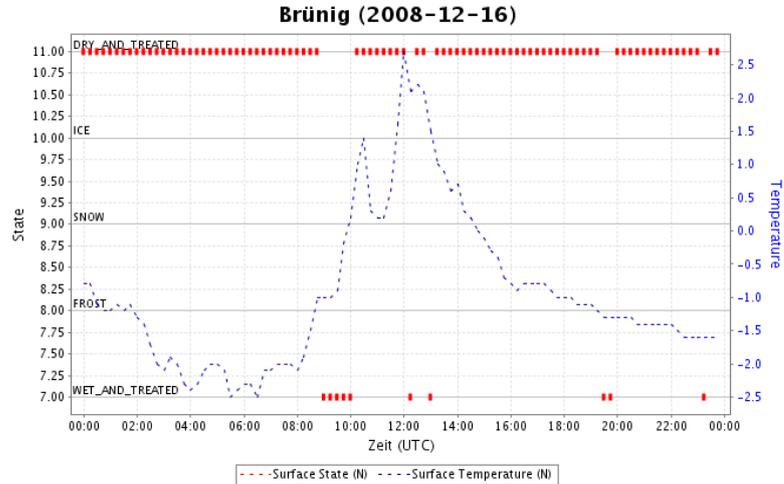
- **Szenarium 10 (Nächtliche Abkühlung nach Tauwetter):** Um dieses Szenarium zu detektieren, braucht man Kameras. Sie erlauben es, die Schneehöhe neben der Strasse zu messen. Mit dem Dataviewer lassen sich die Energieflüsse via Lufttemperatur und negativer Strassenoberflächentemperatur ablesen.
- **Szenarium 11 (Raureif in Verbindung mit Nebel, gefrierender Nebel):** Das Szenarium lässt sich detektieren, wenn die Strassensonde ein Sichtweitenmessgerät oder eine Kamera enthält. Mit den Daten aus der MeteoSchweiz lässt sich feststellen, dass eine eingeschränkte Sichtweite nicht wegen Schneefall eintritt. Eine hohe Luftfeuchtigkeit, sowie der Verlauf der Taupunktskurve geben weitere Hinweise auf Nebel. Es bleibt zu prüfen, ob der Strasse Zustand wirklich gefährlich worden ist. Zu diesem Zweck können mit dem DataViewer der Oberflächentemperaturverlauf und der Surface State der Strasse visualisiert werden. Hier ein Beispiel dazu aus der Messstation beim Brünig vom 16.12.2008: Ab 16:00 bildet sich Nebel, wie aus den Strassenbeobachtungskamerabilder ersichtlich ist:



Die Nebelbildung lässt sich auch indirekt mit dem Datenviewer prüfen. Die folgende Grafik zeigt den Verlauf der Luftfeuchtigkeit und der Sichtweite:



Auffallend sind die hohe Luftfeuchtigkeit und die tiefe Sichtweite von unter 250 Metern. Es bleibt zu prüfen, ob der Strassenzustand wirklich gefährlich worden ist. Zu diesem Zweck können mit dem Dataviewer der Oberflächentemperaturverlauf und der Surface State gezeichnet werden:



Gegen 19:00 ist der Surface State „wet and treated“, während die Oberflächentemperatur negativ ist. Alle Bedingungen, damit sich Glatteis bildet sind vorhanden: die Strasse wird als kritisch eingestuft.

4.2 Die Fehler- oder Richtigraten

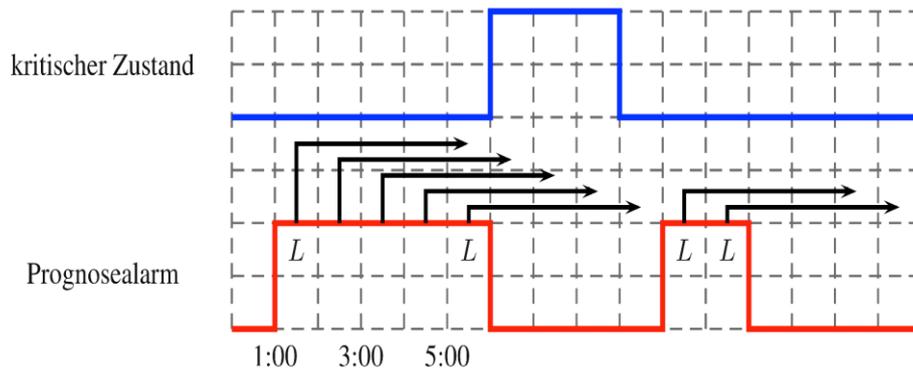
Um die Fehler- oder Richtigraten der berechneten Prognosen zu berechnen, müssen die prognostizierten Wahrscheinlichkeiten der Strassenwetterszenarien in Kategorien eingeteilt werden. Eine feine Einteilung ergibt sich, wenn man die Wahrscheinlichkeiten in die Kategorien 0 – 10%, 10 - 20%,, und 90 - 100% zerlegt. Um aber die Fehler- oder Richtigraten dieser Kategorien mit genügender Präzision zu bestimmen, braucht man Daten aus mehreren Wintern. Da das System aber nur im Winter 2014/15 im Einsatz war, werden nur die drei folgenden Kategorien verwendet, um die Fehlerraten zu bestimmen:

	Gelb	Orange	Rot
Wahrscheinlichkeit Prognose	5 – 30%	30 – 75%	75 – 100%
Sollwert durchsch. Fehlerrate	80%	50%	15%
Sollwert durch. Richtigräte	20%	50%	85%

Die letzte Zeile in der Tabelle zeigt, welche durchschnittliche Richtigräte bei den Prognosen zu Gelb, Orange und Rot zu erwarten ist.

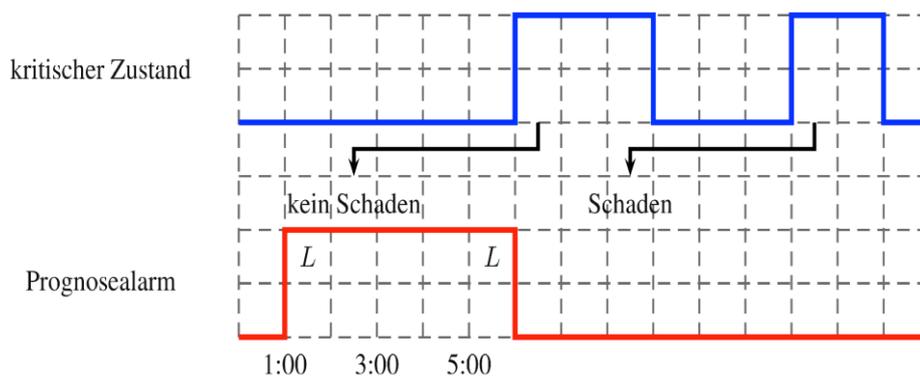
Die statistische Beurteilung des Prognosesystems erfolgt dann über eine Messung der **Leerfahrten** und der **potenziellen Schäden**. Dabei gilt:

1. Das Prognosesystem erzeugt eine Leerfahrt, falls bei einem Prognosealarme kein kritischer Strassenzustand stattfindet. Eine grosse Anzahl von Leerfahrten führt zu höheren Betriebskosten und aus der Sicht der Benutzer zu einem Vertrauensschwund in das Prognosesystem. Man bezeichnet mit L die Anzahl Leerfahrten. Wie Leerfahrten gezählt werden, illustriert die folgende Abbildung bei einer Prognose auf 4 Stunden:



Man hat 4 Leerfahrten ($L = 4$) bei fünf Warnmeldungen während 5 Stunden und zwei Warnmeldungen während 2 Stunden.

- Ein potenzieller Schaden tritt auf, wenn das System eine kritische Situation nicht voraussagt. Nicht erkannte kritische Strassenzustände führen zu potenziellen Schäden und bewirken volkswirtschaftliche Schäden, wie Kosten für Wartezeiten infolge von Staus oder Kosten infolge von Unfällen. Man bezeichnet mit S die Anzahl potentieller Schäden. Wie S gezählt wird, zeigt die folgende Abbildung bei einer Prognose auf 4 Stunden:



Man hat einen Schaden $S = 1$. Die Zahl S ist höchstens gleich der Anzahl problematischer Wettersituationen. Die Anzahl Leerfahrten ist bei der Abbildung gleich zwei.

Die einzelnen Alarme gelb, orange und rot können nur mit Leerfahrten quantifiziert werden, da einzelne Kategorien von Alarmen nicht alle kritischen Strassenzustände voraussagen können. Die Fehler- oder Richtigrate der Gesamtheit aller Alarme wird über die potenziellen Schäden gemessen.

Die Messgrößen L und S werden als Zeitreihen modelliert. Sie sind korrelierte Zufallsvariablen. Eine Gesamtbeurteilung des Prognosesystems mit der Summe $T = L+S$ könnte sinnvoll sein. Die Grösse T informiert über die Kosten pro Wintersaison: diese Kosten können als proportional zu der Summe T angenommen werden.

Für die Größen S und L sind Fehlerraten definiert, und zwar gemäss den folgenden Formeln:

$$P_S = E\left(\frac{\text{Anzahl Schäden}}{\text{Anzahl kritischer Zustände}}\right), \quad P_L = E\left(\frac{\text{Anzahl Leerfahrten}}{\text{Anzahl Warnungen}}\right)$$

Dabei steht das Symbol $E()$ für den *Erwartungswert* oder den im Schnitt erwartbaren Wert. Der Erwartungswert einer Zufallsvariable ist ein theoretischer Mittelwert. Der erste Parameter ist die Wahrscheinlichkeit, dass das System pro kritischem Zustand keinen Alarm auslöst. Der zweite Parameter ist die Wahrscheinlichkeit, dass unter allen Warnungen die Warnung ein Fehlalarm ist. Die **Richtigraten** der Prognosen berechnen sich mit $1-P_S$ bzw. mit $1-P_L$.

Die Fehler- oder Richtigraten werden durch statistische Auswertungen geschätzt und mit einer Genauigkeitsangabe (Unsicherheit der Schätzung) angegeben. Die Rechnungen zur Genauigkeitsangabe erfolgen mit Monte-Carlo-Simulationen. Dabei werden mehrere hundert neue Winter simuliert und dabei wird hochgerechnet, wie das System in solchen Fällen reagieren würde.

Die Fehlerraten pro Ereignis haben den Nachteil, dass sie zu einer Überschätzung der untersuchten Raten führen können. Der Grund ist, dass Perioden ohne kritische Strassenzustände, während welchen das System korrekt funktioniert, nicht berücksichtigt werden. Gibt es beispielsweise während des ganzen Winters ohne kritische Strassenzustände nur eine falsche Warnung des Systems, dann ist die Fehlerrate der Leerfahrten gleich 100%, obwohl das System fast die ganze Zeit korrekt funktioniert hat!

Um dies zu vermeiden, werden Fehlerrate *pro Zeitfenster* (oder genauer pro Wettersituation, hier 10 Stunden) definiert. Die Zerlegung in Zeitfenster von 10 Stunden widerspiegelt in etwa das typische Verhalten von Wettersituationen in der Schweiz. Es geht hier darum, die Anzahl der Schäden oder Leerfahrten pro Zeitfenster mit einer festgelegten Dauer zu zählen:

$$P_{S,W} = E\left(\frac{\text{Anzahl Schäden}}{\text{Anzahl Zeitfenster}}\right), \quad P_{L,W} = E\left(\frac{\text{Anzahl Leerfahrten}}{\text{Anzahl Zeitfenster}}\right)$$

Damit tragen alle Zeitfenster, in welcher keine Schäden oder Leerfahrten vorhanden sind, zur entsprechenden Fehlerrate des Systems bei. Der oben erwähnte schlimmste Fall würde hier „nur“ zu einer Fehlerrate von $1/n$, wobei n die Anzahl Zeitfenster ist, führen.

Um eine relative Fehleranfälligkeit des getesteten Prognosesystems zu erhalten, müssen die Verteilungen von L und S mit einem Modell-Expertensystem mit vorgegebenen Fehleraten F verglichen werden. Bei grünen Alarmen wird $F=85\%$, bei gelben Alarmen wird $F=50\%$ und bei roten Alarmen müsste $F=15\%$ sein. Beim Betrachten aller Alarme wird die Fehlerrate bezüglich potenzieller Schäden auf $F=15\%$ gesetzt. Dies entspricht den Erwartungen an ein operativ einsetzbares System. Die Fehlerrate setzt sich zusammen aus der Prognose vom Wetterdienst von ungefähr 10% und der Fehlerrate aus den Prognosealgorithmen von idealerweise 5%. Die Fehlerraten F werden dabei wie folgt zufällig erzeugt:

- Im fehlerlosen Modell-Expertensystem werden durchschnittlich F [%] der Zeitfenster von 10 Stunden ausgewechselt. Dabei wird das auszuwechselnde Zeitfenster durch ein zufällig gewähltes anderes Zeitfenster des Referenzsystems ersetzt;
- Die Anzahl der ausgetauschten Zeitfenster ist binomial-verteilt mit Parameter F.

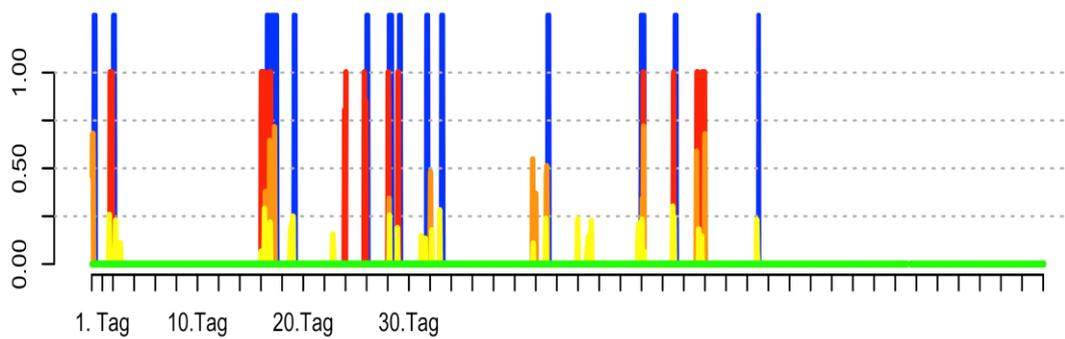
Mit diesem Referenz-Expertensystem kann geprüft werden, ob die Hypothese, dass das Expertensystem bezüglich der Leerfahrten eine Fehlerrate grösser als F hat, verworfen werden kann.

5 Statistische Auswertungen

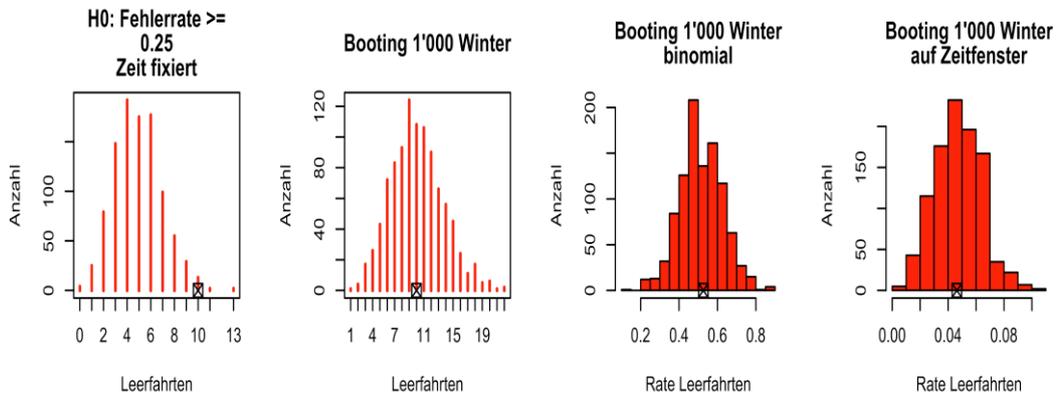
Der hier folgende Abschnitt diskutiert die Resultate der statistischen Evaluationen ausführlich für die Sonden Knutwilerhöhe (ZELUKH) und Stänglematt (ZELUST) aus der Region 49. Bei beiden Sonden sind Sichtweitenmessgeräte vorhanden, damit das Strassenwetterszenarium 11 beurteilt werden kann. *Für die anderen Sondenstationen führten die statistischen Auswertungen zu ähnlichen Resultaten.*

5.1 Knutwilerhöhe (ZELUKH), kurze Vorwarnzeit

Die folgende Abbildung zeigt die Reaktion des Prognosesystem in gelber, oranger und roter Farbe (Alarme gelb, orange und rot) und die kritischen Strassenzustände in blauer Farbe zwischen dem 1.1.2015 und 1.4.2015 für das knappe Vorwarnfenster von 2 Stunden:



Es hat 16 kritische Strassensituationen und 41 Warnmeldungen (gelb bis rot). Ersichtlich sind mehrere rote Warnungen ohne kritische Situation im letzten Drittel des Zeitfensters. Es handelt sich um Warnungen zum Szenarium 8 (Frost). Die nächste Abbildung zeigt die Auswertung bezüglich Leerfahrten (falsche Warnungen) für die roten Alarme:



In der ersten Grafik links sieht man, dass 10 falsche rote Alarme stattfanden (das Kreuzchen in der Grafik). Dies entspricht einer Fehlerrate bezüglich der Leerfahrten L von mehr als 25%. Die dritte Grafik zeigt die Simulation über 1000 Winter und daraus liest man eine Präzisionsangabe ab:

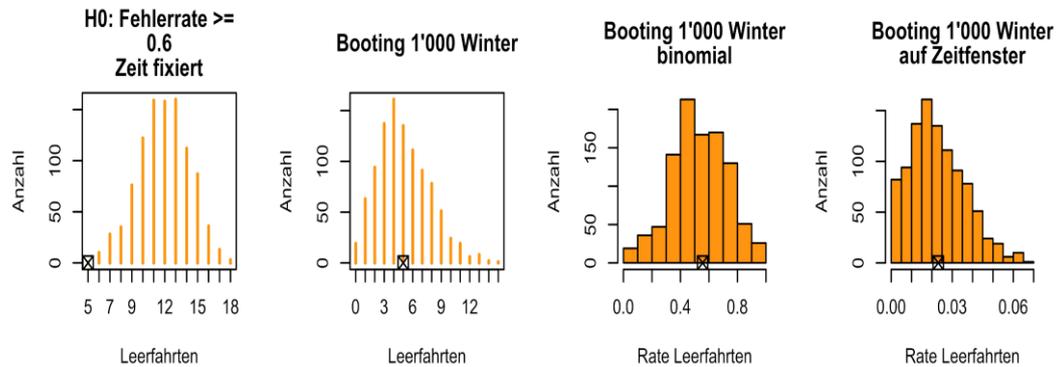
$$L = (55 \pm 25) \% \text{ (mit Wahrscheinlichkeit 95\%)}$$

Die Fehlerrate ist hoch wegen zu vieler Alarme von Frost. Warnt das System beispielsweise während 4 Stunden vor Frost, ergibt die eingeführte Zählweise schon 4 falsche Alarme oder Leerfahrten! Auf Wettersituationen umgerechnet, ergibt dies eine verbesserte Fehlerrate von:

$$L(\text{Zeitfenster}) = (5 \pm 5) \% \text{ (mit Wahrscheinlichkeit 95\%)}$$

Dies visualisiert die vierte Grafik in der obigen Abbildung. Die zweite Grafik von links zeigt die Anzahl Leerfahrten an, die vom Prognosesystem zu erwarten sind. Sie variieren zwischen einer 1 und 20 falscher Alarme auf 3 Monate Winterzeit.

Die nächste Abbildung zeigt die Auswertung bezüglich Leerfahrten der orangen Alarme:



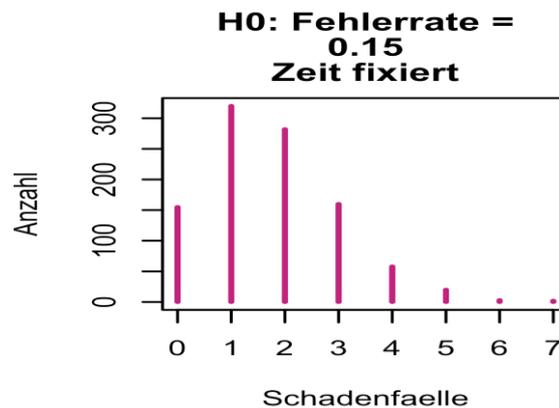
Man hat aus der dritten Grafik von links:

$$L(\text{gelb}) = (55 \pm 30) \% \text{ (mit Wahrscheinlichkeit 95\%)}$$

Dies entspricht den Erwartungen an das Prognosesystems. Für die grünen Alarme erhält man:

$$L(\text{grün}) = (70 \pm 30) \% \text{ (mit Wahrscheinlichkeit 95\%)}$$

Auch dies entspricht den Erwartungen des Systems. Die letzte Auswertung ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



Sie zeigt die Schätzung für die potenziellen Schäden bezüglich aller Warnungen. Die Grafik illustriert, dass bei einer Fehlerrate von 15% mit 0 bis 7 Schadenfällen zu rechnen ist. Alle kritischen Situationen wurden prognostiziert. Daher hat man:

$$S \leq 15 \% \text{ (mit Wahrscheinlichkeit 95\%)}$$

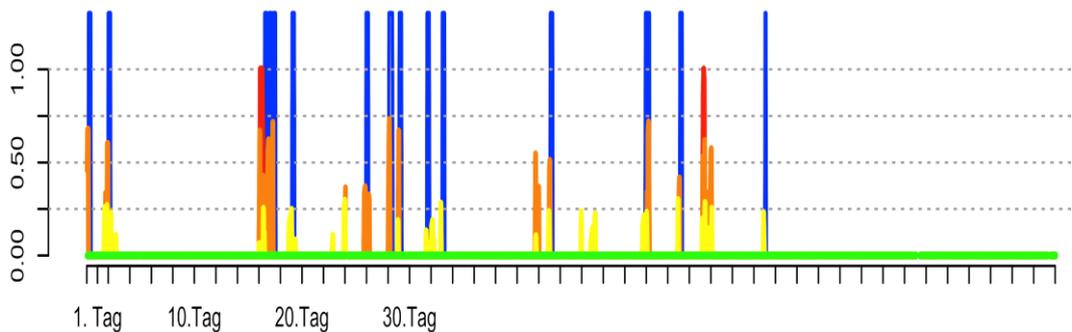
Alle Resultate zu den Fehlerraten zusammengefasst finden sich in der folgenden Tabelle:

Fehlerrate	Gelb	Orange	Rot	Alle	
	Leerfahrten	Leerfahrten	Leerfahrten	Schäden beob.	Mit Präzisionsangabe
Sollwert pro Alarm	80%	50%	15%		≤ 15%
Gemessen (pro Alarm)	(70 ± 30) %	(55 ± 30) %	(55 ± 30) %	0%	≤ 15%
Pro Wettersituation	(7 ± 7) %	(5 ± 5) %	(5 ± 5) %	0%	≤ 14%

Die nächste Tabelle zeigt das entsprechende Resultat mit den Richtigraten:

Richtigrate	Gelb	Orange	Rot	Alle	
	leerfahrtenfrei	leerfahrtenfrei	leerfahrtenfrei	schadenfrei beob.	Mit Präzisionsangabe
Sollwert pro Alarm	20%	50%	85%		> 85%
Gemessen (pro Alarm)	(30 ± 30) %	(45 ± 30) %	(45 ± 30) %	0%	> 85%
Pro Wettersituation	(93 ± 7) %	(95 ± 5) %	(95 ± 5) %	0%	> 86%

Wie oben erwähnt, liegt die zu tiefe Richtigrate bei den roten Alarmen des Szenariums 8 (Frost). Reifglätte ist aber ein meist ein langsamer Prozess, der manchmal Stunden benötigt. Rote Warnungen zum Szenarium 8 erfolgen daher meist über mehrere Stunden. *Eine einzige falsch prognostizierte Wettersituation zu Frost bewirkt daher, dass die Anzahl Leerfahrten gross wird.* Weiter scheint es meteorologisch sinnvoll, die Streuungen in der Prognose für das Szenarium 8 zu glätten. Dies kann getan werden, indem man die Stundenalarme über die letzten drei Stunden mittelt. Die folgende Abbildung zeigt die Reaktion des Prognosesystem in gelber, oranger und roter Farbe (Alarme gelb, orange und rot) und die kritischen Strassenzustände in blauer Farbe zwischen dem 1.1.2015 und 1.4.2015 für das knappe Vorwarnfenster von 2 Stunden, bei geglätteten Alarmwerten zum Szenarium 8:



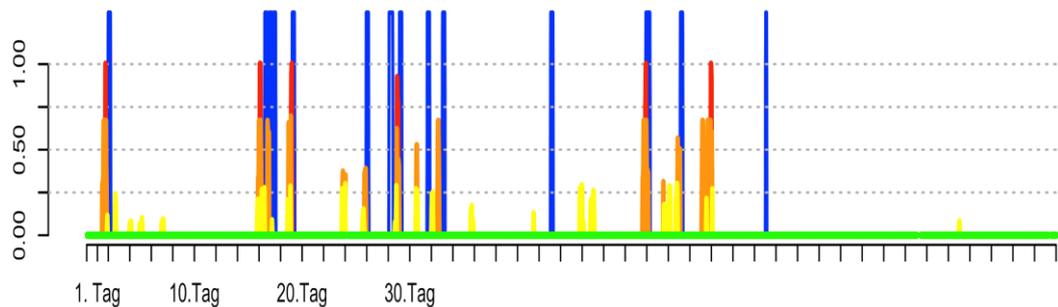
Auffallend ist, dass nun im Vergleich zur ungeglätteten Version weniger rote Alarme zum Szenarium 8 vorhanden sind. Die folgende Tabelle zeigt die nun entstandenen Richtigraten, wobei nun beim Szenarium 8 *aufeinanderfolgende, falsche Alarme* nur als eine Leerfahrt gezählt werden:

Richtigrate	Gelb	Orange	Rot	Alle	
	leerfahrtenfrei	leerfahrtenfrei	leerfahrtenfrei	schadenfrei beob.	Mit Präzisionsangabe
Sollwert pro Alarm	20%	50%	85%		> 85%
Pro Alarm	(30 ± 30) %	(45 ± 30) %	(80 ± 30) %	0%	> 85%
Pro Wettersituation	(93 ± 7) %	(94 ± 5) %	(97 ± 4) %	0%	> 86%

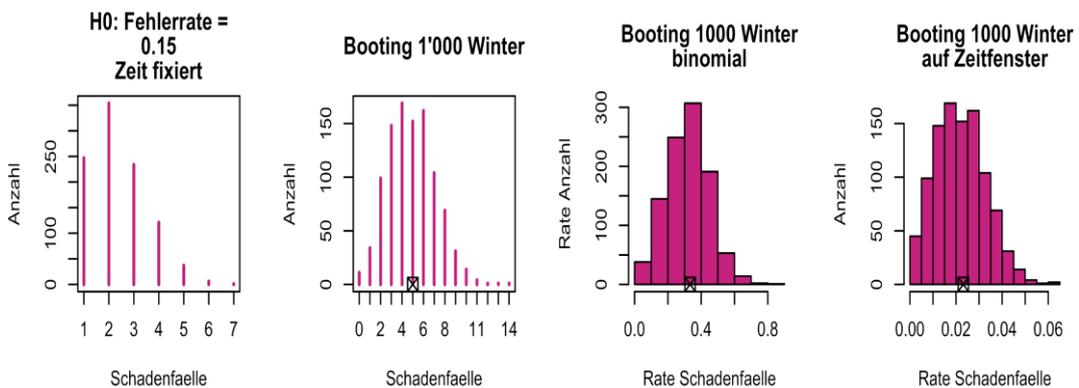
Die Richtigrate pro Alarm ist nun bei den roten Alarmen deutlich erhöht. Die Richtigraten zu den gelben, orangen und roten Alarmen, sowie zu den Schäden entsprechen den Sollwerten des Prognosesystems. Die statische Unsicherheit ist aber in der Grössenordnung von 30% und daher gross.

5.2 Knutwilerhöhe (ZELUKH), lange Vorwarnzeit

Die statistische Fehleranalyse bei einer Vorwarnzeit von 6 Stunden sollte wegen der erhöhten Unsicherheit zu tieferen Richtigraten führen als bei einer kurzen Vorwarnzeit von nur 2 Stunden. Die folgende Abbildung zeigt die Reaktion des Prognosesystem in gelber, oranger und roter Farbe (Alarme gelb, orange und rot) und die kritischen Strassenzustände in blauer Farbe zwischen dem 1.1.2015 und 1.4.2015 für das Vorwarnfenster von 6 Stunden, bei geglätteten Alarmwerten zum Szenarium 8:



Man sieht aus der Abbildung, dass mindestens zwei kritische Strassensituationen nicht prognostiziert wurden. Gesamthaft wurde der Zeitpunkt der kritischen Situation bei 5 von 16 Strassensituationen nicht langfristig exakt prognostiziert. Dies zeigt auch die nächste Abbildung mit der Simulation zu den potenziellen Schäden:



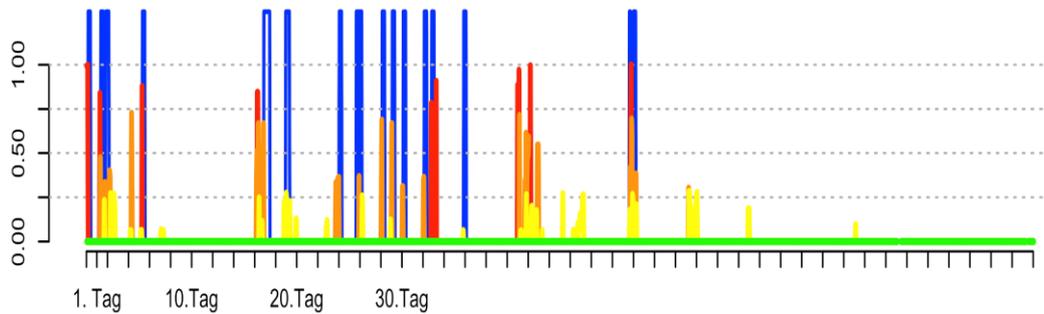
Zu beachten ist aber, dass schon eine um 1-2 Stunden falsch versetzte Warnung (Warnung um 12:00 für 18:00, kritische Strasse aber erst um 20:00) zu einem potenziellen Schaden gezählt wird! Nur bei drei Situationen fand überhaupt keine Warnung statt. Die folgende Tabelle zeigt die Richtigraten:

Richtigrate	Gelb	Orange	Rot	Alle	
	leerfahrtenfrei	leerfahrtenfrei	leerfahrtenfrei	schadenfrei beob.	Mit Präzisionsangabe
Sollwert pro Alarm	20%	50%	85%		> 85%
Pro Alarm	(20 ± 20) %	(30 ± 25) %	(70 ± 30) %	63.5%	> 60%
Pro Alarm (6 ± 3 Stunden)	(30 ± 25) %	(50 ± 20) %	(75 ± 20) %	82.2%	> 60%
Pro Wettersituation	(91 ± 8) %	(93 ± 6) %	(96 ± 4) %	2.5%	> 94%

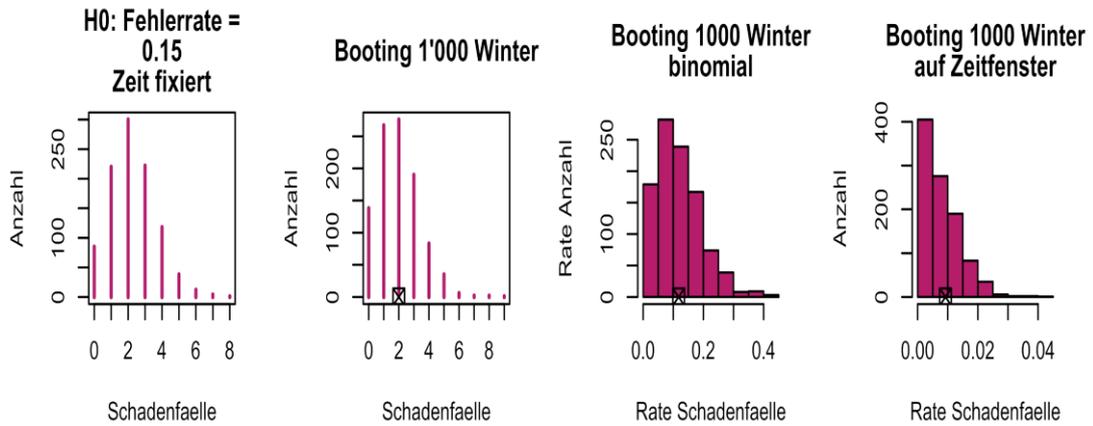
Bei den Leerfahrten ergibt sich eine leicht tiefere Richtigrate als bei einem Prognosefenster von 2 Stunden. Die Richtigraten bei den gelben, orangen und roten Alarmen entsprechen den Sollwerten des Prognosesystems. Die Rate potenzieller Schäden ist aber hoch. Fasst man eine Prognose auf 6 Stunden als eine Prognose von 6 ± 3 Stunden auf, reduzieren sich die Fehlerraten vor allem bei den potenziellen Schäden um die Hälfte!

5.3 Stänglematt (ZELUST), kurze Vorwarnzeit

Die folgende Abbildung zeigt die Reaktion des Prognosesystem in gelbe, oranger und roter Farbe (Alarme gelb, orange und rot) und die kritischen Strassenzustände in blauer Farbe zwischen dem 1.1.2015 und 1.4.2015 für das knappe Vorwarnfenster von 2 Stunden, bei geglätteten Alarmwerten zum Szenarium 8:



Man sieht aus der Abbildung, dass die meisten kritischen Strassensituationen prognostiziert wurden. Gesamthaft wurde bei 2 von 17 Strassensituationen der Zeitpunkt der kritischen Situation nicht exakt prognostiziert. Dies zeigt auch die folgende Abbildung mit der Simulation zu den potenziellen Schäden:



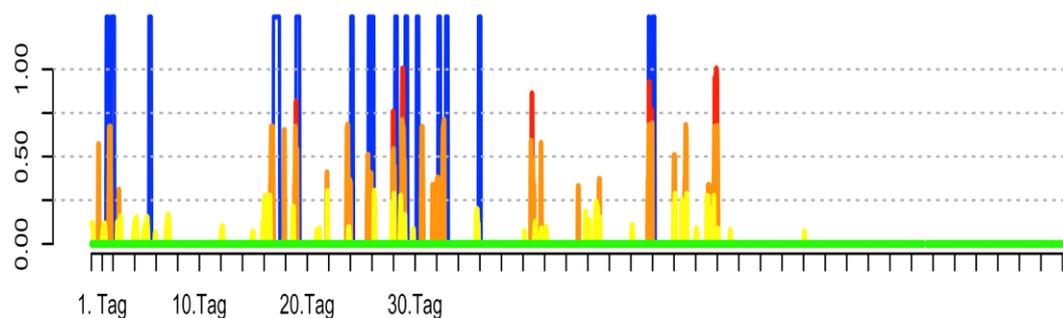
Die folgende Tabelle zeigt die Richtigraten:

Richtigrate	Gelb	Orange	Rot	Alle	
	leerfahrtenfrei	leerfahrtenfrei	leerfahrtenfrei	schadenfrei beob.	Mit Präzisionsangabe
Sollwert	20%	50%	85%		> 85%
Pro Alarm	(15 ± 15) %	(35 ± 20) %	(40[75] ± 20) %	88.5%	> 65%
Pro Wettersituation	(88 ± 12) %	(92 ± 6) %	(97[98] ± 2) %	99%	> 97%

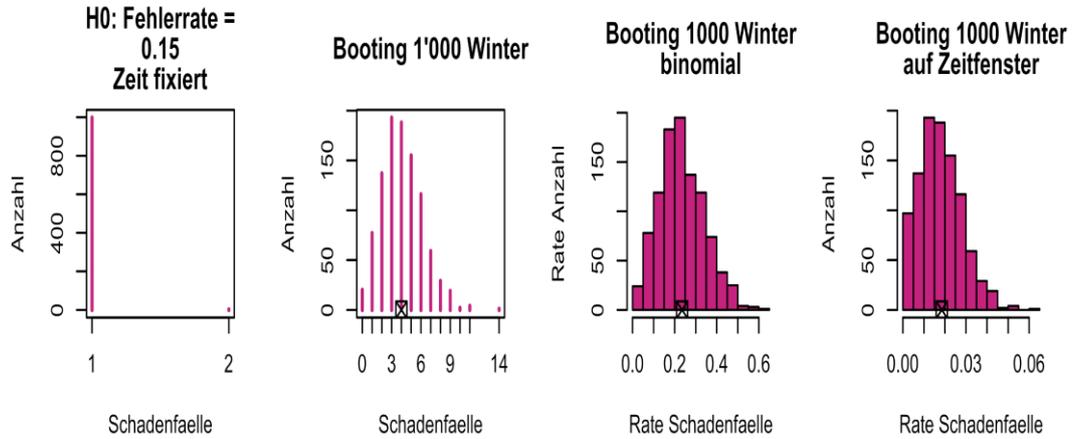
Die Richtigrate ist bei den roten Alarmen tief. Dies liegt daran, dass zwei rote, lang anhaltende Alarme wegen Frost vorhanden sind (siehe die obige Abbildung um den 40. Tag). Der Grund für diese falschen Alarme: das Energiebilanzmodell prognostizierte Strassentemperaturen, die rund 1°C zu tief waren (0°C statt 1°C) und daraus Reifablagerung auf der Strasse. Zählt man diese beiden falschen Prognosealarme als zwei Leerfahrten, erhält man statt einer Richtigrate von 40 ± 25 % eine von 75 ± 25 %. Die übrigen Richtigraten sind vergleichbar wie bei der Station ZELUKH und entsprechen den Erwartungen, die an das Prognosesystem gestellt werden.

5.4 Stänglematt (ZELUST), lange Vorwarnzeit

Die folgende Abbildung zeigt die Reaktion des Prognosesystem in gelber, oranger und roter Farbe (Alarme gelb, orange und rot) und die kritischen Strassenzustände in blauer Farbe zwischen dem 1.1.2015 und 1.4.2015 für das lange Vorwarnfenster von 6 Stunden, bei geglätteten Alarmwerten zum Szenarium 8:



Es sind deutlich weniger rote Alarme, als bei einem Vorwarnfenster von 2 Stunden vorhanden. Gesamthaft wurde bei 4 von 17 Strassensituationen der Zeitpunkt der kritischen Situation nicht exakt prognostiziert. Dies zeigt auch die nächste Abbildung mit der Simulation zu den potenziellen Schäden:



Die folgende Tabelle zeigt die Richtigraten:

Richtigräte	Gelb	Orange	Rot	Alle	
	leerfahrtenfrei	leerfahrtenfrei	leerfahrtenfrei	schadenfrei beob.	Mit Präzisionsangabe
Sollwert	20%	50%	85%		> 85%
Pro Alarm	(15 ± 15) %	(42 ± 20) %	(45[70] ± 25) %	76.5%	> 50%
Pro Alarm (6 ± 3 Stunden)	(20 ± 15) %	(50 ± 20) %	(55[75] ± 20) %	83%	> 70%
Pro Wettersituation	(80 ± 10) %	(89 ± 6) %	(98 ± 2) %	98%	> 95%

Die Richtigraten sind vergleichbar mit den Richtigraten zu den kurzfristigen Prognosen. Fasst man eine Prognose auf 6 Stunden als eine Prognose von (6 ± 3 Stunden) auf, erhöhen sich die Richtigraten. In der Tabelle zu den roten Alarmen finden sich in eckigen Klammern die Richtigraten, wenn aufeinanderfolgende, falsche Alarme zu Frost nur als eine Leerfahrt gezählt werden. Insgesamt gilt hier: *Die Richtigraten zu den gelben und orangen Alarmen entsprechen den Sollwerten des Prognosesystems. Die Fehlerrate zu den potenziellen Schäden ist sehr unsicher. Die Richtigraten zu den roten Alarmen dürfte wegen der wahrscheinlich zu pessimistischen Prognose zu Reifglätte zu tief sein.*

5.5 Die Richtig- oder Fehlerraten der einzelnen Szenarien

Die obigen Richtig- oder Fehlerraten zeigen, wie sich das Prognosesystem für eine bestimmte Strecke verhält. Man kann die Raten aber auch nach den Szenarien rechnen. Die statistischen Unsicherheiten der beobachteten Richtigraten sind aber meist sehr hoch, da zu einzelnen Strassenwetterszenarien nur wenige kritische Strassensituationen auftraten. Es lässt sich das Folgende sagen:

- **Szenarium 1 (Gefrierender Regen oder Eisregen):** Die Prognose dieses Szenariums funktioniert entsprechend den prognostizierten Wahrscheinlichkeiten. Wegen der wenigen Ausschläge des Prognosesystems, sind die Richtigraten sehr unpräzise.
- **Szenarium 3 (Schneefall mit Kälteeinbruch):** Das Szenarium ist eine Fortsetzung des Szenariums 4. Ein Fall von Szenarium 3 wurde in der Testphase vom System prognostiziert (als gelber Alarm). Eine statistische Auswertung ist daher mit grosser Unsicherheit verbunden und kaum sinnvoll.

- **Szenarium 4 (Nassschnee -- beginnend mit Regen oder Schneeregen):** Das System prognostiziert dieses Szenarium gut. Da nur 3 Falle während der Testphase auftraten, sind die Richtigraten mit grossen statistischen Unsicherheiten behaftet.
- **Szenarium 8 (Frost -- klare Nacht mit Bodenfrost, Blitzfrost):** Eine kritische Strassensituation zum Szenarium 8 ist nur mit grosser Unsicherheit zu bestimmen. Die Prognose dieses Szenariums dürfte aber zu pessimistisch sein (2 -3 falsche rote Warnprognosen während 3 Monaten). Der Grund liegt darin, dass das Energiebilanzsystem manchmal ein Grad Celsius zu tiefe Strassentemperaturen prognostiziert. Zudem wäre es sinnvoll mit geglätteten Prognosewerten zu arbeiten. Die Richtigraten zu gelben und orangen Alarmen entsprechen den Erwartungen an das Prognosesystem. Wie schon erwähnt, ist die Richtigrate bei roten Alarmen wahrscheinlich zu tief, aber sie ist sehr pessimistisch gerechnet.
- **Szenarium 10 (Nächtliche Abkühlung nach Tauwetter):** Dieses Szenarium fand während der Testphase nicht statt. Das Prognosesystem prognostizierte das Szenarium 10 nicht. Eine statistische Fehlerauswertung zu den potenziellen Schäden ist daher nicht möglich.
- **Szenarium 11 (Raureif in Verbindung mit Nebel, gefrierender Nebel):** Die Prognose funktioniert gut, vor allem bei den gelben und roten Alarmen. Bei den orangen Alarmen ist die Richtigrate leicht zu hoch.

6 Kurzzusammenfassung

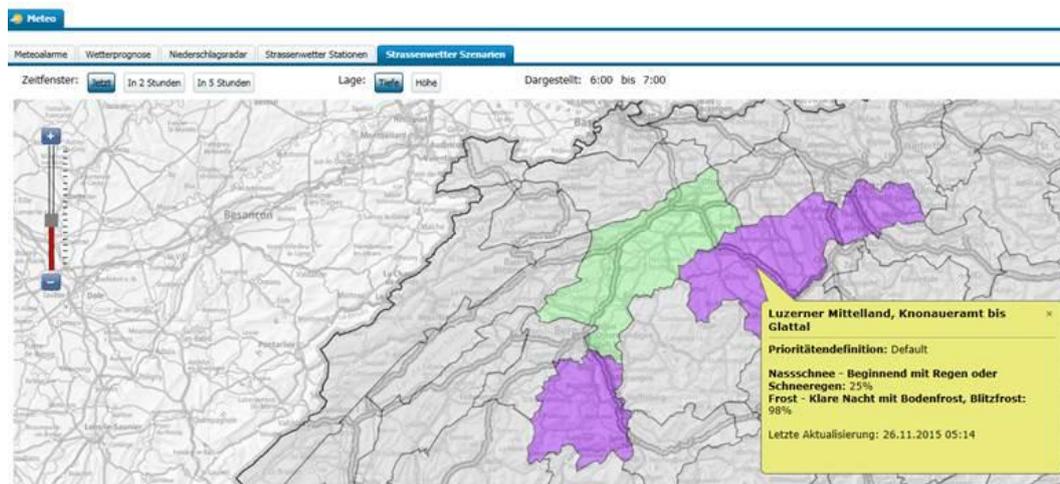
Die Strassenwetter Regionsprognosen werden bereits seit über 20 Jahren durch die MeteoSchweiz an die Gebietseinheiten, respektive an die Werkhöfe geliefert. Mit der Dokumentation ASTRA 86211, Entscheidungsfindung und Auswertung bei Winterdiensteseinsätzen (2014 V1.00) [9] werden die Wettervorhersagen vereinheitlicht und mit der ASTRA Fachapplikation Baustellenmanagement (FA-BM) abgeglichen. Damit kann die Lagebeurteilung [8] für den Winterdiensteseinsatzleiter EL-WD standardisiert und ein messbares Risikomanagement aufgestellt werden. Diese neu standardisierten Strassenwetterszenarien (SWSZ) sind ein Produkt der MeteoSchweiz, erstellt in Zusammenarbeit mit dem ASTRA. Die SWSZ werden pro MeteoStation gerechnet. Daraus ergeben sich dann Prognosen für die Strassenwetterszenarien pro Strassenwetterregion.

Für den Testbetrieb im Winter 2014/15 wurden Prognosen für die Szenarien 1, 3, 4, 8, 10 und 11 gerechnet. Dies deckt ein breites Spektrum von verschiedenen gefährlichen Strassensituationen ab. Für diese erste Projektphase wurden Prognosen für drei Regionen (Regionen 43, 47 und 49) gerechnet. Die Stationen bilden verschiedene Strassensituationen ab: Brücken, Nebelgebiete, tiefe und höhere Regionen. Die Resultate sind:

- Die Trefferraten bei Prognosealarmen mit Wahrscheinlichkeiten von 5 – 75% (sogenannte gelbe und orange Alarme) entsprechen den erwarteten Sollwerten. Die Trefferraten bei Prognosealarmen mit hoher Wahrscheinlichkeit (rote Alarme) stimmen – ausser bei Reifglätte – mit den erwarteten Sollwerten überein;
- Die Rate, kritische Strassenzustände nicht zu prognostizieren, entspricht dem erwarteten Sollwert, ist aber statistisch unsicher;
- Die Trefferrate bei einem 6 Stunden-Vorwarnfenster ist leicht tiefer als bei einem Vorwarnfenster von 2 Stunden;
- Der Temperaturnulldurchgang der Strassenoberflächentemperatur wird meist sehr gut prognostiziert.
- Die Richtigrate bei roten Alarmen kann bei Reifglätte tief sein. Der Grund liegt darin, dass Warnungen zu Reifglätte über mehrere Stunden erfolgen und daher über mehrere Stunden falsche Alarme erfolgen.
- Die Strassenoberflächentemperatur wird oft tendenziell zu tief (ca. um 0.5 – 1°C) prognostiziert. Daher sind 2 - 3 zu viele Frostalarme des Prognosesystems pro 3 Monate zu erwarten.

In der zweiten Projektphase werden die restlichen Strassenwetterszenarien modelliert und für alle Strassenwetterregionen berechnet. Der Abschluss vom Projekt ist für die Jahre 2018/2019 vorgesehen. Wichtig ist dabei, dass die folgenden Winter alle SWSZ für die Qualitätskontrolle bieten.

Bild aus der FA-BM Projektphase 1.



Glossar

Begriff	Bedeutung
BFH	Berner Fachhochschule
COSMO	Consortium for Small-Scale Modelling (Numerisches Wetterprognosemodell)
COST	European Cooperation in Science and Research
EL-WD	Einsatzleiter Winterdienst
FA-BM	Fachapplikation Baustellenmanagement
INCA	Auch Nowcasting genannt. Ein räumlich und zeitlich hochaufgelöstes Vorhersagemodell der Wetterentwicklung der nächsten Minuten bis maximal 6 Stunden
RFT	Road Forecast Tool der MeteoSchweiz (auch Energiebilanzmodell)
SWSZ	Strassenwetterszenarien
TGM	Troposphärischen Grenzschichtmodell
VMZ-CH	Verkehrsmanagementzentrale Schweiz (in Luzern)

Referenz: Documentation ASTRA 86990, Glossaire d/f/i – Exploitation (2012 V1.20) [11].

Literaturverzeichnis

Fachliteratur

-
- [1] D.Bättig, L. Martin, U. Mori, J. Ambühl, U. Keller, L. Zraggen, S.Eggimann, **Modellierung der Strassenwetterszenarien und statistische Auswertungen**, i-REX, Institut für Risiko- und Extremwertanalyse, Berner Fachhochschule 2015.
-
- [2] D. Bättig, S.Eggimann, O. Mermoud, U. Mori, S.Stankowski, **Strassenglätte – Prognosesystem (SGPS)**, Forschungsauftrag ASTRA 2008/002_OBF, Juli 2010, 1306.
-
- [3] L. Zraggen, **Strahlungsbilanz der Schweiz**, Diss. ETH Nr 14158, ETH Zürich 2001.
-
- [4] D. Bättig, E.Wyler, S.Stankowski: **Energiebilanz EBM**, Technischer Bericht, Berner Fachhochschule 2007.
-

Richtlinien des Bundesamt für Strassen ASTRA

-
- [5] Richtlinie ASTRA 16200, **Betrieb NS - Allgemein verbindliche Bestimmungen zu den Teilprodukten (2014 V1.00)**, www.astra.admin.ch.
-
- [6] Richtlinie ASTRA 16150, **Pikettdienst (Bereitschaftsdienst) (2011 V2.90)**, www.astra.admin.ch.
-

Fachhandbücher des Bundesamt für Strassen ASTRA

-
- [7] Merkblatt ASTRA 26010-01020, **Wetter (2014 V1.00)**, www.astra.admin.ch.
-
- [8] Merkblatt ASTRA 26010-01060, **Lagebeurteilung (2014 V1.00)**, www.astra.admin.ch.
-

Dokumentationen des Bundesamt für Strassen ASTRA

-
- [9] Dokumentation ASTRA 86211, **Entscheidungsfindung und Auswertung bei Winterdiensteseinsätzen (2014 V1.00)**, www.astra.admin.ch.
-
- [10] Dokumentation ASTRA 86212, **Vergütung Winterdienst (2014 V1.00)**, www.astra.admin.ch.
-
- [11] Documentation ASTRA 86990, **Glossaire d/f/i – Exploitation (2012 V1.20)**, www.astra.admin.ch.
-

Auflistung der Änderungen

Ausgabe	Version	Datum	Änderungen
2015	1.00	01.10.2015	Inkrafttreten Ausgabe 2015.

