

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:	CLIMOD : Thematik und Feldexperiment
Autor:	Dütsch, Hans-Ulrich
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-90907

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: 03.02.2026

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

CLIMOD: Thematik und Feldexperiment

Hans-Ulrich Dütsch

Zusammenfassung

Die Untersuchungen über die Möglichkeit einer Klimaänderung (CLIMOD) im Raum Basel als Folge des Betriebs einiger luftgekühlter Grosskraftwerke im Hoch- und im Oberrheintal wurde auf winterlichen Hochdrucklagen konzentriert, da anthropogene Eingriffe bei dieser Situation am stärksten ins Gewicht fallen. Es wurde eine Kombination von Feldversuch und Modellierung eingesetzt. Die Feldversuche zeigten, dass die Strömung im kritischen Niveau (200 – 400 m über Talboden) nicht dem Rheinlauf folgt, sondern diesen oberhalb Möhlin mit für Hochdrucksituationen ungewöhnlich hohen Geschwindigkeiten schräg überquert (Möhlinjet). Zwischen linker (westlicher) und rechter Seite dieser Starkströmung bestehen eine durch dynamische Prozesse verursachte Temperaturdifferenz von 4 – 8 °C und entsprechende Unterschiede in der relativen Feuchtigkeit, welche die vorteilhafte Beson-

nung der Region Basel bei solchen Lagen bewirken (Nebelarmut). Die beobachtete Strömung und die mit ihr verbundenen Wettereinflüsse werden durch den Ausfluss von Kaltluft aus dem schweizerischen Mittelland durch die tiefstliegende Öffnung dieses Beckens erzeugt; dieser Ausfluss ist Bestandteil der mit den Antizyklonen verbundenen dynamischen Prozesse im synoptischen Massstab und ist damit gegen regionale anthropogene Einflüsse unempfindlich.

Résumé

Le projet «CLIMOD» doit estimer les modifications possibles du climat bâlois à la suite de la mise en exploitation de plusieurs centrales nucléaires refroidies par des tours dans la vallée du Haut-Rhin en amont de Bâle. Ces recherches ont été limitées aux situations hivernales anticycloniques puisque celles-ci donnent lieu aux plus fortes répercussions

Vogesen

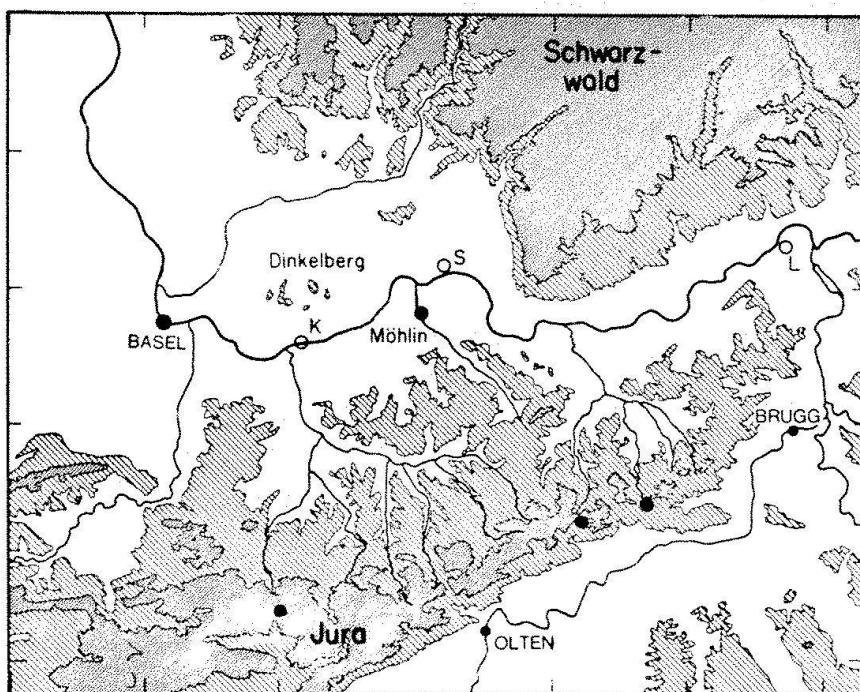


Abb. 1. Topographie des Hochrheintals und seiner Umgebung. o: geplante, im Bau oder in Betrieb befindliche luftgekühlte Grosskraftwerke im Hochrheintal.

des activités humaines sur le climat. On s'est basé sur des mesures dans le terrain et sur une modélisation physique et mathématique des processus atmosphériques. Les mesures montrent qu'entre 200 et 400 m au-dessus du sol, le courant ne longe pas la vallée mais franchit celle-ci obliquement du sud-est au nord-ouest en amont de Moehlin en présentant des vitesses inattendues, vu qu'il s'agit de situations anticycloniques. Entre l'ouest et l'est de ce courant, on observe des différences de température de 4 à 8 degrés et des différences correspondantes de l'humidité relative. Cela explique la rareté du brouillard et l'insolation relativement abondante de Bâle. Le dit courant semble provenir du lac d'air froid situé sur le Plateau. Il atteint la région considérée après avoir franchi une partie basse du Jura. Comme il est engendré par la situation synoptique, il ne réagit guère aux influences anthropogènes.

Einleitung

Dem Projekt «CLIMOD» (Klimamodifikation) war die Aufgabe gestellt, die Möglichkeit der Veränderung der regionalen Klimaverhältnisse im Grossraum Basel (siehe Abb. 1) durch anthropogene Einflüsse, speziell durch eine Anzahl thermischer (nuklearer) Grosskraftwerke mit atmosphärischer Kühlung, aber auch durch den Stadteinfluss abzuklären. Diese Fragestellung bedeutet, dass in erster Linie die Eigenschaften der planetaren Grenzschicht der Region untersucht werden müssen, wobei ein möglichst gutes Verständnis der sich dort abspielenden physikalischen Vorgänge erreicht werden soll. Dabei spielen die spezifischen topographischen Ge-

gebenheiten der Region eine bedeutsame Rolle, z. B. waren die Unterschiede gegenüber dem schweizerischen Mittelland in Betracht zu ziehen.

Die Untersuchung der letztgenannten Frage kann nicht einfach auf Grund klimatologischer Mittelwerte (Temperatur, Niederschlag, Wind, Sonnenschein etc.) erfolgen, sondern muss nach Wetterlagen getrennt ausgeführt werden, da nur so ein Einblick in die physikalischen Mechanismen erlangt werden kann, welche die klimatologischen Unterschiede zwischen den Regionen bedingt. Ein solches Verständnis ist aber zur Abklärung möglicher anthropogener Einflüsse notwendig.

Eine menschliche Einwirkung kann ohnehin nur in bezug auf einzelne Wetterlagen abgeklärt werden, da die Verdünnung der Emissionen – seien es Wärme oder Wasserdampf eines Kühlturms, oder eigentliche Schadstoffe aus Industrie, Verkehr und Heizung – und damit die Reduktion ihrer Wirksamkeit vor allem von der Windstärke und der vertikalen Durchmischung abhängig ist, die für unterschiedliche Wetterlagen sehr verschieden sind, anderseits aber auch beträchtlich von der Topographie beeinflusst werden; letzteres gilt besonders auch für die horizontale Ausbreitung senkrecht zur mittleren Windrichtung (mögliche Kanalisierungseffekte).

Topographische Gegebenheiten

Bei Basel biegt das relativ schmale Hochrheintal mit einem scharfen, rechtwinkligen Knick in die breite, zwischen Vogesen und Schwarzwald verlaufende Ebene des Ober-

Tab. 1. Typische regionale Wetterlagen (synoptische Definition)

TRW	mittlere Häufigkeit (%) 1955-79	regionale Windrichtung 850 mb
a, Hochdrucklage, Winter	11.0	variabel und schwach
a, Hochdrucklage, Sommer	8.8	variabel und schwach
b Flachdrucklage	9.1	variabel und schwach
c Westlagen	10.3	W
d Ostlagen (Bise)	13.0	E, NE
e Nordlagen	14.6	NW, N
f Südlagen (Föhn)	15.6	S, SW, (SE)
u Übergangslagen	12.4	-
x keine Zuordnung	5.2	-

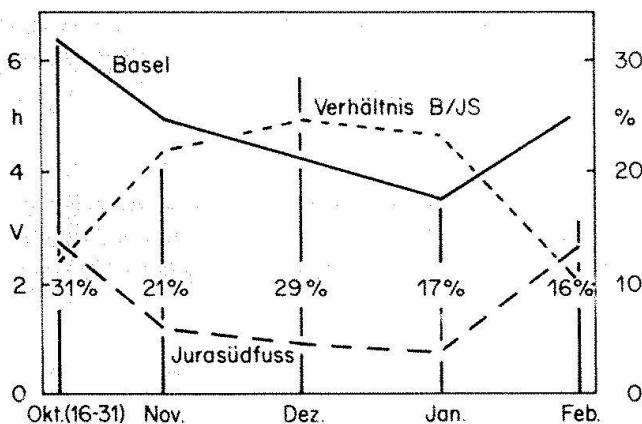


Abb. 2. Der Sonnenscheinreichtum der Region Basel bei winterlichen Hochdrucklagen. Zahl der sonnigen Stunden pro Hochdrucktag in Basel, resp. Jurasüdfuss (Mittel aus Neuchâtel, Koppigen, Olten und Schaffhausen); Verhältnis Basel : Jurasüdfuss; Skala auf der linken Ordinatenachse; Vertikale Säulen: Hochdrucktage in % der Gesamtzeit (Skala auf der rechten Koordinatenachse).

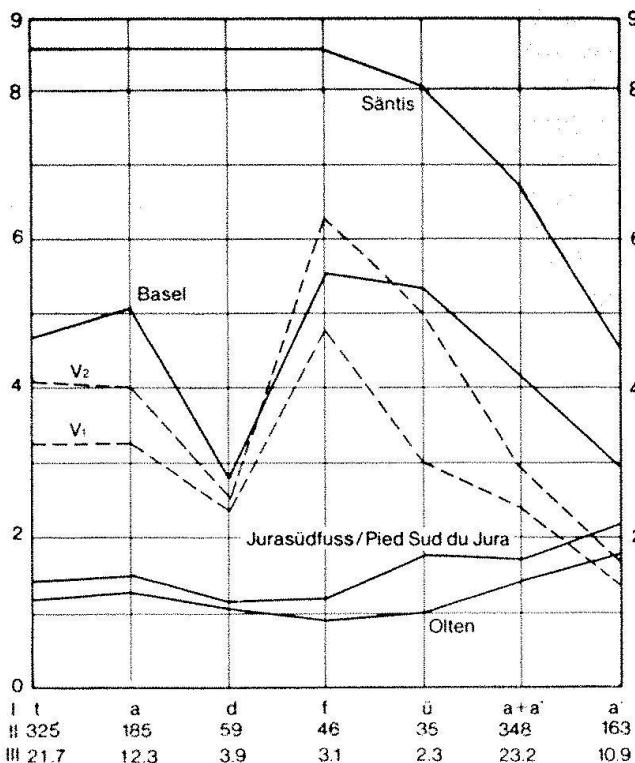


Abb. 3. Vergleich der Sonnenscheindauer pro Tag für Säntis, Basel, Jurasüdfuss (Def. siehe Abb. 2) und Olten während winterlicher Hochdrucklagen (Mittel Mitte Oktober - Ende Februar) aufgeteilt nach einzelnen TRW. t: alle Lagen, welche das nicht-synoptische Kriterium erfüllen, davon a: TRW a (winterliche Hochdrucklage), d: TRW d (Ostlage), f: Südlage, ü: alle übrigen. a': Hochdrucklagen nach HBP, welche die regionalen Kriterien nicht erfüllen; a + a': alle synoptischen Hochdrucklagen nach HBP.

II: Zahl der entsprechenden Tage in den 11 Wintern 1969/70 - 79/80

III: In Prozent aller Tage im betreffenden Zeitraum.
V₁: Verhältnis Basel / Jurasüdfuss; V₂: Basel / Olten.

rheintals um. Der das Hochrheintal im Süden begrenzende Jurakamm verliert von West nach Ost kontinuierlich an Höhe, bis die Aare seine Ausläufer durchbricht. Gleichzeitig nimmt sein durch den von Seitentälern durchschnittenen Tafeljura eingenommener Abstand vom Rhein ab. Der massive Schwarzwald im Norden stösst mit dem Ausläufer Eggberg bei Säckingen bis hart an den Rhein vor, wodurch eine für die regionalen Strömungsverhältnisse offenbar bedeutungsvolle Barrierenwirkung entsteht; nach Westen erstreckt sich der Dinkelberg als ein den Rhein begleitender relativ niedriger Ausläufer. Westlich von Basel bildet die weite burgundische Pforte zwischen Jura und Vogesen den gegenüber dem Rheintal nur geringfügig überhöhten Übergang in das offene Gelände Frankreichs.

Wetterlagen

Wetterlagen werden vom Meteorologen normalerweise nach grossräumigen synoptischen Kriterien definiert. Es scheint aber zum vornherein wenig sinnvoll, diese in einer Region, deren Wetterablauf stark durch die topographischen Gegebenheiten beeinflusst ist, in die rund 30 Typen nach Hess-Brezowsky-Perret aufzusplittieren, die in ihrer regionalen Auswirkung sich einerseits stark über-

schneiden, anderseits aber doch nicht einheitlich sind. Ähnliches gilt für die Alpenwetter-Statistik nach Schuepp-Wanner.

Eine Zusammenfassung von Hess-Brezowsky-Lagen in 7 typische regionale Wetterlagen (TRW) anhand der regionalen 850 mb Strömung, wie sie in der CLIMOD-Studie versucht wurde (Tab. 1), konnte letzten Endes auch nicht voll befriedigen. Es erwies sich als angezeigt, die für die vorliegende Fragestellung relevantesten Wetterlage, nämlich die winterliche Hochdrucklage im westlichen durch regionale Parameter zu definieren, wobei der Begriff Region allerdings grossräumiger gefasst wurde, indem er sich auf die ganze Alpennordseite bezog. Die gewählten Bedingungen sind:

Sonnenscheindauer Säntis \geq 6 Stunden,
Inversion in der Mittagssondierung von
Payerne $\geq 4^\circ \text{C}$,
kein Niederschlag auf der Alpennordseite bis
zum Abend.

Die begleitende synoptische Bedingung:
Schweiz im Bereich eines Hochdruckgebietes
oder eines Hochdruckausläufers hatte kaum
mehr zusätzlich selektiven Charakter.

Wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird, war
die Auswahl der Tage mit für die Region Basel
typischem Hochdruckwetter durch diese
Definition beträchtlich besser gegeben als
durch die TRW a₁, obschon keiner der Para-
meter auf Beobachtungen im Raume Basel
basiert.

Da die zeitlich begrenzten Untersuchungen
in der Folge weitgehend auf die winterliche
Hochdrucklage beschränkt wurden (die som-
merlichen Feldexperimente bezogen sich auf
Untersuchungen am Kühlurm Gösgen), unterblieb
der Versuch auch andere Lagen – z.B. sommerliche
Hochdrucklagen oder konvektive Lagen – auf ähnlicher, nicht-
synoptischer Basis zu definieren. Es müsste
noch gezeigt werden, ob es möglich wäre,
den Witterungskalender einigermassen um-
fassend und eindeutig mit solchen vor allem
auf den regionalen Witterungscharakter
basierenden Definitionen zu erfassen.

Die winterliche Hochdrucklage

Bei dieser Lage ist aus verschiedenen Grün-
den ein anthropogener Einfluss auf den re-
gionalen Wetterablauf, speziell auf die Ström-
ungsverhältnisse am ehesten denkbar. Ein-
mal kommt bei der im Winter stark reduzier-
ten Einstrahlung der anthropogenen Wär-
meemission eine verstärkte relative Bedeu-
tung zu. Vor allem aber sind die Hochdruck-
lagen windschwach und durch Ausbildung
einer häufig nur wenige 100 m über dem Bo-
den liegenden Inversion gekennzeichnet, so-
dass die Emissionen sich auf ein wesentlich
kleineres Luftvolumen verteilen als bei ande-
ren Situationen, was zu höheren Schadstoff-
konzentrationen und entsprechenden Immis-
sionen führt; strömungsaktive Veränderun-
gen des Temperaturfeldes oder Nebelbildung

durch die Auswirkung von Kühlürmen sind
in diesem Fall am ehesten denkbar.

Für die Region Basel war die Untersuchung
dieser speziellen Lage auch deshalb von be-
sonderem Interesse, weil sie ihr gegenüber
dem schweizerischen Mittelland eine ausge-
prägte Bevorzugung bringt; in den «dunkeln» Monaten November – Januar ist die
mittlere Sonnenscheindauer bei solchen Wet-
terlagen in Basel mindestens viermal grösser
als am direkten Jurasüdfuss (siehe Abb. 2).
Nebel- oder Hochnebelbildung, für diese
Lage am Jurasüdfuss typisch, ist bei Basel
viel seltener. Es bestand die Befürchtung,
dass diese Bevorzugung durch den Bau eini-
ger thermischer Grosskraftwerke verloren
gehen könnte.

Aus den angeführten Gründen wurden die
Untersuchungen auf die winterliche Hoch-
drucklage konzentriert, während man sich
bei den übrigen mit einer knapperen klimato-
logischen Beschreibung begnügen konnte.
Interessanterweise erscheint die Bevorzu-
gung, wie Abb. 3 zeigt, viel deutlicher, wenn
an Stelle der synoptischen Hochdrucklagen-
definition, die im vorigen Abschnitt be-
schriebene regionale Definition verwendet
wird. Zwar müssen in der elfjährigen Testpe-
riode (1969/70 – 1979/80) gut 160 der 348
synoptisch festgelegten Hochdrucklagen,
d.h. fast die Hälfte, aus der Untersuchung
wegelassen werden; sie werden aber durch
140 andere nahezu ersetzt; diese verteilen
sich, wie in Abb. 3 gezeigt wird, auf verschie-
dene synoptische Lagen (TRW). An diesen
Tagen ist die sonnenmässige Bevorzugung
der Region Basel ähnlich gross wie bei den
synoptischen Hochdrucklagen, welche das
regionale Kriterium erfüllen, während sie an
den fallengelassenen Tagen auf 60% ab-
sinkt. Die einzige Ausnahme sind die Ost-
(Bisen-)Lagen, eine Tatsache, welche durch
die Ergebnisse der in folgenden dargestellten
Untersuchungen verständlich wird (siehe
drittletzter Abschnitt).

Das Untersuchungsdispositiv

a) Allgemeines

Voraussagen über eine mögliche Beeinträch-
tigung des Sonnenscheinreichtums der win-

terlichen Hochdrucklagen im Raume Basel können nur gemacht werden, wenn die atmosphärischen Vorgänge, die ihm zu Grunde liegen, einigermassen verstanden werden. Zu ihrer Abklärung wurde eine Kombination von Feldversuchen und Modelluntersuchungen (numerisch und physikalisch) eingesetzt. An dieser Stelle sollen nur die Durchführung und die Resultate der ersten diskutiert werden.

immerhin seien noch folgende allgemeine Bemerkungen angefügt: Wegen des Zeitdrucks, unter dem die Untersuchung stand, wurden Feldversuche und Modellierung parallel zueinander durchgeführt, ein Vorgehen, das wie sich gezeigt hat, nicht sehr optimal ist. Resultate des Feldversuchs sollten für eine effektive Ausnutzung der Mittel als Ausgangsmaterial für eine Modellierung bereits zur Verfügung stehen – speziell im Hinblick auf Randbedingungen am Boden, an den seitlichen Begrenzungen und am Übergang in die freie Atmosphäre. Ebenso ist eine direkte Bestimmung turbulenter Flüsse verschiedener Grössen sehr erwünscht. Anderseits dienen die Beobachtungsergebnisse auch zur Überprüfung der Modellresultate im Inneren des Untersuchungsbereichs, sowie speziell des zeitlichen Ablaufs der Simulation.

Die Modellierung hat einen doppelten Sinn: Sie soll einmal zu einem besseren Verständnis der beobachteten Vorgänge beitragen, wobei Parametervariation eine Rolle spielen kann. Unter Umständen kann sich aus den Ergebnissen der Modellierung die Durchführung eines modifizierten Feldprogrammes aufdrängen; aus Kostengründen wird eine solche an sich sehr wünschenswerte Rückkoppelung allerdings meist nicht möglich sein. Anderseits kann die Modellierung, wenn das Modell an der Gegenwart gut «geeicht» ist, zur Prognostizierung der Auswirkung künftiger menschlicher Eingriffe dienen, eine Anwendung, die im CLIMOD-Projekt im Vordergrund stand.

b) Feldversuche

Das Feldprogramm stützte sich auf die Zusammenarbeit einer grösseren Anzahl von Forschergruppen mit folgendem Instrumentarium:

LAPETH¹⁾): Koordination; Constant Level Ballone

SMA/SPA²⁾ Payerne und SEDE Vevey: 2 instrumentierte stationäre Fesselballone und Constant Level Ballone

EIR³⁾, Gruppe Energie und Umwelt: Instrumentierter Motorsegler (in Zusammenarbeit mit dem Institut für Leichtbau und Seilbahntechnik der ETH), instrumentierter mobiler Fesselballon, Constant Level Ballone

GIUB⁴⁾: Satellitenbildauswertung, Messwagenfahrten, Messflüge mit Motorflugzeug

AMB⁵⁾/SMA: 3 zusätzliche selbstregistrierende Meteostationen auf dem Jurakamm; Messwagenfahrten; einzelne Beobachtungsflüge.

1) Laboratorium für Atmosphärenphysik ETH

2) Schweizerische Meteorologische Anstalt/Section Protection de l'Air

3) Eidg. Institut für Reaktorforschung

4) Geographisches Institut Universität Bern

5) Abteilung Meteorologie Basel

Neben den Daten des normalen meteorologischen Klimastationsnetzes der Region Basel standen auch die Messungen der Meteotürme Kaiseraugst und Schwörstadt sowie Leibstadt zur Verfügung.

Infolge der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit und der begrenzten Mittel mussten der personalintensivste und, wie es sich zeigte sollte, zentrale Teil des Experimentes, nämlich der Einsatz der Constant Level Ballone zur direkten Bestimmung des Strömungsfeldes auf einen kleinen Teil des Untersuchungsgebietes beschränkt werden. Die Satellitenbildauswertung (Abb. 4) hatte – die den Anwohnern längst bekannte Tatsache – deutlich gemacht, dass die Grenze zwischen dem Nebel des Mittellandes und der nebelfreien Region Basel mit grosser Häufigkeit (siehe Abb. 5) im Hochrheintal um oder vor allem etwas oberhalb Möhlin liegt. Ferner war es im Hinblick auf die mögliche Nebel- resp. Hochnebelbildung als Folge von Kühlturmschwaden wichtig festzustellen, ob wegen des bei winterlichen Hochdrucklagen am Rheintalboden häufig beobachteten Ostwindes (Talabwind), mit einer Überlagerung der Kühlturmschwaden eines potentiellen Grosskraftwerkes Schwörstadt,

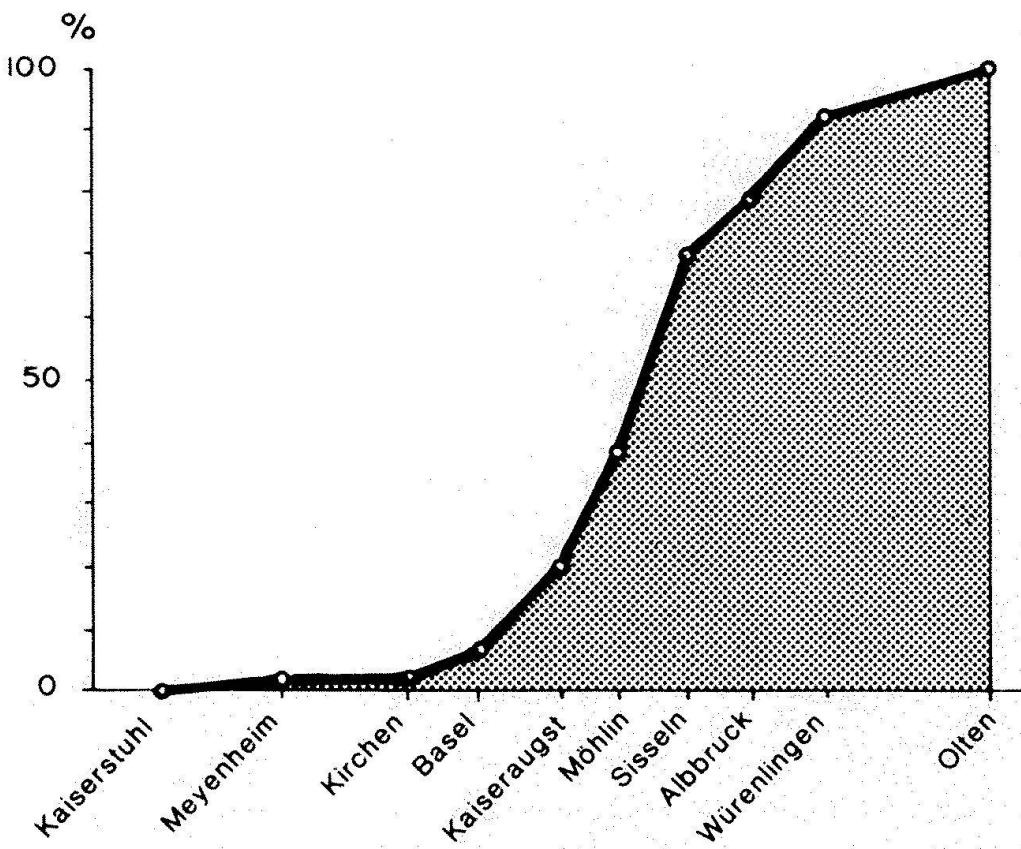


Abb. 4. Abnahme der Nebelhäufigkeit bei Hochdrucklagen vom schweizerischen Mittelland via Aaremündung bis Basel in Prozent; stärkster Gradient oberhalb Möhlin (nach M. Winiger, CLIMOD-Schlussbericht).

mit demjenigen von Kaiseraugst zu rechnen sei (Kanalisierungswirkung des Rheintals). Das Constant Level Balloonexperiment wurde daher im wesentlichen auf den Bereich Möhlin-Wallbach-Stein (vor allem auf das sog. Möhliner-Feld) konzentriert und das übrige Instrumentarium flankierend eingesetzt. Der Motorsegler bestrich neben dem Hochrheintal selbst (von Basel bis etwa Kaisten) die Nordabdachung des Juras sowie die südwestlichen Ausläufer des Schwarzwaldes.

Resultate der Feldversuche

a) Strömungsfeld

Abb. 6 zeigt, dass über 80 % der Flugbahnen der CLB schräg über das Rheintal hinweg nach Westnordwest zum Dinkelberg weisen. Die wenigen, welche dem Rheinlauf folgen, wurden jeweils beim Zusammenbruch der regionalen Hochdruckwettersituation, infolge Aufzugs stärkerer hoher Bewölkung, beobachtet. Die Strömung, vor allem über dem Möhlinerfeld ist für Hochdruckwetterlagen

mit Windgeschwindigkeiten, die häufig zwischen 5 – 10 m/s liegen, ungewöhnlich stark und weist ihre grösste Intensität in den untersten 200 – 300 m über Boden auf; sie wurde deshalb als sog. Möhlinjet bezeichnet. Diese regionale Starkströmung, die keinen wesentlichen Tagesgang aufweist, klingt im Mittel oberhalb 300 m ab Boden rasch ab, um im Inversionsbereich auf sehr schwache Winde abzufallen, wobei die Richtung in die synoptische hineindreht, mit welcher der Möhlinjet häufig einen Winkel zwischen 60 und 120° bildet, was weit über den Drehwinkel einer Ekmanspirale hinausgeht. Die Strömungen unterhalb und oberhalb der Inversion sind praktisch voneinander entkoppelt. Nimmt man die Beobachtungen der Jurakammstationen und der Plateaustationen nördlich davon hinzu, lässt sich das in Abb. 7 gegebene für Hochdrucklagen typische Strömungsbild über dem Hochrheintal inklusive angrenzendem Jurakamm ableiten, das im Mittel etwa 300 m über dem Rheintal Gültigkeit hat. Daraus ergibt sich zunächst, dass eine Schwadenüberlagerung Schörstadt/Kaiseraugst bei gut entwickelten winterlichen Hochdrucklagen höchst selten zu erwarten wäre.

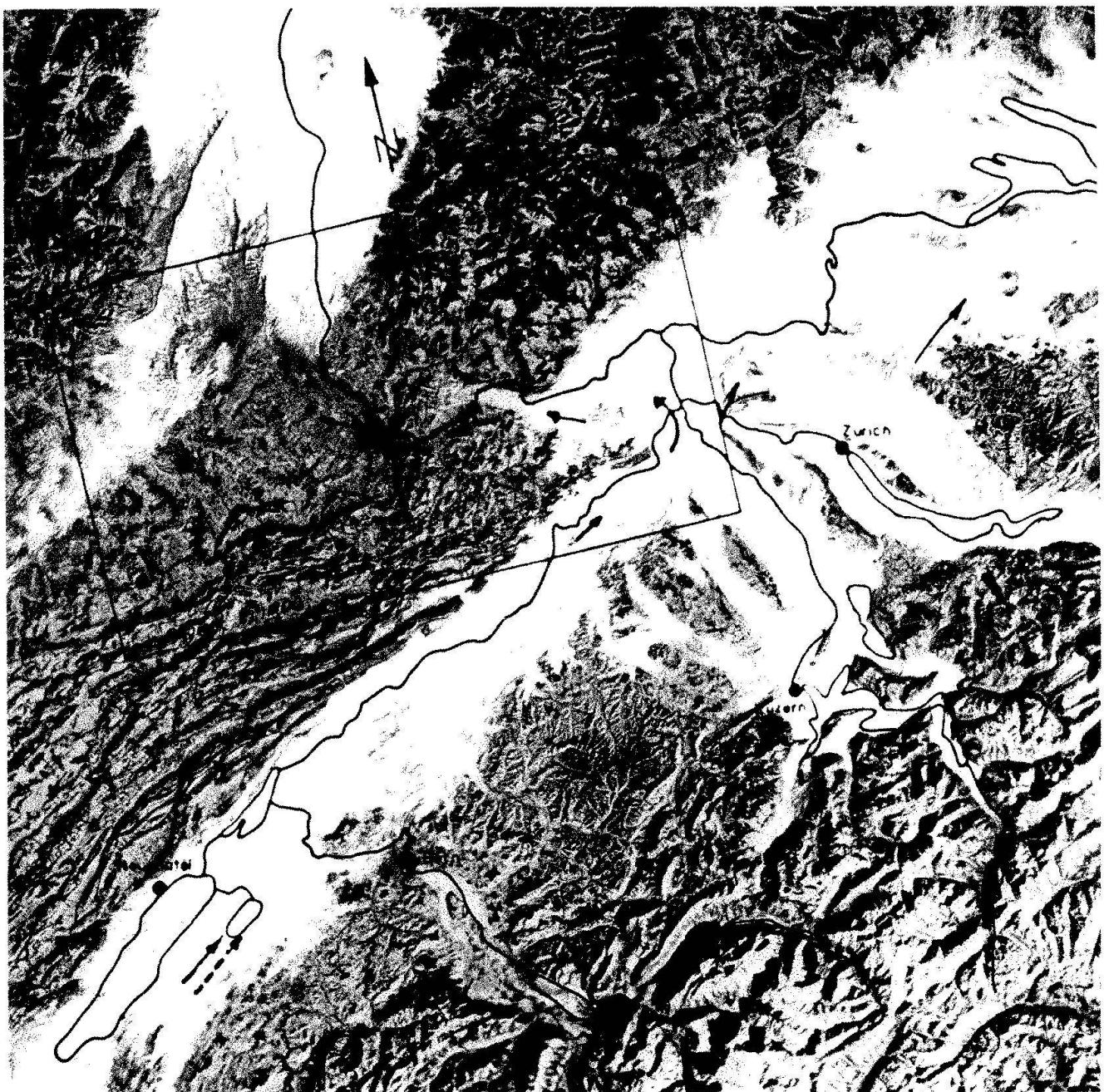


Abb. 5. Typischer Fall einer Hochnebellage Mittelland / Oberrheintal, Aufnahme von 29. 10. 1975 (nach M. Winger, CLIMOD-Schlussbericht). Beachte den über dem Möhlinerfeld zum Dinkelberg weisenden Nebelausläufer.

b) Temperatur und Feuchtigkeit

Wie die Messungen mit dem Fesselballon (Abb. 8) vor allem aber mit dem Motorsegler (Abb. 9a und b) wie auch die Bodenbeobachtungen höher gelegener Stationen (Abb. 10) zeigen, fällt der Möhrlinjet mit einer markanten Quasi-Diskontinuität im Temperaturfeld zusammen. Seine linke Seite im Raum Basel-Rheinfelden, ist bei gut entwickeltem Hochdruckwetter in 200 – 400 m über

dem Rheintalboden 4 – 6° wärmer als die rechte Seite oberhalb von Stein-Säckingen. Die Motorseglerflüge zeigen, dass der Temperatursprung auf knapp 10 km Horizontaldistanz konzentriert ist, auf der deutschen Seite des Rheins an der Kante des Eggberges sogar auf noch wesentlich kürzere Distanz. Ob die mehrfach festgestellten, dem Temperaturabfall überlagerten Wellen, durch Grenzschichtwellen am Übergang zwischen der von Osten keilförmig eingeschobenen

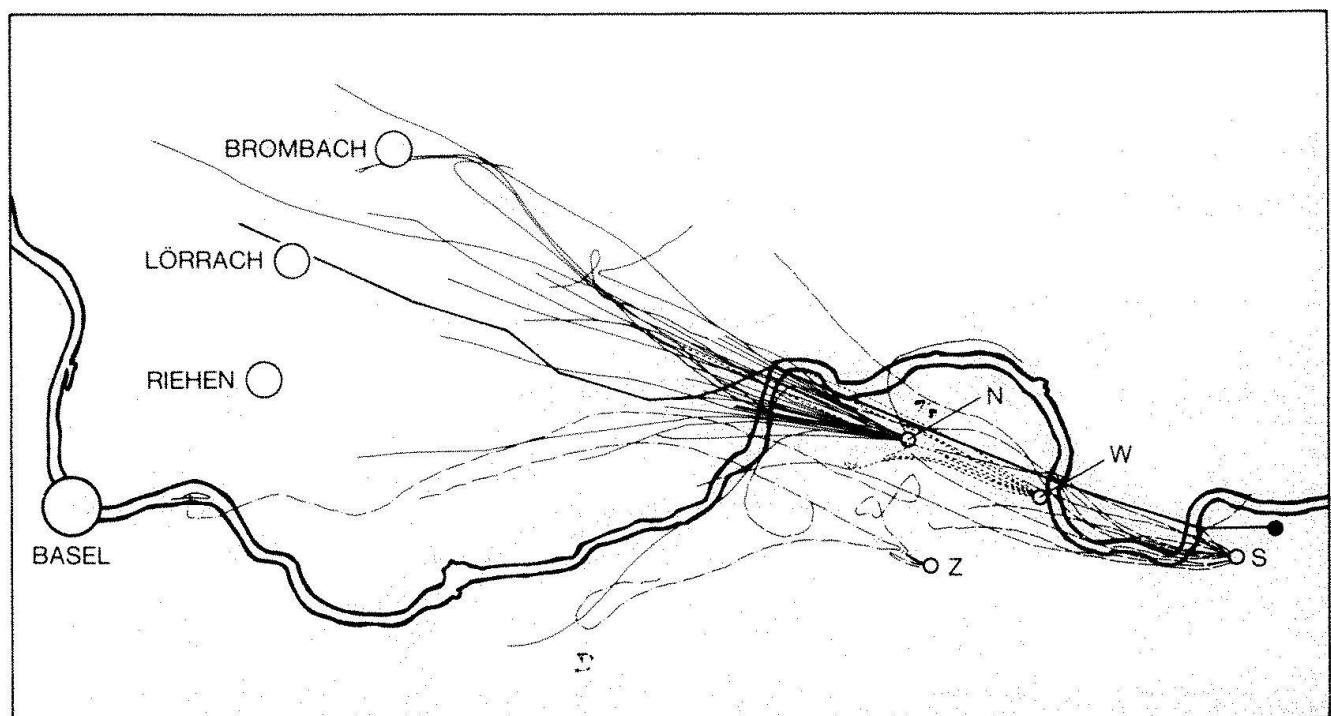


Abb. 6. Trajekturen der CLB (29.11., 3. und 5.12.79; 16. und 18.1.80; 24.11.80 und 10.12.80). Start ab: N o ———: Nünzeberg; S o ———: Stein; W o -----: Wallbach; Z o -,-: Zeinigen; ● ———: Bemannter Freiballon ab Sisseln am 10.12.1980.

Kaltluft in die darüberliegende Warmluft bedingt sind, oder eine Folge der lokalen Topographie darstellen – vom Jura her einmündende Seitentäler – konnte anhand des beschränkten Materials nicht entschieden werden.

Die absolute Feuchtigkeit ist auf der warmen Seite etwa gleich hoch oder liegt nicht selten tiefer als auf der kalten (Abb. 8, 9b). Die relative Feuchtigkeit, welche auf der kalten Seite um 100% beträgt, ist damit im Raum Basel bereits unterhalb der eigentlichen Inversion so niedrig, dass es nicht zu Nebel- oder Hochnebelbildung kommen kann, und infolge der nächtlichen Hangabwinde auch die Bodennebelbildung weitgehend verhindert wird.

Es ist zunächst naheliegend, die Temperaturdifferenz als eine Art Föhneffekt in der nach Abb. 7 den Jura überfliessenden Strömung zu betrachten. Während auf der kalten östlichen Seite die Höhendifferenz zwischen Juragrathöhe und Rheintal nur 200 – 300 m oder noch weniger beträgt, steigt sie im westlichen Teil, abgesehen von wenigen engen Passeinschnitten auf 600 – 800 m an, was mindestens einen beträchtlichen Teil der Temperaturdifferenz erklären würde. Nun

zeigen aber die Windmessungen auf der 1100 m hohen Gratstation Wasserfallen, dass bei unter diesem Niveau liegenden Inversionen der Jura in diesem Bereich kaum noch überströmt wird.

Während die niedrigen Ausläufer des Juras im Osten von einer vertikal relativ mächtigen Kaltluftmasse aus dem Mittelland im breiten Strom überflossen werden, bleiben im Westen zwischen Kammhöhe und Inversion (die als eine Art Deckel wirkt) nur noch niedrige und unzusammenhängende Durchgänge übrig; man kann sich nun vorstellen, dass es in diesen engen Öffnungen zur turbulenten Einmischung von wesentlich wärmerer Luft aus dem Bereich der Inversion kommt, was den Höhendifferenzeffekt wesentlich verstärken würde. Große horizontale Temperaturdifferenzen, die auf dem Passübergang Salhöchi bei Messfahrten auf kürzeste Distanz festgestellt wurden, weisen auf solche Effekte hin, ebenso der gegenüber der kalten Seite sehr verschmierte Übergang in die Inversion in Abb. 8.

Es ist auch denkbar, dass durch dynamische Effekte die Inversionsuntergrenze auf der warmen Seite des Möhlinjets zum Absinken gebracht wird; die vom Motorsegelflieger

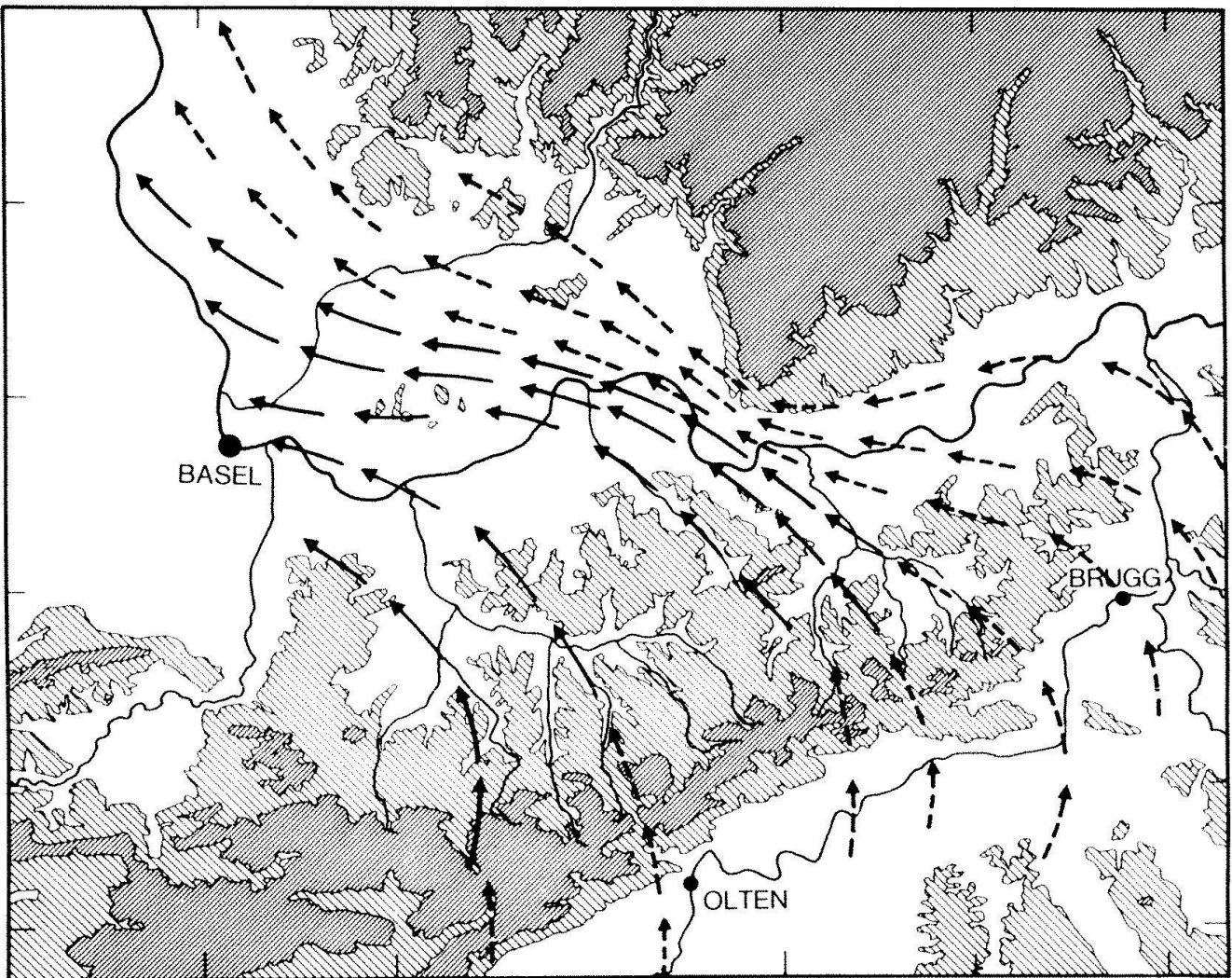


Abb 7. Überströmung des Jura und Möhlinjet bei winterlicher Hochdrucklage. —> warm, - - -> kalt.

über dem Dinkelberg gemessenen Temperaturverhältnisse deuten auf einen solchen Vorgang hin. Wahrscheinlich sind die hohen Temperaturen der Grenzschicht oberhalb der unmittelbaren Bodenschicht über der Region Basel durch eine Überlagerung der hier diskutierten Effekte bedingt, ebenso die geringe Feuchtigkeit, welche zum grossen Sonnenscheinreichtum der winterlichen Hochdrucklagen führt.

Bemerkungen zur Dynamik des Möhlinjets

Die Temperaturdifferenzen zwischen kalter und warmer Seite des Möhlinjets haben nach der Barometerformel eine Druckdifferenz von etwa 0,6 mb auf rund 16 km Horizontaldistanz zur Folge (die Grenzflächenneigung, welche für die Distanzberechnung eine Rolle

spielt, kann aus den vorhandenen Daten nicht genau bestimmt werden). Dieses Resultat basiert auf der Annahme, dass im Bereich der Inversion und darüber, wo die Windgeschwindigkeiten sehr klein sind, der Druckgradient praktisch Null ist. Eine direkte Messung des postulierten Überdruckes im östlichen Teil des Hochrheintales liegt leider nicht vor. Infolge der kurzen Distanz und der damit verbundenen kurzen Durchflusszeit ist ein geostrophischer (Süd-)Wind, der diesem Druckgradienten entsprechen würde, und der in Bodennähe etwa 30 m/s sowie in 200 - 300 m 10 - 15 m/s erreichen würde, keine brauchbare Näherung. Hingegen lässt sich die Geschwindigkeit errechnen, welche die Strömung beim Durchlaufen dieses Druckgradienten erreicht; sie beträgt 10 - 11 m/s, je nach Anfangsgeschwindigkeit (0 - 5 m/s); die von der Erdrotation bis zum Ende

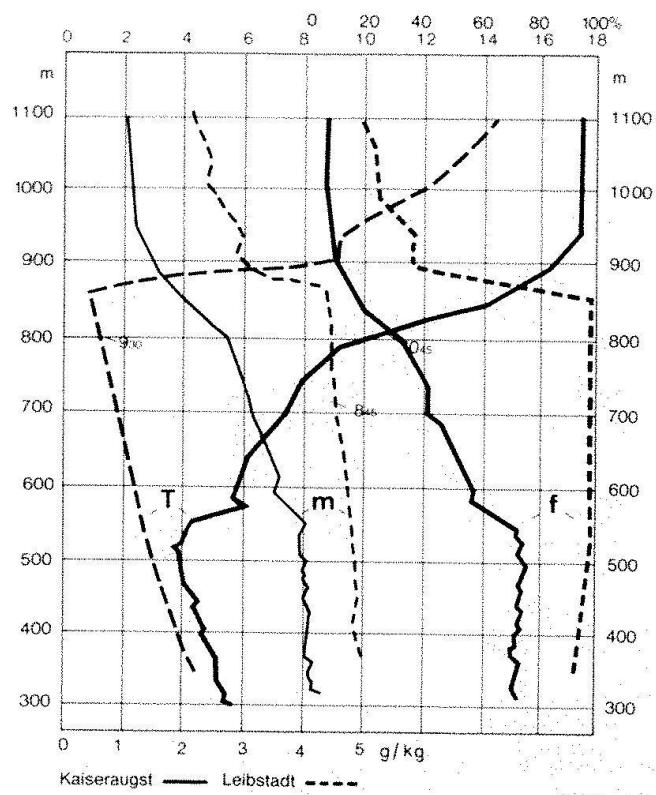


Abb. 8. Vergleich von gleichzeitigen Sondierungen in Kaiseraugst und Leibstadt am 29.11.79.

T: Temperatur; m: Mischungsverhältnis; f: relative Feuchtigkeit.

der 16 km-Strecke (in der Gegend von Möhlin) hervorgerufene Rechts-(Nord-)Abweichung würde etwa 11° ausmachen. Diese Werte (vor allem die Geschwindigkeit) stehen in recht guter Übereinstimmung mit der Beobachtung. Dies, obschon weder der Reibungseinfluss auf die Geschwindigkeit noch der Kanalisierungseffekt östlich des Eggbergs auf die Richtung berücksichtigt sind. Die Reibungswirkung dürfte durch die Beschleunigung kompensiert werden, die aus der wesentlich durch den Eggberg verursachten Verengung der Gesamtströmung resultiert. Diese Strömung enthält, wie Abb. 7 zeigt, nicht nur das Rheintal abwärts fließende Luft, sondern auch Anteile, welche die niedrigen Ausläufer des Juras etwa östlich der Staffelegg direkt überströmen; diese Zusatzluftmenge trägt zur Abweichung des Strömungsverlaufs Richtung Dinkelberg bei. Während also die Entstehung des Möhlinjets mindestens halbquantitativ aus der Temperaturdifferenz zwischen oberem und unterem Hochrheintal erklärt werden kann, wobei allerdings die sicher ausschlaggebenden wichtigen topographischen Einflüsse nur ungenügend berücksichtigt werden können – dazu

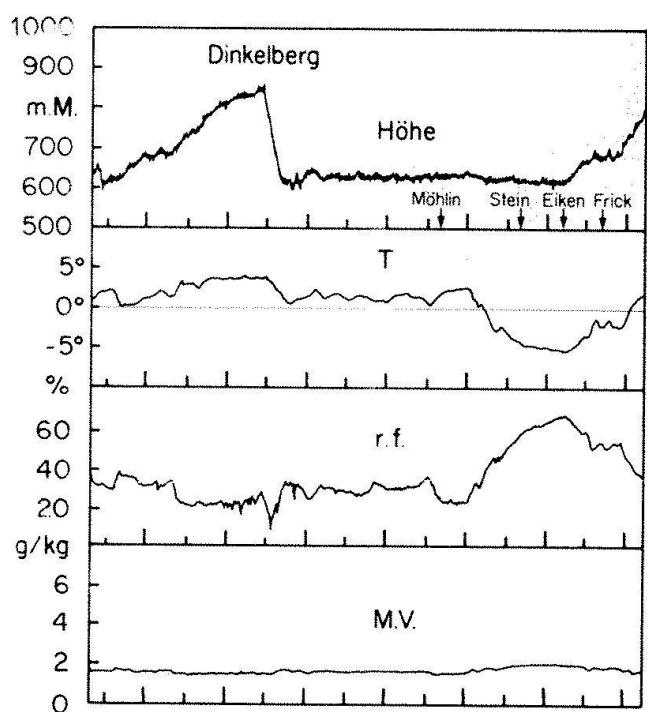
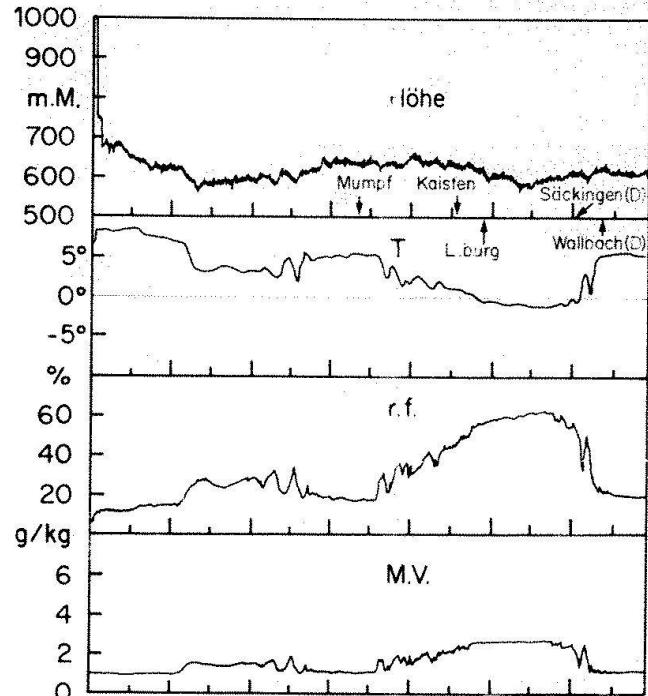


Abb. 9a. Motorsegler-Flug von 10.12.1980: Flughöhe (m M), Temp., relative Feuchtigkeit und Mischungsverhältnis (g/kg).

Abb. 9b. Motorsegler-Flug vom 11.12.1980, gleiche Größen wie in 9a; Umkehr des Flugzeuges bei Laufenburg und Rückflug (rheinabwärts) über dem deutschen Ufer längs des Eggbergs.



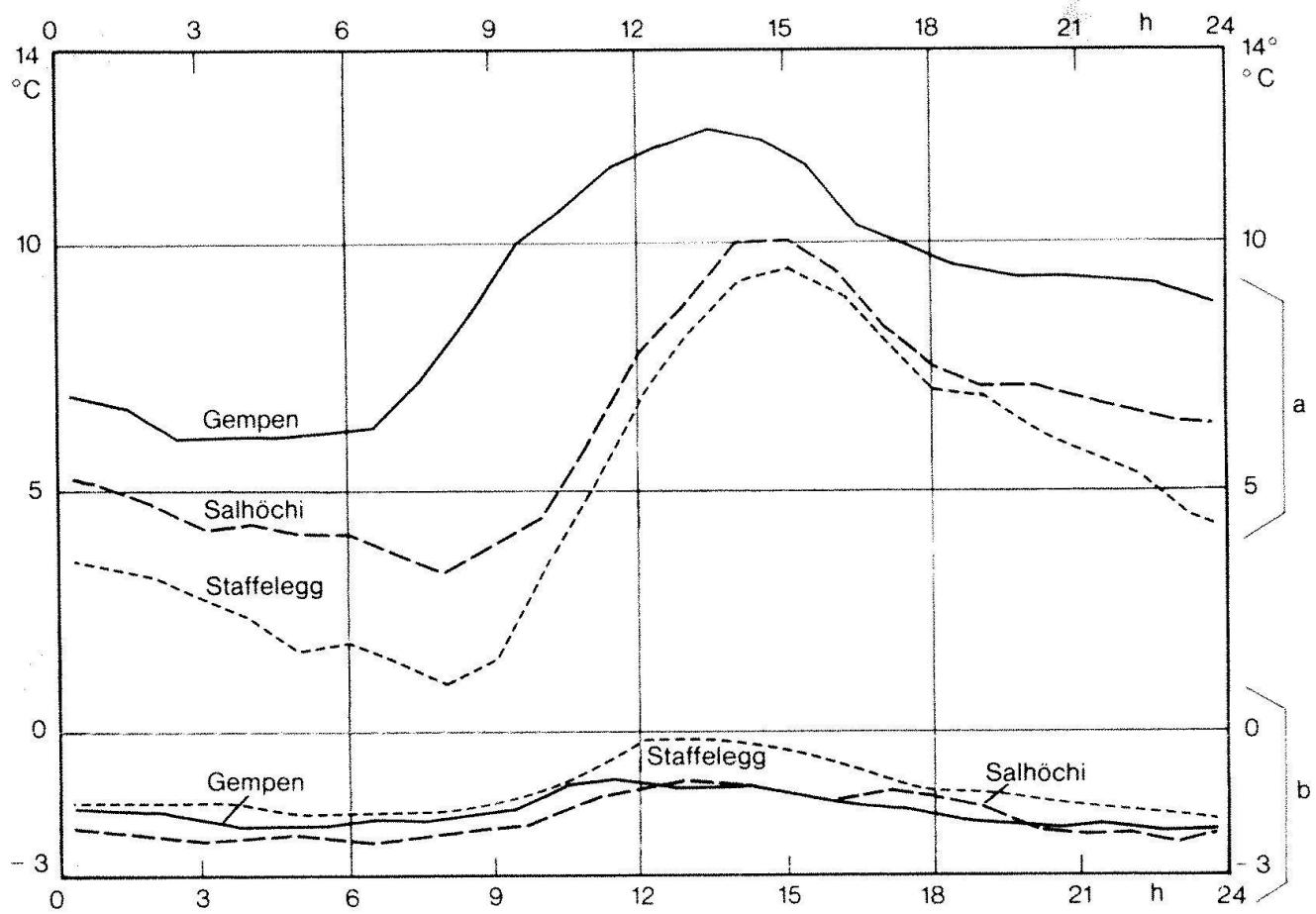


Abb. 10. Vergleich des Tagesganges der Temperatur auf dem Gempen, Tafeljura (700 m M) mit den Jurakammstationen Staffelegg (650 m M) und Salhöchi (779 m M)

a) Während winterlicher Hochdruckperioden: Mittel aus 20. bis 22.10.80, 26. bis 28.10.80, 20. bis 24.11.80 und 9. bis 12.12.80.

b) Bei anderen Lagen: 1. bis 12.11.80.

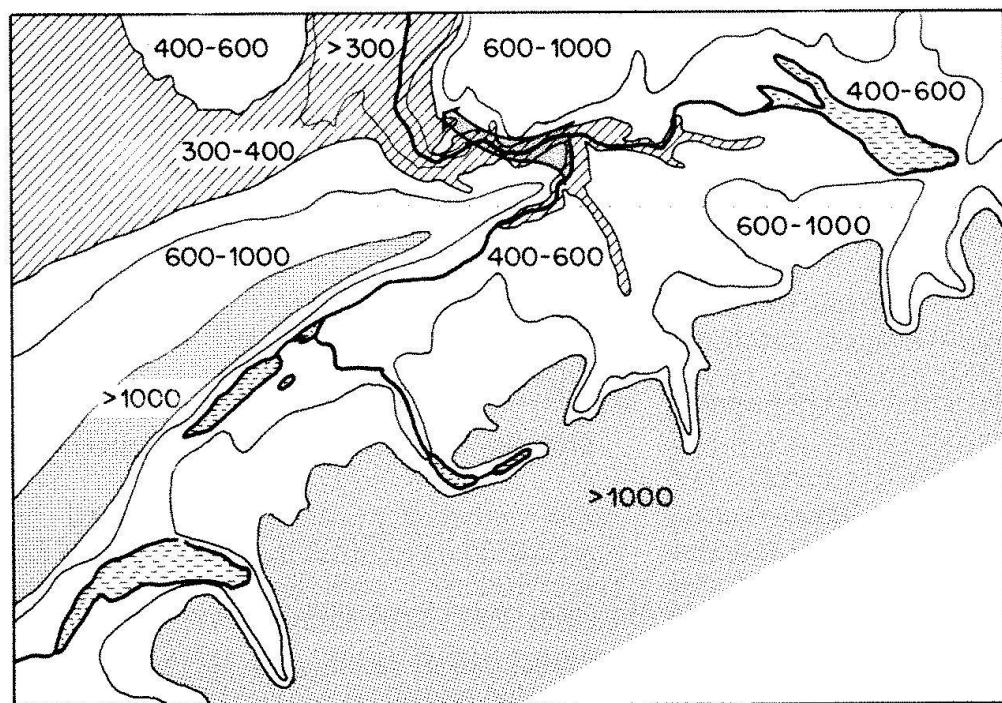


Abb. 11. Der Kaltluftsee über dem schweizerischen Mittelland als Quelle des Möhlinjets, siehe grosser Doppelpfeil (Möglicher Weiterfluss durch Oberrheintal oder burgundische Pforte).

wäre ein dreidimensionales numerisches Modell nötig – gibt dieser Überlegung keine Auskunft über die wahrscheinliche Rückkoppelung, die der Möhlinjet auf die im vorherigen Abschnitt diskutierten dynamischen Prozesse ausübt, welche zur Erwärmung in der Region Basel führen. In einer vollständig befriedigenden Modellierung müssten auch diese Zusammenhänge enthalten sein. Qualitativ kann man postulieren, dass durch das Zusammenwirken der im nächsten Abschnitt diskutierten Sogwirkung der Zirkulation im synoptischen Massstab und der im Möhlinjet erfolgten Ablenkung der Luftzufuhr aus Osten aus dem Rheintal heraus in der Region Basel eine horizontale Divergenz entsteht, die kompensatorisch zum Absinken in der freien Atmosphäre (Absinken der Inversionsuntergrenze) führt.

Der Möhlinjet als Folge nichtregionaler, grossräumiger Prozesse

Wie in Abb. 11 gezeigt ist, ist der Möhlinjet Teil einer Strömung, welche durch das Überfliessen von Kaltluft aus dem bei dieser Wetterlage sehr häufig mindestens z. T. von Nebel oder Hochnebel bedeckten Mittelland entsteht. Nun ist die Aaremündung in den Rhein samt den westlichen angrenzenden niedrigen Juraausläufern der tiefstliegende Ausfluss aus dem grossen Becken des schweizerischen Mittellandes – er liegt etwa 100–150 m tiefer als im Südwesten die Lücke zwischen Jura und Jorat, durch welche Luftabfluss ins Rhonetals erfolgen kann. Dass ein solcher kontinuierlicher Luftabfluss erfolgt, hat zwei letzten Endes miteinander verknüpfte Gründe. Einmal führt der grossräumige, durch die Bodenreibung bedingte Luftabfluss aus dem Randgebiet der Hochdruckzone (etwa über Westdeutschland und dem nördlichen Frankreich oder aus dem Bereich des unteren Rhonetals) zu einer Sogwirkung auf die im schweizerischen Mittelland zwischen Alpen und Jura blockierten Massen. Da der Temperaturrückgang in der Kaltluftschicht unterhalb der Inversion normalerweise etwa 1 Grad/Tag beträgt, während der Strahlungsverlust an der Hochnebelgrenze zu einer Abkühlung von 7–8 Grad führen sollte, die nur zu einem kleinen Teil (10–20%) durch den Wärmefluss aus dem

Boden gedeckt wird, muss man ferner annehmen, dass nicht alle im Hochdruckbereich in der freien Atmosphäre absinkende Luft oberhalb der Inversion nach aussen abfliesst, sondern dass ein Teil, trotz der hohen Stabilität, durch sie hindurch in den darunterliegenden Kaltluftsee eindringt, und dessen strahlungsmässige Wärmeverluste advektiv und durch adiabatische Kompression weitgehend deckt. Da die Inversion bei langandauernden Hochdrucklagen normalerweise nicht ansteigt, sondern eher absinkt, muss diese Luft nach aussen abfliessen. Die beiden hier diskutierten Mechanismen sind selbstverständlich durch die grossräumige Dynamik miteinander verknüpft, d. h. sie sind Teile eines und desselben Prozesses im synoptischen Skala.

Nach dem oben Gesagten erfolgt dieser Abfluss vorwiegend durch den Bereich der Aaremündung (Abb. 11) und sammelt sich (wie Abb. 7 zeigt) im Möhlinjet. Konservative Abschätzung anhand des Wärmebudgets ergeben einen ständigen Luftabfluss von 30 – 50 km³/Std. Untersuchungen anhand der Winddaten zeigten für zwei herausgegriffene Tage (14. 1. 80 und 29. 11. 79, mässiger resp. starker Möhlinjet), analoge Werte für den Abfluss aus dem Rheintal via Dinkelberg sowie für das Einfliessen der Luft aus dem Mittelland ins Hochrheintal. Da wegen der ungenügenden Messdaten aus der freien Atmosphäre (ein gut entwickelter Möhlinjet erlaubt z. B. keinen Fesselballoneinsatz in seinem Bereich) diese Flussmessungen auf gewissen Extrapolationen beruhen, sind sie allerdings mit beträchtlicher Unsicherheit behaftet – wie auch die quantitative Abflussberechnung aus dem Mittelland. Innerhalb dieser Ungenauigkeitsschranken besteht aber gute Übereinstimmung, sodass an der prinzipiellen Richtigkeit dieser Erklärung des Möhlinjets kaum gezweifelt werden kann. Sie steht übrigens in guter Übereinstimmung mit der in Abb. 3 gezeigten Tatsache, dass die mit dem beschriebenen Strömungsfeld verknüpfte sonnenscheinmässige Bevorzugung der Region Basel bei Bisenlagen deutlich reduziert ist: Dann erfolgt der Abfluss mindestens teilweise durch die höher gelegene Lücke im Südwesten Richtung Genfersee-Rhonetals.

Aus der Tatsache, dass der Möhlinjet keine regional bedingte Strömung ist, sondern dem

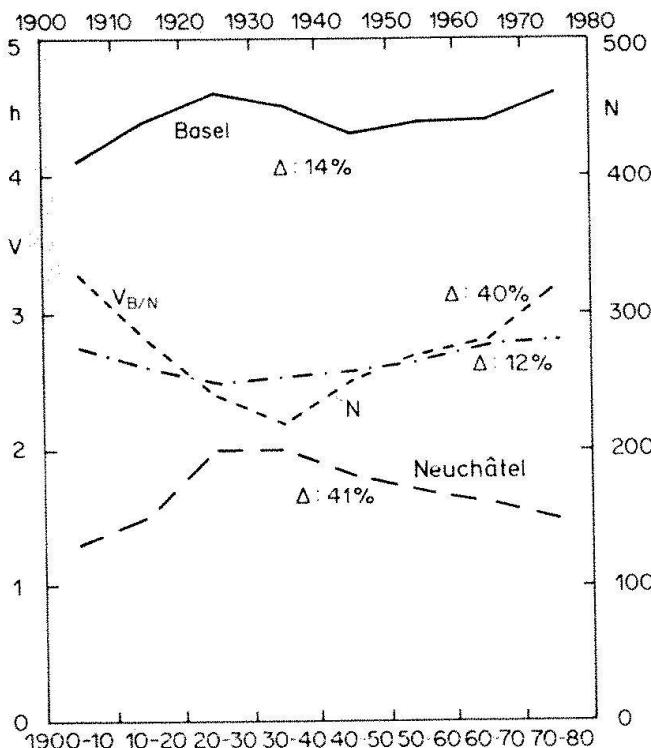


Abb. 12: Säkulare Schwankungen des Sonnenscheinverhältnis Basel / Jurasüdfuss (Neuchâtel) bei winterlicher Hochdrucklage (Ordinate links), Dezennienmittel 1 : 2 : 1 gelättet. Δ : Schwankungsbreite / Mittelwert in Prozent. N: Zahl der Hochdrucklagen pro Dezennium (Ordinate rechts).

Luftabfluss aus dem schweizerischen Mittelland entspricht und damit Teil eines Strömungssystems im synoptischen scale ist, d. h. mit Energieumsätzen verknüpft ist, die um Größenordnungen über den regionalen liegen, konnte gefolgert werden, dass dieses Strömungssystem und mit ihm die sonnenscheinmässige Bevorzugung Basels durch einige Grosskraftwerke nicht wesentlich beeinträchtigt werden könnte.

Langfristige Schwankungen der sonnenscheinmässigen Bevorzugung der Region Basel

Zur Prüfung der Frage, ob der zunehmende Stadteinfluss die sonnenscheinmässige Bevorzugung der Region Basel beeinflusst hat, wurde mit Hilfe der Datenbank der SMA die Dezenniensumme der winterlichen Hochdrucklagen und ihr Sonnenscheinmittel berechnet; als Vergleichsstation am Jurasüdfuss stand Neuchâtel zur Verfügung. Da die

Sondierungen in Payerne nicht für einen grösseren Zeitraum (ab 1900) zur Verfügung stehen, wurde das Inversionskriterium zur Auslese der Hochdrucklagen durch die Temperaturdifferenz Basel-Säntis ersetzt (bei starker Inversion ist sie klein). Gute Übereinstimmung in der Anzahl der Tage ergab sich für die detailliert untersuchte Periode mit der Bedingung ΔT (Basel-Säntis, Mittagstermin) $\leq 7^\circ C$. Abb. 12 fasst die Resultate zusammen.

Offensichtlich ergibt sich kein signifikanter Trend in der mittleren Sonnenscheindauer in Basel. Das Verhältnis zum Jurasüdfuss zeigt ein Minimum zwischen 1920 und 1950, das aber auf die Sonnenscheinzunahme in diesem Zeitabschnitt in Neuchâtel zurückzuführen ist, während gleichzeitig die Zahl der Hochdrucktage ein Minimum aufweist. Es ist zu vermuten, dass diese Schwankung ein Ausfluss globaler Zirkulationsänderungen ist; in diesem Zeitraum erreichte das nordhemisphärische Temperaturmittel nach kontinuierlichem Anstieg seit 1880 ein Maximum, um nachher wieder zu fallen. Dieses Resultat für die Region Basel steht in guter Übereinstimmung mit der im vorhergehenden Abschnitt diskutierten Stabilität der Wetterlage gegenüber anthropogenen Einflüssen; die stärkere Belastung der Atmosphäre mit Schadstoffen führt also nicht einmal zu einer merkbaren Verkürzung der Ansprechzeit des Sonnenscheinautographen.

Offene Fragen

Infolge des Zeitdruckes unter dem die CLIMOD-Untersuchung in ihrer Schlussphase stand, konnten einige nichtzentrale Zusatzprobleme nicht mehr angegangen werden. So wäre eine Strömungsuntersuchung im Raum Pratteln-Muttenz, wo an der Mündung des Ergolztals offenbar lokal verstärkte Windfelder auftreten im Zusammenhang mit der Dynamik der warmen Seite des Möhlinjets von Interesse. Ebenso konnte nicht abgeklärt werden, ob die den Dinkelberg überströmende Luft des Möhlinjets anschliessend nach Norden, über die häufig das Oberrheintal füllende stagnierende Nebelluft oder nach Westen durch die burgundische Pforte abfliesst; je nach grossräumiger Druckverteilung (Lage des Hochdruckzentrums) kann

man sich beides oder auch eine Aufspaltung des Flusses vorstellen.

Im Zusammenhang mit den Schadstoffproblemen auch des schweizerischen Mittellandes sowie der Region Basel, wären eine nähere Erforschung der Strömungsverhältnisse bei sommerlichen Hochdrucklagen von Interesse. In dieser Jahreszeit dürfte die Strömung stärker regional beeinflusst sein, wahrscheinlich aber doch nicht völlig, wie die Tatsache andeutet, dass die Strömungsrichtung im Hochrheintal auch im Sommer häufig keinen Tagesgang aufweist (Mitteilung von W. Schüepp). Untersuchungen über die Existenz eines Möhlinjets im Sommer wären von wesentlichem Interesse für das Verständnis des Lufthaushaltes in der Schweiz.

Schliesslich sollten Modellrechnungen mit den durch die Feldversuche gegebenen Rand-

bedingungen wiederholt werden, z.B. im Hinblick auf ein besseres Verständnis der Rückkoppelung zwischen dem Möhlinjet und den atmosphärischen Vorgängen auf seiner warmen (westlichen) Seite.

Literatur

Eidgenössische Kommission Meteorologie des schweizerischen Gebietes Hochrhein/Oberrhein, Juni 1981: Möglichkeiten regionaler Klimaveränderungen durch menschliche Einwirkungen, Schlussbericht über das Projekt CLIMOD.

Prof. Dr. Hans-Ulrich Dütsch
Atmosphärenphysik ETH
Hönggerberg HPP
CH-8093 Zürich