



Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen

Prévision de gel et de brouillard pour les routes

Prediction of frost and fog for roads

Analysen & Konzepte, Winterthur

Dr. O. Liechti

**Forschungsauftrag VSS 2006/601 auf Antrag des
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière. Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen

Prévision de gel et de brouillard pour les routes

Prediction of frost and fog for roads

Analysen & Konzepte, Winterthur

Dr. O. Liechti

**Forschungsauftrag VSS 2006/601 auf Antrag der
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Oktober 2010

1327

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Olivier Liechti

Federführende Fachkommission

Fachkommission 6: Umwelt und Betrieb

Begleitkommission

Präsident
Vögeli Fridolin
Mitglieder
Boutellier Jean-Pierre
Cypra Thorsten
Gillardin Anne
Hutter Gerald
Mathis Peter
Rodriguez Margarita
Rösti Martin
Wagner Jeannot
Zaugg Werner

Antragsteller

Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	2
	Zusammenfassung	5
	Résumé	6
	Summary	7
	Verdankungen	8
1	Verfahren für die kurzfristige Lokalvorhersage	9
1.1	Nowcasting und numerische Wettermodelle	9
1.2	Vorhersagen für die bodennahe Atmosphäre.....	10
1.3	Erweiterung der Kaskade von Vorhersagemodellen	10
1.4	Das topographische Grenzschichtmodell TGM.....	10
1.5	Ankopplung des TGM an ein übergeordnetes Modell	11
1.6	Assimilation von lokalen Beobachtungen	11
2	Konfiguration des TGM für das Einzugsgebiet der Glatt (ZH)	13
2.1	Vorhersagegebiete.....	13
2.2	Selektion von COSMO-2 Gitterpunkten.....	14
2.3	Stationsmesswerte aus dem DataWareHouse.....	14
2.4	Experimentalperiode	15
2.5	Anpassung des TGM an die Eingangsdaten	15
2.6	Initialisierung und Advektion mit stündlichen COSMO-2 Vertikalprofilen	15
2.7	Assimilation von Messwerten aus SwissNet, SMART und Strassenstationen.....	16
2.8	Kadenz und Verfügbarkeit der TGM Läufe.....	16
3	TGM Simulator	17
3.1	TGM Läufe	17
3.2	Visualisierung von Stationsmessungen.....	18
3.3	Identifikation von Nächten mit Sichtreduktionen.....	18
4	Parametrisierung und Kalibrierung subskaliger Prozesse	19
4.1	Langwelliger Strahlungstransfer	19
4.2	Tau deposition und Kondensation an Aerosolen.....	19
4.3	Sedimentation	20
4.4	Sichtweitenberechnung.....	21
4.5	Kalibrierungsperiode 17.-21. Oktober 2008.....	21
4.6	TGM Simulation der Nacht vom 19./20. Oktober 2008.....	22
5	Nebelvorhersage	23
5.1	Simulation von Nächten mit Sichtreduktionen	23
5.1.1	Windstille Strahlungsnacht mit starker Sichtreduktion (12./13. Oktober 2008)	23
5.1.2	Windstille Strahlungsnacht mit leichter Sichtreduktion (11./12. Oktober 2008).....	25
5.1.3	Umwandlung des Nebels zu tiefem Stratus (24./25. Oktober 2008)	26
5.1.4	Windige und bewölkte Nächte (29./30./31. Oktober 2008).....	27
5.1.5	Nebelbildung bei Inversionslage (31. Oktober/1./2./3. November 2008).....	27
5.1.6	Fortsetzung der Inversionslage (4./5./6. November)	29
5.1.7	Nächtliche Sichtreduktion nach konvektiven Tagen (7./8. November).....	32
5.2	Fazit der TGM - COSMO-2 Nebelsimulationen	34
6	Frost- und Bodenfrostvorhersage	35
6.1	Verifikation von Vorhersagen.....	35
6.2	Frost als Schwellwertunterschreitung.....	36
6.3	Detektions- und Fehlalarmquote.....	37
6.4	ROC Diagramm	37
6.5	Güte als strenge Quote.....	39
6.6	Güte als wohlwollende Quote	41
6.7	Güte als Differenz	43
6.8	Verifikationstermine und Integrationszeit.....	44
6.9	Verifikation der Frostvorhersagen.....	45
6.10	Verifikation der Bodenfrostvorhersagen	51
7	Sensitivität der TGM Simulationen	55
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	57
8.1	Operationeller Betrieb, Ausweitung und qualitative Verbesserungen	57
8.2	Darstellung von Lokalvorhersagen	57
8.3	Aktuelle streckenbezogene Reisewettervorhersage	57

Abkürzungen	58
Literaturverzeichnis	59
Projektabschluss.....	60
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	62

Zusammenfassung

Die experimentelle Erweiterung der in Wetterdiensten operationellen Modellkaskade durch ein zweidimensionales Grenzschichtmodell für komplexe Topographie erfolgte mit der Zielsetzung, numerisch kurzfristige Lokalvorhersagen für Frost und Nebel zu erzeugen. Das topographische Grenzschichtmodell TGM wurde während einer halbjährigen Experimentalperiode für das hydrologische Einzugsgebiet der Glatt (ZH) an das bei MeteoSchweiz operationelle COSMO-2 Modell angekoppelt. Die dreistündige Kadenz der 24-stündigen COSMO-2 Läufe wurde mit dem Grenzschichtmodell unter Assimilation von lokalen Messungen auf eine einstündige Kadenz erhöht.

Die im topographischen Grenzschichtmodell für die nächtliche Abkühlung berücksichtigten subskaligen Prozesse wurden während einer fünftägigen Periode mit unterschiedlichen Wetter- und Sichtbedingungen geeicht. Simulationen von weiteren Nächten mit Sichtreduktionen wurden mit den gemessenen Stationswerten von Sicht, Strahlung und Temperatur am Flughafen Zürich verifiziert. Die Verifikation dokumentierte eine beachtliche Qualität und Detailtreue bei der Simulation von nächtlichen Grenzschichten mit unterschiedlich starken Sichtreduktionen durch strahlungsbedingt gebildeten bodennahen Dunst und Nebel. Die relevanten subskaligen Prozesse sind im topographischen Grenzschichtmodell enthalten und konnten praxistauglich kalibriert werden.

Nächte nach tagsüber konvektiv gut durchmischten Grenzschichten wurden am besten und konsistent simuliert. Extrem stabile Inversionslagen mit tagsüber persistentem tiefem Stratus oder starkem Dunst in der kaum konvektiven Grenzschicht wurden etwas weniger konsistent simuliert. Die Sensitivität der Simulationen auf das übergeordnete Modell und auf die Assimilation von lokalen Messungen kamen zum Ausdruck und zeigten Verbesserungsbedarf beim Assimilationsverfahren und bei der Ankopplung auf, um bei gewissen Wetterlagen stabilere Sequenzen von Modellläufen zu erhalten. Die Transmission kurzwelliger Strahlung durch Nebel und tiefen Stratus muss künftig im Grenzschichtmodell intern parametrisiert und kalibriert werden, da die Nebelauflösung nach Sonnenaufgang mit der verwendeten Strahlung des COSMO-2 systematisch zu früh erfolgte.

Die Verifikation der Schwellwertvorhersagen für Frost und Bodenfrost über die Experimentalperiode zeigt, dass sich die Lufttemperatur etwas besser vorhersagen lässt als die Oberflächentemperatur. Die Assimilation von lokalen Stationsmesswerten durch das TGM wirkt sich über mehrere Stunden positiv auf die Vorhersagegüte der Lufttemperatur aus - speziell für die letzten Nachtstunden. Die Oberflächentemperatur wird durch das TGM auch ohne Assimilation über den gesamten Vorhersagehorizont von 22 Stunden besser vorhergesagt als durch COSMO-2.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes erzielte Qualität in der Modellierung und Vorhersage von nächtlichen Grenzschichten ist bemerkenswert. Mit den genannten Ergänzungen legt dies den Einsatz des topographischen Grenzschichtmodelles im Wetterdienst zur lokalen Vorhersage von Sichteinschränkungen und Frost an Flughäfen und für Strassen nahe.

Résumé

Une chaîne opérationnelle de modèles numériques pour la prévision météorologique a été étendue avec un modèle de couche limite bidimensionnel pour topographie complexe, afin de produire des prévisions de gel et de brouillard locales et à court terme. Pour une période expérimentale de six mois le modèle de couche limite TGM a été couplée au modèle COSMO-2 de MétéoSuisse pour le bassin versant de la rivière Glatt (ZH, Suisse). La cadence de trois heures du modèle COSMO-2 a été augmentée à une heure pour le modèle de couche limite TGM qui assimile des observations locales.

Dans le modèle de couche limite pour topographie complexe TGM les processus qui dominent le refroidissement nocturne ont été ajustés avec une période de cinq jours comprenant une variété de conditions météorologiques et de visibilité. Les simulations d'autres nuits à visibilité réduite ont été vérifiées avec la visibilité, le rayonnement et la température observés à l'aéroport de Zurich. Les vérifications documentent une qualité et un niveau de sophistication remarquables dans les simulations de couches limites nocturnes, ceci pour une variété de réductions de visibilité par brume et brouillard radiatif. Les processus appropriés sont inclus dans le modèle couche limite pour topographie complexe TGM et ont été ajustés pour la mise en pratique.

Les nuits après des jours menant à une couche limite bien mélangée par la convection ont été simulées plus précisément et de manière cohérente. Les cas d'inversion marquée à un niveau bas produisant un stratus, soit persistant ou se dissipant à peine pendant la journée, ont été simulés de façon moins cohérente. Une sensibilité des simulations aux forçages externes et aux observations locales assimilées a été démontrée et indique une nécessité d'affiner à la fois le couplage au modèle extérieur et la procédure d'assimilation en vue d'obtenir des séquences de simulations plus stables dans les cas de stratus bas. La transmission du rayonnement solaire par stratus bas, brouillard et brume doit être mise en œuvre dans le modèle de couche limite TGM, car la dissipation du brouillard s'est produite systématiquement trop rapidement lors de l'utilisation de la transmission du modèle COSMO-2.

La vérification des prévisions de gel pendant la période expérimentale démontre que la prévisibilité de la température est meilleure que celle de la température de la surface. L'assimilation d'observations locales par le modèle TGM améliore le prévision de la température sur plusieurs heures – en particulier pour la fin de la nuit. La température de la surface est mieux prévue par TGM que par COSMO-2 sur toute la portée de 22 h de la prévision bien que ce paramètre ne soit pas assimilé.

La qualité des simulations obtenues pour la couche limite nocturne est remarquable. Avec les raffinements mentionnés le modèle de couche limite pour topographie complexe TGM peut être proposé pour des prévisions locales de visibilité réduite et de gel pour les aéroports et les routes.

Summary

An operational chain of nested numerical weather prediction models has been extended with a two dimensional boundary layer model in order to produce short-term and local predictions of frost and fog. For an experimental period of six months the topographical boundary layer model TGM has been coupled to the operational COSMO-2 model of MeteoSwiss for the hydrological catchment of the Glatt river (ZH, Switzerland). The three hourly COSMO-2 runs have been completed by one hourly runs of the boundary layer model TGM which assimilates local observations.

In the topographical boundary layer model the subscale processes governing the nocturnal cooling have been tuned for a five day period with a variety of weather and visibility conditions. Simulations of other nights with reduced visibility have been verified with visibility, radiation, and air and surface temperature observed at Zurich airport. The verifications documented a remarkable quality and level of sophistication in the simulations of nocturnal boundary layers for a variety of visibility reductions by radiative mist and fog. The relevant subscale processes are included in the topographical boundary layer model and have been tuned for practical application.

Nights after days with well mixed convective boundary layers have been simulated most precisely and consistently. Cases of marked low-level inversions with stratus, either persisting or hardly dissipating during the day, have been simulated less consistently. A sensitivity of the simulations to the external forcing and the assimilated local observations has been demonstrated and shows a need for refining both the coupling to the external model and the assimilation procedure in order to obtain more stable sequences of model runs in particular cases. The transmission of short wave radiation by low stratus, fog, and mist needs to be implemented in the topographical boundary layer model, as the dissipation of fog occurred systematically too rapidly when using the transmission of the COSMO-2 model.

Verifications of the threshold forecasts for frost and ground frost over the experimental period show that the forecasts of the air temperature are better than the ones of the surface temperature. The assimilation of local observations by TGM improves the air temperature forecasts during several hours – particularly for the end of the night period. The surface temperature prediction by TGM is better than by COSMO-2 during the entire forecast range of 22 hours although this parameter is not assimilated.

The quality of the obtained nocturnal boundary layer simulations is remarkable. With the mentioned refinements the topographical boundary layer model TGM can be suggested for local predictions of reduced visibility and frost for airports and roads.

Verdankungen

MeteoSchweiz stellte für den Winter 2008/09 operationell vorhergesagte Vertikalprofile an fünf Gitterpunkten des COSMO-2 Modelles für dieses Forschungsprojekt zur Verfügung. Ferner wurden aus dem DataWareHouse von MeteoSchweiz Stationsmesswerte (SwissNet-Stationen, SMART-Stationen und Strassenwetter-Stationen des Kantons Zürich) bereitgestellt.

Die Baudirektion des Kantons Zürich (Tiefbauamt) erteilte für diese Forschungsarbeit die Bewilligung zur kostenlosen Nutzung der kantonalen Stationsmesswerte. MeteoSchweiz stellte die Daten aus dem operationellen COSMO-2 Modellbetrieb für dieses Forschungsprojekt zu den Installations-, Wartungs- und Übermittlungskosten zur Verfügung.

Die Bereitstellung der meteorologischen Daten wurde persönlich unterstützt durch

- Urs Keller MeteoSchweiz, Prozess Wetter
- Hans Romang MeteoSchweiz, Prozess Wetter
- Philippe Steiner MeteoSchweiz, Prozess Modelle
- François Schubiger MeteoSchweiz, Prozess Modelle
- Emanuele Zala MeteoSchweiz, Prozess Modelle
- Christian Häberli MeteoSchweiz, Prozess Daten
- Marc Musa MeteoSchweiz, Prozess Daten
- Urs Egger Kanton Zürich, Baudirektion

Ich bedanke mich an dieser Stelle bei den beteiligten Institutionen und Personen.

Olivier Liechti

1 Verfahren für die kurzfristige Lokalvorhersage

1.1 Nowcasting und numerische Wettermodelle

Der Vorhersagebereich von einigen wenigen Stunden umfasst den Übergangsbereich vom Nowcasting zur kurzfristigen, numerischen Wettervorhersage [Crook, 2005]. Als Nowcasting wird hier die zeitliche Extrapolation von annähernd kontinuierlichen Fernerkundungen wie Satelliten- und Radarfilmen sowie von kontinuierlichen in situ Beobachtungen in einem meteorologischen Stationsnetz bezeichnet. Die numerische Wettervorhersage beruht auf der Assimilation von Beobachtungen in ein numerisches Modell der Atmosphäre und der anschliessenden Berechnung der zeitlichen Entwicklung des Modelles unter Berücksichtigung physikalischer Prozesse.

Der für die numerische Wettermodellierung notwendige Rechenaufwand wird durch die Anzahl der Modellgitterpunkte, die Anzahl der prognostischen Modellvariablen (Temperatur, Feuchte, Druck, Wind) und durch die Komplexität der erfassten physikalischen Prozesse bestimmt, die die Modellvariablen verändern. Die zeitliche Entwicklung eines numerischen Wettermodelles liegt selbst mit den leistungsstärksten Rechnern erst nach einer minimalen Rechenzeit vor. In der Praxis liegen diese Rechenzeiten für Kurzfristvorhersagen im Bereich von zwei und mehr Stunden, in denen die Nowcasting-Vorhersageverfahren zur Anwendung kommen. Deren Güte nimmt mit der Vorhersagedauer ab. Die Vorhersagegüte von numerischen Wettermodellen (NWP) dagegen steigt zu Beginn der Vorhersageperiode an, erreicht nach einer gewissen Zeit ein Maximum und fällt anschließend ab. Der Übergangsbereich zwischen den beiden Vorhersageverfahren besteht aus einer Periode mit reduzierter Vorhersagegüte.

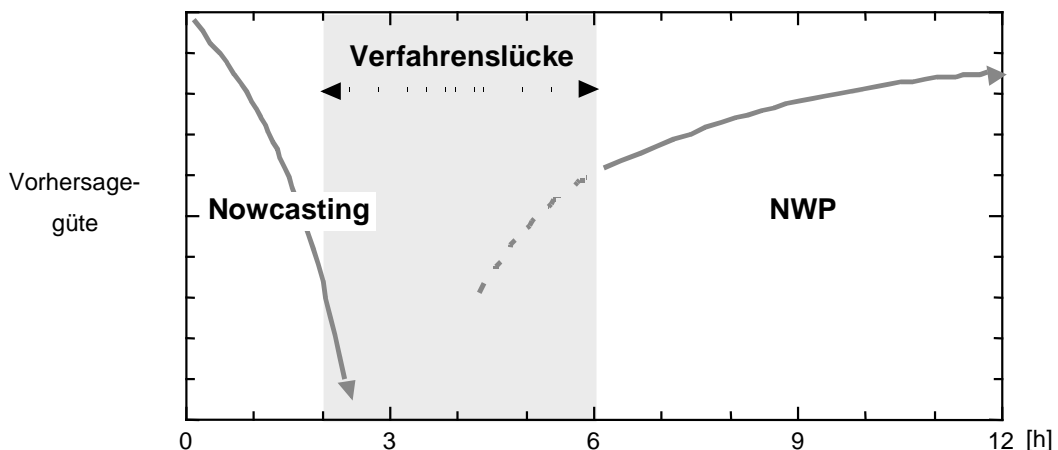


Abb. 1.1 Zeithorizont und Güte von Vorhersageverfahren

Der Vorhersagehorizont eines numerischen Modelles wird neben der langfristig abnehmenden Vorhersagegüte auch durch die Option eines neuen Modelllaufes beschränkt, wenn neue Beobachtungen vorliegen. Ein Praxisbeispiel: das hochaufgelöste COSMO-2 Modell von MeteoSchweiz wird alle 3 Stunden unter Assimilation aktueller Messwerte neu gestartet. Die 24-stündige Vorhersage des Modelles liegt gut anderthalb Stunden nach dem Modellstart vor.

Um diese Modelllaufzeit und Vorhersagekadenz zu erreichen, müssen Einschränkungen bei der Modellarchitektur gemacht werden. Bei einer gegebenen Auflösung des Modellgitters werden subskalige Prozesse (z.B. Strahlung, skaliger und konvektiver Niederschlag, Tröpfchengrösse in Wolken, Bildung und Auflösung von Wolken, turbulente Flüsse von Wärme und Feuchte zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre, Oberflächenstruktur, Bodenprozesse, Mächtigkeit und Temperatur von vereisten Meeresoberflächen, Seewassertemperaturen) an jedem Gitterpunkt parametrisiert [WMO, 2009].

In diesem Projekt wird versucht, die Vorhersagegüte im Übergangsbereich vom Nowcasting zur numerischen Vorhersage durch folgende Ansätze zu verbessern:

- Selektive Erweiterung der Modellkaskade unter vertikaler Verfeinerung und horizontaler Reduktion der Auflösung
- Erhöhte Vorhersagekadenz unter Assimilation von aktuellen Beobachtungen

Die selektiv verfeinerte Modellierung soll einerseits subskalige Prozesse *vertikal* und zeitlich in *höherer* Auflösung erfassen und andererseits die grösseräumigen Einflüsse aus übergeordneten Modellen *horizontal* und zeitlich in *reduzierter* Auflösung übernehmen.

1.2 Vorhersagen für die bodennahe Atmosphäre

Frost und Nebel treten an der Grenzfläche zwischen Erde und Atmosphäre auf. Ihre Erfassung durch die numerische Modellierung ist in der Praxis der Wettervorhersage noch verbesserungswürdig [COST, 2008] [Baer, 2009] [Malardel, 2009]. Diese Phänomene der bodennahen Atmosphäre werden in den Modellen in der Regel durch subskalige physikalische Prozesse gesteuert und sie sind somit weitgehend parametrisiert. Nowcasting-Verfahren sind bei Sichteinschränkungen durch Nebel vorwiegend auf die Diagnose limitiert. Die Vorhersage von Nebelbildung und -auflösung wird auch mit statistischen und klimatologischen Methoden angegangen [COST, 2008].

Tagsüber werden die bodennahen Luftschichten durch turbulente Flüsse von Wärme und Feuchte aufgeheizt. In diesem Bereich konnte die numerische Vorhersage in der vergangenen Dekade durch vertikal besser aufgelöste numerische Modelle signifikant verbessert werden [WMO, 2009] [Liechti, 2007a] [Liechti, 2007b], in dem die Konvektion einschliesslich Wolkenbildung und -auflösung selbst über komplexer Topographie explizit modelliert wurden.

1.3 Erweiterung der Kaskade von Vorhersagemodellen

Operationelle numerische Wettervorhersagen werden durch eine Kaskade von Modellen berechnet [WMO, 2009]. Ein globales Modell (horizontale Maschenweite 25-60 km, Kadenz alle 12 h) erzeugt die Randbedingungen für ein regionales Modell (horizontale Maschenweite 5-10 km, Kadenz alle 6 h). Das regionale Modell wiederum erzeugt die Randbedingungen für ein lokales Modell (horizontale Maschenweite 2-4 km, Kadenz alle 3 h).

Diese Kaskade von Modellen wird in diesem Projekt durch ein zweidimensionales Modell erweitert: das topographische Grenzschichtmodell (TGM) [Liechti, 2004b]. Das TGM setzt bei der räumlichen Auflösung und der Parametrisierung der subskaligen Prozesse andere Schwerpunkte als das übergeordnete, lokale Modell.

1.4 Das topographische Grenzschichtmodell TGM

Das TGM weist in der Vertikalen eine hohe Auflösung von 10 m auf [Liechti, 2007c], um die nächtliche, bodennahe Abkühlung der Atmosphäre in genügender Auflösung erfassen zu können. Die horizontale Auflösung beträgt dagegen nur rund 10 km und ist damit geringer als beim übergeordneten, lokalen Modell. Die Oberflächenstruktur eines Vorhersagegebietes (Grössenordnung: 100 km² Gitterpunktumgebung) wird über die kumulative Flächen-Höhenverteilung mit der hohen vertikalen Auflösung von 10 m fein erfasst. Im TGM werden Temperatur, Feuchte, Wolkenwasser und der Bedeckungsgrad als prognostische Variablen geführt. Das vertikale Windprofil ist eine externe Grösse und wird aus dem übergeordneten Modell übernommen.

Die vertikale Divergenz des langwelligen Strahlungsstromes wird in zwei spektralen Kanälen (Treibhausgasstrahlung und Strahlung von kondensierten Oberflächen im atmosphärischen Fenster) in dieser hohen vertikalen Auflösung berechnet, wobei die Flächen-Höhenverteilung der Gitterpunktumgebung (Oberflächenstruktur) explizit berücksichtigt wird. Der langwellige Strahlungstransfer der Wolken im atmosphärischen Fenster berücksichtigt den Bedeckungsgrad und die spezifische Feuchte des Wolkenwassers schichtweise.

Die Bodenprozesse werden auf die Parametrisierung der wind- und strahlungsbilanzgesteuerten Skin-Temperatur reduziert, welche die nächtliche Auskühlung der bodennahen Luftschichten bestimmt. Die Tauabscheidung hängt vom Wind ab und wird bei geringen Windgeschwindigkeiten re-

duziert, um die bodennahe Nebelbildung zu ermöglichen. Bei Tag sind die vertikalen Flüsse der fühlbaren und latenten Wärme strahlungsbilanzgesteuert, ihr Verhältnis ist saisonal über die klimatologische, höhenabhängige Tagesmitteltemperatur mit dem Vegetationsstand parametrisiert.

Die fühlbaren und latenten Wärmeflüsse erzeugen in der bodennahen Schicht Luftpakete mit Auf- bzw. Abtrieb, die vertikal unter expliziter, schichtweiser Ein- und Ausmischung in ihre Gleichgewichtslage relaxieren können. In jeder Schicht wird der Bedeckungsgrad als prognostische Variable geführt, die auf vertikale Durchmischung, Kondensation, Evaporation, Tauabscheidung und Sedimentation reagiert.

Zusätzlich berechnet das TGM bei differentieller Erwärmung (bzw. Abkühlung) zwischen benachbarten Vorhersagegebieten entlang eines hydrologischen Einzugsgebietes (Tal) horizontale Massenflüsse (tagsüber: Brise/Talwind, nachts: Kaltluftabflüsse/Bergwind). Diese bodennahen, internen Massenflüsse des TGM können in windschwachen Lagen dominant sein.

1.5 Ankopplung des TGM an ein übergeordnetes Modell

Das TGM übernimmt vom übergeordneten, lokalen Modell stündlich das Vertikalprofil von Temperatur, Feuchten und Wind und skalare Grössen wie die Globalstrahlung als externe Randbedingungen.

Mit dem ersten extern vorgegebenen Vertikalprofil wird das TGM initialisiert. Während des anschliessenden TGM Modellaufes werden oberhalb der Topographie und der intern berechneten Grenzschichthöhe die externen Profilwerte für Temperatur, Feuchten und Wolkenwasser stündlich übernommen (Advektion). Unterhalb dieser Höhen werden Temperatur, Feuchte, Wolkenwasser und Bedeckungsgrad TGM intern berechnet. Das Windprofil wird vollständig vom übergeordneten Modell übernommen.

1.6 Assimilation von lokalen Beobachtungen

Liegen während eines TGM Modellaufes für das Vorhersagegebiet relevante Stationsbeobachtungen von Temperatur und Feuchte vor, werden diese durch das TGM assimiliert. Da die Laufzeit des TGM für 24 Stunden im Sekundenbereich liegt, kann die TGM Vorhersage mit grosser Kadenz aktualisiert werden, sobald neue Beobachtungen vorliegen. In diesem Projekt wurden Stationsbeobachtungen *stündlich* erfasst und durch das TGM assimiliert. Die kurze Laufzeit des TGM erlaubt eine weit höhere Kadenz.

2 Konfiguration des TGM für das Einzugsgebiet der Glatt (ZH)

2.1 Vorhersagegebiete

Für einen Teil des Einzugsgebietes des Rheins wurden TGM Vorhersagegebiete entworfen. Davon wurden sechs Gebiete in das Einzugsgebiet der Glatt gelegt. Die Gebietseinteilung orientiert sich an den hydrologischen Becken der folgenden Flüsse: Rhein, Birs, Ergolz, Sissle, Glatt, Töss, Thur, Murg, Sitter, Limmat, Sihl, Aare, Reuss, Aabach, Wyna, Suhre, Wigger, Langete, Emme, Dünner, La Suze, Simme, Kander, Lütshine, Sense, La Sarine, La Broye, L'Orbe, L'Areuse.

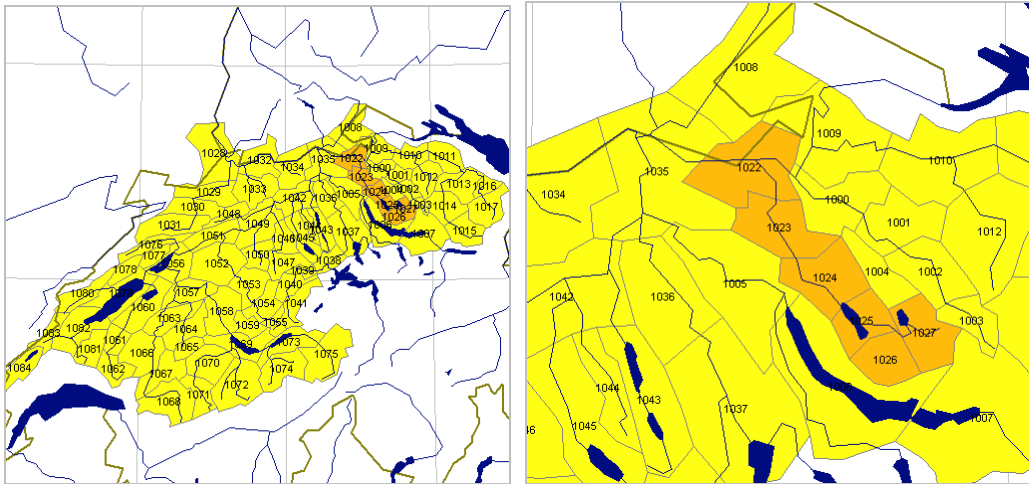


Abb. 2.2 Gebietseinteilung TGM und TGM Gebiete entlang der Glatt (ZH)

Für jedes TGM Gebiet wird aus dem digitalen Geländemodell GTOPO30 die kumulative Flächen-Höhenverteilung ermittelt. Die Horizontalachse entspricht der Gebietsfläche.

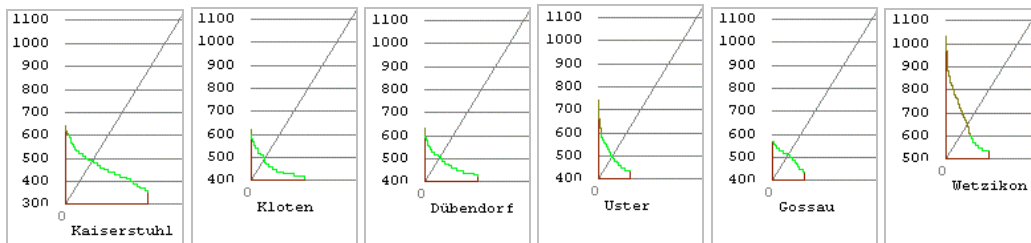


Abb. 2.3 Flächen-Höhenverteilung der TGM Gebiete entlang der Glatt

Entlang der Glatt steigt die Talsohle von Kaiserstuhl (360 m/M) nach Wetzikon (520 m/M) an. Die Kammlagen steigen von Kaiserstuhl (620 m/M) nach Wetzikon (980 m/M) ebenfalls an. Die kumulative Flächen-Höhenverteilung weist im Gebiet Kloten die ausgeprägteste konkave Form auf. Die hügelige Oberflächenstruktur entlang der Glatt führt in allen Gebieten auf eine Höhendifferenz von mindestens 150 m zwischen Talsohle und Kammlagen.

2.2 Selektion von COSMO-2 Gitterpunkten

Die sechs Gebiete entlang der Glatt wurden im Rahmen dieses Projektes mit Eingangsdaten des übergeordneten Wettermodelles COSMO-2 versorgt. Zu diesem Zweck wurde aus dem COSMO-2 Gitter für jedes TGM Gebiet ein Gitterpunkt ausgewählt. Die Auswahl erfolgte durch ein kombiniertes Kriterium: neben einem geringen Abstand zum

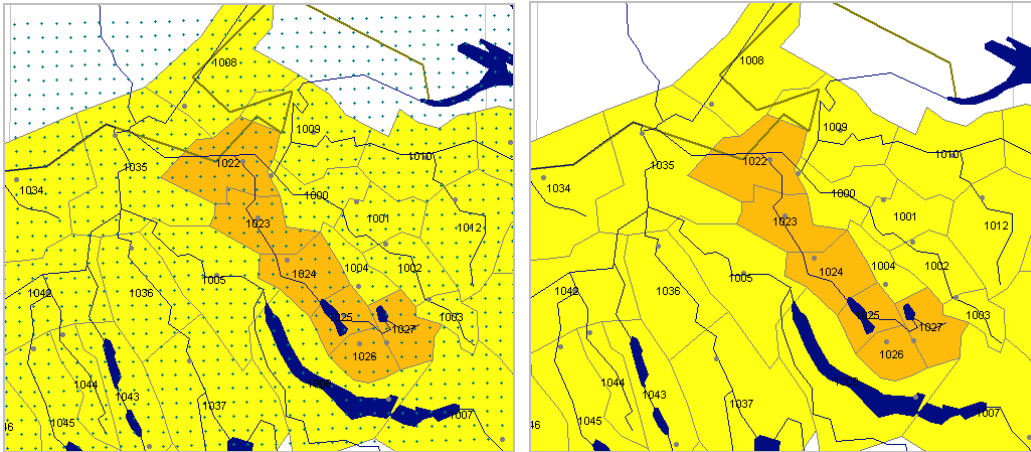


Abb. 2.4 Gitter COSMO-2 (links) und ausgewählte Gitterpunkte für die TGM Gebiete

Gebietsschwerpunkt wurde auf möglichst tiefegelegene Gitterpunkte geachtet.

Die Vertikalprofile an den ausgewählten Gitterpunkten wurden für 18 Höhen des COSMO-2 bereitgestellt. Damit wird der Höhenbereich vom Boden bis rund 2700 m/M abgedeckt.

2.3 Stationsmesswerte aus dem DataWareHouse

Drei Messnetze weisen Stationen im Bereich der Glatt auf: SwissNet, SMART und kantonale Strassenwetterstationen. Die Messwerte dieser automatischen Stationen werden

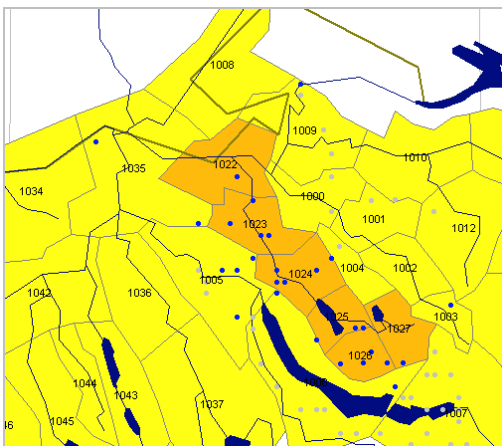


Abb. 2.5 Stationen im DataWareHouse: SwissNet, SMART, Strassen

(teilweise mit hoher Kadenz von 10 Minuten) fortlaufend in das DataWareHouse (Datenbank der MeteoSchweiz) übertragen, von wo aus sie in Echtzeit weitervermittelt werden können.

Die Stationshöhen weisen eine deutliche Verteilung auf: neben Stationen in Beckenlagen sind auch Stationen in Kammlagen (Hörnli, Lägern, Uetlibergturm) vorhanden.

Jedem TGM Gebiet wurden die verfügbaren Stationen für die Assimilation von Temperatur und

Taupunkt, gewichtet nach Abstand und topographischer Lage, zugeordnet.

2.4 Experimentalperiode

Für die Periode vom

1. Oktober 2008 - 31. März 2009 (sechs Monate)

wurden die Eingangsdaten für das TGM durch das COSMO-2 Modell alle drei Stunden (Kadenz des COSMO-2 Betriebs) für den Vorhersagehorizont von 24 Stunden bereitgestellt.

Die stündlichen Beobachtungen der Stationsnetze SwissNet, SMART und der Strassenwetterstationen des Kantons ZH wurden für die gleiche Perioden zur Verfügung gestellt.

Die Eingangsdaten wurden über die Experimentalperiode archiviert. In der Periode vom 13. Dezember 2008 bis 31. Januar 2009 unterblieb die Archivierung der stündlichen Beobachtungen. Die für das TGM notwendigen Eingangsdaten lagen somit für 19 Wochen vollständig vor.

2.5 Anpassung des TGM an die Eingangsdaten

Das TGM musste für die Verarbeitung der COSMO-2 Gitterpunktprofile und für die Assimilation der Stationsmesswerte aus dem DataWareHouse angepasst werden. Die Anpassungen an die lieferbaren Datenstrukturen bzw. Formate verursachten einen beträchtlichen Aufwand.

2.6 Initialisierung und Advektion mit stündlichen COSMO-2 Vertikalprofilen

Das TGM wird an einem Stundetermin mit dem Vertikalprofil des COSMO-2 initialisiert. Beim anschliessenden TGM Lauf wird stündlich die Differenz der COSMO-2 Vertikalprofile als Advektion (externe Änderung) in das TGM übernommen. Die Windprofile des COSMO-2 werden direkt übernommen.

Zusätzlich zu den stündlichen Vertikalprofilen wird auch die kurzweilige Strahlung vom COSMO-2 übernommen (Modellober- und untergrenze). Die TGM interne Globalstrahlungsberechnung wird mit den externen Strahlungswerten an der COSMO-2 Modellobergrenze synchronisiert, damit der Verlauf der kurzweiligen Strahlung im TGM zeitlich hoch aufgelöst und synchron mit dem übergeordneten Modell berechnet werden kann. Die Transmissionsfaktoren für die kurzweilige Strahlung werden vom COSMO-2 übernommen.

2.7 Assimilation von Messwerten aus SwissNet, SMART und Strassenstationen

Am Assimilationstermin wird das Vertikalprofil der Stationsmesswerte gewichtet mit dem Modellprofil gemischt. Die Gewichtung der Stationen (Abstand, Lage in der Topographie) und des Stationsprofils gegenüber dem Modellprofil wurden variiert. Die Temperaturen der Strassenwetterstationen unterscheiden sich in der Regel von den Temperaturen der SMART und SwissNet Stationen. Die Temperaturen der Strassenwetterstationen wurden für die Assimilation nicht verwendet. Die Feuchtwerte sind homogener als die Temperaturmesswerte und wurden alle verwendet.

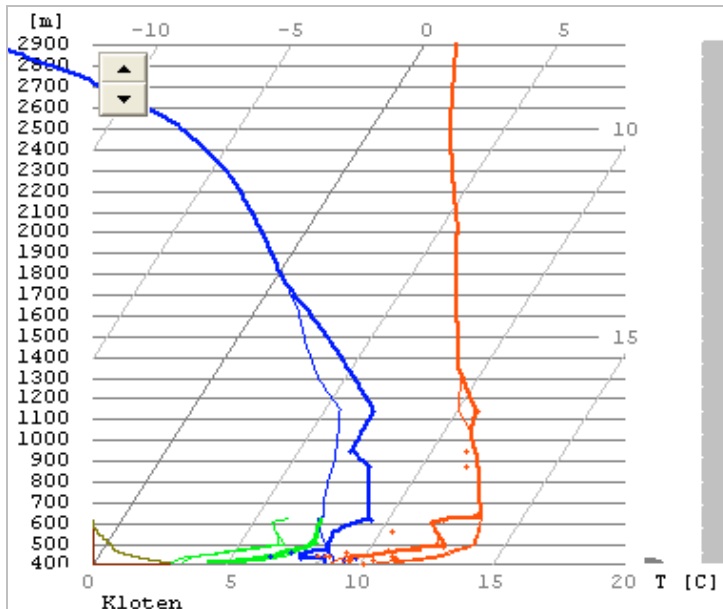


Abb. 2.6 Modifikation des TGM Modellprofils in Bodennähe durch Assimilation von Stationswerten. Das modifizierte Profil (breite Linie) ist in Bodennähe kühler und feuchter als das ursprüngliche Profil (feine Linie).

Durch die Assimilation von Stationsmesswerten wird das Vertikalprofil von Feuchte und Temperatur bei gewissen Wetterlagen in Bodennähe deutlich modifiziert.

2.8 Kadenz und Verfügbarkeit der TGM Läufe

Die COSMO-2 Vertikalprofile an den ausgewählten Gitterpunkten wurden für 18 Höhen (vom Boden bis ca. 2700 m/M) stündlich aus dem jedem Modellauf (Vorhersagehorizont 24 Stunden, acht Starttermine pro Tag: 00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00 h UTC) extrahiert und in Echtzeit weitervermittelt. Diese Vertikalprofile standen spätestens 1:40 h nach dem Starttermin zur Weiterverarbeitung zur Verfügung (Verfügbarkeit 01:40, 04:40, 07:40, 10:40, 13:40, 16:40, 19:40, 21:40 h UTC).

Die aktuellen Messwerte aus SwissNet-, SMART- und Strassenstationen wurden stündlich (Termin HH:40) aus dem DataWareHouse weitervermittelt und standen spätestens nach 10 Minuten (Termin HH:50) für die Weiterverarbeitung zur Verfügung. Die Messwerte des Termins HH:40 wurden in den TGM Modellauf assimiliert und modifizierten die Vertikalprofile in Bodennähe.

Aktualisierte TGM Modellaufe mit einem Vorhersagehorizont von 20 bis 22 h stehen somit zu jeder vollen Stunde HH:00 zur Verfügung. Sie beruhen auf dem letzten verfügbaren COSMO-2 Lauf (Initialisierungstermin HH-02:00 h bis HH-04:00 h) und auf den assimilierten Stationsmesswerten des Termins HH-00:20. Die „Totzeit“ des TGM beträgt in diesem Betrieb somit zwei bis vier Stunden bezüglich des übergeordneten Modellaufes und 20 Minuten bezüglich der letzten assimilierten Stationsmesswerte.

3 TGM Simulator

3.1 TGM Läufe

Zum Testen und Verifizieren der Modellläufe wurde das TGM in einen Simulator integriert. Die Windows-Applikation „TGM Simulator“ führt die Modellrechnung (Initialisierung, Assimilation, zeitliche Entwicklung) und die Visualisierung des Modellzustandes *simultan* aus. Die Visualisierung des berechneten Modellzustandes erfolgt in drei Diagrammen: *Emagramm* (Vertikalprofile von Temperatur, Feuchte, Bedeckungsgrad, Sichtweite), *Barogramm* (zeitliche Entwicklung von Wolken, Bedeckungsgrad und Konvektion) und *Evogramm* (oben: Verlauf von Temperatur, Gras-Temperatur, Taupunkt und Wind am Boden; unten: Sichtweiten, kurz- und langwellige Strahlung, Strahlungsbilanz, Feuchte- und Tausäule).

Die geringen Laufzeiten der TGM Berechnungen erlauben eine Animation in Echtzeit.

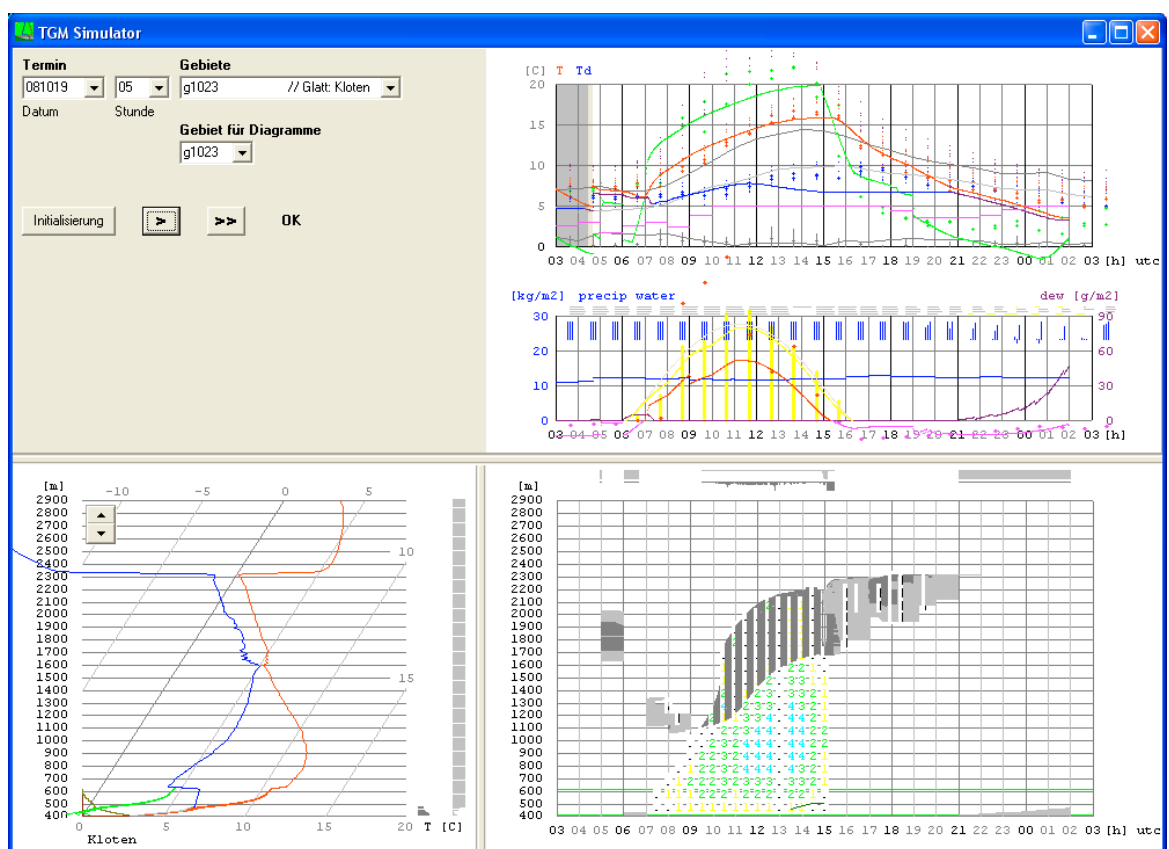


Abb. 3.7 Visualisierung eines TGM Laufes als Emagramm (unten links), Barogramm (unten rechts) und Evogramm (oben rechts)

Der Lauftermin (Datum und Stunde) und das Vorhersagegebiet werden über Auswahllisten festgelegt. Bei gekoppelten Vorhersagen mehrerer benachbarten TGM Gebiete kann für die Visualisierung im Diagramm ein einzelnes Gebiet ausgewählt werden. Für den gewählten Lauftermin wird das TGM mit der aktuellsten COSMO-2 Vorhersage (Start 2 bis 4 Stunden früher) initialisiert und die aktuellsten Stationsmesswerte werden assimiliert.

TGM Läufe werden im Simulator durch drei Aktionsknöpfe ausgelöst: Initialisierung, Stundenschritt (>) und vollständiger Lauf (>>).

3.2 Visualisierung von Stationsmessungen

Stündliche Stationsmesswerte wurden mit dem TGM Simulator in den Evogrammen visualisiert (Temperatur, Grastemperatur, Taupunkt, Wind; Horizontal- und Vertikalsicht, Strahlung).

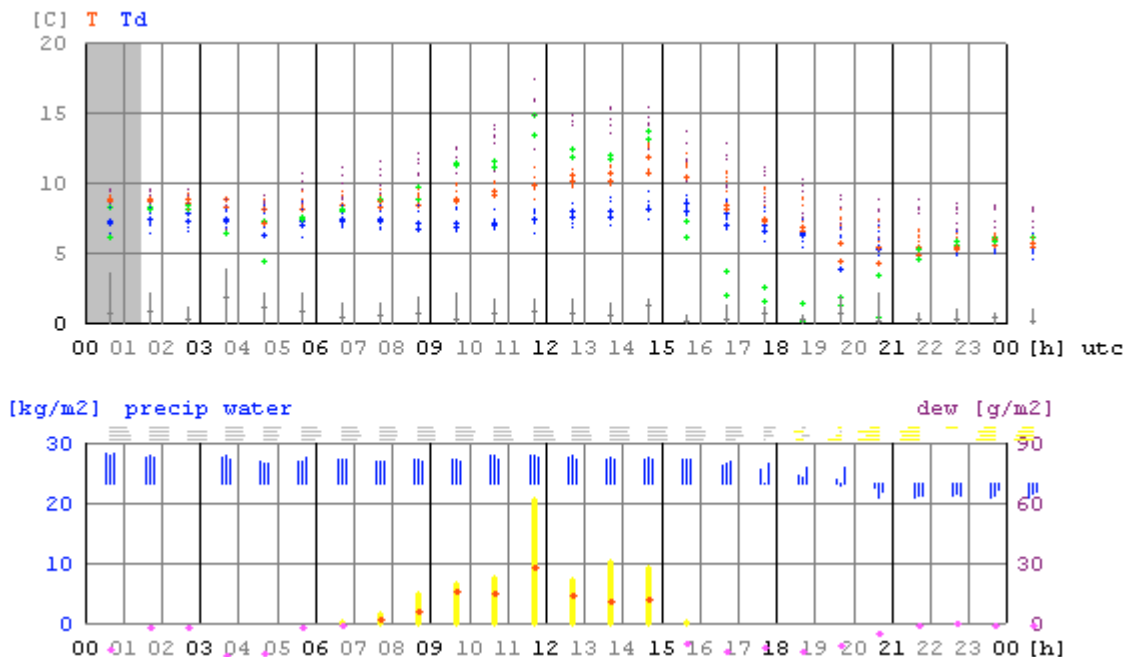


Abb. 3.8 Evogramme mit Stationsmesswerten (oben: Temperatur, Taupunkt, Grastemperatur, Wind; unten: Horizontalsicht, Vertikalsicht, Globalstrahlung, Strahlungsbilanz)

Für die Darstellung der Horizontalsicht im Evogramm verwendet der TGM Simulator eine logarithmische Skala mit Referenzwert 1000 m. Sichtweiten unter 1000 m erscheinen als gelbe Striche nach links, grössere Sichtweiten als graue Striche nach rechts.

Die Vertikalsicht erscheint als vertikale blaue Linie. Auch sie ist logarithmisch dargestellt. Vertikalsicht über dem Referenzwert (1000 Fuss) wird aufwärtsgerichtet dargestellt.

Im Flugwetter gelten Sichtweiten unter 1000 m als Nebel (Hack, 2003), in Flugplatzvorhersagen (TAF) werden die Sichtweiten 5000, 3000, 1500, 800, 600, 350 und 150 m als Schwellenwerte für Veränderungen verwendet (Baer, 2009).

3.3 Identifikation von Nächten mit Sichtreduktionen

Mit der Evogrammdarstellung der beobachteten bzw. gemessenen Sichtweiten um den Flughafen Zürich wurden 32 Nächte (24%) mit reduzierter Sicht identifiziert. Für diese Nächte wurden TGM Läufe erzeugt und mit den Beobachtungen bzw. Messungen verglichen.

4 Parametrisierung und Kalibrierung subskaliger Prozesse

Die subskaligen Prozesse im TGM sind parametrisiert. Diese Parametrisierungen werden hier beschrieben.

4.1 Langwelliger Strahlungstransfer

Bei negativer Strahlungsbilanz (nachts, klarer Himmel, windstill) sinkt die *gemessene* Grastemperatur (5cm-Temperatur) fünf bis sechs Grad unter die *gemessene* 2m-Lufttemperatur [Liechti, 2004a]. Der einsetzende Bodenwärmestrom dürfte eine weitere Absenkung verhindern. Die abgesenkte Grastemperatur bestimmt die langwellige Abstrahlung der Bodenoberfläche.

In TGM ist die nächtliche Absenkung der Skin-Temperatur (Temperatur der Bodenoberfläche) proportional zur Strahlungsbilanz und nach unten begrenzt. Die Proportionalitätskonstante und die Begrenzung sind konfigurierbare Werte (Parameter).

In ungesättigter Luft erfolgt ein langwelliger Strahlungstransfer zwischen den atmosphärischen Treibhausgasen (Wasserdampf und Kohlendioxid) und der Bodenoberfläche. Die Emissivität ungesättigter Luft hängt von der Konzentration der Treibhausgase (Wasserdampf, Kohlendioxid) ab, Referenzen in [Liechti, 2004a]. Die Reichweite dieses Strahlungstransfers wird durch die Konzentration der absorbierenden und emittierenden Treibhausgase bestimmt. In der bodennahen Atmosphäre liegt diese Reichweite in der Grössenordnung einiger 10 m. Diese Reichweite bestimmt die Höhe der Bodeninversion am Ende einer windstillen Strahlungsnacht. Da der Bauch der Bodeninversion (wärmster Punkt) in Höhen von 100 bis 200 m über Grund zu liegen kommt, muss die Reichweite des langwelligen Strahlungstransfers deutlich geringer sein. Der Bauch im Vertikalprofil der nächtlichen Bodeninversion wird mit der vertikalen Auflösung von 10 m sehr gut erfasst. Die vertikale Auflösung des TGM liegt mit 10 m auch unterhalb der Reichweite dieser Treibhausgasstrahlung. Im TGM wird für Treibhausgase ein exponentieller Abfall des langwelligen Strahlungstransfers mit der Distanz verwendet.

Bei gesättigter Luft erfolgt im atmosphärischen Fenster zusätzlich ein Strahlungstransfer zwischen den Oberflächen des Kondensats und des Bodens. Die Reichweite dieses langwelligen Strahlungstransfers hängt von der Konzentration des Kondensats ab: ungesättigte Luft ist im atmosphärischen Fenster für langwellige Strahlung transparent. Die Emissivität des Kondensates wird im TGM proportional zur Konzentration angesetzt und erreicht bei einem Grenzwert 100%. Dieser Grenzwert liegt unter 1 g/kg Wassergehalt. In Wolken mit entsprechendem Wassergehalt liegt damit die Reichweite dieses langwelligen Strahlungstransfers zwischen den Tröpfchenoberflächen in der gleichen Grössenordnung wie beim Strahlungstransfer durch die Treibhausgase. Von Wolken mit vertikaler Erstreckung und entsprechendem Wassergehalt empfängt der Boden im Wesentlichen die Abstrahlung der Wolkenunterseite. Die Abstrahlung an der Bodenoberfläche wird durch die Abstrahlung von kühleren Wolkenuntergrenzen partiell kompensiert, bei wärmeren Wolken(-unterseiten) wird die Strahlungsbilanz für die Bodenoberfläche positiv.

In windigen, wolkenfreien Nächten nimmt die beobachtete 2m-Temperatur langsamer ab als bei Windstille. Somit wird im TGM die Absenkung der Skin-Temperatur bei Wind reduziert. Die Bezugshöhe im (vom übergeordneten Modell übernommenen) Windprofil und ihr Reduktionseffekt auf die Absenkung der Skin-Temperatur sind konfigurierbare TGM Parameter. Bis zu einem Schwellwert der Bezugswindstärke erfolgt keine Reduktion der Absenkung. Bei Windgeschwindigkeiten oberhalb dieses Schwellwertes erfolgt die Reduktion exponentiell mit einer Skalierungswindgeschwindigkeit.

4.2 Taudeposition und Kondensation an Aerosolen

Unterschreitet die Temperatur strahlungsbedingt den Taupunkt, kann Wasserdampf an Oberflächen kondensieren. Boden und Aerosole (Kondensationskerne) weisen die entsprechenden Oberflächen auf.

In Schichten ohne Bodenkontakt kondensiert überschüssiger Wasserdampf im TGM ausschliesslich an Aerosolen. In Schichten mit Bodenkontakt kann sich als Alternative zur Kondensation an Aerosolen an der Bodenoberfläche Tau abscheiden. Bei genügender Windgeschwindigkeit (oberhalb Schwellwert) wird im TGM in Schichten mit Bodenkontakt die Tauabscheidung favorisiert und die mögliche Kondensation an Aerosolen unterdrückt. Bei sehr schwachem Wind (unterhalb Schwellwert) wird im TGM in Schichten mit Bodenkontakt die Taubildung nach wie vor favorisiert, die partielle Kondensation an Aerosolen wird jedoch zugelassen.

4.3 Sedimentation

Bei einem Wolkenwassergehalt von mehr als 0.2 g/kg in einer stratiformen Wolke setzt Sedimentation ein. Die Sedimentationsrate ist ein einstellbarer Parameter.

4.4 Sichtweitenberechnung

Aus dem Bedeckungsgrad clc , der Luftdichte ρ und dem Wolkenwassergehalt q_c wird die Sichtweite VIS in Anlehnung an Kunkel (1984) oder Gultepe (2007) berechnet.

$$VIS = VIS_0 (clc \rho q_c)^\gamma$$

Quelle	VIS_0 [m]	γ
Kunkel (1984)	27.10	-0.88000
Gultepe (2007)	20.85	-0.98848

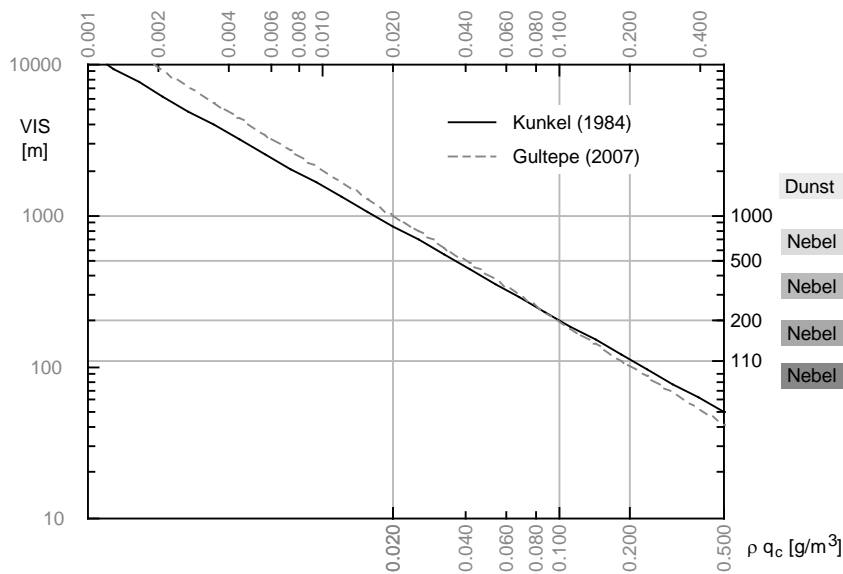


Abb. 4.9 Sichtweitenberechnung aus der kondensierten Luftfeuchte

Der Schwellwert von 1000 m für die Unterscheidung zwischen Dunst und Nebel stammt aus der Flugmeteorologie. Der Schwellwert 100 m entspricht dem Gehalt an Wolkenwasser, bei dem die Emissivität der Wolke im atmosphärischen Fenster 100% erreicht. Der Schwellwert 250 m entspricht dem Wolkenwassergehalt für die Deposition von Wolkenwasser als Niederschlag. Unterschreitungen dieser Sichtweite erfolgen bei konvektiver Mischung des Nebels durch oberflächliche Ausstrahlung.

4.5 Kalibrierungsperiode 17.-21. Oktober 2008

Nachdem die Eingangsdaten (COSMO-2 Vertikalprofile und DataWareHouse Stationsmesswerte) vollständig in das TGM eingelesen bzw. assimiliert werden konnten, erfolgte eine Feinkalibrierung der subskaligen Prozesse im TGM. Als Kalibrierungsperiode wurden die Tage vom

17.-21. Oktober 2008

verwendet. In dieser Schönwetterperiode gab es klare Strahlungsnächte mit unterschiedlichen Windstärken. In der windschwachen Nacht vom 19./20. Oktober 2008 wurden am Flughafen Kloten Sichtreduktionen auf etwas unter 1000 m (Schwellwert für Nebel im Flugwetter) registriert.

4.6 TGM Simulation der Nacht vom 19./20. Oktober 2008

Diese Nacht weist nach den Stationswerten folgende Merkmale auf:

- praktisch windstill
- Taudeposition ab 17 h UTC
- Stabilisierung der Grastemperatur ab 19 h UTC
- leichte Reduktion der Horizontalsicht (ab 19 h) und Vertikalsicht (ab 21 h), Nebel ab 21 h
- Anstieg der Sichtweiten ab 03 h UTC

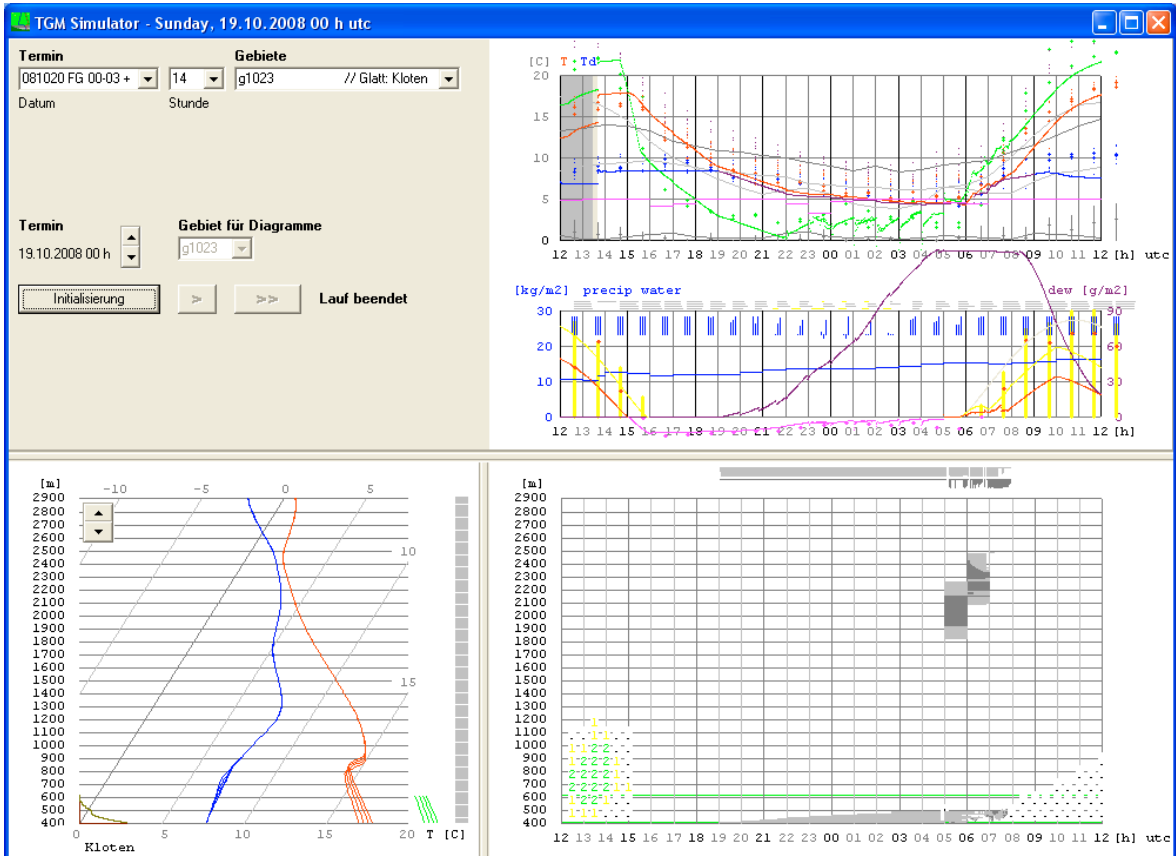


Abb. 4.10 TGM Lauf vom 19. Oktober 2008/14 h UTC und Stationsmessungen für die Nacht vom 19./20. Oktober 2008

Der 14 h UTC TGM Lauf für die Nacht vom 19. zum 20. Oktober 2008 verwendet den 12 UTC Lauf des COSMO-2 und assimiliert Stationsbeobachtungen um 13:40 h UTC. Merkmale:

- klarer Himmel oberhalb der Bodeninversion bis 05 UTC
- Anwachsen der Dunst- bzw. Nebelschicht vom Boden (ab 19 h) bis 90 m über der Talsohle (03 h)
- leichter Anstieg der Grastemperatur unter dem Dunst bzw. Nebel
- Verdünnung des Nebels ab 05 UTC durch Wolkenaufzug um 2000 m
- Vollständige Nebelauflösung in weniger als zwei Stunden ab Sonnenaufgang

5 Nebelvorhersage

5.1 Simulation von Nächten mit Sichtreduktionen

In der Experimentalperiode 1.10.2008-31.3.2009 wurden die Nächte mit Sichtreduktionen mit dem kalibrierten TGM - COSMO-2 für den Flughafen Zürich simuliert und mit Stationsmessungen verifiziert. Ausgewählte Fälle werden in den nachstehenden Abschnitten kommentiert.

5.1.1 Windstille Strahlungsnacht mit starker Sichtreduktion (12./13. Oktober 2008)

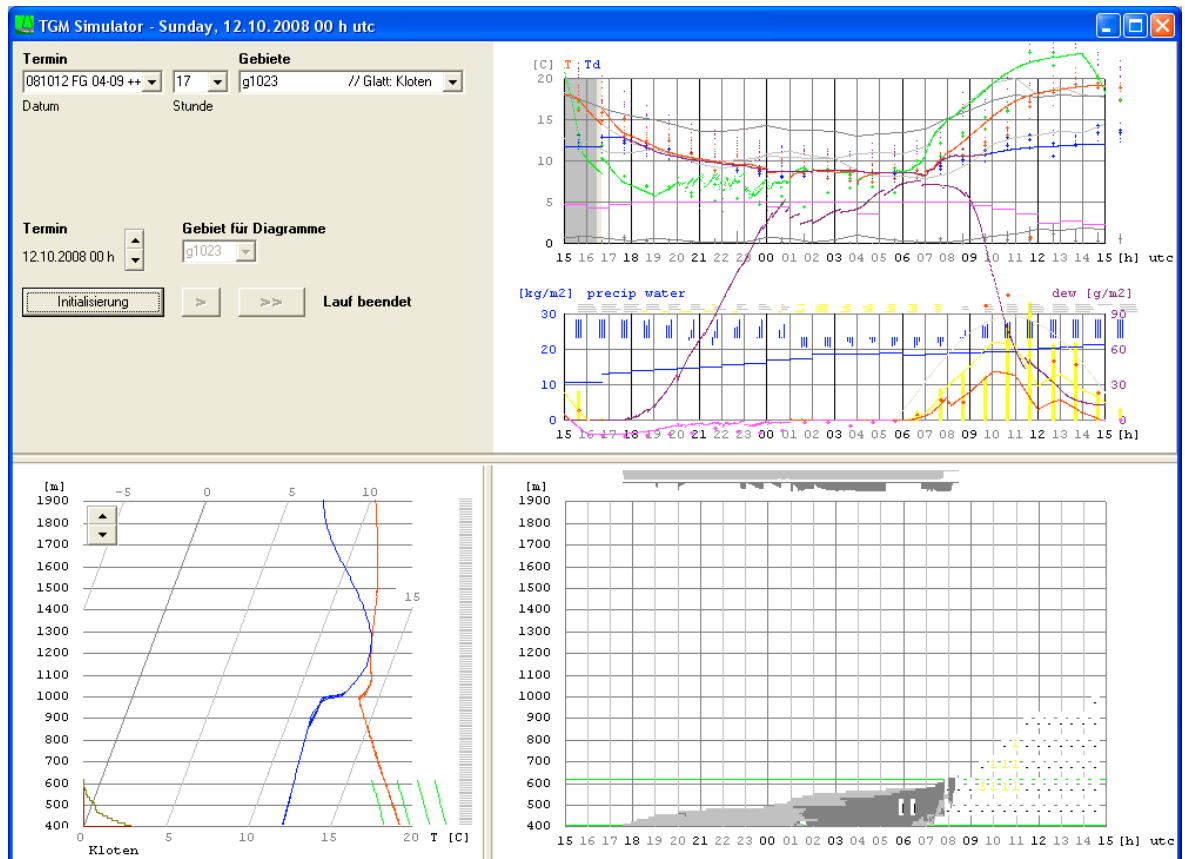


Abb. 5.11 TGM Lauf vom 12. Oktober 2008/17 h UTC. Die hellgrau eingefärbte Nebeldichte im Barogramm entspricht mässigen Sichtreduktionen (über 1000 m), dunkelgraue Einfärbung stärkeren Reduktionen (unter 1000 m, Nebel im Flugwetter).

In dieser windschwachen, klaren Nacht setzt die Tauabscheidung im TGM Lauf von 17 h UTC bereits um 18 h UTC ein, ebenso die Kondensation an Aerosolen. Die beobachtete Sichtweite nimmt mit zunehmender Mächtigkeit der entstehenden Dunst- und Nebelschicht ab. Ab 01 h UTC sinkt die beobachtete Sichtweite in allen Messungen bzw. Beobachtungen unter 1000 m (Schwellwert für Nebel).

Zu diesem Zeitpunkt wird die Schichtung in der Nebelschicht durch die zunehmende Abstrahlung der Nebeltröpfchen weniger stabil. Die direkte Tauabscheidung geht zurück und allmählich setzt die (schwächere) Sedimentation ein. Die im TGM Lauf berechnete Nebelauflösung erfolgt im Vergleich mit dem Anstieg der Sichtweite leicht verfrüht.

Der frühere 14 h TGM Lauf zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf der Nebelbildung und Auflösung wie der 17 h Lauf. Im 14 h Lauf wird die Nebeldecke etwas weniger mächtig als im 17 h Lauf. Die Nebelauflösung setzt nach 07 UTC ein und wird durch einen Wolkenaufzug in 1200 m unterstützt.

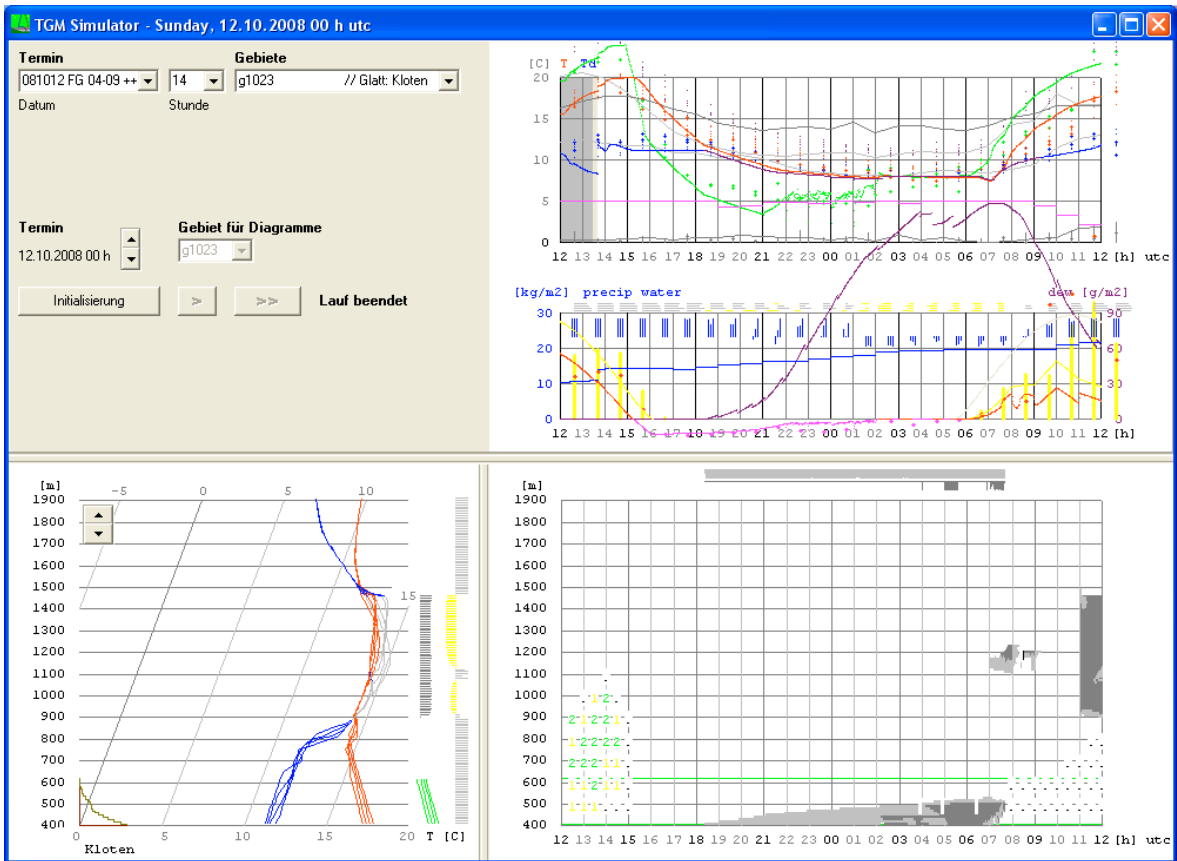


Abb. 5.12 TGM Lauf vom 12. Oktober 2008/14 h UTC

Die Unterschreitung der Sichtweite von 1000 m um 01 h UTC stimmt zeitlich recht gut mit dem ersten Knick in der akkumulierten Tauabscheidung überein. Dieser Knick entsteht, wenn die langwellige Abstrahlung im Nebel diejenige des Bodens erreicht und die Nebelschicht damit bodennah isotherm wird.

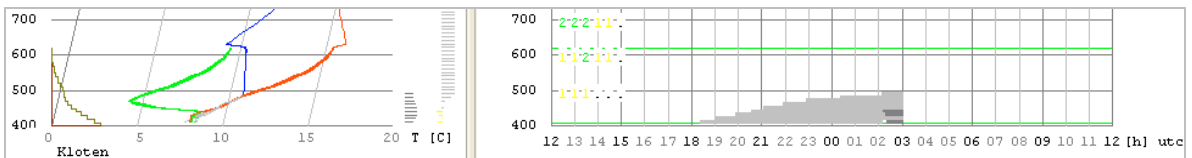


Abb. 5.13 Verdichtung von Dunst zu Nebel

Im noch früheren 11 h UTC Lauf des TGM wird die einsetzende Nebelbildung durch den Aufzug von Wolken im COSMO-2 ab 20 h UTC gestoppt. Dieser TGM Lauf illustriert eine bodennahe, nächtliche Erwärmung durch den Aufzug einer wärmeren Schichtwolke.

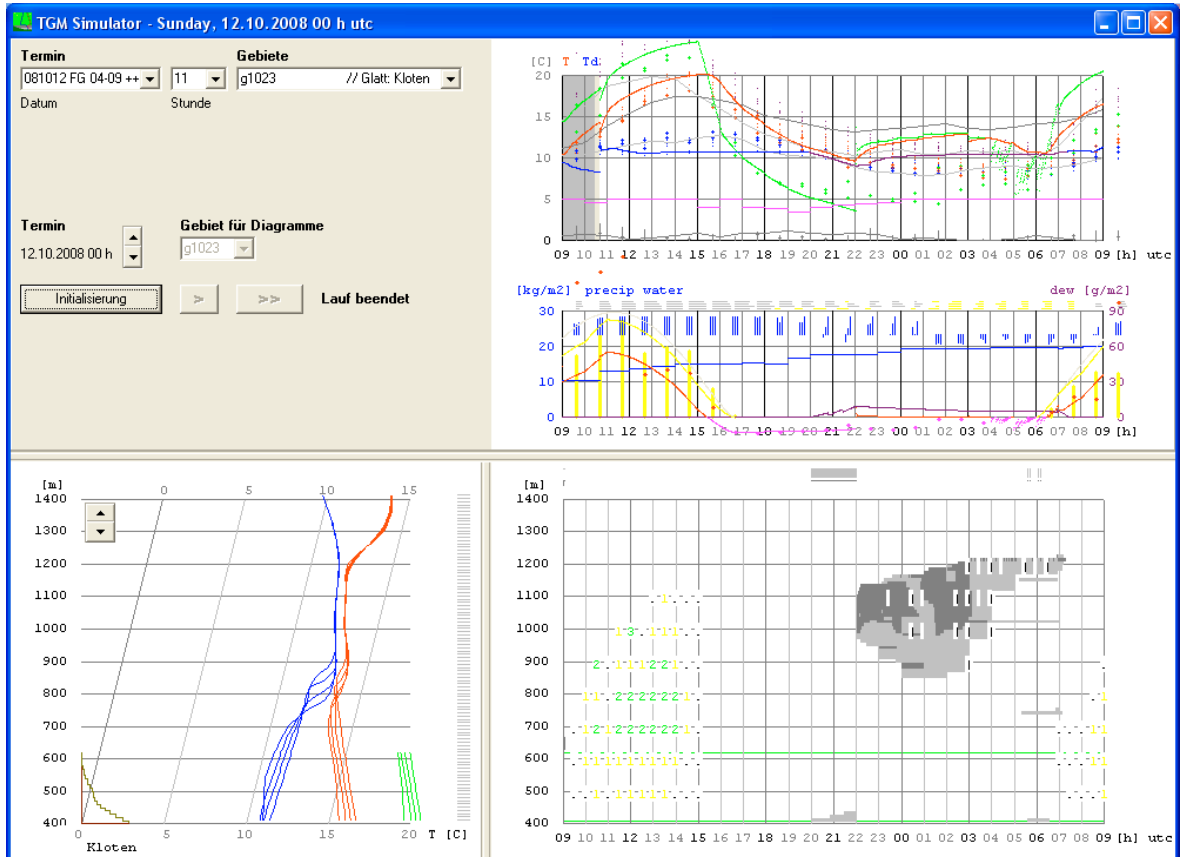


Abb. 5.14 TGM Lauf vom 12. Oktober 2008/11 h UTC

5.1.2 Windstille Strahlungsnacht mit leichter Sichtreduktion (11./12. Oktober 2008)

Bereits in der Nacht vom 11./12. Oktober traten Reduktionen der Sichtweite auf. Diese waren geringer und von kürzerer Dauer als in der Nacht vom 12. auf den 13. Oktober. Die TGM Läufe simulierten auch für diese Nacht die Bildung, Entwicklung und Auflösung von Bodennebel. Die Übereinstimmung erreichte für diese Nacht die Qualität der Simulationen für die Nacht vom 12./13. Oktober nicht. Die Abweichungen liessen sich auf die Assimilation von Stationsdaten zurückverfolgen. Die 11 und 14 h Läufe erreichten durch zu warme Stationen eine leicht erhöhte Maximaltemperatur und einen leicht zu tiefen Taupunkt. Damit setzte die Nebelbildung etwas verzögert ein. Der 17 Uhr Lauf wurde durch die Assimilation eines sehr hohen Taupunktes in 560 m/NN dominiert: die Nebelobergrenze stieg dadurch in der Nacht zu rasch an.

Die Nebelauflösung erfolgte in allen Läufen verfrüht.

5.1.3 Umwandlung des Nebels zu tiefem Stratus (24./25. Oktober 2008)

In dieser Nacht setzte die Nebelbildung um 18 h UTC früh ein und der Bodennebel hob um 03 h UTC vom Boden ab (Umwandlung in tiefen Stratus).

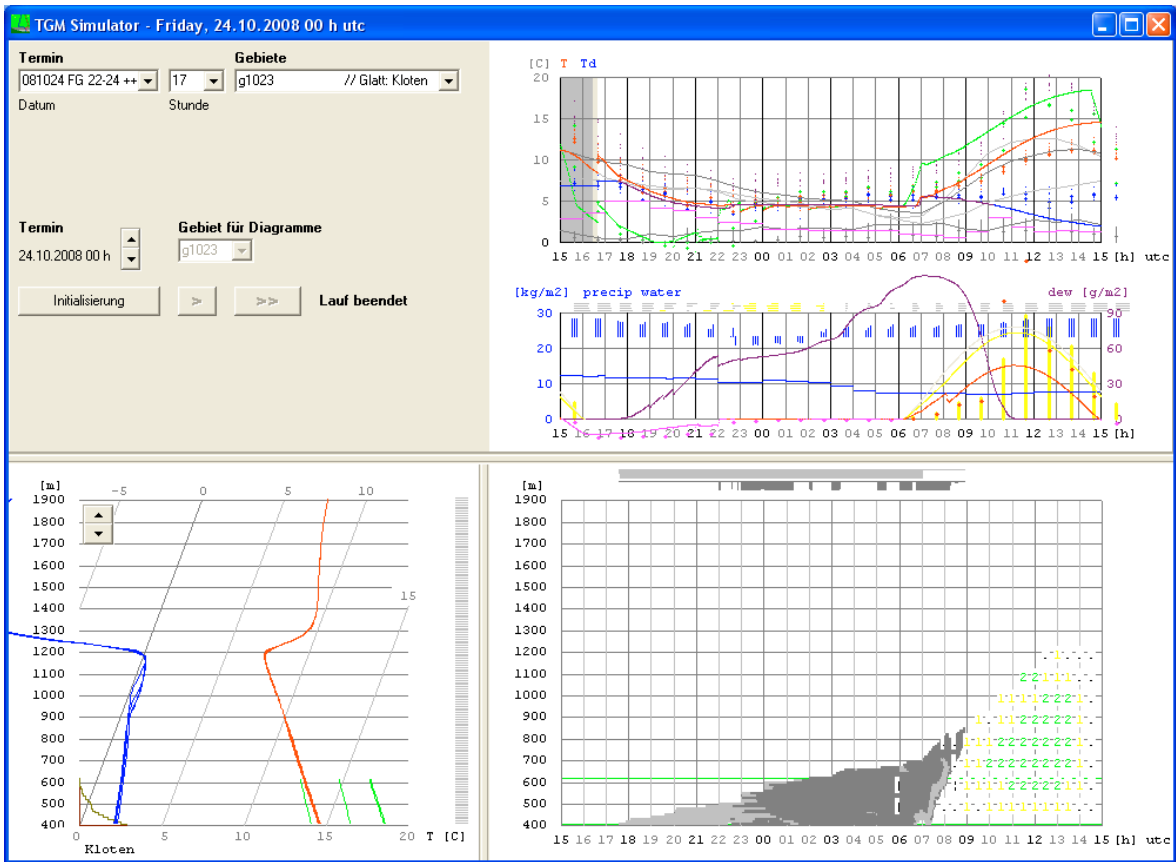


Abb. 5.15 TGM Lauf vom 24. Oktober 2008/17 h UTC

Der 17 h UTC Lauf des TGM simuliert Bildung und Verlauf des Nebels sehr gut. Die Umwandlung in tiefen Stratus in der zweiten Nachthälfte wird tendenzmässig erfasst. Die Nebelauflösung dagegen erfolgt deutlich zu rasch.

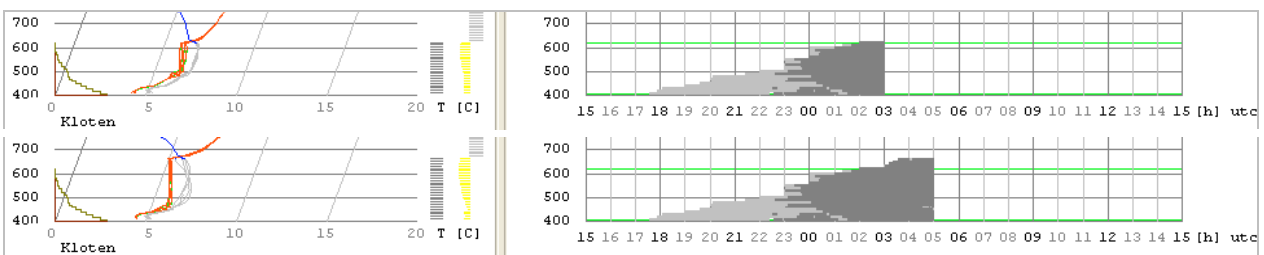


Abb. 5.16 Tendenz zur Umwandlung des Bodennebels in tiefen Stratus

5.1.4 Windige und bewölkte Nächte (29./30./31. Oktober 2008)

Die erste Nacht war durch eine sehr feuchte Grundschicht mit Wind und Bewölkung charakterisiert. Bereits geringe Abkühlung führte zu Übersättigung und Kondensation. In den meisten Simulationen (Läufe 08, 17, 20, 23 h UTC) traten bodennahe Sichtreduktionen ab 20 h UTC während der ganzen Nacht auf.

Im Lauf der zweiten Nacht klarte der Himmel auf und es kam zu leichten Sichtreduktionen. Das Aufklaren war in den COSMO-2 Eingangsdaten ab dem 14 h UTC Lauf enthalten und das TGM simulierte in der Folge bodennahe Sichtreduktionen.

Beide Nächte wurden gut durch TGM – COSMO-2 simuliert. Die Nebelauflösung am 31. Oktober wurde zu früh simuliert. In Wirklichkeit ging der Nebel in einen ganztägig persistenten, tiefen Stratus über. Das COSMO-2 erfasste dies in den Läufen vom 30. Oktober noch nicht und das TGM erhielt damit zu viel kurzweilige Einstrahlung.

5.1.5 Nebelbildung bei Inversionslage (31. Oktober/1./2./3. November 2008)

Am 31. Oktober ging der nächtliche Nebel tagsüber in *ganztägig* persistenten, tiefen Stratus über.

Dieser Stratus war in den COSMO-2 Läufen von 06, 09, 12 h UTC nun erfasst. Nach dem 15 UTC Lauf wurde der tiefe Stratus durch Aufheizung zwischen 12 und 15 h UTC aufgelöst.

Das TGM erhielt in den 08, 11 h UTC Läufen nach wie vor zu viel Globalstrahlung und löste den übernommenen tiefen Stratus durch Aufheizung rasch auf (viel rascher als das COSMO-2). Durch die in der Folge deutlich zu hohe Temperatur im Tagesmaximum setzte die Nebelbildung in der folgenden Nacht in diesen TGM Läufen deutlich zu spät ein.

Im 14 Lauf heizte das TGM den vom COSMO-2 um 12 h UTC übernommenen Stratus ebenfalls weg und wurde zu warm. Die Assimilation von 13:40 h korrigierte das Temperaturprofil noch ungenügend nach unten und vermochte den Stratus nicht zu erfassen.

Auch im 17 h UTC Lauf korrigierte die Assimilation der Stationsmesswerte zwar die 2m-Temperatur an der Talsohle, erfasste den Stratus aber nicht. Das TGM bildete damit in diesen beiden Läufen durch Ausstrahlung Nebel bei zu tiefen Temperaturen. Die Verdichtung des leichten zu dichtem Nebel erfolgte in zeitlich guter Übereinstimmung mit den beobachteten Sichtweiten. Das Abheben (Umwandlung in tiefen Stratus) erfolgte erst verspätet mit dem Einsetzen der kurzweiligen Einstrahlung. Die Nebelauflösung erfolgte zu rasch.

Der 18 h UTC Lauf des COSMO-2 erfasste den tiefen Stratus wieder. Bei der Assimilation der 19:40 h UTC Stationsmessungen in den 20 h UTC TGM Lauf blieb der tiefe Stratus erhalten und das TGM simulierte den Nebel in der Nacht sehr gut. Selbst das Abheben des Stratus ab 05 UTC wurde ansatzweise erfasst. Die Nebelauflösung ab Sonnenaufgang erfolgte - wie in den meisten Simulationen - zu rasch.

Der 23 h UTC TGM Lauf „verlor“ bei der Assimilation der 22:40 h UTC Stationswerte den vom COSMO-2 um 21 h UTC übernommenen Stratus wieder und bildete Nebel bei zu kalten Temperaturen.

Am 1. November wiederholten sich die Abweichungen vom Vortag: bei Stratus bestehen Probleme bei der zu starken Aufheizung im TGM und der Assimilation (11 und 14 h UTC Läufe). Im 17 h TGM Lauf wurde der Stratus ab 21 h UTC wieder gebildet. Die Dichte des Nebels wurde aber überschätzt. Der 20 h UTC TGM Lauf verlief ähnlich.

Am 2. November wandelte sich der Morgennebel zwischen 09:40 und 10:40 h UTC in tiefen Stratus bzw. starken Dunst um. Das COSMO-2 war deutlich zu warm und selbst die Assimilation um 10:40 h UTC vermochte das zu warm initialisierte Profil im TGM nicht genügend zu korrigieren. Das TGM erwärmte sich zu stark und die simulierte Nebelbildung in der Nacht zum 3. November setzte zu spät ein. Der 14 h UTC TGM Lauf wies das gleiche Assimilationsproblem auf. Der 17 h UTC TGM Lauf war von der Nebelbildung her zeitlich wieder gut, die Dichte des Nebels wurde aber überschätzt.

Am 3. November überschätzte der 02 h UTC TGM Lauf die Dichte des Nebels ebenfalls, die Tem-

peratur und der Taupunkt wurden sehr gut erfasst. Im Tagesverlauf zogen nach 10 h UTC Wolken auf, die im COSMO-2 Lauf nicht erfasst waren. Damit heizte das TGM zu stark auf mit der entsprechenden Verzögerung der Nebelbildung in der Folgenacht. Die 05 bis 13 h UTC TGM Läufe zeigten die gleiche Verzögerung. Beim 14 h UTC TGM Lauf war die Verzögerung schon stark reduziert.

Die 17-19 h UTC TGM Läufe erfassten die Nebelbildung in der Folgenacht praktisch perfekt einschliesslich der Tendenz zur Umwandlung in tiefen Stratus. Um 03 h UTC wurde die Nebelschicht in der Simulation durch oberflächliche Abkühlung komplett

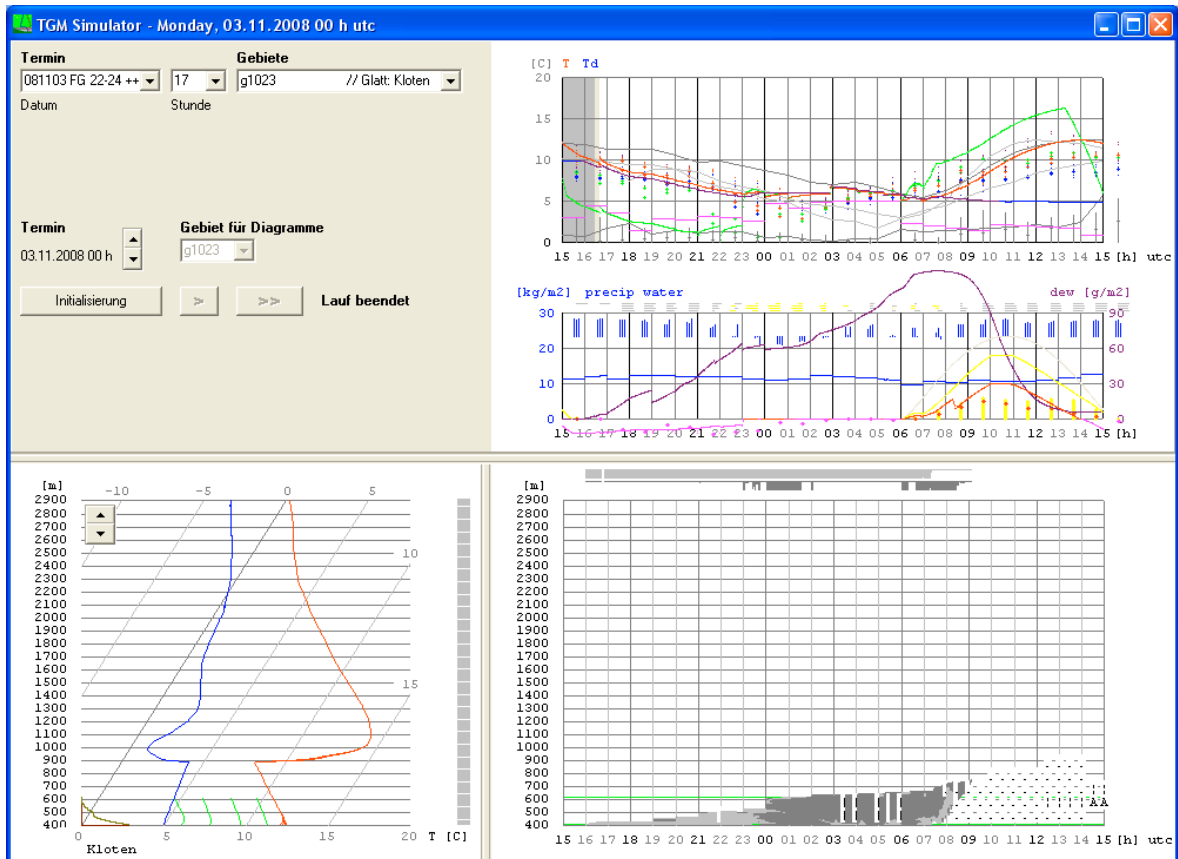


Abb. 5.17 TGM Lauf vom 3. November 2008/17 h UTC

durchmischt (leichter Sprung in der 2m-Temperatur). Sowohl die beobachteten Horizontal- als auch die Vertikalsichten stiegen gleichzeitig deutlich an. Die Nebelauflösung nach Sonnenaufgang erfolgt in der Simulation zu rasch.

Ab dem 20 h UTC Lauf wurden die Simulationen etwas instabiler bezüglich der internen Entwicklung der Nebelschicht. Die Fluktuationen konnten auf das Assimilationsverfahren zurückgeführt werden.

5.1.6 Fortsetzung der Inversionslage (4./5./6. November)

Am 4. November 2008 löste sich der Morgennebel in Stratus und Dunst auf. In der Nacht auf den 5. November kam Wind auf. An Stelle von Bodennebel entwickelte sich tiefer Stratus, die am Boden beobachteten Sichtweiten (horizontal und vertikal) blieben hoch.

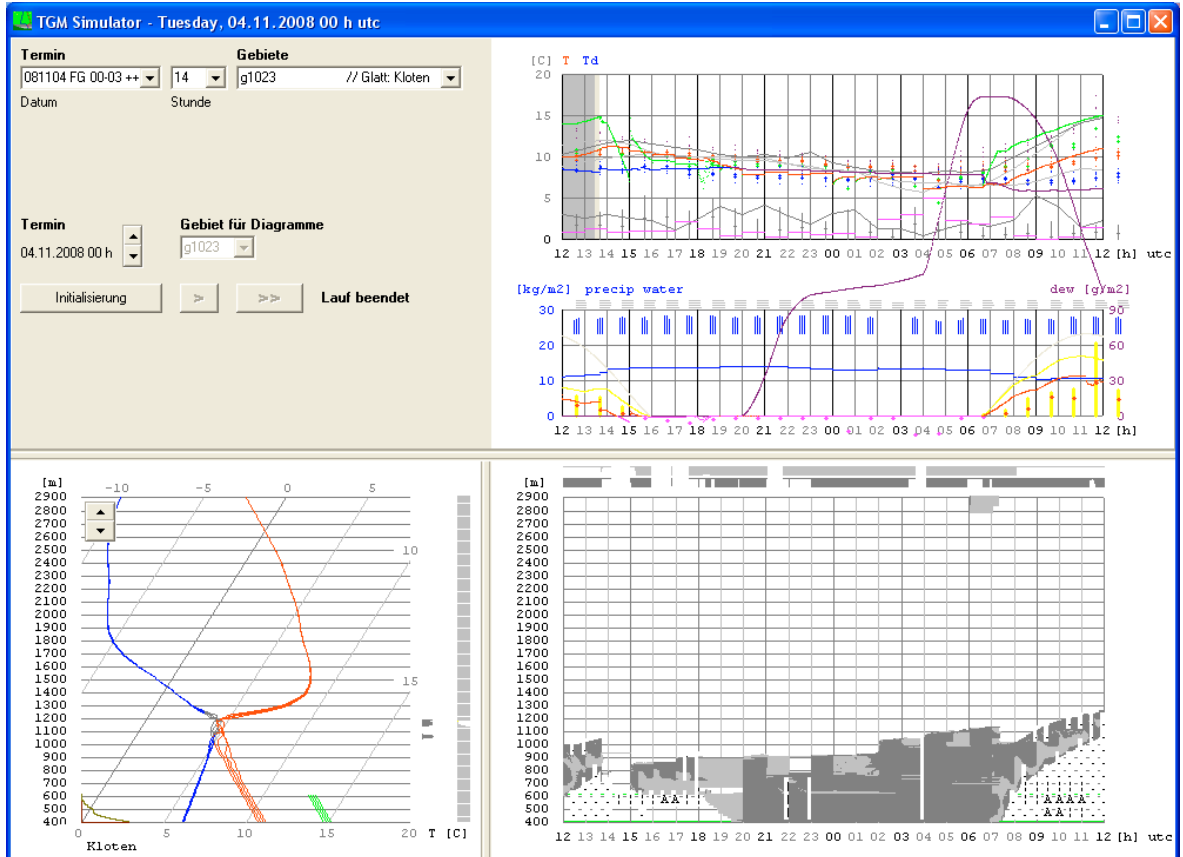


Abb. 5.18 TGM Lauf vom 4. November 2008/14 h UTC

Der Stratus wurde vom COSMO-2 12 h UTC Lauf erfasst und an das TGM übergeben. Mit der Assimilation um 13:40 h UTC verschwand der Stratus kurz aus dem TGM. Im 14 h UTC TGM Lauf liess das TGM den wieder erschienen Stratus ab 18 h UTC unter Verdichtung auf den Boden absinken. Das lässt sich aus den Sichtbeobachtungen nicht nachvollziehen. Mit dem Advektionsschritt um 20 h UTC verdichtete sich der Nebel ruckartig, das TGM reagierte mit starker Sedimentation. Der Effekt wiederholte sich um 04 h UTC. Dieses „advective Ruckeln“ des Wolkenwassers mit anschliessenden Sedimentationsschüben trat auch in den späteren TGM Läufen diese Nacht auf.

Am 5. November zeigt bereits der 02 h UTC TGM Lauf für die Folgenacht massive Sichtreduktionen, die auch beobachtet wurden.

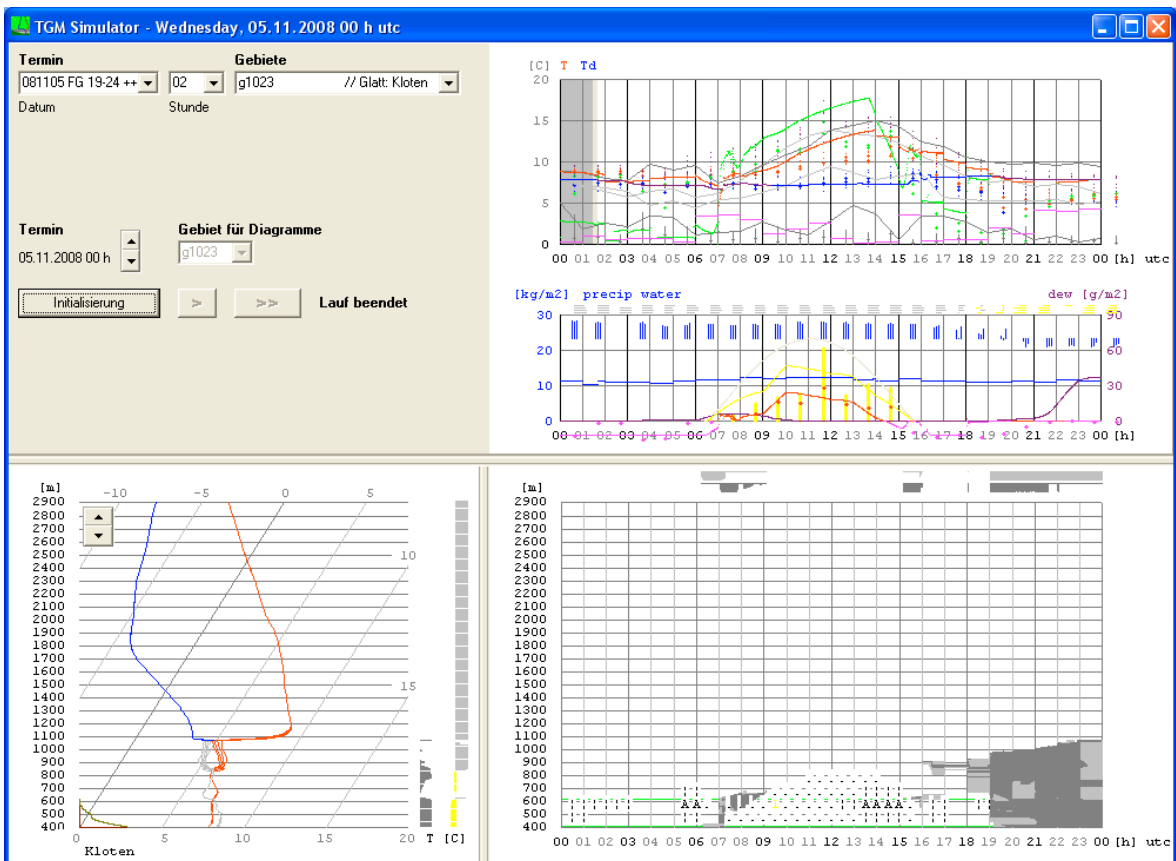


Abb. 5.19 TGM Lauf vom 5. November 2008/02 h UTC

Diese frühzeitige Ankündigung der Sichtreduktion für die Folgenacht war in den 05-14 h UTC TGM Läufen nicht mehr oder stark verspätet zu sehen, da Interferenzen zwischen dem COSMO-2 Stratus und dem TGM auftraten. Erst der 17 h UTC TGM Lauf zeigte die kurz darauf folgende bodennahe Sichtreduktion, nachdem das COSMO-2 im 15 h UTC Lauf an Stelle des Stratus nur noch Dunst zeigte. Fluktuationen im COSMO-2 wirkten sich stark auf die TGM Simulationen aus.

Der 20 h UTC TGM Lauf erfasste schliesslich die bereits eingetretene, starke Sichtreduktion in voller Länge. Die Nebelauflösung nach Sonnenaufgang wurde verfrüht simuliert.

Am 6. November wandelt sich der nächtlich gebildete Nebel in tiefen Stratus, der sich tagsüber nicht auflöste. In der folgenden Nacht kam es bodennah zu keinen Sichtreduktionen.

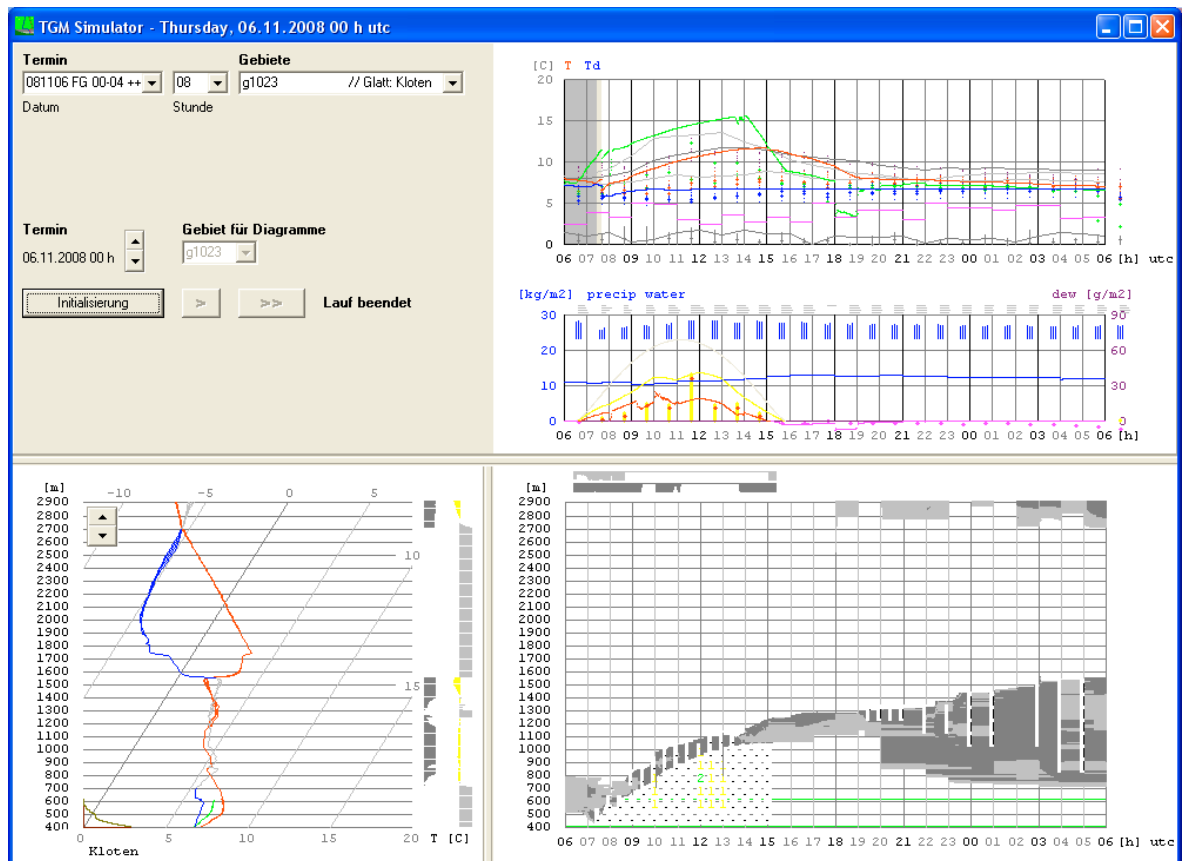


Abb. 5.20 TGM Lauf vom 6. November 2008/08 h UTC

Sowohl das COSMO-2 als auch das TGM wurden etwas zu warm. Der Stratus wurde tagsüber vom TGM 08 h UTC Lauf während knapp 3 Stunden aufgelöst und bildete sich gegen 14 h UTC wieder.

Im 11 h UTC Lauf blieb er bereits trotz zu starker Aufheizung ganztägig persistent und dehnte sich nachts vertikal nach oben und unten aus (Advektion aus dem COSMO-2). Im 14 h UTC TGM Lauf war konsistent mit etwas geringerer vertikaler Ausdehnung. Im 17 h UTC Lauf verdünnte sich der Stratus am Ende der Nacht und das TGM entwickelte bodennah eine leichte Inversion mit schwacher Sichtreduktion. Die Sequenz 08 – 20 h UTC von TGM Vorhersagen war stabil in der Tendenz und bis auf die überschätzte Erwärmung äusserst nahe an den Messwerten.

5.1.7 Nächtliche Sichtreduktion nach konvektiven Tagen (7./8. November)

Der 7. November war ein wolkenfreier Tag mit maximaler Sonneneinstrahlung, deutlichem Tagesgang der Temperatur und guter konvektiver Durchmischung der Grenzschicht.

In den 02, 05, 08, 11, 14 h UTC TGM Läufen wurde dies gut erfasst. Am Ende der Konvektion blieb jeweils ein dünner Stratus an der Obergrenze der Mischungsschicht zurück, der die bodennahe Abkühlung zu Beginn der Nacht kaum dämpfte. In der zweiten Nachthälfte erschien konsistent ein starker Wolkenaufzug aus dem COSMO-2.

Ab dem 17 h UTC TGM Lauf wurde der nächtliche Wolkenaufzug vom COSMO-2 nicht mehr vorhergesagt und die nächtliche - in der zweiten Nachthälfte deutliche - Sichtreduktion wurde nahezu perfekt von der Simulation erfasst.

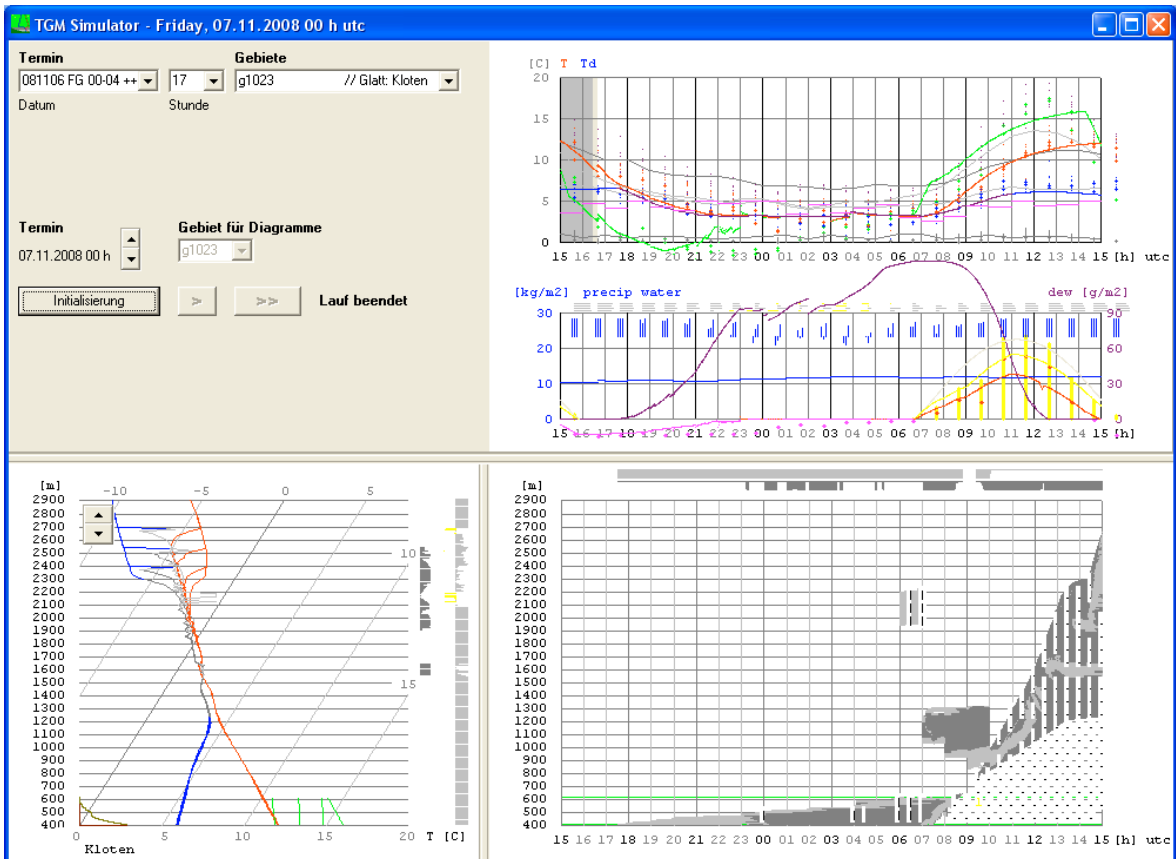


Abb. 5.21 TGM Lauf vom 7. November 2008/17 h UTC

Die Assimilation von 23 h UTC führte zu leicht erhöhten Taupunktdifferenzen. Damit nahm die Nebelschicht zu langsam zu und die Sichtreduktionen wurden in diesem Lauf nicht genügend stark simuliert.

Die Nebelauflösung wurde jeweils zu früh simuliert.

Der 8. November war wieder ein wolkenfreier Tag mit praktisch voller Sonneneinstrahlung (nach Auflösung des Morgennebels um 10 h UTC) und deutlichem Tagesgang der Temperatur. Der Tagesgang erzeugte eine konvektiv gut durchmischte Schicht.

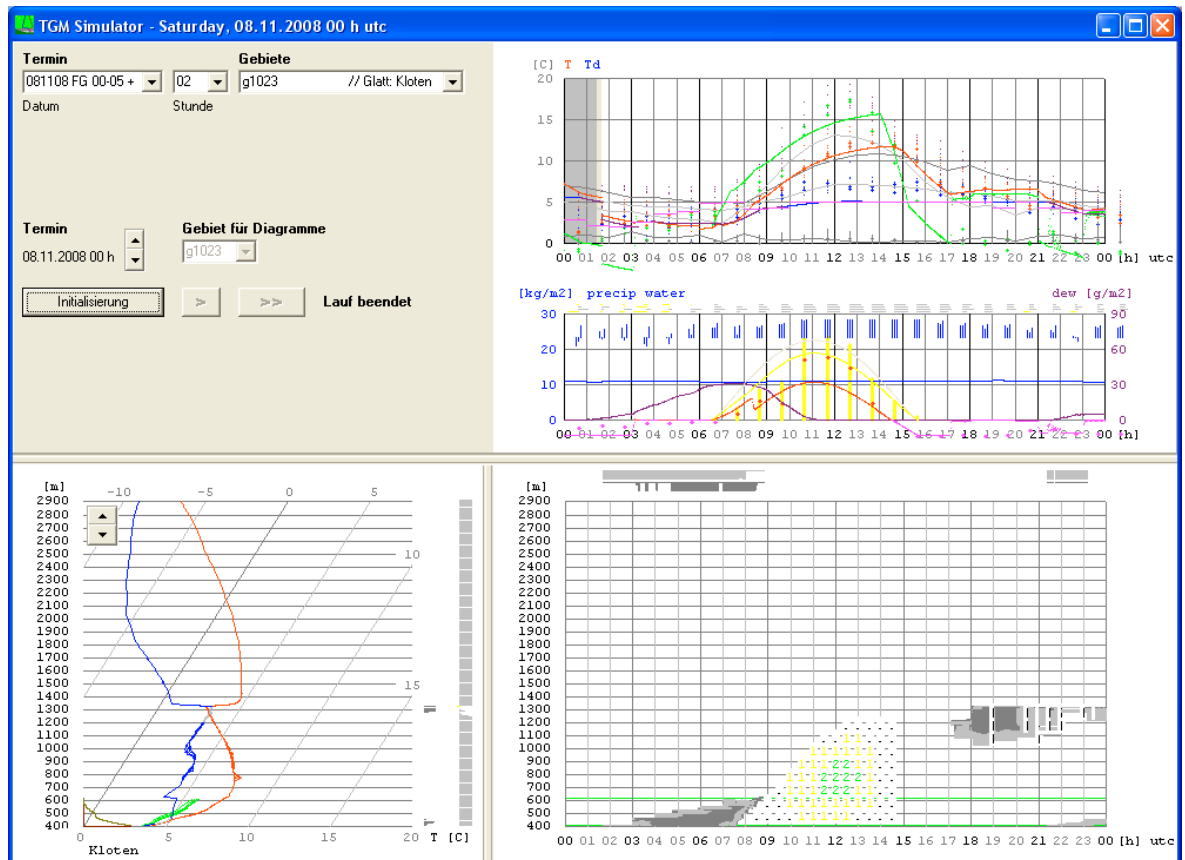


Abb. 5.22 TGM Lauf vom 8. November 2008/02 h UTC

Im 08 h UTC TGM Lauf wurde die bodennahe Sichtreduktion in der zweiten Hälfte der Folgenacht selbst bei aufziehenden Wolken bereits angedeutet, im 11 h UTC Lauf dann schon gut simuliert. Der 14 und 17 h UTC Lauf waren konsistent und sehr realitätsnah.

5.2 Fazit der TGM - COSMO-2 Nebelsimulationen

Aus der Verifikation der drei und einstündlichen TGM – COSMO-2 Läufe für 16 Nächte mit unterschiedlichen Sichtreduktionen „kondensierten“ die folgende Erkenntnisse: der Vergleich der mit dem TGM – COSMO-2 berechneten Nebelbildung und -entwicklung mit gemessenen und beobachteten Sichtweiten fällt für einige Nächte bestechend realitätsnah aus. Die relevanten Prozesse sind im TGM offensichtlich enthalten. Insbesondere wird die von der langwelligigen Strahlung angetriebene interne Dynamik der Nebelschicht detailliert erfasst:

- Das relativ schnelle Abfallen der Horizontalsicht erfolgt beim strahlungsbedingten Umschlagen des Temperaturgradienten in den bodennahen Schichten.
- Das Abheben des Bodennebels zu tiefem Stratus erfolgt bei entsprechender Mächtigkeit der Nebelschicht strahlungsbedingt.
- Wolken über dem Nebel greifen in den Strahlungshaushalt ein und führen zu Verdünnung bis zu Auflösung.
- Die Nebelauflösung nach Sonnenaufgang erfolgt systematisch zu früh, insbesondere bei mächtigeren Nebelschichten, deren Umwandlung zu tiefem Stratus bereits vor Sonnenaufgang einsetzt. Die direkte Übernahme der kurzwelligen Strahlungswerte aus dem übergeordneten Modell genügt nicht, die entsprechenden Prozesse müssen im TGM intern ebenfalls parametrisiert und kalibriert werden.

Sequenzen von stündlichen TGM – COSMO-2 Simulationen weisen in gewissen Lagen bestechend konsistente Tendenzen über den gesamten Vorhersagehorizont von bis zu 22 Stunden auf. In anderen Lagen weisen Sequenzen von stündlichen TGM – COSMO-2 Simulationen übermäßige Fluktuationen bei der simulierten Nebelbildung und -entwicklung auf. Diese Fluktuationen weisen auf Konstellationen hin, in denen die Assimilation von Stationswerten und die Ankopplung an das übergeordnete Modell kritisch sind. Inversionslagen (mit tiefem Stratus/starkem Dunst) werden beispielsweise durch die gegenwärtige Ankopplung an das COSMO-2 und die Assimilation unzuverlässig erfasst. Nächtliche Sichtreduktionen nach konvektiven Tagen werden dagegen gut bis sehr gut erfasst.

- Die Assimilation von Stationswerten muss noch weiterentwickelt werden, um stabilere Ergebnisse bei aufeinanderfolgenden TGM Läufen zu erhalten. Insbesondere muss die Assimilation tiefen Stratus erfassen und ins TGM einbringen. An und nach konvektiven Tagen ist die Assimilation deutlich besser.
- Die Interaktion (durch Advektion) zwischen der Entwicklung von tiefem Stratus im COSMO-2 und den TGM internen Prozessen muss gegebenenfalls verhindert werden. Die Advektion muss in kritischen Fällen auf Höhen oberhalb des Stratus eingeschränkt werden, damit die beiden Modelle nicht interferieren.

6 Frost- und Bodenfrostvorhersage

Unterschreitet die Grastemperatur den Gefrierpunkt, tritt Bodenfrost auf. Bei Frost unterschreitet die 2m Temperatur den Gefrierpunkt. Der Gefrierpunkt ist der relevante Schwellwert für die Vorhersage von Frost und Bodenfrost.

Die von COSMO-2 bzw. TGM – COSMO-2 *berechneten* 2m- und Oberflächentemperaturen können mit den *gemessenen* 2m- und Grastemperaturen von Stationen verglichen werden. Die Güten der Vorhersagen für die 2m Temperatur und die Oberflächentemperatur sind speziell im Frostbereich von Interesse.

6.1 Verifikation von Vorhersagen

Meteorologische Parameter wie

- Temperatur [°C]
- Taupunkttemperatur [°C]
- Grastemperatur [°C]

werden messtechnisch erfasst (OBS) und mit Modellen vorausgesagt (PRE). Numerische Wettermodelle werden mit Beobachtungen $OBS(t_0)$ zum Termin t_0 initialisiert. Die Integration der Wettermodelle liefert vorhergesagte Zeitreihen $PRE(t_0+\Delta t)$ von meteorologischen Parametern. Zur Verifikation der Vorhersagen zur Zeit $t = t_0+\Delta t$ werden die vorhergesagten Parameter $PRE(t_0+\Delta t)$ mit den beobachteten Parametern $OBS(t_0+\Delta t)$ verglichen.

PRE

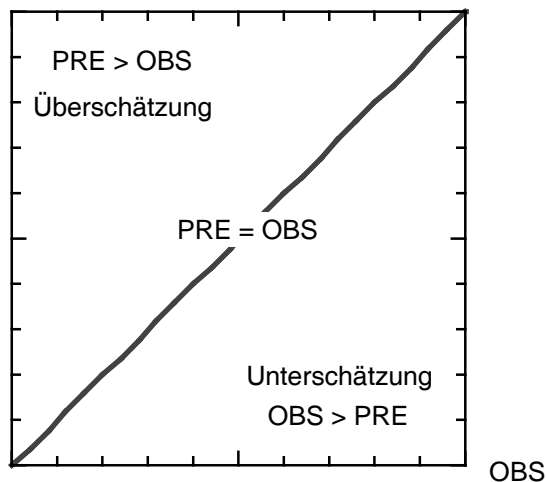


Abb. 6.23 Verifikationsdiagramm

In einem ersten Schritt können die Vorhersagen $PRE(t)$ und die Beobachtungen $OBS(t)$ in einem rechteckigen Verifikationsdiagramm dargestellt werden. Perfekte Vorhersagen liegen in einem solchen Diagramm auf der Diagonale. Unterschätzt die Vorhersage den beobachteten Parameter, liegen die Paare $(PRE(t), OBS(t))$ unterhalb der Diagonale, bei Überschätzung oberhalb.

6.2 Frost als Schwellwertunterschreitung

Frost (Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes) entspricht der Unterschreitung eines Schwellwertes ST (*strike*). Schwellwertunterschreitungen von Beobachtungen ($OBS < ST$) und Vorhersagen ($PRE < ST$) können verglichen werden.

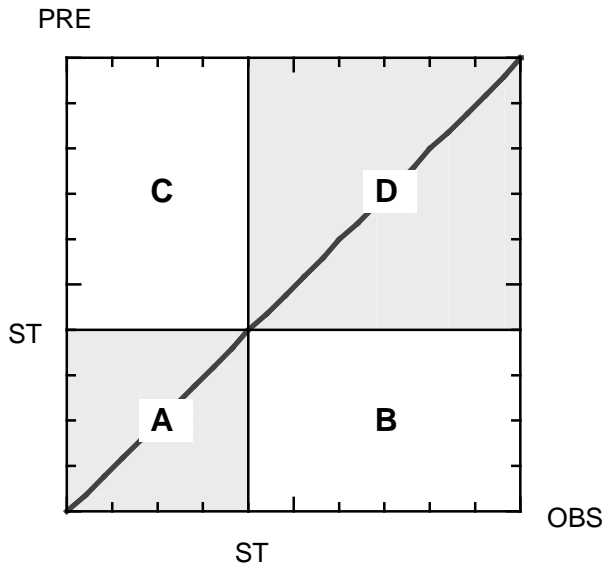


Abb. 6.24 Verifikationsdiagramm mit Schwellwert

Der Schwellwert ST unterteilt das rechteckige Verifikationsdiagramm in vier Sektoren. A, B, C und D sind die Anzahlen der verifizierten Vorhersagen in den einzelnen Bereichen:

- A Korrekte Detektion (*correct detection*) $PRE < ST$ und $OBS < ST$
- B Verpasste Zurückweisung (*missed rejection*) $PRE < ST$ und $OBS > ST$
- C Verpasste Detektion (*missed detection*) $PRE > ST$ und $OBS < ST$
- D Korrekte Zurückweisung (*correct rejection*) $PRE > ST$ und $OBS > ST$

B und C sind Fehlvorhersagen, A und D sind zutreffende Vorhersagen.

Bei einer perfekten Schwellwertvorhersage verschwinden die fehlerhaften Vorhersagen B und C ($B = C = 0$). Ausgewogene Fehlvorhersagen entsprechen $B = C$ (symmetrische Fehlvorhersagen).

A ist in der Regel kleiner als D ($A < D$): der Schwellwert wird weniger häufig unter- als überschritten.

PRE > ST Vorhergesagte Schwellwert <i>überschreitung</i>	C	D
PRE < ST Vorhergesagte Schwellwert- <i>unterschreitung</i>	A	B
	OBS < ST Beobachtete Schwellwert <i>unterschreitung</i>	OBS > ST Beobachtete Schwellwert <i>überschreitung</i>

Verifizierte Anzahlen A, B, C und D können tabelliert werden.

6.3 Detektions- und Fehlalarmquote

Die korrekten Detektionen A sollten einen grossen Anteil der beobachteten Schwellwertunterschreitungen A+C ausmachen. Die Detektionsquote POD (*probability of detection, hit rate*)

$$0 \ll \text{POD} = A / (A+C) \leq 1$$

sollte demnach möglichst nahe bei 1 sein.

Gleichzeitig sollte die Anzahl B von verpassten Zurückweisungen (Fehlalarme) einen geringen Anteil der vorhergesagten Schwellwertunterschreitungen A+B ausmachen. Die Fehlalarmquote FAR (*false alarm rate*)

$$0 \leq \text{FAR} = B / (A+B) \ll 1$$

sollte demnach nahe bei 0 sein.

Korrekte Zurückweisungen D gehen in diese beiden Quoten POD und FAR *nicht* ein.

6.4 ROC Diagramm

Für Schwellwertvorhersagen können die Detektionsquote POD und die Fehlalarmquote FAR im quadratischen ROC Diagramm (*relative operating characteristics*) gegeneinander aufgetragen werden.

Perfekte Schwellwertvorhersagen haben C=B=0 (d.h. POD=1 und FAR=0) und erscheinen im ROC Diagramm an der Ecke oben links. Unbrauchbare Schwellwertvorhersagen liegen in der Ecke unten rechts: für $A \ll B$ wird FAR annähernd 1, für $A \ll C$ wird POD annähernd 0.

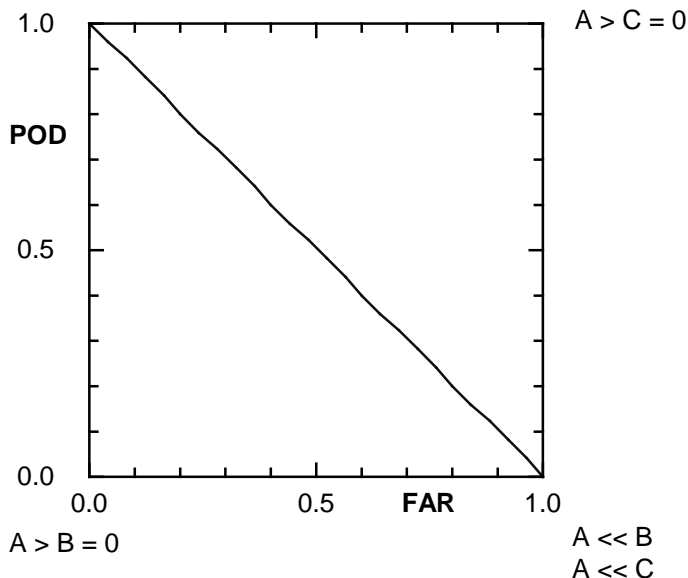


Abb. 6.25 ROC Diagramm

Bei ausgewogenen Fehlvorhersagen (C=B) wird die Summe

$$\text{POD} + \text{FAR} = A / (A+C) + B / (A+B) = A / (A+B) + B / (A+B) = 1$$

Im ROC Diagramm liegen ausgewogene Fehlvorhersagen auf der abfallenden Diagonale:

$$\text{POD} = 1 - \text{FAR}$$

Entlang der abfallenden Diagonale im ROC Diagramm nimmt die Güte der Schwellwertvorhersagen ab.

Unterhalb der Diagonale des ROC Diagrammes ist die Vorhersage PRE höher als die Beobachtung OBS ($C > B$), oberhalb der Diagonale umgekehrt ($C < B$).

6.5 Güte als strenge Quote

Die Güte S (*skill*) einer verifizierten Schwellwertvorhersage kann als Quote der korrekten Detektionen A und der korrekten Detektionen A erhöht um die Fehlvorhersagen $B+C$ definiert werden:

$$S = A / (A+B+C)$$

Diese Güte S ist ein eher *strenges* Gütemass, da korrekte Zurückweisungen D nicht berücksichtigt werden.

Der Wertebereich von S beträgt $0 < S < 1$. Eine perfekte Vorhersage (keine Fehlvorhersagen: $B=C=0$) erhält die maximale Güte 1. Treten Fehlvorhersagen gleich häufig auf wie korrekte Detektionen ($B+C = A$) geht die Güte auf 0.5 zurück. Bei Fehlvorhersagen ($B+C > 0$) ohne korrekte Detektionen ($A=0$) wird die Güte 0.

Die Güte S kann auch durch die Detektionsquote POD und die Fehlalarmquote FAR ausgedrückt werden:

$$1/S = (A+B+C)/A = 1 + B/A + C/A$$

Die Quoten B/A und C/A können durch POD und FAR ersetzt werden:

$$B/A = FAR / (1-FAR) \quad C/A = (1-POD)/POD$$

Die Güte S ergibt sich als:

$$1/S = 1 + FAR / (1-FAR) + (1-POD)/POD$$

Isolinien $POD(FAR)$ zu vorgegebener Güte $0 < S < 1$ berechnen sich als

$$1/POD = 1/S - FAR/(1-FAR)$$

und können im nachstehenden ROC Diagramm (links) für $FAR < 1/(1+S)$ dargestellt werden:

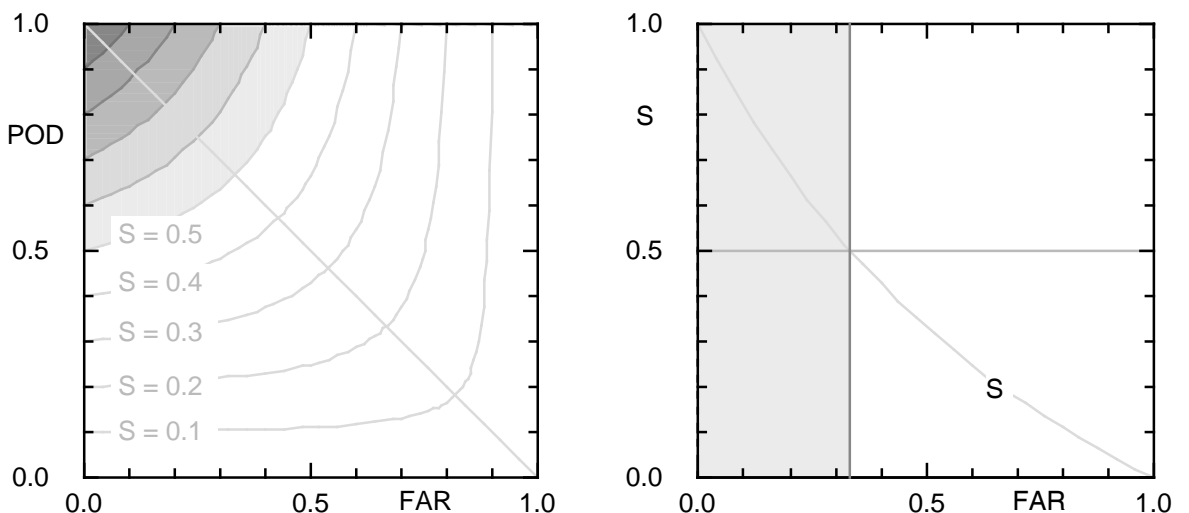


Abb. 6.26 ROC Diagramm mit Linien gleicher Güte S (links). Abfall der Güte S entlang der Diagonale im ROC Diagramm (rechts).

Schwellwertvorhersagen erreichen Güte, wenn die Detektionsquote POD und die Fehlalarmquote FAR im ROC Diagramm in den schattierten Bereich oben links zu liegen kommen ($A > B+C$ bzw. $S > 0.5$).

Die Güte S nimmt entlang der abfallenden Diagonale (B=C: POD = 1 - FAR) des ROC Diagrammes ab:

$$1/S = 1 + 2 \text{ FAR} / (1-\text{FAR})$$

Dieser Verlauf ist vorstehend im rechten Diagramm dargestellt.

6.6 Güte als wohlwollende Quote

Alternativ zu S kann die Güte einer verifizierten Schwellwertvorhersage auch als Quote *aller* korrekten Vorhersagen $A+D$ und der korrekten Vorhersagen $A+D$ erhöht um die Fehlvorhersagen $B+C$ definiert werden:

$$S_{\alpha} = (A+D) / (A+D + B+C)$$

Diese Güte S_{α} ist ein *wohlwollenderes* Gütemass als S ($S_{\alpha} > S$), da korrekte Zurückweisungen D ebenfalls eingehen. Der Wertebereich von S_{α} ist $0 < S < S_{\alpha} < 1$.

Auch die Güte S_{α} kann durch die Detektionsquote POD und die Fehlalarmquote FAR ausgedrückt werden:

$$1/S_{\alpha} = (A+D + B+C)/(A+D) = (1 + D/A + B/A + C/A) / (1+D/A)$$

Die Quoten B/A und C/A können durch POD und FAR ersetzt werden:

$$B/A = FAR / (1-FAR) \quad C/A = (1-POD)/POD$$

Die Güte S_{α} ergibt sich als:

$$1/S_{\alpha} = 1 + \alpha (FAR / (1-FAR) + (1-POD)/POD)$$

mit

$$\alpha = 1/(1+D/A), \quad 0 < \alpha < 1.$$

$D=0$ führt auf $\alpha=1$ ($S_{\alpha=1} = S$). $D=A$ führt auf $\alpha=1/2$ (korrekte Zurückweisungen D und korrekte Detektionen A sind ausgewogen). $D=2A$ führt auf $\alpha=1/3$ (korrekte Zurückweisungen D doppelt so häufig wie korrekte Detektionen A). α wird sehr klein, wenn $D \gg A$. Die Sensitivität von S_{α} auf Fehlvorhersagen $B+C$ wird für $D \gg A$ sehr schwach. In solchen Fällen ist S_{α} als Gütemass ungeeignet.

Isolinien $POD(FAR)$ vorgegebener Güte $0 < S_{\alpha} < 1$ und Strenge $0 < \alpha < 1$ berechnen sich als

$$1/POD = 1 + (1/S_{\alpha}-1)/\alpha - FAR/(1-FAR)$$

und können im ROC Diagramm (links, $\alpha=1/3$, $D=2A$) dargestellt werden:

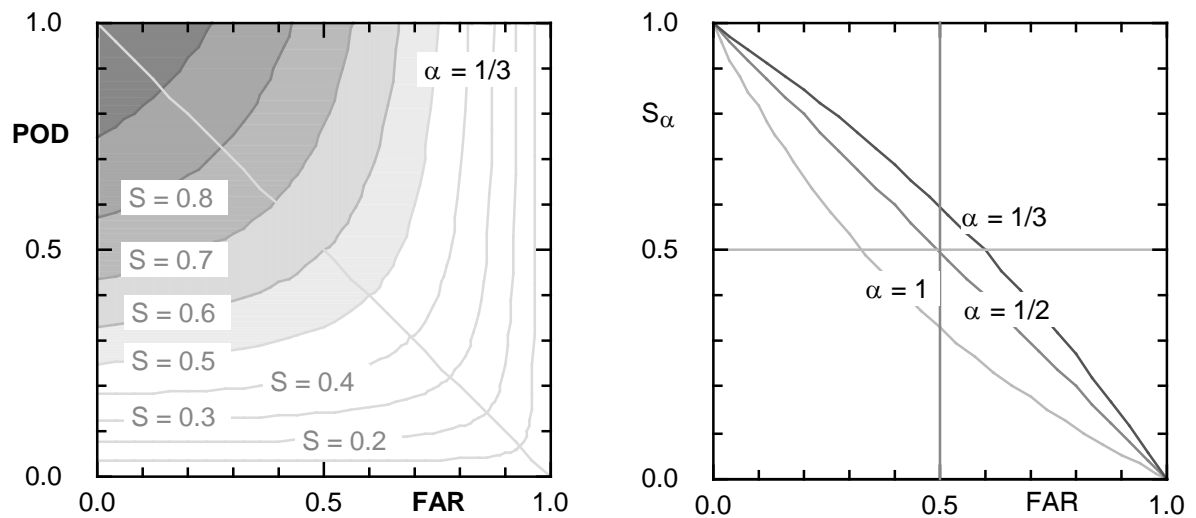


Abb. 6.27 ROC Diagramm mit Linien gleicher Güte S_α (links). Abfall der Güte S_α entlang der Diagonale im ROC Diagramm (rechts).

Schwellwertvorhersagen erreichen Güte S_α , wenn Detektionsquote POD und Fehlalarmquote FAR im ROC Diagramm in den schattierten Bereich oben links zu liegen kommen ($A+D > B+C$ bzw. $S_\alpha > 0.5$).

Die Isolinien von S_α weisen bei $FAR = 1/(1+\beta)$ einen Pol auf: $\beta = 1 + (1/S_\alpha - 1)/\alpha$

Die Güte S_α nimmt entlang der abfallenden Diagonale ($B=C$: $POD = 1 - FAR$) des ROC Diagrammes ab:

$$1/S_\alpha = 1 + 2 \alpha FAR / (1-FAR)$$

Dies ist vorstehend im rechten Diagramm für verschiedene Werte von α dargestellt.

6.7 Güte als Differenz

Alternativ zur Quote kann Güte auch als Differenz definiert werden

$$S_D = \text{POD} - \text{FAR}$$

mit dem Wertebereich $-1 \leq S_D \leq 1$.

Linien gleicher Güte S_D sind im ROC Diagramm (links) Geraden parallel zur Diagonale $\text{POD} = \text{FAR}$, die der Güte $S_D = 0$ entspricht. Alle Punkte auf der Diagonale von unten links ($\text{FAR} = 0, \text{POD} = 0$), über das Zentrum ($\text{FAR} = 1/2, \text{POD} = 1/2$) und oben rechts ($\text{FAR} = 1, \text{POD} = 1$) weisen nach S_D die gleiche Güte 0 auf. S_D ist gegenüber asymmetrischen Vorhersagefehlern ($B <> C$) indifferent und deshalb ungeeignet für die Identifikation von nicht ausgewogenen Fehlvorhersagen. Die minimale Güte $S_D = -1$ wird im ROC Diagramm an der Ecke unten rechts ($\text{FAR}=1, \text{POD} = 0$) erreicht.

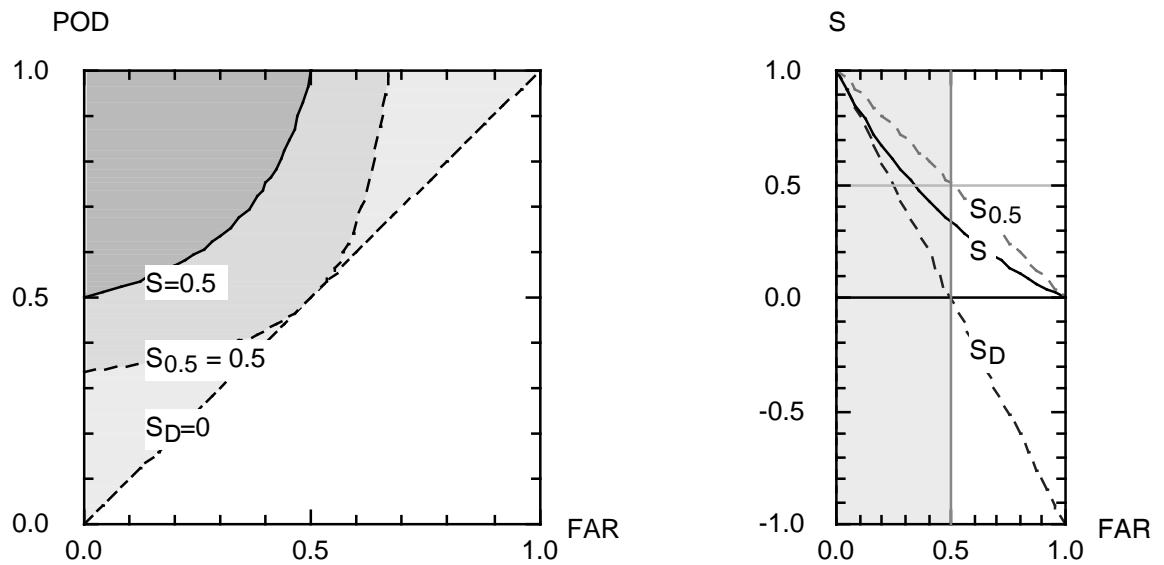


Abb. 6.28 ROC Diagramm mit Linien gleicher Güten S, S_α und S_D (links). Abfall der Güten S, S_α und S_D entlang der Diagonale im ROC Diagramm (rechts).

Entlang der abfallenden Diagonale $\text{POD} = 1 - \text{FAR}$ nimmt die Güte S_D linear auf -1 ab:

$$S_D = 1 - 2 \text{FAR}$$

Die Güteschwelle von $S_D = 0$ wird für das halbe ROC Diagramm erreicht.

6.8 Verifikationstermine und Integrationszeit

Beobachtungen $OBS(t)$ können mit Vorhersagen $PRE(t_0+\Delta t)$ unterschiedlicher Initialisierungstermine t_0 und Integrationszeiten Δt verglichen werden. Das COSMO-2 Modell wurde alle drei Stunden und das COSMO-2/TGM Modell stündlich initialisiert. Die Vorhersagen wurden stündlich verifiziert mit Beobachtungen der Station Kloten.

- $T = 1h$ Zeitschritt für Initialisierung und Verifikation
- $t_{ref} = 30.09.08\ 23:40$ Referenztermin (UTC)
- $t_0 = t_{ref} + m T$ Initialisierungstermin
- $0 < m < 1684$ Index m für Initialisierungstermine 1.10.08 – 12.12.08
- $2954 < m < 4408$ Index m für Initialisierungstermine 1.02.09 – 2.4.09
- $\Delta t = n T$ Integrationszeit (Laufzeit ab letztem Assimilationstermin)
- $0 < n < 22$ Index n für die Integrationszeit bis zum Verifikationstermin
- $t_0+\Delta t = t_{ref} + (m+n) T$ Verifikationstermin COSMO-2/TGM (hh:40),
Beobachtungstermin Station Kloten
- $t_{ref} + (m+n) T + 20\ min$ Verifikationstermin COSMO-2 (zur vollen Stunde)
- $(m+n) \text{ modulo } 24$ Verifikationstermin als Tageszeit in Stunden (UTC)
- $S(t_0, \Delta t) = S(m, n)$ Güte in Abhängigkeit der Initialisierungstermine m
und der Integrationszeiten n

6.9 Verifikation der Frostvorhersagen

Die Güte der Schwellwertvorhersagen von COSMO-2/TGM für

- Frost Schwellwert $ST_{T_{2m}} = 0^{\circ}\text{C}$ für die 2m Temperatur
- Bodenfrost Schwellwert $ST_{T_{5cm}} = 0^{\circ}\text{C}$ für die Grastemperatur

für die Station Kloten (436 m.ü.M) wird mit dem strengeren Gütemass S(A,B,C) ermittelt:

- Ausgewogene Fehlvorhersagen (B=C) werden favorisiert
- Korrekte Zurückweisungen D werden nicht berücksichtigt
- Um die Sensitivität von S auf Fehlvorhersagen B+C zu maximieren, wird die Gütebestimmung von Frost- und Bodenfrostvorhersagen auf den Temperaturbereich

$$-5^{\circ}\text{C} < T_{\text{OBS}} < +5^{\circ}\text{C}$$

eingeschränkt. Damit tragen korrekte Detektionen A bei beobachteten Temperaturen unterhalb -5°C *nicht* zur Güte bei. Fehlvorhersagen B bei beobachteten Temperaturen oberhalb $+5^{\circ}\text{C}$ werden auch nicht berücksichtigt.

Der eingeschränkte Temperaturbereich für die Frostverifikation ist in den nachfolgenden Verifikationsdiagrammen **grau** hinterlegt.

Eine engere Wahl des Temperaturbereiches für die Verifikation reduziert die Güte S absolut, da die berücksichtigten korrekten Detektionen A stärker zurückgehen als die Fehlvorhersagen B+C. Umgekehrt erhöht eine weitere Wahl des Temperaturbereiches die Güte S.

Frost und Bodenfrost werden mit prognostischen Variablen der beiden Modelle

- COSMO-2 2m Temperatur am Gitterpunkt Gebiet Kloten
- COSMO-2/TGM 2m Temperatur in Schicht 430 m.ü.M für Gebiet Kloten

verifiziert.

Die Güte S der Vorhersagen beider Modelle wird ermittelt.

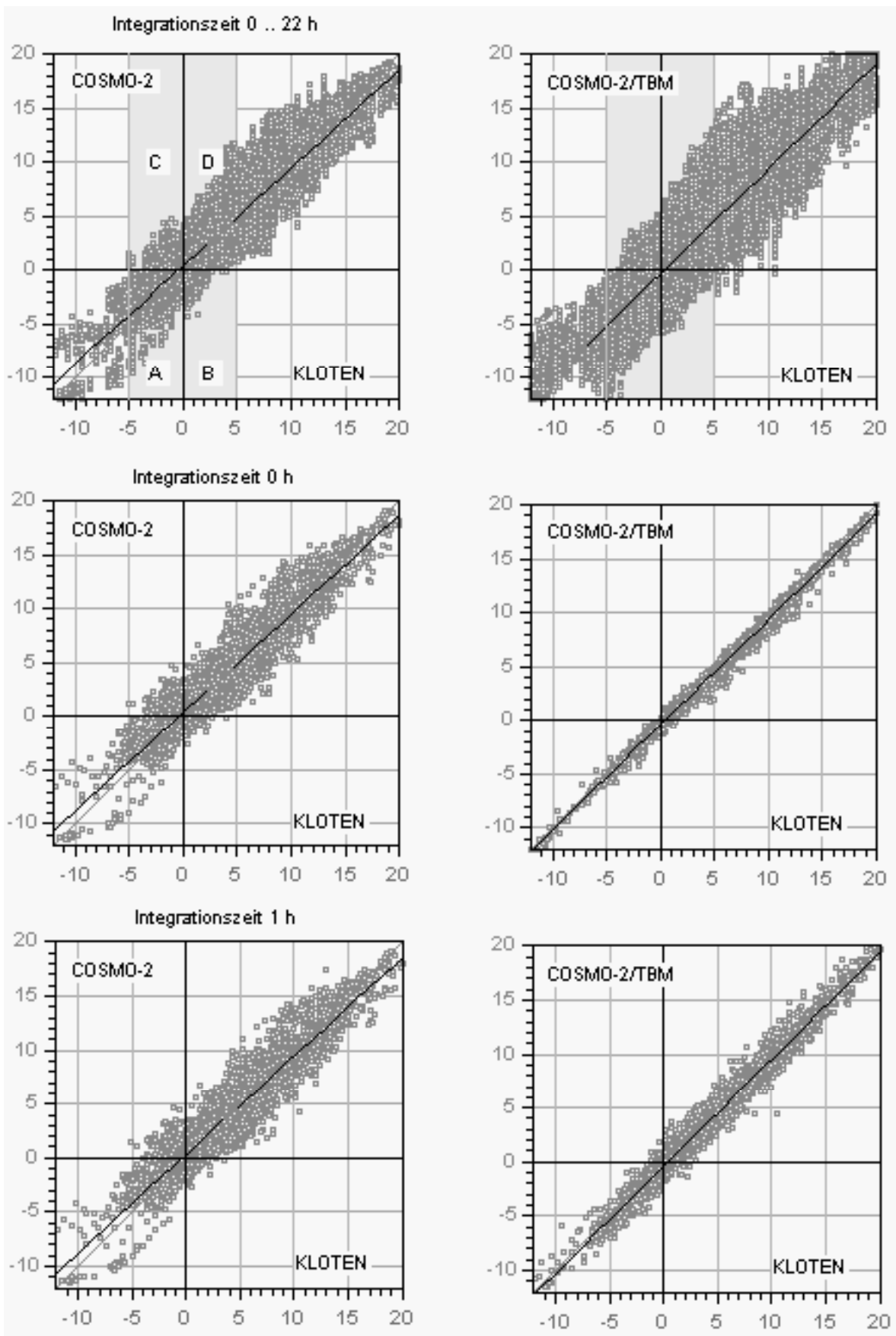


Abb. 6.29 Verifikationsdiagramme COSMO-2 (links) und COSMO-2/TGM (rechts)

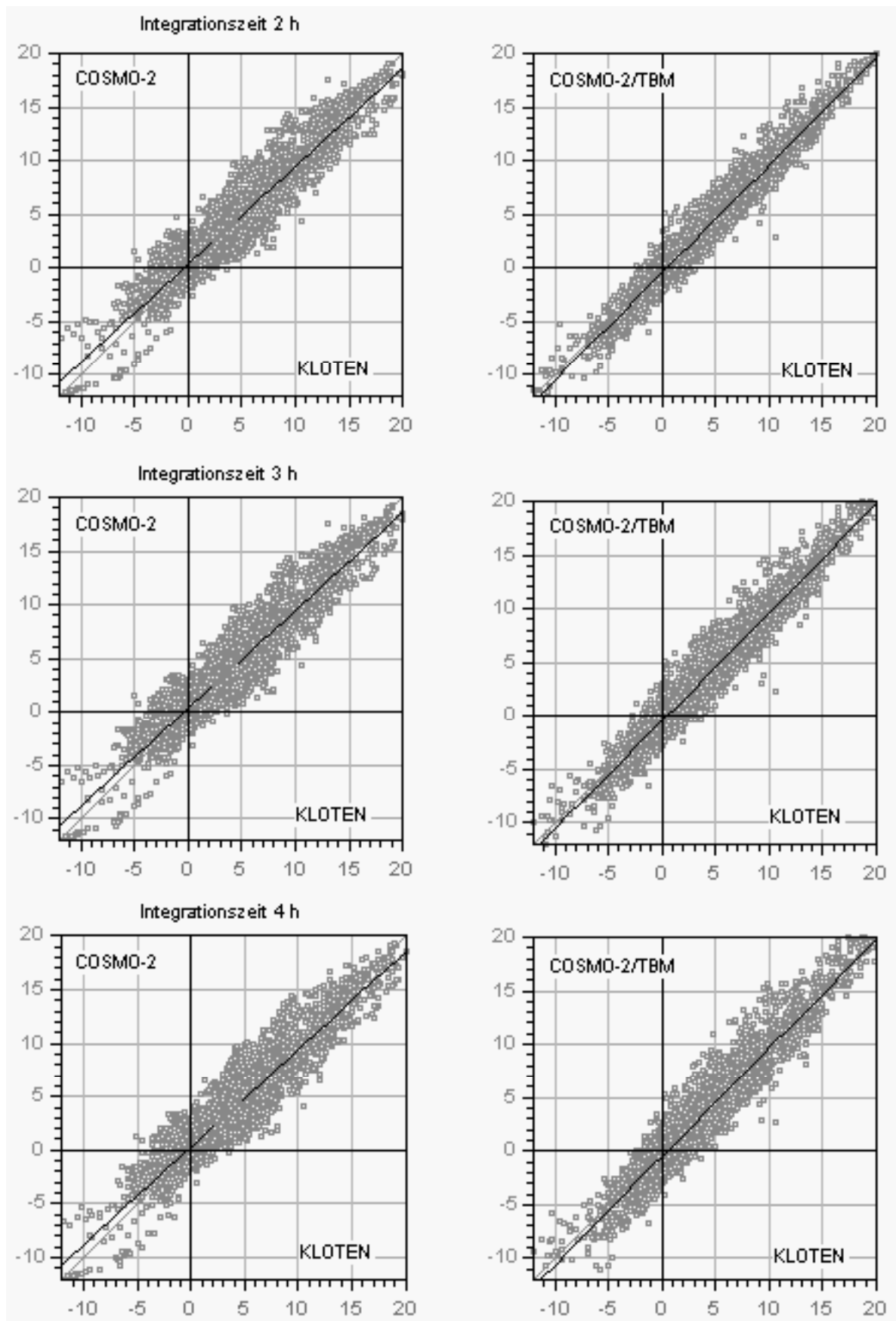


Abb. 6.30 Verifikationsdiagramme COSMO-2 (links) und COSMO-2/TGM (rechts)

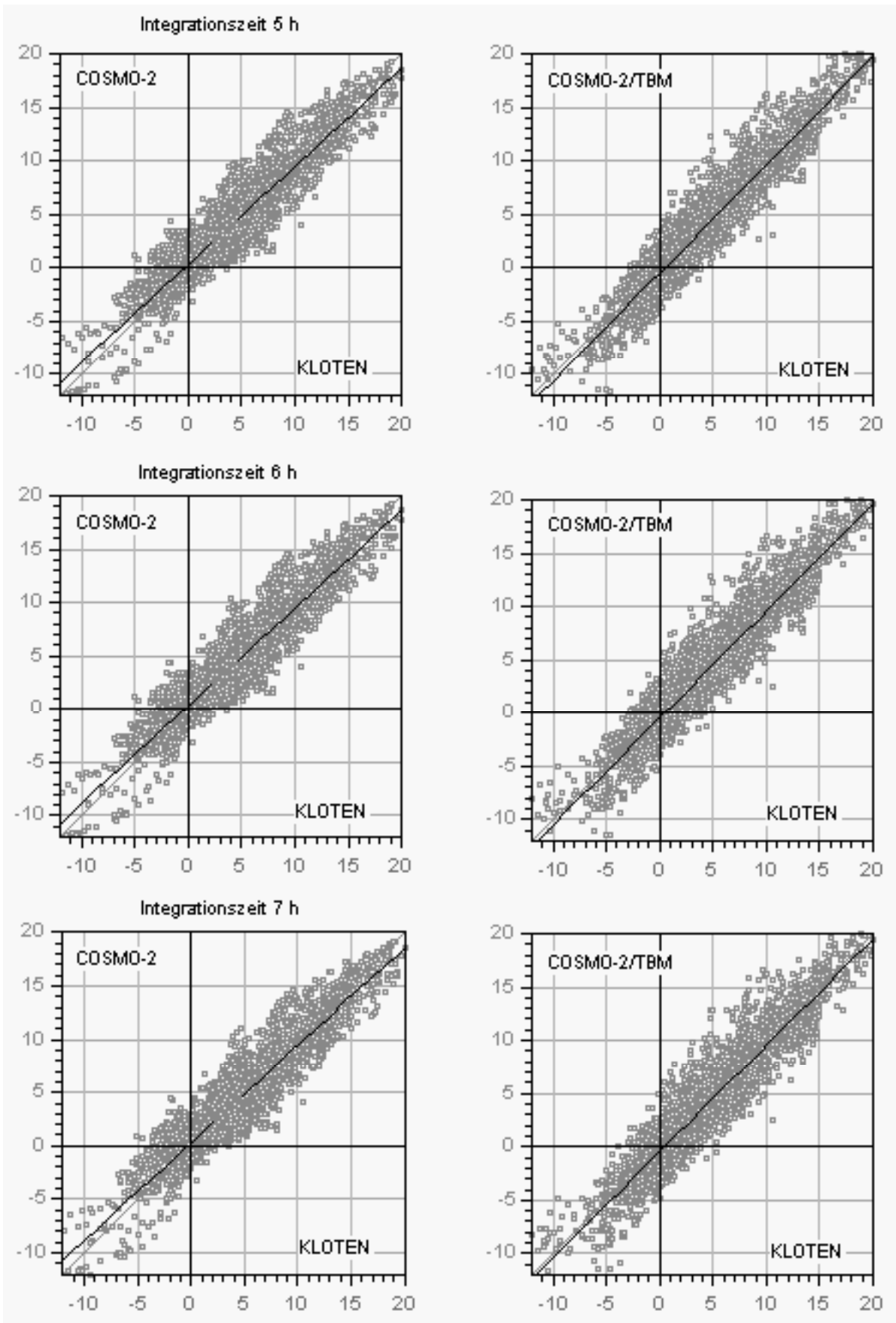


Abb. 6.31 Verifikationsdiagramme Frost für COSMO-2 (links) und COSMO-2/TGM (rechts)

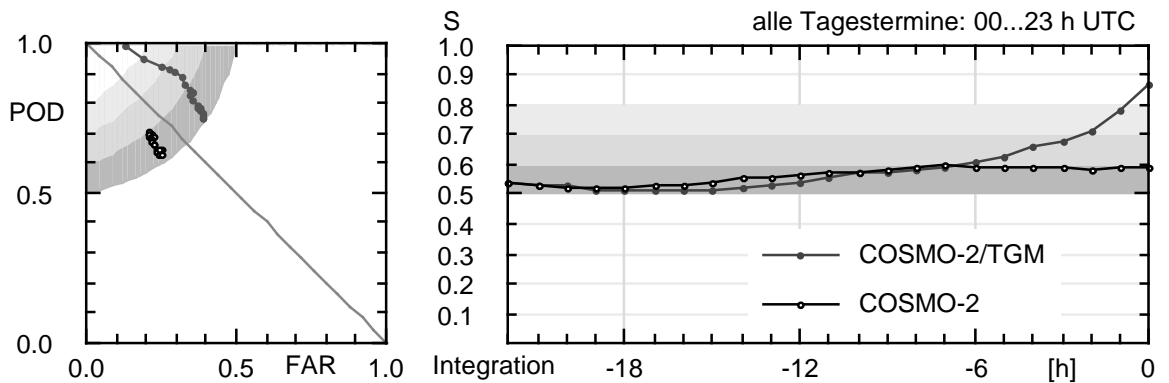


Abb. 6.32 Verifizierte Frostvorhersagen für alle Tagestermine (00 – 23 h UTC) im ROC Diagramm (links) und als zeitliche Entwicklung (rechts)

Die Güte der COSMO-2 Frostvorhersagen ($-5^{\circ}\text{C} < T_{\text{obs}} < +5^{\circ}\text{C}$) hängt nur schwach von der Modellintegrationszeit ab und erreicht im Mittel 56%.

Die Güte der COSMO-2/TGM Frostvorhersagen ist im Kurzfristbereich am höchsten und erreicht zum Assimilationstermin 86%. Im Langfristbereich geht die Güte bis auf 51% zurück und nähert sich dem COSMO-2. Im Mittel über alle Modellintegrationszeiten erreicht die Güte 59%.

Bei Integrationszeiten bis sechs Stunden übertrifft die Güte des COSMO-2/TGM die Güte der reinen COSMO-2 Vorhersagen für Frost. Die Assimilation von Stationstemperaturen durch das TGM wirkt sich im Kurzfristbereich günstig aus.

Das COSMO-2 überschätzt um den Frostpunkt ($-5^{\circ}\text{C} < T_{\text{obs}} < +5^{\circ}\text{C}$) die vorhergesagten Temperaturen für alle Tagestermine (00 – 23 h) leicht. Damit kommen die Verifikationen *unterhalb* der Diagonale im ROC Diagramm zu liegen.

Das COSMO-2/TGM andererseits kühlt um den Frostpunkt ($-5^{\circ}\text{C} < T_{\text{obs}} < +5^{\circ}\text{C}$) etwas zu stark ab: die Verifikationspunkte kommen im ROC Diagramm *oberhalb* der Diagonale zu liegen.

Die Vorhersagegüte des COSMO-2/TGM für ausgewählte Tageszeiten variiert. Die Tageszeiten des Pendlerverkehrs

- am Morgen (03-07 h UTC)
- am Abend (15-19 h UTC)

sind von besonderem Interesse für den Unterhaltsdienst.

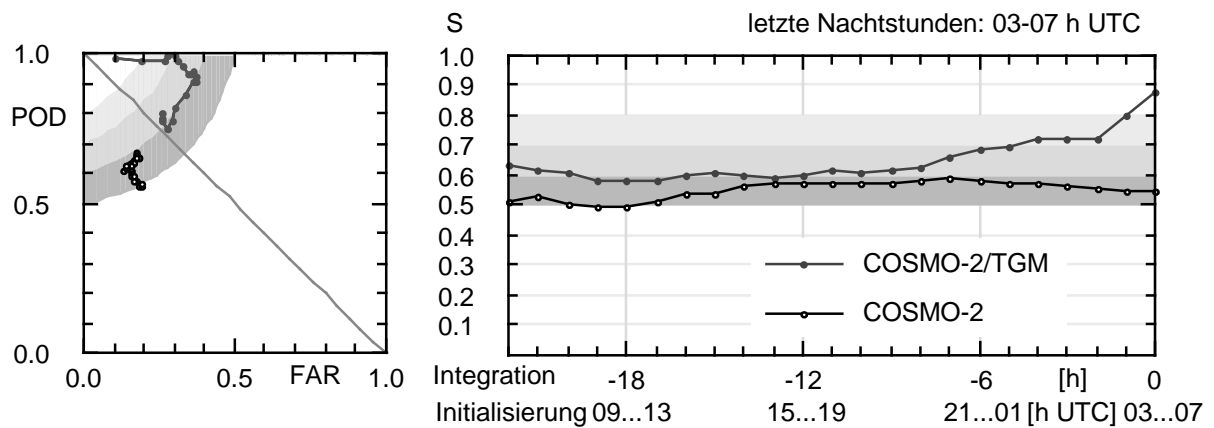


Abb. 6.33 Verifizierte Frostvorhersagen für den Morgenverkehr (03 – 07 h UTC) im ROC Diagramm (links) und als zeitliche Entwicklung (rechts)

Die ermittelte Güte von Frostvorhersagen für den Morgenverkehr ist beim COSMO-2/TGM für alle Vorhersageperioden bis 22 h höher (Mittelwert 65%) als beim COSMO-2 (Mittelwert 55%).

Das COSMO-2 ist für Frost während des Morgenverkehrs durchwegs zu warm, das COSMO-2/TGM dagegen zu kalt (ROC Diagramm).

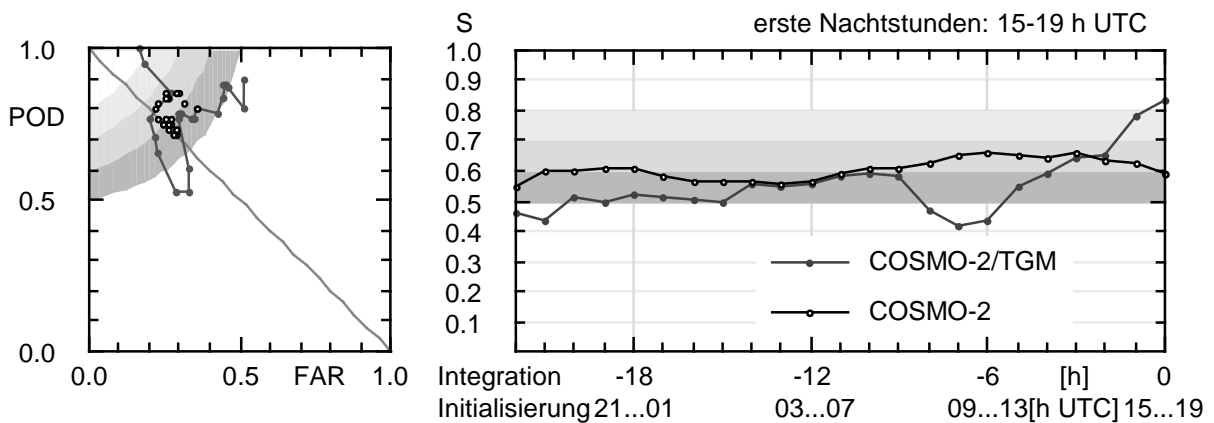


Abb. 6.34 Verifizierte Frostvorhersagen für den Abendverkehr (15 – 19 h UTC) im ROC Diagramm (links) und als zeitliche Entwicklung (rechts)

Für den Abendverkehr ergibt die Ergänzung des COSMO-2 durch das TGM eine Steigerung der Vorhersagegüte für Frost nur im extremen Kurzfristbereich. Die hohe Güte (84%) zum Assimilationstermin geht mit zunehmendem Vorhersagehorizont rasch unter die Güte des COSMO-2 zurück.

Das COSMO-2 ist für Frost in den ersten Nachtstunden im Mittel ganz leicht zu kalt. Für die Initialisierungstermine bei Tag ist das COSMO-2/TGM zu warm (ROC Diagramm). Das COSMO-2/TGM überschätzt die Tageserwärmung in den Tagesläufen.

6.10 Verifikation der Bodenfrostvorhersagen

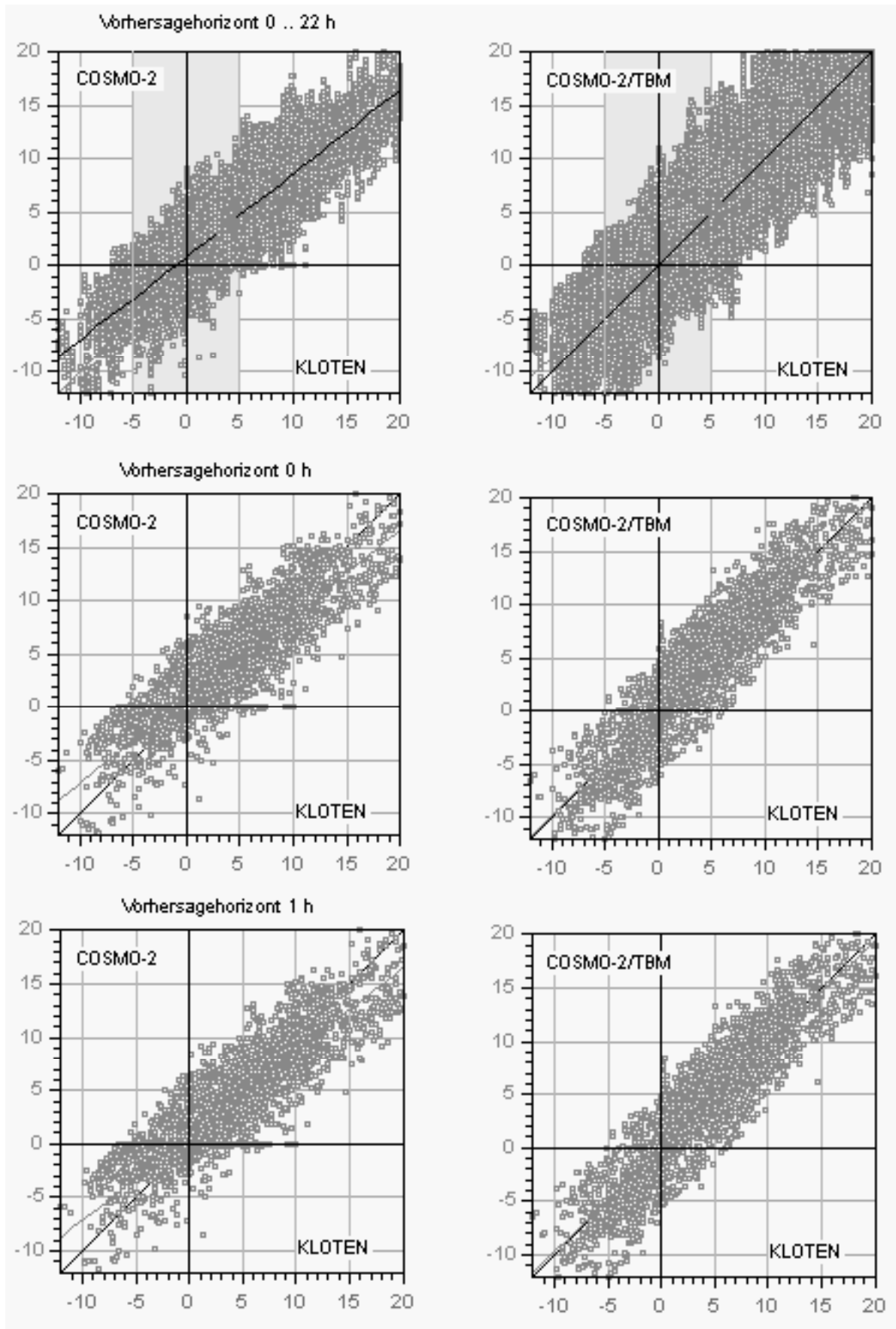


Abb. 6.35 Verifikationsdiagramme Bodenfrost für COSMO-2 (links) und COSMO-2/TGM (rechts)

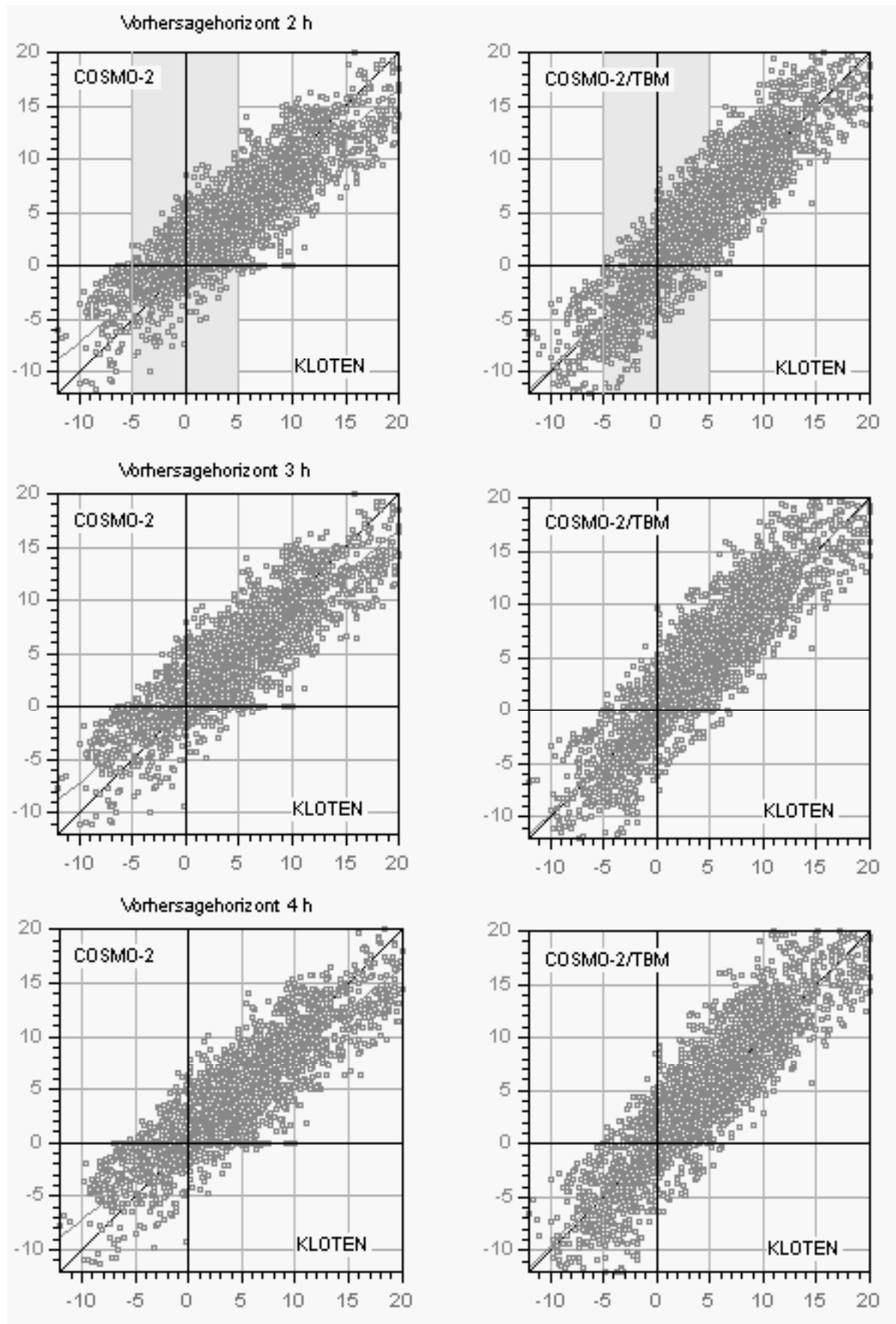


Abb. 6.36 Verifikationsdiagramme Bodenrost für COSMO-2 (links) und COSMO-2/TGM (rechts)

Die COSMO-2 Vorhersagen der Bodenoberflächentemperatur sind gegenüber den Beobachtungen (Grastemperatur) im Frostbereich zu warm, bei +4°C im Mittel richtig und bei höheren Temperaturen zu kühl. Für COSMO-2/TGM sind die Abweichungen sowohl im Frostbereich als auch bei höheren Temperaturen geringer.

Die beobachtete Grastemperatur kann von beiden Modellen grundsätzlich mit geringerer Güte vorhergesagt werden als Frost. Der verwendete Temperaturbereich

$$-5^{\circ}\text{C} < T_{\text{OBS}} < +5^{\circ}\text{C}$$

erfasst die für Bodenrost aufgetretenen Fehlvorhersagen B+C nicht ganz vollständig. Er wurde für die Vergleichbarkeit der beiden Vorhersagegüten Frost und Bodenrost trotzdem beibehalten.

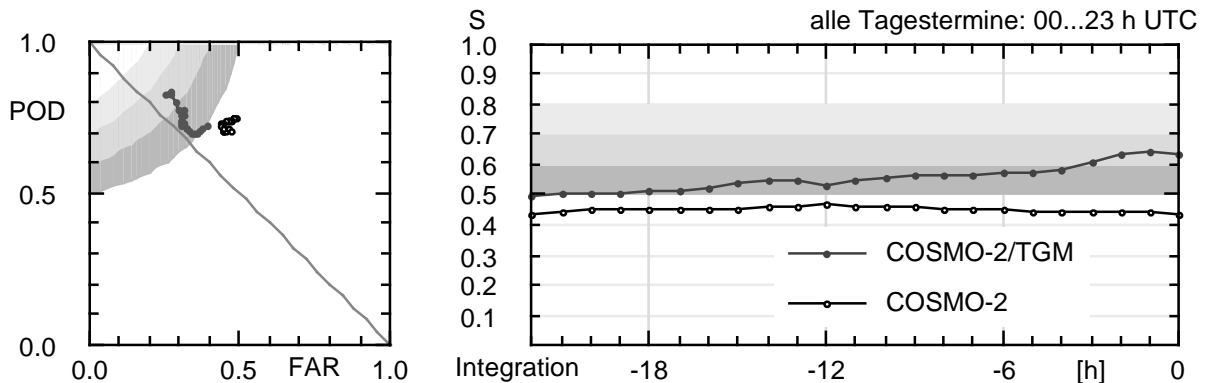


Abb. 6.37 Verifizierte Bodenrostvorhersagen für alle Tagestermine (00 – 23 h UTC) im ROC Diagramm (links) und als zeitliche Entwicklung (rechts)

Die für alle Vorhersageperioden höhere Güte des COSMO-2/TGM für Bodenrostvorhersagen deutet darauf hin, dass die Bodenoberflächentemperatur im TGM systematisch besser modelliert ist als im COSMO-2. Die hohe Güte der Frostvorhersagen zum Assimilationstermin wird für Bodenrost nicht ganz erreicht, da die Grastemperatur vom TGM *nicht* assimiliert wird. Die Grastemperatur wird aus den berechneten Strahlungsflüssen und der assimilierten Lufttemperatur diagnostiziert.

Das COSMO-2 und das COSMO-2/TGM unterschätzen um den Frostpunkt ($-5^{\circ}\text{C} < T_{\text{obs}} < +5^{\circ}\text{C}$) die Bodenoberflächentemperaturen für alle Tagestermine (00 – 23 h) leicht. Damit kommen die Verifikationen *oberhalb* der Diagonale im ROC Diagramm zu liegen.

Die Vorhersagegüte des COSMO-2/TGM für ausgewählte Tageszeiten variiert. Die Tageszeiten des Pendlerverkehrs

- am Morgen (03-07 h UTC)
- am Abend (15-19 h UTC)

sind von besonderem Interesse für den Unterhaltsdienst.

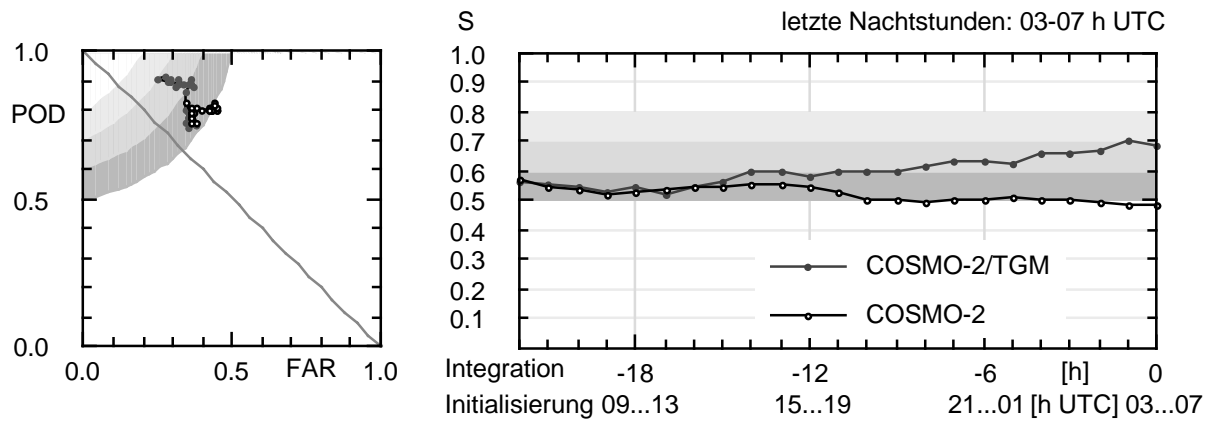


Abb. 6.38 Verifizierte Bodenfrosthvorhersagen für den Morgenverkehr (03 – 07 h UTC) im ROC Diagram (links) und als zeitliche Entwicklung (rechts)

Die ermittelte Güte von Bodenfrosthvorhersagen für den Morgenverkehr ist beim COSMO-2/TGM für alle Vorhersageperioden bis 15 h höher (Mittelwert 60%) als beim COSMO-2 (Mittelwert 52%).

Das COSMO-2 ist für Bodenrost während des Morgenverkehrs durchwegs zu kalt, das COSMO-2/TGM ebenfalls (ROC Diagramm).

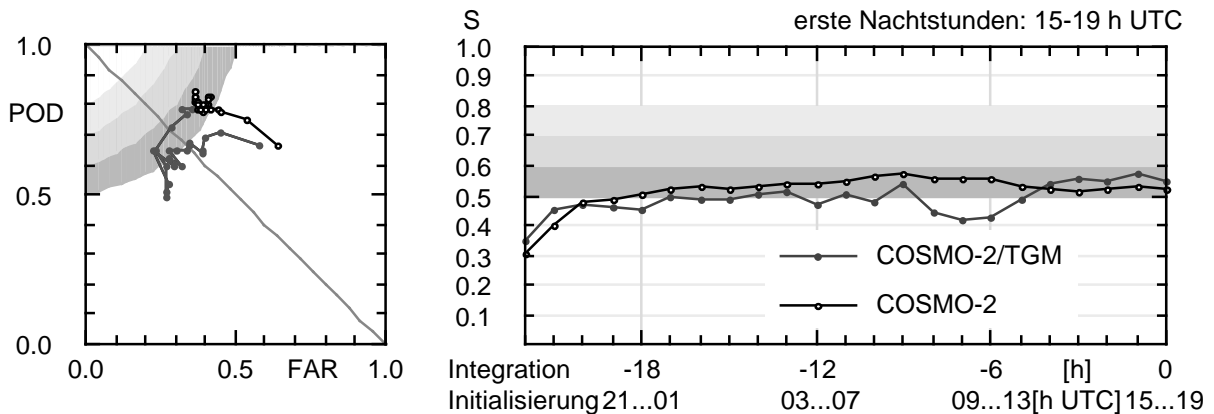


Abb. 6.39 Verifizierte Bodenfrosthvorhersagen für den Abendverkehr (15 – 19 h UTC) im ROC Diagram (links) und als zeitliche Entwicklung (rechts)

Für den Abendverkehr ergibt die Ergänzung des COSMO-2 durch das TGM keine Steigerung der Vorhersagegüte für Frost.

Das COSMO-2 ist für die Bodenoberflächentemperatur in den ersten Nachtstunden im Mittel zu kalt. Für die Initialisierungstermine bei Tag ist das COSMO-2/TGM zu warm (ROC Diagramm). Das COSMO-2/TGM überschätzt in den Tagesläufen die Tageserwärmung und damit auch die Bodenoberflächentemperatur in den frühen Nachtstunden.

7 Sensitivität der TGM Simulationen

Die TGM Modellierung ist komplex und die Simulationen hängen von zahlreichen Einflussgrößen ab.

Gebietseinteilung nach der hydrologischen Struktur

- komplexe Topographie

Ankopplung an übergeordnetes Modell

- Initialisierung
- Advektion
- Kadenz
- Vorhersagezeitraum

Assimilation

- Stationsnetz (Dichte, Art, Höhe)
- Assimilationsverfahren
- Kadenz

TGM-interne, subskalige Prozesse

- Die Emissivität von Wolkentröpfchen ist proportional zum Wassergehalt. Damit wird die Reichweite der langwelligen Abstrahlung konzentrationsabhängig.
- Der langwellige Strahlungstransfer zwischen Treibhausgasen und zwischen kondensierten Oberflächen (Tröpfchen) haben in „dichten“ Wolken eine vergleichbare Reichweite.
- Windeinfluss auf die Skin-Temperatur
- Windeinfluss auf die Konkurrenz zwischen Kondensation an Aerosolen und Tauabscheidung in Bodennähe
- Transmission der kurzwelligen Strahlung durch Schichten mit Wolkenbedeckung

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

8.1 Operationeller Betrieb, Ausweitung und qualitative Verbesserungen

Die für den Flughafen Zürich und die Station Kloten in dieser Forschungsarbeit erreichte und dokumentierte Qualität der TGM – COSMO-2 Simulationen von Frost und Nebel legt den operationellen Betrieb dieses Vorhersagekonzeptes für den Flughafen Zürich nahe, die Ausweitung dieser Vorhersagen auf weitere Gebiete ebenfalls. Die nach konvektiven Tagen bereits bestehende Qualität der TGM – COSMO-2 Simulationen sollte sich auch bei Inversionslagen mit marginaler konvektiver Durchmischung erreichen lassen.

- Operationeller Betrieb des COSMO-2 - TGM für Kurzfristvorhersagen
- Ausdehnung auf weitere Gebiete
- Verbesserung der Vorhersagegüte durch Modellanpassungen und deren Verifikation mit Stationsmesswerten.

8.2 Darstellung von Lokalvorhersagen

Die Darstellung von Lokalvorhersagen in einem interaktiven Wetter-Browser erlaubt die interaktive Kopplung einer Karte mit Vorhersagegebieten und dem Zeit-Höhenquerschnitt der Gebietsvorhersage. Ein entsprechender Wetter-Browser wird für das Selbstbriefing von Piloten bereits im Flugwetterportal des Deutschen Wetterdienstes eingesetzt [Liechti, 2009]. Nach Anpassung auf die höhere geographische Auflösung der TGM Gebiete könnte ein entsprechender Wetter-Browser auch flächendeckende TGM Vorhersagen visualisieren.

8.3 Aktuelle streckenbezogene Reisewettervorhersage

Aktuelle und streckenbezogene Wettervorhersagen könnten einen Beitrag zur optimalen Durchführung von Strassenreisen leisten, in dem Wettereinflüsse vorzeitig erkannt und in die Reiseplanung (Route und Abfahrtszeitpunkt) einbezogen werden.

Der Zeithorizont von längeren Strassenreisen liegt mit mehreren Stunden im Kurzfristbereich von Wettervorhersagen. Eine zeitliche Auflösung der Reisewettervorhersage von einer Viertelstunde dürfte für mehrstündige Reisen genügen. Reisegeschwindigkeiten zwischen 50 und 100 km/h führen bei einer zeitlichen Auflösung von einer Viertelstunde auf eine entsprechende räumliche Auflösung der Vorhersagen von 25 bis 50 km. Für streckenbezogene Reisewettervorhersagen genügen diese Auflösungen.

Werden Wettervorhersagen entsprechend räumlich und zeitlich aufbereitet, ist die Datenmenge so gering, dass sie mit den im Mobilfunk verfügbaren Übertragungskapazitäten auf Fahrzeuge übertragen werden kann.

Die spezifische Aufbereitung von numerischen Wettervorhersagen für Strassenreisen würde die fortlaufende Aktualisierung von streckenbezogenen Strassenwettervorhersagen ermöglichen - vor und während einer Reise. Die Entwicklung entsprechender Aufbereitungs-, Übertragungs- und Verarbeitungsverfahren könnte einen Beitrag zur Durchführung von Strassenreisen leisten. Entsprechende Verfahren wurden für die meteorologische Planung von Streckensegelflügen bereits entwickelt [WMO, 2009] [Liechti, 2009]. Diese Verfahren müssten für die meteorologische Planung von Strassenreisen angepasst werden.

Winterthur, im Oktober 2010

Dr. O. Liechti

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
COSMO	Consortium for small scale modelling
COSMO-2	Operationelles Wettermodell von MeteoSchweiz mit 2.2 km Gitter
DataWareHouse	Datenbank von MeteoSchweiz
GTOPO30	US geological service. http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/gtopo30.html .
NWP	Numerical weather prediction (numerische Wettervorhersage)
SMART	Automatisches Flugwetter-Informationssystem von MeteoSchweiz
SwissNet	Meteorologisches Messnetz von MeteoSchweiz
TGM	Topographisches Grenzschichtmodell
WMO	World Meteorological Organization
ZH	Kanton Zürich

Literaturverzeichnis

[Baer, 2009]	Baer O, Aesch A: Nebel – die tückische Bodenwolke. <i>AeroRevue</i> , 10/2009, 30-31.
[COST, 2008]	Short range forecasting methods of fog, visibility and low clouds. ESSEM, COST Action 722, final report, EUR 22978.
[Crook, 2005]	Crook N A: Presentation of the World Weather Research Program Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting WSN05, Toulouse. (http://www.meteo.fr/cic/wsn05/DVD/ , Presentation).
[Hack, 2003]	Hack K H: Flugwetter. ISBN 3-9522668. Verlag <i>aviamet</i> .
[Kunkel, 1984]	Kunkel B: Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog model. <i>J Appl Meteor</i> , 23, 34-41.
[Liechti, 2007c]	Liechti O: Radiative cooling in still air. EMS 2007, http://www.cosis.net/abstracts/EMS2007/00357/EMS2007-J-00357.pdf
[Liechti, 2004a]	Liechti O: Lokal verstärkter Schneegriesel bei tiefem Stratus (Industrieschnee). <i>VSS</i> , No. 1084.
[Liechti, 2004b]	Liechti O: Topographical boundary layer model for road weather predictions, SIRWEC 2004, Bingen. <i>Annalen der Meteorologie</i> , 40, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.
[Liechti, 2007a]	Liechti O, Lorenzen E, Thehos R, Olofsson B and Olsson E : Verification of thermal forecasts with glider flight data. <i>Technical Soaring</i> , 31(2) :42-51.
[Liechti, 2007b]	Liechti O: Operational predictions of the potential flight distance for soaring in wind and thermals. EMS 2007, http://www.cosis.net/abstracts/EMS2007/00359/EMS2007-A-00359.pdf
[Liechti, 2009]	Liechti O : TopTask Wetter-Browser. <i>Aerokurier</i> , 6/2009, 87-90.
[Malardel, 2009]	Malardel S : Fondamentaux de Météorologie à l'école du temps. Verlag <i>Cépaduès</i> , ISBN 2.85428.851.3
[WMO, 2009]	WMO: Weather Forecasting for Soaring Flight. <i>WMO</i> , Technical Note No. 203, WMO-No. 1038.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

ARAMIS SBT

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 14. Februar 2011

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2006/601

Projekttitle: Vorhersagen von Frost und Nebel für Strassen

Enddatum: 31. Dezember 2010

Texte:

Zusammenfassung der
Projektresultate:

Die bestehende Verfahrenslücke zwischen Nowcasting als Extrapolationsmethode und numerischen Wettervorhersagen mit einem hochaufgelösten, 3-dimensionalen Strömungsmodell wird durch das topographische Grenzschichtmodell TGM geschlossen. Das TGM wurde an das operationelle COSMO-2 Modell von MeteoSchweiz angekoppelt und verwendet die aktuellsten Beobachtungen von Wetterstationen im Vorhersagegebiet. Kurz- und langwellige Strahlungsprozesse kontrollieren die bodennahe Entwicklung der atmosphärischen Grenzschicht in windschwachen Lagen und sind im TGM mit einer hohen vertikalen Auflösung von 10 m modelliert. Im Vorhersagebereich bis zu sechs Stunden resultiert daraus eine systematische Verbesserung der Vorhersagegüte für Frost und Bodenfrost, speziell für die Nachtstunden und in komplexer Topographie. Strahlungsnebel wird in seinem gesamten Lebenszyklus von der Entstehung über die Reifung zum tiefen Stratus bis zur Auflösung realitätsnah simuliert.

Zielerreichung: Die vorgenommene Evaluation von COSMO-2/TGM Vorhersagen für den Winter 2008/09 dokumentiert eine systematische Verbesserung der COSMO-2 Vorhersagen von Frost und Nebel in einem Gebiet mit komplexer Topographie im Kurzfristbereich bis zu sechs Stunden. Die Anwendbarkeit der evaluierten Vorhersagemethode im Strassenwinterdienst ist speziell für die Nacht- und Morgenstunden gegeben.

Folgerungen und
Empfehlungen: Verbesserte Lokalvorhersagen der bodennahen Lufttemperatur und Luftfeuchte dürften die Vorhersagegüte von Energiebilanzmodellen für die Temperatur von Strassenoberflächen in komplexer Topographie erhöhen. Routenvorhersagen in komplexer Topographie dürften durch das TGM mit einem Minimum an Strassenwetterstationen möglich sein. Radarerfasste Niederschläge können mittels TGM Lokalvorhersagen höhenabhängig als Regen oder Schnee diagnostiziert werden. Der flächendeckende, operationelle Einsatz des TGM als Anschlussmodell von hochaufgelösten Strömungsmodellen für Lokalvorhersagen in komplexer Topographie wird empfohlen.

Publikationen: http://www.emetsoc.org/annual_meetings/documents/presentations_2010/AW3_Liechti.pdf



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:	Der Schlussbericht der Forschungsarbeit ist wissenschaftlich sauber aufgebaut und verständlich. Er stützt sich auf modernste Wetterprognosen ab und interpretiert sie korrekt. Mit dem zweidimensionalen Grenzschichtenmodell (TGM) kann eine numerische kurzfristige Lokalvorhersage für Frost und Nebel erzeugt werden. Die dreistündige Kadenz wurde mit dem Grenzschichtenmodell unter Assimilation von lokalen Messungen auf eine einstündige Kadenz erhöht. Das topographische Grenzschichtenmodell wurde während einer fünfjährigen Periode mit unterschiedlichen Wetter- und Sichtbedingungen geeicht. Simulationen wurden in weiteren Nächten mit am Flughafen Kloten gemessenen Stationswerten verifiziert. Die Verifikation der Schwellwertvorhersagen für Frost und Bodenfrost über die Experimentalperiode zeigt, dass sich die Lufttemperatur etwas besser vorhersagen lässt, als die Oberflächentemperatur. Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes erzielte Qualität in der Modellierung und Vorhersage von nächtlichen Grenzschichten ist bemerkenswert.
Umsetzung:	Mit den genannten Ergänzungen legt dies den Einsatz des topographischen Grenzschichtenmodelles im Wetterdienst zur lokalen Vorhersage von Sicht Einschränkungen und Frost an Flughäfen und für Strassen nahe. Die Wetterdienste müssten die verbesserten Vorhersagen in ihre Prognosen einbauen.
weitergehender Forschungsbedarf:	Zurzeit besteht kein weiterer Forschungsbedarf.
Einfluss auf Normenwerk:	Bei Überarbeitung der Norm 640 754 Wetterinformation, Strassenzustandserfassung, Aufgebotsorganisation ist eine Prüfung nötig. Der Forschungsbericht soll baldmöglichst in verbesserte Vorhersagen der Wetterdienste einfließen.

Präsident Begleitkommission:

Name:	Knuchel	Vorname:	Reto
Amt, Firma, Institut:	Tiefbauamt Graubünden		
Strasse, Nr.:	Grabenstrasse 30		
PLZ:	7000	Email:	reto.knuchel@tba.gr.ch
Ort:	Chur	Telefon:	081 257 37 35
Kanton, Land:	Schweiz	Fax:	081 257 20 10

Unterschrift Präsident Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II- Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1 <i>Footprint II- Langzeit Belag Performance und Umwelt Monitoring an der A1</i> <i>Footprint II- Long terme performance des chaussées et à la surveillance de l'environnement A1</i>	2010
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN <i>Affinité entre granulats et bitume, mise en application nationale de la EN</i> <i>Affinity between aggregate and bitumen, national implementation of the EN</i>	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen <i>Modèles de conduite sur autoroutes surchargées</i> <i>Speed patterns on congested highways</i>	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux <i>Bestimmung der Anwesenheit und Wirksamkeit von Haftmittel im Asphaltbeton</i> <i>Determination of the presence and efficiency of adhesion agent in asphalt concrete</i>	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinkörnungen am Haufwerk <i>Répétabilité et reproductibilité de la résistance à la compression des granulats en vrac</i> <i>Repeatability and Reproducibility of the compressive Strength on the Stack</i>	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden <i>Base de projet pour installations de feux de circulation et guide</i> <i>Design basics for traffic light systems and guidelines</i>	2010
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen <i>Adhérence sur les chaussées hivernales</i> <i>Skid resistance of winter road surfaces</i>	2010
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung <i>Speed on upgrades and downgrades; revision</i> <i>Les vitesses dans les rampes et les pentes; vérification</i>	2010

622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasier- ten Sicherheitskonzepts <i>Aspects juridiques d'un concept de sécurité basé sur les risques et l'efficience</i> <i>Legal aspects of a risk and efficiency based safety approach</i>	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen <i>Procédure de détermination du besoin d'entretien dans les réseaux routiers communaux</i> <i>Procedure for determining the maintenance require- ments of municipal road networks</i>	2009
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben <i>Systematical impact assessment of small and medium transport projects</i> <i>Analyses des impacts systématiques pour projets de transport petits et moyens</i>	2009
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement <i>Application de couches intercalaires de géosynthé- tiques pour la gestion de l'entretien des chaussées</i> <i>Application of asphalt interlayers for road maintenance management</i>	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de naviga- tion pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route <i>Perspektiven und Anwendungen der Navigationsme- thoden für die Strassenverkehrstelematik und für das Strasseninformationssystem</i> <i>Perspectives and applications of the navigation sy- stems for the intelligent transportation systems and for the road information system</i>	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien <i>RiskNow-Falling Rocks</i> <i>Outil intégré Excel pour le calcul de risques sur les galeries de protection contre les chutes de pierre</i> <i>RiskNow-Falling Rocks</i> <i>Excel-based tool for the risk analysis of rockfall protection galleries</i>	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern <i>Comportement d'adhérence des unités de précon- trainte à torons</i> <i>Bond behaviour of strand tendons for post-tensioning</i>	2009

644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton <i>Béton filtré ultra-performant pour augmenter l'efficacité de la maintenance des ouvrages d'art en béton armé</i> <i>Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete for increasing efficiency of the maintenance of reinforced concrete road structures</i>	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle <i>Développement d'une centrale de cogénération à base d'huile végétale avec propre moulin à huile</i> <i>Development of a vegetable oil block heat and power plant with own oil mill</i>	2010
1296	ASTRA 2007/008	Swis contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP) <i>Schweizer-Beitrag zum Russpartikel-Messprogramm für schwere Motorwagen (HD-PMP)</i> <i>Contribution de la Suisse au Programme de Mesure des Particules pour voitures automobiles lourdes (HD-PMP)</i>	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages? -(Performance-orientierte Methoden) <i>Relation between binder properties and damage characteristics of pavements ?</i> <i>(Performance orientated methods)</i>	2010
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen Schadensprozesse und Zustandsverläufe <i>Processus de dégradation et lois d'évolution</i> <i>Pavement damage processes and performance curves</i>	2008
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen <i>Génération de trafic par des installations de stationnement</i> <i>Traffic generation of parking facilities</i>	2009
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesysteme (SGPS) <i>Système de prévision de chaussées glissantes</i> <i>Forecasting Expert System for Road Slipperiness</i>	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum-Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung <i>Espace de rues sans obstacles-Exigences des personnes avec handicap</i> <i>Obstacle free traffic areas-Demands of people with disabilities</i>	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen <i>Modernisation des feux de signalisation</i> <i>Modernisation of traffic control systems</i>	2010