

Lokal verstärkter Schneegriesel bei tiefem Stratus (Industrieschnee)

Amplification locale de chute de neige en grain par stratus bas

Local enhancement of snow grains from low stratus

Dr. O. Liechti, Analysen & Konzepte, CH-8404 Winterthur

**Forschungsauftrag Nummer VSS 1999/244 im Auftrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

April 2004

Zusammenfassung

Bei frostigen und windschwachen Inversionslagen mit niedrigem Hochnebel fällt in unmittelbarer Nähe von konzentrierten Feuchtequellen regelmässig Niederschlag in Form von *Schneegriesel*. Die beschneite Fläche beträgt typischerweise 4 km², die Schneemengen sind meist gering und lokal kann Schneeglätte auftreten. Für die betroffenen Stadtteile und Abschnitte von Nationalstrassen werden Einsätze des Winterdienstes nötig. Streueinsätze sind die Regel, in Ausnahmefällen müssen Pflüge eingesetzt werden. Das lokal begrenzte Auftreten von Schneeglätte durch Griesel bei generell stabilem, niederschlagsfreiem Winterwetter überrascht sowohl die Strassenbenützer als auch die Unterhaltsdienste und stellt ein gewisses Unfallrisiko dar. Schneegriesel tritt am häufigsten in den kalten Morgenstunden auf, bei ganztägigem Stratus auch bereits ab der Abenddämmerung.

Als meteorologische Voraussetzung für das Auftreten von Schneegriesel muss sich in einem frostigen Kaltluftsee zuerst niedriger Hochnebel bilden. Es muss windstill sein, die Stratusuntergrenze muss fast am Boden aufliegen (Nebel) und die vertikale Mächtigkeit des Stratus 200-300 m betragen. Bilden sich im kalten Nebel Eiskristalle, wachsen diese auf Kosten der unterkühlten Wassertröpfchen. Bei genügender Grösse fallen Schneekristalle als Griesel aus dem Stratus heraus in ungesättigte Luft, wo sie sublimieren. Kristallisierter Niederschlag aus dem kalten Stratus erreicht den Boden nur, wenn die Untergrenze des Stratus nahe am Boden liegt.

Stratus kühlt nachts bei darüber klarem Himmel an seiner Oberfläche aus und durchmischt sich dadurch konvektiv von oben her. Der Gehalt an unterkühlten Wassertröpfchen ist an der kalten Stratusobergrenze am Ende der Nacht am grössten. Wenn die ausstrahlungsbedingte konvektive Durchmischung in und unterhalb des tiefen Stratus im Lauf der Nacht bis zum Boden durchgreift, tragen Wasserdampfquellen in allen Höhen – also auch Kraftfahrzeuge und Heizungsanlagen – zur Sättigung- bzw. Übersättigung des tiefen Stratus bei. In den frühen Morgenstunden ist bei den tiefsten Temperaturen des Tages zudem die Gebäudeheizleistung nach der üblichen Nachtabsenkung maximal und der Strassenverkehr weist an Wochentagen eine Tagesspitze auf.

Ohne lokalisierte kräftige Feuchtequelle sind die aus dem Stratus fallenden Mengen von Schneegriesel sehr gering. Bei konzentrierten Feuchtequellen nimmt die in deren Umgebung ausfallende Schneemenge bei Windstille entsprechend der Quellstärke zu, da der Stratus strahlungsbedingt bereits gesättigt bzw. übersättigt ist. Der lokale Wasserdampfeintrag ist bei Verbrennungsprozessen an die Wärmeleistung gekoppelt und dort besonders stark, wo Wärme zum Verdampfen bzw. Trocknen eingesetzt wird. Als Feuchtequellen für die lokale Beschneigung durch Schneegriesel wirken Kehrriechverbrennungsanlagen, Papierfabriken, Blockheizkraftwerke, Brauereien sowie Stahl- und Chemiewerke, das Beschneigungsphänomen wird der Quelle entsprechend als «Industrieschnee» oder «Bierschnee» bezeichnet.

Wesentlich für das lokale Beschneigungsphänomen ist eine lokal konzentrierte Feuchteabgabe in den niedrigen Stratus bei beschränkter Wärmeabgabe, damit die feuchtwarme Abluft nicht aus dem Nebelmeer in die darüberliegende, ungesättigte Luft entweichen kann. Der Beitrag der lokal erzeugten Aerosole ist für das Auftreten von Schneegriesel vermutlich sekundär, da das Phänomen bei tiefem Stratus in schwacher Form auch ohne konzentrierte Feuchtequelle auftritt und da es gleichzeitig an verschiedenen Standorten mit unterschiedlichen lokalen Feuchtequellen auftritt. Wesentlicher scheint die lokale Übersättigung durch den punktuellen Wasserdampfeintrag in den stagnierenden Kaltluftsee zu sein. Bei Kaminhöhen von 80 m über Grund wird feucht-warme Abluft direkt in die bereits übersättigte und unterkühlte Schichtwolke eingeleitet. Kühltürme von Kernkraftwerken sind die kräftigsten lokalen Feuchtequellen. Ihre Abluft ist genügend warm, um weit in die Inversion über dem Stratus aufsteigen zu können. Der Feuchteeintrag erfolgt damit über dem Nebelmeer und «Kühlturmschnee» tritt nicht auf.

In den An- und Abflugschneisen des Flughafens Zürich wird bei Frost und niedrigem Stratus ebenfalls ganz lokaler Schneefall in Form von Griesel beobachtet, wenn die ersten Flugzeuge in den frühen Morgenstunden durch tiefliegenden Stratus landen und starten. Die generierten Turbulenzen lösen die Kristallisation aus und setzen das Kristallwachstum auf Kosten der unterkühlten Nebeltropfen in Gang. Abwärmebedingte Turbulenzen in feuchter Kaminabluft könnten somit die Kristallisation ebenfalls begünstigen.

Die Vorhersage von lokalem Schneegriesel ist an die Vorhersage von niedrigem Stratus gekoppelt. Operationelle synoptische Wettermodelle arbeiten in diesem Bereich unbefriedigend, da sie die lokale Topographie und konvektive Umlagerungen zu wenig berücksichtigen. Ein spezialisiertes Grenzschichtmodell für komplexe Topographie wurde in seinem Strahlungshaushalt für die Nachtanwendung erweitert, um die nächtliche Abkühlung der bodennahen Luft zu simulieren. Die nächtliche Auskühlung der bodennahen Luft kann mit diesem topographischen Grenzschichtmodell auch bei niedrigem Stratus simuliert werden. Es ergänzt operationelle synoptische Modelle und dürfte lokal bessere Vorhersagen bei windschwachen Lagen erlauben. Ein Betrieb dieses topographischen Grenzschichtmodells für ausgewählte Testregionen wird sein Potential für den Winterdienst auf Strassen und Flughäfen aufzeigen. *Nebelvorhersagen* als Grundlage für Warnungen im Strassenverkehr und für die Betriebsplanung von Flughäfen und Luftstrassen liegen in Reichweite dieses Grenzschichtmodells. An Standorten mit konzentrierten Feuchtequellen sind damit auch Vorhersagen von lokal verstärktem Schneegriesel möglich.

Résumé

Dans des conditions calmes avec du stratus bas et du gel la précipitation sous forme de *neige en grain* est amplifiée autour de sources d'humidité concentrées. La surface enneigée comprend environ 4 km², la quantité de neige est peu considérable mais elle suffit pour rendre les routes glissantes. Le service d'hiver devient nécessaire pour les routes et les trottoirs affectées. Normalement il suffit de saler, dans des cas exceptionnels le déblaiement est nécessaire. L'apparition locale de routes couvertes de neige dans des conditions généralement stables et sans précipitation est surprenante autant pour les services d'hiver que pour les utilisateurs des routes. Le phénomène crée un certain risque d'accident. La neige en grain se produit préférentiellement pendant les heures les plus froides en début de matinée. Avec un stratus qui persiste pendant toute la journée la neige en grain peut déjà se produire à partir du crépuscule.

Les conditions météorologiques pour le phénomène de neige en grain sont un temps calme, une couche limite froide avec des températures au gel et une couverture basse de stratus. La base du stratus doit être près du sol (brouillard) et l'épaisseur du stratus entre 200 et 300 m. Des cristaux de glace se formant dans le stratus froid grandissent au détriment des gouttelettes superfroides. Les grains de taille suffisante tombent du stratus. Dans l'air non-saturé sous le stratus les grains qui tombent se mettent à sublimer. Ils n'atteignent le sol que si la base du stratus est suffisamment basse.

Pendant la nuit et par ciel clair la surface du stratus se refroidit. Ce refroidissement déclenche un faible brassage convectif qui part de la surface du stratus et qui s'étend vers le bas. La concentration de gouttelettes est maximale près de la surface froide du stratus et à la fin du refroidissement nocturne. Une fois que le brassage nocturne a atteint le sol, les sources d'humidité à tous les niveaux – trafic et chauffages y compris – contribuent à la supersaturation du stratus bas. En début de journée l'intensité du trafic et des chauffages est maximale.

Sans sources d'humidité importantes la quantité de neige en grain qui tombe du stratus bas est normalement négligeable. Avec des sources d'humidité importantes, par contre, la quantité de neige en grain qui tombe autour des sources augmente avec la puissance de la source, car le stratus est supersaturé par le refroidissement nocturne. La production d'humidité par la combustion est liée à la chaleur produite. Elle est augmentée si la chaleur est utilisée pour l'évaporation dans des processus techniques. Les sources d'humidité connues de provoquer localement de la neige en grain sont des centrales d'incinération de déchets, des centrales de chauffage et des usines pour la production industrielle (papier, acier, bière, chimie). Selon la source de l'humidité le phénomène local de neige en grain est nommé «neige industrielle» ou «neige de brasserie» dans certains endroits.

Les facteurs essentiels pour le phénomène local de neige en grain sont une source d'humidité concentrée qui débite directement dans le stratus bas et dont la chaleur dégagée est limitée de façon à ce que l'échappement de la source ne pénètre guère dans les couches d'air non-saturé qui couvrent le stratus. La contribution locale d'aérosols ne semble pas être décisif car le phénomène se produit également sans sources d'humidité – les quantités de neige en grain étant beaucoup plus faibles – et le phénomène se produit simultanément avec des sources différentes. La supersaturation locale semble être un facteur décisif pour la quantité de la précipitation. Les tours de refroidissement propre aux centrales nucléaires sont les sources d'humidité les plus intenses. Leur chaleur dégagée est suffisante pour permettre une pénétration importante dans l'air non-saturé au-dessus du stratus. L'humidité est ajoutée au-dessus du stratus et la précipitation sous forme de neige en grain n'est pas amplifiée dans les environs des centrales nucléaires.

Par conditions de stratus froid et bas la neige en grain est également observée dans les secteurs d'approche et de départ de l'aéroport de Zurich lors des premiers vols le matin. La turbulence générée par les avions déclenche le phénomène. La turbulence des échappements de cheminée chauds et humides pourraient donc également déclencher le phénomène de la cristallisation.

La prévision de la neige en grain doit être basée sur la prédiction de stratus bas et de brouillard. Les modèles météorologiques actuels ne sont pas satisfaisant dans cet aspect, ils ne traitent pas la topographie et le brassage convectif à l'échelle nécessaire. Un modèle de couche limite spécialisé pour la convection en topographie complexe a été adapté aux conditions de radiation nocturne. Le refroidissement nocturne de la couche limite est traité, même par conditions de stratus bas voire de brouillard. Ce modèle complète les modèles météorologiques en service et pourra améliorer les prévisions locales par temps calme. Son application pour des lieux particuliers montrera son potentiel pour le service d'hiver des routes et des aéroports. La prévision de la formation et de la dissipation du brouillard sera obtenue par ce modèle de couche limite. L'avertissement du trafic routier et une amélioration de la gestion des aéroports et des voies aériennes peuvent être attendus. Dans des lieux avec des sources d'humidité concentrées la prévision de neige en grain amplifiée localement est possible.

Summary

In freezing conditions precipitation from stagnant low stratus in the form of snow grains is enhanced near concentrated sources of moisture. The area affected by snow grains is typically 4 km², the amount of precipitation is usually small but leads to slippery conditions on frosty road surfaces. Winter road maintenance is needed for the affected roads and sidewalks. Normally the use of salt is sufficient, in extreme cases mechanical snow removal is needed. The very local occurrence of snow covered roads in generally stable weather conditions without precipitations is often surprising for road users as well as for road maintenance services. Thus the phenomenon increases the risk of accidents. Locally enhanced precipitation of snow grains occurs most frequently in the cold morning hours. With low stratus persisting all day it can also occur after dusk.

The meteorological conditions for snow grains to occur is a pool of frosty air topped by stratus. The cold air pool must be stagnant, the cloud base of the stratus must be close to the ground (fog) and the depth of the stratus 200–300 m. Ice crystals forming in the cold stratus will grow at the expense of the supercooled water droplets. Snow grains of sufficient size fall out of the stratus. Below the cloud base falling snow grains do sublimate in the unsaturated air. They only reach the ground when the base of the stratus is very low.

At night stratus is cooled at the surface under clear sky. This cooling triggers weak convective mixing starting at the cooled top of the stratus and extending downwards. The concentration of supercooled droplets is highest at the cold surface of the stratus and at the end of the nocturnal cooling. Once the convective mixing of the cooled stratus reaches the ground moisture sources at all levels – traffic and heating of buildings included – contribute to the supersaturation of the low stratus. In the cold morning hours traffic and heating of buildings have their diurnal peaks of intensity.

Without localized and powerful sources of moisture the amount of snow grains falling out of low stratus is mostly negligible. With such additional sources of moisture, however, the amount of snow grains reaching the ground in the vicinity of the source in calm conditions increases with the strength of the source as the low stratus is supersaturated by radiative cooling. The production of moisture from combustion is coupled to the produced heat. It is enhanced if the heat is used for evaporation in technical processes. Known moisture sources for locally enhanced precipitation in form of snow grains are waste disposal plants, power stations for heating, industrial production of paper, steel, chemicals and beer. According to the source of moisture the precipitation phenomenon is named «industrial snow» or «beer snow» in certain places.

The essential factors for the phenomenon of local snow fall are a concentrated source of moisture feeding the low stratus with limited release of heat, so that the exhaust can not penetrate significantly into the dry air above the stratus. The contribution of locally produced aerosols seems to be of minor importance as the phenomenon occurs also without concentrated moisture sources – the amount of precipitation being much smaller – and as the phenomenon occurs simultaneously with different sources of moisture. Local supersaturation, however, seems to be a critical factor for the amount of precipitation. Cooling towers of nuclear power plants are the most intense moisture sources. Their release of heat, however, is sufficient to allow significant penetration of the released moisture into the inversion above the stratus. Moisture is added to the dry layers above the stratus and precipitation of snow grains is not enhanced near cooling towers.

With frosty low stratus local precipitation in form of snow grains is also observed in the approach and take-off sectors of Zurich airport during the first flights in the morning. The turbulence generated by the airplanes when descending or climbing through the stratus triggers crystalization and the growth of snow grains at the expense of supercooled droplets. The turbulence of the warm and moist exhaust of industrial chimneys might also initiate crystalization and support the growth process.

Prediction of local snow grains must be based on the prediction of low stratus and fog. Current synoptic weather models are not satisfactory in this aspect, as they do not treat local topography and convective mixing at the required resolution. A specialized boundary layer model for convection in complex topography has been expanded to nocturnal radiation conditions. Nocturnal cooling of the boundary layer can be treated in conditions with low stratus. The model completes operational weather models and will improve local predictions in calm weather. The application of the model to selected areas will show its potential for road and airport maintenance in winter. Predictions of fog formation and dissipation can be obtained from this topographical boundary layer model. Warnings for road traffic and improved management of airport and airway operations can be expected. In locations with concentrated moisture sources the prediction of locally enhanced snow grains is possible.

Dank

Urs Keller (MeteoSchweiz) führte bei Werkhöfen eine schriftliche Umfrage zum Phänomen «Industrieschnee» durch.

Jürg Wirth (Strasseninspektorat der Stadt Winterthur) stellte Einsatzjournale und lokale Messdaten zur Verfügung.

Zahlreiche Mitarbeiter von Werkhöfen und Strasseninspektoraten erteilten wertvolle Auskünfte.

Der Flugwetterdienst am Flughafen Zürich (MeteoSchweiz) stellte mit der Tagesgangstatistik aufschlussreiche Wetterbeobachtungen zur Verfügung.

MeteoSchweiz stellte Wetterbulletins sowie Boden- und Höhendaten zur Verfügung.

Allen Beteiligten sei an dieser Stelle für die wertvolle Unterstützung herzlich gedankt.

Inhalt

1	Phänomenologie	10
1.1	Einleitung	10
1.2	Erhebungen	10
1.3	Termine mit Industrieschnee	14
1.4	Meteodaten	15
1.5	Wetterlage	16
1.6	Stratushöhe	17
1.7	Beschneiungsfläche und Schneehöhe	18
1.8	Bodenstationen in Kamm- und Beckenlagen	18
1.9	Grenzschichtmasten in Beckenlagen	22
1.10	Höhendaten Payerne	23
2	Wärme- und Feuchtehaushalt der atmosphärischen Grenzschicht	24
2.1	Thermische Zirkulation	24
2.2	Bildung von Kaltluftseen	25
2.3	Temperatur-, Feuchte- und Windprofil im kalten Stratus	26
2.4	Strahlungsbilanz und nächtliche Kühlraten	27
2.5	Latente Wärme	28
2.6	Effekt der Kondensationswärme auf Kühlrate und Durchmischungsgradient	28
2.7	Niederschlag bei auskühlendem Stratus: Nebelregen und Schneegriesel	30
2.8	Quellen und Senken von Wärme und Feuchte	31
2.9	Wasserdampf aus Feuerungen	32
2.10	Punktquelle KVA	33
2.11	Punktquelle Kühlturm	34
2.12	Flächenquelle Heizung	34
2.13	Tagesmodulation der Heizproduktion	35
2.14	Tagesgang von lokalem Schneegriesel bei niedrigem Stratus	36
3	Vorhersage	37
3.1	Aktuelle Vorhersagemethoden	37
3.2	Topographisches Grenzschichtmodell	38
3.3	Simulation von Kaltluftseen	39
3.4	Lokale Nebelvorhersage mit topographischem Grenzschichtmodell	43
4	Schlussfolgerungen	44
4.1	Atmosphärische Bedingungen bei Schneegriesel	44
4.2	Bedeutung der lokalen Wasserdampfquellen	44
4.3	Vorschlag eines Prognoseverfahrens	44
5	Anhang	45
5.1	Niederschlagsformen	45
5.2	Literaturverzeichnis	45

1 Phänomenologie

1.1 Einleitung

An gewissen Orten tritt im Winter nur ganz lokal Schneefall auf, der zu Strassenunterhaltseinsätzen führt. Typischerweise tritt das Phänomen in der Nähe von Anlagen zur Kehrrichtverbrennung oder Anlagen der Papier-, Stahl- und Chemieindustrie auf. Im Rahmen des Forschungsauftrages 1999/244 wurde das Phänomen unter dem Arbeitstitel «Industrieschnee» eingehender untersucht. Die Zielsetzung war, eine Übersicht über Ort und Häufigkeit zu gewinnen, zu einem Verständnis des Phänomens zu gelangen und seine Vorhersagbarkeit zu prüfen.

1.2 Erhebungen

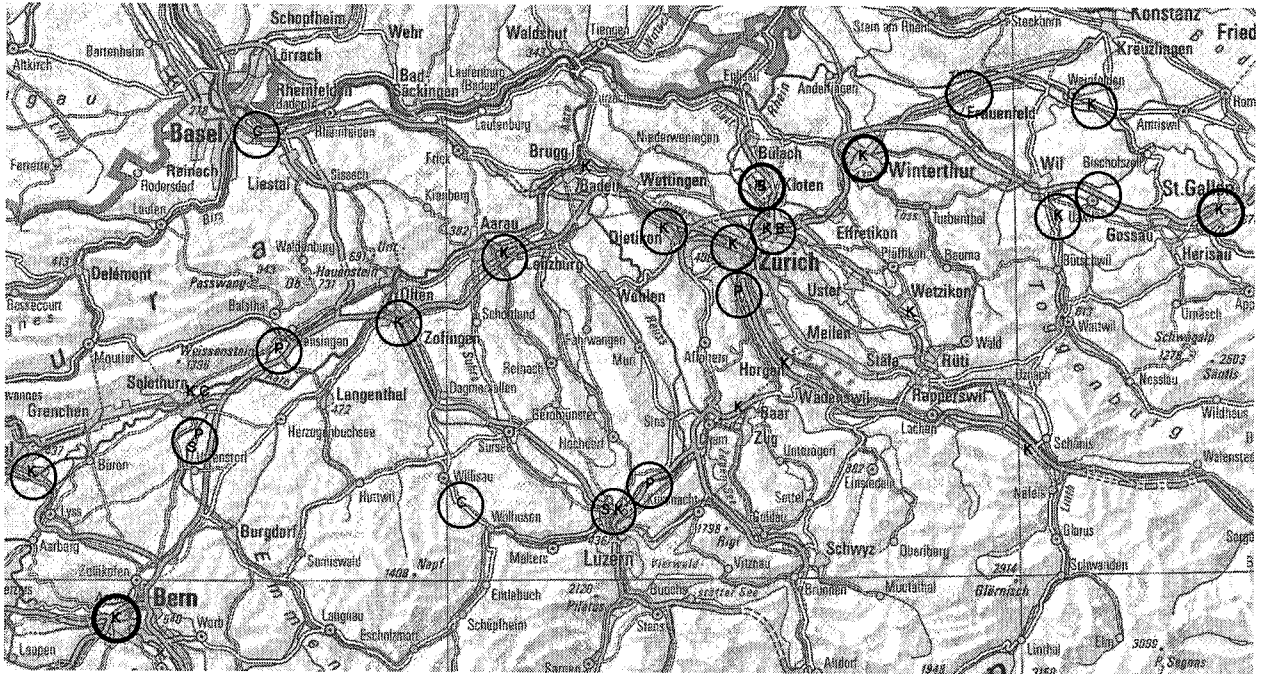
Durch eine schriftliche Umfrage bei Werkhöfen und Strasseninspektoraten der deutschsprachigen Schweiz wurden im Frühjahr 2002 von Urs Keller (MeteoSchweiz) Informationen über Häufigkeit, regionale Verteilung und Notwendigkeit von Unterhaltseinsätzen bei Industrieschnee zusammengetragen. Von 35 versandten Fragebogen wurden 25 beantwortet und Industrieschnee wurde von 17 Werkhöfen gemeldet. Am häufigsten wird Industrieschnee in Bern West, Zürich Flughafen, Winterthur Ost und St. Gallen West beobachtet. An vielen Orten werden die Verursacher als bekannt gemeldet.

<i>Gebiet</i>	<i>Einsatz</i>	<i>Häufigkeit</i>	<i>Anlage</i>
Stadt Bern West A1/A12	Taumittel	oft	KVA
A1 Anschluss Kriegstetten	Pflug	gelegentlich	Papier, Stahl
A1 Anschluss Oensingen	Taumittel	selten	Papier
A1 Anschluss Oftringen	Taumittel	selten	KVA
A1 Anschluss Aarau Ost	Taumittel	selten	KVA
A1 Anschluss Dietikon	Taumittel	selten	KVA
Stadt Zürich Industrie West	Taumittel	selten	KVA
A3 Anschluss Brunau	Taumittel	selten	Papier
A1 Zürich Nord/Flughafen	Taumittel	oft	KVA, BHK
Stadt Winterthur	Taumittel	oft	KVA
A1 Anschluss Oberwinterthur	Taumittel	selten	KVA
A7 Anschluss Frauenfeld Ost	Taumittel	gelegentlich	
A1 Anschluss Wil	Taumittel	selten	KVA
Stadt St. Gallen West und A1	Taumittel	oft	KVA
A13 Anschluss Sargans	Taumittel	selten	
A2 Schweizerhalle	Taumittel	selten	Chemie
A14/A2 Anschluss Emmenbrücke	Taumittel	selten	Stahl, KVA
A14 Perlen	Taumittel	selten	Papier
A8 Sarnen	Taumittel	sehr selten	

Industrieschnee kommt im Schweizer Mittelland in unmittelbarer Nähe von Kehrrichtverbrennungsanlagen (KVA), Blockheizkraftwerken (BHK), Papier, Stahl- und Chemiefabriken vor. In der Schweiz sind 28 KVA in Betrieb. An 9 KVA Standorten im Mittelland wurden Fälle von Industrieschnee mit Einsätzen der Strassenunterhaltsdienste gemeldet.

Das Phänomen Industrieschnee tritt nach den Erhebungen von Urs Keller bei stationären Hochdrucklagen mit Nebel/Hochnebel auf, dessen Obergrenze zwischen 700 und 1100 m/M liegt (Mittel bei 900 m/M). Der Wind im Kaltluftsee ist schwach: bei Bise maximal 15 km/h, bei SW/SE /variablen Wind maximal 7 km/h. Die Temperatur liegt im Bereich $-5...+1^{\circ}\text{C}$, im Bereich $-1...+1^{\circ}\text{C}$ fällt der Niederschlag als Nebelregen. Das Phänomen ereignet sich vorwiegend in der Nacht und am Morgen (00...08 Uhr) in den Monaten Dezember bis Februar.

Anfragen bei den Unterhaltsdiensten ergaben, dass Industrieschnee in den Einsatzjournalen der Strasseninspektorate und -werkhöfe nicht speziell protokolliert wird. Einzig das Strasseninspektorat der Stadt Winterthur führt den Begriff in seinen Aufzeichnungen. Die Termine mit Industrieschnee in Winterthur konnten daraus für die vier Winter 1999/2000 bis 2002/2003 zusammengestellt werden. Sie wurden durch Aufzeichnungen des im beschneiten Gebiet wohnhaften Autors ergänzt.

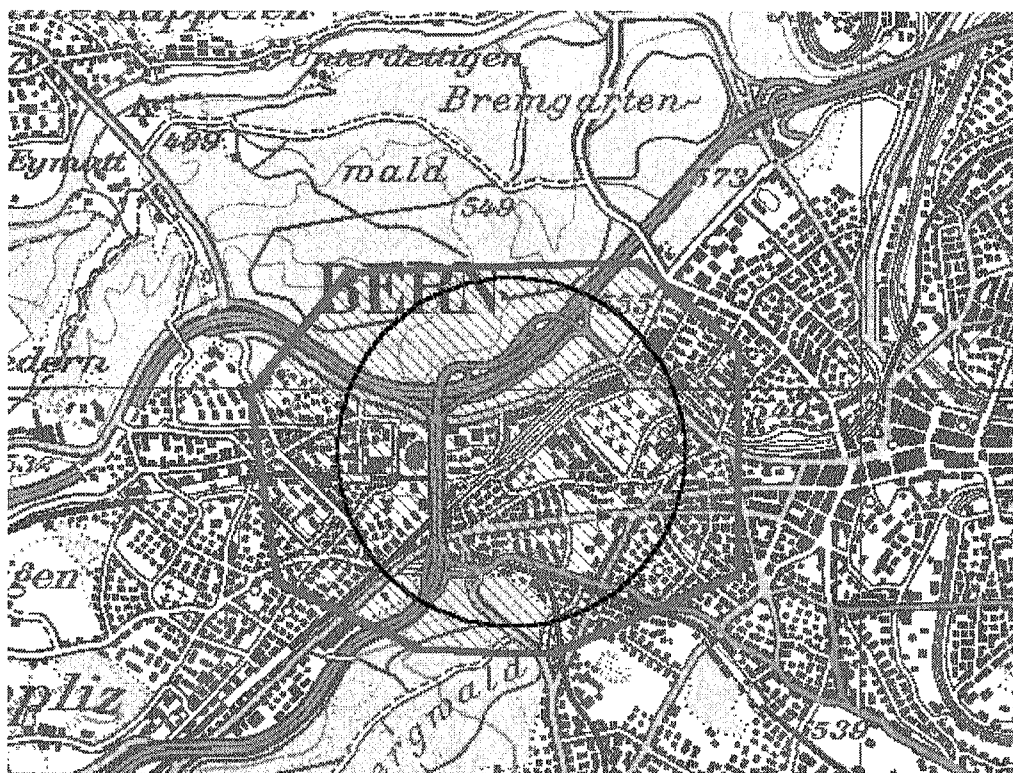


Lokalisierte Wärme- und Feuchtequellen.

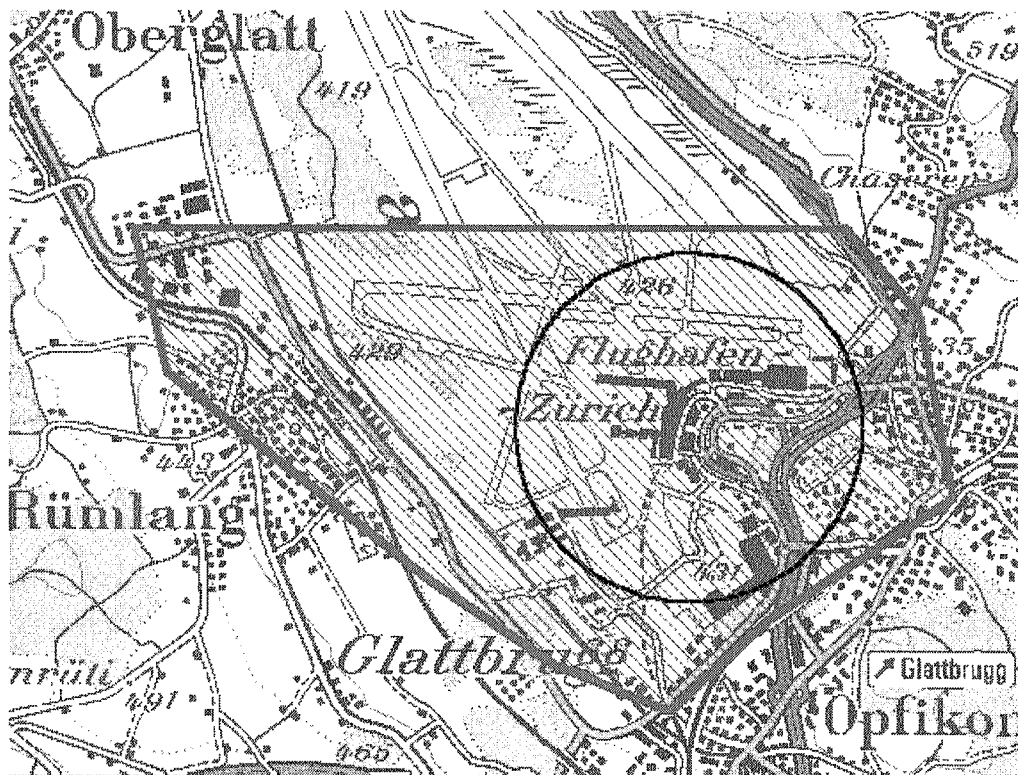
(B: Blockheizkraftwerk, K: Kehrrichtverbrennung, P: Papier, S: Stahl, C: Chemie, Kühltürme von Kernkraftwerken sind nicht aufgeführt)

*In den eingekreisten Gebieten tritt Industrieschnee auf
(fein: selten/gelegentlich, fett: oft)*

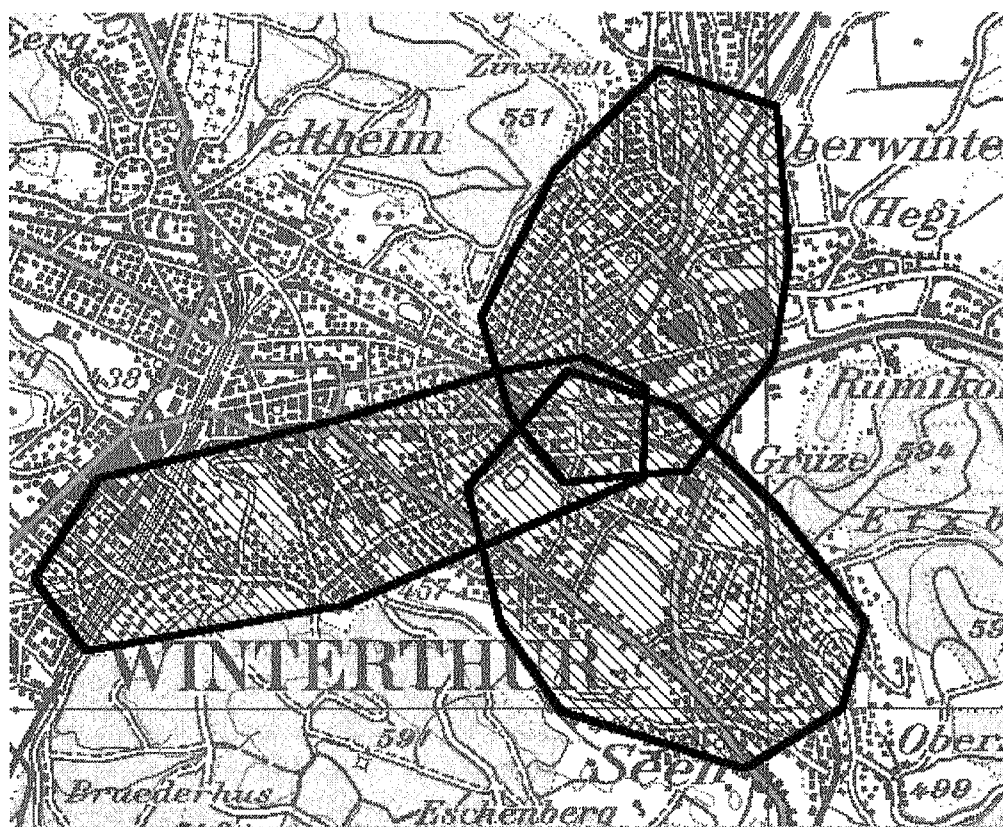
Die vier Orte, an denen Industrieschnee relativ oft auftritt, sind nachfolgend detaillierter dargestellt.



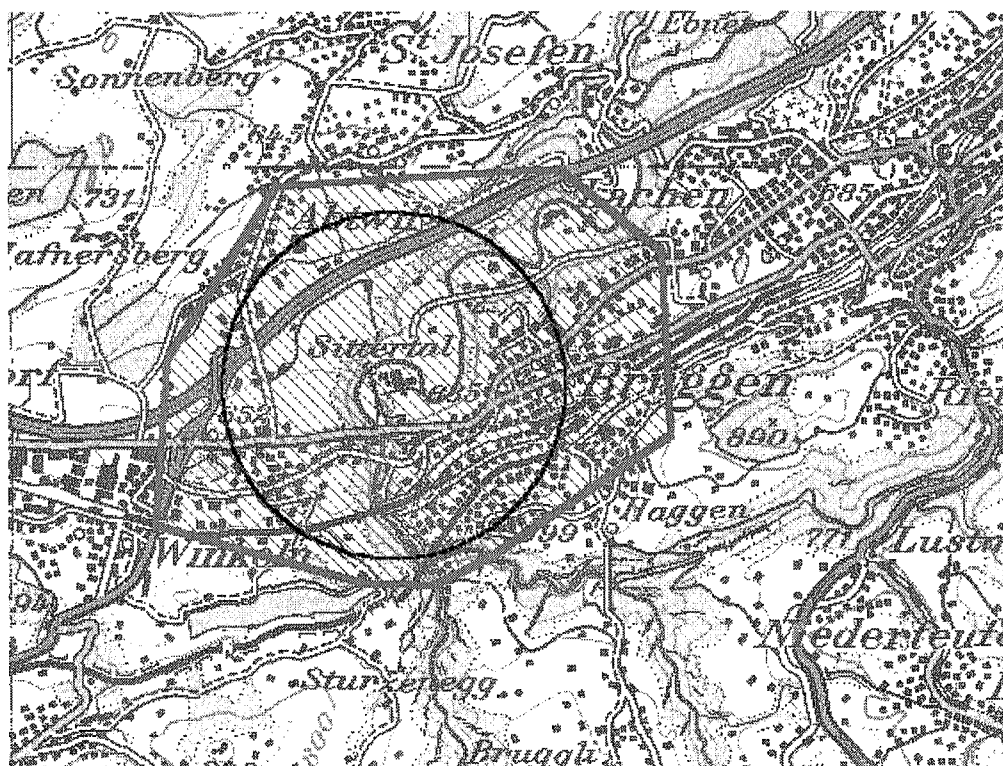
KVA Bern und Gebiet mit Industrieschnee



Flughafen Zürich und Gebiet mit Industrieschnee



KVA Winterthur und Gebiet mit Industrieschnee



KVA St. Gallen und Gebiet mit Industrieschnee

1.3 Termine mit Industrieschnee

Termine mit Industrieschnee in Winterthur (W) wurden für vier Winter zusammengestellt. Nach der Tagesgangstatistik des Flugwetterdienstes wurde am Flughafen Zürich (F) an diesen Terminen meist Schneegriesel oder Graupel beobachtet. Für Oftringen (O) liegt nur eine zufällige Einzelbeobachtung vor. Für andere Orte mit Industrieschnee wie Bern West, Luzern Nord und St. Gallen West liegen keine Terminangaben vor.

Die Schneehöhen für Winterthur sind punktuelle Schätzungen des Autors. Am Flughafen werden Spuren (S) von Schneegriesel oder Graupel in den Beobachtungen festgehalten.

Die Termine mit Schneegriesel bzw. Industrieschnee fallen in die Monate Dezember, Januar und Februar. Als typische Tageszeiten können die Stunden um Sonnenaufgang und bei ganztägigem Stratus auch die Stunden nach Sonnenuntergang bezeichnet werden.

Ort	Datum	Termin (UTC)	Schneehöhe (mm)
F, W	14. Jan 2000	05:30-06:30	S, 2
F	26. Jan 2000	05:30-09:30	S
F, W	24. Dez 2000	05:30-09:30	S
W	17. Jan 2001	08:00	
F		08:00-08:30	S
W	16. Feb 2001	06:00	
F		05:30-09:00	S
W	05. Jan 2002	03:30	1
F		05:30-08:30	S
W	06. Jan 2002	07:00	15
F		05:30-08:00	3
F		15:00-18:00	S
F		20:30-23:00	S
W	07. Jan 2002	07:00	2
W	09. Jan 2002	05:30	5
W		07:30	1
W		10:30	1
F		05:30-10:30	S
F		17:10-18:40	S
F		19:40-21:00	S
F	10. Jan 2002	07:30-09:30	S
F		20:00-20:40	S
W		00:00-06:00	10
W		21:00	
W	11. Jan 2002	06:00	2
W	13. Jan 2002	06:00	
F	14. Jan 2002	20:00-22:00	S
W	15. Jan 2002	06:00	S
F		07:00-07:30	S
		10:00-12:00	S
		21:00-22:30	S
F	16. Jan 2002	05:35-07:00	S
F	19. Jan 2003	05:00	S
F	20. Feb 2003	07:00	S
F	21. Feb 2003	05:00	S
W	22. Feb 2003	04:00	
F, W, O	23. Feb 2003	05:00-07:00	S
F, W	24. Feb 2003	05:30-07:00	S

Für die beiden Perioden 19.-24. Februar 2003 und 5.-16. Januar 2002 wurden archivierte Wetterdaten beschafft und analysiert.

In den vier untersuchten Wintern kam Industrieschnee in Winterthur und Schneegriesel am Flughafen Zürich im Mittel an 4 bis 5 Tagen pro Winter vor.

Ort	1999/2000 (Tage)	2000/2001 (Tage)	2001/02 (Tage)	2002/2003 (Tage)	Mittelwert (Tage/Jahr)
Winterthur	2	2	10	4	4.50
Flughafen Zürich	3	1	10	5	4.75

Häufigkeit von Tagen mit Industrieschnee 1999...2003

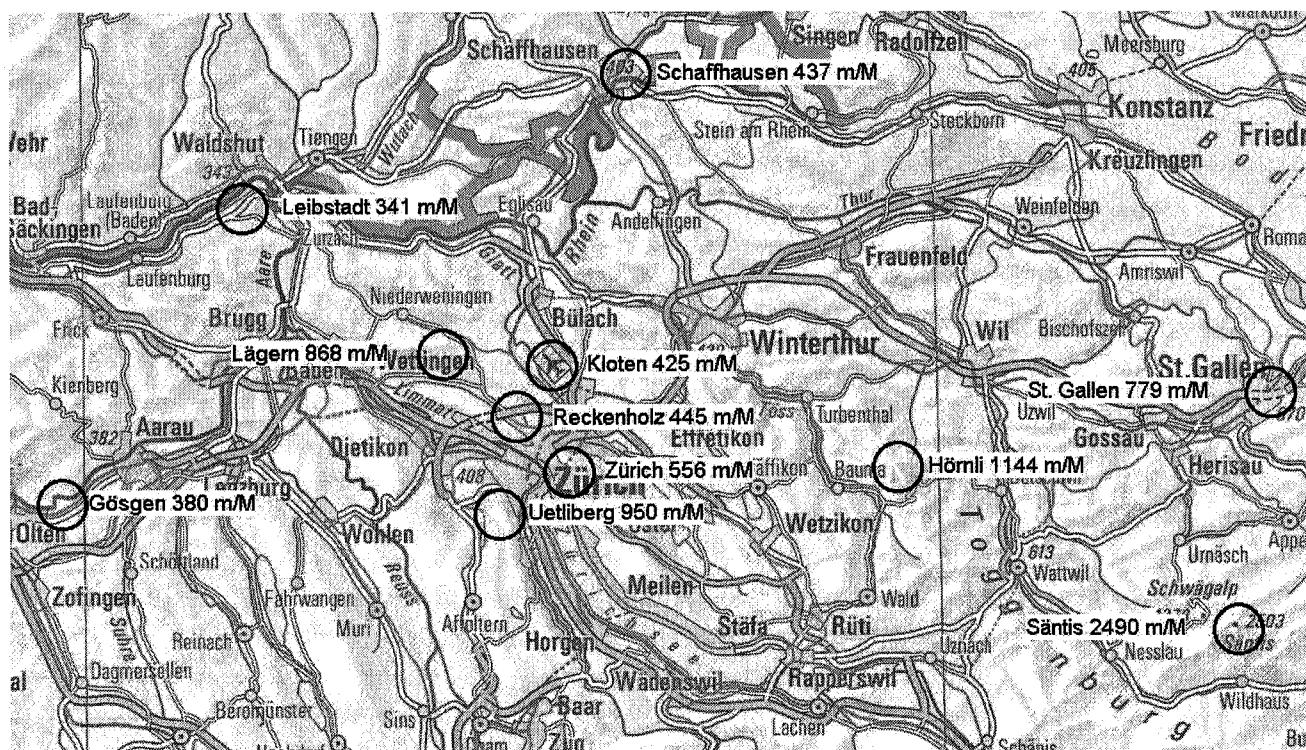
1.4 Meteodaten

Für die beiden Perioden mit häufigem Auftreten von Industrieschnee (Januar 2002 und Februar 2003) wurden folgende Wetterdaten ausgewertet:

Quelle	Daten
MeteoSchweiz, Zürich	Wetterberichte, Bodendaten, Höhendaten
Strasseninspektorat, Winterthur	Lufttemperatur 2m und 5cm

Die Wetterberichte von MeteoSchweiz enthalten die Boden- und die Höhenkarte, die Radiosonden-aufstiege von Payerne und ausgewählte Stationsmeldungen.

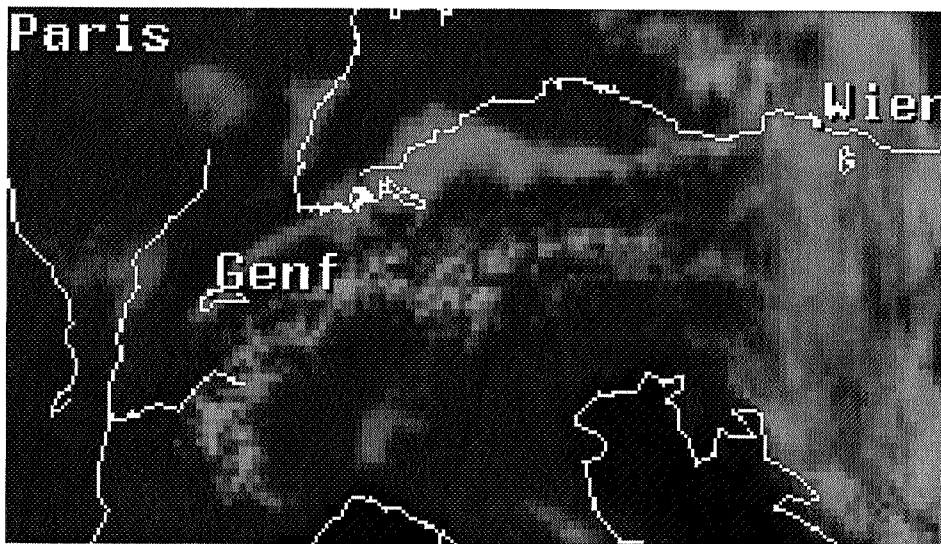
Als Höhendaten standen die Radiosondierungen von Payerne zur Verfügung, als Bodendaten die Stationen Zürich Flughafen, Reckenholz, Leibstadt, Gösigen, Zürichberg, Lägern, Uetliberg, Hörnli, St. Gallen und Säntis.



Ausgewertete Stationen

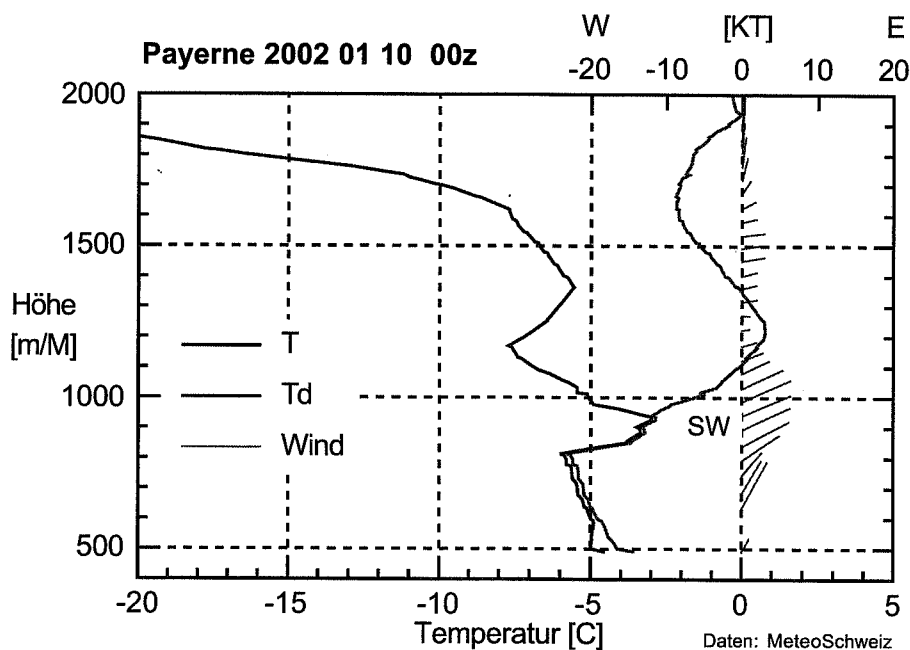
1.5 Wetterlage

Industrieschnee tritt im Winter nach dem Aufbau von stationären Hochdrucklagen auf. Es liegt immer eine windschwache *Inversionslage* mit warmer, trockener Luft in der Höhe und einem kalten, stagnierendem Nebelmeer (Stratus) in den tiefen Lagen des Schweizer Mittellandes vor.



Niedriger Stratus im Schweizer Mittelland und über der schwäbischen Hochebene

Niedriger Stratus (Obergrenze unter 800 m.ü.M.) bildet sich nach Abflauen der Bise aus mittelhohem Hochnebel (1500 m.ü.M) oder bei windschwachem Hochdruckwetter durch nächtliche Ausstrahlung. Im Winter bei flachem Sonnenstand löst sich der tiefe Stratus im Tagesverlauf spät oder gar nicht auf.

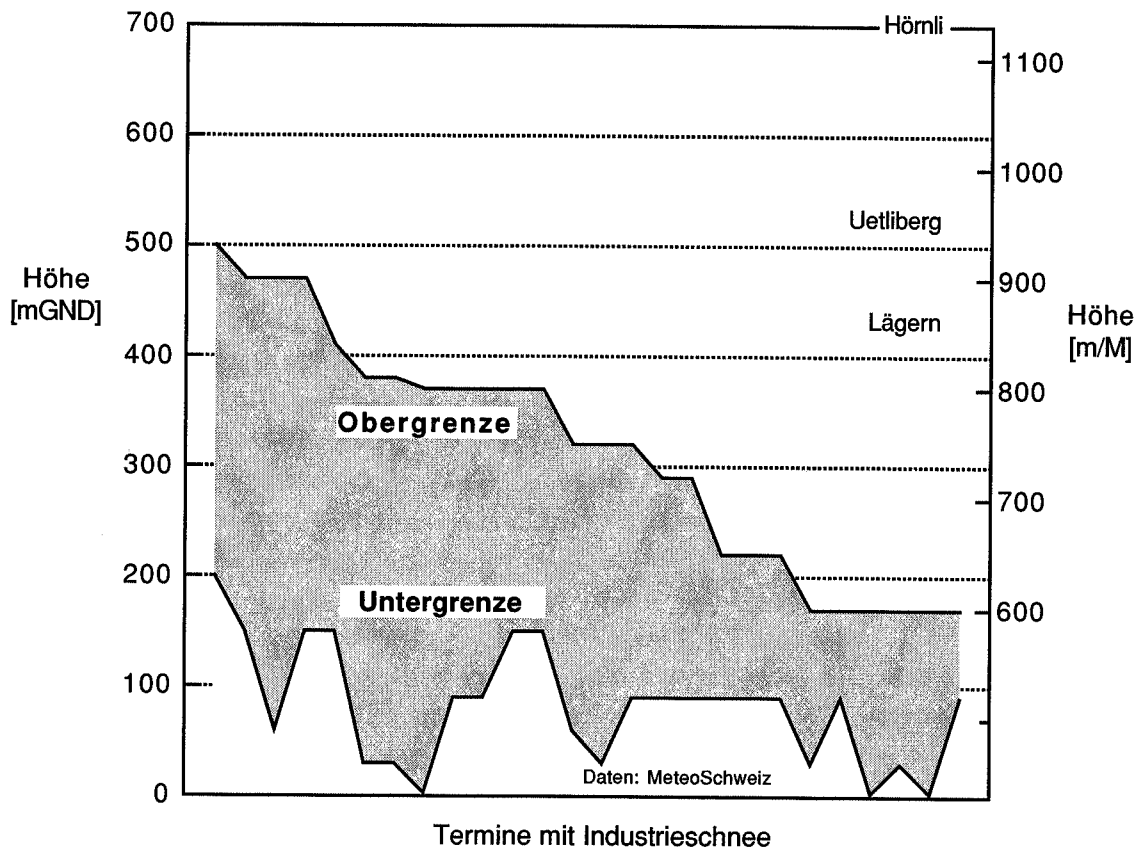


Vertikalprofil von Taupunkt (Td, links), Temperatur (T, rechts) und Wind (ganz rechts, als Faden) bei tiefem Stratus

1.6 Stratushöhe

Die Tagesgangstatistik des Flugwetterdienstes am Flughafen Zürich enthält neben den Augenbeobachtungen von schwachen Schneefällen auch den mit dem Ceilometer gemessenen Verlauf der Wolkenuntergrenze. Vereinzelt liegen auch Pilotenmeldungen der Stratusobergrenze vor. Ergänzt wurden die von Piloten gemeldeten Obergrenzen durch die Mont-Meldungen (Augenbeobachtung der unterhalb der Station liegenden Wolken) der Stationen Säntis, Jungfraujoch, St. Gallen und Zürichberg.

Bei Industrieschnee enthält der Kaltluftsee eine geschlossene Hochnebeldecke (Stratus) mit einer Obergrenze in 170-470 m über Grund. Das Nebelmeer reicht bis in eine Höhe von 600-900 m/M.



Stratushöhe bei Industrieschnee im Schweizer Mittelland

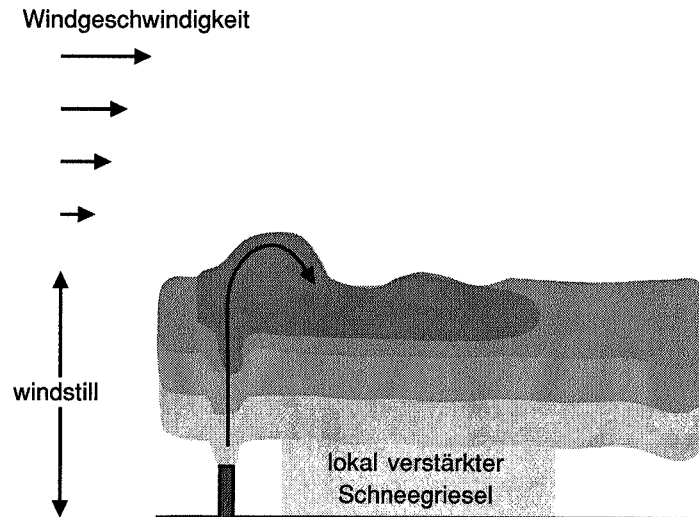
Die Station Hörnli liegt mit 1144 m/M bei Industrieschnee immer über dem Stratus, die Stationen Uetliberg (Messfühler auf ca. 950 m/M) und Lägern (868 m/M) liegen meistens über dem Stratus („Uetliberg hell“).

Die Untergrenze des Stratus liegt in höchstens 150 m über Grund, der Stratus weist eine Dicke von 100-300 m auf. Es ist wesentlich, dass die Untergrenze des Stratus nur wenig über dem Boden liegt. Höherer Stratus kann auch ausschneien, der Niederschlag sublimiert (verdunstet) aber, bevor er den Boden erreicht.

Als typische Bedingung für Industrieschnee kann ein stagnierender, kalter Stratus von 200 m Mächtigkeit bezeichnet werden, dessen Untergrenze 100 m über Grund liegt. Die Obergrenze liegt dann in 300 m über Grund.

1.7 Beschneiungsfläche und Schneehöhe

Die beschneite Fläche beträgt einige Quadratkilometer, der Abstand zur Quelle meist weniger als 2 km. In der Umgebung der KVA Winterthur umfasst die beschneite Fläche bis 6km². In der Regel ist die Schneehöhe gering und knapp bodendeckend. Die Schneehöhe ist nicht auf der ganzen beschneiten Fläche homogen.



Feuchtetransport bei Industrieschnee mit leichtem Wind über dem Stratus

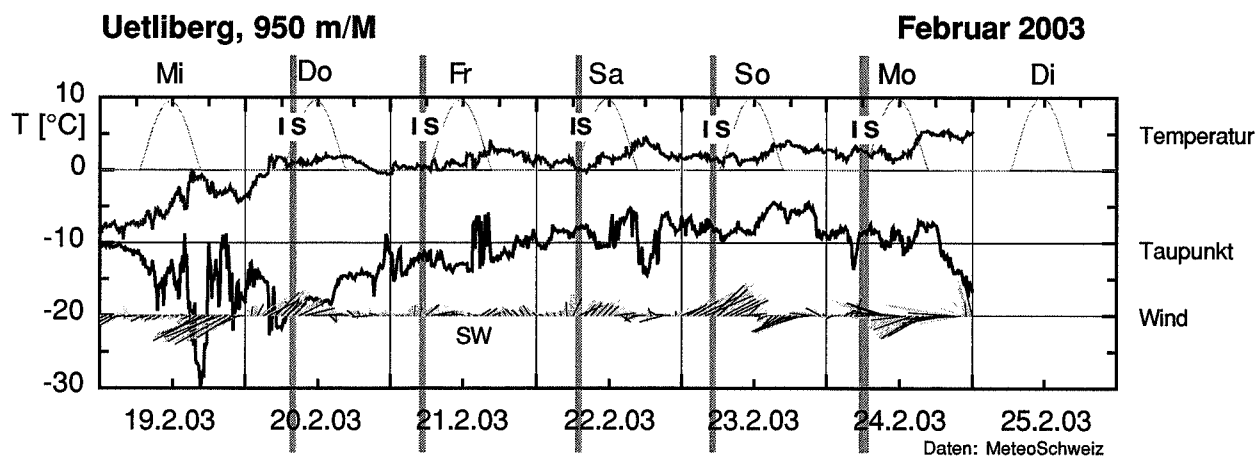
Bei Wind oberhalb des Stratus liegt die beschneite Fläche auf der windabgewandten Seite der Wasserdampfquelle. Die feucht-warme Abluft aus Hochkaminen dringt nach dem Aufstieg durch den Stratus leicht in die Inversion ein, wird durch den Wind mitgenommen und sinkt dann wieder in den ruhenden Stratus ab.

In Winterthur wird bei Südwestwind über dem Stratus der Stadtteil Oberwinterthur beschneit. Bei Bise oberhalb des stagnierenden Stratus werden die Stadtteile Breite und Töss beschneit. Bei Nordwestwind fällt der Industrieschnee entsprechend in Seen. Am häufigsten wird Oberwinterthur beschneit, am seltensten Töss. Bei Windstille über dem Stratus fällt der Industrieschnee um die Kehrrichtverbrennungsanlage.

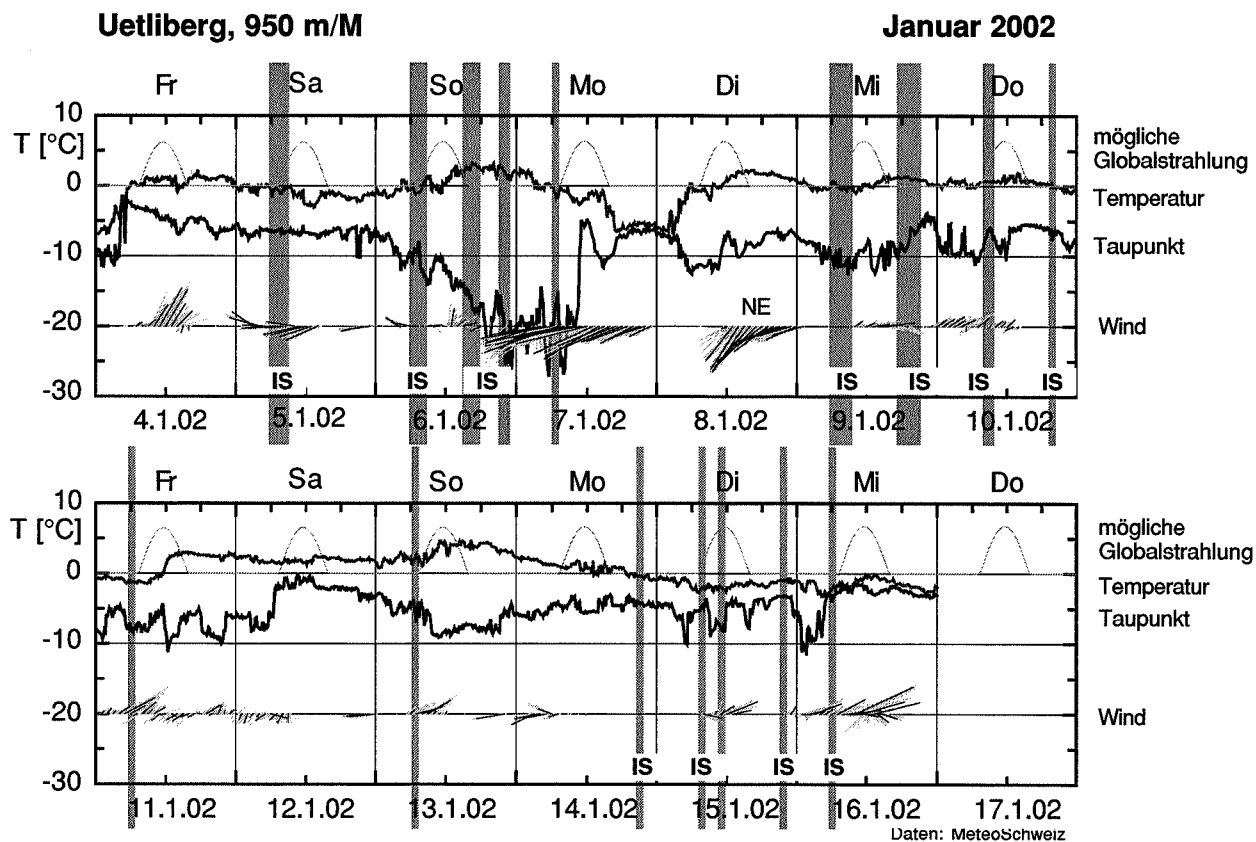
1.8 Bodenstationen in Kamm- und Beckenlagen

Für die beiden Perioden vom 19.–24. Februar 2003 (Stratusauflösung am Tag und Neubildung in der zweiten Nachthälfte) und vom 4.–16. Januar 2002 (ganztägiger Stratus) wurden die Zeitreihen der Stationsmessungen dargestellt und ausgewertet. Die Termine mit Industrieschnee in Winterthur bzw. Schneegriesel am Flughafen Zürich wurden eingetragen.

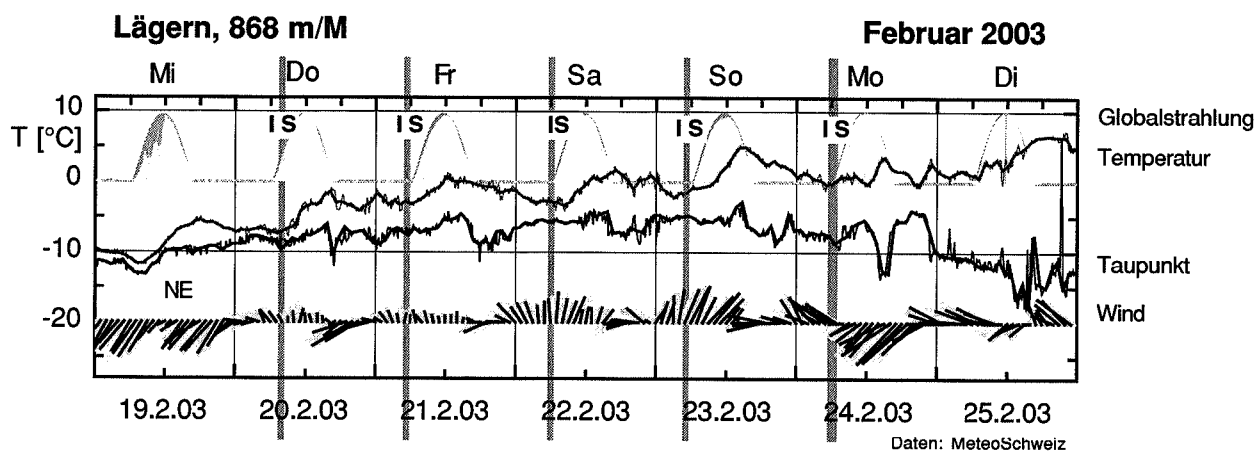
In der Inversion über dem Stratus ist die Luft trocken (Hörnli, Uetliberg und zeitweise auch Lägern). An den Terminen mit Industrieschnee ist der Wind über dem Stratus meistens schwach und weht in der Regel aus SW.



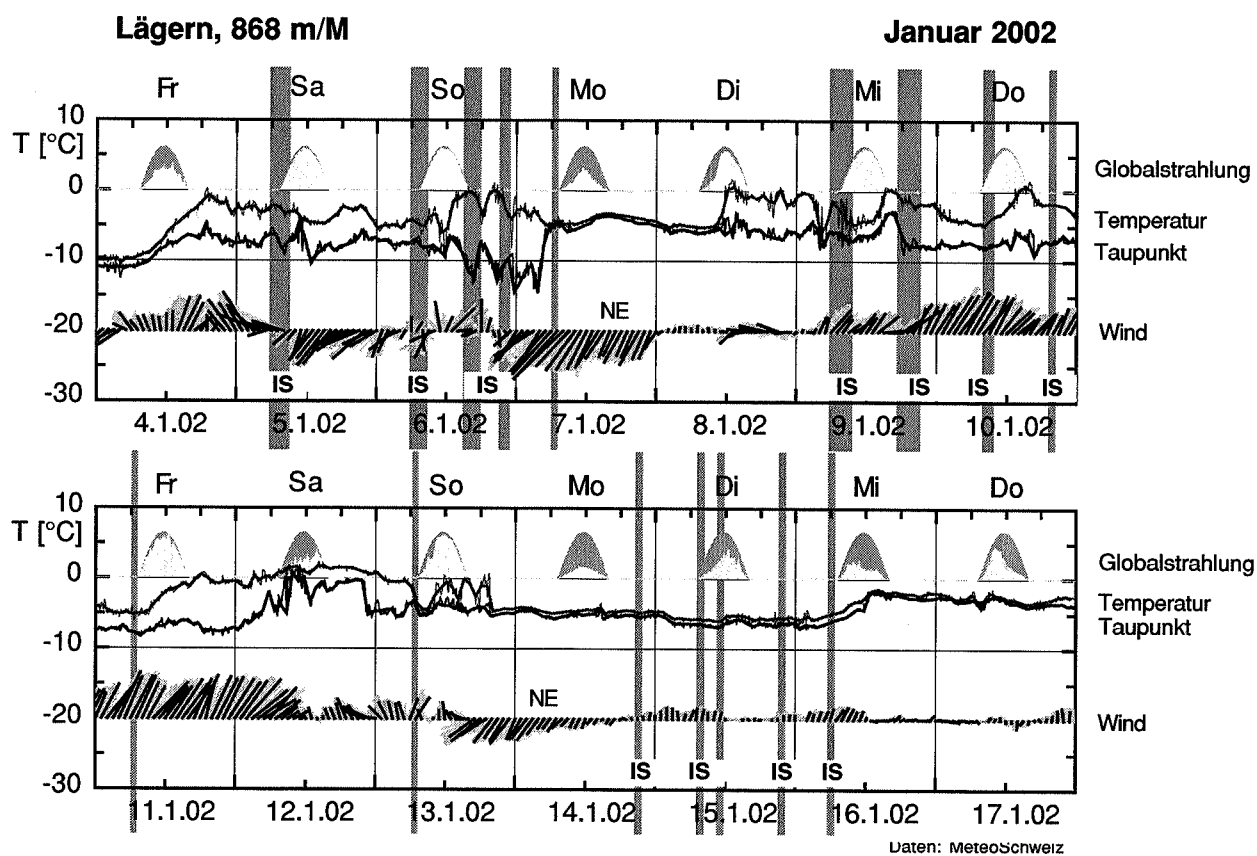
*Turm Uetliberg an Tagen mit Stratusauflösung.
Die Messfühler liegen über dem Nebelmeer.*



*Turm Uetliberg an Tagen mit ganztägigem Stratus.
Die Messfühler liegen meist über dem Nebelmeer.*

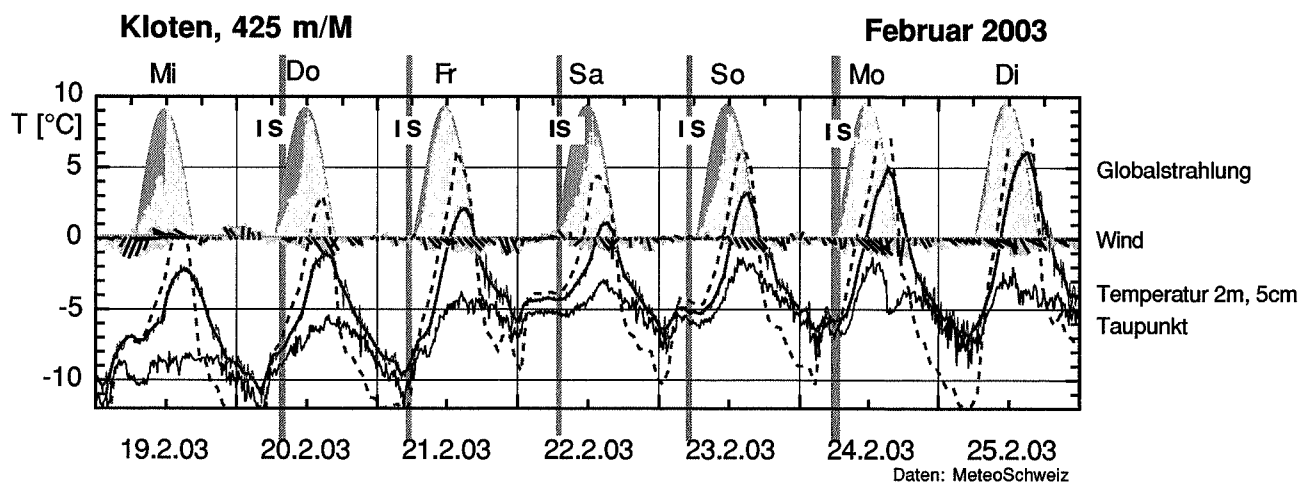


*Station Lägern an Tagen mit Stratusauflösung.
Die Station liegt meist wenig über dem Nebelmeer.*



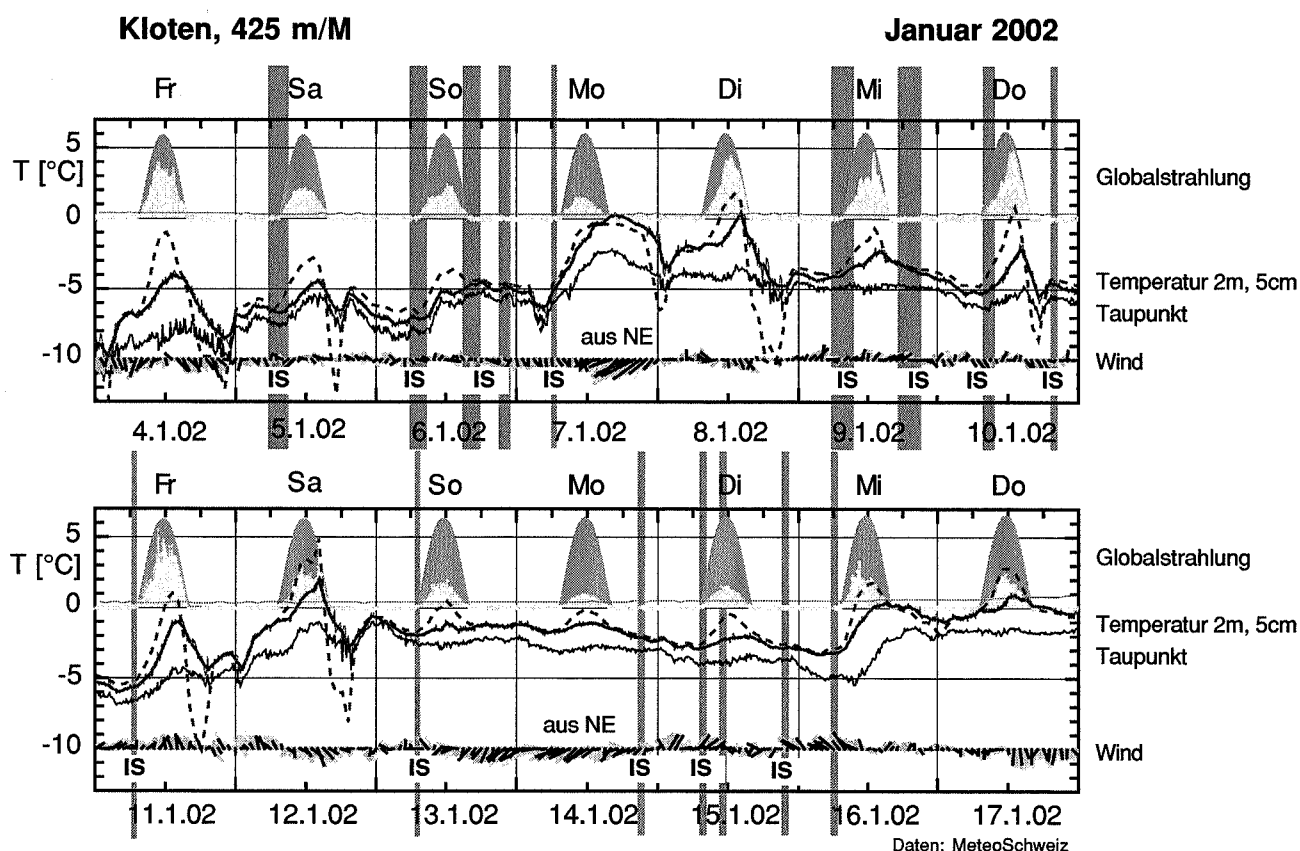
*Station Lägern an Tagen mit ganztägigem Stratus.
Die Station liegt teilweise im Nebelmeer.*

Die Temperaturaufzeichnungen der Stationen im Kaltluftsee (Beckenlagen) zeigen die nächtlichen Kühlraten. Wenn die +5cm Temperatur (gestrichelt) nachts unter der 2m Temperatur (ausgezogen) liegt, bildet sich eine Bodeninversion und die Kühlrate liegt unter Tau- bzw. Reifbildung bei klarem Himmel zwischen -0.45 bis -0.6°C/h . Mit der Entstehung eines tiefen Stratus steigt die Lufttemperatur etwas an (23.2.2003) und die +5cm Temperatur wird gleich oder leicht grösser als die 2m Temperatur. Die Kühlrate ist deutlich geringer als vor der Stratusbildung.



Station in Beckenlage bei Stratusauflösung im Tagesverlauf

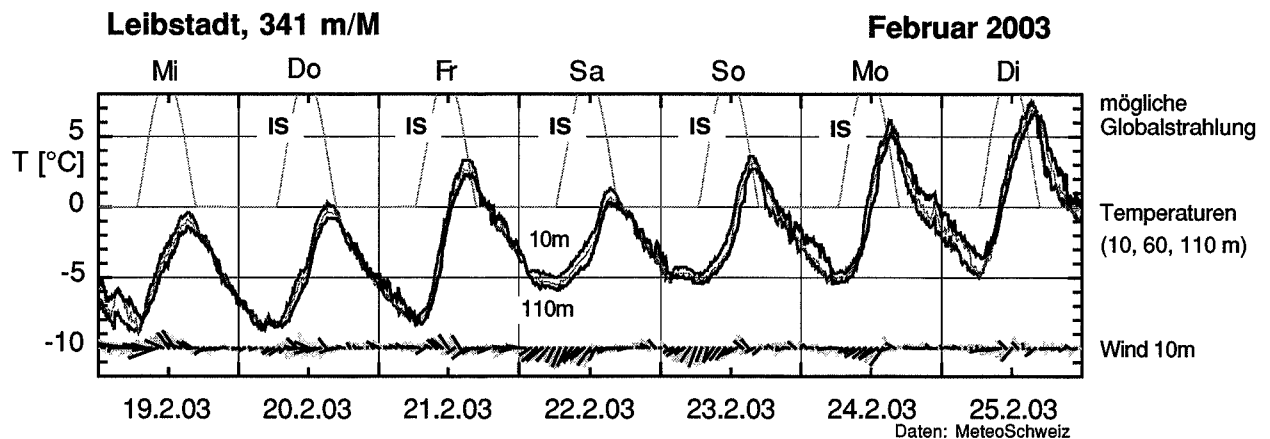
Wenn sich der tiefe Stratus tagsüber nicht auflöst, kann es auch in der zweiten Tageshälfte zu Industrieschnee kommen.



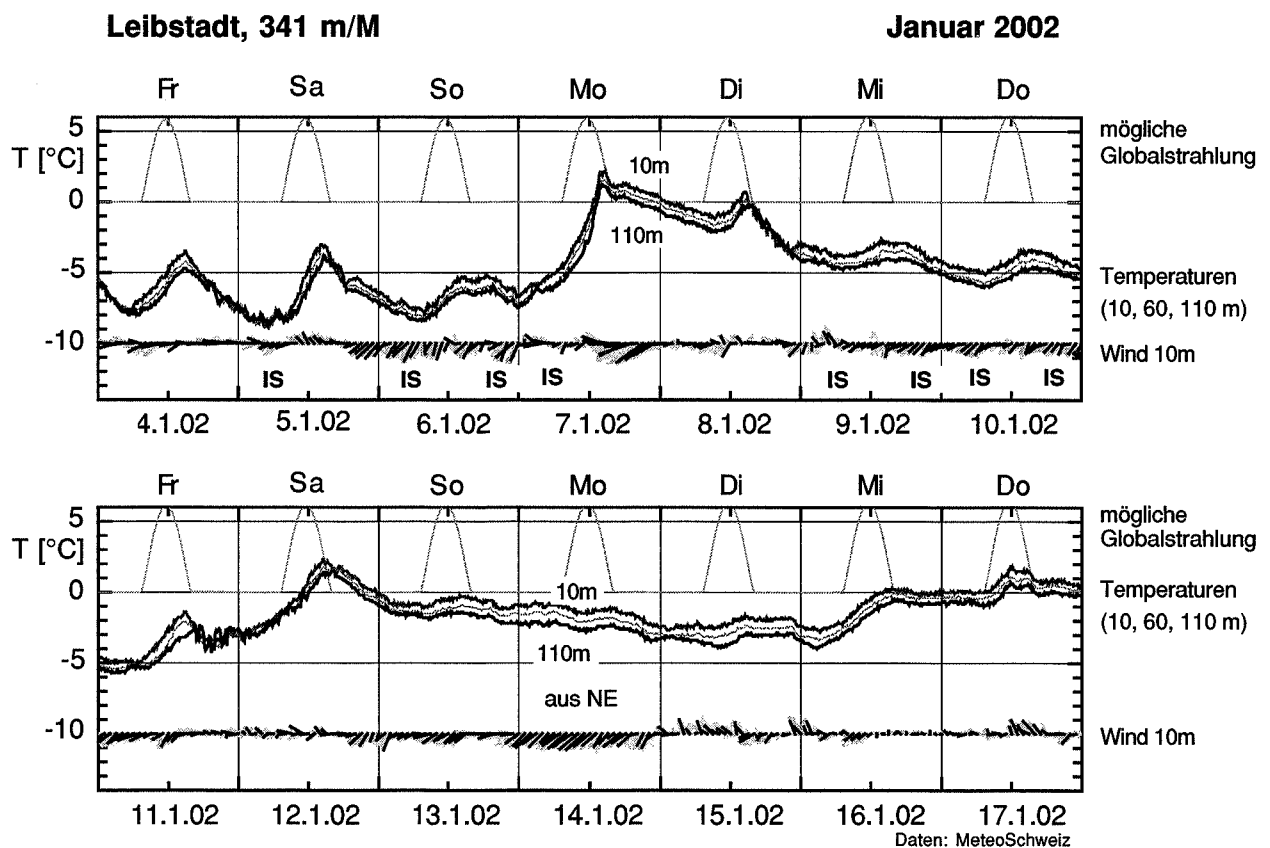
Station in Beckenlage bei ganztägigem Stratus

1.9 Grenzschichtmasten in Beckenlagen

Bei den Kühltürmen der Kernkraftwerke Leibstadt und Gösgen werden an Masten die Lufttemperaturen in den drei Höhen 10, 60 und 110 m über Boden gemessen. Die Temperaturschichtung in der Grenzschicht hängt von den Wärmeflüssen ab. In klaren Nächten ist es in 10 m kälter als in 110 m (Februar 2003), bei niedrigem Stratus liegt nachts die 10 m Temperatur höher als die 110 m Temperatur (Januar 2002).



Temperaturen in 10, 60 und 110 m über Grund in tagsüber nebelfreiem Kaltluftsee



Temperaturen in 10, 60 und 110 m über Grund bei ganztägigem Stratus

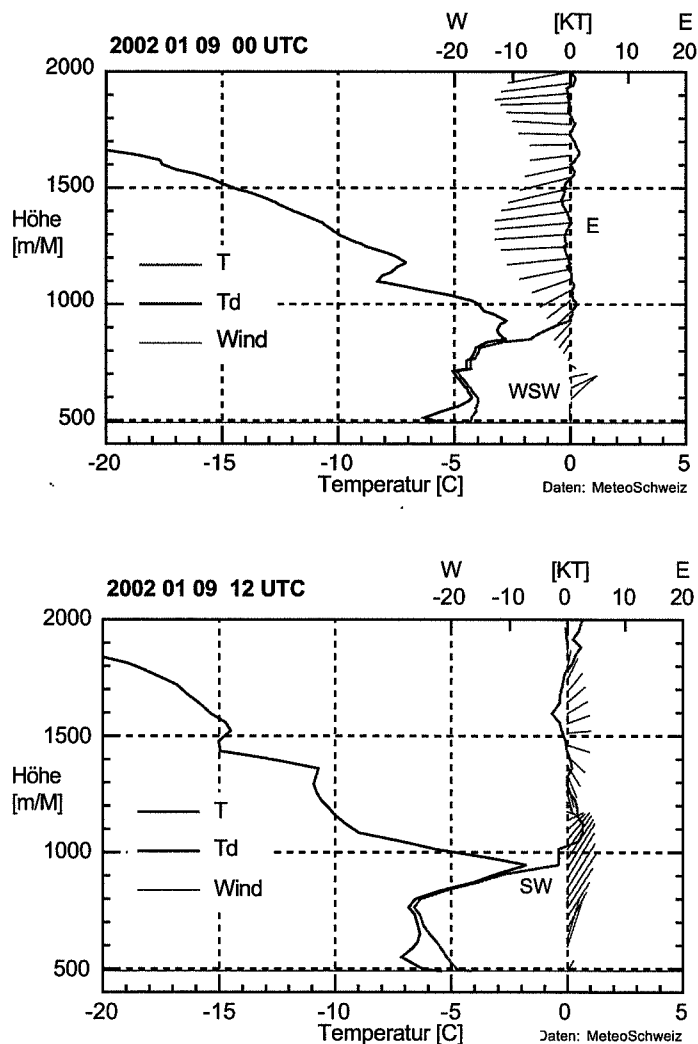
1.10 Höhendaten Payerne

Für die beiden Perioden vom 4.–16. Januar 2002 (ganztägiger Stratus) und vom 19.–24. Februar 2003 (Stratusauflösung am Tag und Neubildung in der zweiten Nachthälfte) wurden Vertikalprofile für die Grenzschicht erstellt, wie sie aus den Radiosondierungen von Payerne hervorgehen. Die Aufstiege in Payerne erfolgen zweimal pro Tag (00 UTC und 12 UTC).

Die konvektive Durchmischung des Nebelmeeres ist an den vertikalen Temperaturgradienten im Nebelmeer zu erkennen. Bei Durchmischung nimmt die Temperatur mit der Höhe ab.

In den Vertikalprofilen der Radiosondierungen nimmt der Taupunkt (T_d) in der Inversion (Temperaturzunahme mit der Höhe) mit der Höhe zu. Die Stationsmessungen und die Mons-Meldungen weisen aber darauf hin, dass die Stratusobergrenze auf der Höhe liegt, in der die Inversion beginnt und dass die Luft darüber ungesättigt ist. Die Sättigung in der Inversion wird möglicherweise durch die während des Aufstieges durch den übersättigten Stratus akkumulierte Vereisung des Feuchtemessfühlers vorgetäuscht. Das akkumulierte Eis muss beim Aufstieg zuerst schmelzen, bevor der Fühler die ungesättigte Luft über dem Nebelmeer messen kann. Die Stratusobergrenze erscheint durch diesen Hystereseffekt in den Radiosondierungen systematisch zu hoch.

Bei stagnierendem Stratus liegt die Temperatur im Kaltluftsee um 12 UTC tiefer als um 00 UTC. Durch den tiefen Sonnenstand und die kurze Sonnenscheindauer ist die nächtliche Abkühlung durch Ausstrahlung auch einige Stunden nach Sonnenaufgang im Vertikalprofil noch erkennbar.



Grenzschichtprofile in Payerne bei niedrigem Stratus

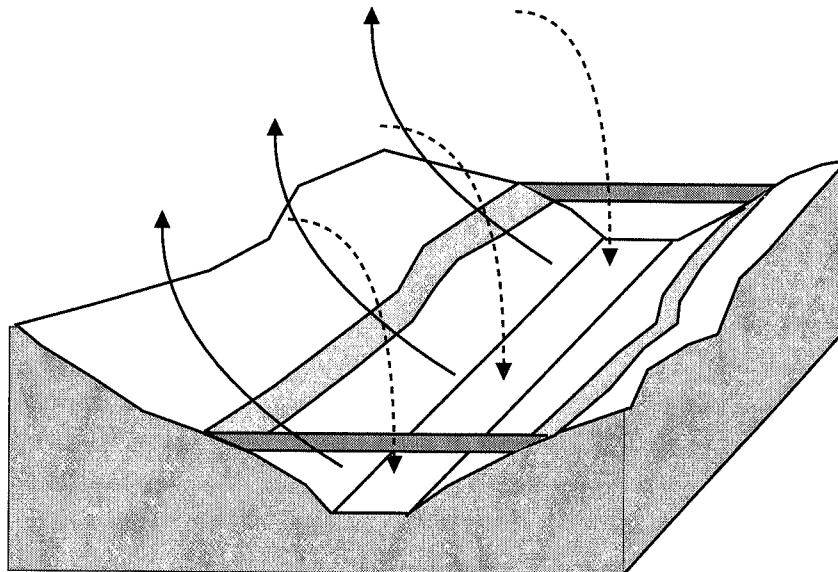
2 Wärme- und Feuchtehaushalt der atmosphärischen Grenzschicht

2.1 Thermische Zirkulation

Tagsüber erwärmt sich die Bodenoberfläche unter Sonneneinstrahlung, wenn diese die langwellige Abstrahlung übertrifft. Durch die langwellige Abstrahlung des Bodens und durch Konvektion verteilt sich diese Erwärmung auf die *Mischungsschicht*, deren Mächtigkeit im Tagesverlauf zunimmt. Nachts dominiert die Abstrahlung der Bodenoberfläche und auch die bodennahe Luft kühlt sich dadurch ab. Die nächtliche Abkühlung der Luft ist deutlich weniger hochreichend als die Erwärmung bei Tag.

Der langwellige Wärmestrahlungsfluss zwischen der Bodenoberfläche und der bodennahen Luft wird durch die Treibhausgase beeinflusst. Die Konzentration des Kohlendioxids ist dabei räumlich und zeitlich praktisch konstant, diejenige des Wasserdampfes dagegen variabel.

In gegliedertem Gelände (Hügel, Berge) werden die Wärmeflüsse durch Strahlung und Konvektion durch die *Hangwindzirkulation* ergänzt. Bei tagsüber positiver Strahlungsbilanz bilden sich Hangaufwinde, nachts bei negativer Strahlungsbilanz Hangabwinde. Die nächtliche Abkühlung ist in gegliedertem Gelände hochreichender als über einer Ebene, da höhergelegene Kühlflächen vorhanden sind. Die thermische Hangwindzirkulation ist bei klarem Himmel am stärksten und bei bedecktem Himmel schwach.



Hangwindzirkulation bei Tag

In gegliedertem Gelände reduziert die topographische Flächen-Höhenverteilung über die geometrisch reduzierte Luftmasse (Volumeneffekt nach Steinacker 1984, Neininger 1984, Liechti 1994) auch die atmosphärische Wärmekapazität. Bei gleicher Strahlungsbilanz sind Erwärmung- bzw. Abkühlung grösser als über ebenem Gelände und die thermisch beeinflusste Luftschicht wird mächtiger.

Zwischen benachbarten Gebieten mit unterschiedlicher Erwärmung bilden sich im Tages- bzw. Nachtverlauf horizontale Ausgleichsströmungen aus wie das nächtliche bodennahe Abfließen der Kaltluft aus dem Hügelland in die vorgelagerte Ebene (Bergwind) und die tagsüber auftretenden Talwinde aus der vorgelagerten Ebene ins gegliederte Gelände. Solche horizontalen Ausgleichsströmungen verfrachten bodennah kältere Luft aus dem kühleren Quell- ins wärmere Zielgebiet.

2.2 Bildung von Kaltluftseen

Bodennah entsteht bei klarem Himmel nachts Kaltluft. Die Auskühlung erfolgt durch die Wärmeabstrahlung des Bodens. Ein Teil der abgestrahlten Wärme wird durch die atmosphärische Gegenstrahlung der Treibhausgase kompensiert. Es bildet sich im Lauf der Nacht eine Bodeninversion: die Lufttemperatur sinkt bodennah am tiefsten und nimmt mit der Höhe zu. Typischerweise reicht die Bodeninversion bei Windstille über einer Ebene bis in 200 m über Grund. Über komplexer Topographie reicht die Abkühlung höher als über ebenem Gelände. Die bodennah entstehende Kaltluft neigt dazu, einen *Kaltluftsee* zu bilden.

An der Obergrenze der Kaltluftseen kann sich bei genügend hoher Luftfeuchtigkeit eine Hochnebel-schicht (Stratus) bilden. Die in diesem Fall an der Obergrenze der Schichtwolke auftretende Ausstrahlung verändert den Wärmehaushalt des Kaltluftsees. Die oberflächliche Abkühlung führt im Stratus zu spontaner, konvektiver Durchmischung, wobei die schwache Konvektion durch Absinken von an der Oberfläche abgekühltem Nebel in Gang kommt. Bei konvektiver Durchmischung ist die Übersättigung im Stratus an der Obergrenze am höchsten, da dort die tiefsten Temperaturen auftreten. Je mächtiger die vertikale Erstreckung des konvektiv durchmischten Stratus ist, desto grösser wird die Übersättigung an der Obergrenze. Über dem Stratus bildet sich eine Inversion wie über dem Boden.

Die Höhe der Stratusobergrenze ist von Bedeutung. Durch die Konvektion im Stratus nimmt eine grössere Luftmasse an der Abkühlung teil als bei klaren Verhältnissen. Die Abkühlungsrate wird bei gleicher Ausstrahlung durch die grössere beteiligte Luftmasse geringer. Zudem wird durch die Kondensation im Stratus ein weiteres Wärmereservoir verfügbar.

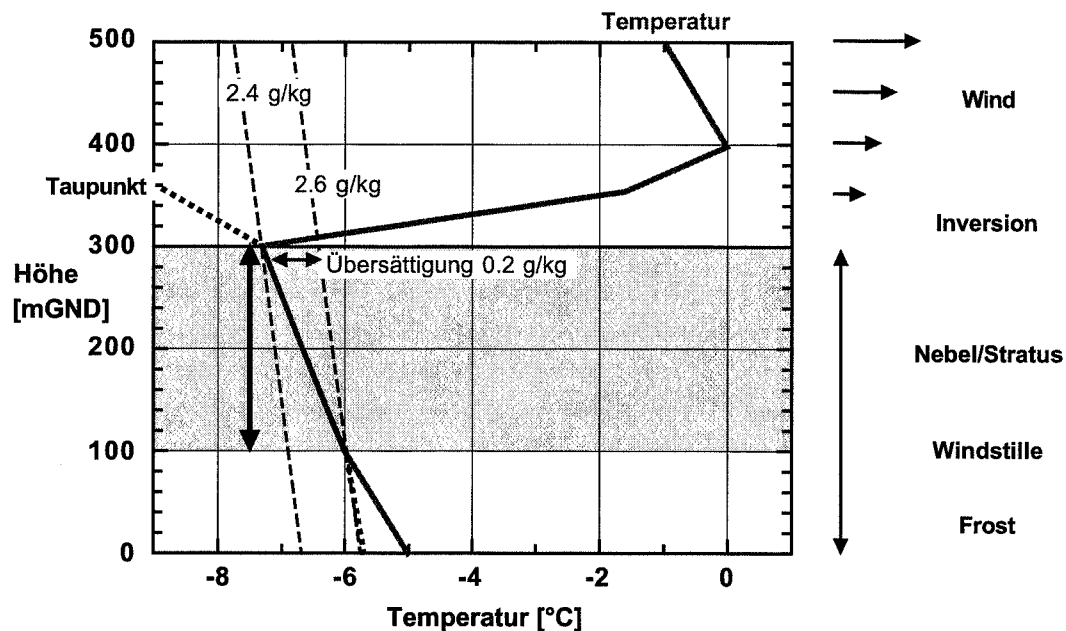
Im oberflächlich abstrahlenden Stratus stellt sich unter schwacher Konvektion mit der Zeit ein feucht-adiabatischer Temperaturgradient ein: die Temperatur nimmt mit zunehmender Höhe um weniger als 1°C pro 100 m ab. Der genaue Wert hängt von der frei werdenden Kondensationswärme ab. Bei tiefen Temperaturen ist die Sättigungsfeuchte geringer und damit die bei Abkühlung frei werdende Kondensationswärme. Bei -6°C beträgt der feucht-adiabatische Temperaturgradient $-0.71^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Die Abstrahlung kühlt mit der Zeit den ganzen Stratus bei feucht-adiabatischem Temperaturgradient ab. Unterhalb des auskühlenden Stratus wird die Temperaturschichtung trockenadiabatisch ($-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$). Erreicht die trockenadiabatische Schichtung von der Stratusuntergrenze ausgehend den Boden, wird die bodengebundene Wasserdampfproduktion in die schwache Konvektion einbezogen. Die am Boden messbare Abkühlung der Luft entspricht unter konvektiven Bedingungen der Kühlrate des gesamten Kaltluftsees.

Der Stratus und die darunterliegende ungesättigte Luft kühlen sich nachts als Ganzes ab. Damit sinken die Stratusober- und -untergrenze allmählich auch etwas ab.

2.3 Temperatur-, Feuchte- und Windprofil im kalten Stratus

Die Temperaturschichtung im Stratus wird nach längerer nächtlicher Ausstrahlung feucht-adiabatisch, darunter trockenadiabatisch. Diese Temperaturschichtung ist nur in wenigen Radiosondenaufstiegen zu erkennen, da die üblichen Aufstiegstermine Mitternacht und Mittag dafür ungünstig liegen. In den kontinuierlich vorliegenden Temperaturprofilen der Stationsmeldungen ist diese Schichtung besser zu erkennen, hier ist aber die vertikale Auflösung gering. Die Temperaturmessungen an den Kühlturmstandorten Leibstadt und Gösgen zeigen diese Schichtung wenigstens in den untersten 110 m in genügender räumlicher und zeitlicher Auflösung mit Messfühlern in 10, 60 und 110 m über Grund. Über dem Stratus nimmt die Temperatur rasch zu wie in einer Bodeninversion bei klaren Verhältnissen.

Wenn Industrieschnee aus dem Stratus fällt, beträgt die Taupunktdifferenz am Boden weniger als 1°C. Die Stratusuntergrenze kommt damit unter konvektiven Bedingungen auf weniger als 125 m über Grund zu liegen.



Kaltluftsee bei Industrieschnee

Das Mischungsverhältnis zwischen Wasserdampf und Luft beträgt innerhalb des 300 m mächtigen, konvektiv durchmischten Kaltluftsees 2.6 g Wasserdampf pro kg Luft. In einer Luftsäule von 1 m² Bodenfläche und 300 m Höhe (zwischen 450 und 750 m/M) befinden sich 371 kg Luft. Davon sind nur 965 g Wasser bzw. Wasserdampf. Bei einer durchschnittlichen Übersättigung im Stratus von 0.1 g/kg sind davon 75 g als unterkühlte Wassertröpfchen und 890 g in Form von Wasserdampf vorhanden. Pro km² sind 890 t Dampf und 75 t unterkühlte Tröpfchen vorhanden.

Aus der typischen Dicke des konvektiven Stratus von 200 m lässt sich bei Industrieschnee-Bedingungen ein maximaler Nebeltröpfchengehalt von 0.2 g/kg (8%) abschätzen. Höhere Übersättigungen führen zu Niederschlag. Aus Stratus fallender kristallisierter Niederschlag wird Schneegriesel (Eichenberger 1990, Hack 2003) genannt. Durch die oberflächliche Abstrahlung des Stratus steigt die Übersättigung während der Nacht an und damit auch die Möglichkeit von Schneegriesel. Ohne Niederschlag sinkt die Stratusuntergrenze bei Abkühlung ab.

Im Kaltluftsee ist es praktisch windstill und über dem Stratus ist der Wind meistens nur schwach (bis 5 m/s bzw. 18 km/h).

2.4 Strahlungsbilanz und nächtliche Kühlraten

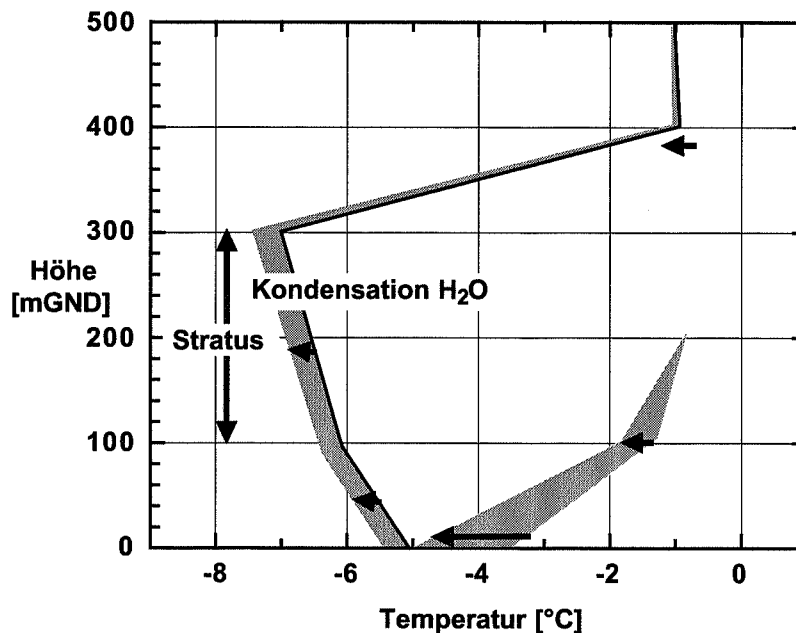
Der Stratus gibt an der Oberfläche – wie der Erdboden – bestenfalls schwarze Wärmestrahlung mit einer Intensität von $\sigma \cdot T^4 = 288 \text{ W/m}^2 = 288 \text{ MW/km}^2$ ab ($T = -7^\circ\text{C} = 266 \text{ K}$). Die atmosphärische Gegenstrahlung (Treibhausgase) beträgt bei klarem Himmel und geringer Feuchte rund 67% davon (Baur und Philips, 1934). Als Nettoausstrahlung verbleiben höchstens $96 \text{ W/m}^2 = 96 \text{ MW/km}^2$.

Bei *klarem Himmel* über ebenem Gelände führt diese Nettoausstrahlung bei Temperaturen um den Gefrierpunkt am Boden des Kaltluftsees zu einem nächtlichen Temperaturrückgang von rund $\Delta T/\Delta t = -0.6^\circ\text{C/h}$. Unter der Annahme, dass die untersten 200 m Luft (Höhe h_l der Bodeninversion) sich im Mittel halb so rasch abkühlen, entspricht dies einem Wärmeverlust der Luft von $I_{\text{Luft}} = 21 \text{ W/m}^2$.

$$\Delta Q/\Delta t = m \cdot c \cdot \Delta T/\Delta t \quad \text{bzw.}$$

$$I_{\text{Luft}} = \Delta Q/\Delta t/\Delta A = \rho \cdot c \cdot h_l \cdot \Delta T/\Delta t / 2 = 21 \text{ W/m}^2$$

$\rho = 1.24 \text{ kg/m}^3$ ist die Luftdichte bei 950 hPa und -6°C , $c = 1005 \text{ J/kg/K}$ die spez. Wärme von Luft, $h_l = 200 \text{ m}$ die Höhe der abgekühlten bodennahen Luftschicht (Mächtigkeit der Bodeninversion). Die restlichen 75 W/m^2 Wärmeverlust (Maximalwert) deckt der Bodenwärmestrom. Darin kann auch anthropogene Wärmeproduktion enthalten sein.



Kühlraten: tiefer Stratus (links) und klare Nacht (rechts)

Mit tiefem Stratus ist der nächtliche Temperaturabfall im gesamten Kaltluftsee, d.h. auch am Boden, deutlich langsamer als bei klarem Himmel. Die abkühlende Luftschicht ist mit dem Stratus viel mächtiger: zur abkühlenden Luftschicht oberhalb des Stratus kommt der schwach konvektive Kaltluftsee mit $h_{\text{KL}} = 300 \text{ m}$ Mächtigkeit hinzu. Die Abkühlung reduziert sich durch die grössere Masse der beteiligten Luft rechnerisch auf 0.15°C/h .

$$I_{\text{Luft}} = \rho \cdot c \cdot h_{\text{KL}} \cdot \Delta T/\Delta t + \rho \cdot c \cdot h_l \cdot \Delta T/\Delta t / 2$$

Dabei ist die Abgabe der Kondensationswärme noch nicht berücksichtigt. Wie im folgenden Abschnitt berechnet wird, liefert die Kondensationswärme eines bei -6°C auskühlenden Stratus zusätzlich noch $f_K (-6^\circ\text{C}) = 40\%$ der fühlbaren Wärme. Ein $h_s = 200 \text{ m}$ mächtiger Stratus geht also zusätzlich noch mit 40% seiner Mächtigkeit in die Wärmebilanz ein:

$$I_{\text{Luft}} = \rho * c * h_{\text{KL}} * \Delta T / \Delta t + \rho * c * h_{\text{I}} * \Delta T / \Delta t / 2 + \rho * c * f_{\text{K}}(T) * h_{\text{S}} * \Delta T / \Delta t$$

Um die gleichen Wärmeverluste wie bei klarer Luft zu kompensieren (21 W/m^2) wird nur noch eine Kühlrate von $\Delta T / \Delta t = 0.13^\circ\text{C/h}$ benötigt.

Kühlrate [$^\circ\text{C/h}$]	auskühlende Schicht
-0.60	200 m Bodeninversion ohne Nebel
-0.15	300 m Kaltluftsee, davon 200 m Stratus, darüber 200 m Stratusinversion, <i>ohne</i> Kondensationswärme
-0.13	300 m Kaltluftsee, davon 200 m Stratus, darüber 200 m Stratusinversion, <i>mit</i> Kondensationswärme

Nächtliche Kühlraten der bodennahen Luft bei einem Wärmeverlust von 21 W/m^2

Die Kühlrate am Boden wird bei einem stratusbedeckten Kaltluftsee massiv reduziert. Die Kühlrate wird mit zunehmender Dicke des Kaltluftsees geringer, da die auskühlende Luftmasse grösser ist.

Die Kühlrate wird auch vom topographischen Volumeneffekt beeinflusst: in komplexer Topographie sind die Kühlraten bei gleicher Strahlungsbilanz wegen der geringeren Luftmasse etwas höher. Dieser Volumeneffekt ist in den obigen Abschätzungen nicht berücksichtigt.

2.5 Latente Wärme

Der Sättigungsdampfdruck von Wasser ist stark temperaturabhängig. In 450 m/M kann Luft der Temperatur 0°C bis 4.0 g Wasserdampf pro kg enthalten, bei -10°C ist es mit 1.9 g/kg nur noch knapp die Hälfte. Die Aufnahmekapazität von Luft für Wasserdampf halbiert sich in etwa bei einer Abkühlung um 10°C . Bei der Abkühlung gesättigter Luft kondensieren im genannten Temperaturbereich im Durchschnitt 0.2 g Wasserdampf pro kg Luft und pro Grad Celsius. Die gleiche Menge kann bei Erwärmung wieder verdunsten.

Ein Teil der Abstrahlungsverluste eines auskühlenden Stratus wird durch die latente Wärme (Kondensationswärme) des überschüssigen Wasserdampfes gedeckt. Bei 7°C ist der Beitrag der latenten Wärme gleich gross wie die fühlbare Wärme. Die Kühlrate gesättigter Luft ist somit bei gegebener Abstrahlung nur halb so gross wie diejenige ungesättigter Luft. Bei -6°C mit 40% Beitrag der latenten Wärme zur fühlbaren Wärme wird die Kühlrate $1/(1+0.4) = 71\%$ der Kühlrate trockener Luft.

2.6 Effekt der Kondensationswärme auf Kühlrate und Durchmischungsgradient

Eine Abnahme des Mischungsverhältnisses durch Kondensation kann mit der spez. Kondensationswärme von Wasser $r = 2256 \text{ kJ/kg}$ und der spez. Wärme von Luft $c = 1.005 \text{ kJ/(kg}^\circ\text{C)}$ in eine Temperaturzunahme ΔT umgerechnet werden:

$$\Delta m_{\text{H}_2\text{O}} * r = m_{\text{Luft}} * c * \Delta T \quad (\text{Kondensationswärme wird fühlbare Wärme})$$

$$\Delta T = (\Delta m_{\text{H}_2\text{O}} / m_{\text{Luft}}) * (r/c)$$

Das Mischungsverhältnis kann mit den Molmassen M als Verhältnis des Dampfdruckes $e_{\text{H}_2\text{O}}$ zum Gesamtdruck p_{Luft} geschrieben werden:

$$(m_{\text{H}_2\text{O}} / m_{\text{Luft}}) = (M_{\text{H}_2\text{O}} / M_{\text{Luft}}) * (e_{\text{H}_2\text{O}}(T) / p_{\text{Luft}})$$

Eine Erwärmung ΔT entspricht einer Änderung beim Sättigungsmischungsverhältnis bzw. beim Sättigungsdampfdruck.

Die Änderung des Sättigungsdampfdruckes $\Delta e_{\text{H}_2\text{O}}(T)$ hängt von der Temperaturänderung ΔT ab:

$$\Delta e_{\text{H}_2\text{O}}(T) = (\Delta e_{\text{H}_2\text{O}}(T) / \Delta T) * \Delta T$$

Damit erhält man eine Beziehung für die Lufterwärmung ΔT_{Kond} durch Kondensation bei der Lufttemperaturänderung ΔT_{Luft}

$$\Delta T_{\text{kond}} = (r/c) * (M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{Luft}}) * (1/p) * (\Delta e_{\text{H}_2\text{O}}(T)/\Delta T) * \Delta T_{\text{Luft}}$$

Die Verdoppelung des Dampfdruckes bei 10°C Temperaturänderung kann wie folgt ausgedrückt werden (gute Näherung):

$$e(T) = e_0 * \exp(T/T_0) \quad \text{mit } T \text{ in } ^\circ\text{C}, T_0 = 10^\circ\text{C}/\ln(2) = 14.4^\circ\text{C}, e_0 = 6.02 \text{ hPa}$$

In guter Näherung erhält man

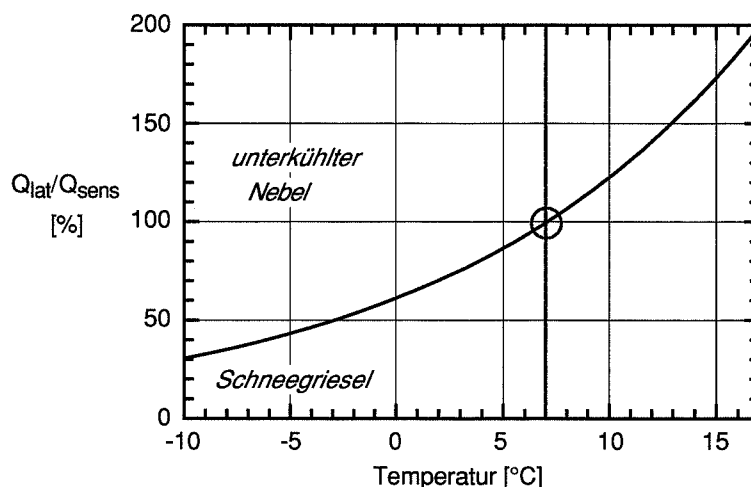
$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{kond}} &= (r/c) * (M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{Luft}}) * (e_0/p) * (1/T_0) * \exp(T/T_0) * \Delta T_{\text{Luft}} \\ &= (1/T_0) * (r/c) * (M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{Luft}}) * (e_{\text{H}_2\text{O}}(T)/p) * \Delta T_{\text{Luft}} \end{aligned}$$

Die Temperaturänderung durch die Kondensation lässt sich mit dem dimensionslosen Faktor f_K auf die fühlbare Temperaturänderung ohne Kondensation zurückführen:

$$\Delta T_{\text{kond}} = f_K * \Delta T_{\text{Luft}}$$

mit

$$f_K(T) = (1/T_0) * (r/c) * (M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{Luft}}) * (e_{\text{H}_2\text{O}}(T)/p) = Q_{\text{lat}} / Q_{\text{sens}}$$



Latente und direkt fühlbare Wärme in auskühlender gesättigter Luft

Der Faktor f_K verdoppelt sich wie der Dampfdruck bei einer Temperaturerhöhung um etwa 10°C. Bei $T = 7^\circ\text{C}$ ist $f_K(7^\circ\text{C}) = 1$. Der Faktor f_K entspricht dem Verhältnis der fühlbar werdenden latenten Wärme Q_{lat} zur direkten fühlbaren Wärme Q_{sens} bei Temperaturänderungen von gesättigter Luft. Die gesamte fühlbar werdende Wärme Q_{tot} wird somit

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{lat}} + Q_{\text{sens}} = (1+f_K(T)) * Q_{\text{sens}} = (1+f_K(T)) * m * c * \Delta T$$

Dieser Faktor $f_K(T)$ beeinflusst zeitliche und räumliche Temperaturänderungen gesättigter Luft.

Ein Stratus liefert bei einer mittleren Temperatur von -6°C unter strahlungsbedingter Auskühlung (*diabatisch*) zusätzlich zur direkten fühlbaren Wärme nochmals 40% davon durch Kondensationswärme. Ein auskühlender Stratus mit höherer Temperatur liefert dem Wasserdampfgehalt entsprechend mehr Kondensationswärme und kühlt damit langsamer aus.

Bei der Abkühlung von Luft durch Aufsteigen (*Expansion*) modifiziert die bei Sättigung fühlbar werdende Kondensationswärme den trockenadiabatischen vertikalen Temperaturgradienten:

$$(\Delta T/\Delta z)_{\text{feucht}} = 1 / (1+f_K) * (\Delta T/\Delta z)_{\text{trocken}}$$

Bei $T=7^{\circ}\text{C}$ wird $f_k(T) = 1$ und der feuchtadiabatische Temperaturgradient ist nur noch halb so gross wie der trockenadiabatische Gradient von $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

Bei -6°C ist $f_k(T) = 0.4$ und der feucht-adiabatische Temperaturgradient wird mit $1/(1+0.4) = 71\%$ noch $-0.71^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

2.7 Niederschlag bei auskühlendem Stratus: Nebelregen und Schneegriesel

Bei der Niederschlagsbildung spielt die *Abkühlung* der Luft und die damit verbundene Sättigung bzw. Übersättigung mit Wasserdampf eine Rolle. Luft der bodennahen Grenzschicht enthält immer genügend Aerosole (Partikel), dass bei Sättigung spontan Kondensation in Form von kleinsten Wassertröpfchen einsetzt.

Am Boden wird bei Übersättigung Tau bzw. Rauheis abgelagert. Die in niedrigem Stratus bei Frost am Gelände beobachtbare Rauheisbildung bestätigt die nach oben hin zunehmende Übersättigung. Steigt man im Stratus an einem Hang auf, nehmen Temperatur und Sichtweite mit der Höhe ab und die Menge des an Zweigen angesetzten Rauheises nimmt entsprechend zu. Dies zeigt die im Stratus mit der Höhe zunehmende Übersättigung mit unterkühlten Wassertröpfchen an.

In gesättigter Luft kondensiert der überschüssige Wasserdampf selbst bei Temperaturen im Frostbereich als feinste, unterkühlte Wassertröpfchen (kalter Nebel). Die Tröpfchen sind so klein, dass sie in Suspension bleiben. Es fällt vorerst kein Niederschlag. Um als Niederschlag ausfallen zu können, müssen diese feinen Wassertröpfchen wachsen. Das Wachstum kann durch weitere Abkühlung (zusätzliche Kondensation) oder durch Zusammenschluss mit anderen Tröpfchen (Koaleszenz) erfolgen. Die Tröpfchen müssen sich *bewegen*, um an übersättigte Orte zu gelangen oder mit anderen Tröpfchen zusammentreffen zu können.

Das Tropfenwachstum hängt damit von der Übersättigung und von der mechanischen Durchmischung ab. Mit dem Grad der Übersättigung steigt die Konzentration an Tröpfchen. Kühlt sich die Luft in der Wolke um 10°C unter den Taupunkt ab, halbiert sich in etwa der Sättigungsdampfdruck. Die Übersättigung in Form von feinen Wassertröpfchen wird gleich hoch wie die noch verbleibende unkondensierte Luftfeuchte.

Das Tropfenwachstum durch das Zusammenwachsen kleinster Tröpfchen (Koaleszenz) ist ohne mechanische Durchmischung in der Wolke sehr langsam, wenn es nur durch Diffusion erfolgt. Die mechanische Durchmischung kann durch Windscherungen und Konvektion angeregt werden, da dabei Turbulenzen generiert werden. Windscherungen treten bei windschwachen Lagen nicht auf. Damit ist in stagnierender Luft primär die *Konvektion* als Durchmischungsprozess für das Tropfenwachstum von Bedeutung.

Die oberflächliche Abstrahlung erzeugt im Stratus schwache Konvektion und Durchmischung. Damit entsteht nach genügender Abkühlung des Stratus bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt Nebelregen und bei Frost Schneegriesel (Definition im Anhang). Dies sind natürliche Phänomene und führen zu kaum messbaren Niederschlagsmengen.

Punktförmige Wärmequellen (Hochkamine) führen lokal zu verstärkter Konvektion und Durchmischung. Zudem sind sie auch Feuchtequellen, die lokal die Übersättigung deutlich erhöhen. Die Wachstumsbedingungen für Wassertröpfchen sind in der konvektiv aufsteigenden Kaminabluft günstig, wenn diese in den Stratus aufsteigt. Wenn sich natürlicherweise Bedingungen für Nebelregen oder Schneegriesel einstellen, werden diese Phänomene durch punktförmige Feuchtequellen lokal verstärkt und führen bei genügender Quellstärke zu relevanten Niederschlagsmengen.

Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt sind Wassertröpfchen *unterkühlt* und damit in einem thermodynamisch an sich instabilen Zustand, der aber über Stunden erhalten bleiben kann. Das spontane Gefrieren von unterkühlten Nebeltröpfchen zu Eiskristallen geht von Kristallisationskernen (Aerosole) oder von Turbulenzen aus. In Schneekanonen zur Beschneiung von Skipisten gelingt es, unterkühlte Wassertröpfchen durch Turbulenzen zum spontanen Kristallisieren zu bringen.

Es stellt sich beim Beschneien mit Industrieschnee die Frage, in welchem Mass Kristallisationskerne (Aerosole) und Turbulenzen beteiligt sind. Die Turbulenzen von landenden und startenden Verkehrsflugzeugen lösen auf dem Flughafen Kloten beim Durchqueren des übersättigten Stratus lokal leichten Schneefall aus. Selbst die Turbulenzen in konvektiv aufsteigender Kaminabluft von intensiven Punktquellen (Hochkamine) scheinen unter günstigen Bedingungen für die spontane Kristallisation zu Schneegriesel zu genügen.

Bei der Kristallisation wird die Schmelzwärme freigesetzt. Gebildete Eiskristalle wachsen auf Grund des leicht höheren Sättigungsdampfdruckes über Wasser als über Eis bei weiterer Abkühlung etwas schneller als die unterkühlten flüssigen Wassertröpfchen. Beim Zusammentreffen von unterkühltem Wasser und einem Eiskristall gefriert das unterkühlte Wasser. Für das Wachstum der Eiskristalle zu ausfallendem Schneegriesel ist die Konvektion als Durchmischungsprozess weiterhin von Bedeutung. Die beim spontanen Gefrieren der Wassertröpfchen frei werdende Schmelzwärme unterstützt die Konvektion.

Eiskristalle genügender Grösse beginnen als Niederschlag zu fallen. Sobald sie unten aus dem Stratus herausfallen, fallen sie durch wärmere, ungesättigte Luft. Dabei verlieren sie durch Sublimation (Verdunstung) an Masse. Wenn die Untergrenze der Wolke hoch genug über dem Boden liegt, sublimieren die Kristalle vollständig zu Wasserdampf, bevor sie am Boden ankommen. Beim Sublimieren entziehen die fallenden Schneekristalle der umgebenden Luft die notwendige Schmelz- und Verdunstungswärme. Mit dem Sublimieren des Niederschlages wird die ungesättigte Luft unter der Wolke angefeuchtet und abgekühlt. Die Anfeuchtung durch den Wasser(dampf)transport aus dem übersättigten Stratus senkt mit der Zeit die Wolkenuntergrenze. Fällt der Niederschlag zu Boden, wird der Atmosphäre Feuchte entzogen und die Wolkenuntergrenze sinkt nicht weiter.

Zusammengefasst kühlt sich die Oberfläche eines Stratus nachts durch Wärmeabstrahlung ab, die Inversion verschärft sich und die Stratusuntergrenze sinkt durch Auskühlung und schwachen Niederschlag ab. Auskühlender Stratus wird konvektiv durchmischt und die schwache Konvektion greift mit der Zeit bis zum Boden durch. Alle bodengebundenen Wasserdampfquellen tragen dann zum Wasserdampfhaushalt bei. Bei lokalen Turbulenzen gefrieren Nebeltröpfchen spontan zu Schneekristallen, die in konvektiv durchmischem Stratus gute Wachstumsbedingungen haben und als Schnee ausfallen. Liegt die Stratusuntergrenze genügend nah am Boden, erreicht dieser Niederschlag als Schnee den Boden, bevor er in der ungesättigten Luft sublimieren (verdunsten) kann.

Das natürliche Ausschneien von auskühlendem tiefen Stratus wird durch konzentrierte Wasserdampfquellen lokal verstärkt, da der Stratus bereits strahlungsbedingt übersättigt ist und keine freie Kapazität für die Aufnahme von zusätzlichem Wasserdampf aufweist. Industrieschnee ist Schneegriesel, der durch lokale Feuchtequellen verstärkt wird.

2.8 Quellen und Senken von Wärme und Feuchte

Natürliche Feuchtequellen sind die Verdunstung von Wasser bzw. Schnee an der Erdoberfläche (Böden, Vegetation, Gewässer). Diese Prozesse führen der Atmosphäre bodennah Wasserdampf zu. Die Verdunstung erfordert immer Wärmezufuhr. Als natürliche Energiequelle wirkt die Sonnenstrahlung und ist auf den Tag beschränkt. Bei der Kondensation von Luftfeuchtigkeit wird die Verdunstungswärme wieder freigesetzt.

Niederschlag in Form von Regen, Schnee und Hagel wirkt im Wolkenniveau als Senke. Verdunstung bzw. Sublimation von fallendem Niederschlag unterhalb von Wolken bildet dort eine Quelle. Am Boden auftreffender Niederschlag bildet eine Senke für die Atmosphäre.

Als anthropogene Quellen für Wasserdampf kommen Verbrennungs- und Verdampfungsprozesse in Frage, die zur mechanischen Energieerzeugung, zur Kehrrichtentsorgung, zum Kühlen und zum Heizen unterhalten werden. Diese Prozesse finden überwiegend an der Erdoberfläche statt. Bei Hochkaminen und Verkehrsflugzeugen liegt die zugehörige Wärme- und Feuchtequelle erhöht.

Die anthropogenen Wasserdampfquellen sind einerseits punktuell konzentriert (Hochkamine, Kühltürme, startende Verkehrsflugzeuge) und andererseits flächig verteilt (Gebäudeheizungen, Strassenverkehr).

2.9 Wasserdampf aus Feuerungen

Verbrennungsprozesse wandeln Luft (Sauerstoff, Stickstoff) und Brennstoffe (Kohlenstoff und Wasserstoff) in Wasser(dampf), Kohlendioxid und Stickstoff. Dabei wird Wärmeenergie freigesetzt. Verbrennungsprozesse greifen in den atmosphärischen Wärme- und Wasserhaushalt ein.

Der *Brennwert* H_o (früher oberer Heizwert) ist die auf die Brennstoffmenge bezogene Energie, die bei vollständiger Verbrennung frei wird, wenn das Abgas auf Bezugstemperatur zurückgekühlt wird. Dabei kondensiert der mit dem Brennstoff erzeugte Wasserdampf im Abgas und gibt seine Kondensationsenthalpie ab.

Der *Heizwert* H_u (früher unterer Heizwert) ist die auf die Brennstoffmenge bezogene Energie, die bei vollständiger Verbrennung frei wird, wenn das Abgas auf Bezugstemperatur zurückgekühlt wird und der mit dem Brennstoff erzeugte Wasserdampf im Abgas dampfförmig gedacht bleibt. Der Heizwert ist damit geringer als der Brennwert.

Der Brennwert H_o und der Heizwert H_u eines Brennstoffes stehen in einem bestimmten Verhältnis zueinander, das vom Wasserstoffgehalt des Brennstoffes abhängt: $H_u = f_h \cdot H_o$

Die spezifische Wasserdampfproduktion bei der Verbrennung hängt vom Wasserstoffgehalt im Brennstoff ab. Die Differenz zwischen dem Brennwert und dem Heizwert kann durch die Kondensationsenthalpie $r = 2442 \text{ kJ/kg H}_2\text{O} = 0.6783 \text{ kWh/kg H}_2\text{O}$ geteilt werden, um den erzeugten Wasserdampf pro Brennstoffeinheit zu erhalten:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} / m_{\text{Brennstoff}} = H_o \cdot (1 - f_h) / r$$

Bei Verbrennungsprozessen kann die Wasserdampfproduktion aus dem Brennstoffverbrauch ermittelt werden, wenn Brennwert H_o und Heizwert H_u bekannt sind.

Brennstoff	Brennwert H_o [kWh/kg]	f_h	Heizwert H_u [kWh/kg]	$m_{\text{H}_2\text{O}} / m_{\text{Brennstoff}}$ [kg/kg]
Kohlenstoff C	10.0	1.000	10.0	0.00
Heizöl EL	11.1	0.937	10.4	1.03
Methan CH_4	15.4	0.896	13.8	2.36
Wasserstoff H_2	39.4	0.842	33.2	9.18
Kehrricht (Richtwert)	5.5	0.827	4.55	1.40

Massenspezifische Wasserdampfproduktion

Die Wasserdampfproduktion kann auch auf die Wärmeproduktion $Q = P \cdot t$ bezogen werden:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} / (P \cdot t) = (1 - f_h) / r$$

Brennstoff	1- f _h	m _{H2O} / (P*t)	
		[t/MWd]	[l/kWh]
Kohlenstoff C	0.000	0.00	0.000
Heizöl EL	0.063	2.23	0.093
Methan CH ₄	0.104	3.68	0.153
Wasserstoff H ₂	0.158	5.59	0.233
Kehrricht (Richtwert)	0.173	6.12	0.255

Energiespezifische Wasserdampfproduktion

Kehrricht als Brennstoff produziert wärmespezifisch am meisten Wasserdampf.

Quelle	Leistung	Brennstoff	m _{H2O}
	[MW]		[t/h]
Kehrrichtverbrennung	80	Kehrricht	20.4
Papierfabrik	75	Erdgas	11.5
Stahlwerk	50	Erdgas	7.7
BHK	25	Heizöl EL	2.3
Startende Jets	10	Kerosen	0.9

Brennstoffbedingte Wasserdampfproduktion von Feuerungsanlagen

Die effektive Quellenstärke für die Abgabe von Wasserdampf in die Atmosphäre wird durch weitere Faktoren beeinflusst. Bei Feuerungen mit Kondensationstechnik (Brennwertkessel) wird der Wasserdampfgehalt der Abluft deutlich reduziert. Die nasse Rauchgasreinigung bei Kehrrichtverbrennungsanlagen entzieht der Abluft Wärme und erhöht ihren Wasser(dampf)gehalt. Wenn Prozesswärme zum Trocknen/Verdunsten verwendet wird (Papierfabriken, Kühlturm), steigt die Wasserdampfquellenstärke massiv an.

2.10 Punktquelle KVA

Der Betrieb einer 80 MW Kehrrichtverbrennungsanlage (64 MW Wärme/ 16 MW Enthalpie) setzt Wärme und Wasserdampf (rund 20 t/h) frei. Die Wärmeproduktion von 80 MW (die Enthalpie wird bei Kondensation des Wasserdampfes in der Luft ebenfalls fühlbar) kann die Strahlungsabkühlung eines stratusbedeckten Kaltluftsees von $21 \text{ W/m}^2 = 21 \text{ MW/km}^2$ auf einer Fläche von $80 \text{ MW} / 21 \text{ MW/km}^2 = 3.8 \text{ km}^2$ kompensieren. Damit kann die Lufttemperatur trotz Ausstrahlung des Stratus auf dieser Fläche (Kreis mit Radius 1.1 km) konstant bleiben. Wenn durch die nasse Rauchgasreinigung Reinigungswasser verdampft, sinkt die Abgabe der fühlbaren Wärme. Entsprechend steigt die Quellstärke des abgegebenen Wasserdampfes auf über 20 t/h.

Temperaturaufzeichnungen des Strasseninspektorates Winterthur (in 1.0 km Distanz zur Kehrrichtverbrennungsanlage Winterthur Grüze) zeigen in den Stunden vor dem Auftreten des lokalen Schneegriesels aus dem Stratus eine konstante Lufttemperatur. Die gesamte lokale Wärmeproduktion kompensiert somit näherungsweise die Strahlungsabkühlung und dies definiert bei gegebener Abstrahlung die „erwärmte“ Fläche.

Eine Wasserdampfabgabe von 20 t/h kann von niedrigem, bereits übersättigten Stratus unter konvektiven Bedingungen (nächtlige Ausstrahlung) nicht dauerhaft aufgenommen werden und fällt auf der erwärmten Fläche von 4 km^2 als Schneegriesel aus. Die Schneehöhe nach einer Nacht von 16 h entspricht $16 \cdot 20\text{ t} / 4\text{ km}^2 = 80\text{ t} / \text{km}^2 = 80\text{ g} / \text{m}^2 = 0.08\text{ mm}$ Wasserfilm bzw. 0.8 mm Schnee. Diese Schneehöhe kann auf der beschneiten Fläche ungleich verteilt sein und liegt in der Grössenordnung der auftretenden Schneegrieselmengen. Höhere Wasserdampfquellstärken (nasse Rauchgasreinigung) führen entsprechend zu höheren Mengen von Schneegriesel.

Wesentlich ist zudem die Windstille im Kaltluftsee, damit die Wasserdampfquelle zu lokalem Schneegriesel führt. Weiter muss die nächtliche Ausstrahlung zur konvektiven Durchmischung des Stratus führen, damit es zum Niederschlag kommt.

Bei Kehrriichtverbrennungsanlagen genügt die Abwärme der Abluft (nasse Rauchgasreinigung) nicht, um die Inversion über dem tiefliegenden Stratus zu durchstossen. Die feuchtwarme Abluft dringt nur wenig in die Inversion ein und sinkt anschliessend wieder in den Stratus ab. Bei Kehrriichtverbrennungsanlagen mit Wärmenutzung ist die fühlbare Abwärme der Abluft zusätzlich reduziert. Das Eindringen der aufsteigenden Abluft in die Sperschicht oberhalb des Stratus wird dadurch weiter eingeschränkt. An den Standorten St. Gallen West, Winterthur Grütze und Bern West (Orte mit häufigem Schneegriesel) wird die Kehrriichtwärme teilweise genützt und die Abluft nass gereinigt.

2.11 Punktquelle Kühlturm

In Kühltürmen von Kernkraftwerken wird die Abwärme zu grossen Teilen durch die Verdampfung von Wasser abgeführt. Die Wasserdampfproduktion kann auch hier auf die Energieabfuhr bezogen werden:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} / (P \cdot t) = 1 / r = 35.4 \text{ t} / \text{MWd}$$

Bei einer abzuführenden Leistung von 2000 Megawatt ergibt sich eine maximal Verdampfung von 2'950 Tonnen Wasserdampf pro Stunde. Im Vergleich mit einer 80 MW Kehrriichtverbrennungsanlage wird maximal die 145-fache Wasserdampfmenge in die Luft abgegeben. Die Abwärme wird aber im Kühlturm nicht vollständig durch Verdampfung abgeführt. Die Kühlturmluft enthält genügend fühlbare Wärme (Übertemperatur), dass sie die Inversion über dem tiefliegenden Stratus zu durchstossen vermag. Die Anfeuchtung geschieht damit oberhalb des Stratus. In der Nähe der Kühltürme Gösigen und Leibstadt tritt die lokale Verstärkung von Schneegriesel bei niedrigem Stratus nicht auf.

2.12 Flächenquelle Heizung

Heizungen bilden in überbauten Gebieten flächig verteilte Quellen. In Städten sind Erdgas und Heizöl Heizenergieträger, die als flächige Wärme- und Wasserdampfquellen wirken. Am Beispiel der Stadt Winterthur kann die Heizintensität bei -5°C abgeschätzt werden. Die überbaute Fläche beträgt 16 km^2 , die Heizleistung mit Erdgas 80 MW, die Heizleistung mit Heizöl schätzungsweise gleich viel. Gesamthaft ergibt sich eine Heizintensität von $160\text{ MW} / 16\text{ km}^2 = 10\text{ MW} / \text{km}^2 = 10\text{ W} / \text{m}^2$. Ein neueres Einfamilienhaus (500 m^2 , 5 kW bei -5°C) führt auf die gleiche Grössenordnung von $10\text{ W} / \text{m}^2$ bei der Heizintensität.

Quelle	Leistung [MW/km ²]	Brennstoff	m _{H2O} [t/km ² /h]
Heizung (-5°C)	5	Erdgas	0.77 (ohne Kondensation)
	5	Heizöl	0.46 (ohne Kondensation)
Total Heizung	10	Erdgas&Heizöl	1.23 (ohne Kondensation)

Wasserdampfproduktion von Heizungen

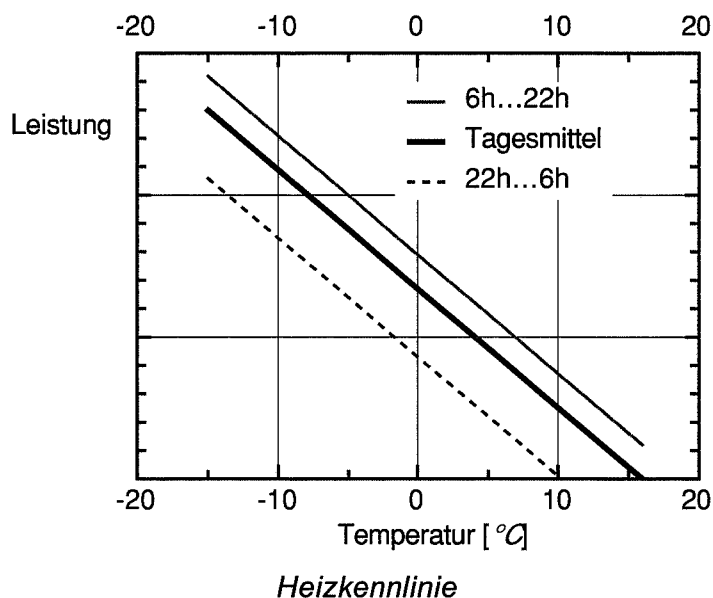
Ohne kondensierende Heizkessel entspricht eine Heizintensität von 10 W/m² einer Wasserdampfabgabe in die Luft von 1.23 t/km²/h.

Pro Tag (24 h) werden dadurch rund 30 t/km² = 30 g/m² produziert. Falls diese Menge als Niederschlag ausfällt, bildet sich ein Wasserfilm von 0.03 mm bzw. eine Schneehöhe von 0.3 mm. Wenn ein wesentlicher Teil der Heizkessel kondensierend sind, reduziert sich diese potentielle Schneehöhe nochmals deutlich. Die Wasserdampfproduktion der Heizungen ergibt somit unerhebliche Schneehöhen. Hingegen kompensiert eine Heizintensität von 10 W/m² (Tagesmittel) nachts einen Teil der 21 W/m² Strahlungsverluste des Kaltluftsees (städtische Wärmeinsel).

Im Vergleich zu einer 80 MW Kehrriichtverbrennungsanlage (80 MW / 4 km² = 20 W/m²) ist die Intensität der Heizungen mit 10 W/m² nur halb so gross. Die Intensität der Wasserdampfproduktion aus Heizungen ist mit 1.23 t/km²/h höchstens ein Viertel der Intensität aus der Kehrriichtverbrennung (5 t/km²/h), wobei in Kondensationskesseln noch ein wesentlicher Anteil des produzierten Wassers ausfällt. Erdgasfeuerstätten mit einer Abgastemperatur von 30°C kondensieren 83% des produzierten Wassers.

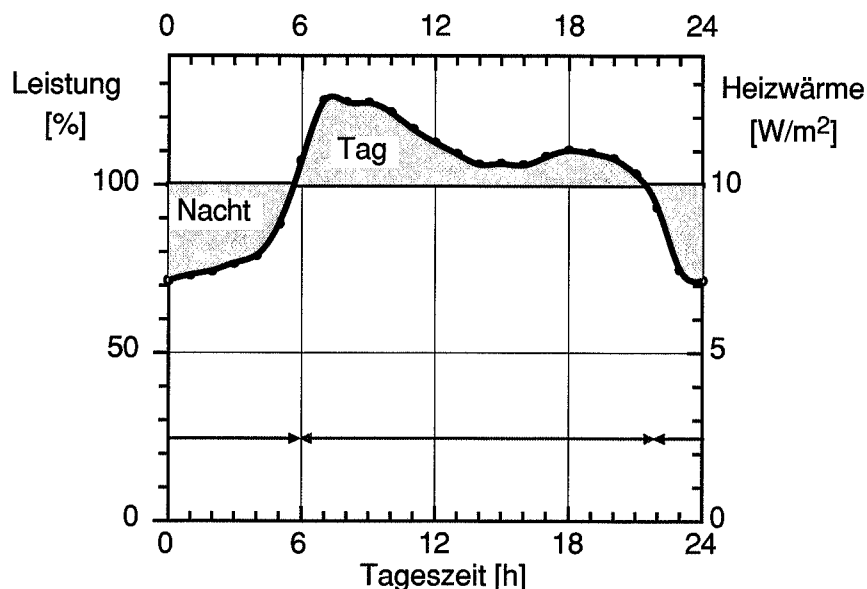
2.13 Tagesmodulation der Heizproduktion

Die Heizleistung ist im Tagesmittel proportional zur Temperaturunterschreitung von etwa 16°C (Hunziker 2004).



Durch den bei niedrigem Stratus geringen Tagesgang der Temperatur weist auch die Heizleistung nur einen schwachen Tagesgang auf mit einer Leistungsspitze am Ende der Nacht. Diese

schwache Spitze wird durch den verbreiteten Wechsel von der Nachtabsenkung (22h...6h) auf die Tageskennlinie (6h...22h) markant verstärkt (Cerbe 1999). Am späten Abend geht die Heizlast auf die Nachtkennlinie zurück.



Tagesgang der Heizleistung bei -5°C Tagesmitteltemperatur und Nachtabsenkung

Zwischen 6 und 8 Uhr weist die Wärmeproduktion von Heizungen die Tagesspitze auf, weil einerseits die Temperatur das Tagesminimum erreicht und andererseits der Wechsel von der Nachtabsenkung auf die Tageskennlinie erfolgt. Das nächtliche Leistungsminimum liegt bei etwa 70%, das Maximum am Morgen bei 125% des Tagesmittels. Der Heizwärmestrom schwankt bei einer Tagesmitteltemperatur von -5°C zwischen 7 und 12 W/m^2 (Tagesmittel 10 W/m^2).

Synchron dazu schwankt die Wasserdampfproduktion bei einem Tagesmittel von $1.23\text{ t/km}^2/\text{h}$ zwischen 0.86 und $1.54\text{ t/km}^2/\text{h}$. Mit Kondensationskesseln wird nur ein Teil davon in die Luft abgegeben.

2.14 Tagesgang von lokalem Schneegriesel bei niedrigem Stratus

Schneegriesel aus niedrigem Stratus tritt in der Regel um Sonnenaufgang und bei ganztägigem Stratus nach Sonnenuntergang auf. Am Ende der Nacht ist die Temperatur des Kaltluftsees ausstrahlungsbedingt am tiefsten und die konvektive Durchmischung durch die nächtliche Kühlung der Nebeloberfläche greift bis zum Boden des Kaltluftsees durch. Damit ist die Aufnahmekapazität des Stratus für Wasserdampf minimal und das Ausschneien von Schneegriesel um starke Wasserdampfquellen am wahrscheinlichsten.

Bei Tag wird die Strahlungsbilanz im Stratus positiv. Der Kaltluftsee erwärmt sich etwas und kann damit mehr Wasserdampf aufnehmen. Die oberflächliche Kühlung setzt aus, der Kaltluftsee wird tendenziell isotherm und damit verschwindet die nächtliche Durchmischung. Bei positiver Strahlungsbilanz tritt Schneegriesel nicht mehr auf. Bei genügender Erwärmung löst sich der Stratus auf und es kommt zu konvektiver Durchmischung am Boden des Kaltluftsees.

Gegen Sonnenuntergang wird die Strahlungsbilanz wieder negativ. Bei ganztägigem Stratus setzt die Auskühlung an der Oberfläche ein, wo die Übersättigung zuerst steigt. Ab den frühen Nachtstunden kann es dann durch die fortschreitende nächtliche Auskühlung des niedrigen Stratus zu Schneegriesel kommen, der den Boden erreicht.

3 Vorhersage

3.1 Aktuelle Vorhersagemethoden

Schneegriesel aus tiefem Stratus wird in der Schweiz nicht vorhergesagt.

Die Vorhersage von Stratusbewölkung (Obergrenze) beruht im Wetterdienst auf verschiedenen Verfahren. Einerseits kann mit numerisch vorhergesagten Vertikalprofilen (Previ-TEMPs aus synoptischen Modellen) die Obergrenze des Stratus abgeschätzt werden. Der Vorhersagezeitraum für Previ-TEMPs beträgt mehrere Tage ab Modellauf. Synoptische Modelle können die bodennahen Vertikalprofile von Temperatur und Feuchte nur unbefriedigend vorhersagen, speziell bei windschwachen Lagen, wenn die Obergrenze des Stratus ins Relief absinkt. Die Bildung von tiefem Stratus in stagnierenden Kaltluftseen wird durch Previ-TEMPs ungenügend vorhergesagt.

Eine zweite Methode beruht auf einer Kombination von numerischen und statistischen Methoden. Aus der Klimatologie ist ein statistischer Zusammenhang zwischen dem *Druckgradienten* Zürich-Strassburg und der *Obergrenze* des Stratus im Schweizer Mittelland bekannt. Diese Druckdifferenz kann mit synoptischen Modellen recht zuverlässig vorhergesagt werden. Bei dieser Methode fehlt aber die Vorhersage, ob sich überhaupt Stratus bildet, da die Feuchtigkeit nicht eingeht.

Die Stratusuntergrenze wird im Flugwetterdienst (Ceiling) auf einige Stunden mit statistischen Methoden vorhergesagt. Der Zeitpunkt der Nebelauflösung wird mit statistischen Methoden nur unbefriedigend vorhergesagt. Eine Verbesserung der gegenwärtigen Vorhersagemethoden für tiefen Stratus (Ober- und Untergrenze) ist wünschenswert. Das Defizit besteht in einer ungenügenden Modellierung der bodennahen Grenzschicht über komplexer Topographie unter Einbezug der Feuchte.

Die Vorhersage von Schneegriesel ist entsprechend unsicher, da sie mit der Vorhersage von tiefem Stratus eng verbunden ist.

3.2 Topographisches Grenzschichtmodell

Die thermodynamische Modellierung von Kaltluftseen in komplexer Topographie wurde auf der Basis des bestehenden Grenzschichtmodelles REGTHERM (Liechti, 2002) in Angriff genommen. Dieses Modell ist auf die Simulation der Konvektion bei Tag ausgerichtet, wenn die Strahlungsbilanz am Boden positiv ist und es berücksichtigt den Volumeneffekt des Vorhersagegebietes. Es wird von den Wetterdiensten der Schweiz, Deutschlands und Österreichs für regionale Konvektionsvorhersagen operationell betrieben.

Zur Anwendung dieses Grenzschichtmodelles bei Nacht wurde die Wärmestrahlung der Wolken in das Modell einbezogen. Die Wärmeabstrahlung fester und flüssiger Materie (Boden, Wolken) wurde als schwarz angesetzt, d.h. sie folgt dem Planckschen Strahlungsgesetz mit einer Emissivität ε von 100% (obere Grenze).

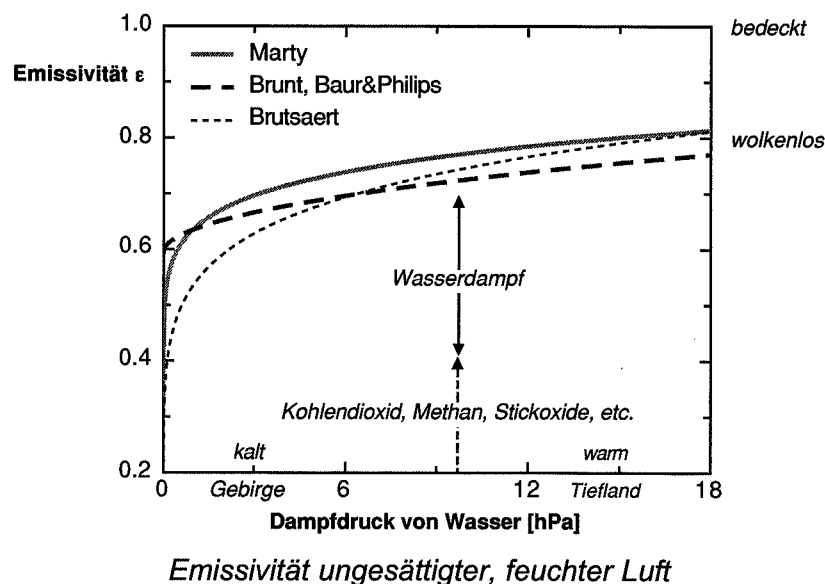
$$I = \varepsilon * \sigma * T^4$$

Die Treibhausgase der Luft strahlen als graue Wärmestrahler mit einer geringeren Emissivität $\varepsilon < 100\%$, die vom Treibhausgasgehalt abhängig ist. Kohlendioxid, Methan, Stickoxid und troposphärisches Ozon liefern einen festen Beitrag zur Emissivität, währenddem der Beitrag von Wasserdampf zur Emissivität ε über den Wasserdampfgehalt variabel ist. Mehrere Berechnungsformeln für die Emissivität von ungesättigter, feuchter Luft sind bekannt: Baur und Philips (1934), Brutsaert (1975), Marty (2000). Sie geben die Emissivität ε als Funktion des Wasserdampfdruckes e und teilweise der Temperatur T an.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + k * e^{1/2} \quad \varepsilon_0 = 0.594, k = 0.0461, e \text{ in } hPa \quad (\text{Baur und Philips, 1934})$$

$$\varepsilon = k(e/T)^{1/7} \quad k \text{ ortsabhängig, } e \text{ in } Pa, T \text{ in } K \quad (\text{Brutsaert, 1975})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + k(e/T)^{1/8} \quad \varepsilon_0 = 0.23, k = 0.461, e \text{ in } Pa, T \text{ in } K \quad (\text{Marty, 2000})$$

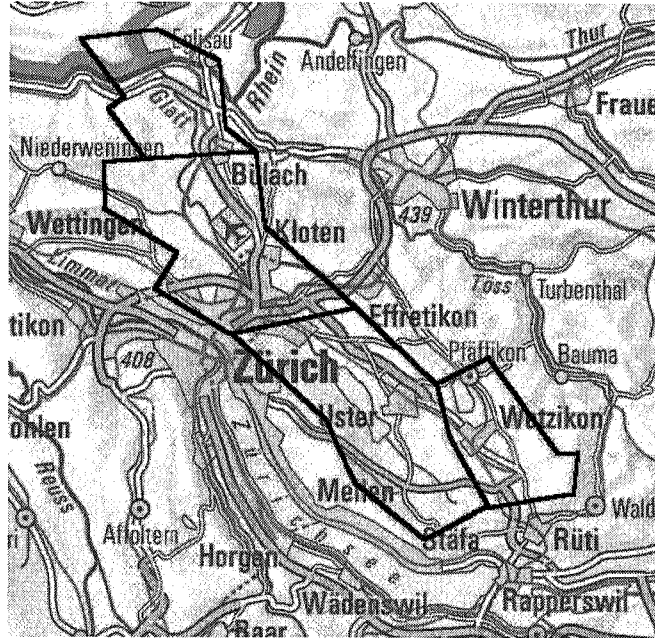


Die Erweiterung des Grenzschichtmodelles auf nächtliche Verhältnisse umfasste die Berechnung der Wärmestrahlungsflüsse zwischen benachbarten Luftschichten unter Berücksichtigung der Wolkenbedeckungsgrade. Mit den Energiebilanzen zwischen benachbarten Luftschichten werden Luftpakete generiert, die konvektive Vertikalbewegungen ausführen können. Damit wird die Abstrahlung an der Wolkenoberfläche und das zugehörige Durchmischen durch absinkende Wolkenpakete im Modell erfasst.

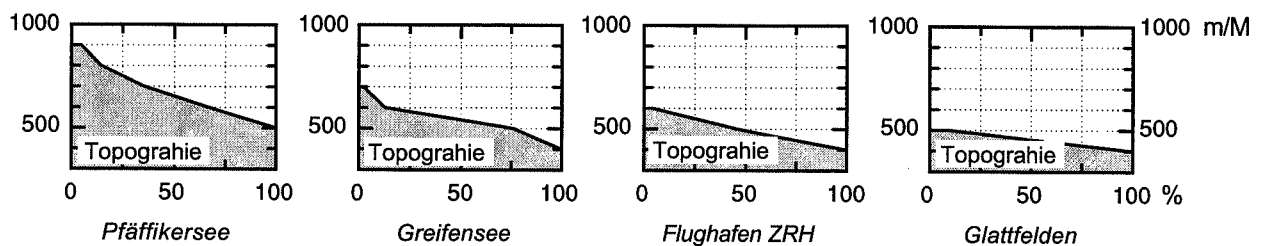
3.3 Simulation von Kaltluftseen

Zur Simulation des Kaltluftsees mit dem topographischen Grenzschichtmodell wurde das Glatttal in vier Abschnitte unterteilt. Als tiefstgelegener Abschnitt wurde Glattfelden (Mündung in den Rhein) gewählt, anschliessend der Flughafen Zürich, gefolgt von Greifensee (Uster) und dem Quellgebiet Pfäffikersee (Wetzikon).

Die vier Gebiete weisen leicht verschiedene Flächen-Höhenverteilungen auf.

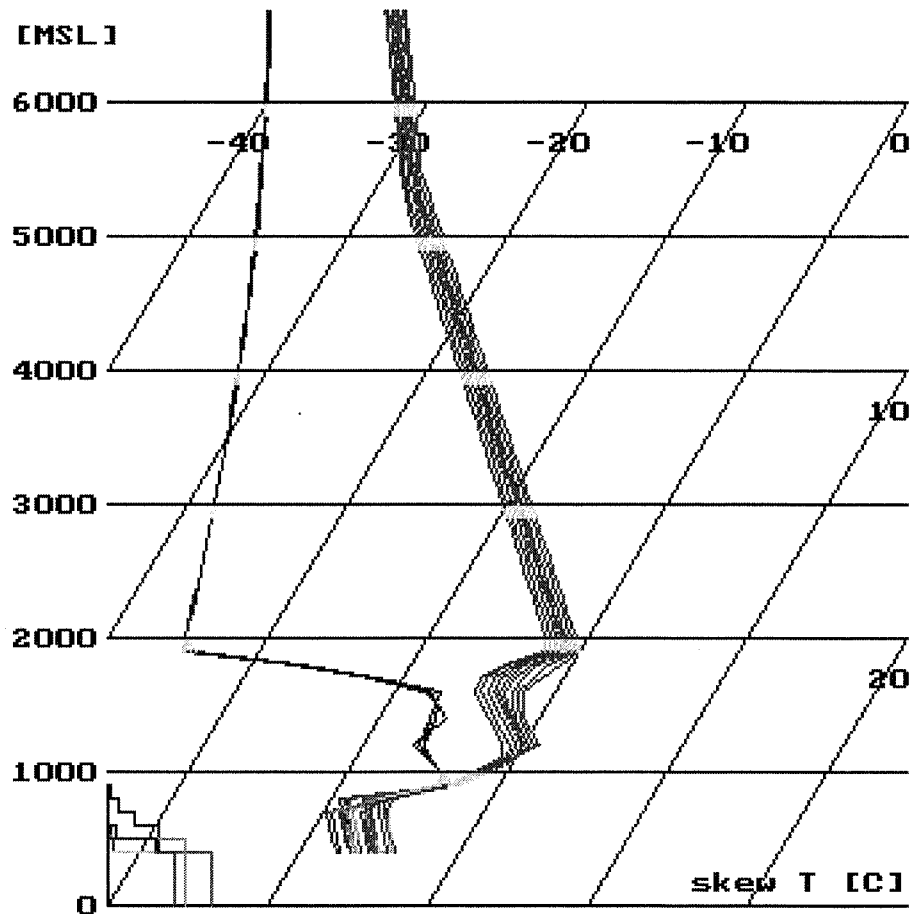


Abschnitte des Glatttales



Flächen-Höhenverteilungen im hydrologischen Einzugsgebiet der Glatt

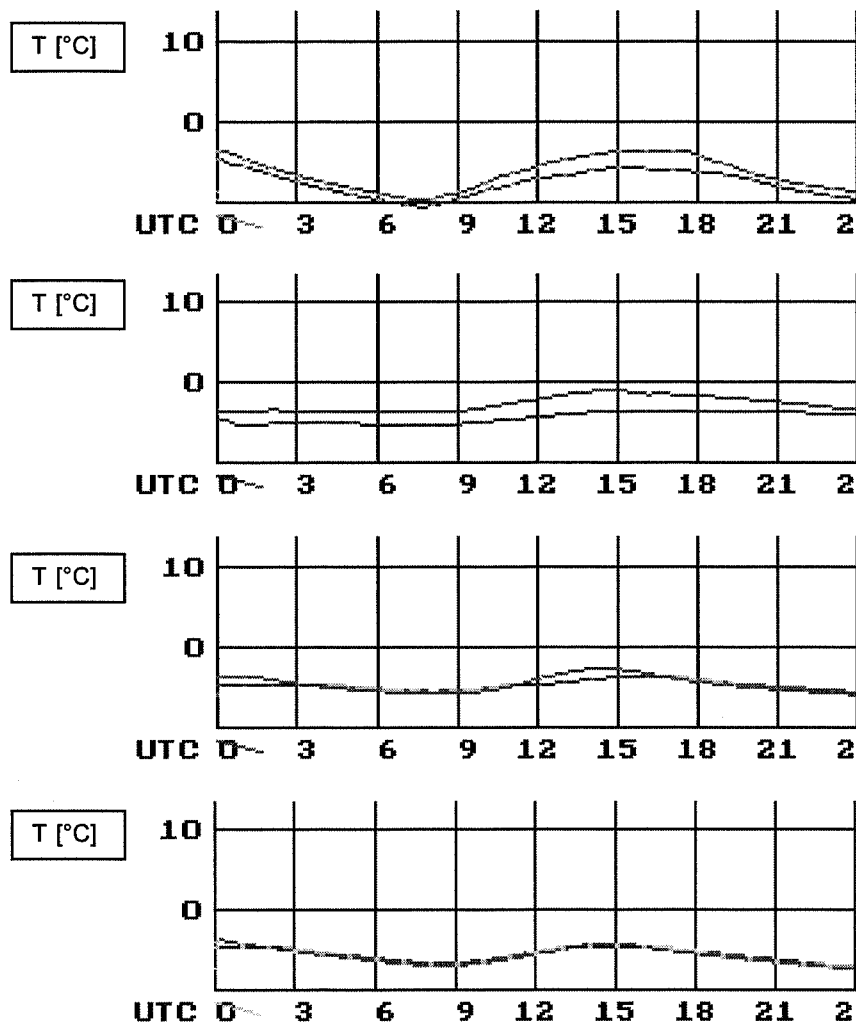
Das Grenzschichtmodell wurde für alle Gebiete mit gemessenen Vertikalprofilen (Temperatur, Feuchte) von Payerne initialisiert. Als Beispiel wurden mit dem topographischen Grenzschichtmodell die Verhältnisse vom 10. Januar 2002 simuliert. Es lag ein stratusbedeckter Kaltluftsee mit einer Obergrenze von 800 m/M vor.



*Radiosonde Payerne am 10. Januar 2002 00 UTC (Feuchte links, Temperatur rechts)
 Flächen-Höhenverteilungen des Glatttales (vier Abschnitte, unten links)
 Simulation der Strahlungsprozesse über 24 h mit dem topographischen Grenzschichtmodell
 Tagesgang des Vertikalprofils im Kaltluftsee für den tiefsten Abschnitt Glattfelden*

Die Simulation des Tagesganges erfolgte ohne Ankopplung an ein synoptisches Modell. Der Tagesgang resultiert somit nur aus den Strahlungsbilanzen. Oberhalb des Kaltluftsees kühlt die Atmosphäre in 24 Stunden um rund 2°C ab. Die Abtrocknung bei 1600 m/M erhöht die Abkühlung und führt zu spontaner Durchmischung bis auf 1100 m/M hinunter. Der Kaltluftsee kühlt nachts aus und erwärmt sich tagsüber, der Tagesgang beträgt rund 4°C.

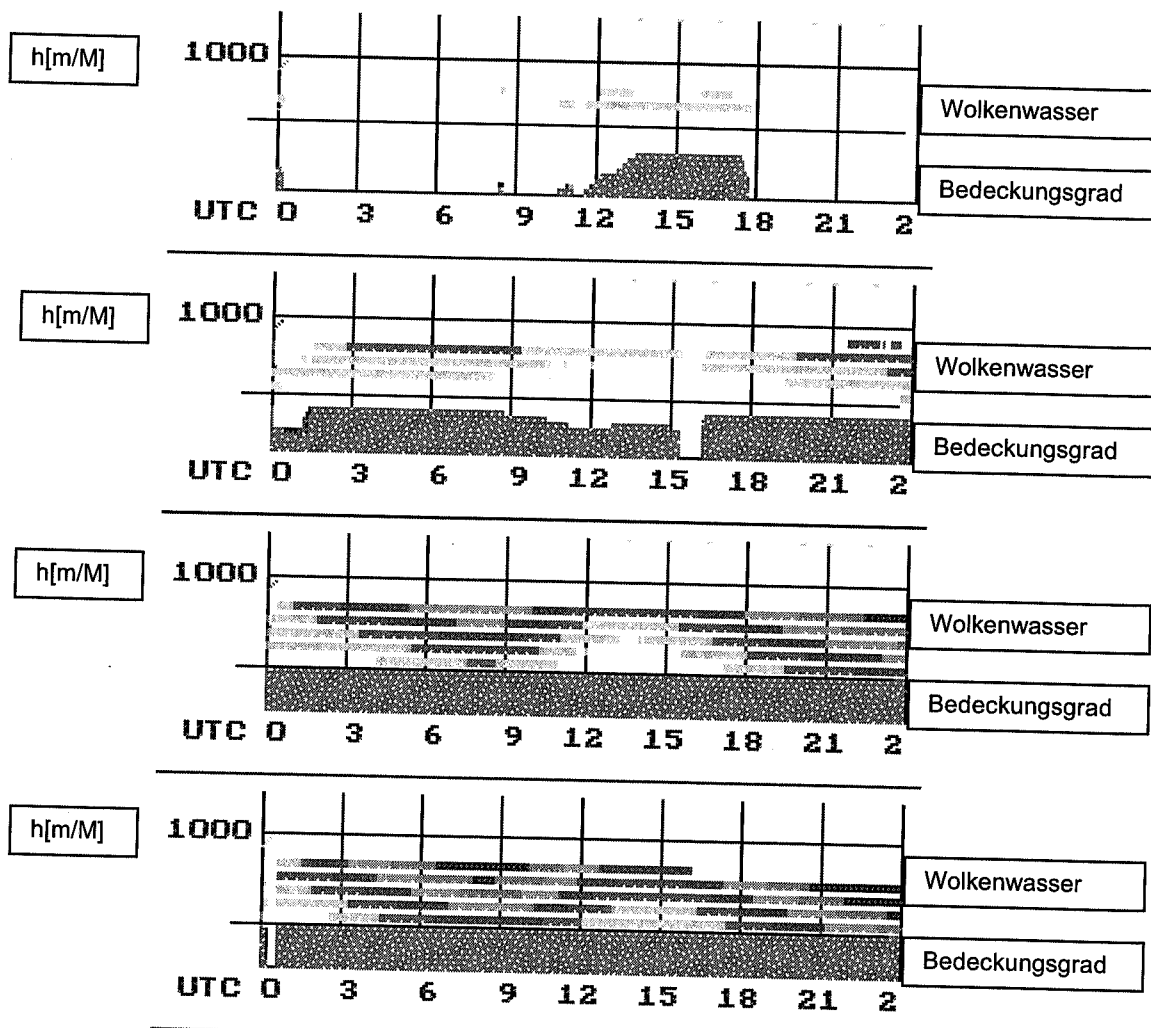
Der Tagesgang am Boden des Kaltluftsees unterscheidet sich in den vier Abschnitten deutlich.



Simulation von Temperatur und Feuchte am Boden des Kaltluftsees über den Abschnitten Pfäffikersee (ganz oben), Greifensee, Flughafen Zürich und Glattfelden (ganz unten). Der oberste Abschnitt Pfäffikersee zeigt den grössten Tagesgang.

Die beiden tiefsten Abschnitte weisen einen geringen Tagesgang auf und die Luft ist meist gesättigt (Nebel). Einzig am Nachmittag stellt sich am Flughafen Zürich eine geringe Taupunktsdifferenz zur Temperatur ein (Nebel hebt vom Boden ab). Im Abschnitt Greifensee liegt tiefer Stratus vor, der nie am Boden aufliegt. Im obersten Abschnitt Pfäffikersee ist der thermische Tagesgang am ausgeprägtesten.

Die simulierten Bewölkungsverhältnisse unterscheiden sich für die vier Abschnitte deutlich.



*Simulation der Bewölkung über den Abschnitten Pfäffikersee (ganz oben), Greifensee, Flughafen Zürich und Glattfelden (ganz unten).
Der Abschnitt Pfäffikersee (oben) ist nachts klar, tagsüber bildet sich tiefer Stratus (grau).
Der Abschnitt Greifensee ist nachts bedeckt (grau), tagsüber wird der Stratus ausgedünnt.
Die tiefergelegenen Abschnitte Zürich Flughafen und Glattfelden sind ganztägig von niedrigem Stratus bedeckt, dessen Untergrenze am Nachmittag leicht vom Boden abhebt.*

Die simulierte Übersättigung im konvektiven Stratus ist am Ende der Nacht und an der Obergrenze am höchsten. Die typischen Zeiten von Schneegriesel stimmen mit den Perioden der grössten Übersättigung überein.

Im Abschnitt Glattfelden wird das Absinken der Stratusobergrenze am Abend sichtbar. Die Übersättigung im Kaltluftsee wird in der zweiten Nacht höher.

Die Simulationen des Kaltluftsees zeigen für die vier Abschnitte charakteristische Unterschiede, die auf die Topographie zurückzuführen sind. Der atmosphärische Wärme- und Feuchtehaushalt von Kaltluftseen wird mit dem Grenzschichtmodell realistisch simuliert.

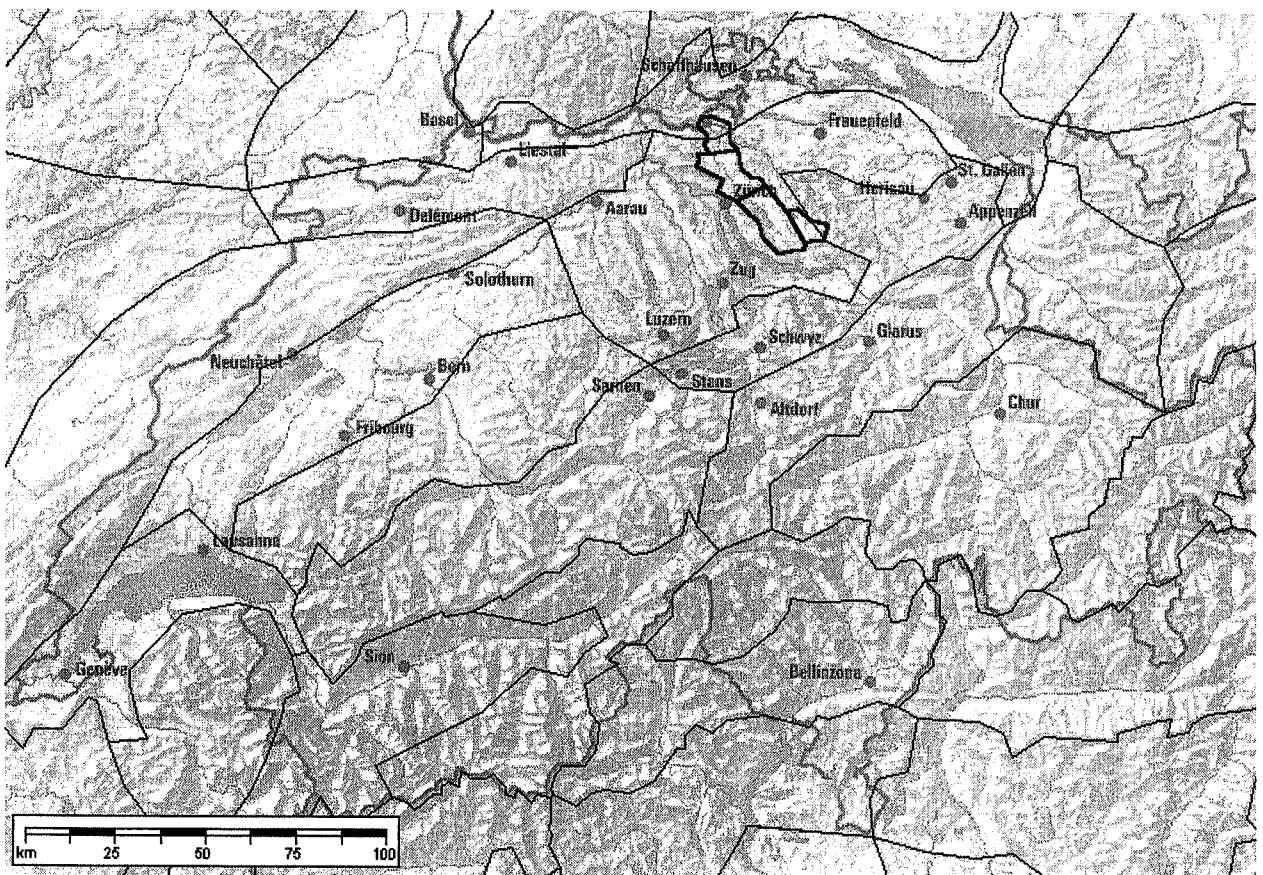
3.4 Lokale Nebelvorhersage mit topographischem Grenzschichtmodell

Das auf Nachtbetrieb erweiterte topographische Grenzschichtmodell kann synoptische Modelle bei der Simulation von stagnierenden Kaltluftseen in komplexer Topographie ergänzen. Zur operationellen Vorhersage von Nebel und Stratus muss das Grenzschichtmodell an ein synoptisches Modell angekoppelt und betrieben werden. Das Grenzschichtmodell berechnet den Verlauf von Ober- und Untergrenze von bodennahem Stratus. Die Bildung und Auflösung von Nebel kann damit lokal simuliert und vorhergesagt werden.

Die räumliche Skala für den Nachtbetrieb des topographischen Grenzschichtmodells liegt bei rund 10 km bzw. 100 km². Sie ist kleiner als die bereits operationelle Anwendungsskala des Modells bei Tag, wo die Konvektion für Gebiete von typischerweise 70 km (rund 5000 km²) Ausdehnung berechnet wird. Die Vorhersagegebiete werden aufgrund der hydrologischen Geländestruktur gewählt, da am Relief abgekühlte Luft in windschwachen Lagen wie Wasser abfließt.

Prognoseregionen

Lokalprognose



Skala von Lokal- und Regionalvorhersagen

Als Nebelvorhersagemodell ermöglicht ein operationelles Grenzschichtmodell auch die Vorhersage von lokal verstärktem Schneegriesel in der Umgebung von intensiven Wasserdampfquellen.

4 Schlussfolgerungen

4.1 Atmosphärische Bedingungen bei Schneegriesel

Schneegriesel tritt bei windschwachen, winterlichen Inversionslagen mit niedrigem Stratus auf. Die Obergrenze des Stratus liegt in max. 450 m über Grund, die Untergrenze in max. 150 m über Grund. Der Stratus kühlt nachts durch oberflächliche Ausstrahlung als Ganzes aus und wird dadurch konvektiv durchmischt.

4.2 Bedeutung der lokalen Wasserdampfquellen

Kehrrichtverbrennungs- und Industrieanlagen sind punktförmige Quellen von Wasserdampf und Wärme, in deren unmittelbaren Umgebung bei den genannten atmosphärischen Bedingungen Schneegriesel verstärkt auftritt: «Industrieschnee». Ihre lokal konzentrierte Wasserdampfproduktion kann von stagnierendem, tiefem Stratus zu gewissen Tageszeiten nicht aufgenommen werden und fällt als Schneegriesel aus. Anlagen mit Wärmenutzung führen durch die im Vergleich zur Wasserdampfabgabe geringe Wärmeabgabe lokal verstärkt zu Übersättigung im Stratus. Die ausfallenden Schneemengen entsprechen der Feuchteabgabe der Anlagen.

Alle Wasserdampfquellen, deren Wärmeabgabe ein Durchstossen der Inversion nicht erlaubt, tragen zum Wasserdampfeintrag bei. Ihre vertikale Verteilung (Verkehr am Boden, Gebäudekamine in Dachhöhe, Industriekamine darüber) ist unbedeutend, da der gesamte Kaltluftsee bei Schneegriesel konvektiv durchmischt ist. Unterschiede bestehen bei der horizontalen Verteilung der Quellstärken. *Gebäudeheizungen* sind – auch ohne Kondensationskessel – schwache, flächig verteilte Wasserdampfquellen und tragen mengenmässig nur marginal zur Grundübersättigung des Stratus bei. Sie liefern allenfalls Kondensationskerne für das Gefrieren der unterkühlten Wolkentröpfchen zu Kristallen. Die Beiträge des motorisierten Verkehrs sind ähnlich verteilt wie die der Gebäudeheizungen und mengenmässig ebenfalls marginal.

4.3 Vorschlag eines Prognoseverfahrens

Die Vorhersage von Schneegriesel hängt direkt mit der Vorhersage von niedrigem Stratus zusammen. In den aktuellen synoptischen Modellen werden die relevanten Grenzschichtprozesse ungenügend berücksichtigt. Sie sind derzeit für die Vorhersage von Nebel und niedrigem Stratus ungeeignet.

Ein Prognoseverfahren für Schneegriesel erfordert die Vorhersage von tiefem Stratus mit seiner Ober- und Untergrenze. Ein lokales Grenzschichtmodell, das die lokale Topographie berücksichtigt, kann die operationelle Modellkette der Wetterdienste gezielt vervollständigen. Lokale Vorhersagen von nächtlichen Temperaturminima (Frost), Nebel- und Stratusbildung können daraus gewonnen werden.

Das Anwendungspotential einer entsprechend ergänzten Modellkette geht beim Strassenwetter deutlich über die Vorhersage von Schneegriesel (Industrieschnee) hinaus. Lokale Frost- und Nebelvorhersagen sind mit dieser Modellarchitektur möglich.

5 Anhang

5.1 Niederschlagsformen

In Kraus (2001) finden sich die folgenden Definitionen. Die französischen Bezeichnungen sind Eichenberger (1990) entnommen.

Schneegriesel (engl. snow grains, frz. neige en grain): Niederschlag von sehr kleinen ($d < 1$ mm) weissen und undurchsichtigen Körnchen aus Eis; sie sind meist flach oder länglich; es sind kleine Reifgraupeln, die wie das Nieseln aus niedrigem Stratus, Stratocumulus oder Nebel fallen.

Reifgraupeln (engl. snow pellets, frz. neige roulée): Niederschlag von weissen, undurchsichtigen, leicht zusammendrückbaren, meist runden schneeähnlichen Körnchen mit einem Durchmesser von 2 bis 5 mm; sie fallen meist in Schauern bei Temperaturen um 0 °C; sie sind verwandt mit dem (Schnee-)Griesel; mit Reif haben sie nichts zu tun. „Vergraupeln“ heisst: Zusammenbacken von kleinen Eiskristallen und winzigen Wassertropfchen (Wolkentropfchen, die so klein sind, dass sie kaum fallen).

5.2 Literaturverzeichnis

- Baur F, Philips H (1935) Der Wärmehaushalt der Lufthülle der Nordhalbkugel im Januar und Juli, Gerl. B. 42 und 45.
- Brutsaert W (1975) On a Derivable Formula for Longwave Radiation From Clear Sky, Water Resource Research, Vol 20, No 12.
- Cerbe G (1999) Grundlagen der Gastechnik, Carl Hanser Verlag.
- Eichenberger W (1990) Flugwetterkunde, Schweizer Verlagshaus.
- Hack KH (2003) Flugwetter, Verlag aviamet.
- Hunziker P (2004) Methode zur Berechnung des Lastprofils, Gas Wasser Abwasser gwa 2/2004.
- Kraus H (2001) Die Atmosphäre der Erde, Springer Verlag.
- Kraus H, Ebel U (2003) Risiko Wetter, Springer Verlag.
- Liechti O, Neiningen B (1994) ALPTHERM – a PC-based model for atmospheric convection over complex topography, Technical Soaring Vol 18, No 3.
- Liechti O (2002) REGTHERM – convection model with local winds, Technical Soaring Vol 26, No 1.
- Marty C (2000) Surface Radiation, Cloud Forcing and Greenhouse Effect in the Alps, Diss. ETH No. 13609.
- Neiningen B, Liechti O (1984) Local Winds in the Upper Rhone Valley, GeoJournal Vol 8, No 3.
- Scorer R S (1978) Environmental Aerodynamics, Ellis Horwood Publishers.
- Steinacker R (1984) Area-elevation distribution of a valley and its relation to the valley wind, Beitr. Phys. Atmosph. Vol 57.