

PRÉVISION IMMÉDIATE ET À TRÈS COURT TERME DES RISQUES DE CHUTES DE NEIGE ET DE PLUIE VERGLAÇANTE À L'AIDE DE DONNÉES RADAR ET DE TERRAIN

Willi Schmid*, Albert Mathis** and Urs Keller***

*Institut pour l'Atmosphère et le Climat, EPF
CH-8093 Zürich, Suisse
TÉL: +41 1 633 68 05/FAX: +41 1 633 10 58
E-mail: schmid@atmos.umnw.ethz.ch

**Bureau d'Inspection des Routes
Canton de Lucerne, Werkhof Sprengi
CH-6020 Emmenbrücke, Suisse
TÉL: +41 41 288 91 63/FAX: +41 41 288 91 53
E-mail: albert.mathis@lu.ch

***MétéoSuisse
Krähbühlstrasse 58
CH-8044 Zürich, Suisse
TÉL: +41 1 256 92 44/FAX: +41 1 256 92 78
E-mail: urs.keller@meteoschweiz.ch

Résumé

Une prévision fiable du danger de chute de neige ou de pluie verglaçante est indispensable pour la planification du déneigement et du dégivrage des routes. Il serait particulièrement utile de disposer de prévisions à 0-2 heures afin de pouvoir procéder au salage ou de prendre suffisamment tôt des mesures spécifiques de prévention des accidents ou d'interruption du trafic. Actuellement, les procédures de prévision reposent essentiellement sur des mesures locales au niveau du sol de la température, de l'humidité et des précipitations. Les prévisions relatives au début et à l'évolution des précipitations sont normalement fournies par des services météorologiques ou par des systèmes de surveillance basés sur des cartes météorologiques, des modèles de prévisions, ainsi que des données satellite ou radar. A ce jour, rares ont été les tentatives de **combiner** des données locales avec des prévisions de précipitations à court terme basées sur des données satellite ou radar dans un véritable système de prévision immédiate et à très court terme (appelé aussi "nowcasting").

Nous présentons ici un nouveau concept combinant différents facteurs de risque afin d'établir une prévision du risque de chute de neige ou de pluie verglaçante. Ces facteurs de risque sont:

- [1] La probabilité de précipitations au-delà d'une intensité donnée dans les 1 à 2 heures suivantes. Ce facteur de risque est obtenu grâce à **RainCast**, une procédure de prévision immédiate et à très court terme entièrement automatisée développée à l'EPF.
- [2] La probabilité que ces précipitations tombent sous forme de neige ou d'eau à l'état surfondu. Cette probabilité est calculée à l'aide de mesures au sol de la température, de l'humidité et des précipitations. Dans une région accidentée ou montagneuse, il est possible d'utiliser des pseudo profils de température et d'humidité pour le calcul de ce facteur de risque à condition que les stations de mesure soient bien réparties à différentes altitudes.
- [3] La probabilité que des précipitations liquides tombent sur une surface gelée

Cette procédure de prévision immédiate et à très court terme est appelée **RainCast+**. Divers produits prévisionnels peuvent être fournis aux utilisateurs : images de prévision, prévision de risques locaux et messages d'alerte. La procédure offre une grande flexibilité quant à la sélection des régions à alerter et aux critères d'alerte. La fiabilité des prévisions, basée sur une analyse statistique de grands échantillons de données est prometteuse. Le système est en cours d'installation en Suisse, au Nord des Alpes, où il sera bientôt opérationnel.

1. Introduction

Une prévision fiable de temps critique pour la circulation routière (i.e. chutes de neige ou pluie verglaçante) est nécessaire pour une planification optimale du déneigement et du dégivrage des routes. Il serait particulièrement utile de disposer de prévisions à 0-2 heures afin de pouvoir procéder au salage ou de prendre suffisamment tôt des mesures adéquates de prévention des accidents ou d'interruption du trafic. Actuellement, les procédures de prévision reposent essentiellement sur des mesures locales au niveau du sol de la température, de l'humidité et des précipitations. Les prévisions relatives au début et à l'évolution des précipitations sont normalement fournies par des services météorologiques ou par des systèmes de surveillance basés sur des cartes météo, des modèles de prévisions, ainsi que sur des données satellite ou radar. A ce jour, rares ont été les tentatives de **combiner** des données locales avec des prévisions à court terme de précipitations basées sur des données satellite ou radar et ce dans un véritable système de prévision immédiate et à très court terme (i.e. Rasmussen et al. 2001).

Nous présentons ici un nouveau concept combinant divers facteurs de risque afin d'établir une prévision du risque de chute de neige ou de pluie verglaçante. En plus des prévisions basées sur des mesures locales, nous utilisons également des prévisions de précipitations basées sur des images radar. Le système **COTREC/RainCast** développé à l'EPF est une technique entièrement automatisée de prévision immédiate et à très court terme qui est actuellement utilisée dans des applications diverses. Dans la prochaine partie, nous résumons la technique d'extrapolation radar, ainsi que l'algorithme pour établir les prévisions de risque désirées. Après cela, nous illustrons les nouveaux algorithmes avec un premier épisode de chutes de neige et un second de pluie verglaçante survenus lors de l'hiver 2000/2001. Une dernière partie résume les principaux résultats et donne un aperçu des développements ultérieurs.

2. Les algorithmes

a. **COTREC/RainCast**

La technique d'extrapolation radar est une extension de TREC ("Tracking radar echoes by correlation"), présentée par Rinehart and Garvey (1978). L'image radar est divisée en cases de forme carrée. Chaque case est comparée à la même case dans une image ultérieure. La case de la seconde image est déplacée sur un quadrillage régulier jusqu'à ce que les motifs radar des deux cases correspondent le mieux (i.e. corrélation maximale). Le déplacement et la variation d'intensité des échos radar peuvent ainsi être calculés pour chaque case. Cette information est utilisée pour l'extrapolation. Cette manière de procéder a été optimisée dans différents articles. Li et al. (1995) développèrent COTREC, une méthode visant à améliorer les vecteurs de déplacement à l'aide d'une technique variationnelle. Mecklenburg et al. (2000) trouvèrent les paramètres de modèle optimaux (i.e. la grandeur des cases) pour différents types de précipitations. Schmid (2000) améliorèrent la technique d'extrapolation et introduisirent RainCast, la version opérationnelle de COTREC qui répond aux exigences suivantes:

1. Bonne qualité et robustesse de la prévision pour différents types de temps.
2. Court temps de calcul sur un PC moderne.

Les propriétés statistiques des erreurs de prévision sont converties en prévisions de risque local (Schmid et al. 2001). Le risque de présence de précipitations (p_r ci-après) peut être calculé pour chaque lieu ou période de temps désiré en fonction des variations de mouvement des échos dans le voisinage du lieu considéré. Des prévisions de risques de grêle, inondations, chutes de neige, pluie verglaçante, foudre ou de fort vent peuvent également être obtenues. Des messages d'alerte peuvent être envoyés aux utilisateurs intéressés si le facteur de risque calculé atteint un niveau pré-défini. Il est possible de cette manière d'utiliser la machine (en lieu et place de personnes) pour des tâches de surveillance sur le long terme ou permanentes.

RainCast est maintenant opérationnel en Suisse pour des applications diverses. Des produits prévisionnels ainsi que des messages d'alerte sont distribués par une société issue de l'EPF ("MeteoRadar Schmid" ; pour plus de détails, voir sous <http://www.meteoradar.ch/>). Le programme est installé sur une machine Linux. Les images radar ainsi que d'autres données météorologiques sont fournies par MétéoSuisse et d'autres services d'entretien. Les prévisions de risque et les critères d'alerte sont calculés et distribués aux clients toutes les 5 minutes.

b. RainCast+

De nouveaux algorithmes en vue de traiter les risques de chutes de neige et d'eau de pluie verglaçante sont développés pour une extension du système RainCast déjà existant. Cette extension se nomme **RainCast+**, puisque des données supplémentaires sont ajoutées et combinées aux procédures déjà présentes dans RainCast. Nous résumons ci-dessous les algorithmes d'estimation des risques de chutes de neige et de pluie verglaçante.

Chute de neige. L'identification du type de précipitations (pluie, neige, grésil, grêle) à l'aide d'un radar n'est possible que si ce dernier est un radar à double polarisation. De tels radars sont très onéreux et ne sont actuellement utilisés que pour la recherche. Aussi des données supplémentaires doivent-elles être prises en compte pour différencier la pluie de la neige dans un environnement opérationnel. Une orographie montagneuse permet de prendre en compte des mesures au niveau du sol de la température de l'air et de l'humidité et ce à différentes altitudes. La fraction de masse neigeuse (p ci-après) présente dans des précipitations peut être estimée en suivant une méthode donnée par Koistinen et Saltikoff (1998). Suivant leur suggestion, il est possible de définir une "température de la neige" t_s (°C) de la manière suivante:

$$t_s = t + rh \cdot 0.074 \quad (1)$$

Ici, t est la température de l'air (°C), et rh est l'humidité relative (%). La fraction de masse neigeuse p (p étant un nombre entre 0 et 1) est une fonction non-linéaire de t_s :

$$p = \frac{1}{1 + \exp(22 - 2.7 \cdot t_s)} \quad (2)$$

La fraction de neige présente dans les précipitations peut être calculée pour chaque altitude à l'aide des équations 1 et 2 si les profils de température et d'humidité relative sont connus. La prévision du risque de chute de neige (p_s ci-après) pour les heures suivantes est d'un intérêt particulier. Pour la

déterminer, il est nécessaire d'avoir une prévision du risque de précipitation (p_p) ainsi qu'une prévision de p . Si les deux prévisions sont données, il est possible d'obtenir une estimation de p_s :

$$p_s = p_p \cdot p \quad (3)$$

La prévision de p_p est fournie par RainCast et la prévision de p est ici obtenue grâce à une extrapolation dans le futur de la série temporelle de t et rh à l'aide d'un modèle auto-régressif de série temporelle.

Pluie verglaçante: La même méthode peut être appliquée pour obtenir une prévision de pluie verglaçante. Une grandeur supplémentaire importante est ici la température du sol t_g , ainsi qu'une extrapolation de t_g dans le futur. La déviation standard de t_g extrapolée doit être également estimée afin d'obtenir une estimation du risque (p_0 ci-après) que la température du sol soit inférieure au point de congélation. Le risque de pluie verglaçante (p_f ci-après) peut être estimé comme suit :

$$p_f = (1 - p_s) \cdot p_0 \quad (4)$$

Eau de pluie verglaçante après chute de pluie ou chute de neige mouillée: Un autre danger est constitué par un ciel clair après des chutes de pluie et ce à une température proche du point de congélation. Le refroidissement par rayonnement peut conduire à des conditions glissantes. Deux facteurs sont importants pour prévoir cette situation : l'humidité à la surface du sol et la tendance de la température du sol en fonction de la couverture nuageuse. Le premier facteur peut être estimé soit directement par des capteurs au sol, soit indirectement en accumulant la quantité de pluie observée par le radar et en considérant l'évaporation de l'eau de pluie tombée. Le second facteur est difficile à prévoir. Une prévision fiable de la température du sol n'est possible qu'en considérant le mouvement et l'évolution des champs nuageux. Les images radar ne sont pas ici d'une grande utilité puisque le radar "voit" les nuages avec précipitations mais est incapable de "voir" des nuages sans précipitations. Les images satellitaires ne sont également pas suffisantes : l'imagerie infra-rouge est souvent incapable de différencier le sol du sommet d'un nuage en hiver. Aussi des recherches portant sur d'autres méthodes d'estimation de la couverture nuageuse sont-elles en cours de développement. Une possibilité est d'utiliser les températures du sol et de l'air conjointement comme indicateur indirect de la couverture nuageuse. Un réseau de stations peut fournir des informations sur le déplacement des champs nuageux. Nous étudions actuellement la possibilité de surveiller les champs nuageux à l'aide d'un réseau au sol dense mesurant les températures du sol et de l'air.

3. Etudes de cas

a. Un épisode de pluie verglaçante

Nous discutons dans cette partie de deux exemples qui ont eu lieu l'hiver dernier dans le nord de la Suisse. Le premier exemple est un épisode de pluie verglaçante qui a eu lieu dans la soirée du 1^{er} janvier 2001. L'évolution dans le temps de la température du sol et des précipitations de la Fig. 1a indique une température du sol inférieure ou égale au point de congélation. Comme le niveau de congélation dans l'atmosphère se situe à environ 700 mètres au-dessus du sol (pas montré ici), il est attendu que les précipitations soient sous forme liquide et puissent geler en atteignant le sol. De faibles précipitations tombèrent à 22h10 pendant quelques minutes et des précipitations plus importantes tombèrent une heure plus tard. A ce moment, la température du sol était encore très proche de zéro degré. Donc le gel de l'eau de pluie est possible à certains endroits. L'épaisse ligne verticale sur la Fig. 1a indique le moment où le danger de pluie verglaçante est évident.

Les prévisions calculées à 21h40 (fine ligne verticale sur la Fig. 1a) sont indiquées respectivement sur les Figs. 2a et 3a. La Fig. 2a montre une prévision d'image radar valide à 22h40, soit une heure plus tard. Cette figure indique que la région de Zürich-Aéroport est déjà recouverte par un écho de précipitations. La prévision locale (Fig. 3a) indique que le risque de précipitations faibles ou modérées augmente substantiellement à 22h00, mais n'atteint pas 100%. Les risques de chutes de neige et de pluie verglaçante augmentent également mais restent à un niveau d'environ 20%.

En résumé, le risque croissant de précipitations et de pluie verglaçante a été décelé par le modèle de prévision. Le modèle a également prévu un risque de chute de neige. Des messages d'alerte auraient été émis par le modèle si les niveaux d'alerte avaient été de 20% pour les risques de chutes de neige et de pluie verglaçante. Comme les prévisions sont renouvelées toutes les cinq minutes, elles doivent, selon toute attente, devenir de plus en plus précises avec le temps.

b. Un épisode de chute de neige

Dans le deuxième exemple, nous discutons d'un épisode de chute de neige en Suisse Centrale. La Fig. 1b montre de faibles précipitations à des températures positives à environ 20h00. A ce moment, l'intensité des précipitations augmenta substantiellement et la température atteignit le point de congélation à environ 20h30, heure locale. Le type de précipitations changea apparemment de pluie en neige et la neige persista au sol après 20h30, causant ainsi des conditions glissantes. L'épaisse ligne verticale sur la Fig. 1b marque l'heure (20h30) où le RWIS (système d'information météorologique routière) (Vaisala) émit un message d'alarme.

La principale raison d'envoyer ce message était la température du sol décroissante et atteignant le point de congélation. Ce message fut apparemment émis trop tard pour un salage préventif des routes. Pour cette raison, nous avons étudié la manière avec laquelle le nouveau système RainCast+ pouvait prévoir le danger. Nous avons calculé les prévisions RainCast à 19h45, soit 45 minutes avant l'événement. Les résultats sont montrés respectivement sur les Figs. 2b et 3b.

La prévision radar à une heure (Fig. 2b) indique des précipitations modérées dans la région concernée. La prévision locale montrée sur la Fig. 3b suggère que les précipitations persistent durant toute la période de prévision (19h34-20h34). Cette prévision est en accord avec les observations (Fig. 1b). Le modèle délivre également un risque de chute de neige (20%) et de conditions glissantes dues à la neige (augmentant de 0 à environ 35%). Ces prévisions sont légèrement conservatrices en comparaison de la réalité. La raison en est que la chute de température, telle qu'observée sur la Fig. 1b, n'est pas prévue correctement par le modèle. La prévision de température dans cette version de RainCast n'est basée que sur des mesures locales. Il est suggéré qu'un raffinement de la prévision de température incluant des prévisions de modèles numériques ainsi que des données spatiales peut encore améliorer la fiabilité des prévisions de RainCast.

Nous pouvons néanmoins déclarer que le modèle donne des prévisions réalistes des risques hivernaux définis dans les deux cas. Nous évaluons actuellement d'autres cas de l'hiver dernier dans une manière similaire afin d'obtenir des résultats statistiquement valides.

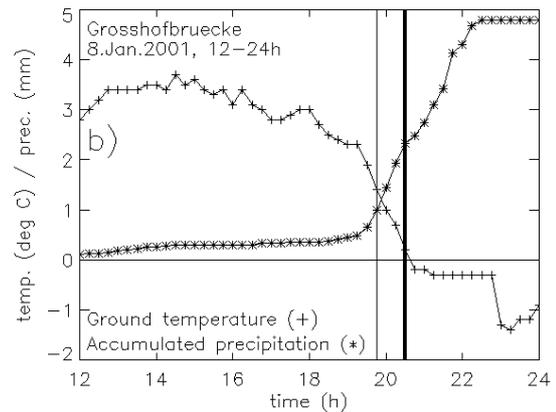
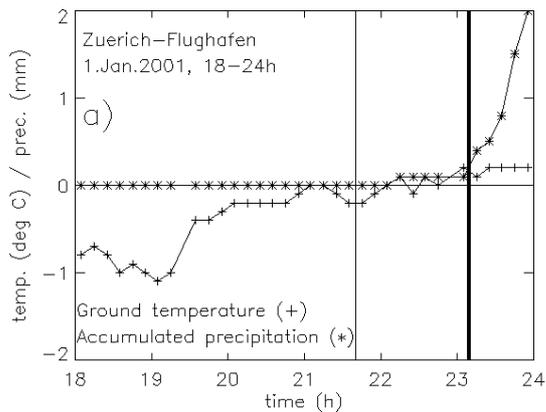


Fig. 1: Evolution dans le temps de la température du sol et de l'accumulation de pluie, pour Zürich-Aéroport (Fig. 1a) et le Grosshofbrücke près de Lucerne (Fig. 1b). Les données de la Fig. 1a proviennent d'ANETZ, géré par MétéoSuisse et pour la Fig. 1b du réseau Vaisala géré par le Canton de Lucerne. Les lignes verticales sont expliquées dans le texte.

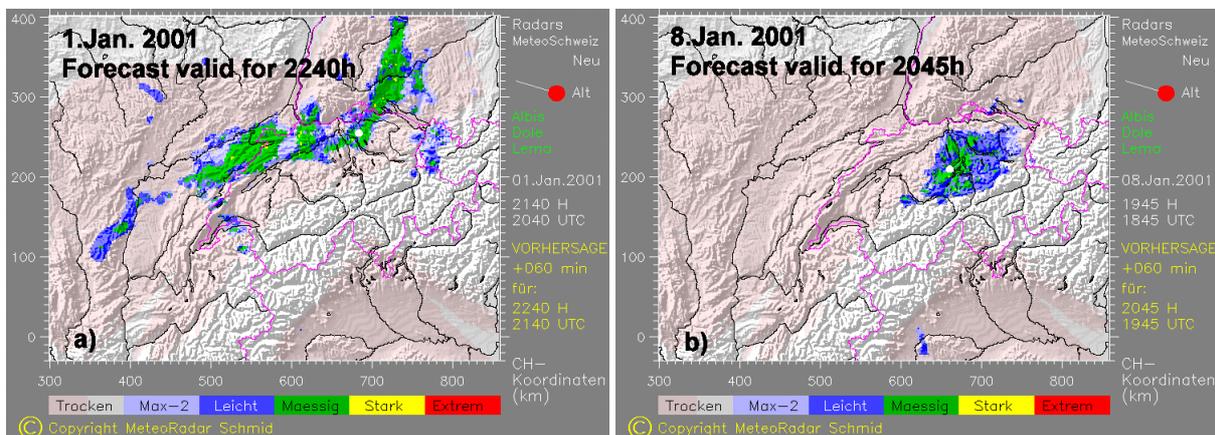


Fig. 2: Images de prévisions radar (1 heure), pour Zürich-Aéroport (Fig 2a) et pour le Grosshofbrücke près de Lucerne (Fig.2b). Les positions des sites de mesures sont indiquées par un point blanc.

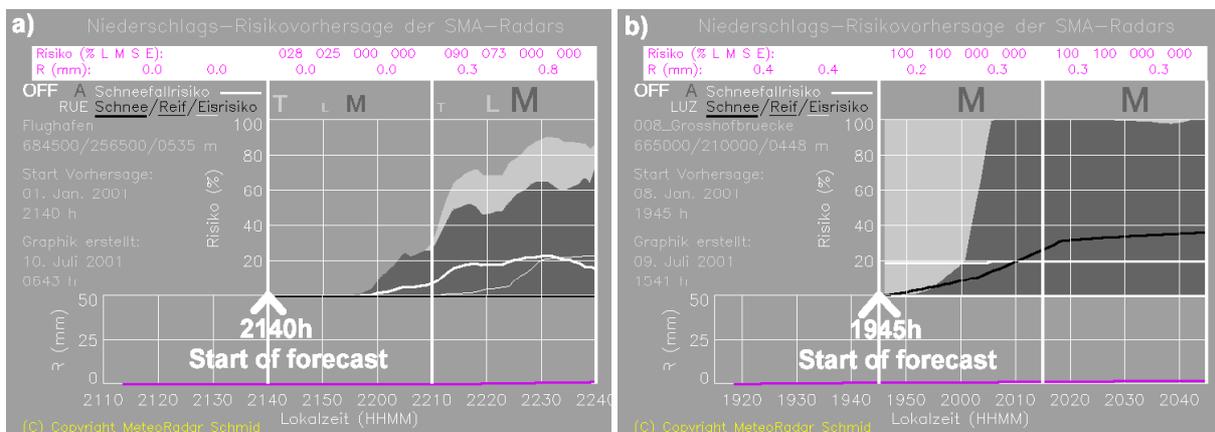


Fig. 3: Prévisions locales à une heure du risque de faibles précipitations (gris clair), précipitations modérées (gris-foncé), chutes de neige (ligne blanche épaisse), verglas (ligne blanche fine) et conditions glissantes dues à la neige (ligne noire) pour Zürich-Aéroport (Fig. 3a) et pour le Grosshofbrücke près de Lucerne (Fig. 3b).

4. Discussion and conclusions

Dans cette étude, nous avons proposé une nouvelle méthode pour obtenir de meilleures prévisions de temps critiques pour la route. La nouvelle technique combine des prévisions radar de précipitations avec des prévisions de paramètres locaux tels que la température de l'air, la température du sol et l'humidité en surface. Les facteurs de risque de chutes de neige, de pluie verglaçante et de routes verglacées suite à des chutes de neige ou d'eau de pluie verglaçante sont calculées en combinant des facteurs de risque individuels estimés par deux systèmes : mesures locales et observations radar.

Le modèle de prévision, appelé RainCast+, a été testé pour la première fois durant l'hiver 2000/2001. Les données sont actuellement en cours d'évaluation. Nous présentons ici également une analyse de deux épisodes spécifiques, mettant en lumière la fiabilité des facteurs de risque calculés. Une évaluation statistique de plus grands échantillons de données est en cours. Les résultats préliminaires peuvent être résumés comme suit:

1. Les facteurs de risque de précipitations (basés sur la prévision radar) surestiment légèrement les facteurs de risque observés (Schmid et Mecklenburg 2001).
2. La déviation standard de la température du sol donnée par la prévision est d'environ 1°C sur une prévision de 50 minutes.

Le deuxième point n'est pas encore satisfaisant et doit encore être amélioré. A ce jour, la prévision de température est simplement une extrapolation des séries temporelles de températures passées avec un modèle auto-régressif, sans considérer d'effets advectifs tels que le déplacement de masses d'air ou de champs de nuages. Aussi la prochaine étape sera-t-elle une amélioration des prévisions de température et de couverture nuageuse en considérant des données spatiales de températures et de couverture nuageuse, ainsi que peut-être de modèles de prévisions numériques.

L'avantage d'une prévision temps-route et d'un système d'alarme météorologique est évident et largement confirmé par nombre d'utilisateurs des systèmes RWIS. La prise en compte de processus d'advections dans de tels systèmes signifierait un important pas en avant vers de plus précises prévisions à court terme. L'advection se réfère aux précipitations vues par le radar, mais également aux champs nuageux, ainsi qu'à l'air à la surface. L'advection de zones de précipitations est maintenant implémentée dans RainCast+, alors que l'advection de champs nuageux et de températures de l'air sera prise en compte dans une future version du système.

Remerciements

Nous sommes reconnaissants aux nombreuses institutions et personnes qui supportent le projet RainCast. Nous tenons à remercier spécialement le canton de Lucerne, l'EPF et MétéoSuisse pour nous avoir fourni les données utilisées dans cette étude. Nous remercions également le canton de Lucerne pour son support financier substantiel, ainsi que Patrick Koch pour la traduction française de cet article.

Références

- Koistinen, J. and E. Saltikoff, 1998. Experience of customer products of accumulated snow, sleet and rain. In: *Advanced weather radar systems*, COST 75 Int. Seminar, Locarno, Switzerland, 397-406. (Available from European Commission, B-1049 Brussels, EUR 18567 EN)
- Li, L., W. Schmid, and J. Joss, 1995: Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 1286-1300.
- Mecklenburg, S., J. Joss, and W. Schmid, 2000: Improving the nowcasting of precipitation in an Alpine region with an enhanced radar echo tracking algorithm, *J. Hydrol.*, **239**, 46-68.
- Rasmussen, R., M. Dixon, F. Hage, J. Cole, C. Wade, J. Tuttle, S. McGettigan, T. Carty, L. Stevenson, W. Fellner, S. Knight, E. Karplus, and N. Rehak, 2001: Weather support to deicing decision making (WSDDM): a winter weather nowcasting system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 579-595.
- Rinehart, R.E. and E. Garvey, 1978: Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, **273**, 287-289.
- Schmid, W., 2000: Nowcasting winter precipitation with radar. Proc. SIRWEC-2000, Davos, Switzerland, Swiss Federal Roads Office, CH-3003 Bern, 17-24.
- Schmid, W., S. Mecklenburg, and J. Joss, 2000: Short-term risk forecasts of severe weather. *Phys. Chem. Earth (B)*, **25**, 1335-1338.
- Schmid, W. and S. Mecklenburg, 2001: Anwendungen von COTREC/RainCast im Nowcasting Bereich. Proc. DACH-MT 2001, 18-21 Sept 2001, Wien, in press. (Available from IACETH, CH-8093 Zürich, Switzerland).