

Zur Durchlüftung des Aaretals zwischen Bern und Thun

Autor(en): **Schorer, Michael / Wanner, Heinz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Berner Geographische Mitteilungen : Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Bern und Jahresbericht des Geographischen Institutes der Universität Bern**

Band (Jahr): - **(1983)**

PDF erstellt am: **16.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-321102>

Nutzungsbedingungen

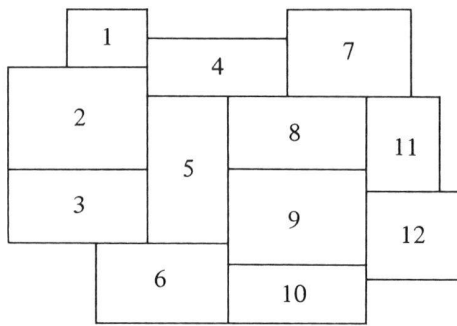
Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



Impressionen zur formalen, funktionalen und strukturellen Gliederung Bogotás

Informationen zu den Fotos auf Seite 52 und 53

1. Villa in einer durch Wächter geschützten einheitlichen Gesamtüberbauung – hier im Quartier «Calatrava». Dieser Bebauungstyp (neuerdings mit Häusern im Neokolonial-Stil) erstreckt sich über weite Flächen der seit den sechziger Jahren entstandenen Agglomerationen. (Sozio-ökonomische Schichtzugehörigkeit der Bewohner: Untere Oberschicht)
2. Architektonischer Kontrast im neu in Entstehung begriffenen Geschäftszentrum an der Calle 72 (vgl. Funktionierungsschema Einzel- und Gross-Handel, Gewerbe: Ausweitung des Regionalzentrums A in Richtung Nord). Die Verlagerung der City aus dem alten, heute stark kriminalisierten Zentrum in den sichereren Norden ist damit eingeleitet.
3. Gemischte Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebebauung an der Avenida 15 beim Multizentrum «Unicentro».
4. City mit Hochhausbebauung und Wolkenkratzern.
5. Verkehrschaos bei der Gabelung von Carrera 7 und 13 am nördlichen Rande der City.
6. Moderne Hochhausbebauung an der Carrera 7 im Quartier «Chico Alto» (Oberschicht).
7. Ungeschützte Altstadtbebauung, die unaufhaltsam moderner Bebauung weichen muss. 80% des Historischen Zentrums sind versumt – die Kriminalität nimmt hier ständig zu.
8. Geschützte Historische Bebauung (Unterschicht). Die verlotterte, aber äusserst schöne Kolonial-Architektur wird heute meist auf privater Basis restauriert. Die Besitzer, die den höchsten Gesellschaftsschichten angehören, können aber die Häuser aus Sicherheitsgründen nicht selber bewohnen.
9. Ältere, konventionelle Quartierbebauung hat sich vor allem ausserhalb der City erhalten. Die Übernahme des englischen «Tudor-Stils» in den dreissiger Jahren verleiht solchen einstigen Oberschicht-Quartieren noch heute eine homogene Physiognomie (Mittelschicht, z.T. Untere Mittelschicht).
10. Älterer Bandcomercio in der Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebebauung der Carrera 13: Geschäfts- und Wohnfunktion sind getrennt im gleichen Quartier vorhanden.
11. Ältere, konventionelle Stadtkernbebauung – aus der historisierenden Epoche Ende 19. bis anfangs 20. Jahrhundert – hat sich fast nur noch inselhaft in der City erhalten.
12. Gemischte Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebebauung im Süden Bogotás. Dieser funktionale Typ breitet sich in jüngster Zeit – durch das unaufhaltsame Flächenwachstum Bogotás bedingt – entlang der wichtigsten Verkehrsträger und im besonderen der Ausfallstrassen als Bandcomercio aus. (Unter diesen Begriff fallen Einzel- und Filialhandelsbetriebe, die sich längs einer Strasse aneinanderreihen, wobei die oberen Stockwerke und die Rückseite der Gebäude in der Regel Wohnfunktion zeigen.)

Zur Durchlüftung des Aaretals zwischen Bern und Thun

Michael Schorer und Heinz Wanner

1. Einleitung

Verschiedene Schweizer Städte liegen eingebettet in ein Flusstal, das aus einer Hügelregion (z. B. Jura, höheres Mittelland oder Voralpen) in die benachbarte Vorlandsenke oder Talbene einmündet: Basel, Bellinzona, Bern, Freiburg. Die städtischen Baukörper reichen damit in eine bodennahe Luftschicht (die sog. Planetare Grenzschicht) hinein, deren Dynamik vor allem bei windschwachen Schönwetterlagen sehr massgebend durch die Druckunterschiede zwischen den Hügel- und Vorlandregion und die dadurch induzierte Regionalwindzirkulation geprägt wird. MAEDER (1968) sowie MESSERLI und MAURER (1973) haben als erste auf das entsprechende Berg- und Talwindssystem der Region Bern hingewiesen. MAURER (1977) hat diesen «Aaretalwind» detaillierter studiert. MATHYS (1976) und WANNER (1979) haben anhand ihrer Temperatur- und Nebelstudien erste Hinweise über die Höhe der Mischungsschichtobergrenzen geliefert. FUHRER (1980) hat schliesslich auf die Bedeutung des regionalen Strömungs- und Schichtungsmusters für den Stadt-Umland-Transport von Photooxidantien (in diesem Fall Ozon) hingewiesen. Um die erwähnten Prozesse etwas näher kennen zu lernen, führte die Gruppe für Angewandte Klimatologie des Geographischen Instituts der Universität Bern im Aare- und Gürbetal zwischen Bern und Thun seit 1978 Studien zur Untersuchung der bodennahen Durchlüftung durch. Der vorliegende Bericht stellt einige Resultate dieser Arbeiten in stark vereinfachter Form dar.

2. Zielsetzung und Arbeitskonzept

Ziel der genannten Arbeiten ist es, eine Klassierung des Durchlüftungspotentials für verschiedene Wetterlagen vorzunehmen und die Mechanismen dieser Durchlüftung auch kartographisch darzustellen. Unter *Durchlüftung* werden jene Vorgänge verstanden, die für den räumlich-dreidimensionalen Austausch der Luft verantwortlich sind (mittlere Strömung, Turbulenz, Temperaturschichtung; WANNER, 1983). Mit dem *Durchlüftungspotential D* bezeichnen wir jenes Luftvolumen, das für die Ausbreitung von Luftfremdstoffen aus unterschiedlichen Quellen (punktuell, linear, flächenhaft oder dreidimensional) zur Verfügung steht:

$$D = l \cdot b \cdot h^* \text{ (m}^3\text{)}$$

- l: Länge des Luftvolumens über einem Geländeauschnitt; in unserem Fall oft abhängig von der Berg- oder Talwindgeschwindigkeit (m).
- b: Breite dieses Luftvolumens; in unserem Fall abhängig von der Talbreite oder von der Breite eines bewegten Luftpaketes (m).
- h*: Mischungsschichthöhe, d.h. Höhe über Boden, bis zu welcher sich die bodennahe Luft aufgrund thermischer (Erwärmung durch die Sonne) oder mechanischer (Reibung) Einflüsse normalerweise durchmischen kann (m).

Kann dieses Durchlüftungspotential als guter Indikator für die räumliche Verteilung quellennaher Primärschadstoffe

(z. B. SO₂) bezeichnet werden (REMSBERG und WOODBURY, 1983), so leuchtet es rasch ein, dass für quellenfernere Sekundärprodukte (z. B. Photooxidantien) andere Einflussfaktoren wie Strahlung, Temperatur, Fähigkeit zur Selbstreinigung usw. eindeutig in den Vordergrund treten.

Zur Bestimmung des genannten Durchlüftungspotentials wurden verschiedene Feldexperimente und Modellstudien angesetzt, wobei ein Gleichgewicht zwischen diesen beiden Arbeitsinstrumenten angestrebt wurde. Figur 1 gibt in Form des *Arbeitskonzeptes* einen Grobübersicht über durchgeführte Arbeiten. Dabei sollten die genannten Messungen und Modelle vor allem Aufschluss über das horizontale Strömungsfeld und den Vertikaltemperaturverlauf geben können. Strahlungs- und Energiehaushaltabschätzungen wurden nur beschränkt in die Betrachtungen einbezogen.

Bei den *Feldexperimenten* wurde nach Möglichkeit ein vielfältiges Mess- und Beobachtungsinstrumentarium eingesetzt, das sich etwa wie folgt zusammensetzte: Feste Wetterstationen mit Windmast, mobiles Messfahrzeug, Ballonsondiersystem, fest eingerichtete Zeitrafferkameras (zur Verfolgung der Nebelmeerdynamik), Messflugzeug, Wettersatelliten-Empfangsstation, Augenbeobachtungen (in Form gezielter Publikumsfragen über Windrichtung und Windstärke; vgl. BERLINCOURT, 1980; BAUMGARTNER, 1981).

Im *Modellbereich* wurden zwei verschiedene Arbeitstechniken angewendet: Eine erste Studie befasste sich mit der Abschätzung des Durchlüftungspotentials aufgrund empirisch-

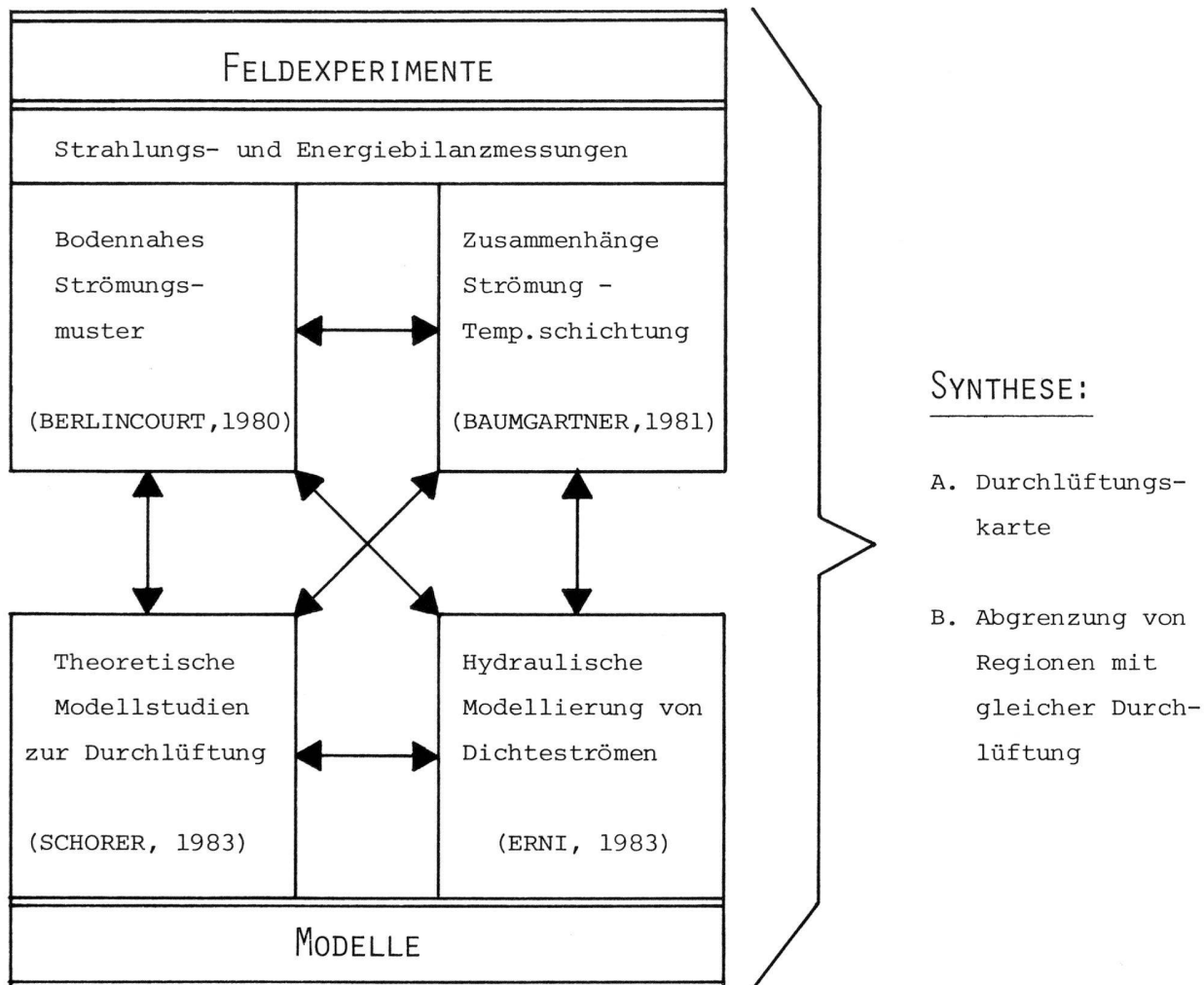
statistischer Näherungen mit Hilfe digitaler Geländemodelle (SCHORER, 1983). Bei der zweiten Arbeit (ERNI, 1983) wurde die nächtliche Kaltluftproduktion gemessen und abgeschätzt, und die von geneigten Oberflächen (vor allem Alpenraum) abfließenden Dichteströme wurden im limnologischen Labor des Geographischen Instituts mit Hilfe von gefärbten Salzwasserlösungen reproduziert, um

- A) die komplexen, dreidimensionalen Prozesse visuell darzustellen;
- B) ein qualitatives Verständnis für die ablaufende Dynamik zu schaffen;
- C) bessere Grundlagen für die Auswahl künftiger Messstandorte bereitzustellen.

Als Resultat der bisher durchgeführten Arbeiten wird in diesem Aufsatz eine vorläufige *Durchlüftungskarte* vorgestellt. Die räumlich-kartographische Abgrenzung von Durchlüftungsregionen (d. h. Regionen mit gleichem Durchlüftungspotential) bleibt einer späteren Studie vorbehalten.

3. Die regionale Klassifikation durchlüftungsarmer Wetterlagen

Da Feldexperimente und deren Auswertung sehr aufwendig sind, musste man die Untersuchungen auf sogenannt «durch-



Figur 1: Studien zur Durchlüftung des Aare- und Gürbetales zwischen Thun und Bern: Arbeitskonzept.

lüftungsschwache Wetterlagen» beschränken. Für das Aaretal zwischen Thun und Bern wurde daher im Jahre 1978 der Zustand der Atmosphäre bis zur 850 mbar-Druckfläche (zirka 1500 m ü. M.) anhand von Temperaturgradient und bodennaher Windgeschwindigkeit (Mittagswerte) täglich klassiert und mit den Wetterlagen verglichen (ERNI in: BAUMGARTNER, 1981). Als Bodenwerte wurden die Wind- und Temperaturdaten der Station Belpmoos – einer ausgesprochenen Talstation – gewählt; die Temperaturwerte der 850 mbar-Druckfläche wurden den Sondierungen von Payerne entnommen. Sie stellen somit für das Aare- und Gürbetal eine (allerdings brauchbare) Grobabschätzung dar. Tabelle 1 enthält die Kriterien, die zur Ausschcheidung von 6 Durchlüftungsklassen führten. Die Durchlüftungsklasse 1 (starke Winde und grosse Mischungsschichthöhe dank labiler Schichtung der bodennahen Atmosphäre) bedeutet das grösste Durchlüftungspotential und damit die geringste Gefährdung der Lufthygiene, die Durchlüftungsklasse 6 lässt umgekehrt die stärkste Gefährdung erwarten. Aus dem Verhältnis der Zahl von Tagen mit gehemmter Durchlüftung (Klassen 4–6) zur Gesamtzahl der Tage, an denen diese Wetterlage aufgetreten ist, lässt sich nun für jede Wetterlage ein *Durchlüftungsindex* ableiten. Dieser Index sagt aus, mit welcher Wahrscheinlichkeit beim Auftreten dieser bestimmten Wetterlage am Mittag eine Gefährdung der lufthygienischen Situation zu erwarten ist.

Tabelle 1: Definition von sechs Durchlüftungsklassen (ERNI in: BAUMGARTNER, 1981)

Windgeschwindigkeit FF	vertikaler Temperaturgradient γ ($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)		
	$\gamma < -0.8$ labile Schichtung	$-0.8 \leq \gamma < -0.4$ indifferente Schichtung	$\gamma \geq -0.4$ stabile Schichtung
FF > 2 m/s (stark)	1	3	5
FF \leq 2 m/s (schwach)	2	4	6

In Tabelle 2 sind diese Indizes für das Winter- und Sommerhalbjahr 1978 aufgeführt.

Tabelle 2: Durchlüftungsindizes pro Wetterlagengruppe und Wertenart zur Mittagszeit für die Station Belpmoos und das Jahr 1978, 339 Fälle (ERNI in: BAUMGARTNER, 1981)

Wetterlage Nr. (nach SCHUEPP, 1968)		Durchlüftungsindex DLI	
		Winter	Sommer
Hochdrucklage	1–5	0.82	0.13
Flachdrucklage	6–10	0.75	0.09
Tiefdrucklage	11–15	0.52	0.08
Westlage	16–20	0.43	0.08
Nordlage	21–25	0.38	0.17
Ostlage	26–30	0.43	0
Südlage	31–35	0.50	0.17
Mischlage	36–40	0.67	0.17
Konvektive Lagen	1–15	0.73	0.08
Advektive Lagen	16–40	0.44	0.13

$0 \leq \text{DLI} \leq 0.5$:
gut durchlüftete Wetterlage, mehr als 50% der Fälle gehören in die Klassen 1–3.

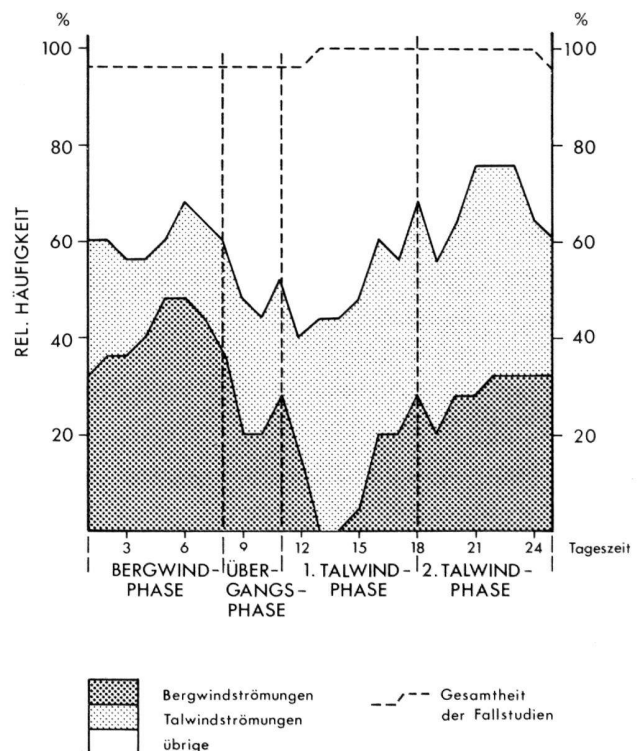
$0.5 \leq \text{DLI} \leq 1$:
gehemmt durchlüftete Wetterlage, 50% oder mehr der Fälle gehören den Klassen 4–6 an.

Der vermutete Zusammenhang zwischen konvektiven Hoch- und Flachdrucklagen und schlechten Durchlüftungsverhältnissen am Mittag wird im Herbst und Winter klar ersichtlich. In diesen Jahreszeiten dürfen aber auch die restlichen Wetterlagen nicht ausser acht gelassen werden. Wie erwartet ist die Durchlüftung des Aaretals von der Jahreszeit abhängig, indem im Sommer kaum tagelang andauernde, durchlüftungsschwache Situationen auftreten können (siehe auch Kap. 4.2).

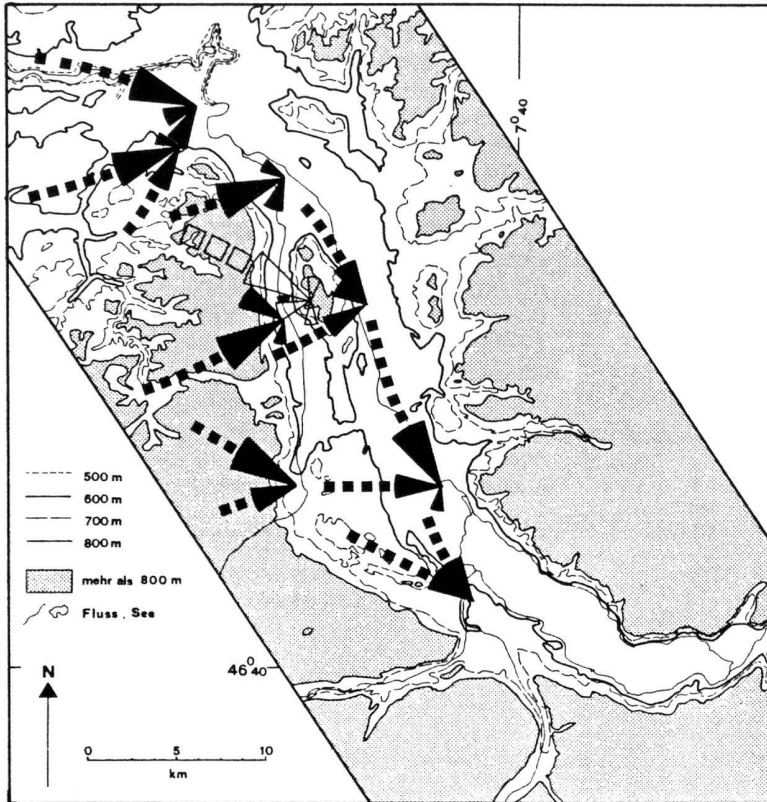
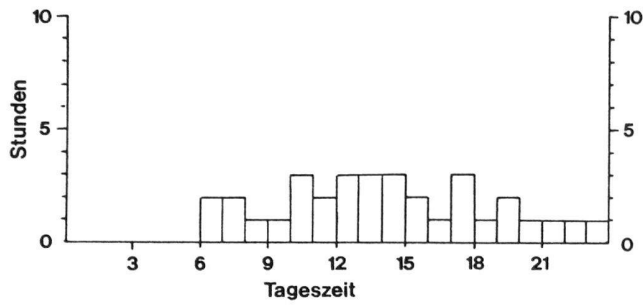
4. Experimentelle Untersuchung der Strömungs- und Schichtungsdynamik


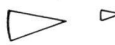

4.1 Das Horizontalwindfeld

BERLINCOURT (1980) untersuchte anhand der statistischen Bearbeitung von 11 zwischen Bern und Spiez eingerichteten Windmessstationen die Strömungsverhältnisse im Aare- und Gürbetal bei konvektiven Hoch- und Flachdruckwetterlagen. Es zeigte sich, dass der von MAURER (1977) in Bern festgestellte Wechsel vom Talwind (tagsüber) zum nächtlichen Bergwind ein regionales Phänomen darstellt und als eigenständiges Regionalwindssystem bemerkenswert stabil ist. In Karte 6 (Anhang) sind einige ausgewählte Windrosen sowie das sich an die topographischen Leitlinien anlehende Berg-Talwindssystem dargestellt. Figur 2 zeigt den Tagesgang und die Häufigkeit des Auftretens dieses «Aaretalwindes». Der strahlungsabhängige und somit jahreszeitlich schwankende Wechsel vom Berg- zum Talwind stellt sich im Mittel zwischen 8 und 11 Uhr ein. In der 1. Talwindphase dominiert der Talwind in der ganzen Region; häufig treten aber zu dieser Zeit auch andere Strömungen auf (v.a. West- und Ostströmungen; siehe Fig. 3 und 4). Die zweite Talwindphase zeigt ein uneinheitliches Bild: Lokal setzt schon der Bergwind ein, wobei die Umkipppzone im Prinzip eine Talabwärtswanderung vornimmt. Diese lokalen Abweichungen komplizieren das Strömungsbild.



Figur 2: Tagesgang und Häufigkeit der bodennahen Strömungstypen im Aare- und Gürbetal bei konvektiven Hoch- und Flachdrucklagen (verändert nach BERLINCOURT, 1981).



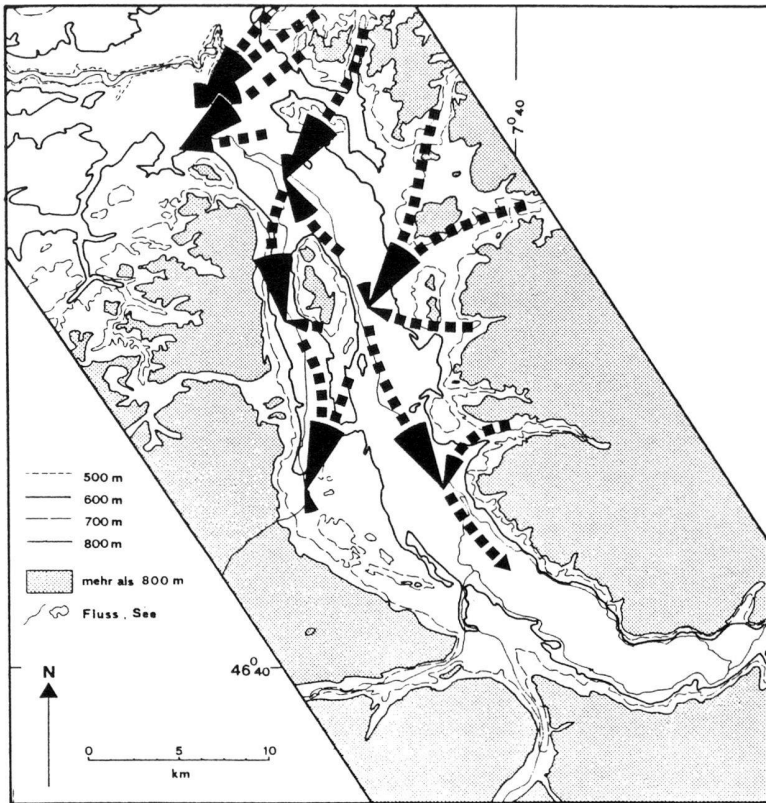
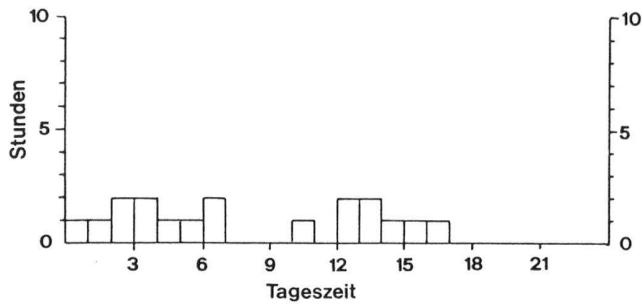
-  Richtung der Winde an den Messstationen
-  Richtung der Winde an der Höhenstation Hostetten/Belpberg
-  Strömungslinien

Die Grösse der Richtungsdreiecke gibt die Häufigkeit der Windrichtungen approximativ an.

Figur 3: Ablenkung der Winde im Aaretal bei neutraler bis labiler Temperaturschichtung und Westströmung in der Höhe (BERLINCOURT, 1980).

mungsmuster beträchtlich. So weist die Region Thun bei Bergwind oft besondere Windverhältnisse auf, da der Kaltluftabfluss aus dem Tal der Zulg nachts eine lokale Gegenströmung aus Talwindrichtung erzeugt. Im Gürbetal setzt der Bergwind schon am Nachmittag ein, da sich dort vermutlich die Luft infolge der Abschattung durch die Stockhornkette früher abkühlt. Das obere Stockental hingegen wird nachts vom regionalen Bergwind kaum erreicht. Gegenüber Richtungswechseln der Höhenwinde ist dieses bodennahe Windsystem wenig empfindlich. Einzig bei Westla-

gen oder Ostlagen mit neutraler Vertikaltemperaturschichtung (d.h. mit $\Delta T/\Delta z \approx 1^\circ\text{C}/100\text{ m}$ Temperaturabnahme) können diese synoptischen Winde bis auf die Talböden durchdringen, wo sie dann das gewohnte Regionalwindssystem und die damit verbundenen Schichtungsverhältnisse der Temperatur ganz markant verändern. Die Figuren 3 und 4 zeigen die erwähnten West- und Ostlagen. Es scheint, dass vor allem die durch die Talöffnungen vom Emmental ins Aaretal einströmende Bise durch die Topographie in die Talwindrichtung umgelenkt und in der ganzen Region wirksam wird.



- Richtung der Winde an den Messstationen
- Strömungslinien

Die Grösse der Richtungsdreiecke gibt die Häufigkeit der Windrichtungen approximativ an.

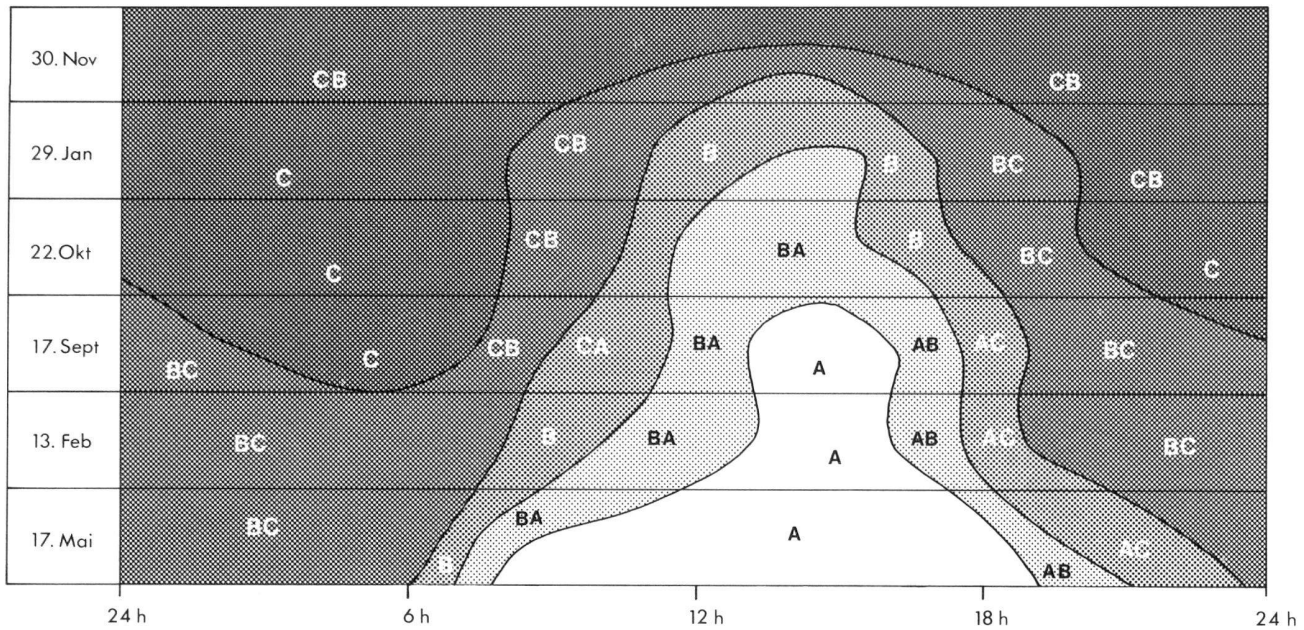
Figur 4: Ablenkung der Winde im Aaretal bei neutraler bis labiler Temperaturschichtung und Ostströmung in der Höhe (BERLINCOURT, 1980).

Da die regionalen Winde bei durchlüftungsschwachen Wetterlagen dominieren, sind sie von besonderer lufthygienischer Bedeutung. Einerseits fördern sie den Luftaustausch, andererseits können sie, infolge ihrer geringen räumlichen Wirksamkeit und ihrer kleinen Geschwindigkeiten (oft unter 2 m/sec), auch Zubringer vorbelasteter, nur wenig verdünnter Luft aus Ballungsräumen wie der Stadt Bern sein. Modellschätzungen, die das mögliche Einzugsgebiet der Regionalwinde abschätzen, sind in Kapitel 5 dargelegt.

4.2 Die vertikale Temperaturschichtung

Neben dem horizontalen Lufttransport ist die Mischungsschichthöhe h^* die zweite wesentliche Grösse zur Bestimmung des Durchlüftungspotentials (siehe Kap. 2). Die vertikale «Durchmischungsfähigkeit» der bodennahen Atmosphäre ist eng mit der vertikalen Temperaturschichtung ver-

* Die Arbeit wird unterstützt durch den Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung



Zunahme des Durchlüftungspotentials			<p>C: starke Bodeninversion; tritt v.a. frühmorgens z.Z. der grössten Abkühlung ein.</p> <p>CB: Höheninversion (absinkende Luft in der Höhe); dieses Profil kann tagelang auftreten</p>
			<p>CB: s. oben</p> <p>BC: Bodennahe Abkühlung während der Nacht; Durchmischung der höheren Schichten (Aufgleiten des Bergwindes auf die Kaltluft?)</p>
			<p>Uebergangsprofile (nur kurzzeitig)</p> <p>CA,B: Erwärmung der bodennahen Luft morgens oder über den Mittag</p> <p>AC: Abendliche Abkühlung der bodennahen Luft</p>
			<p>BA: Neutrale Schichtung in der Höhe: Form der max. Erwärmung, wenn Einstrahlung zum Erreichen des Typs A nicht ausreicht (häufig in Herbst und Winter)</p> <p>AB: Uebergangsprofil am frühen Abend</p>
			<p>A: Labile Grundsicht; tritt im Sommer z.T. recht lange auf (über 12 Std.), im Winter manchmal für kurze Zeit über Mittag (geringe Einstrahlung). Zusammen mit neutraler Schichtung Normalfall bei nicht durchlüftungsgefährdeten Wetterlagen.</p>

*) G: Obergrenze der betrachteten Grundsicht = jene Höhe, wo das Temperaturprofil in eine normale, von jeglichem Tagesgang unbeeinflusste Abnahme übergeht, mindestens aber 500m über Grund angenommen.

Figur 5: Tages- und Jahresabfolge der vertikalen Temperaturverläufe im Aaretal und ihre Bedeutung für die Lufthygiene (verändert nach BAUMGARTNER, 1981).

knüpft. Eine stabile Schichtung mit gleichzeitig schwachen Winden verhindert, dass ein verschmutztes Luftpaket vom Boden weg in die Höhe verwirbelt, mit Frischluft durchmischt und wegtransportiert werden kann.

BAUMGARTNER (1981) untersuchte in allen Jahreszeiten mit einer Reihe von Fallstudien während *durchlüftungsarmer Wetterlagen* die Dynamik der Temperaturschichtung. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Studie sind stark schematisiert in Figur 5 zusammengefasst:

- Beim Aarebecken handelt es sich um ein Gebiet mit häufigen *nächtlichen* Bodeninversionen zu allen Jahreszeiten (Profile C, BC, AC), die manchmal sehr mächtig sein können und die in Karte 6 (Anhang) angegebene Grenze von



Abbildung 1: Blick auf den Belpberg von Allmendigen aus. Das Belpmoos sowie das Aare- und Gürbetal liegen im Dunst des sich auflösenden Kaltluftsees, Belp- und Längenberg ragen daraus hervor (4. Nov. 1981, 9 Uhr, Photo M. Schorer).

750 m ü.M. überschreiten. Bei solchen Situationen ist der vertikale Luftaustausch praktisch unterbunden.

- Diese Bodeninversionen lösen sich im Sommer tagsüber durch die Erwärmung des Bodens vollständig auf, so dass Profil A erreicht wird. Die maximale Mischungsschichthöhe liegt dann sehr hoch (am 17. Mai 1980 nachmittags: auf 1500 m ü.G.), d.h. die vertikale Durchmischung ist effizient.
- Im Herbst und Winter bleibt nach der Auflösung der Bodeninversion (siehe Bild 1) über Mittag oft in der Höhe (auf zirka 1000 m ü.M.) eine isotherme bis inverse Temperaturschichtung bestehen (Profile BA und CA), doch darf in diesen Fällen in der bodennahen Grundsicht im allgemeinen mit einem genügenden vertikalen Austausch tagsüber gerechnet werden. Gefährdet sind in dieser Situation die Höhenlagen im Bereich der Mischungsschichtobergrenze zwischen 850 m und 950 m ü.M. Auf dieser Höhe tritt häufig Hochnebel auf; die stabile Schichtung und die schwachen Winde führen dann zu einer Anreicherung der Luftfremdstoffe in dieser Zone.
- Ein Andauern einer Inversionslage in Bodennähe über mehrere Tage hinweg ist eher selten (Profil CB) und tritt nur im Winterhalbjahr auf.

Die nächtliche Bildung, der Transport und die Lagerung von stabil geschichteter Kaltluft ist stark von der Topographie abhängig. Lokal können daher in den untersten Metern der Atmosphäre recht unterschiedliche Verhältnisse auftreten. Da flächendeckende Feldmessungen viel zu aufwendig sind, wurden ergänzende Modelle entwickelt (Kap. 5).

5. Modellstudien zur Kaltluftdynamik

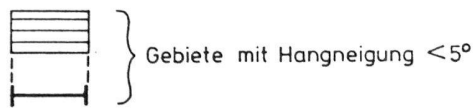
5.1 Topographische Modelle

Die negative Strahlungsbilanz in der Nacht führt bei wolkenlosem Himmel zu einer starken Abkühlung der Erdoberfläche

und der auflagernden Luft. Die spezifisch schwere Kaltluft fließt an den Hängen ab und sammelt sich auf den flachen Talböden und in Mulden. Aufgrund einer Analyse der Geländeparameter Topographie, Bodenrauigkeit und Bodenbedeckung kann das Verhalten der lokalen Kaltluft ohne Feldmessungen nicht zuverlässig vorausgesagt werden (SCHORER, 1983). Die *Kaltluftproduktion* lässt sich aus dem Strahlungsverlust und dem daraus resultierenden Energieverlust abschätzen; der anschließende Abfluss und die Lagerung der Kaltluft ergibt sich mit Hilfe von Ansätzen aus der geomorphologischen Methodik:

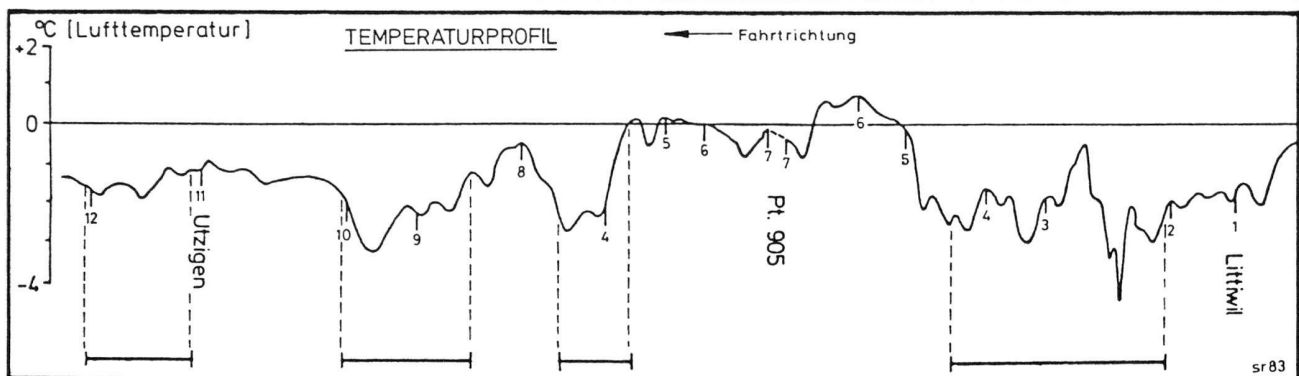
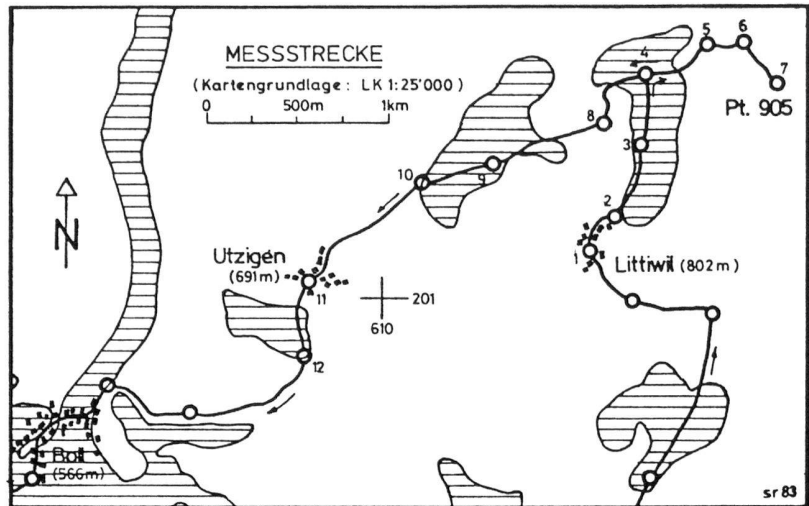
- Eine Hangneigung unter 5° verhindert in der Regel das Abfließen der Kaltluft. Figur 6 zeigt dies anschaulich anhand einer Messfahrt im Raum Worb. Bei gleicher Bodenbedeckung (offenes Land) und gleicher Höhenlage sind die Lufttemperaturen über schwach geneigten Flächen statistisch signifikant tiefer.
- Untersuchungen von SCHNELLE (1956) im Odenwald (BRD) ergaben, dass Talquerschnitte unter 450 m Breite (Engnisse) das Abfließen der «zähflüssigen» Kaltluft verhindern können. Die dadurch im Aaretal gebildeten Stauzonen sind in Karte 6 (Anhang) dargestellt. Diese Kaltluftseen sind aus lufthygienischer Sicht die gefährdetsten Zonen.

LEGENDE:



\circ_1 Referenzpunkt

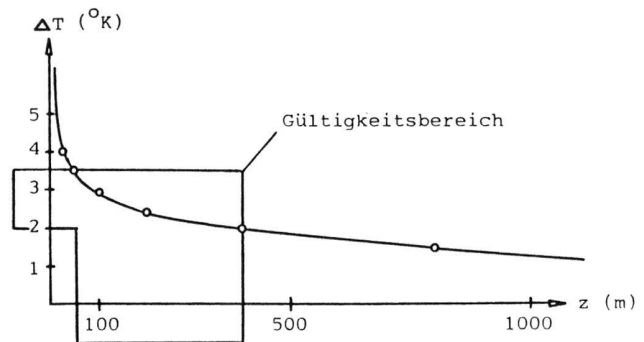
Zeit: 4. Feb. 1982, kurz vor Sonnenaufgang
 Messhöhe: 1.5m über Boden
 Sondage Payerne 00 GMT: Bodeninversion bis ca. 1500m; Höheninversion auf ca. 3500m



Figur 6: Der Zusammenhang zwischen Hangneigung und Lufttemperatur. Resultat einer Messfahrt nordöstlich von Worben (SCHORER, 1983).

- Mit Hilfe eines *digitalen Geländeerasters* (250 m Gitterabstand) wurden die potentiellen Kaltluftabflussrinnen ermittelt. Diese «Kaltluftstrassen» sollten als Frischluftzubringer nicht verbaut werden. Der Massstab der Karte 6 (Anhang) erlaubt die Darstellung dieser Rinnen nicht.

ERNI (1983) errechnete aus den Daten von MATHYS (1976) den mittleren Zusammenhang zwischen der Vertikaltemperaturdifferenz und der Mächtigkeit von Kaltluftmassen (Fig. 7). Je kleiner die Temperaturdifferenz innerhalb eines Kaltluftkörpers (vom Boden bis zur Kaltluftobergrenze) und je grösser die Schichtdicke ist, desto effektiver ist (bei gleichbleibender Horizontalwindgeschwindigkeit!) die Durchmischung der bodennahen Luft. Mit Hilfe geeigneter Parameter (Kaltluftproduktion, Fläche der Kaltluftzugsgebiete, Talquerschnitte, Volumen der von der Topographie eingeschlossenen Luft) wurde im Aaretal eine Gleichgewichtsobergrenze der Kaltluft von 700–750 m ü. M. ermittelt. Kaltluftabflüsse unter diesem Niveau führen zu dynamischen Staus, mächtigere Abflüsse passieren den Untersuchungsraum oberhalb dieser Grenze ungehindert. Theoretische Rechnungen ergeben ausserdem, dass während einer Nacht Luft aus dem ganzen Berner Oberland das Aaretal erreichen kann und die Menge ausreichen würde, das gesamte Luftvolumen unterhalb 900 m ü. M. zweimal zu ersetzen.



Figur 7: Vertikal-Temperaturdifferenz und Schichtdicke von Kaltluftmassen im Aaretal (ERNI, 1983).

5.2 Das «Wassermmodell»

Die grossräumige Kaltluftdynamik wurde mit Hilfe eines physikalisch-hydraulischen Modells simuliert (ERNI, 1983). Dabei wurde aus Kunststoff eine exakte Nachbildung des Aaretals und seiner Umgebung im Massstab 1:50 000 gebaut. Da es sehr aufwendig ist, künstliche Kaltluft darin abfliessen zu lassen, wurde die Luft durch Wasser ersetzt. Mit Hilfe unterschiedlich dichter Salzlösungen von verschiedener Farbe wurde der Abfluss der schweren Kaltluft aus den Tälern des Oberlandes simuliert. Die Schwierigkeit bei solchen Modellen liegt darin, die Wassermengen und -dichten so zu regulieren, dass

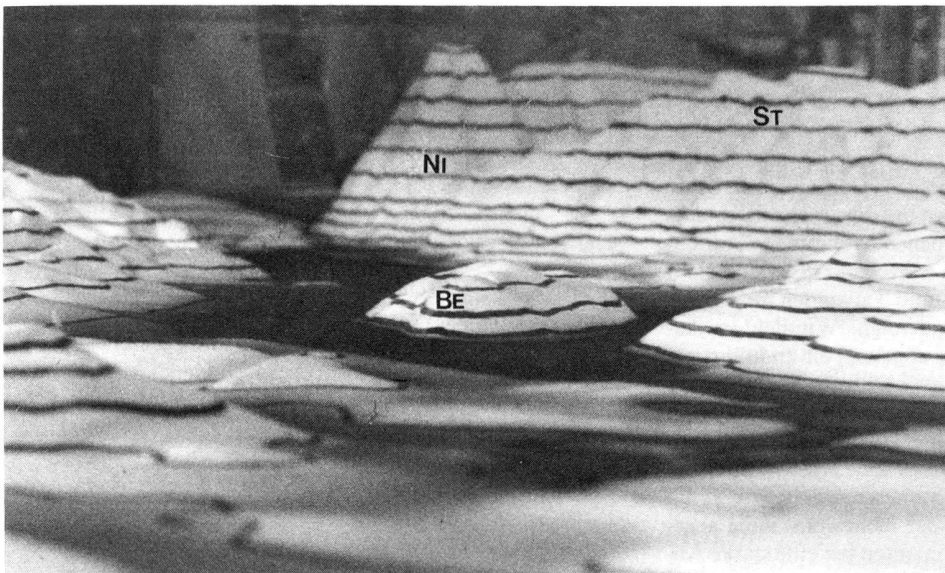


Abbildung 2: Das «Wassermmodell»: Blick von Bern durch das Aare- und Gürbetal hinauf nach Thun, im Hintergrund der Niesen (Ni) und die Stockhornkette (St). Auch hier ragt der Belpberg (Be) aus dem mit gefärbtem Wasser gebildeten Kaltluftsee wie eine Insel heraus (Photo M. Schorer).

möglichst naturähnliche physikalische Verhältnisse herrschen. Bild 2 zeigt den auf Bild 1 abgebildeten Kaltluftsee aus einem ähnlichen Blickwinkel im Modell. Versuche zeigten, dass auch starke Nordwestwinde Mühe haben, die Kaltluft im Belpmoos auszuräumen.

In Bild 3 hat sich der «Kaltluftstrom» bereits über die Stadt Bern hinaus ergossen und fliesst westlich, Richtung Wohlensee, zum kleineren Teil aber auch östlich des Frienisberges, über die Senke von Zollikofen ab. Das Gürbetal profitiert vom Überfließen der Aaretalluft über die Senken im Raum Seftigen. In vielen Modellversuchen war klar zu erkennen, dass die Richtungsträgheit der ausströmenden Simmental-Kaltluft das Stockental im Windschatten «links liegen lässt» und dort die Zufuhr von frischer Luft aus dem Oberland unterbindet. Dieses Modellergebnis deckt sich sehr gut mit der Windrose von Gesigen (Karte 6, Anhang)!

Die Ausbildung von Haupt- und Nebenströmungsachsen lässt die randlichen Gebiete nur wenig am regionalen Luftaustausch teilhaben, während die lufthygienische Gefährdung der beiden Haupttäler gemildert wird (Karte 6, Anhang).

6. Die vorläufige Durchlüftungskarte des Aaretals (Anhang, Karte 6)

Die Durchlüftungskarte des Aaretals stellt die für die Durchlüftungsverhältnisse massgebenden Parameter Horizontalwindfeld und Vertikaltemperaturschichtung kombiniert und flächendeckend dar. Mit Hilfe dieser Karte sollen einheitliche *Durchlüftungsregionen* abgegrenzt werden. Beide Karten zusammen sollen eine erste (quantitative) Beurteilung des Durchlüftungspotentials eines bestimmten Standortes ermöglichen. Die Gültigkeit dieser Klassifikation ist dabei auf die durchlüftungsarmen Wetterlagen, die bodennahe Atmosphäre und die primären Schadstoffe beschränkt.

Die Arbeiten an der Durchlüftungskarte des Aaretals sind noch nicht ganz abgeschlossen. Wir beschränken uns daher auf eine vorläufige synthetische Darstellung der durchlüftungswirksamen Parameter und nehmen zusätzlich den Nachteil einer Schwarz-Weiss-Darstellung in Kauf (Karte 6, Anhang). In flächenhafter Darstellung wird eine Übersicht über fünf wichtige, von der Vertikaltemperaturschichtung abhängige «Austausch»- und «Nebelzonen» gegeben. Als be-

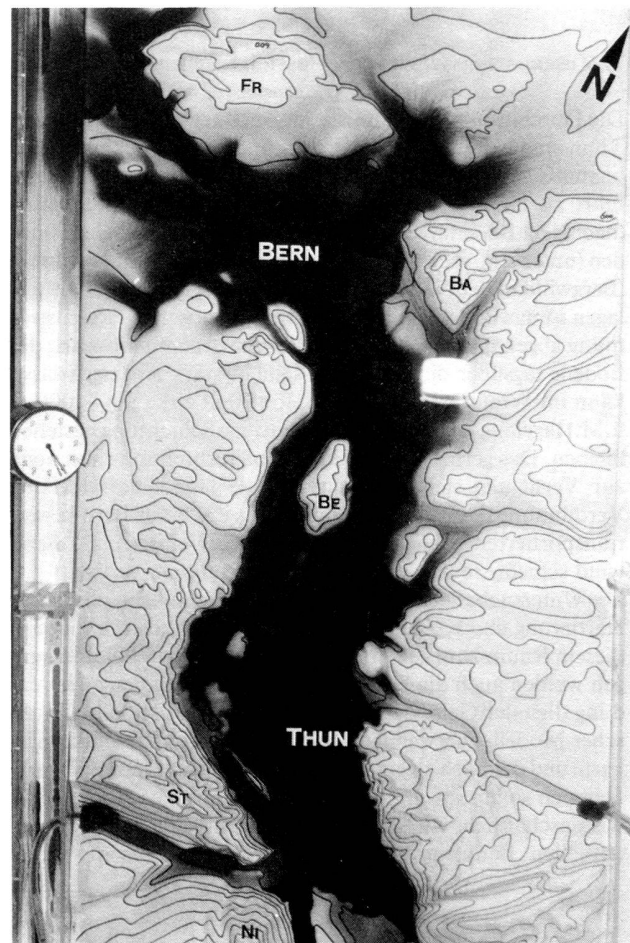


Abbildung 3: Resultat eines Modellversuches: In der Mitte des Bildes ist der Belpberg sichtbar. Der «Kaltluftstrom» hat sich bereits über die Stadt Bern hinaus ergossen und fliesst an Bantiger (Ba) und Frienisberg (Fr) vorbei ins tiefere Mittelland (siehe Text, Photo Th. Erni).

sonders bedeutungsvoll erweist sich dabei der Bereich der Mischungsschichtobergrenze, welcher eine wichtige Grösse für die Berechnung des Durchlüftungspotentials darstellt (siehe Kap. 2). Der untere Teil der Legende stellt in Form von «Strombahnen» das regionale Windsystem dar; Schwachwindrosen (Winde unter 2 m/sec) für ausgewählte Standorte belegen die Strömungsachsen. Das Kärtchen Mitte links soll anhand der Sondagedaten aus Payerne zeigen, dass die durch Jura und Alpen vorgegebenen häufigsten Windrichtungen über dem schweizerischen Mittelland (SW- und NW-Strömungen) gegenüber den Berg- und Talwinden im Aaretal um zirka 90° gedreht sind: Das bodennahe Windfeld im Aaretal ist oft von der Oberströmung abgekoppelt und führt ein «Eigenleben».

Die Durchlüftungskarte zeigt eine klare Unterscheidung in austauschgefährdete Tal- und Muldenlagen einerseits und gut durchlüftete Höhenlagen andererseits. Eine Ausnahme bildet der Bereich der Mischungsschichtobergrenze, wo (v.a. im Winter, wenn die Inversion tagsüber nicht vollständig abgebaut wird) die Schadstoffzufuhr von unten her eine starke Anreicherung an Luftfremdstoffen bewirken kann. Das regionale Windsystem bringt (zumindest im Bereich der Strömungsachsen) den breiten Talböden eine Verbesserung des Durchlüftungspotentials; Beobachtungen im Belpmoos lassen allerdings vermuten, dass die regionalen Winde auf die gestaute Kaltluft aufgleiten und diese nur mit Mühe ausräumen können.

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Durchlüftungsverhältnisse im Aaretal zwischen Bern und Thun sind bei konvektiven Hoch- und Flachdrucklagen problematisch. Die Beckenform des Aaretal/Gürbetal-Gebietes führt zu häufigem Auftreten von tiefliegenden Inversionen (nachts oft Bodeninversionen) mit bodennah schwachen Winden (unter 2 m/sec), die im Tagesgang ihre Richtung wechseln (Bergwind in der Nacht, Talwind am Tag). Bei diesen Wetterlagen ist das Bodenwindfeld von der synoptischen Höhenströmung abgekoppelt. Während im Sommer die Erwärmung des Bodens tagsüber die Mischungsschicht stark ansteigen lässt, kann im Winterhalbjahr in der Höhe (auf zirka 900–1000 m ü. M.) tagelang eine isotherme bis inverse Schichtung bestehen bleiben. Das geringe für die Schadstoffausbreitung dann noch zur Verfügung stehende Luftvolumen lässt eine wirksame Verdünnung der mit dem Talwind aus der Stadt Bern herantransportierten Schadstoffe kaum zu; der einsetzende Bergwind schiebt sie wieder an ihren Ursprungsort zurück.

Die Untersuchungen im Aaretal haben eine flächendeckende Kartierung und Klassierung der Durchlüftungsverhältnisse in diesem Raum zum Ziel. Neben herkömmlichen Feldmessungen werden auch die Ergebnisse aus Modellstudien (Verwendung digitaler GeländeraSTER, Simulation mit Hilfe hydraulischer Modelle) verwendet. Die Aussagen der Durchlüftungskarte und der noch zu erarbeitenden Karte der Durchlüftungsregionen sollen sowohl für Planer und Politiker, als auch für wissenschaftliche Zwecke anwendbar sein. Um jedoch die potentiellen Benutzer besser anzusprechen, müssen weitere

Möglichkeiten der Darstellung (v.a. in der 3. Dimension) geprüft werden.

Es ist geplant, die im Aaretal entwickelte Methodik zur Erarbeitung einer «Durchlüftungskarte der Schweiz» einzusetzen.

8. Verdankungen

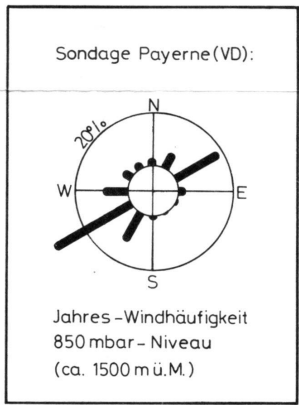
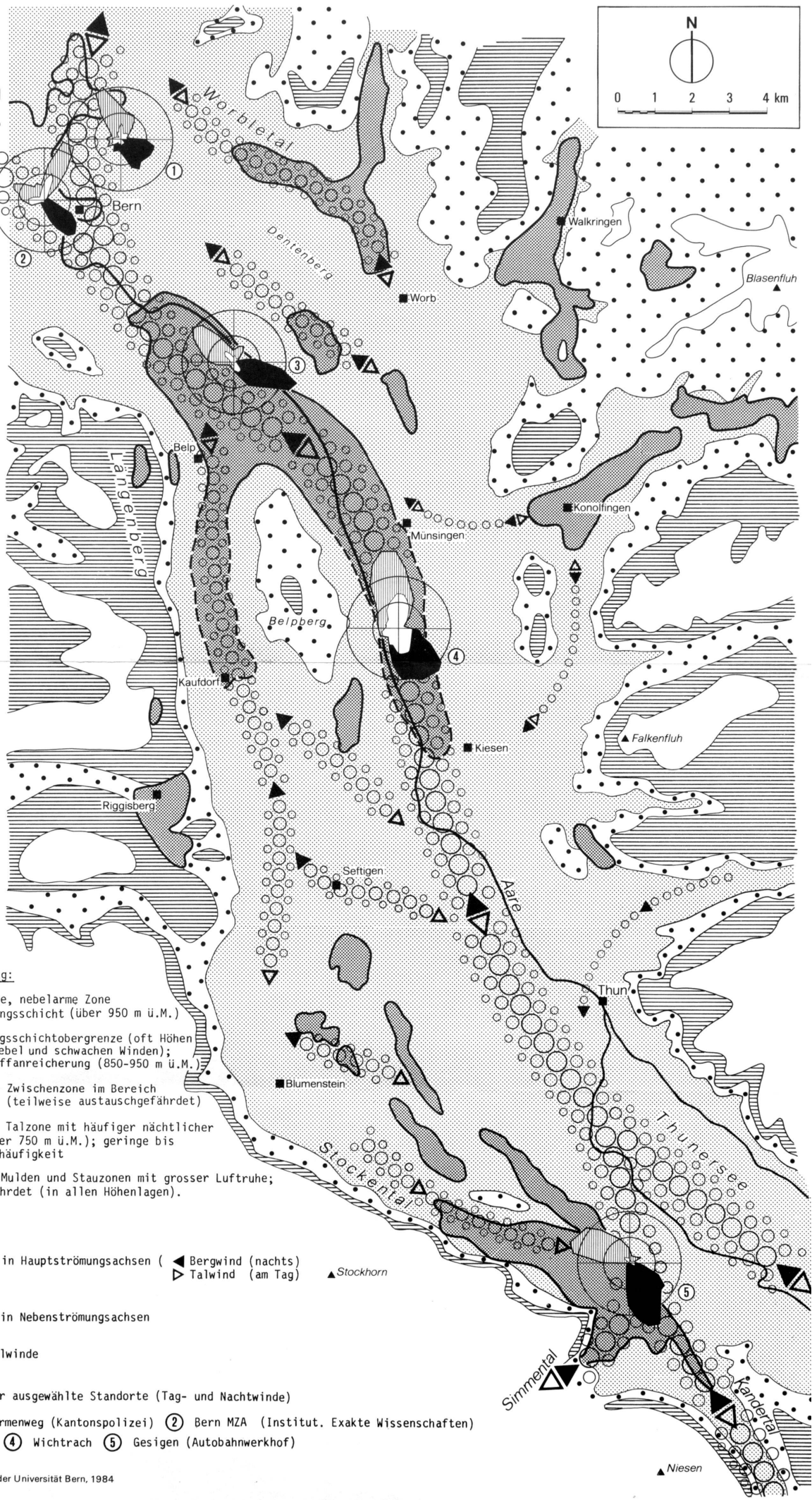
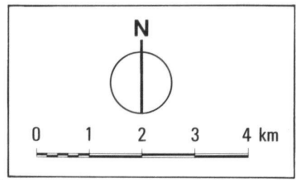
Die Verfasser danken herzlich:

- dem Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung für die Finanzierung des Durchlüftungsprojektes;
- dem Geographischen Institut der Universität Bern (insbesondere den Herren Prof. B. Messerli, Prof. P. Nydegger und Dr. M. Winiger) für die finanzielle und fachliche Unterstützung;
- den Herren J. Engel und A. Brodbeck für graphische Arbeiten;
- Frau E. Schüpbach für die Reinschrift des Manuskripts.

Bibliographie

- BAUMGARTNER, M., 1981: Die Durchlüftung des Aaretals zwischen Bern und Thun bei ausgewählten Wetterlagen. Diplomarbeit Geogr. Institut Bern, 168 S.
- BERLINCOURT, P., 1980: Les conditions de ventilation dans les vallées de l'Aar et de la Gurbe lors de situations météorologiques convectives de haute pression et de répartition indifférente des pressions. Diplomarbeit Geogr. Institut Bern, 133 S.
- BERLINCOURT, P., 1981: Die Windverhältnisse im Aare- und Gürbetal bei konvektiven Hoch- und Flachdruckwetterlagen. Mitteilungen d. Naturforsch. Ges. in Bern, 38. Band, 65–84.
- ERNI, T., 1983: Die Dynamik von Dichteströmen. Simulation des nächtlichen Kaltluftabflusses im Aaretal zwischen Thun und Bern mit Wasser in einem physikalischen Reliefmodell. Diplomarbeit Geogr. Institut Bern, 88 S.
- FUHRER, J., 1980: Der Ozongehalt der bodennahen Luftschicht in der Region Bern. Wasser, Energie, Luft, 5/6, 167–171.
- MAEDER, F., 1968: Untersuchung über die Windverhältnisse in Bodennähe bei verschiedenen Witterungslagen. Veröffentl. d. Sz. Meteorol. Zentralanstalt, Heft 9, 42 S.
- MATHYS, H., 1976: Die Temperaturverhältnisse in der Region Bern. Beiträge z. Klima der Region Bern, Nr. 3, 136 S.
- MAURER, R., 1977: Das regionale Windgeschehen. Beiträge z. Klima der Region Bern, Nr. 2, 153 S.
- MESSERLI, P. und MAURER, R., 1973: Windverhältnisse im Raum Bern. Jahrbuch d. Geogr. Ges. Bern, Bd. 50, 54–59.
- REMSBERG, E.E. und WOODBURY, G.E., 1983: Stability of the surface layer and its relation to the dispersion of primary pollutants in St. Louis. J. Climate Appl. Meteor., 22, 244–255.
- SCHNELLE, R., 1956: Ein Hilfsmittel zur Feststellung der Höhe von Frostlagen in Mittelgebirgstälern. Met. Rundschau, 9, 180–182.
- SCHORER, M., 1983: Theoretische Abschätzung der Durchlüftung aufgrund von Geländeparametern. Diplomarbeit Geogr. Institut Bern, 181 S.
- SCHÜEPP, M., 1968: Kalender der Wetter- und Witterungslagen von 1955 bis 1967 im zentralen Alpengebiet. Veröffentl. der Sz. Met. Zentralanstalt, Nr. 11, 43 S.
- WANNER, H., 1979: Zur Bildung, Verteilung und Vorhersage winterlicher Nebel im Querschnitt Jura–Alpen. Geogr. Bernensia, G 7, 240 S.
- WANNER, H., 1983: Das Projekt «Durchlüftungskarte der Schweiz» – Methodik und erste Ergebnisse. Inform. u. Beiträge z. Klimaforschung, 18, 66 S.

Vorläufige Durchlüftungskarte des Aaretals zwischen Bern und Thun für durchlüftungsschwache Wetterlagen

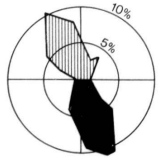


Temperaturschichtung:

- Austauschbegünstigte, nebelarme Zone oberhalb der Mischungsschicht (über 950 m ü.M.)
- Bereich der Mischungsschichtobergrenze (oft Höheninversion mit Hochnebel und schwachen Winden); starke Luftfremdstoffanreicherung (850-950 m ü.M.)
- Warme und nebelarme Zwischenzone im Bereich der Hangwindssysteme (teilweise austauschgefährdet)
- Austauschgefährdete Talzone mit häufiger nächtlicher Bodeninversion (unter 750 m ü.M.); geringe bis mittlere Bodennebelhäufigkeit
- Kaltluftgefährdete Mulden und Stauzonen mit grosser Luftruhe; stark austauschgefährdet (in allen Höhenlagen).

Windfeld:

- Berg- und Talwinde in Hauptströmungsachsen (Bergwind (nachts) Talwind (am Tag) ▲ Stockhorn
- Berg- und Talwinde in Nebenströmungsachsen
- Lokale Berg- und Talwinde



Schwachwindrosen für ausgewählte Standorte (Tag- und Nachtwinde)

- ① Bern Schermenweg (Kantonspolizei) ② Bern MZA (Institut. Exakte Wissenschaften)
- ③ Belpmoos ④ Wichtrach ⑤ Gesigen (Autobahnwerkhof)