Zeitschrift: Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Annuaire de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 163 (1983)

Artikel: Modelle für die CLIMOD-Studie

Autor: Haschke, Dieter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-90908

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Modelle für die CLIMOD-Studie

Dieter Haschke

Zusammenfassung

Für die Untersuchung der Auswirkung von anthropogener Wärmeabgabe auf das Klima der Region um Basel wurden im Rahmen des Projektes CLIMOD drei Modellierungsansätze eingesetzt: die physikalische Modellierung sowie zwei mathematische Modelle. Der vorliegende Bericht stellt die mathematischen Modelle, das Kühlturmschwadenmodell FOG und das Grenzschichtmodell, vor. Ausgehend von den den Modellen zugrundeliegenden Gleichungen werden die Modelle dargestellt sowie deren Genauigkeit und Leistungsfähigkeit mittels ausgewählter Beispiele gezeigt. Anhand von Simulationsresultaten wird gezeigt, dass der Betrieb eines einzelnen Kühlturmes keine regionalklimatischen Auswirkungen hat, während eine willkürliche Verzehnfachung der Anzahl der Kühltürme mess- und damit nachweisbare Auswirkungen auf das regionale Klima haben könnte.

Résumé

Dans le cadre du projet CLIMOD, trois modèles ont été établis pour déterminer les effets des rejets anthropogènes de chaleur sur le climat de la région de Bâle: un modèle physique et deux modèles mathématiques. Le présent rapport expose les modèles mathématiques: le modèle de panache FOG et le modèle de la couche limite planétaire. Ces modèles, ainsi que leur exactitude et leur efficacité, sont présentés à partir de leurs équations de base et au moyen d'exemples choisis. S'appuyant sur les résultats de simulations, on montre que l'activité d'une seule tour de refroidissement n'a aucun effet climatique régional tandis qu'un décuplement arbitraire de leur nombre aurait sur le climat régional des effets mesurables et donc non négligeables.

Einleitung

Wesentliche Aufgabe der CLIMOD-Studie (1981) war es, die Möglichkeit einer regionalen Klimaveränderung durch den Ausbau der Kernkraftwerke mit atmosphärischer Kühlung an den Standorten Fessenheim (F), Wyhl und Schwörstadt (BRD) sowie Kaiseraugst und Leibstadt (CH) zu untersuchen.
Dazu mussten einerseits detaillierte Kenntnisse des lokalen Klimas und speziell eventuelle Besonderheiten desselben durch Feldmesskampagnen erarbeitet werden (Dütsch, 1984), die auch die notwendige Datenbasis für die Modelle darstellen. Andererseits mussten die klimatischen Auswirkungen aller zukünftigen anthropogenen Eingriffe in die regionalen Klimamechanismen durch den Einsatz von Modellen quantifiziert und prognostiziert werden.
Aus der Sicht des Modellierers war es klar, dass die Entwicklung eines umfassenden Klimamodells mit der Anforderung der Quantifizierung anthropogener Einflüsse nicht kompatibel ist. Daher wurde frühzeitig beschlossen, die Modellierung und damit auch die Feldexperimente auf ausgewählte Wetterlagen zu beschränken, von denen auf Grund allgemeiner atmosphärenphysikalischer Überlegungen eine anthropogene Beeinflussbarkeit nicht ausgeschlossen werden konnte.
Für die Modelle stellten sich daraus folgende Anforderungen:

- sie müssen in der Lage sein, die eine regionale Wetterlage bestimmenden physikalischen Prozesse wie z. B. Advektion, Strahlungsströme, Energie- und Massenaustausch an der Bodenoberfläche und Turbulenz richtig simulieren zu können.
- die durch anthropogene Effekte bewirkten Veränderungen obiger physikalischer Prozesse wie zum Beispiel zusätzlicher Energie- und Masseneintrag in regionalem Massstab

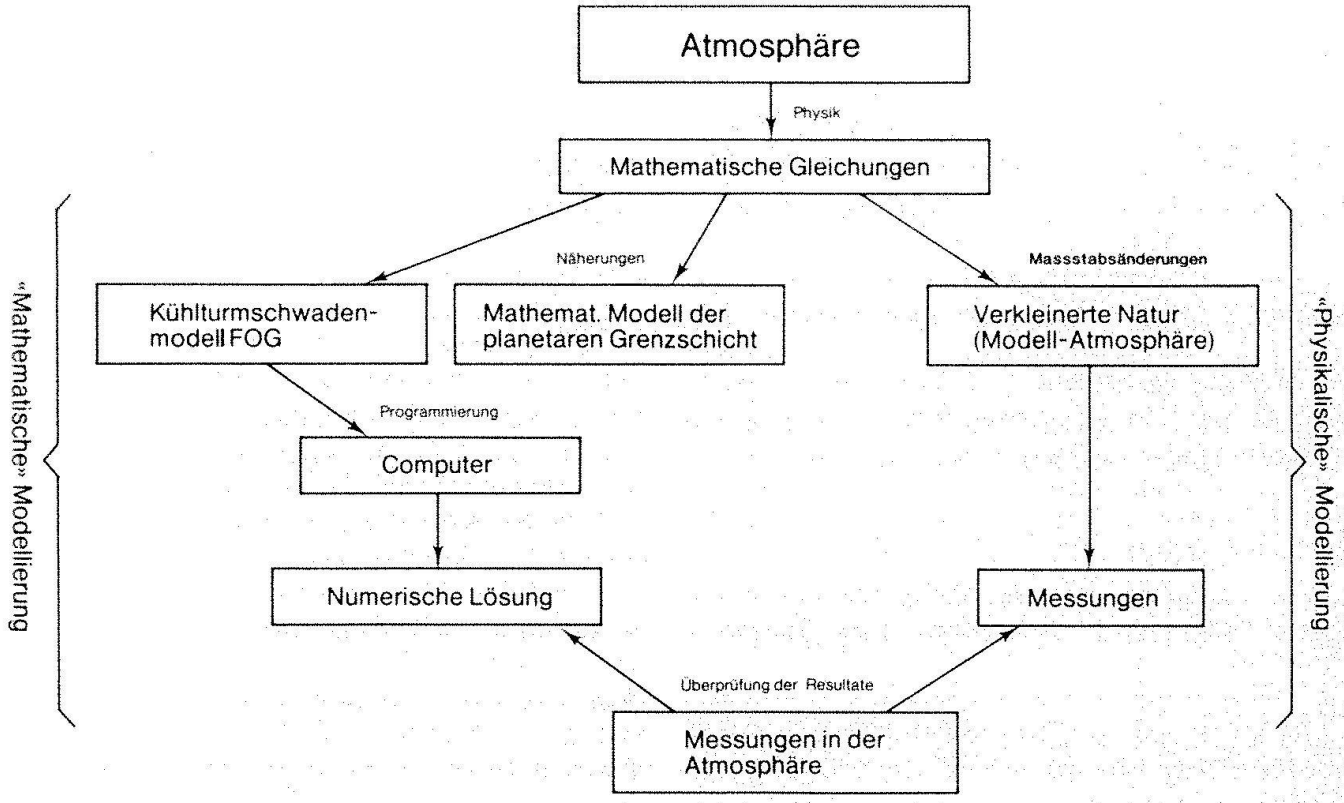


Abb. 1. Schematische Übersicht über das Vorgehen bei der mathematischen und physikalischen Modellierung der Atmosphäre (nach CLIMOD [1981] geändert).

oder Veränderungen von Bodenbeschaffenheit und Bodenrauhigkeit müssen mit dem Modell darstellbar sein.

Die erste Anforderung dient zur Sicherstellung, dass das zum Einsatz gelangende Modell die planetare Grenzschicht und deren zeitliche Entwicklung während einer bestimmten Wetterlage, den sogenannten «Istzustand» nachbilden kann. Mit der zweiten Bedingung wird ein Werkzeug gefordert, das anthropogene Veränderungen des «Istzustandes» nachzuvollziehen in der Lage ist, und quantitative Aussagen über dessen mögliche Veränderungen gestattet.

Modelle in der CLIMOD-Studie

Obwohl ein relativ geradliniger Weg zur Aufstellung eines die pysikalischen Prozesse in der Atmosphäre beschreibenden Gleichungssystemes führt, ist es nicht möglich, dieses System in einer für CLIMOD befriedigende Art zu lösen. Daher war es naheliegend, dass die Simulation der für CLIMOD relevanten Probleme mit mehreren Modellierungsansätzen angegangen wurde.
Zwei Modelliertechniken sind dabei zum Einsatz gelangt, die in der Terminologie des Projektes CLIMOD als «physikalische» und «mathematische» Modellierung bezeichnet wurden.
Der Zusammenhang dieser beiden Modellierungswege ist auf Abb. 1 veranschaulicht. Dabei ist zu erkennen, dass sowohl ein mathematisches Modell der Atmosphäre als auch ein physikalisches Modell der Atmosphäre aus demselben System von Grundgleichungen hervorgeht.
Während die physikalische Modellierung mit Massstabsänderungen in den Grundgleichungen Ähnlichkeitsregeln für eine verkleinerte Modellatmosphäre ableitet, mit der experimentiert wird, führt die mathematische Modellierung problemangepasste Näherungen in die Grundgleichungen ein, um zu mathematischen Modellen, im speziellen Fall der CLIMOD-Studie zwei Modelle, zu kommen. Der weitere Weg führt über eine Diskretisierung des Gleichungssystems und dessen Programmierung zu einem für die numerische Vorausberechnung regionaler Wetter-

lagen und deren anthropogener Beeinflussbarkeit brauchbaren Werkzeug.
Die wichtigsten Vor- und Nachteile der physikalischen und mathematischen Modellierung sind in Tab. 1 gegenübergestellt. Hinzuzufügen wäre zu dieser Tabelle, dass die physikalische Modellierung, sofern quantitative Aussagen angestrebt werden, zwei Messprobleme gibt: Die Feldmessungen in der Atmosphäre und die Messungen in der Modellatmosphäre, beide mit dem zugeordneten Aufwand an Datenverarbeitung. Die letztere Messaufgabe entfällt bei einer mathematischen Modellierung.

Das mathematische Kühlturmschwadenmodell FOG nach Gassmann und Tinguely (1982)

Die wichtigste dem Modell zugrundeliegende Vorstellung besteht in der Unterteilung des gesamten Schwadens, ob sichtbar oder unsichtbar, in einen Ast aufsteigender Luftpakete und einen Diffusionsteil. Der Aufstiegsteil ist gekennzeichnet durch eine mittlere Vertikalgeschwindigkeit, die grösser ist als die Turbulenz-Intensität der freien Atmosphäre; im Diffusionsteil ist dieser Sachverhalt umgekehrt.
Für die Berechnung der Schwadenachse wurde die folgende Modellvorstellung herangezogen: Ein homogenes Luftpaket verlässt den Kühlturm mit einer mittleren Vertikalgeschwindigkeit. Seiner kleinen Trägheit zufolge nimmt es sofort die Horizontalgeschwindigkeit des Windes an. Während des Aufstieges um einen Vertikalschritt Δz wird einerseits wegen der Eigenturbulenz des Paketes, andererseits wegen der Turbulenz der freien Atmosphäre Umgebungsluft zugemischt (Entrainment), die homogen im Paket verteilt dessen Grösse und thermodynamischen Zustand ändert. Dies wirkt sich in einer Ver-

Tab. 1. Wichtigste Aspekte der physikalischen und mathematischen Modellierung (aus CLIMOD, 1981).

Phänomen	mathematische Modellierung	physikalische Modellierung
natürliche Strahlungsströme	werden vollständig berücksichtigt, genauere Kenntnis der Zusammensetzung der Atmosphäre notwendig	werden nur über die Bodenenergiebilanz berücksichtigt
Bodenenergiebilanz	wird vollständig berücksichtigt, Kenntnis der Verdunstungseigenschaften des Bodens notwendig	wird angenähert berücksichtigt durch Nachbildung des Tagesganges der Bodenoberflächentemperatur; Verdunstung wurde nicht berücksichtigt
Wasserdampf	Kondensation und Verdunstung wird berücksichtigt, auch Wechselwirkung mit Strahlungsströmen (Nebelbildung)	Kondensation und Verdunstung wurden nicht berücksichtigt
Cumuluskonvektion	kann mit den verwendeten Modellen nicht simuliert werden, erfordert anders aufgebaute Modelle	kann mit den verwendeten Modellen nicht simuliert werden
Atmosphärische Turbulenz	wird detailliert in Abhängigkeit der lokalen Stabilität der Atmosphäre berücksichtigt	mittlere mechanische und thermische Turbulenz wird im Modell 1:5 000 und 1:25 000/1:10 000 richtig berücksichtigt
Orographie, Modellperimeter	Orographie muss mit einem Maschengitter angenähert werden, dadurch entsteht Glättung. Modellperimeter ist wegen des Rechenaufwandes auf regionale Untersuchungen beschränkt	Orographie wird detailliert berücksichtigt, Modellperimeter aus praktischen Gründen durch die Modellgrösse beschränkt
Strömungen	wegen der näherungsweisen Darstellung der Orographie geglättete Strömungen	sehr gut geeignet für die qualitative Nachbildung von Strömungen in der Atmosphäre und deren anschauliche Sichtbarmachung
Simulation verschiedener Wetterlagen	jeweils umfangreiche Eingabevorbereitungen mit Testläufen notwendig	schnelle Umstellung von einer zur anderen Lage möglich

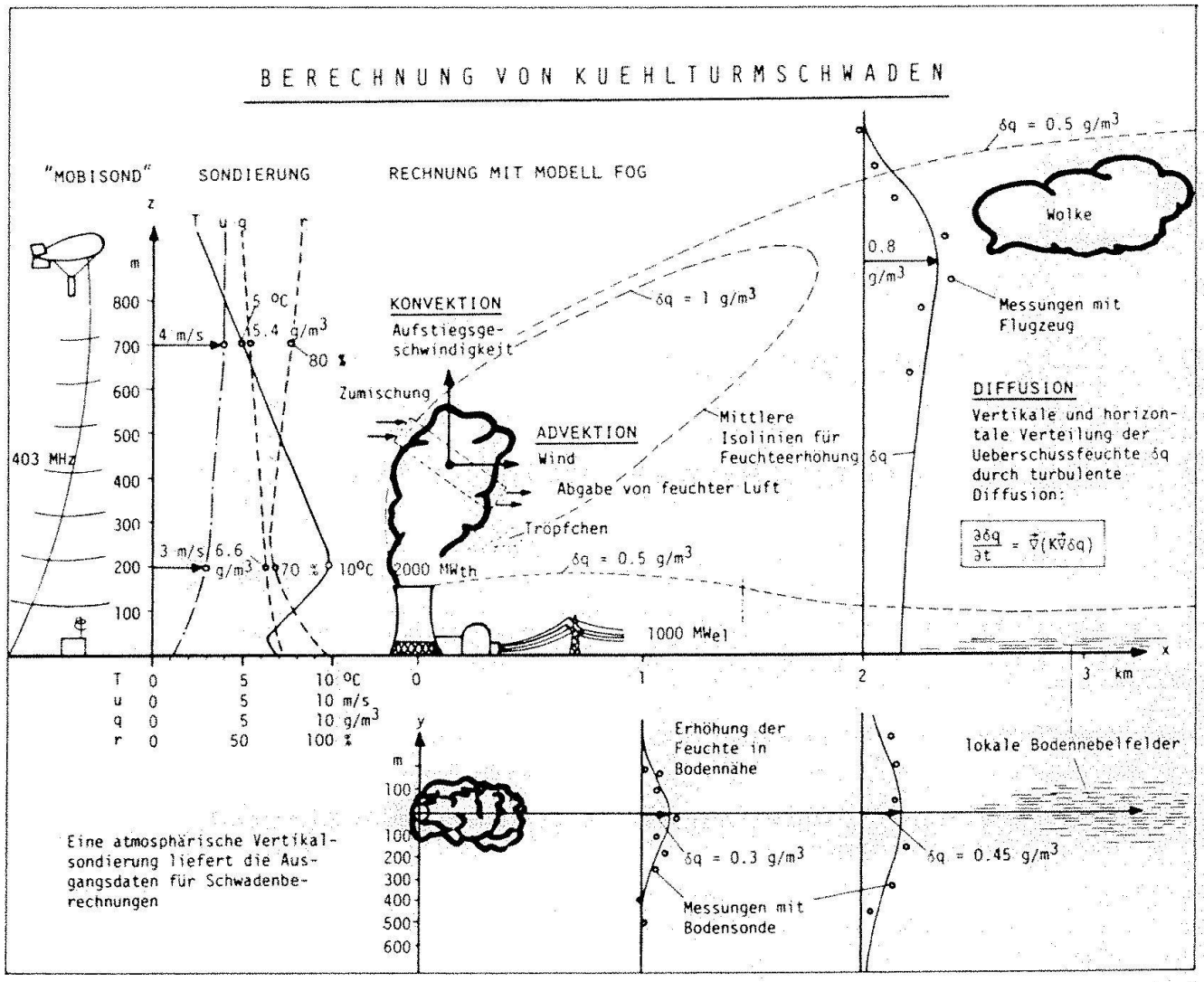


Abb. 2. Einsatz des Kühlturmschwadenmodelles FOG. Eine feinaerologische Sondierung (links) stellt die meteorologischen Eingabeparameter für das Kühlturmschwadenmodell bereit. FOG berechnet dann Aufstiegshöhen, sichtbare Teil- und Zusatzfeuchten bzw. Temperaturerhöhung durch die Schwaden (rechts).

änderung des Auftriebes und damit einer Veränderung der Vertikalbewegung aus. Gleichzeitig mit diesen Vorgängen wird ein Teil des betrachteten Paketes an die Umgebungsluft abgegeben (Detrainment). Wird das Paket durch die Zustandsänderung übersättigt, entstehen winzige Nebeltröpfchen, die ab einer gewissen Dichte anwachsen und durch Zusammenstösse koagulieren können und schliesslich als Regentropfen das Paket verlassen. Dadurch fallen sie unterhalb des Schwadens in ungesättigte Luft hinein und verdampfen, währenddem sie eine bestimmte Strecke durchfallen. Kühlt sich das Paket bis unter die Gefriertemperatur der Wassertröpfchen ab, werden diese in Eiskristalle umgewandelt, und die dabei frei werdende Schmelzwärme vergrössert den Auftrieb des Paketes.

Die mathematische Formulierung vorhergehender Modellvorstellungen führt zu dem in Tab. 2 zusammengefassten Formelsatz, der dem entsprechenden Computerprogramm zugrundegelegt ist. Da die fundamentalen Erhaltungssätze der Physik hier für ein (relativ grosses) Volumenelement formuliert wurden, sind sie als solche vielleicht nicht auf den ersten Blick erkennbar. Sie sind jedoch identisch mit den auf Tab. 3 in differentieller Form angeschriebenen Sätzen für das mathematische Modell der planetaren Grenzschicht und in diese überführbar.

Die praktische Anwendung des Modelles FOG ist auf Abb. 2 dargestellt. Die erforderliche meteorologische Information besteht aus einer feinaerologischen Sondierung bis etwa 800 – 1000 m über Boden und vorzugsweise in der Nähe des Standorts des Kühltur-

Tab. 2. Mathematisches Kühlturmschwadenmodell FOG. Für die Ableitung der Formeln wird auf Gassmann (1980) und Gassmann und Tinguely (1982) verwiesen. Die Symbole sind am Schluss des Artikels zusammengefasst.

Impulssatz (Gleichung für die Vertikalbewegung für ein Schwadenpaket)

$$\frac{dw}{dt} = g\left(\frac{T_{vp} - T_{ve}}{T_{ve}} - Q^{cl}\right) - \mu_{en} w^2$$

Energiesatz für das Schwadenpaket (1. Hauptsatz der Thermodynamik)

$$dT_p = dz \frac{r\left\{(1+X_s)\frac{T_{vp}}{T_{ve}} + X_s \Lambda_1\right\} - \mu_{en}(E+\Lambda_3) + \delta^*(T_p - T_f)\Lambda_4}{1 + X_s\left(\frac{C_p^v}{C_p^a} + \Lambda_2\right) + Q^{cl}\frac{C}{C_p^a}}$$

Massenerhaltung für Wasserdampf im (ungesättigten) Schwadenpaket (Kontinuitätsgleichung)

$$X_p + dX_p = \frac{X_p + \mu_{en}\, dz X_e}{1 + \mu_{en} dz}$$

zusätzlich: Kontinuitätsgleichung für Wassertröpfchen in gesättigtem Paket
Zu- und Entmischung von Umgebungsluft zu Schwadenpaket
(«Entrainment» und «Detrainment»)

Definition Entrainmentparameter $\mu_{en} \equiv \frac{1}{m^a} \frac{dm_{en}^a}{dz} > O$

Definition Detrainmentparameter $\mu_d \equiv \frac{1}{m^a} \frac{dm_d^a}{dz} < O$

Zusammenhang zwischen De- bzw. Entrainmentparameter
und De- bzw. Entrainmentgeschwindigkeit

$$\mu_{en,d} = \frac{1}{dz} \frac{2\pi r_c\, ds\, v_{en,d}\, \varrho^a\, dz/w}{\pi r_c^2 ds\, \varrho^a} = \frac{2\, v_{en,d}}{r_c w}$$

Parametrisierung der De- bzw. Entrainmentgeschwindigkeit

$$v_{en} = \alpha w \cos\zeta + \gamma w \sin\zeta + v_a$$

$$v_d = -v_a$$

$$\mathrm{tg}\,\zeta \equiv \frac{u}{w}$$

Zumischung durch atmosphärische Turbulenz

$$v_d = \delta \sqrt{\overline{w'^2}} \frac{u}{\sqrt{u^2+w^2}}$$

Experimentell abgesicherte Zahlenwerte

$\alpha = 0.09, \quad \gamma = 0.35, \quad \delta = 0.5$

Diffusion von Schwadenfeuchte: Vertikalverteilung mit Faltung über Feuchtequellen

$$\Delta q(z,x+\Delta x) = \int_0^H \Delta q(z',x) \cdot G_D(z-z';z,t)\, dz'$$

mit

$$G_D(z-z';z,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma(t)} \left\{ e^{-\frac{(z-z')^2}{2\sigma^2(t)}} + e^{-\frac{(z+z')^2}{2\sigma^2(t)}} + e^{-\frac{(2H-(z+z'))^2}{2\sigma^2(t)}} \right\}$$

wobei

$$\sigma(t) = \sqrt{2Dt} \quad , t = \Delta x/u$$

und Parametrisierung der Diffusionskoeffizienten D_i mit

$$D_i = \sqrt{\overline{w'^2_i}} \cdot \Lambda_i$$

$\Lambda_i = 0.046\,(\bar{z}_i + 4)^{1.4}$,$\bar{z}_i$ abhängig von T-Schichtung

Für horizontale Diffusion in ausreichender Entfernung von der Quelle ergibt sich eine Streubreite von:

$$\sigma(x) = \sqrt{R_o^2 + 2\bar{D} \cdot \frac{x}{\bar{u}}}$$

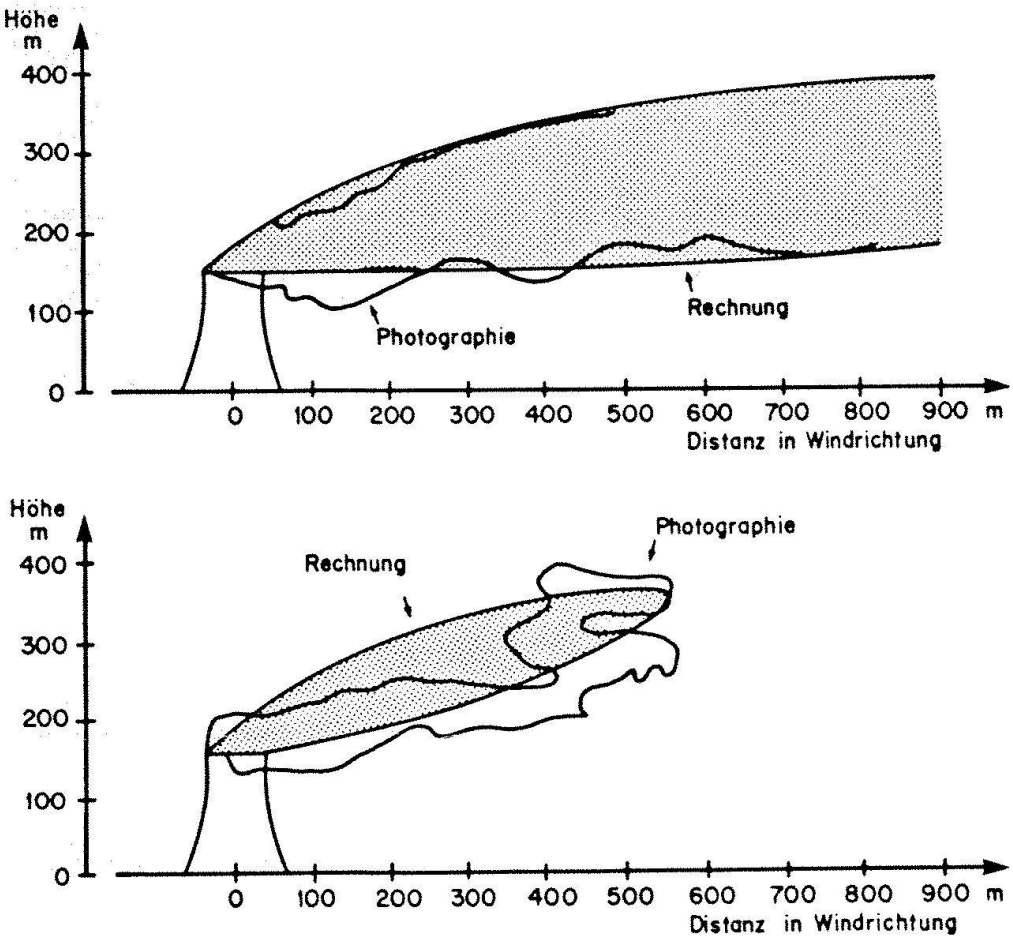


Abb. 3. Vergleich beobachteter mit berechneten Schwaden nach F. Gassmann und M. Tinguely (1982). Die Rechnung wurde unter Verwendung einer am Standort gemachten Sondierung durchgeführt. Die obere Figur zeigt einen Schwaden mit nicht genau angebbarer Länge, da sie sich mit einer tiefliegenden, geschlossenen Wolkendecke vereinigt.
Die untere Figur zeigt einen ähnlichen Vergleich. Die Schwadenlänge kann aus der Fotografie angegeben werden und wird durch die Rechnung gut bestätigt. Die aus der Fotografie abgeleitete Momentanform der Schwaden ist prinzipiell nicht mit Modellrechnungen voraussagbar, das Modell gibt die sich bei den vorherrschenden Wetterbedingungen einstellende mittlere Schwadenform wieder.

mes. Das EIR setzt dazu ein leichtes, transportables Sondierungssystem für die meteorologischen Grössen Druck, Temperatur, Feuchte sowie Windrichtung und -geschwindigkeit ein («MOBISOND»). Die anschliessend durchgeführte Schwadenrechnung liefert die Schwadenachse, die Vertikalgeschwindigkeit während des Aufstieges sowie die Aufstiegshöhe. Weiters werden die durch die Schwaden verursachte Feuchteänderung oder, jedoch weniger wichtig, Temperaturänderung, die sich durch turbulente Diffusion in der planetaren Grenzschicht ergeben, berechnet.
Die Leistungsfähigkeit des Modells ist anhand von zwei Beispielen dargestellt. Auf Abb. 3 ist ein Vergleich von sichtbaren Schwaden, deren Form anhand einer Fotografie festgelegt wurde, mit den entsprechenden Nachrechnungen gezeigt (Gassmann und Tinguely, 1982). Zwei Fälle aus einem umfangreichen Material, das im Zuge eines internationalen Vergleichs von Schwadensimulationsrechnungen am KKW Philippsburg I (BRD) erarbeitet wurde, sind herausgegriffen. Die obere Figur der Abb. 3 zeigt einen sehr langen Schwaden, der sich mit einer tiefliegenden geschlossenen Wolkendecke vereinigt, sodass keine Schwadenlänge angegeben werden kann. Die untere Figur zeigt einen Vergleich mit einem etwa 600 m langen Schwaden, der bis auf etwa 400 m über Boden steigt.
Die Abb. 4 zeigt ein in CLIMOD (1981) untersuchtes Schwadenverhalten während einer winterlichen Hochdrucklage, währendder das schweizerische Mittelland unter einer Hochnebeldecke liegt. Die zwei wichtigen Grenzfälle «Schwaden durchbricht Nebeldecke» und «Schwaden bleibt in Nebeldecke stecken» sind herausgegriffen. In beiden Fällen zeigt sich, dass das Modell auch in diesen anspruchsvollen Fällen das Schwadenverhalten richtig reproduziert.

Das mathematische Modell der planetaren Grenzschicht («PGS-Modell»)

Ausgehend von einem in (Jacobs, Pandolfo und Atwater, 1975) dargestellten mathemati-

Tab. 3. Grundgleichungen des PGS-Modells. Die Symbole sind am Schluss des Artikels zusammengefasst.

Strömungsfeld

Bewegungsgleichungen (Horizontales Geschwindigkeitsfeld)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{v}_h \nabla) u = f \cdot \left\{ v - v_g(z) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_m \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right\}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{v}_h \nabla) v = -f \cdot \left\{ u - u_g(z) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_m \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right\}$$

Vertikalgeschwindigkeit

$$w(\zeta) = -\int_0^{\zeta} \left[\frac{\partial u}{\partial \xi}(\zeta') + \frac{\partial v}{\partial \eta}(\zeta') \right] d\zeta'$$

Thermische Windgleichungen

$$u_g(z) \equiv u_g(H) \frac{T_v(z)}{T_v(H)} + g \frac{T_v(z)}{f} \int_z^H \frac{1}{T_v(z')^2} \cdot \frac{\partial T_v}{\partial y} dz'$$

$$v_g(z) \equiv v_g(H) \frac{T_v(z)}{T_v(H)} - g \frac{T_v(z)}{f} \int_z^H \frac{1}{T_v(z')^2} \cdot \frac{\partial T_v}{\partial x} dz'$$

Energiegleichung

Luft

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v}_h \nabla) T = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_e \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \Gamma \frac{\partial K_e}{\partial z} - \Gamma w + \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}_{rad} + \frac{C_L \cdot L_e}{C_p^a} + \dot{S}_T$$

Energiequelle durch Strahlungsabsorption

Boden

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_s \frac{\partial T}{\partial z} \right]$$

Wasserdampf

$$\frac{\partial q}{\partial t} + (\vec{v}_h \nabla) q = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_e \frac{\partial q}{\partial z} \right] - C_L + \dot{S}_q$$

Luftverunreinigungen

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (\vec{v}_h \nabla) C_i = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_e \frac{\partial C_i}{\partial z} \right] + \left\{ \frac{\partial C_i}{\partial t} \right\}_{ph} + \dot{S}_{C_i}$$

photochemischer Quellterm

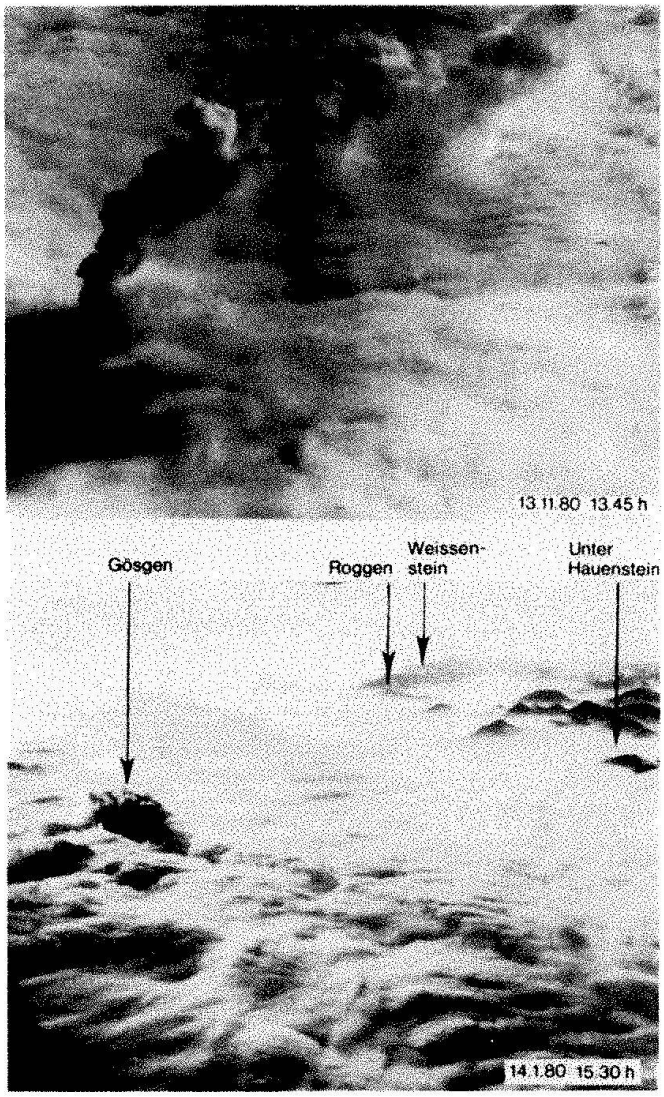
Bodenenergiebilanzgleichung

$G \cdot (1-a)$	solare Einstrahlung
$+ E_A$	atmosphärische Gegenstrahlung
$= \sigma \cdot T_I^4$	Infrarotausstrahlung der Bodenoberfläche
$- \varrho C_p^a K_e \left\{ \left\{ \frac{\partial T}{\partial z} \right\}_+ + \Gamma \right\}$	sensibler Wärmefluss (in Atmosphäre)
$- \varrho L_e K_e \frac{\partial q}{\partial z}$	latenter Wärmefluss (in Atmosphäre)
$+ \varrho_s c_s K_s \left\{ \frac{\partial T}{\partial z} \right\}_-$	sensibler Wärmefluss in Boden
$- \varrho_w c_w P_r (T_r - T_I)$	Energieeintrag durch Niederschlag
$- \dot{S}_{T_I}$	anthropogene Energiequellen am Boden

schen Modell der planetaren Grenzschicht wurde das für die CLIMOD-Studie eingesetzte PGS-Modell entwickelt, um die Auswirkungen von Abwärmeeinleitung in die Atmosphäre bei speziellen («kritischen») regionalen Wetterlagen untersuchen zu können. Die dem Modell zugrundegelegten Gleichungen sind in Tab. 3 zusammengefasst. Zu bemerken ist, dass die Bewegungsgleichung für die Vertikalgeschwindigkeit nur in ihrer Restform als hydrostatische Grundgleichung im Modell berücksichtigt ist, die zusammen mit der Zustandsgleichung für feuchte Luft sowie der Definition des geostrophischen Windes zur thermischen Windgleichung umgeformt ist. Damit wird erreicht, dass der Druck im Modell nicht als Variable auftritt, sondern nur die Temperatur. Das Modell wurde im Hinblick auf seine Anwendung bewusst so gestaltet, da sich anthropogene Eingriffe in die planetare Grenzschicht primär als Temperaturänderungen bemerkbar machen, die dann durch Störungen des Druckfeldes Änderungen im Windfeld bewirken.

Die Verwendung der thermischen Windgleichung in der auf Tab. 3 angegebenen Form beschränkt das Modell auf eine Atmosphäre, die sich nahezu in hydrostatischem Gleichgewicht befindet. Die Erfahrung zeigt, dass die Atmosphäre praktisch immer diese Bedingung erfüllt. Meteorologische Phänomene, die mit grossen Vertikalbeschleunigungen verbunden sind, wie z. B. Konvektion, sind ausserhalb des Anwendungsbereiches des Modells. Im Prinzip ist eine Erweiterung des Modells auf eine nichthydrostatische Atmosphäre möglich, ist aber für die CLIMOD-Studie nicht notwendig gewesen. Die Beschränkung auf eine hydrostatische Formulierung des Modells gestattet einerseits die Verwendung des Massenerhaltungssatzes (in inkompressibler Schreibweise) als prognostische Gleichung zur Berechnug der Vertikalgeschwindigkeit, andererseits muss bemerkt werden, dass dadurch die Lösungsmannigfaltigkeit eingeschränkt wird.

Die Energiegleichung des Modells ist mit der Bilanzgleichung für Wasserdampf über die Kondensationsrate und der dabei frei werdenden Energie direkt gekoppelt. Eine indirekte Koppelung besteht über die in der Tabelle nicht angegebene, aber im Modell enthaltenen Strahlentransportrechnung, da die durch Kondensation entstehenden Wassertröpfchen die natürlichen Strahlungsflüsse stark modifizieren und so in die Energiebilanz eingreifen. Das Modell kann anthropogene Wärme- und Feuchtequellen in praktisch beliebiger Konfiguration und zeitlicher Variabilität der Quellstärke berücksichtigen. In der gegenwärtigen Version ist die Simula-



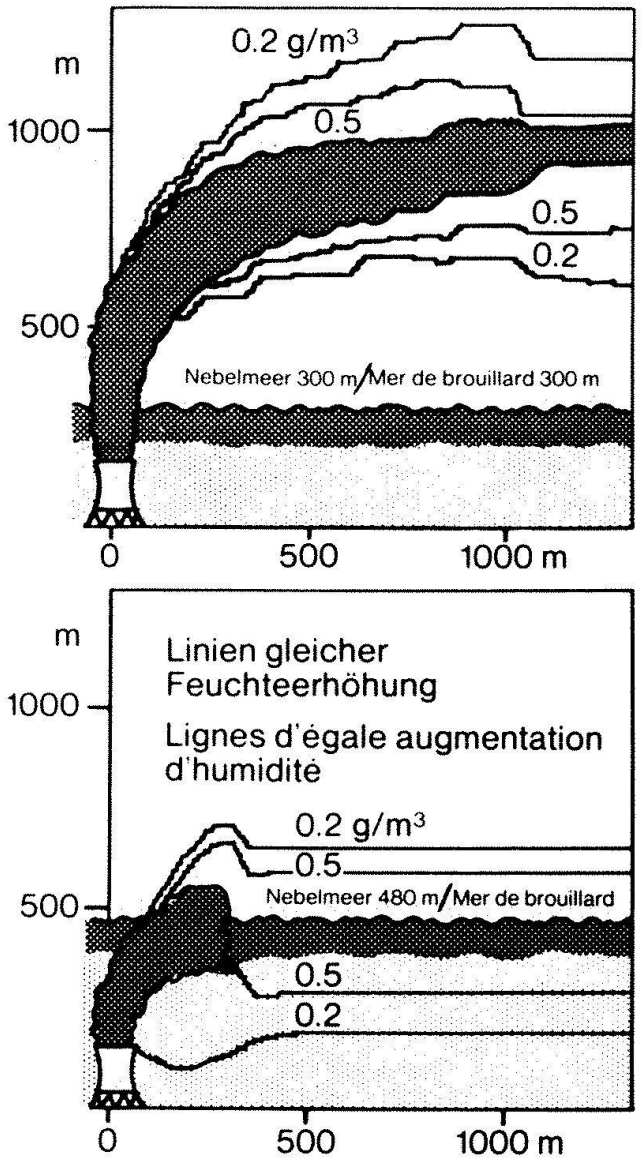


Abb. 4. Verhalten des Schwadens des Kernkraftwerkes Gösgen bei einer winterlichen Hochdrucklage mit Nebelmeer über dem Mittelland. Die obere Figur zeigt die Fotografie eines die relativ tiefliegende Nebeldecke durchstossenden Schwadens und dessen Nachrechnung mit dem Modell. In der unteren Fotografie ist der Schwaden nicht in der Lage, die Nebeldecke zu durchstossen, rechts unten die entsprechende Modellrechnung nach CLIMOD (1981).

tion von zwei verschiedenen Luftverunreinigungen möglich, die sich gegenseitig nicht beeinflussen, deren Rückwirkung auf die Strahlungsflüsse aber berücksichtigt werden kann. Der in den Gleichungen auf Tab. 3 berücksichtigte Quellterm durch photochemische Reaktionen wird an der Technischen Universität Karlsruhe (Institut für Thermodynamik, Leiter: Prof. G. Ernst) entwickelt, ist aber noch nicht einsatzbereit.

Der Einsatz des PGS-Modells erfordert die Vorgabe von Rand- und Anfangsbedingungen, mit denen das Modell an das synoptische Wettergeschehen angekoppelt wird. Prinzipiell ist dazu die Angabe von Funktionswerten oder deren Ableitungen an den Rändern möglich. Diese werden im allgemeinen zeit- und ortsabhängig sein. Eine Vorgabe von Funktionswerten, z. B. der Temperaturverteilung und des Windfeldes an den Rändern, ist mit ausreichender Genauigkeit schon aus praktischen Gründen nicht möglich, so dass eine auf diese Art erzwungene Ankoppelung des regionalen Modells an das grossräumige Wettergeschehen nicht sinnvoll erscheint.

Für die Vorgabe von Gradienten anstatt Funktionswerten als Randbedingungen an den seitlichen Rändern sprechen folgende Überlegungen:

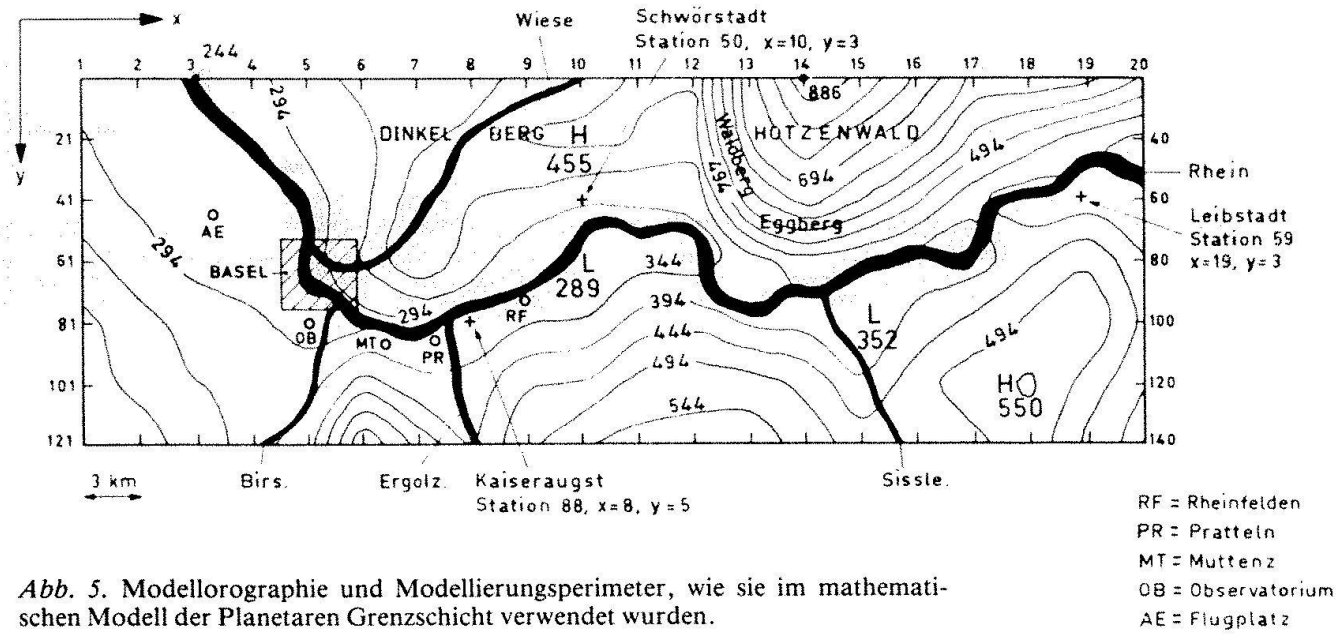


Abb. 5. Modellorographie und Modellierungsperimeter, wie sie im mathematischen Modell der Planetaren Grenzschicht verwendet wurden.

- Sie sind räumlich und zeitlich, verglichen mit den hier interessierenden Raum- und Zeitscales, nicht zu stark variierende Funktionen.
- Sie können zumindest grössenordnungsmässig und für bestimmte Höhenniveaus aus den synoptischen Wetterkarten bestimmt werden.
- Durch Vorgabe von Gradienten wird auch eine ein- bzw. zweidimensionale Simulation der planetaren Grenzschicht sinnvoll, da dadurch zumindest Advektion in den nicht betrachteten Koordinatenrichtungen berücksichtigt wird.

Das Modell wurde daher so aufgebaut, dass es mit Hilfe von zeit- und höhenabhängig vorgebbaren Gradienten der meteorologischen Variablen als Randbedingungen rechnet (Haschke, 1983).
Wie aus den auf Tab.3 angeschriebenen Gleichungen hervorgeht, wurde für die Behandlung atmosphärischer Turbulenz ein einfacher Diffusionsansatz gewählt, der vertikalen Impuls-, Energie- und Stoffaustausch beschreibt. Horizontaler Transport obiger Grössen erfolgt durch die advektiven Terme der Gleichungen. Horizontale turbulente Diffusion wird nicht explizit berücksichtigt, da der heutige Stand des meteorologischen Wissens dazu noch zu grosse Lücken enthält und eine sinnvolle Parameterisierung daher nicht möglich ist. Durch die Diskretisierung der advektiven Terme mit Hilfe von «Upstream»-Differenzen wird jedoch implizite numerische Diffusion in die numerische Lösung der Gleichungen eingeschleppt, von der angenommen werden kann, dass sie die tatsächlich vorhandene horizontale Diffusion grob approximiert (Molenkamp, 1968 und Orville, 1968).
Die vertikalen Diffusionskoeffizienten für Impuls, Energie und Wasserdampf bzw. Schadstoffe werden abhängig von der lokalen Stabilität der Atmosphäre, ausgedrückt durch die lokale Gradienten-Richardson-Zahl, gebildet oder mit Hilfe von ebenfalls stabilitätsabhängigen Profilfunktionen unter Zuhilfenahme der Ähnlichkeitstheorie in der planetaren Grenzschicht gebildet. Beide Methoden geben vergleichbare Resultate für die Diffusionskoeffizienten. Prinzipiell sind auch Turbulenzparameterisierungen höherer Ordnung im Modell verwendbar. So wurde die Energiegleichung für turbulente Energie («k-Gleichung») zur Turbulenzparameterisierung herangezogen, da sie eine einfache Behandlung des turbulenten Energieflusses durch die obere Modellbegrenzung gestattet. Es zeigte sich, dass bei Wahl der oberen Modellbegrenzung in ausreichendem Abstand der Bodengrenzfläche (~ 2 bis 4 km) Resultate erzielt werden, die gut mit den mit einem Diffusionsansatz erhaltenen übereinstimmen. Diese wesentlich aufwendigere Anwendung der «k-Gleichung» für die Turbulenz-

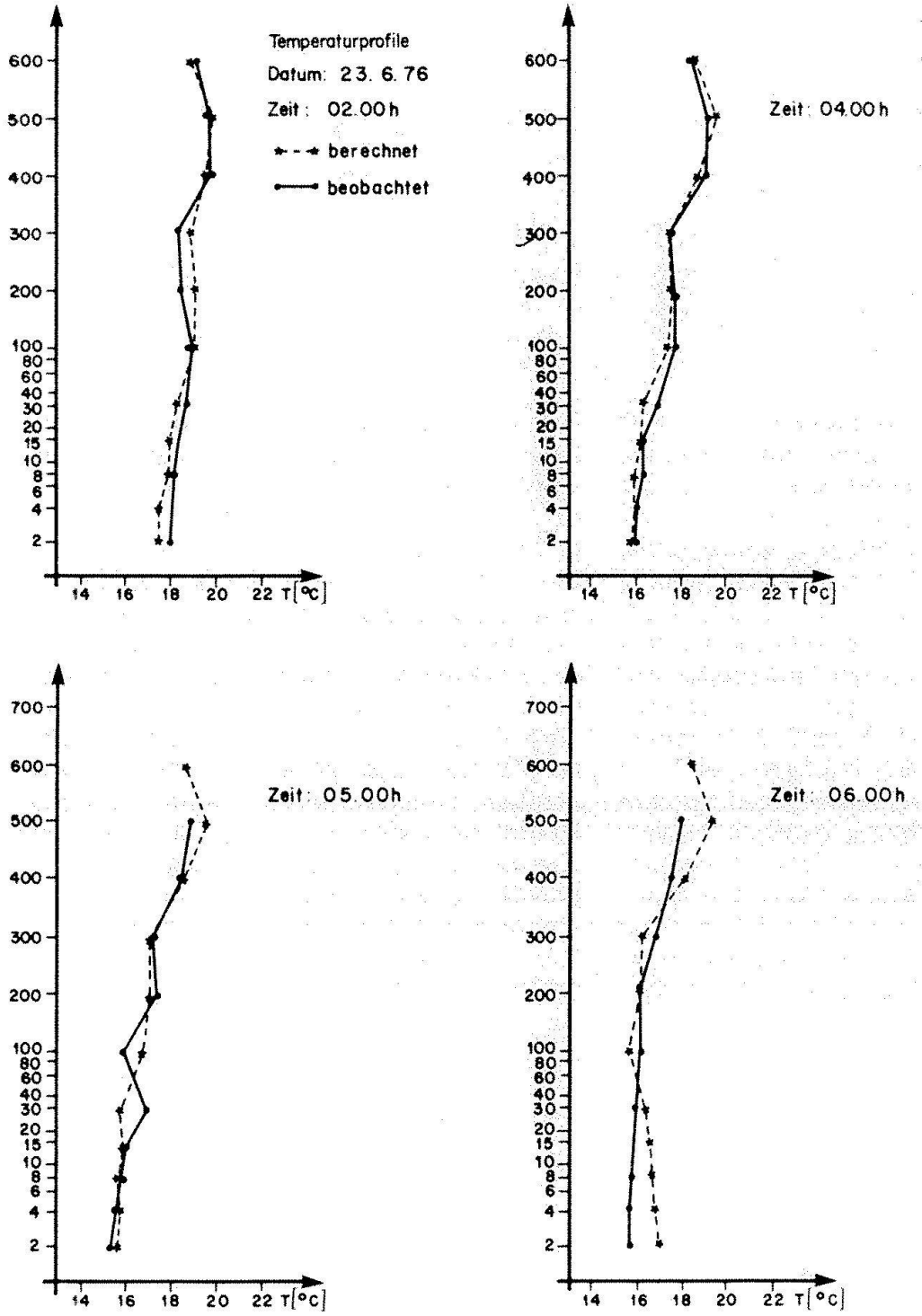


Abb. 6. Vergleich gemessener und berechneter Temperaturprofile am 23.6.1976 zu verschiedenen Zeitpunkten. Beginn der Rechnung am 22.6.1976 um 10.00 h.

parameterisierung wurde daher nicht notwendig.

Untersuchungsgebiet

Das im Rahmen des Projektes CLIMOD mit dem mathematischen Modell untersuchte Gebiet erstreckte sich von der Aaremündung bis unterhalb von Basel etwa auf die Höhe der Ortschaft Efringen (Baden-Württemberg). Auf der Landeskarte 1:100000 der Eidgenössischen Landestopographie ist das Gebiet durch die Koordinaten (600, 258), (600, 279) und (660, 258), (660, 279) abgegrenzt, was eine Ausdehnung von 21 km in Richtung N–S und 60 km in Richtung W–O ergibt.

Für die Modellsimulation wurde das Gebiet mit einem 3 × 3 km Raster approximiert.

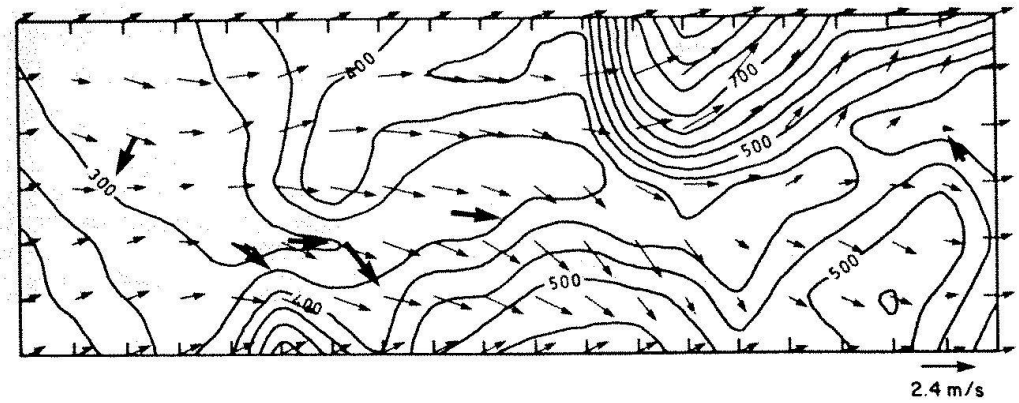


Abb. 7. Vergleich des berechneten Temperaturfeldes 8 m über Boden mit Temperaturmessungen (23.6.1976, 10.00 h).

Jeder Maschenpunkt ist damit für eine Fläche von 9 km^2 repräsentativ. Durch Bildung einer mittleren Höhenkote wird die für die Simulation massgebende Orographie erhalten. Ein Bild der so gebildeten numerischen Approximation des Gebietes ist in Abb. 5 dargestellt.

Ausgehend von der tiefsten Station werden für je 50 m Höhendifferenz Höhenschichtlinien gezeigt. Zusätzlich sind die bei den Modellsimulationen verwendeten Stationsnumerierungen in die Abb. 5 eingetragen. Die wichtigen orographischen Charakteristiken gehen aus der Abbildung deutlich hervor. Problematisch ist nur die Darstellung des Rheintals an den Engstellen bei Stein/Laufenburg (etwa bei Station 72 bis 76). Bedingt durch die Mittelung über den 3 km-Raster ergibt sich hier ein leichtes Gefälle des Talbodens in Richtung Ost.

Modellverifikation

Ein mathematisches Modell der planetaren Grenzschicht ist nur dann brauchbar, wenn es das beobachtete und gemessene Wettergeschehen reproduzieren kann. Im einfachsten Fall bedeutet das, dass das Modell aus feinaerologischen Sondierungen erhaltene Temperatur-, Wind- und Feuchteprofile ausgehend von vorgegebenen Anfangsprofilen zu reproduzieren vermag. Dies sei am Beispiel von Temperaturprofilen auf Abb. 6 gezeigt. Das Modell wurde mit einer am 22. 6. 1976 um 10.00 h gemachten Sondierung gestartet, 16 Stunden später zeigt der Vergleich auf Abb. 6 eine gute Übereinstimmung zwischen gerechneten und gemessenen Temperaturprofilen. Obige Resultate stammen aus einer eindimensionalen Rechnung, d. h. es wird eine horizontal homogene planetare Grenzschicht vorausgesetzt. Problematisch wird ein Vergleich zwischen Beobachtung und Rechnung, wenn die reale planetare Grenzschicht betrachtet wird, die unter dem Einfluss ausgeprägter Orographie, stark veränderlicher physikalischer Eigenschaften der Bodengrenzfläche sowie der Einwirkung synoptischer Wetterbedingungen horizontal inhomogen ist und eine dreidimensionale, zeitabhängige Simulation erfordert.

Auf den Abb. 7 und 8 ist der Vergleich des berechneten Temperatur- bzw. Windfeldes

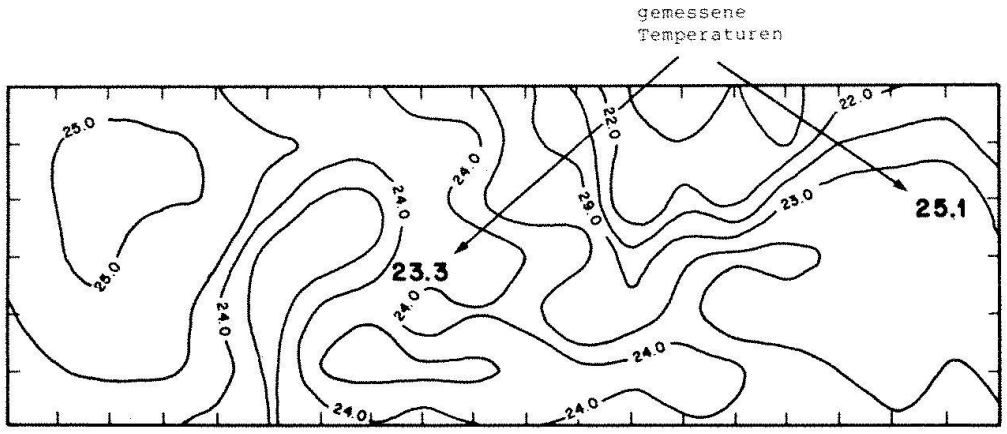


Abb. 8. Berechnetes Windfeld 8 m über Boden und Vergleich mit gemessenen Winden 10 m über Boden (23.6.1976, 10.00 h). Die dünnen Pfeile entsprechen berechneten, die fetten Pfeile gemessenen Windvektoren.

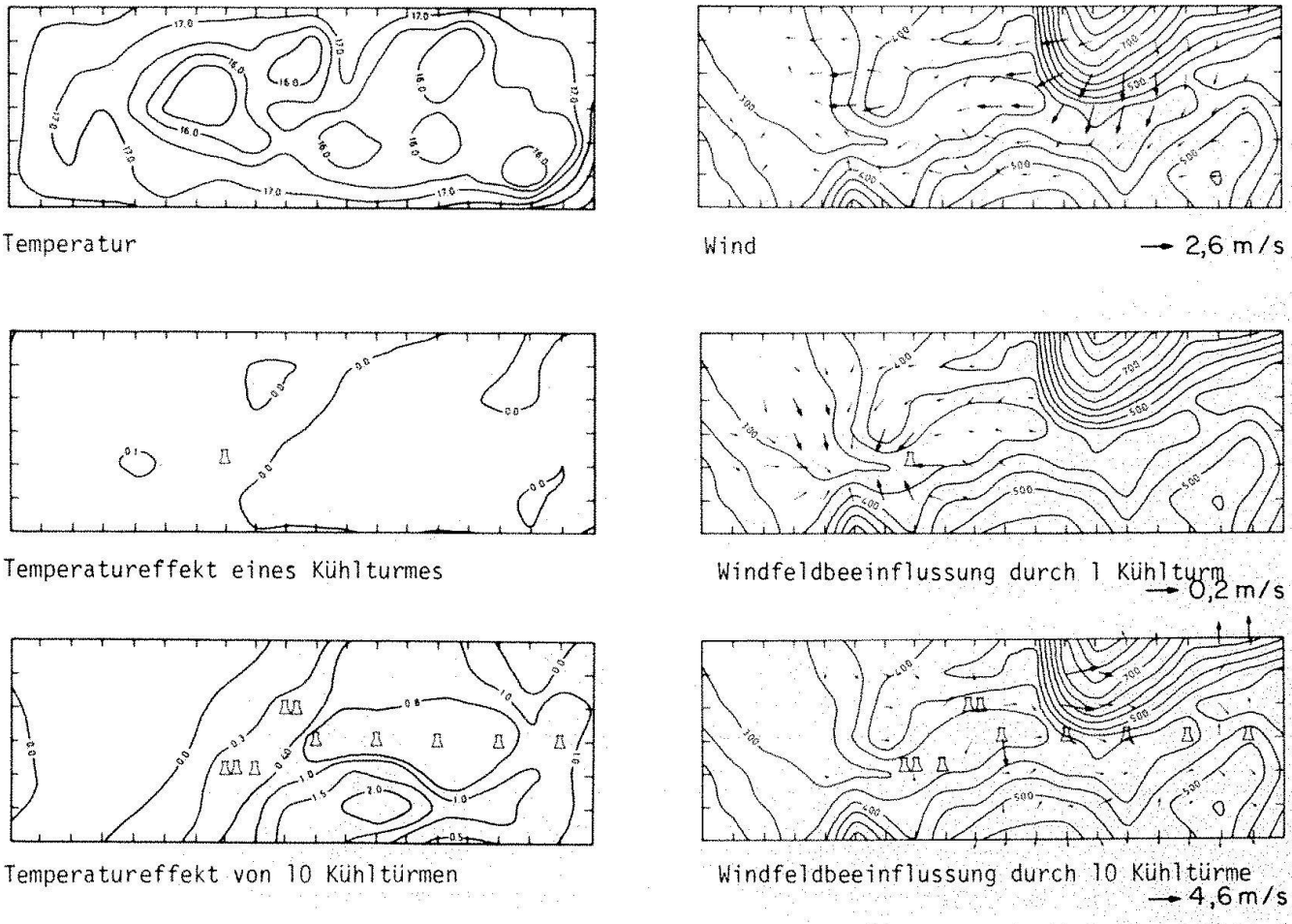


Abb. 9. Sommerliche Hochdrucklage, 22.-26. Juni 1976. Temperatur- und Windfeld am Tag, 8 m über Boden. Anthropogene Wärmequellen sind Trockenkühltürme mit je 2×10^9 W Leistungsabgabe. Die Auswirkung des Kühlturmbetriebes ist als Temperaturdifferenz bzw. Vektordifferenz des Windfeldes gegenüber dem Istzustand angegeben.

im 8 m-Niveau für den 23. 6. 1976, 10.00 h gezeigt. Um das berechnete Temperaturfeld zu vergleichen, sind zum Beispiel nur zwei Messwerte im ganzen Gebiet vorhanden. Das berechnete Windfeld kann im 8 m-Niveau noch mit 6 Beobachtungsstationen im 10 m-Niveau verglichen werden, für höhere Niveaus (h > 100 m) sind, ähnlich wie bei der Temperatur, nur ein oder höchstens zwei Messwerte vorhanden. Ein Vergleich der berechneten Felder mit der Natur kann also nur beschränkt durchgeführt werden. Die Modellresultate (die natürlich am Standort von Sondierungen mit den Messwerten übereinstimmen müssen) können dann als eine physikalische konsistente räumliche und zeitliche Extrapolation der Messungen aufgefasst werden, das mathematische Modell stellt die Extrapolationsvorschrift dar.

Anthropogene Beeinflussung von Wetterlagen

Das Erscheinungsbild einzelner Kühlturmschwaden, deren zeitliche Änderungen sowie die Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung um den Standort wurden mit dem in Abschnitt 3 dargestellten Schwadenmodell untersucht. Ein ausführliches Beispiel einer derartigen Untersuchung für die von Dütsch (1984) ausführlich diskutierte winterliche Hochdrucklage wird von Gassmann, Tinguely und Haschke (1982) dargestellt. Auf den Abbildungen 9, 10 und 11 sind Resultate von Untersuchungen über die mesoskalige Auswirkung von Kühltürmen, wie sie mit dem planetaren Grenzschichtmodell erhalten werden, dargestellt. Die oberen Figuren jeder Abbildung zeigen das berechnete Tem-

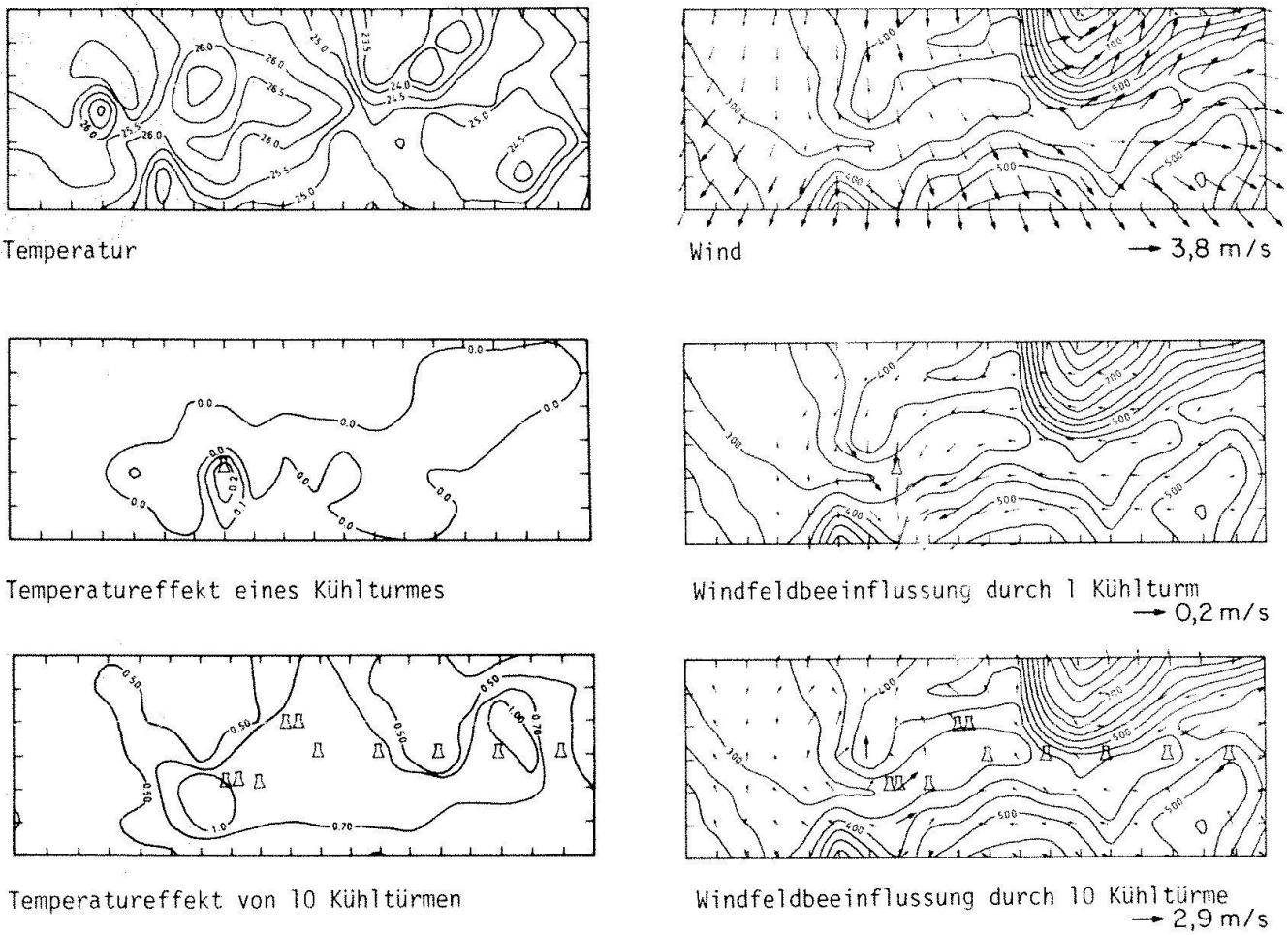


Abb. 10. Sommerliche Hochdrucklage, 22.–26. Juni 1976. Nächtliches Temperatur- und Windfeld 8 m über Boden. Anthropogene Wärmequellen sind Trockenkühltürme mit je 2×10^9 W Leistungsabgabe. Die Auswirkung des Kühlturmbetriebes ist als Temperaturdifferenz bzw. Vektordifferenz des Windfeldes gegenüber dem Istzustand angegeben.

peratur- und Windfeld des Istzustandes und 8 m über Bodenniveau. Die mittleren beiden Figuren geben die durch den Betrieb eines Trockenkühlturmes mit einer Leistung von 2×10^9W bewirkten Veränderungen des Temperatur- bzw. Windfeldes gegenüber dem Istzustand. Die unterste Figurenreihe zeigt als Resultat einer Parameteruntersuchung die Auswirkungen von 10 Trockenkühltürmen mit einer Leistung von je 2×10^9W an 8 hypothetischen Standorten auf das Temperatur- und Windfeld.

Auf Abb. 9 ist der Istzustand des voll ausgebildeten Wind- und Temperaturfeldes am Tage während der bereits erwähnten sommerlichen Hochdrucklage wiedergegeben (23.6.1976, 16.00 h). Sowohl Windsystem als auch Temperaturfeld sind stark durch die lokale Orographie bestimmt. Das Temperaturfeld zeigt kältere Höhenrücken und einen wärmeren Talgrund, das Windsystem ist im wesentlichen ein Talwindsystem mit der Besonderheit, dass es in etwa in einen N-S-Ast und einen W-O-Ast zerfällt, was durch das Abbiegen des Rheintals in Richtung N bei Basel zu verstehen ist.

Der Einfluss eines Trockenkühlturmes auf das Temperaturfeld lässt einen Nahbereich erkennen, der sich etwa 3 - 6 km um den Kühlturm befindet und Temperaturänderungen von etwa 0,3 K aufweist. Ausserhalb des Nahbereiches entstehen grossräumige Störungen des Temperaturfeldes von einigen 10^{-2} bis 10^{-3} K, die als Ausgleichsvorgänge auf die lokale Störung zu interpretieren sind. Die Lage des Nahbereiches relativ zum Kühlturm ist von der jeweiligen Windrichtung (Advektionsrichtung) abhängig.

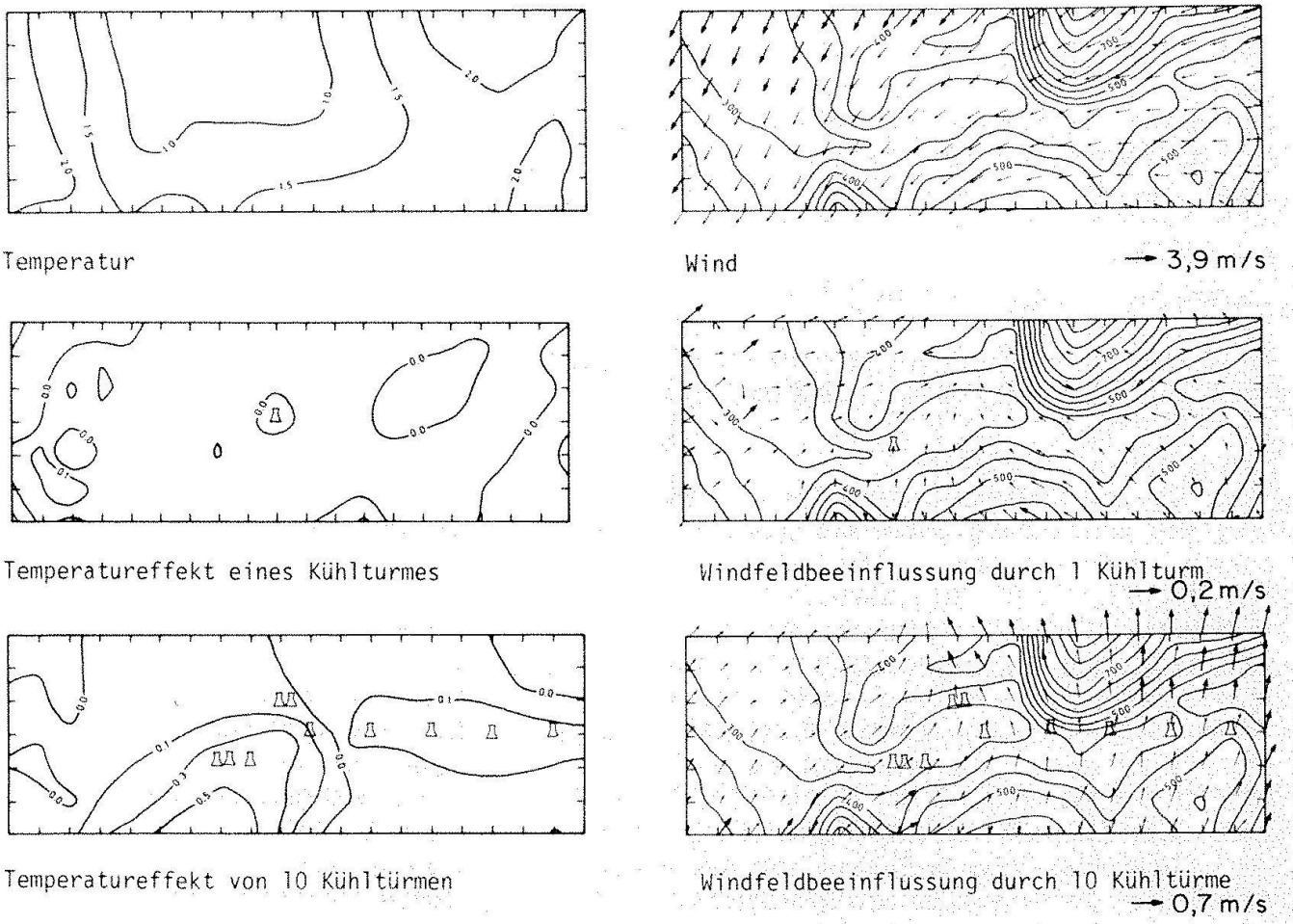


Abb. 11. Winterliche Hochdrucklage, 18.-21. Dezember 1977. Temperatur- und Windfeld am Tag, 8 m über Boden. Anthropogene Wärmequellen sind Trockenkühltürme mit je 2×10^9 W Leistungsabgabe. Die Auswirkung des Kühlturmbetriebes ist als Temperaturdifferenz bzw. Vektordifferenz des Windfeldes gegenüber dem Istzustand angegeben.

Deutlich zeigt sich der Einfluss des Trockenkühlturmes auf das Bodenwindfeld durch die Bildung von Konvergenzgebieten im Bereich des Kühlturmes, wobei durch den Kühlturmbetrieb hervorgerufene Effekte von etwa 20 - 30 cm/s auftreten.

Die durch den Betrieb von 10 Kühltürmen verursachten Temperatureffekte sind in der Grössenordnung von 0,5 - 1,0 K und umfassen Gebiete von der Grössenordnung von einigen 10 km. Die Grössenordnung dieses Temperatureffektes und das davon betroffene Gebiet sind so, dass sie als klimatologisch relevante anthropogene Erwärmung bewertet werden müssten und sicher nicht vernachlässigt werden können. Durch die Kühltürme bewirkte Änderungen des Windfeldes sind in gleicher Grössenordnung wie das Windfeld des Istzustandes, also auch hier muss von einer klimatologisch relevanten anthropogenen Veränderung gesprochen werden.

Abb. 10 zeigt die bodennahen Verhältnisse bei der gleichen sommerlichen Hochdrucklage in der Nacht (23. 6. 1976, 4.00 h). Das berechnete Temperaturfeld zeigt geringfügig wärmere Höhenrücken und kühlere Talböden, wie es konsistent mit dem berechneten Bergwindsystem ist. Bemerkenswert ist der praktisch vernachlässigbare bodennahe Temperatureffekt eines Trockenkühlturmes zu diesem Zeitpunkt, was auf die stabile Schichtung der Bodennähe (wegen der nächtlichen Ausstrahlung) zurückzuführen ist. Diese behindert die vertikale Durchmischung und «schirmt» so die bodennahen Luftschichten von der überhöhten Wärmequelle ab. Von Haschke (1983) wurde der Einfluss eines Trockenkühlturmes über eine 24 h-

Periode berechnet und gezeigt, dass die nächtlichen Effekte eines Einzelkühlturmes unter gewissen Umständen aber auch grösser sein können als jene am Tag. Demgegenüber sind die nächtlichen Temperatureffekte, die durch den Betrieb von 10 Trockenkühltürmen hervorgerufen werden, beträchtlich. Hier kann sich die nächtliche Strahlungsinversion nicht ungehindert ausbilden, so dass die Temperatureffekte der Kühltürme gut messbare Grössenordnungen annehmen. Auch das nächtliche Bergwindsystem wird wesentlich gestört und praktisch von einem anthropogenen überlagert.

Abb. 11 zeigt in bereits gewohnter Darstellung die bodennahen Kühlturmeffekte bei einer winterlichen Hochdrucklage (18.12.1977, 23.00 h). Das bodennahe Windsystem des Istzustandes wird durch Advektion aus dem Schweizerischen Mittelland erzeugt (Dütsch, 1984) und dem Modell durch Vorgabe entsprechender Randbedingungen mitgeteilt. Dementsprechend stellt sich ein Temperaturfeld ein, das keine orographische Einflüsse erkennen lässt. Da die Atmosphäre bei dieser Wetterlage sehr stabil geschichtet ist, vertikaler Energieaustausch also stark behindert ist, sind die Temperatureffekte bei Betrieb eines bzw. von 10 Kühltürmen kleiner als in den vorhergehenden Beispielen. Der Transport des durch die Kühltürme in die Atmosphäre eingeleiteten Energieflusses erfolgt im wesentlichen durch Advektion in den Luftschichten in Quellhöhe. Konvektion ist ebenfalls unmöglich wegen der vorhandenen starken Höheninversion (Dütsch, 1984). Auch die Auswirkungen auf das Windsystem sind kleiner als in den vorhergehenden Beispielen, da die Energieabgabe durch den Kühlturm nicht in die von aussen aufgezwungene Advektion eingreifen kann.

Die von Dütsch (1984) dargestellte komplizierte Physik der winterlichen Hochdrucklage, insbesondere das Zusammenspiel zwischen Kaltluftsee über dem Mittelland, darüberliegender warmer Luft, die durch grossräumige Advektion aus S bis SW herangeführt wird, sowie lokaler Orographie kann mit dem Grenzschichtmodell in seinem jetzigen Entwicklungsstand nur beschränkt nachgebildet werden. Künftige Modellierungsarbeiten dieses Falles müssten einerseits den südlichen Rand des Modellierungsperimeters weiter in das Schweizerische Mittelland verschieben, um insbesondere den Jurakamm voll berücksichtigen zu können, andererseits müssten die Strahlungsströme und deren Wechselwirkung mit Dunst bzw. Nebel genauer und damit auch aufwendiger als bisher berechnet werden.

Symbole

C	=	spezifische Wärme für Wasser oder Eis
$C_p^{a,v}$	=	spezifische Wärme bei konstantem Druck für trockene Luft, Wasserdampf
C_L	=	Kondensationsrate
D	=	Koeffizient für turbulente Diffusion von Wasserdampf
f	=	Coriolisparameter
G	=	Kern der Faltung
g	=	Erdbeschleunigung
K_m, K_s	=	Diffusionskoeffizienten
L_e	=	spezifische Verdampfungswärme
L_s	=	spezifische Sublimationswärme
M	=	Molekulargewicht
m	=	Masse im Paket
Q^{cl}	=	Mischungsverhältnis für Cloud Water
Δq	=	durch Schwaden hervorgerufene Veränderung der Wasserdampfdichte
R^a	=	Gaskonstante pro Molekulargewicht von trockener Luft
R_o	=	Kühlturm-Austrittsradius
r_c	=	charakteristischer Radius
s	=	Weg auf der Schwadenmittellinie
t	=	Zeit
T	=	Temperatur
T_v	=	virtuelle Temperatur
u, v, w	=	Windgeschwindigkeit (x, y, z-Komponente)
u_g, v_g	=	x, y-Komponenten des geostrophischen Windes
v_a	=	Vermischungs-Geschwindigkeit zufolge atmosphärischer Turbulenz
v_h	=	Vektor des horizontalen Windes
v_d	=	Detrainment-Geschwindigkeit
v_{en}	=	Entrainment-Geschwindigkeit
w	=	Vertikalgeschwindigkeit des Paketes
X_s	=	Sättigungs-Mischungsverhältnis von Dampf über Wasser, Eis
x, X	=	Koordinate in Windrichtung; Mischungsverhältnis
z	=	Vertikalkoordinate
α	=	Entrainment-Parameter für «vertical stage»

γ = Entrainment-Parameter für «bent over stage»

δ = Entrainment-Parameter für atmosphärische Turbulenz

Λ = charakteristische Mischungslänge für atmosphärische Turbulenz

ρ = Dichte

σ = Standard-Abweichung bei Gauss-Verteilung

μ = Vermischungs-Parameter

ζ = Winkel zwischen der Vertikalen und der Schwadenachse (Modell FOG)

ξ, η, ζ = relative Koordinaten (Grenzschichtmodell)

Spezielle Abkürzungen

$\Lambda_1 .. \Lambda_4$, E = Abkürzungen komplizierter Ausdrücke (Gassmann und Tinguely 1982)

Indices rechts oben:

a = trockene Luft (air)

cl = Wolkenwasser (cloud water)

i = Eis (ice)

v = Wasserdampf (vapour)

w = Wasser (water)

' = Abweichung vom Mittelwert (Schwankungsgrösse)

Indices rechts unten:

e = Umgebung (environment, FOG), Energie (Grenzschichtmodell)

en = Beimischung (entrainment)

d = Abgabe von Schwadenluft an die Umgebung (detrainment)

m = Impuls momentum

p = Paket (parcel)

s = Sättigung (saturation)

v = virtuell (virtual)

Literatur

CLIMOD, 1981: Möglichkeiten Regionaler Klimaveränderungen durch menschliche Einwirkungen, Schlussbericht über das Projekt CLIMOD, Bern.

Dütsch, H. U. 1984: CLIMOD: Thematik und Feldexperimente. Dieser Band, Seite 52.

Gassmann, F. et al., 1976: Messungen an Kühlturmfahnen, mathematische Simulation und Bedeutung von Messungen, Jül 1250 (Teil 1) und EIR-Bericht Nr. 295.

Gassmann, F. 1980: Untersuchungen zur Turbulenztheorie am Beispiel des rotationssymmetrischen Freistrahles, Diss. ETH Nr. 6772.

Gassmann, F., Tinguely, M. 1982: In: Vergleich von Schwadensimulationsrechnungen mit Beobachtungen am KKW Philippsburg I, EIR interner Bericht TM-34-82-3.

Gassmann, F, Tinguely, M., Haschke, D. 1982: Calculs de Panaches de Tours de Refroidissement pour des Situations de Haute Pression Hivernales, EIR-Bericht Nr. 475.

Haschke, D. 1983: Die Simulation des zeitlichen Ablaufes regionaler Wetterlagen mit einem mathematischen Modell der planetaren Grenzschicht, Diss. ETH Nr. 7251.

Jacobs, C. A., Pandolfo, J. P. and Atwater, M. A. 1975: A Description of a General Three Dimensional Numerical Simulation Model of a Coupled Air-water and/or Air-land Boundary Layer, IFYGL final report, CEM Report No. 5131-509a.

Molenkamp, C. R., 1968: Accuracy of Finite Difference Methods Applied to the Advection Equation. J. Appl. Meteorol. 7, p. 160.

Orville, H. D., 1968: Grid Interval Effects on a Numerical Model of Upslope Winds and Mountain-Induced Cummulus. J. Atm. Sci. 25, p. 1164.

Dr. Dieter Haschke
Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung
CH-5303 Würenlingen