Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau

Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie
Office fédéral des routes

Dipartimento federale dei trasporti, delle comunicazioni e delle energie
Ufficio federale delle strade

Wetterdienstleistungen für den Strassenwinterdienst

Prestations de météorologie pour le service hivernal

Meteolabor AG, Ingenieurunternehmung, Wetzikon
P. Ruppert
Dr. B. Neininger
Dr. O. Liechti

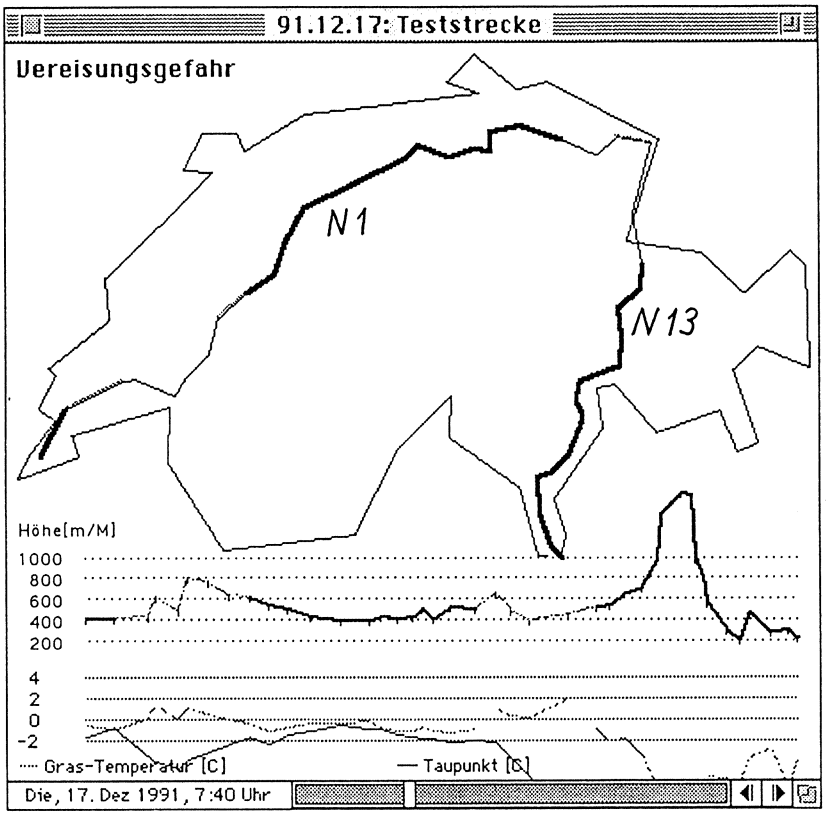
Forschungsauftrag 20/89 auf Antrag der
Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

Oktober 1994 **315**

FORSCHUNGSPROJEKT

20/89

Wetterdienstleistungen für den Strassen-Winterdienst



Meteolabor AG, CH-8620 Wetzikon

Projektleiter: P. Ruppert

Mitarbeiter: Dr. B. Neininger, METAIR AG
Dr. O. Liechti, Analysen & Konzepte

Wir danken für die fachliche und beratende Unterstützung:

Herrn U. Schlup, Sektionschef im Bundesamt für Strassenbau
Herrn Köhli, Werkhofverwalter, Tiefbauamt des Kantons Zürich
Herrn Dr. A. Junod, Direktor der SMA
Herrn U. Keller, Meteorologe, SMA

Meteolabor AG, CH-8620 Wetzikon
Projektleiter: P. Ruppert

Wetterdienstleistungen für den Strassenwetterdienst (Forschungsprojekt 20/89)

Kurzfassung

Einleitung

Das Ziel der Strassenwinterdienste ist die Vermeidung aller durch das Winterklima verursachten Verminderungen der Haftreibung zwischen Fahrzeugreifen und Strassenoberfläche. Soll ein solcher Dienst möglichst effizient sein und ausser ökonomischen in zunehmendem Masse auch ökologische Aspekte berücksichtigen, so ist ein Strassenwetterdienst notwendig. Im Laufe der letzten Jahre sind verschiedene Hilfsmittel für die Beurteilung des Strassenwetters durch die Unterhaltsdienste geschaffen worden. Aus Diskussionen in der schweizerischen Arbeitsgruppe des europäischen Strassenwetterprojektes COST 309 ist die vorliegende Studie entstanden. Ziel der Studie ist die Beschreibung des Ist-Zustandes der Strassenwetter-Prognosen-Tätigkeit in der Schweiz. Es werden auch Möglichkeiten für eine Nutzung der bereits vorhanden Wetterdaten hoher Qualität gezeigt.

Bedürfnisse

Die Bedürfnisse des Unterhaltsdienstes sind zwar nicht ganz einheitlich. Jedoch besteht der einheitliche Wunsch nach einer lokalen, präzisen Prognose für die Entwicklung des Strassenoberflächenzustandes. Die maximale Voraussagezeit von ca. sechs Stunden genügt im allgemeinen. Vom Strassenwetterdienst wird erwartet, dass eine Eis- oder Reifbildung auf der Strasse vorausgesagt wird. Beginn und Dauer von Scheefällen und von vereisendem Regen sind ebenfalls wichtige Informationen.

Bestehende Aktivitäten

In der Schweiz gibt es ein relativ dichtes Netz von "Glatteis-Frühwarn-Systemen (GFS)". Diese überwachen den Strassenoberflächenzustand automatisch in Bezug auf Temperatur, Feuchtigkeit und die Gefrierneigung. GFS hat eine ausgesprochen kleinräumige Aussage, da es punktuell misst. Im Gegensatz dazu erfassen die offiziellen Wetterprognosen grosse Gebiete pauschal. Sowohl in Deutschland als auch in der Schweiz laufen gegenwärtig (1992) Versuche mit einem "Strassen-Wetter-Informations-System SWIS". Dabei werden die beiden oben beschriebenen Methoden kombiniert.

Methoden zur Erreichung der erwünschten Wetterdienstleistungen

Zwischen den grossflächigen und den punktuellen (GFS) Aussagen wären Prognosen in Räumen von der Grösse des Unterhaltsgebietes eines Autobahnwerkhofes erwünscht. Dabei müsste die Schweiz in etwa zehn Regionen und fünf Höhenstufen unterteilt werden. Eine solche feingegliederte Prognose ist nur mit der automatischen oder mindestens halbautomatischen Auswertung von Daten möglich (zehn Regionen und fünf Höhenstufen ergeben fünfzig Einzelprognosen!). Die Schweizerische Meteorologische Anstalt SMA betreibt seit mehr als zehn Jahren ein Netz von ca. 70 automatischen Wetterstationen (ANETZ), das landesweit alle zehn Mi-

nuten Wetterdaten in hoher Qualität und Verfügbarkeit liefert. Mit diesen Daten kann durch Interpolation auf die in der Nähe der jeweiligen Station durchführenden Strassen auf das Strassenwetter geschlossen werden.

Interpolation der ANETZ-Daten auf die Strassenoberfläche

Es wird ein Versuch auf den zwei Nationalstrassen N1 (Genève-St. Margrethen) und N13/N2 (St. Margrethen-Chiasso) mittels der ANETZ-Daten (Lufttemperaturen, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag) durchgeführt. Die errechneten Zustände werden mit der Unfallstatistik der BfU kontrolliert. Dabei ist die Uebereinstimmung der BfU-Unfallstatistik mit den ermittelten kritischem Fällen des Strassenwetters gut.

Im folgenden Beispiel wird die Situation des Ueberganges von Regen in Schneefall innerhalb einer Stunde gezeigt.

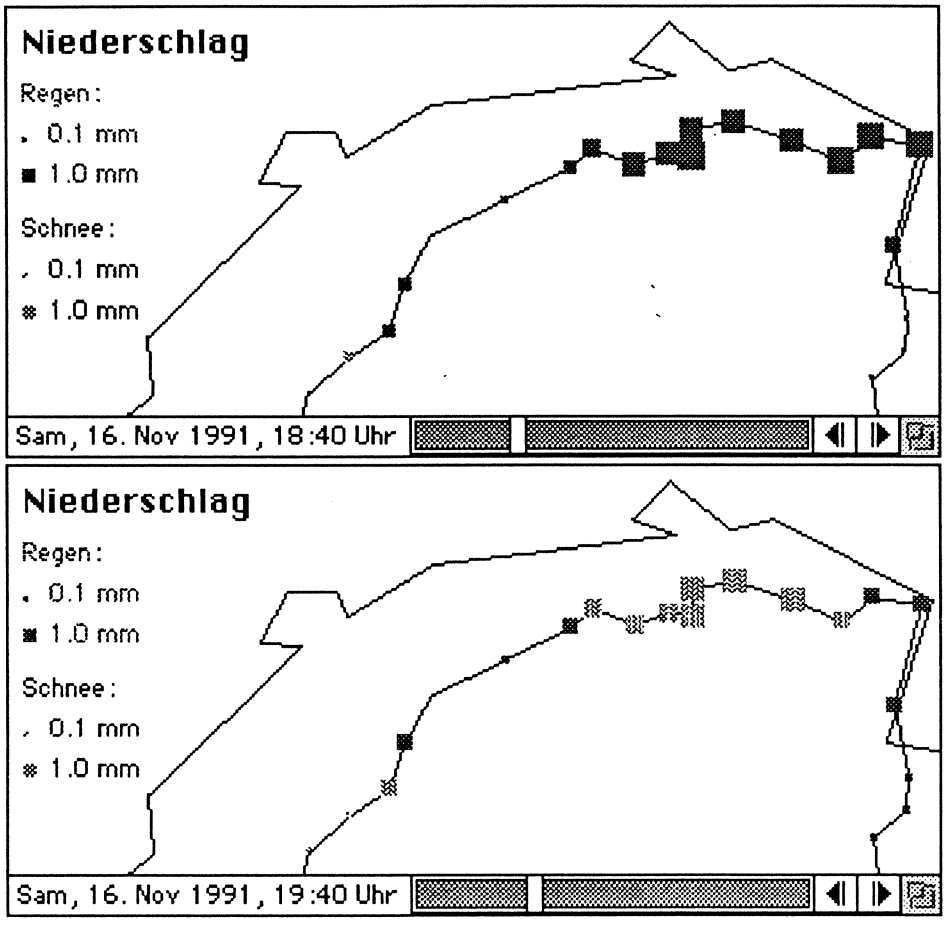


Fig. 13

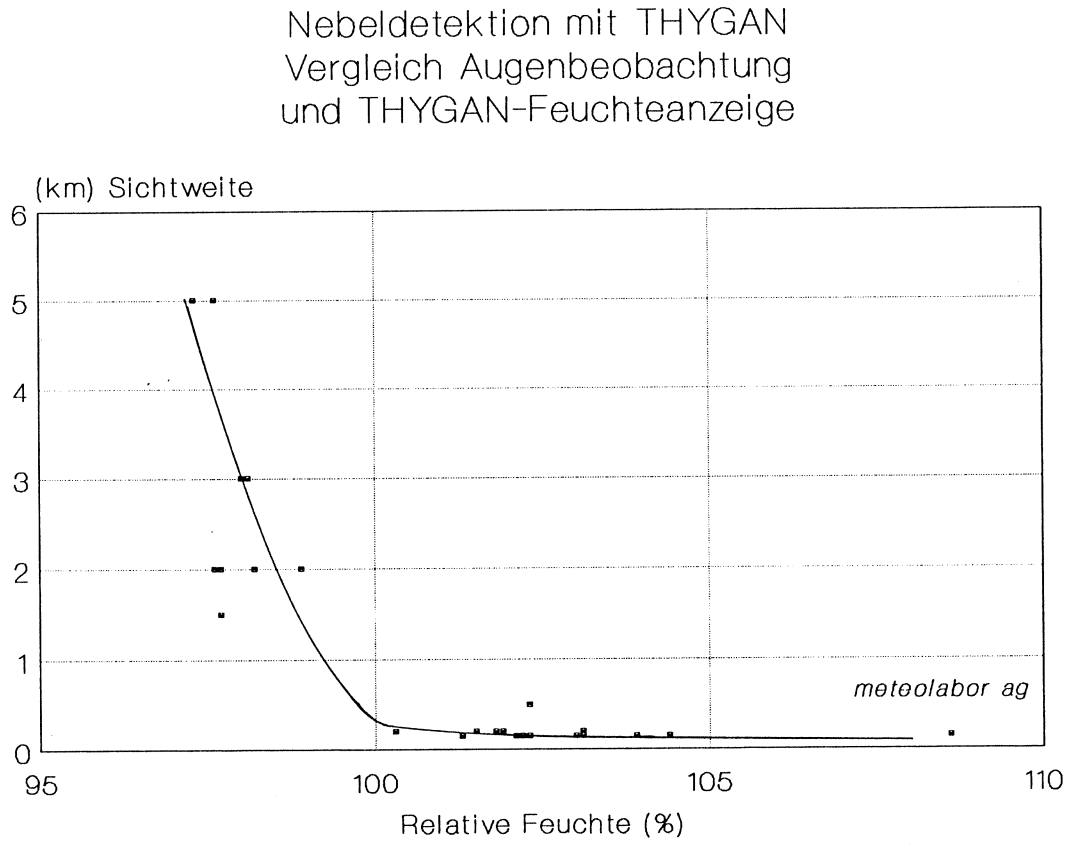
Kartendarstellung des Niederschlages entlang der Teststrecke

Die Daten zeigen eine Situation, bei der Dauerregen am Abend im Raum Zürich-St. Gallen in Schneefall überging.

Die Unterscheidung Schneefall/ Regen erfolgt mit der Psychrometer-Temperatur.

Spezialinformationen aus ANETZ-Sensoren

Aus den Messwerten einzelner ANETZ-Sensoren können zusätzliche Informationen gewonnen werden. Ein solcher Sensor ist das Thermohygrometer THYGAN. Es misst die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit. Die Luftfeuchtigkeit wird aus der nach dem Taupunktspiegel-Verfahren gemessenen Taupunkttemperatur berechnet. Durch das Zusammenwirken des geheizten Gehäuses mit dem Messverfahren kann Wasser in flüssiger Form (Nebeltröpfchen) von Wasserdampf unterschieden werden. In Nebelsituationen meldet THYGAN eine Luftfeuchtigkeit von mehr als 100%. Der Nebel kann detektiert werden, und es ist auch eine Abschätzung der Sichtweite möglich.



Weitergehende Möglichkeiten

Aus den gemachten Untersuchungen geht hervor, dass die ANETZ-Daten für den Strassenwetterdienst verwendet werden können. Weitere zusätzliche Möglichkeiten wären:

- Kontrolle der Prognosen
- kurzfristige Prognosen durch zeitliche Extrapolation
- Ansätze mit statistischen Methoden
- Einsatz von künstlicher Intelligenz
- Modellierung nach klassischen Verfahren

Prestation de météorologie pour le service hivernal

(mandat de recherche 20/89)

A travers le service hivernal, on cherche à empêcher que l'adhérence des pneus à la surface de la route soit amoindrie par toute sorte de facteurs climatiques liés à la saison. Lorsqu'un tel service doit être le plus efficace possible, tout en tenant compte d'aspects économiques et - toujour plus souvent - écologiques, le recours à la météorologie routière s'avère nécessaire. La présente étude s'attache à présenter les possibilités de réalisation d'un tel outil à l'aide d'une part d'informations météo existantes, de l'autre avec de nouvelles méthodes.

Partant de la nécessité de disposer à l'échelon local et à relativement court terme de prévisions cependent précises pour connaître l'état de la chaussée, le rapport présente les possibilités actuelles. Le système de détection du verglas (SVD) fournit par exemple des informations ponctuelles pour de petites zones, au contraire des prévisions météorologiques plus générales.

Voici plus de 10 ans que dans notre pays, l'Institut suisse de météorologie (ISM) exploite un réseau de mesure automatique ANETZ, comptant 70 stations. Chacune d'entre elles livre toutes les 10 minutes des informations de haute qualité et facilement accessibles. Le rapport montre comment tirer profit de ces données pour les routes nationales, afin d'être renseigner sur la température de la route, le type de précipitation (neige ou pluie), etc.

Les mesures fournis par différents capteurs d'ANETZ permettent d'obtenier des informations supplémentaires, particulièrement intéressantes pour le service hivernal (p.ex. brouillard).

Le rapport conclut en présentant d'autres voies de recherche plus globales, qui seraient actuellement possibles grâce aux méthodes informatiques modernes.

Inhaltsverzeichnis Seite

1. Einleitung 1

2. Zusammenfassung 1

3. Bedürfnisse 2
   3.1 Recherchiertes 2
   3.2 Arbeiten innerhalb der schweizerischen COST 309-Arbeitsgruppe 2
   3.3 Ziele eines Strassenwetterdienstes 2

4. Aktivitäten 5
   4.1 Kleinräumige Systeme 5
   4.2 Klassische Wetterprognose 5
   4.3 SWIS 5
   4.4 Ausländische Aktivitäten 6
   4.5 Schweizerische Literatur 6

5. Methoden zur Erreichung des geforderten Zieles 7
   5.1 Grundsätzliches 7
   5.2 Weitergehendes 7

6. Strassenwetterprognosen 8
   6.1 Zur Zeit in der Schweiz angewandte Progonsetechnik 8
   6.2 Verwendung von ANETZ-Messwerten für den Strassen-Winterdienst 9
      6.2.1 Relevante ANETZ-Grössen 10
      6.2.2 Interpolation auf das Nationalstrassennetz 11
      6.2.3 Statistik über die Strassenverkehrsunfälle 12
      6.2.4 Darstellung von ANETZ-Messwerten 14
      6.2.5 Validierung der Niederschlagsform 18
      6.2.6 Validierung der Strassenvereisung 21
      6.2.7 Tau- und Reifbildung 23
      6.2.8 Föhnlage 24

7. Verwendung nicht genützter und möglicher neuer Daten des ANETZes 25
   7.1 Nächtliche Abstrahlung und Strassenoberflächentemperatur 25
   7.2 Nebel 25
   7.3 Temperaturgradientenmessung 27

8. Schlussbetrachtungen 29
   8.1 Aufbereitung von ANETZ-Messwerten 29
   8.2 Prognosen aus ANETZ-Messwerten 29
   8.3 Ansätze für einen Strassenwetterdienst aus heutiger Sicht 30
   8.4 Ansätze für weitere Arbeiten 31

1. Einleitung

Weltweit wird nach Möglichkeiten gesucht, einen optimalen Strassenwinterdienst zu realisieren. Die Bedeutung solcher Dienste hat mit dem grösser gewordenen Motorfahrzeugverkehr stark zugenommen, besonders auch wegen der wirtschaftlichen Bedeutung von auch im Winter befahrenen Autostrassen. Ziel eines Strassenwinterdienstes ist die Vermeidung aller durch das Winterklima verursachten Verminderungen der Haftreibung zwischen Autoreifen und Strassenoberfläche. Die Forderung nach Berücksichtigung ökonomischer und in vermehrtem Masse auch ökologischer Aspekte verlangt einen gezielten Einsatz des Strassenunterhaltsdienstes. In der Schweiz ist durch die regional unterschiedlichen Klima- und Höhenlagen das rechtzeitige und den Verhältnissen angepasste Reagieren besonders wichtig. Die Strassenunterhaltsdienste benötigen für ihre oftmals prophylaktische Tätigkeit die Kenntnisse des momentanen Strassenzustandes und des Wettergeschehens der nächsten Stunden. Ende der achtziger Jahre arbeitete in der Schweiz eine Arbeitsgruppe für das europäische Strassenwetterprojekt COST 309. Dabei initiierte der schweizerische COST-Vertreter, der Beamter des Bundesamtes für Strassenbau ist, das im vorliegenden Bericht behandelte Forschungsvorhaben. Es soll über den Ist-Zustand der Strassenwetter-Prognosen-Tätigkeit berichten. Im weiteren sollen die wünschbaren Wetterdienstleistungen formuliert und mögliche Mittel zu deren Realisierung gezeigt werden. In der Schweiz sind Wetterdaten von hoher Qualität und Verfügbarkeit vorhanden, die für einen eigentlichen Strassenwetterdienst genutzt werden können.

2. Zusammenfassung

Es wird über Studien und Versuche berichtet, wie der Wetterdienst für den Winterstrassenunterhalt in der Schweiz verbessert werden könnte. Wettereinflüsse, welche die Haftung des Autoreifens auf der Fahrbahn reduzieren, sollen erfasst, prognostiziert und den Strassenunterhaltsdiensten in einer gut verständlichen Form gemeldet werden. In der Schweiz existiert eine Vielzahl von Glatteisfrühwarnsystemen GFS, welche punktuell über den Strassenzustand informieren. Die SMA erstellt anderseits grossräumige Prognosen. In der vorliegenden Arbeit wird über den Versuch berichtet, die Messdaten des Netzes automatischer Wetterstationen ANETZ auf die Nationalstrassen zu interpolieren und daraus auf die Gefahrenpotentiale zu schliessen. Die Versuchsresultate werden mit der Unfallstatistik der BfU kontrolliert. Das Ergebnis ist ermutigend, so dass weitere Arbeiten in dieser Richtung nützlich erscheinen. Einige Versuche mit Auswertungen der Messwerte von im ANETZ vorhandenen Sensoren zeigen Möglichkeiten für die Detektion von Nebel und Verbesserungen der Kenntnisse über die nächtliche Abstrahlung. Als zusätzliche und weiterführende Forschungen werden die Methoden der künstlichen Intelligenz sowie das Entwickeln von Modellen vorgeschlagen.

3. Bedürfnisse

3.1 Recherchiertes

Umfragen bei Strassenunterhaltsfachleuten ergeben wie erwartet kein homogenes Bild für den Wunsch-Strassenwetterdienst. Die Vorstellungen variieren zum Teil zwischen recht extremen Grenzen, nämlich vom hochtechnisierten Informationssystem bis hin zu auf Erfahrung und Augenbeobachtung beruhenden Methoden. In einer kleinen Abklärung des SMA-Meteorologen Urs Keller bei Unterhaltsdiensten vom September 1987 kommen die verschiedenen Haltungen ebenfalls zum Ausdruck. Jedoch können auch einige Gemeinsamkeiten gefunden werden. Insbesondere ist eine gewisse Autonomie erwünscht, u.a. weil so die Eigenverantwortung und das persönliche Engagement gefördert werden können. Es ist erforderlich, dass die verfügbaren Wetterdaten in eine Form aufbereitet werden, die zusammen mit einer entsprechenden Ausbildung der Benützer und dem Einbringen ihrer Berufserfahrung eine sinnvolle Verwendung erst ermöglicht. Dabei wäre eine präzise, lokale Prognose für eine Zeit von max. sechs Stunden erwünscht.

3.2 Arbeiten innerhalb der schweizerischen COST 309-Arbeitsgruppe

Während der Bearbeitung des Forschungsprojektes wurden in der schweizerischen COST 309-Arbeitsgruppe eine Bestandesaufnahme der heute bereits bestehenden Wetterdienstleistungen und der speziellen Strassenzustandsmessungen sowie eine "Wunschliste" für weitergehende Leistungen, insbesondere eines speziellen Strassenwetterdienstes, formuliert.

3.3 Ziele eines Strassenwetterdienstes

Der spezielle Wetterdienst soll die verschiedenen Wetterereignisse, welche zu einer Verminderung der Haftreibung zwischen Autoreifen und Strassenoberfläche beitragen, prognostizieren. Dies ermöglicht dem Strassenunterhaltsdienst den optimalen Einsatz. Dieser richtet sich nach Kriterien der Sicherheit, der Oekonomie im weitesten Sinne und der Oekologie. Die Kriterien selbst sind dabei nicht ein für allemal festgelegt, da sie verschiedenen Einflüssen, wie z.B. der sich im Laufe der Zeit ändernden Ansichten, unterworfen sind.

Definition der verschiedenen Strassenoberflächen-Beeinflussungen:

a) Glatteis

Eine Bekämpfung durch präventive Massnahmen ist meistens möglich.

Glatteis entsteht auf zwei Arten:

- Regenfall auf die Strasse bei Oberflächentemperaturen von unter null Grad Celsius
- "Unterkühlter Regen fällt auf die Strasse bei positiven oder negativen Oberflächentemperaturen.

b) Reifglätte

Auch diese Glätteart kann präventiv bekämpft werden.

Reifglätte entsteht in den folgenden zwei Fällen:

- Feuchtigkeit der Luft kondensiert auf der Oberfläche, deren Temperatur unter der Taupunkt- bezw. Reifpunkttemperatur der Luft liegt. Das Kondensat gefriert zu Reif.

- Reif bildet sich auf der Strassenoberfläche aus Nebeltröpfchen. Es handelt sich um die gleiche Erscheinung wie das Vereisen von Oberflächen, das insbesondere im Gebirge vorkommt.

c) Eisglätte

Eisglätte kann präventiv bekämpft werden.

Die Eisglätte entsteht durch Gefrieren einer Wasserschicht, die auf der Strassenoberfläche liegt.

d) Glättebildung durch Schnee

Die folgenden vier Situationen führen zu Schneeglätte. Sie können nur teilweise präventiv bekämpft werden:

- **Schneeglätte** entsteht durch Verdichten des auf der Strasse liegenden Schnees durch den Verkehr. Sie kann präventiv bekämpft werden.

- **Neuschnee** führt bei starkem Schneefall zu Glätte, welche erst beim Eintreffen des Ereignissen bekämpft werden kann.

- **Schneematsch** ist die Mischung aus Schnee und Eis, z.B. durch Schneefall in eine mit Wasser bedeckte Oberfläche. Er kann erst beim Eintreffen des Ereignisses bekämpft werden.

- **Festfrierender Schnee** entsteht, wenn nasser Schnee auf die Strasse fällt, deren Oberfläche unter dem Gefrierpunkt liegt. Präventive Massnahmen sind möglich.

Weitere Wettereinflüsse, welche den Strassenverkehr behindern:

a) Nebel

Die durch Nebel verkürzte Sichtweite kann - insbesondere bei gedankenloser Fahrweise von Motorfahrzeuglenkern - eine erhebliche Gefährdung sein. Diese Situationen sind für spektakuläre Massenkarambolagen verantwortlich. Der Strassenunterhaltsdienst kann keine Massnahmen treffen. Die Kenntnis der Nebelsituation ist jedoch im Fall von Reifglätte wichtig (siehe Reifglätte).

b) Gewitter mit starker Regenintensität

Niederschläge in Gewittern können so intensiv sein, dass sowohl die Sichtweite als auch die Reifenhaftung auf der Strasse beeinträchtigt werden. Auch hier kann der Strassenunterhaltsdienst keine Massnahmen vorkehren, ausser evtl. in Fällen von eigentlichen Elementarschäden.

4. Aktivitäten

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, werden weltweit grosse Anstrengungen zur Optimierung der Strassenwinterdienste und der Bereitstellung von Daten für die Prognose kritischer Situationen unternommen. Im Literaturverzeichnis im Anhang sind einige in letzter Zeit publizierte Arbeiten aufgelistet.

Es lassen sich folgende Gruppen von gleichartigen Aktivitäten unterscheiden:

4.1 Kleinräumige Systeme

In diese Kategorie gehören die Glatteis-Frühwarn-Systeme (GFS), von denen in der Schweiz im Vollausbau etwa 250 Exemplare eingesetzt sind. Der Strassenunterhaltswerkhof erhält durch diese Geräte Zustandsmeldungen der Strassenoberflächen in seinem Einzugsgebiet bezüglich Temperatur und Feuchtigkeit. Manchmal werden zusätzlich einzelne meteorologische Messwerte (Wind, Niederschlag, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit) erfasst. Die Meteomesswerte sind meistens nicht mit denjenigen der Messnetze der Meteorologen kompatibel, da sie nicht auf die Forderungen und Normen der WMO abgestimmt sind.

Die GFS-Daten geben ein Bild von einzelnen Punkten über die aktuelle Lage und werden vom Strassenunterhaltsdienst auf verschiedene Weise genutzt.

Die Daten gelten nur punktuell und eignen sich nur beschränkt für eine Prognose des Strassenwetters.

4.2 Klassische Wetterprognose

In der SMA werden seit geraumer Zeit Prognosen für den Strassenunterhaltsdienst mit den klassischen Wetterdienstmethoden erstellt. Diese Prognosen sind im Gegensatz zu den GFS grossräumig und müssen vom Unterhaltsdienst mit den Erfahrungen der lokalen Gegebenheiten kombiniert werden. Obwohl die Benützer eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung der Prognosen benötigen würden, kann dieser Wunsch durch den SMA-Strassenwetterdienst wegen personeller Einschränkungen dieser Bundesanstalt zur Zeit leider nicht erfüllt werden.

4.3 SWIS

SWIS ist das "Strassen-Wetter-Informations-System", wie es z.Z. in Deutschland und in der Schweiz versuchsweise betrieben wird. Es kombiniert klassische Wetterdienstmethoden mit den aus den GFS-Daten gewonnenen Erkenntnissen zu einer "mittelräumigen" Prognose, z.B. für grössere Streckenabschnitte einer Autostrasse.

4.4 Ausländische Aktivitäten

Wie bereits erwähnt, laufen in verschiedenen europäischen Ländern Aktivitäten, die zu einem optimalen Strassenwinterdienst führen sollen. Darüber existiert sehr viel Lieratur. Allgemein besteht die Tendenz, Messnetze aufzubauen, die das Strassenwettergeschehen an möglichst vielen Punkten erfassen und an eine Zentrale melden. Das Schwergewicht liegt dabei auf der Erfassung von Oberflächentemperatur und -zustand, der Stärke und Art der Niederschläge und oftmals auch der Sichtverhältnisse. Für die Niederschlagsvoraussage hat das Verfahren der hierfür speziell betriebenen Radars grosse Bedeutung. Ein weiterer Ansatz sind Modelle (Simulationen), die ausser der Erfassung des Momentanzustandes eine kurzfristige Vorhersage erlauben. Einen guten Ueberblick geben die Tagungsbücher der einschlägigen Konferenzen SIRWEC "Standing International Road Weather Conference":

1984	2. Konferenz in Kopenhagen (DK)
1986	3. Konferenz Tampere (SF)
1988	4. Konferenz Florenz (I)
1989	5. Konferenz Tromsö (N)
1992	6. Konferenz Minneapolis (USA)

4.5 Schweizerische Literatur

Im Jahre 1985 hat der SMA-Meteorologe Urs Keller, der sich besonders auch mit dem Strassenwetter befasst, eine Publikation verfasst, die eine ausserordentlich gute Hilfe für die Strassenwetterprognose ist (Arbeitsbericht Nr. 133 der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt "Grundlagen zur Prognose von Strassenvereisung"). Die Arbeit gibt einen sehr guten Ueberblick über die gesamte Problematik der Strassenvereisung. Die verschiedenen interessierenden Wettersituationen sind beschrieben, und es werden Hinweise gegeben, wie die vorhandenen Daten für den vorgesehenen Zweck genützt werden können. Solche Daten stellt z.B. das landesweite Netz der automatischen Wetterstationen ANETZ im Zehnminuten-Takt zur Verfügung.

Ein weiterer Arbeitsbericht der SMA (No. 116 "Abschätzung der nächtlichen Gesamtbewölkung mit Hilfe von ASTA-Daten" von Peter Albisser) befasst sich mit der durch die Bewölkung beeinflussten nächtlichen Abkühlung der Erdoberfläche. Diese Abkühlung ist eine wesentliche Ursache für die Strassenvereisung. Auch hier werden die ANETZ-Daten benützt.

5. Methoden zur Erreichung der geforderten Leistungen

5.1 Grundsätzliches zu den heute bestehenden Wetterdienstleistungen

Die Qualität der heute bestehenden Wetterdienstleistungen der SMA ist unbestritten. Für den Strassenunterhaltsdienst wären jedoch räumlich und zeitlich höher aufgelöste Wettermeldungen und Prognosen erwünscht. Die Schweiz sollte dabei in mindestens zehn Regionen und fünf Höhenstufen unterteilt werden. Ein solcher Ausbau des Strassenwetterdienstes ist der SMA zur Zeit aus personellen Gründen nicht möglich.

5.2 Weitergehendes

Eine räumlich und zeitlich genügend fein aufgelöste Prognose lässt sich für das schweizerische Strassennetz mit den grossen regionalen und höhenmässigen Unterschieden kaum von Hand ausführen, sondern muss mit Computerhilfe erstellt werden. Ausser den heute im Wetterdienst üblichen Mitteln könnten weitere - beispielsweise die im Kapitel 6 eingehend beschriebenen - Methoden angewendet werden. Das von der SMA betriebene Netz von automatischen Wetterstationen A-NETZ ermöglicht mit seinen zehnminütigen Messwerten einen sehr guten Ueberblick über die aktuelle Wetterlage in der ganzen Schweiz. Die Nutzung von neuartigen Mitteln wie Modellen und speziellen Computertechniken (z.B. der künstlichen Intelligenz) sollte versucht werden.

Ein spezieller Strassenwetterdienst ist auf privater oder privat/öffentlicher Basis denkbar. Damit dies mit vernünftigem Personalaufwand möglich ist, müssen die Datenbearbeitungen wesentlich stärker automatisiert werden.

Als Fernziel erscheint die Kombination einer feinstrukturierten Strassenwetterprognose, der Interpretation der GFS-Daten durch erfahrene Unterhaltsfachleute und der Einsatz von "intelligenten" Unterhaltsfahrzeugen optimal. "Intelligente" Unterhaltsfahrzeuge wären mit Sensoren ausgerüstet, welche die Aggregate (z.B. Salzstreuer) so steuern, dass immer die genau richtige Menge Salz gestreut wird, sodass die Strassenoberfläche in den nächsten Stunden nicht gefrieren kann. Das "intelligente" Unterhaltsfahrzeug müsste vor seiner Ausfahrt mit Daten aus der Strassenwetterprognose "gefüttert" werden.

6. Strassenwetterprognosen

6.1 Zur Zeit in der Schweiz angewandte Prognosetechnik

Die Schweizerische Meteorologische Anstalt (SMA) verbreitet im Winterhalbjahr Strassenzustandsprognosen und Warnungen vor Schneefall und Glatteis. Urs Keller, SMA, verfasste 1985 den SMA-Arbeitsbericht Nr. 133 «Grundlagen zur Prognose von Strassenvereisung». Dieser Bericht bietet dem verantwortlichen Prognostiker mit einer Checkliste Hilfe für die Ausarbeitung der täglichen Prognose.

Die Checkliste umfasst die Prognose von
- Glatteis
- Nebeleis
- Eisglätte nach Niederschlag
- Eisglätte durch Schmelzwasser
- Reifglätte
- Schneeglätte.

Sie enthält die wichtigen Elemente der Grosswetterlage und führt die Voraussetzungen auf, die in bezug auf Temperatur und Luftfeuchtigkeit für die verschiedenen Arten von Strassenglätte erfüllt sein müssen. Für die Eisglätte nach Niederschlag oder durch Schmelzwasser liegen empirische Gefriertabellen nass bzw. trocken vor, um den Zeitpunkt der Eisglätte abschätzen zu können.

Die Prognose wird um 18 Uhr Lokalzeit für die ganze folgende Nacht herausgegeben. Die Verbreitung erfolgt via Radio, Telefon 163, Teletext, Videotex und gelegentlich durch das Fernsehen.

Im Winter 1991/92 lief ein Versuchsbetrieb an für das Strassenwetter-Informations-System (SWIS), das regionalisierte Prognosen für die Unterhaltsdienste enthält. Beteiligt sind die SMA, das Tiefbauamt des Kantons Baselland und die Boschung Mecatronics AG. Die SMA liefert dazu einmal täglich um 18.30 Uhr Prognosen der Parameter Bewölkung, Niederschlag (Art und Menge), Wind, Luft- und Grastemperatur für die kommenden vier 6-Std Abschnitte (18-0, 0-6, 6-12, 12-18 Uhr). Diese prognostizierten Werte werden in ein Strahlungsmodell eingegeben.

Das SWIS wird im kommenden Winter auf zwei weitere Regionen ausgedehnt.

6.2 Verwendung von ANETZ-Messwerten für den Strassen-Winterdienst

Die Schweizerische Meteorologische Anstalt (SMA) betreibt ein landesweites Netz von automatisierten Stationen (ANETZ) zur Erfassung von meteorologischen Grössen. Das ANETZ umfasst rund 70 Stationen und hebt sich mit seiner Dichte im internationalen Vergleich deutlich von ähnlichen Netzen ab. Alle 10 Minuten stehen auf einem Zentralrechner die aktuellen Messwerte einer grossen Anzahl meteorologischer Grössen zur Verfügung. Dank der einheitlichen Ausrüstung, der Wartung und der kontinuierlichen Nacheichung aller Messfühler liefert das Netz Messwerte, die untereinander vergleichbar sind. Regionale Unterschiede in den Messgrössen werden aufgezeigt. Das ANETZ zeichnet sich durch eine hohe zeitliche Verfügbarkeit von aktuellen Messwerten aus.

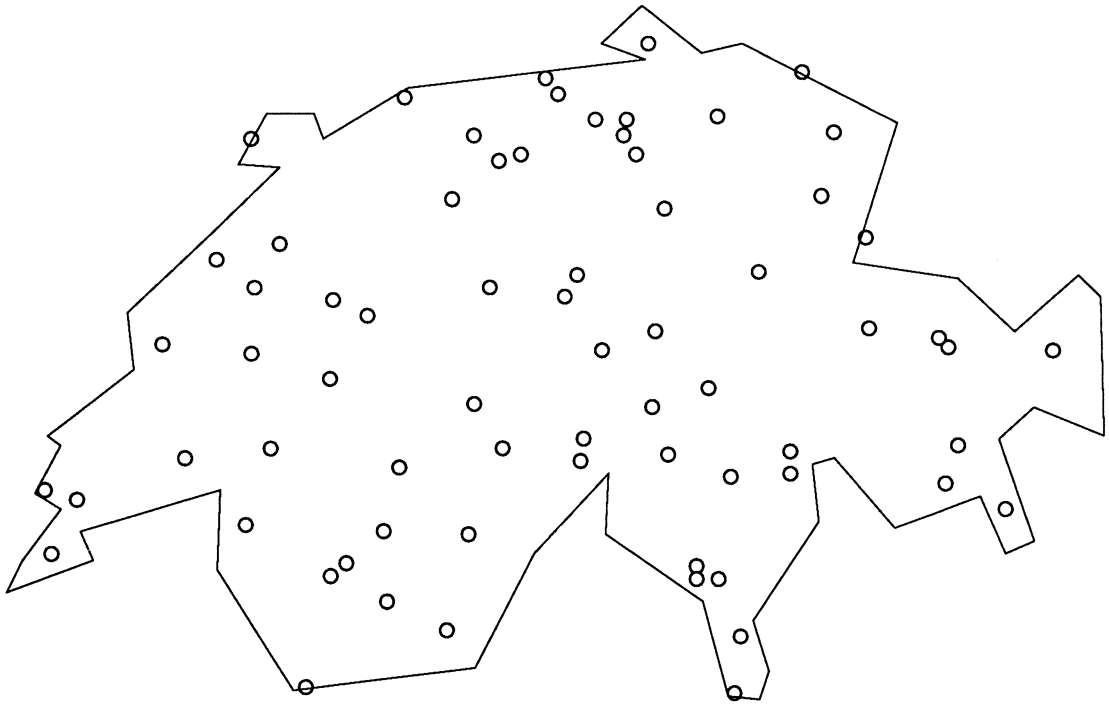


Fig. 1 ANETZ Stationen

Es stellt sich die Frage, in welcher Art Informationen aus dem ANETZ für die Unterstützung des Strassen-Winterdienstes verwendet werden können. Für die Unterhaltsdienste sind
- die aktuelle Lage
- die kurzfristige Entwicklung (3-12 Stunden)

von Bedeutung.

Primär interessieren die zu erwartenden Niederschläge in Form von Regen, Schnee oder vereisendem Regen sowie das Auftreten von Schnee-, Eis- und Reifglätte. Bei kritischen Wetterlagen ist zudem eine aktuelle Beratung nützlich, die auf die spezifischen Bedürfnisse des Strassen-Winterdienstes zugeschnitten ist.

Die Unterhaltsdienste verfügen mit ihren installierten Glatteisfrühwarnsystemen (GFS) über aktuelle lokale Informationen zum Zustand der Strassen-Oberflächen. Das ANETZ bietet grundsätzlich die Möglichkeit, sich einen landesweiten Überblick über die aktuelle meteorologische Lage zu verschaffen. Es liefert Grunddaten für Prognosen und deren Kontrolle.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden Möglichkeiten geprüft, ANETZ-Messwerte spezifisch für die Unterstützung des Strassen-Winterdienstes aufzubereiten. Dabei wurden folgende Fragen angegangen:

1. Welche Grössen aus dem vielfältigen Angebot von ANETZ-Daten sind für den Strassen-Winterdienst relevant?
2. Können diese ANETZ-Messwerte auf das Nationalstrassennetz interpoliert werden (ANETZ-Stationen befinden sich i.a. nicht in unmittelbarer Nähe von Nationalstrassen)?
3. Lassen sich daraus unterhaltsspezifische Gegebenheiten ableiten und auf dem Nationalstrassennetz darstellen?

6.2.1 Relevante ANETZ-Grössen

In der vorliegenden Arbeit wurden folgende Grössen aus dem ANETZ verwendet:

a) Temperaturen
- das Stundenmittel der Luft-Temperatur T200, gemessen 2m über dem Boden
- das Stundenmittel der Gras-Temperatur T5, gemessen 5cm über dem Boden

b) Luftfeuchtigkeit
- das Stundenmittel der Psychrometer-Temperatur Tps
- der momentane Taupunkt Td

c) Niederschlag
- die Stundensumme des Niederschlages Ns

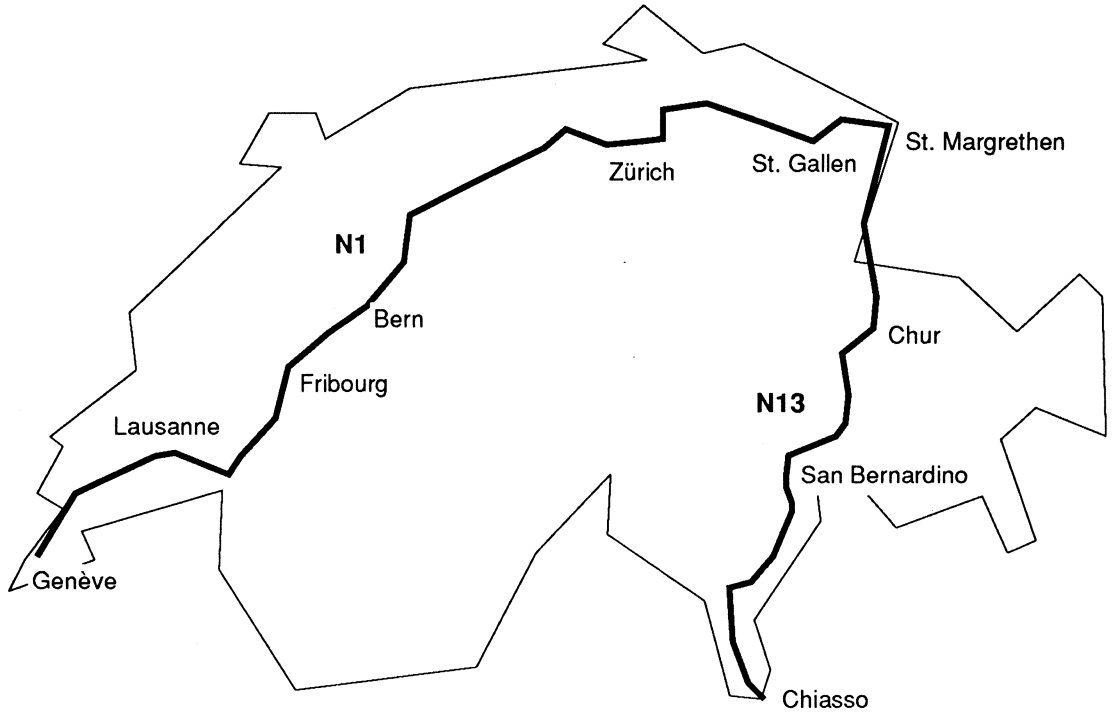


Fig. 2 Teststrecke

6.2.2 Interpolation auf das Nationalstrassennetz

Die Übertragbarkeit dieser Grössen auf das Nationalstrassennetz wurde durch die Wahl einer Teststrecke geprüft, auf welche die Messwerte umgerechnet wurden. Als Teststrecke wurde im Mittelland die Strecke Genève-Lausanne-Fribourg-Bern-Zürich-St. Gallen-St. Margrethen und in den Alpen die Strecke St. Margrethen-Chur-San Bernardino-Chiasso festgelegt. Die gesamte Teststrecke hat eine Länge von rund 560 km.

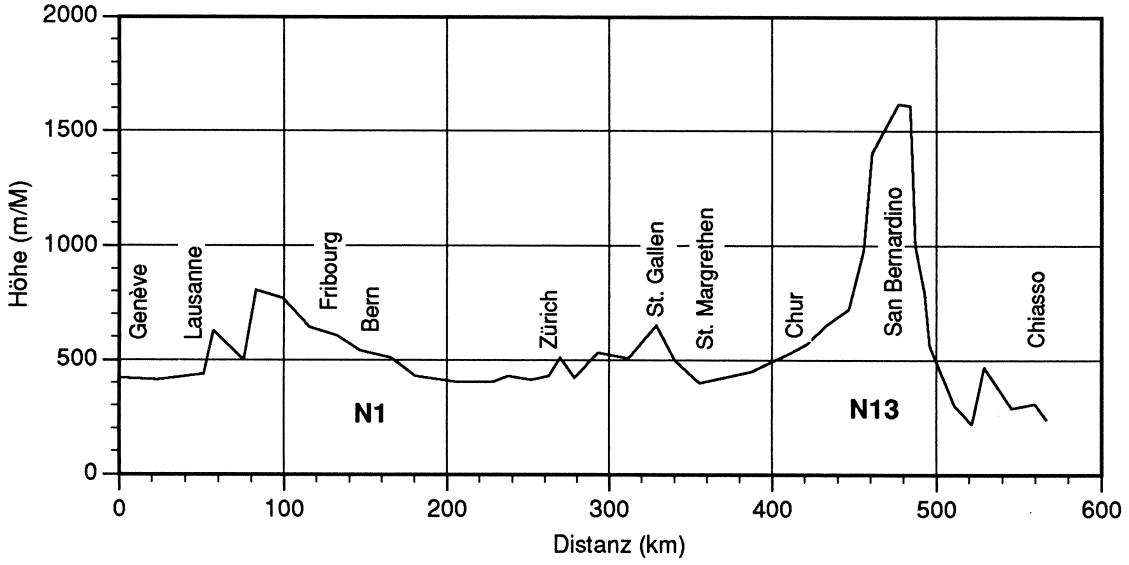


Fig. 3 Höhenprofil der Teststrecke

Die Teststrecke wurde durch 42 charakteristische Punkte im Streckenprofil in einzelne Abschnitte unterteilt, die im Mittel 13 km lang sind. Für jeden dieser charakteristischen Punkte werden die interessierenden meteorologischen Grössen aus den benachbarten ANETZ Stationswerten berechnet (interpoliert). Als Interpolationsverfahren wurden das «Kriging» (Jensen 1989), die Kollokation (Wirth 1990) und das «inverse distance averaging» (Wehrli 1986) erwogen. Die vorliegenden Resultate wurden mit einer Methode erhalten, die sich stark an die letzte Methode anlehnt.

Die gewählte Interpolationsmethode geht davon aus, dass die Vertikalgradienten der Interpolationsgrössen am wichtigsten sind (Anisotropie der Atmosphäre). Folgender Ansatz wurde gemacht: für jeden Punkt (x,y,z), an dem ein Interpolationwert W berechnet werden soll, wird eine lokale, lineare Änderung von W mit der Höhe z postuliert:

$$W(x,y;z) = W_0(x,y) + z\left(\Delta W/\Delta z\right)\Big|_{(x,y)}.$$

Als Stützwerte für die Berechnung dieser Geraden mit den Parametern W_0 und $\Delta W/\Delta z$ werden die Messwerte der benachbarten ANETZ-Stationen verwendet, wobei diese horizontal höchstens 50 km und vertikal höchstens 500 m entfernt sein dürfen. Der Stützwert der ANETZ-Station i erhält eine Gewichtung, die invers proportional zum Horizontalabstand der Station i zum Interpolationspunkt (x,y) ist. Da die Gewichtung der ANETZ-Stationen für jeden Interpolationspunkt nur einmal berechnet werden

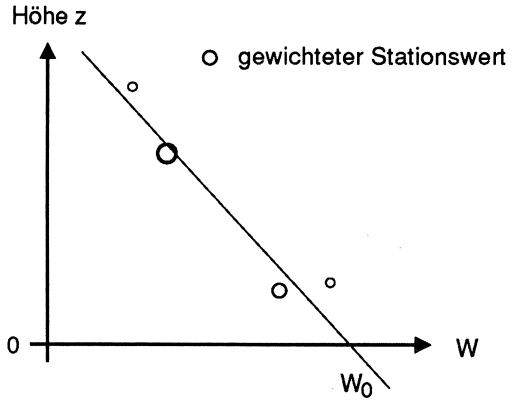


Fig. 4 Interpolationsansatz

muss, ist die Berechnung der beiden Parameter W_0 und $\Delta W/\Delta z$ nicht allzu aufwendig. Die Berechnung dieser Parameter muss jeweils für jeden Zeit- und Interpolationspunkt neu durchgeführt werden. Ein heutiger Arbeitsplatzrechner mit numerischem Koprozessor schafft dies in einer vernünftigen Zeit. Wesentlich für die Brauchbarkeit dieser Methode ist, dass die benachbarten ANETZ-Stationen eine gute Höhenstaffelung aufweisen, damit der Gradient $\Delta W/\Delta z$ gut definiert ist und dass vertikal nicht extrapoliert werden muss. An den meisten Punkten der Teststrecke sind diese Bedingungen erfüllt.

Die beschriebene Interpolationsmethode wurde für folgende ANETZ-Grössen angewandt:
- die Luft-Temperatur T200
- die Gras-Temperatur T5
- den Taupunkt Td
- die Psychrometer-Temperatur Tps.

Bei der Niederschlagsmenge wurde vorerst auf eine Interpolation verzichtet und mit dem Messwert der nächsten ANETZ Station gearbeitet.

6.2.3 Statistik über die Strassenverkehrsunfälle

Für die Validierung der auf die Teststrecke umgerechneten ANETZ-Messwerte bietet sich die Statistik über die Strassenverkehrsunfälle an. Diese Statistik beruht auf den Unfallrapporten der Polizei und enthält u.a. Angaben über *Ort (Gemeinde)*, *Zeit*, *Strassenart*, *Strassenzustand* und *Witterung*. Im Hinblick auf die angestrebte Validierung sind die beiden letzten Merkmale besonders wertvoll. Die Beratungsstelle für Unfallverhütung (BfU) stellte diese Daten freundlicherweise zur Verfügung. Verfügbar waren im November 1991 die Perioden:

Januar 1988 - März 1988
Oktober 1988 - März 1989
Oktober 1989 - März 1990
Oktober 1990 - Dezember 1990

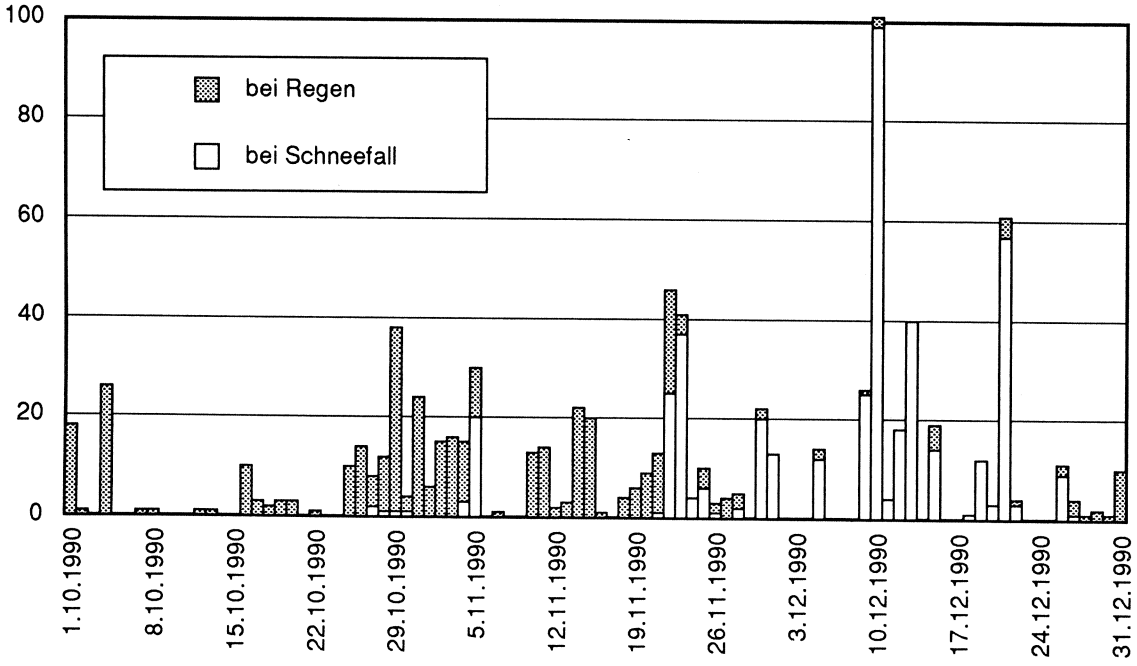


Fig. 5 Unfallzahlen auf Nationalstrassen bei Regen oder Schneefall. **Quelle: BfU**

Mit Hilfe der Unfallstatistik konnten unfallreiche Perioden ermittelt werden. Für die Validierung wurden die folgenden Perioden ausgewählt:

Datum	Dauer (Std.)	Bemerkung
5.11.90, 12:00	24	Übergang Regen - Schneefall
22.11.90, 00:00	48	Übergang Regen - Schneefall
25.11.90, 00:00	48	gefrierende Nässe nach Regen
30.11.90, 12:00	24	Abkühlung mit Schneefall
9.12.90, 00:00	48	Schneefall nach mehreren Eistagen
20.12.90, 00:00	48	Erwärmung mit Schneefall und Regen
16.11.91, 12:00	24	Übergang Regen - Schneefall
16.12.91, 12:00	48	vereisender Regen nach Hochdrucklage

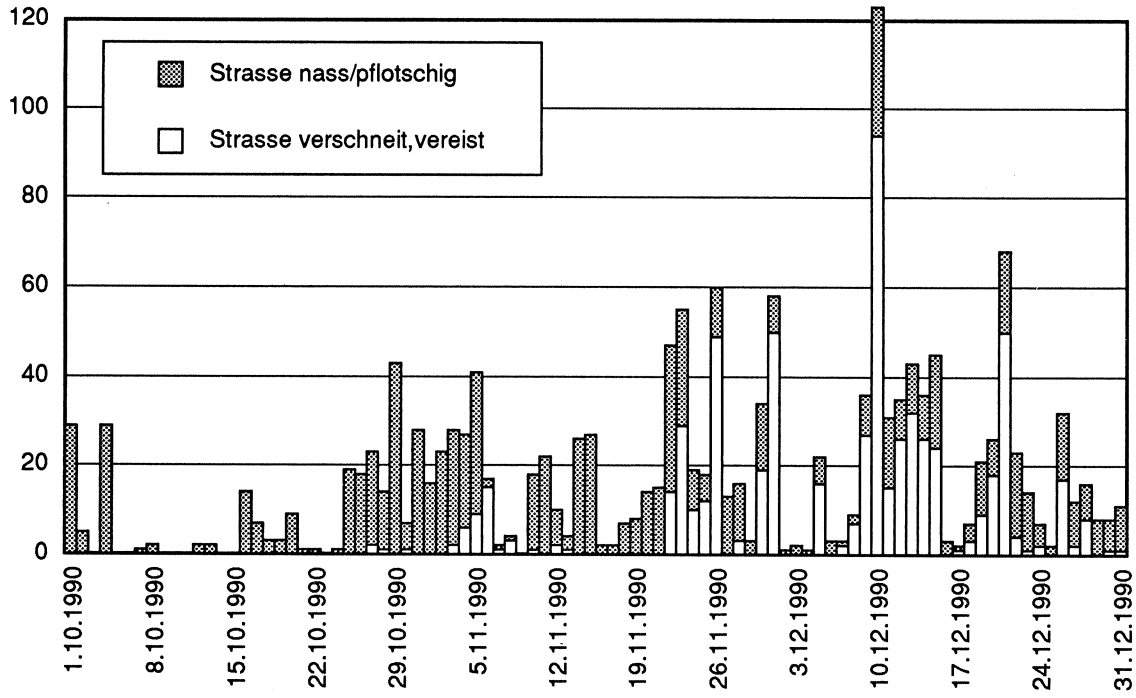


Fig. 6 Unfallzahlen auf Nationalstrassen mit Strassenzustand. **Quelle: BfU**

An den ausgewählten Tagen des Jahres 1990 ereigneten sich entlang der Teststrecke 205 Unfälle, an denen die Witterung mit *Regen* bzw. *Schneefall* angegeben wurde. Bei 317 Unfällen wurde der Strassenzustand mit *vereist, verschneit, pflotschig, nass* angegeben. Anhand dieser Unfälle wurde die Validierung vorgenommen.

6.2.4 Darstellung von ANETZ-Messwerten

Die ANETZ-Daten wurden von der ENAD-Datenbank auf dem ETH-System NOS/VE bezogen. Die SMA unterhält diese Datenbank zu Forschungszwecken. Sie wird um die Monatsmitte mit den Daten des Vormonats aktualisiert.

Bei der gegebenen grossen Datenmenge sind effiziente Zugriffs- und Darstellungsmethoden von grosser Bedeutung, um die Daten überhaupt verwenden zu können. Im Rahmen des Projektes wurde eine Applikation entwickelt, welche diese Aufgaben auf einem Arbeitsplatzrechner löst und welche die angestrebte Validierung ermöglichte.

ANETZ-Messwerte werden auf vier Arten dargestellt:

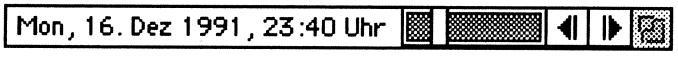
- Kartendarstellung (x,y) der Stationswerte
- Profildarstellung (z) der Stationswerte
- Kartendarstellung (x,y) der auf die Teststrecke interpolierten Werte
- Profildarstellung (z) der auf die Teststrecke interpolierten Werte

	ANETZ		Teststrecke	
Darstellung:	Karte	Profil	Karte	Profil
Grösse:				
Luft-Temperatur T200	ja	ja	ja	ja
Gras-Temperatur T5	ja	ja	ja	ja
Temperaturdifferenz T5-T200	ja	ja	ja	ja
Boden-Temperatur -5cm	ja	ja		
Psychrometer-Temperatur Tps	ja	ja	ja	ja
Taupunkt Td	ja	ja	ja	ja
Niederschlag	ja	ja	ja	ja
Tau-/Reifbildung	ja		ja	ja
Vereisungsgefahr	ja		ja	ja
Luftdruck		ja		
Luftdruckänderung	ja			
Wind	ja			

Tabelle **Realisierte Darstellungen von ANETZ-Messwerten. Die schraffierten Darstellungen sind für den Strassen-Winterdienst von besonderer Bedeutung.**

Für die ausgewählten Perioden wurden einzelne Datenfiles (meist 24 - 48 Stunden) erzeugt, die menugesteuert geladen werden können. Die Auswahl des gewünschten Zeitpunktes erfolgt mit einem Rollbalken (mausgesteuert). Die Karten- und Profildarstellungen der Stationswerte erfolgen in separaten Fenstern. Die Karten- und die Profildarstellung der auf die Teststrecke interpolierten Werte erfolgt im gleichen Fenster. Alle Darstellungen sind farbig und laufen syn-

Fig. 7 Zeit-Rollbalken



chron. Mit Hilfe dieser Applikation kann die Wetterlage, wie sie auf dem ANETZ erfasst wird, zu einem gegebenen Zeitpunkt übersichtlich dargestellt werden. Durch die Animation von aufeinanderfolgenden Darstellungen werden zeitliche Änderungen sichtbar gemacht.

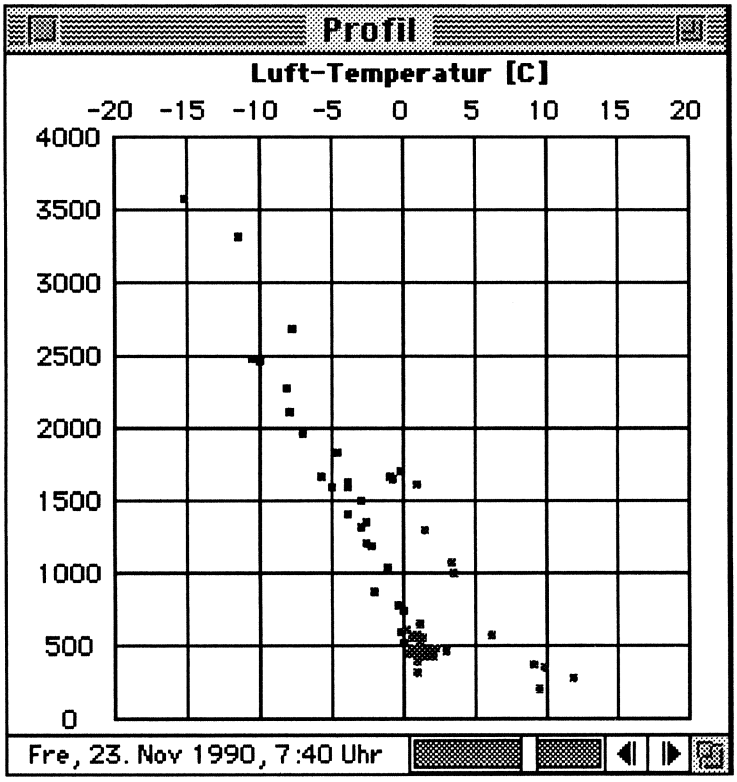
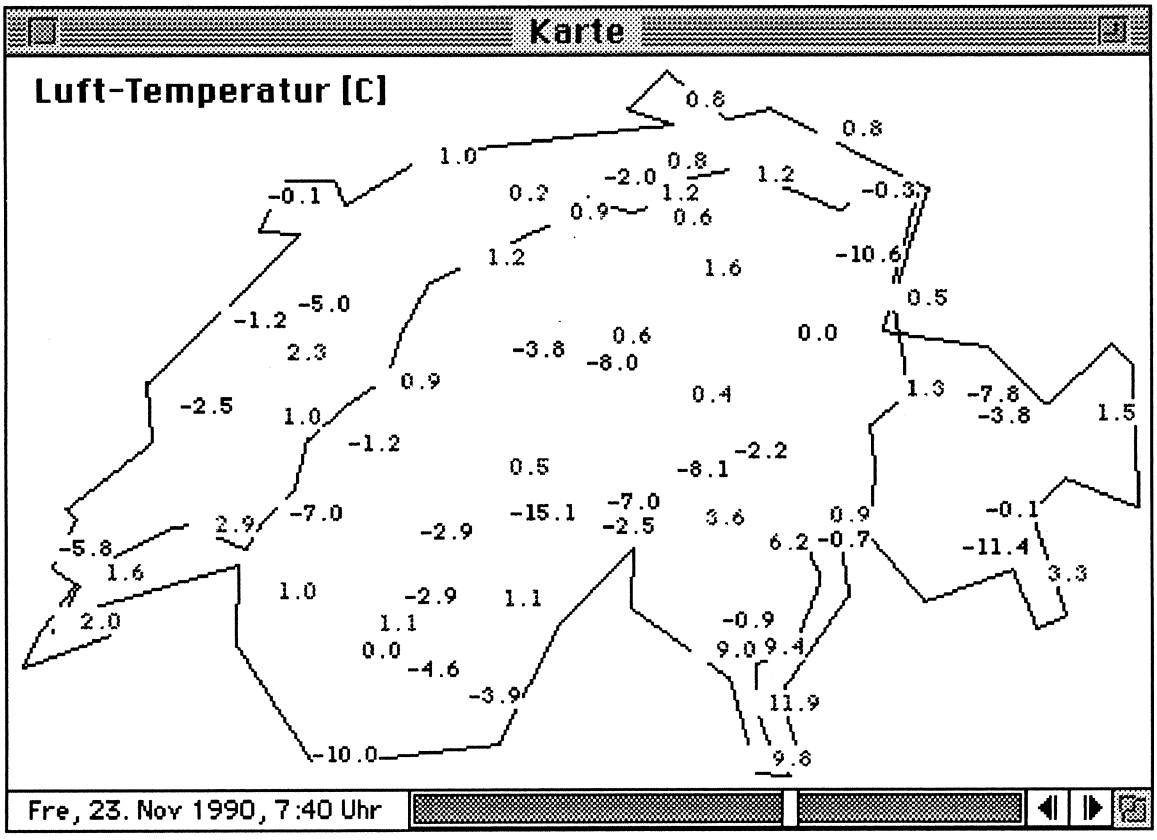


Fig. 8

Karten- und Profildarstellung der Luft-Temperatur T200 im ANETZ

In der Profildarstellung(links) ist ersichtlich, dass zwei unterschiedlich warme Luftmassen über der Schweiz liegen.

Die Kartendarstellung (unten) zeigt, dass die Bündner und Tessiner Stationen in der wärmeren Luft liegen. Die Nullgradgrenze liegt im Mittelland bei 700 m/M und in Graubünden und im Tessin bei 1600 m/M.



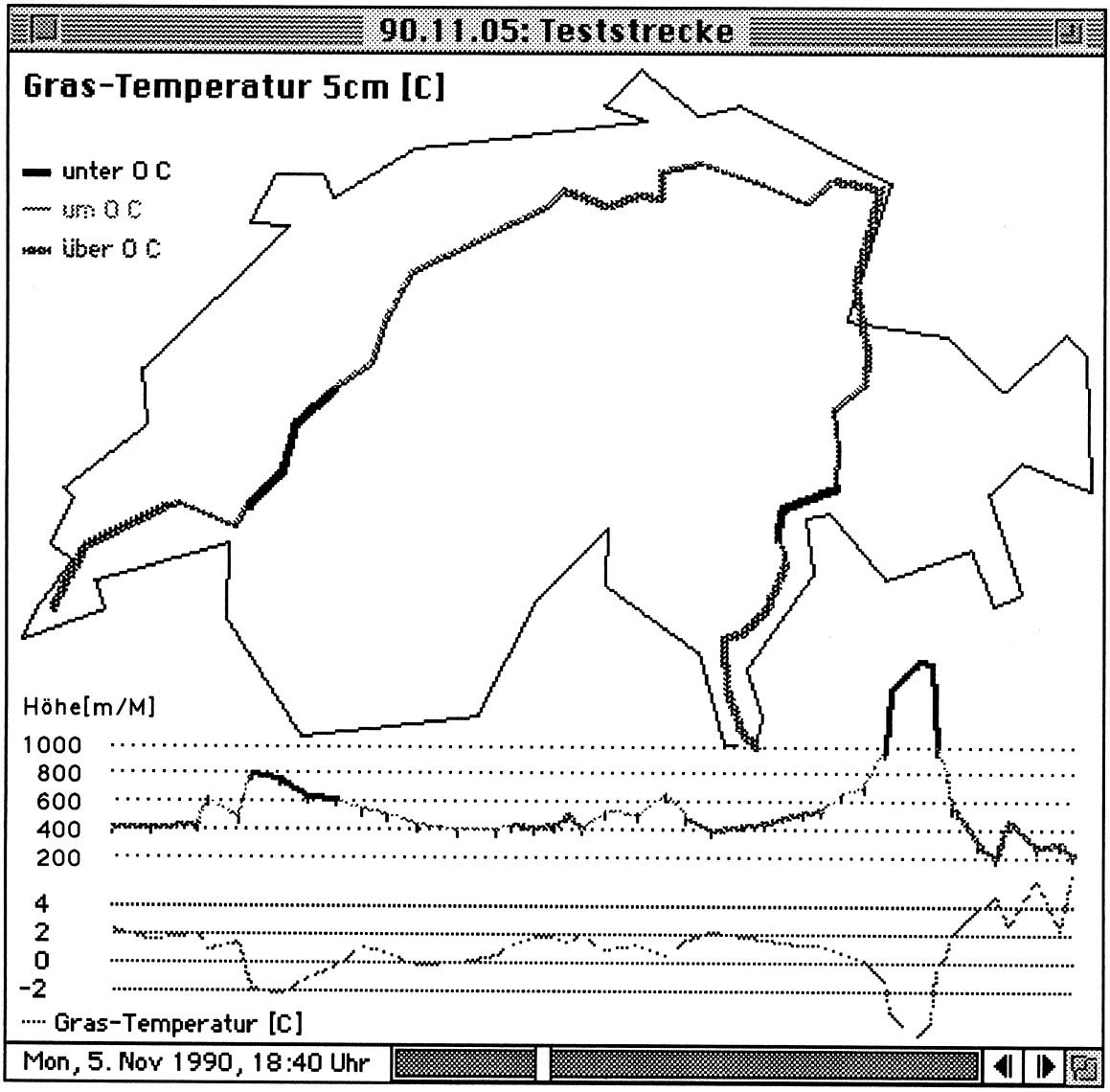


Fig. 9 Karten- und Profildarstellung der auf die Teststrecke interpolierten Gras-Temperatur T5.

In den tieferen Lagen der Alpennordseite liegen die Gras-Temperaturen um +2 C (Genfersee, Zürich, Rheintal), auf der Alpensüdseite bei +4 C. In Lagen über 600 m sind die Gras-Temperaturen negativ (Freiburg, San Bernardino).

Durch die Umrechnung der ANETZ-Messwerte auf die Nationalstrassenabschnitte und die analoge Darstellung der interpolierten Werte entlang der Nationalstrasse ergibt sich ein rascher Überblick über die regionalen Unterschiede in der bodennahen Luft-Temperatur.

Die numerischen Werte der Gras-Temperatur entlang der Teststrecke können in der untersten Darstellung abgelesen werden. Diese letzte Darstellung wurde insbesondere bei der Validierung verwendet.

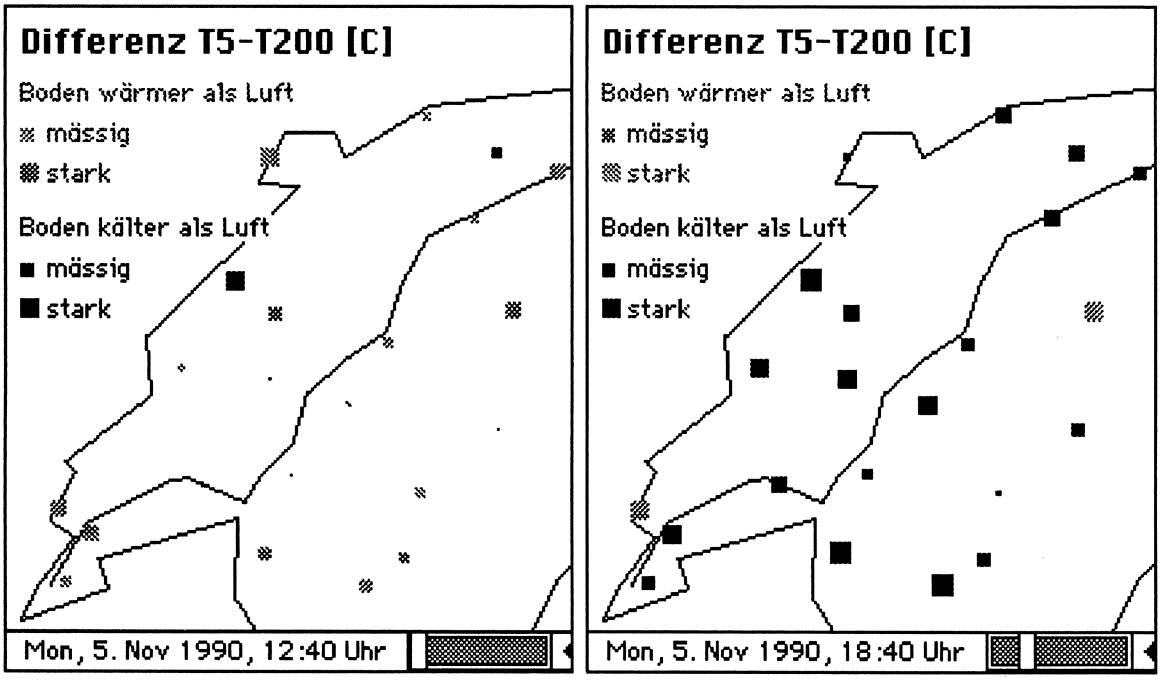


Fig. 10 Kartendarstellung der Differenz zwischen Gras- und Luft-Temperatur im ANETZ

Zur Mittagszeit (links) vermag die Sonneneinstrahlung den Boden etwas zu erwärmen (T5>T200), nach Sonnenuntergang (rechts) sinkt die Gras-Temperatur durch die Ausstrahlung unter die Luft-Temperatur. Die Temperaturdifferenz T5-T200 ist ein Mass für den bodennahen Wärmefluss und ist stark strahlungsabhängig.

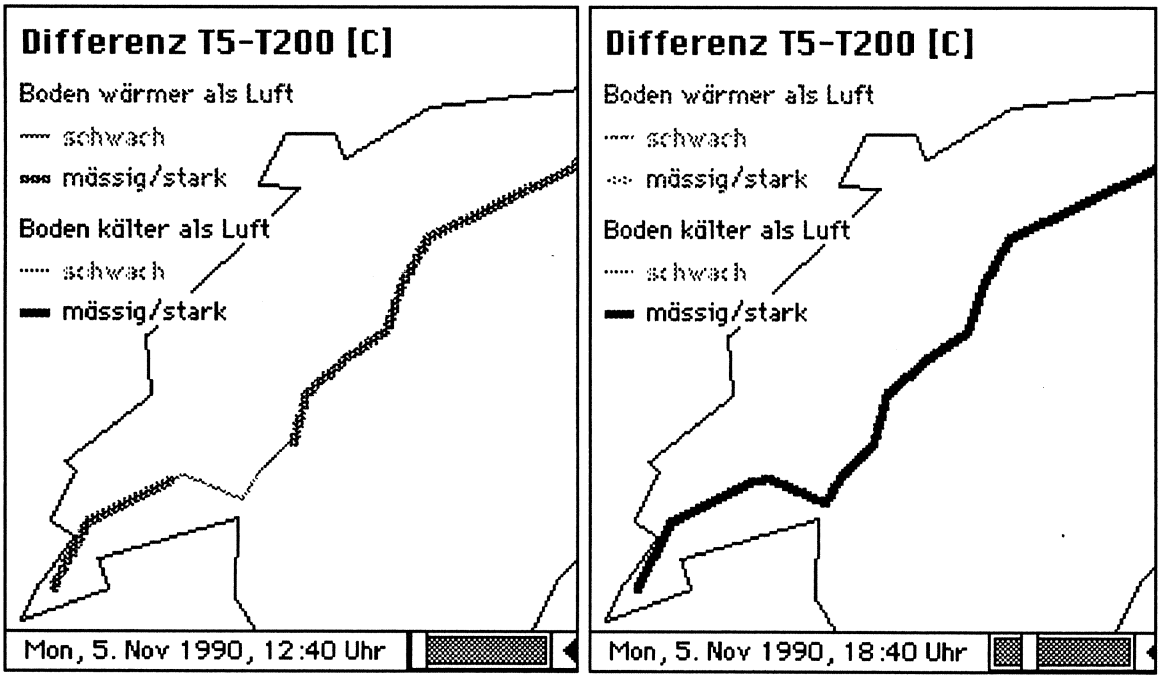


Fig. 11 Kartendarstellung der Differenz zwischen Gras- und Luft-Temperatur auf der Teststrecke

Durch die Umrechnung der ANETZ-Messwerte auf die Nationalstrassenabschnitte und die analoge Darstellung der interpolierten Werte entlang der Nationalstrasse ergibt sich ein rascher Überblick über die regionalen Unterschiede im bodennahen Wärmefluss.

6.2.5 Validierung der Niederschlagsform

In der Unfallstatistik wird für jeden Unfall das Kriterium «Witterung» mit den Merkmalen *schön, bedeckt, Regen, Hagel, Schneefall, Nebel, starker Wind, Sonnenblendung, andere* geführt. Im Nov/Dez 1990 wurde für 205 Unfälle bei Regen oder Schneefall die Luft-Temperatur (T200), die Gras-Temperatur (T5), die Psychrometer-Temperatur (Tps) und der Taupunkt (Td) für den Unfallort aus den ANETZ-Messwerten berechnet (Interpolation).

Für die vier Parameter T200, T5, Td und Tps ergeben sich folgende plausible Übergangsbereiche von Schneefall zu Regen:

	Übergangsbereich Schnee/Regen
a) Lufttemperatur	0.4 C < T200 < 2.0 C
b) Grastemperatur	-0.2 C < T5 < 0.3 C
c) Taupunkt	0.0 C < Td < 0.4 C
d) Psychrometer-Temperatur	**0.3 C < Tps < 1.0 C**

Für die Unterscheidung Schneefall/Regen wurde in den Darstellungen die Psychrometer-Temperatur Tps mit dem Übergangsbereich d) verwendet.

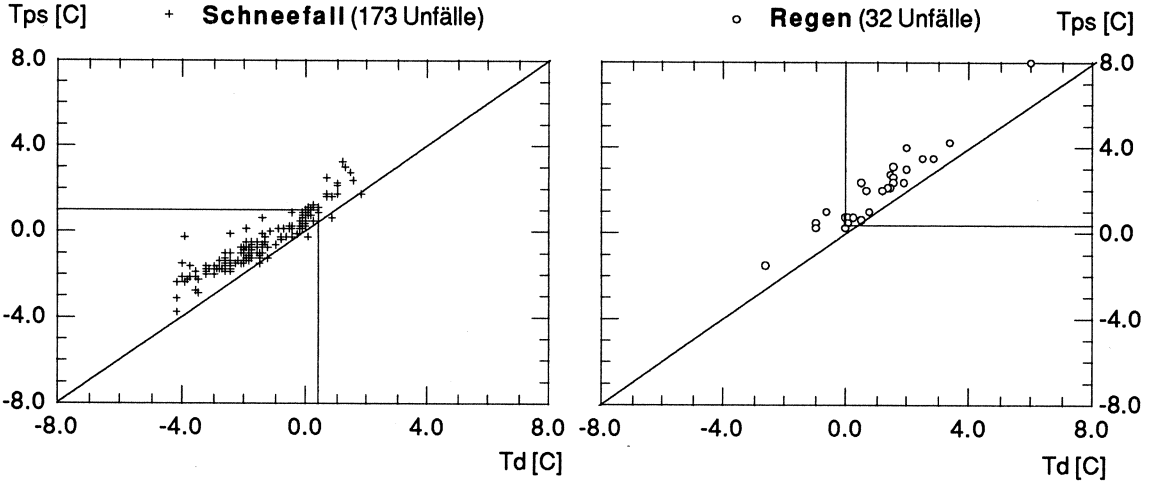


Fig. 12 Übergang Schneefall/Regen, der sich für Psychrometer-Temperatur und Taupunkt aus der Unfallstatistik ergibt

Diese Übergangsbereiche gelten bei genereller Abnahme von Tps und Td mit der Höhe, was bei Wetterlagen mit Niederschlägen meistens der Fall ist. Die Wetterlage am Abend des 16.11.91 erlaubte eine Verifikation dieses Übergangsbereiches für Tps. Der Dauerregen ging im Raum Zürich-St. Gallen in den Abendstunden in Schneefall über, während der Jura-Südfuss und das St. Galler Rheintal Regen erhielten (Fig. 13 und 14).

Im wichtigen Fall von *vereisendem Regen*, bei dem Regen in einen bodennahen Kaltluftsee mit negativer Temperatur fällt, zeigt auch die Psychrometer-Temperatur Tps eine «Inversion», sodass mit obigen Übergangsbereichen bei negativen Bodenwerten von Tps und Td der Niederschlag als Schnee angegeben wird, obwohl Regen fällt. Die Profildarstellung der ANETZ-Psychrometer-Temperaturen erlaubt die Identifikation solcher Situationen (Fig. 15 und 16).

Folgerung: *Aus den ANETZ-Messwerten lässt sich abschätzen, ob an einer bestimmten Stelle der Teststrecke Niederschlag als Regen oder Schnee fällt.*

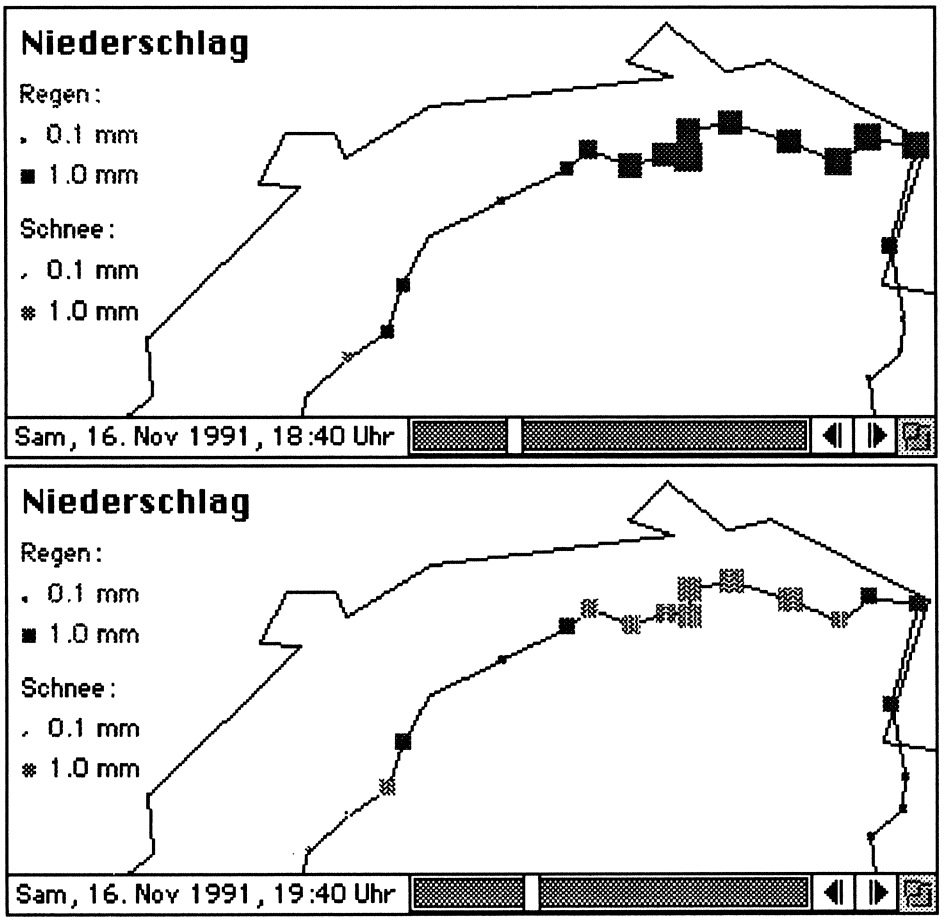


Fig. 13

Kartendarstellung des Niederschlages entlang der Teststrecke

Die Daten zeigen eine Situation, bei der Dauerregen am Abend im Raum Zürich-St. Gallen in Schneefall überging.

Die Unterscheidung Schneefall/ Regen erfolgt mit der Psychrometer-Temperatur.

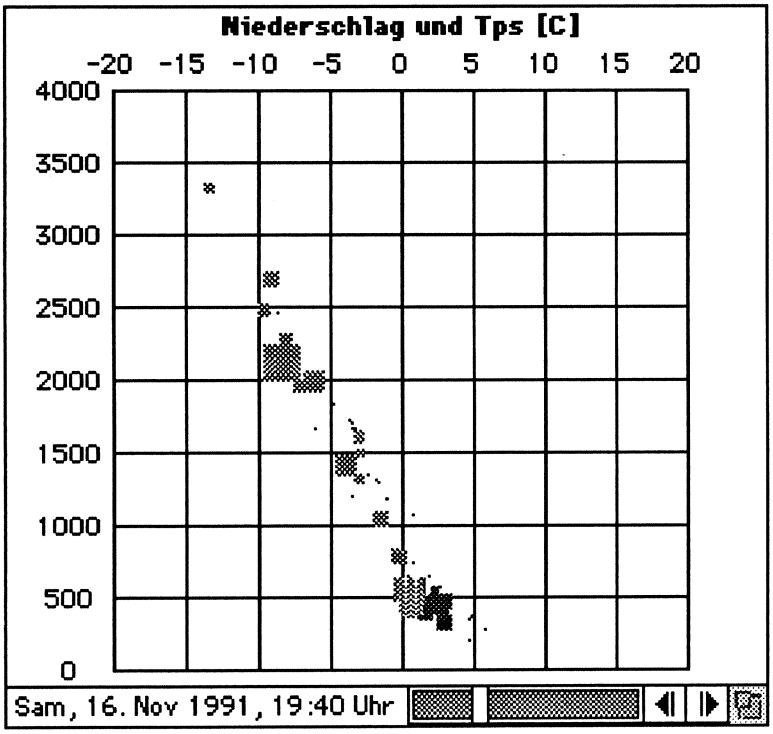


Fig. 14

Profildarstellung des Niederschlages

Die Daten zeigen die gleiche Situation wie Fig 11. Die bei Niederschlagssituationen übliche Abnahme der Psychrometer-Temperatur mit der Höhe ist gut sichtbar.

Die Psychrometer-Temperatur kann zur Bestimmung der Schneefallgrenze herangezogen werden.

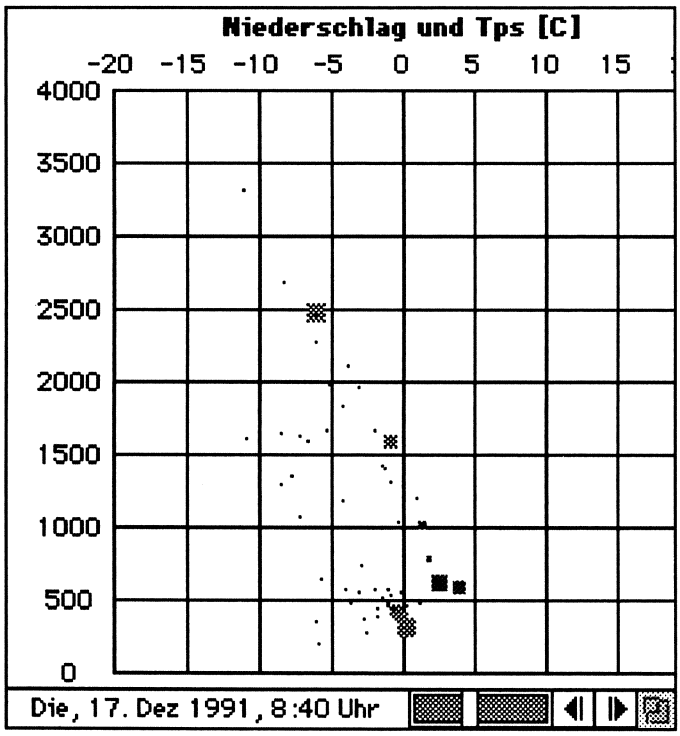


Fig. 15

Profildarstellung des Niederschlages bei vereisendem Regen

Die Daten zeigen eine seltene Situation, bei der vereisender Regen auftrat. Viele ANETZ Stationen unterhalb 600 m/M zeigen negative Psychrometer-Temperaturen. Einige höhergelegene Stationen zeigen, dass die Schneefallgrenze bei rund 1200 m/M liegt. Beim Fallen durch den bodennahen Kaltluftsee werden die Regentropfen wieder abgekühlt. Beim Auftreffen auf den gefrorenen Boden gefrieren die Tropfen und überziehen den Boden mit einer nassen Eisschicht.

Die im Kaltluftsee registrierten Niederschläge werden anhand der lokalen Psychrometer-Temperatur fälschlicherweise als Schnee angegeben.

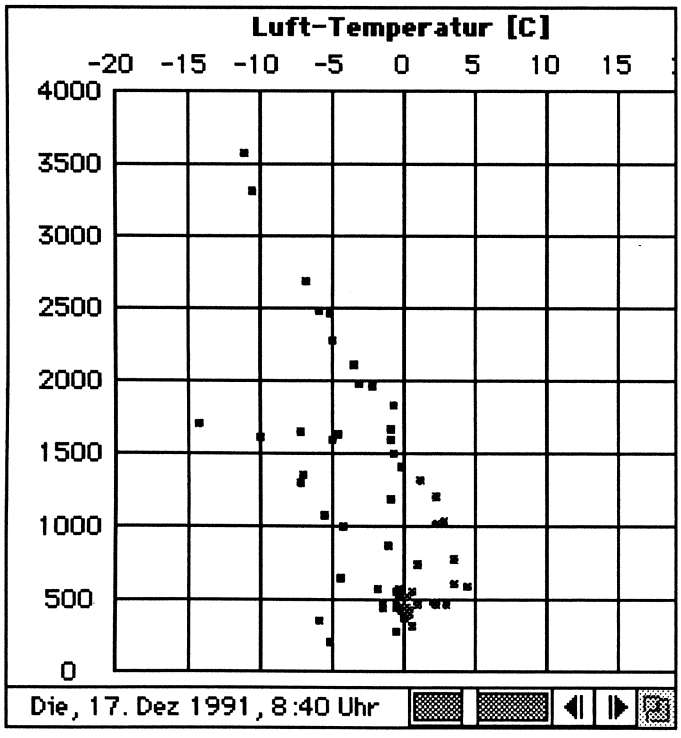


Fig. 16

Profildarstellung der Luft-Temperatur bei vereisendem Regen

Die Daten zeigen die gleiche Situation wie Fig. 15.

Unter der Schicht mit positiven Temperaturen zwischen 500 und 1500 m/M befindet sich an einigen Stationen des ANETZ noch bodennahe Kaltluft mit negativen Temperaturen. Niederschlag fällt dort als Regen in einen Kaltluftsee.

6.2.6 Validierung der Strassenvereisung

In der Unfallstatistik wird für jeden Unfall das Kriterium «Strassenzustand» mit den Merkmalen *trocken, nass, verschneit, vereist, pflotschig, oelig, verschmutzt, Schlaglöcher/Frostschäden, andere* geführt. Im Nov/Dez 1990 wurde für 317 Unfälle die Lufttemperatur (T200), die Grastemperatur (T5), die Psychrometer-Temperatur (Tps) und der Taupunkt (Td) für den Unfallort aus den ANETZ-Messwerten berechnet (Interpolation).

Beim Strassenzustand «vereist» ergaben sich folgende obere Grenzwerte für die Luftfeuchtigkeit und die Grastemperatur:

a) Taupunkt	Td	≤	0.2 C
b) Psychrometer-Temperatur	Tps	≤	1.0 C
c) Grastemperatur	T5	≤	0.0 C

Bei vereister Strasse müssen sowohl der Taupunkt als auch die Gras-Temperatur negativ sein. Für die Anzeige von Vereisungsgefahr wurden in den Darstellungen der Taupunkt Td und die Grastemperatur T5 mit den Grenzwerten a) und c) verwendet.

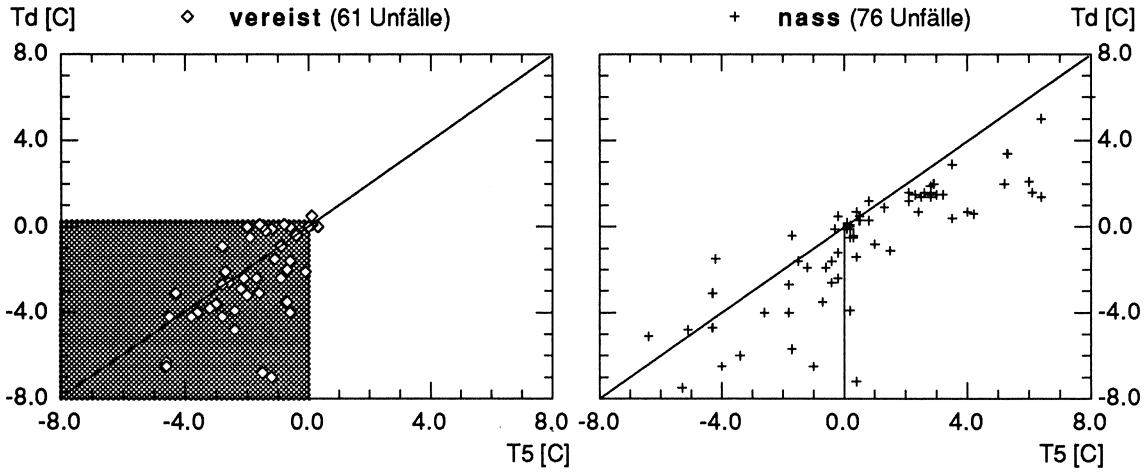


Fig. 17 Werte von Taupunkt und Gras-Temperatur bei vereister und nasser Strasse. Der Strassenzustand wurde der Unfallstatistik entnommen.

Die Unfälle bei nasser Strasse und negativen Gras-Temperaturen (rechts) dürften auf den Einsatz von Streusalz zurückzuführen sein.

Die Darstellung der Vereisungsgefahr entlang der Teststrecke ist am Beispiel des vereisenden Regens vom 17.12.91 gezeigt (Fig. 18).

Folgerung: *Aus den ANETZ-Messwerten lässt sich abschätzen, ob eine bestimmte Stelle der Teststrecke vereist sein kann.*

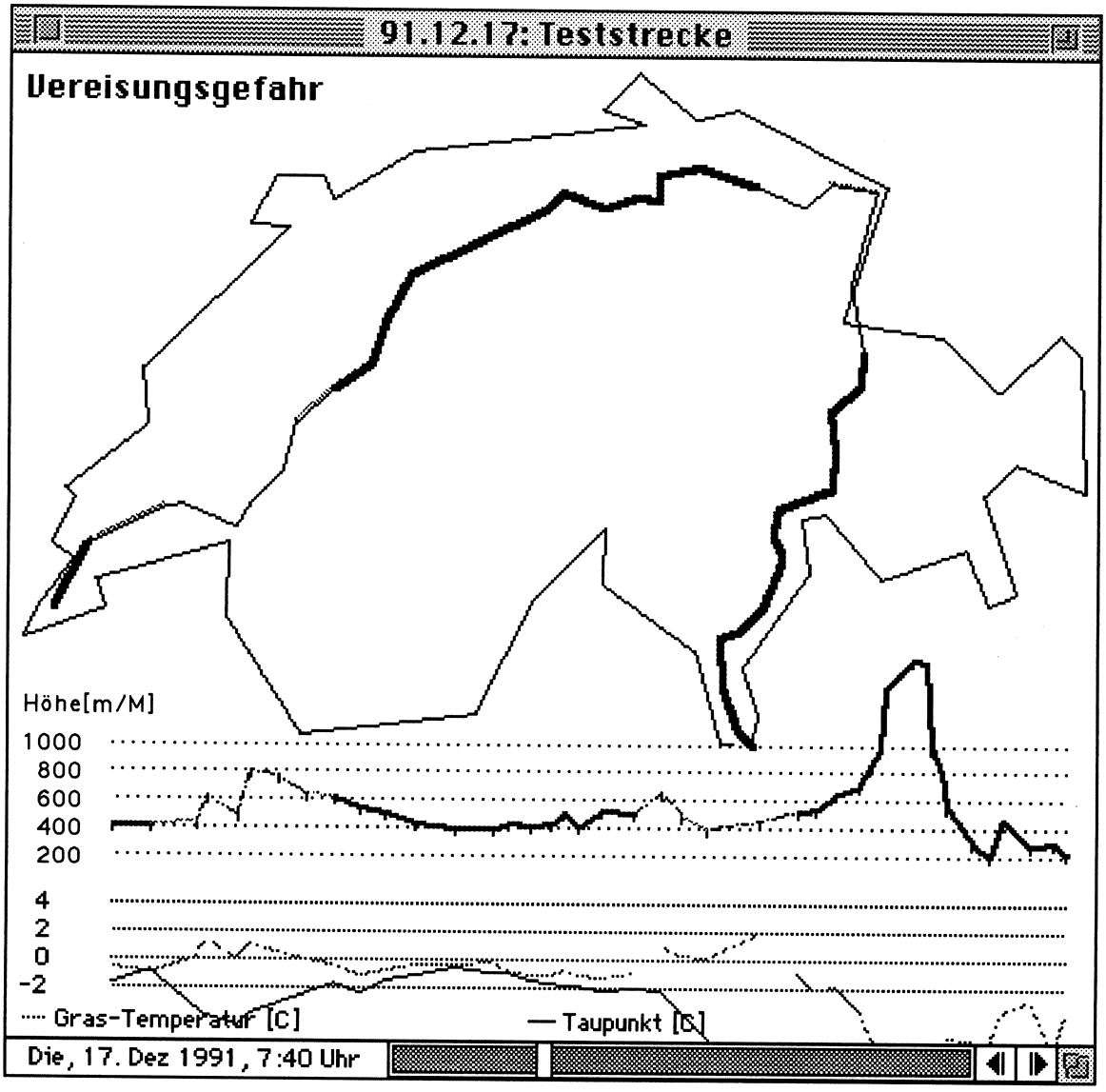


Fig. 18 Anzeige möglicher Strassenvereisung entlang der Teststrecke

6.2.7 Tau- und Reifbildung

Aufgrund der guten Ergebnisse bei der Interpolation der Gras-Temperatur T5 und des Taupunktes Td auf die Teststrecke, wurde die Kombination dieser Grössen auch dazu verwendet, die Bildung von Tau und Reif darzustellen. Sinkt die Gras-Temperatur T5 durch die nächtliche Ausstrahlung unter den Taupunkt, sind die Bedingungen für das Kondensieren der Luftfeuchtigkeit gegeben. Bei Gras-Temperaturen über dem Gefrierpunkt bildet sich Tau, darunter Reif. Je tiefer die Gras-Temperatur unter den Taupunkt sinkt, desto grösser ist die abgeschiedene Wassermenge.

Die erhaltenen Resultate sind erfreulicherweise konsistent mit anderen ANETZ-Messwerten wie z.B. dem Niederschlag. Taubildung wird nur nachts und in niederschlagsfreien Gebieten angezeigt. Eine Validierung mit einer unabhängigen Datenquelle wurde in diesem Fall nicht vorgenommen.

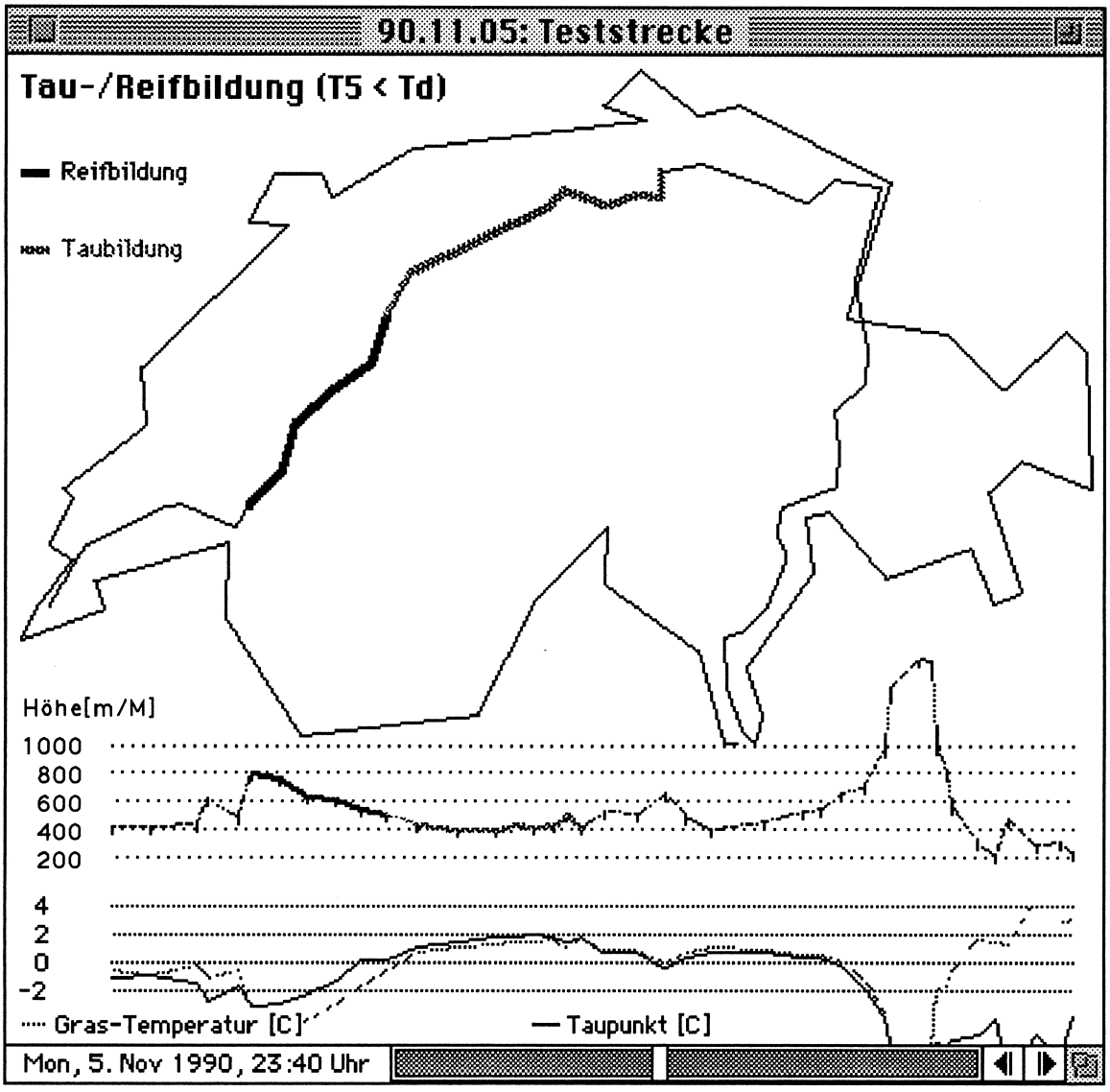


Fig. 19 Darstellung der Tau- und Reifbildung entlang der Teststrecke.

Aus der untersten Darstellung ist das Mass der Taupunktsunterschreitung durch die Gras-Temperatur ersichtlich.

6.2.8 Föhnlage

Das folgende Beispiel zeigt eine Föhnlage, wie sie vom ANETZ erfasst wird und wie sie sich auf der Teststrecke niederschlagsmässig darstellt. Besonders interessant ist in diesem Fall die San Bernadino Strecke.

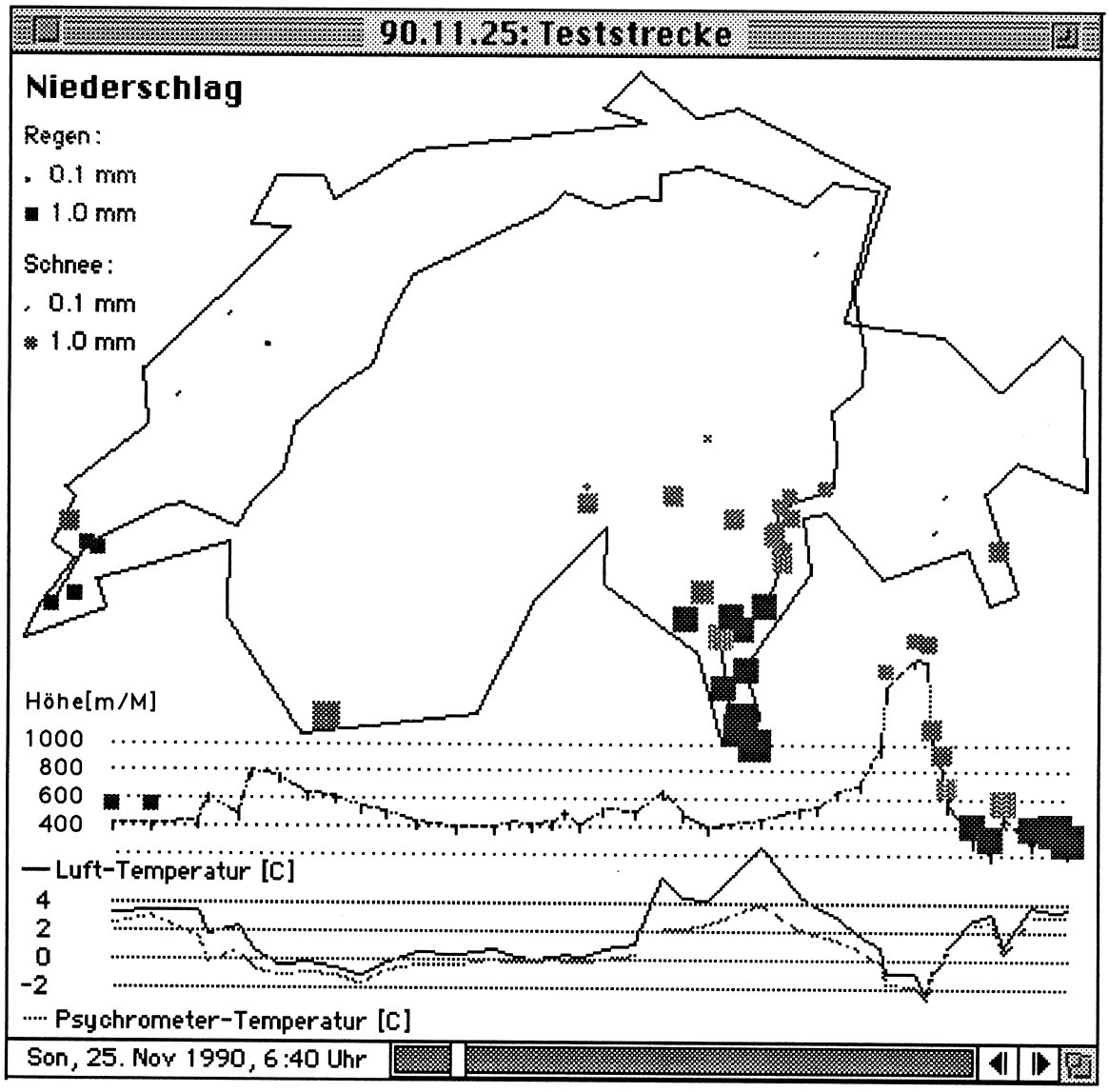


Fig. 20 Föhnlage mit Föhndurchbruch im Rheintal (Vaduz) und in St. Gallen.

Im Föhngebiet ist die Luft relativ trocken (unterste Darstellung, grosse Differenz zwischen Luft- und Psychrometer-Temperatur). Die Niederschläge auf der Alpensüdseite und in der Westschweiz fallen in den tieferen Lagen als Regen, die Schneefallgrenze liegt im Tessin bei ca. 600 m/M.

7. Verwendung nicht genutzter und möglicher neuer Daten des ANETZes

Im ANETZ werden Messgrössen einzelner Sensoren noch wenig oder gar nicht verwendet, die für die Weiterentwicklung der Strassenwetterprognose interessant sein können.

7.1 Nächtliche Abstrahlung und Strassenoberflächentemperatur

Die Strassenoberflächentemperatur ist wohl die wichtigste Grösse für die Beurteilung der Eisbildung. Die Kenntnis der nächtlichen Abstrahlung ist deshalb eine besonders wichtige Information. Sie wird in den heute angewandten Methoden aus der Differenz der Lufttemperatur in 2m und der sogenannten Grastemperatur in 5cm Höhe beurteilt. Bei Abstrahlung ist die 5cm-Temperatur tiefer. Am Grasthermometer stellt sich eine Temperatur ein, die sich aus der Abstrahlungsabkühlung sowie Wärmeübergängen zur Umgebungsluft bildet. Der Sensor misst somit eine Grösse, die sowohl von der Abstrahlung des Erdbodens unter dem Thermometer als auch von der Abstrahlung des Thermometers sowie dem Einfluss der Umgebungsluft und ihrer Bewegung gebildet wird.

Im ANETZ könnten Informationen über die Abstrahlung auch aus den Messwerten des Photometers gewonnen werden. Dieser Sensor ist an jeder Station vorhanden. Er misst die Helligkeit des Himmelslichtes zwischen voller Sonnenstrahlung und Sternenlicht. Aus der Intensität des nächtlichen Himmelslichtes kann auf die Bewölkung und damit auf die Abstrahlung des Erdbodens geschlossen werden. Die Anwendung der Daten ist nicht einfach, da die Mondphasen und die lokalen Restlichtverhältnisse beachtet werden müssen.

Auch das Thermohygrometer THYGAN, mit dem die Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur an jeder ANETZ-Station gemessen werden, könnte evtl. für die Berechnung der Strassenoberflächentemperatur verwendet werden. Da sich das Gehäuse des Gerätes mit einer sorgfältig gesteuerten Gehäuseheizung selbst "pflegt", d.h. seine Oberfläche schnee- und eisfrei hält, kann die Gehäusetemperatur (die im ANETZ mit einer Auflösung von 1°C zur Verfügung steht) für diese Auswertung benützt werden. Versuche haben gezeigt, dass bei ausgeschalteter Heizung die Abstrahlung an der Gehäusetemperatur gut erkennbar ist.

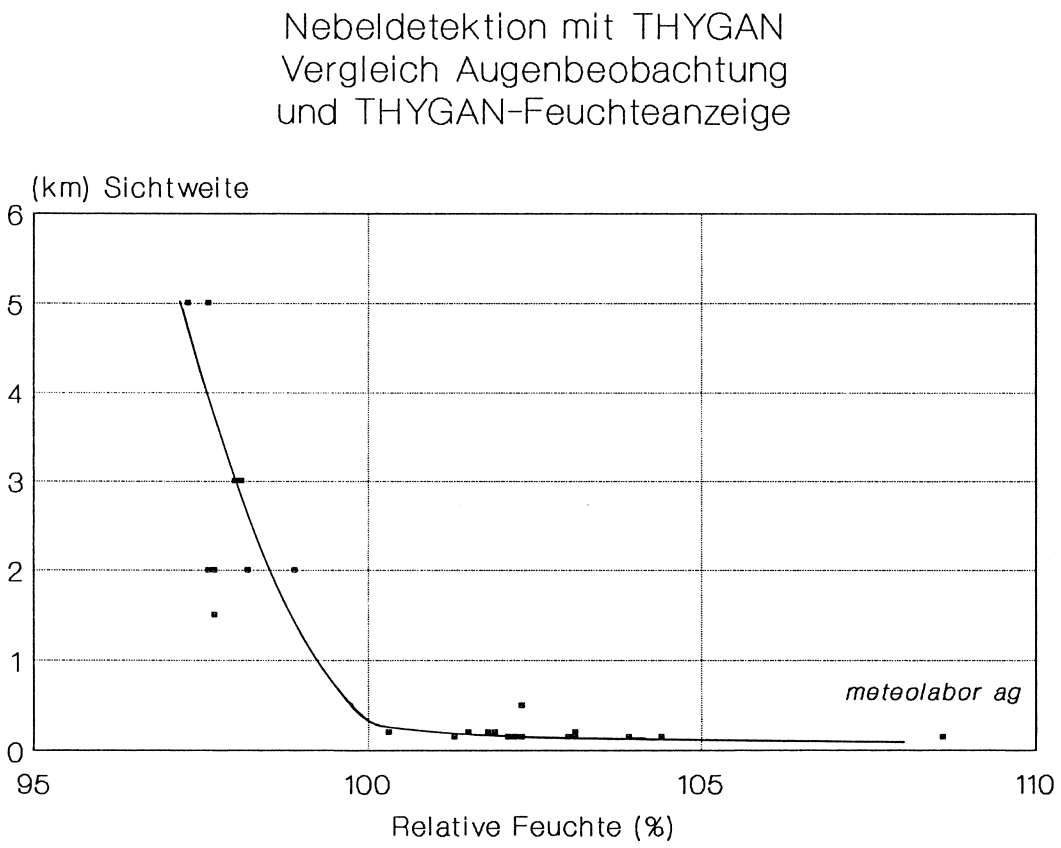
7.2 Nebel

Reifbildung

Die Nebelbildung ist im Zusammenhang mit der Reifbildung und für die Beurteilung der Sichtweite von Interesse. Sie kann aus den ANETZ-Daten des Thermohygrometers THYGAN gut erkannt werden. THYGAN zeigt im Nebel eine Luftfeuchtigkeit von mehr als 100%. Dieses eigenartige Verhalten entsteht dadurch, dass die vom eingebauten Ventilator angesaugte Luftprobe am geheizten Gehäuse erwärmt wird und dabei Wassertröpfchen verdampfen. Die vom Taupunktspiegel des Sensors gemessene Taupunkttemperatur liegt in diesen Fällen höher als die Lufttemperatur der (ungeheizten) Luftprobe, so dass die berechnete relative Feuchtigkeit grösser als 100% wird. Die mit dieser Methode direkt gemessene Menge des flüssigen Wassers in der Luft erlaubt zusammen mit der Oberflächentemperatur eine gute Beurteilung der Reifbildung auf der Strasse.

Sichtverhältnisse

An der Wetterstation von Meteolabor in Wetzikon wurden Beobachtungen gemacht, um den quantitativen Zusammenhang von Sichtweite und angezeigter relativer Feuchtigkeit zu finden.



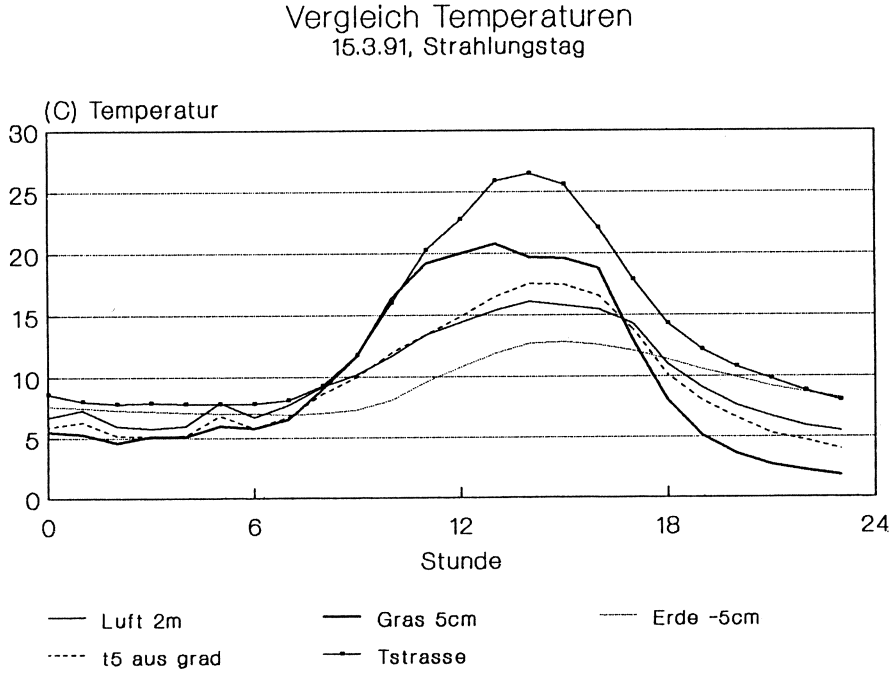
.

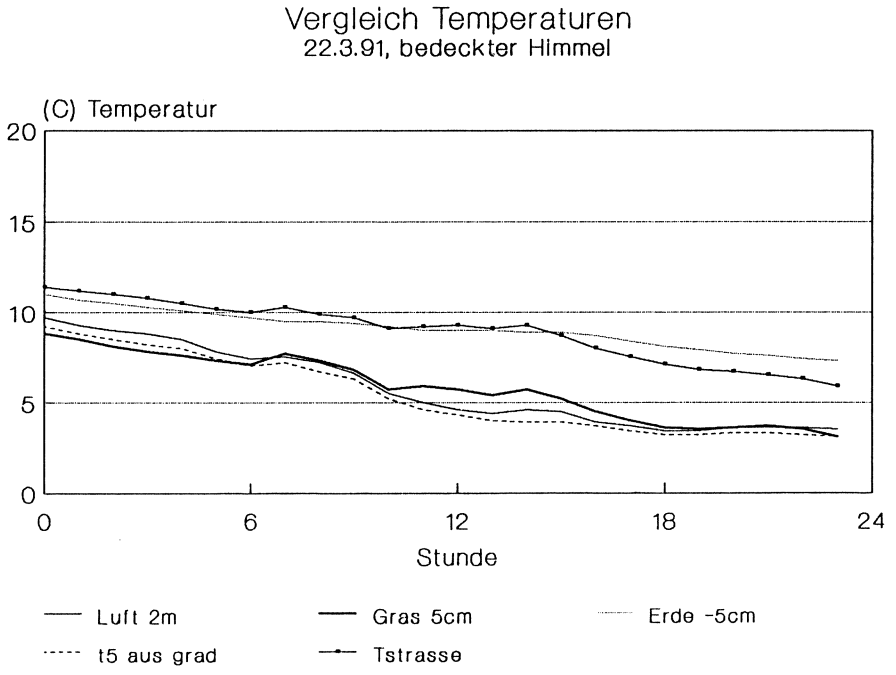
Die Darstellung zeigt eine gute Uebereinstimmung der angezeigten Feuchtewerte von mehr als 100% mit einer stark reduzierten Sichtweite. Da die Sichtweite nicht direkt mit einem optischen Verfahren gemessen wird, dürfte es nicht einfach sein, einen genauen Zusammenhang zur Feuchteanzeige zu finden. Anderseits ist die Selektivität des Zusammenhanges so gut, dass die THYGAN-Feuchte im praktischen Einsatz eine eindeutige Information über die Sichtweitenreduktion gibt.

Weitere Vorteile des THYGANs als Nebeldetektor im Vergleich zu einer Aufrüstung des Netzes mit speziellen Sichtweitemessgeräten sind vor allem die hohe Verfügbarkeit der Daten und das günstige Kosten/Nutzen-Verhältnis. Letzteres deshalb, weil THYGAN als kombinierter Sensor die Lufttemperatur, die Feuchtigkeit und den Nebel erfassen kann.

7.3 Temperaturgradientenmessung

Die für verschieden Auswertungen verwendete Wetterstation KLIMET am Standort der Firma Meteolabor AG ist mit Gradiententhermometern ausgerüstet, welche die Lufttemperaturunterschiede zwischen 2m und 50cm sowie zwischen 50cm und 5cm Höhe messen. Da die Sensoren selbst sehr wenig strahlungsempfindlich sind, ist die gemessene Grösse für die Lufttemperaturunterschiede gut repräsentiv. Diese Messwerte sind eine Ergänzung zur klassischen Auswertung der Differenz der Lufttemperatur in 2m und der Grastemperatur in 5cm Höhe.





Die beiden graphischen Darstellungen zeigen die Temperaturverhältnisse an einem Strahlungstag (15.3.91) und an einem Tag mit bedecktem Himmel (22.3.91). Dargestellt sind fünf Temperaturen:

1. Luft 2m	Lufttemperatur ab THYGAN in 2m Höhe
2. Gras 5cm	Temperatur des Grasthermometers in 5cm Höhe
3. Erde -5cm	Erdtemperatur in 5cm Tiefe
4. T5 aus grad	Die aus der THYGAN-Temperatur und den Gradiententhermometern berechnete 5cm-Temperatur
5. Strasse	Oberflächentemperatur der Strasse mit Asphaltbelag 20 Meter neben dem Messfeld

Die mit Hilfe der Gradiententhermometer berechneten 5cm-Temperaturwerte T5g weichen in Strahlungssituationen recht erheblich von den klassischen Grastemperaturen T5 ab. Die Grasthermometertemperatur reagiert stärker auf die Strahlung als die Temperatur T5g. Da das klassische Grasthermometer relativ stark auf die Strahlung reagiert, stellt sein Messwert eine Grösse dar, die nur zum Teil die Lufttemperatur in 5cm Höhe repräsentiert. Im Gegensatz dazu erfasst das Gradientenverfahren die 5cm-Temperatur genauer. Insbesondere beeinflusst beim klassischen Grasthermometer die Sensoroberfläche in hohem Masse den Messwert.

An den beiden Beobachtungstagen stimmen die Erdtemperaturen in 5cm Tiefe und die Strassenoberflächentemperatur in der Nacht gut überein. Dies ist nicht immer so, z.B. wenn Schnee auf dem Messfeld liegt ist die Erdtemperatur meistens um null Grad.

8. Schlussbetrachtungen

8.1 Aufbereitung von ANETZ-Messwerten

Aus den gemachten Versuchen geht hervor, dass ANETZ-Daten für die Unterstützung des Strassen-Winterdienstes durchaus sinnvoll aufbereitet werden können.

Primär geht aus den ANETZ-Messwerten die aktuelle Lage hervor. ANETZ-Messwerte lassen sich auf das Nationalstrassennetz umrechnen und erlauben dort aktuelle, strassenunterhaltsspezifische Aussagen wie Niederschlagsform, Reifbildung und Vereisungsmöglichkeit. Die grafische Darstellung solcher Aussagen auf dem Strassennetz liefert einen unmittelbaren Überblick über die aktuelle Lage und kritische Strassenabschnitte.

Die Animation der verschiedenen Darstellungen zeigt die Entwicklung bis zur aktuellen Lage und reiht sich damit in die Kategorie von Hilfsmitteln ein wie die Animation von Wetterradar- und Satellitenbildern. Zur Prognosekontrolle - beispielsweise bei unsicheren, kritischen Lagen - eignet sie sich sehr gut und könnte für die Auslösung kurzfristiger Alarme an die Unterhaltsdienste benützt werden. In der gegenwärtigen Form der Aufbereitung von ANETZ-Messwerten sind keine prognostischen Elemente enthalten.

8.2 Prognosen aus ANETZ-Messwerten

Zeitliche Extrapolationen aus den ANETZ-Daten sind für gewisse Wetterlagen möglich, wie zum Beispiel die empirischen Gefriertabellen nass bwz. trocken (Keller, 1985) zeigen. Die Bedeutung des ANETZ für prognostische Zwecke liegt in der Beschaffung von *regionalen Grunddaten* für die Prognose von Vorgängen wie z.B.
- die strahlungsbedingte Abkühlung in der Nacht oder
- das Trocknen von Strassenoberflächen nach Niederschlägen.

Die Erarbeitung von Prognosehilfen durch die Untersuchung von vergangenen Wetterlagen kann auf verschiedene Arten erfolgen:
- phänomenologische Untersuchungen statistischer Art
- klassische Modellierung
- Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI)

Die Gefriertabellen und die vorliegende Arbeit gehören in die erste Kategorie. In die zweite Kategorie fällt die Erarbeitung numerischer Modelle, bei denen Prozesse mathematisch formuliert und die entsprechenden Gleichungen numerisch gelöst werden. Beim dritten Ansatz wird eine Maschine eingesetzt, um aus verknüpften Datensätzen Regeln abzuleiten, die zwischen den Datensätzen gelten. Durch die Bearbeitung von zeitlich verschobenen Datensätzen mit KI-Methoden können auch Prognoseregeln generiert werden.

Bei der Anwendung von KI-Methoden sind keine a priori Kenntnisse der Prozesse nötig, die Regeln werden durch die Maschine aus den Daten abgeleitet. Mit meteorologischen Datensätzen sind auf diese Weise schon beachtliche Resultate erzielt worden - insbesondere was Voraussagen angeht. Beispiele sind die Klassifizierung der Lawinengefährdung aufgrund von Meteo-Daten, die Klassifizierung der Windrichtung aufgrund von lufthygienischen Messungen und die Voraussage der Entwicklung von Gewitterzellen aus Radardaten.

Die Verknüpfung von ANETZ-Daten mit der Statistik über Verkehrsunfälle, wie sie in dieser Arbeit phänomenologisch angegangen wurde, eignet sich auch zur Bearbeitung mit KI-Methoden, wobei ANETZ-seitig gleich zusätzliche Grössen wie Wind und Luftdruck einbezogen werden müssten. Ziel einer solchen Bearbeitung wäre z.B. die Generierung von Prognoseregeln für den Strassenzustand in der Nacht aufgrund von ANETZ-Messwerten am Nachmittag.

8.3 Ansätze für einen Strassen-Wetterdienst aus heutiger Sicht

Spezialisierte Wetterprognosen für den Strassen-Unterhaltsdienst müssen regionalisiert (Abschnitte von rund 40 km Länge mit z.T. markanten Höhendifferenzen) erarbeitet werden, da die Unterhaltsdienste entsprechend organisiert sind. Das Interesse konzentriert sich auf notwendige Schneeräumungs- und Streueinsätze. Das Strassennetz wird von 6 bis19 Uhr am intensivsten benützt. Tagsüber ist das Personal der Unterhaltsstellen im Dienst und kann rasch auf Veränderungen der Wetterlage reagieren. Das Bedürfnis nach Prognosen ist am grössten für den späten Nachmittag (Dienstende) und die Nacht, wenn Einsätze ausserhalb der Dienstzeiten erfolgen müssen.

Die Erarbeitung von standardisierten, regionalisierten Prognosen mit entsprechenden Bereitschaftsgraden für die Werkhöfe wird sinnvollerweise in einer Zentrale vorgenommen und von dort automatisch an die einzelnen Werkhöfe übermittelt. Eine solche Prognose wird immer von synoptischen Prognosekarten ausgehen müssen. Numerische Modelle, z.B. für die Auswirkungen der nächtlichen Ausstrahlung, können für die Regionalisierung dieser Prognose herangezogen werden.

Das Auslösen von Unterhalts-Einsätzen ausserhalb der Dienstzeit ist ein wichtiger Punkt, auf den sich ein Strassen-Wetterdienst ausrichten muss. Ein zentral betriebenes, automatisches Informationssystem kann den Werkhöfen bei Bedarf weitere Entscheidungsgrundlagen liefern (z.B. die Darstellung der aktuellen Bereitschaftsgrade oder der aktuellen Niederschläge auf dem ganzen Nationalstrassennetz) und sie bei der Auslösung eines Einsatzes unterstützen.

Als Ergänzung zu den automatisierbaren Informationsübertragungen sollte eine persönliche Beratung der Werkhöfe durch die Zentrale bei Bedarf ebenfalls möglich sein. Diese kurzfristige Beratung müsste durch meteorologisch ausgebildetes Personal mit Zugriff auf aktuelle Daten (synoptische Prognosekarten, Satellitenbild, Wetterradar, ANETZ-Messwerte, Stationsmeldungen in den Nachbarländern) geboten werden, das mit diesen Hilfsmitteln laufend Prognosekontrollen - speziell des Strassenzustandes - durchführt und über Abweichungen von den Prognosen Auskunft geben kann.

Mit dem SWIS ist ein Konzept in Erprobung, das einige dieser Ansätze enthält.

8.4 Ansätze für weitere Arbeiten

a) Weiterentwicklung eines eindimensionalen numerischen Konvektionsmodells, das heute die tägliche Aufheizung der atmosphärischen Grundschicht berechnet, auf Nachtbetrieb. Damit liesse sich der Einfluss der *nächtlichen Ausstrahlung* auf die vertikalen Profile von Lufttemperatur und -feuchte berechnen. Als wesentlichen Punkt berücksichtigt das Modell die *regionale* Topographie (Höhenverteilung) und würde die Bildung von Kaltluftseen in Becken- und Tallagen simulieren. Das weiterentwickelte Modell wäre im Hinblick auf die regionalisierte Prognose von *Nebelbildung* und *-auflösung* von grossem Interesse und würde auch ausstrahlungsbedingte *Gefrierpunktsunterschreitungen* am Boden anzeigen.

b) Bestimmung der Parameter, die den Trocknungsvorgang einer nassen Strasse beeinflussen. Die Zielsetzung wäre, bei Gefrierpunktunterschreitungen nach Niederschlägen abschätzen zu können, ob die Strassenoberfläche überhaupt nass ist.

c) Anwendung von KI-Methoden auf ANETZ-Daten und die Unfallstatistik, um Prognoseregeln für den Strassenzustand abzuleiten. Das Interessante an den bisherigen Anwendung von KI im Bereich der Meteorologie ist, dass die Prognosegüte mit zunehmender Prognosezeit langsamer abzunehmen scheint als mit herkömmlichen Methoden. Brauchbare Prognoseregeln für den Strassenzustand könnten auf dem Nationalstrassennetz grafisch dargestellt werden.

d) Einbettung der entwickelten Darstellungen von ANETZ-Messwerten in einen operationellen Betrieb mit real-time Messwerten und Erweiterung der Darstellungsformen (z.B. Emagrammdarstellung). Ein solches Hilfsmittel wäre für einen aktuellen Beratungsdienst nützlich, da es einen raschen Überblick und genaue Einzeldaten liefern könnte.