

Zu 1364.

Berichte des Deutschen Wetterdienstes

Nr. 130
(Band 17)



DK 551.584.31:551.588.7:625

Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten

von

ERWIN KING

(Mit 5 Tabellen und 32 Abb. im Text)

Die Untersuchungen wurden mit Forschungsmitteln des Bundesministeriums für
Verkehr (Forschungsauftrag 3.208) durchgeführt.

Offenbach a. M. 1973

Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung, Abstract	5
1. Einleitung	6
2. Vorbereitung und Durchführung der Messungen	6
2.1. Das Meßprogramm	6
2.2. Meßorte	7
2.3. Meßanordnung	7
2.3.1. Der Kaltluftstauzaun	7
2.3.2. Messung der Temperaturverteilung	8
2.3.3. Beobachtung und Messung der Kaltluftströmung	8
2.3.4. Messungen an Stauzaun-Öffnungen	9
2.3.5. Messungen an Dammdurchlässen	9
3. Meßergebnisse	9
3.1. Meßort A	9
3.1.1. Nächtliche Kaltluftströmung und Temperaturverteilung ohne Stauzaun	9
3.1.2. Nächtliche Kaltluftströmung und Temperaturverteilung bei geschlossener Folienwand	10
3.1.3. Kaltluftströmung an Stauzaun-Öffnungen verschiedener Durchlaßbreite	11
3.1.4. Schlußfolgerungen aus den Messungen im Gelände A	13
3.2. Meßort B	13
3.2.1. Stärke, Andauer und Häufigkeit der nächtlichen Kaltluft	14
3.2.2. Strömungsprofile und Temperaturverteilung am geschlossenen Stauzaun	14
3.2.3. Kaltluftströmung und Temperaturverteilung bei teilweise geöffnetem Stauzaun	15
3.2.4. Schlußfolgerungen aus den Messungen im Gelände B	15
3.3. Meßort C	16
3.3.1. Kaltluftströmung zu Beginn einer Strahlungsnacht	16
3.3.2. Kaltluftströmung und Temperaturverteilung bei voll geöffnetem und geschlossenem Stauzaun	16
3.3.3. Kaltluftströmung und Temperaturverteilung bei teilweise geöffneter Folienwand	17
3.3.4. Schlußfolgerungen aus den Messungen im Gelände C	18
4. Vergleichende Analyse der Kaltluftentstehung und des Kaltluftflusses an den 3 Meßorten	18
4.1. Geschwindigkeit der Kaltluft am Hang	19
4.2. Abflußmenge der Kaltluft über der Talsohle	19
4.3. Abhängigkeit des Kaltluftflusses in Durchlässen von der Hindernishöhe	20
4.4. Zusammenfassung der Meßergebnisse	20
5. Messungen an Dammdurchlässen	21
5.1. Meßprogramm und Durchführung	21
5.2. Meßergebnisse	22
5.3. Einfluß von Dämmen in ebenem Gelände auf das Temperaturfeld der Umgebung	23
6. Schlußfolgerungen aus den gesamten Meßergebnissen	24
7. Literatur	24

Anschrift des Verfassers:

Dr. E. King, 53 Bonn-Bad Godesberg, Mittelstraße 121

Zusammenfassung

Die bei der Querung von Tälern durch Verkehrsstraßen erforderlichen Dämme verursachen durch den Anstau der nächtlichen, im Tal abfließenden Kaltluft eine erhöhte Frostgefährdung der dort angebauten Kulturen. Da über das Ausmaß dieser Klimaverschlechterung keine allgemein gültigen Angaben vorliegen, wurden in Eifeltälern künstliche Hindernisse errichtet und in deren klimatischem Einflußbereich während der Frühjahrs- und Herbstmonate von 1968–71 meteorologische Messungen durchgeführt. Dabei wurde in Strahlungsnächten der Temperaturverlauf sowie der Fluß und Anstau der bodennahen Kaltluft erfaßt, und zwar sowohl bei geöffnetem als auch ganz oder teilweise geschlossenem Hindernis. Die Meßergebnisse beziehen sich auf den Staubereich der Kaltluft hinsichtlich seiner Ausdehnung und seines Temperatureffekts in Abhängigkeit von Kaltluftzu- und abfluß sowie der Höhe des Hindernisses und seiner Durchlässe. Aus der Zusammenfassung aller Messungen (einschließlich der an bereits vorhandenen Dämmen durchgeführten) ließen sich Beziehungen zwischen der Orographie einerseits und der Geschwindigkeit sowie Menge der abfließenden Kaltluft andererseits ebenso ableiten, wie zwischen Durchlaßgröße sowie Dammhöhe und Abflußwirkung einschließlich Temperatureffekt. Diese Beziehungen ermöglichen eine Abschätzung der kleinklimatischen Auswirkung von Dammbauten und deren Durchlässe. Abschließend werden Ergebnisse von Temperaturmessungen an einem Hindernis im ebenen Gelände mitgeteilt.

Abstract

Raised ground or banks, provided for the tracing of roads across narrow, but rather flat valleys, necessarily dam up and accumulate the cold air flowing off these valleys by night, increasing thus locally the risk of frost within cultivated areas. As there are not generally accepted data about the resulting deterioration of agroclimatic conditions, artificial barriers (curtainlike screens of foils stretched on what may be called a tubular steel scaffolding), simulating the just mentioned "dams", have been set up in some valleys of the Eifel and meteorological measurements carried out within the microclimatically influenced areas during spring and autumn 1968–71. In nights of intensive radiation the variation of temperature, the flow and the damming up of the cold air in the lowest surface layer were observed and recorded under different conditions (artificial barriers open, partly or absolutely closed). The purpose of these experiments was to describe quantitatively the effects of the cold air flow and of the height of the barriers and the width of the openings on the extent of and the temperatures in the dammed up cold air. Summarizing and comparing the results of all measurements (including those carried out within the areas of existing traffic causeways), relationships were derived which relate the orography of the given area to the velocity and quantity of the running off cold air as well as the width of the openings and the height of the barriers to the runoff and the resulting temperatures. These relationships enable the evaluation of microclimatic effects caused by the banks under discussion (constructed for traffic purposes). To round off this final report results are presented of temperature measurements taken in the vicinity of similar barriers set up in a plane area.

1. Einleitung

Der heutige Straßenverkehr verlangt als Folge der großen und immer weiter zunehmenden Verkehrsdichte sowie der hohen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge eine diesen Erfordernissen angepaßte Straßenführung. Sowohl im Hinblick auf die Bewältigung des hohen Verkehrsaufkommens als auch auf die Verminderung der Unfallgefährdung dürfen die Fahrbahnen solcher Fernverkehrsstraßen weder enge Kurve noch größeres Gefälle aufweisen. Bei stark gegliederten orographischen Verhältnissen, wie sie insbesondere in den deutschen Mittelgebirgs- und Hügellandschaften bestehen, erfordert eine solche Straßenführung meist beachtliche bauliche Maßnahmen wie Schaffung von Einschnitten, Brückenbauwerken und Aufschüttungen. Während durch Bergeinschnitte zwar Abflußstraßen der nächtlichen Kaltluft geschaffen werden können, deren Auswirkungen im Einzelfall sowohl positiv als auch negativ sein können, üben Brückenbauwerke keinen merklichen Einfluß auf die klimatischen Verhältnisse der angrenzenden Geländeabschnitte aus. Im Gegensatz hierzu ist diese Möglichkeit bei Aufschüttungen durchaus gegeben. So können bei der Querung enger Täler, deren Flanken steiler als das für die Trasse zulässige Höchstgefälle sind, erforderlich werdende Dammbauten einen beachtlichen Einfluß auf die Klimaverhältnisse der Umgebung ausüben. Hiervon wird im wesentlichen der oberhalb (d. h. sich talaufwärts erstreckende) vom Damm gelegene Geländeabschnitt betroffen, da die sich in klaren und windstarken bzw. windstillen Nächten im gesamten Tal bildende und infolge ihrer Schwerkraft talabwärts strömende bodennahe Kaltluft an dem als Barriere wirkenden Damm gestaut wird. Da innerhalb dieses Anstaubereiches die Lufttemperaturen wegen des fehlenden, bzw. verminderten Austauschs in solchen Nächten vielfach stärker absinken als dies im ungestörten Zustand der Fall ist, ergibt sich somit eine durch den Dammbau verursachte erhöhte Nachtfrostgefährdung für die im Staubereich angebauten Kulturen. Daß sich die damit einhergehende Erhöhung der Frosthäufigkeit, Verschärfung der einzelnen Fröste und Verkürzung der frostfreien Periode besonders auf die Güte, Menge und das Risiko des Ertrags von früh- und spätfrostgefährdeten Kulturen auswirkt, aber auch bei nicht frostgefährdeten Kulturen durch Verschlechterung der ökologischen Bedingungen Ertragsdepressionen hervorruft, braucht nicht näher erläutert zu werden.

Da bislang gesicherte Meßergebnisse weder über den Flächenbereich noch über das Ausmaß solcher durch Dammbauten verursachten Klimaänderungen vorhanden sind, erwies sich die nach dem Verursacherprinzip für Umweltschäden erforderliche Schadensregulierung zwischen Bauträger und den betroffenen Anliegern als für beide Seiten höchst unbefriedigend. Die exakte Ermittlung der im Einzelfall durch den Damm verursachten Klimaänderungen bzw. -verschlechterungen und der daraus resultierenden Ertragseinbußen ist zwar mittels agrarmeteorologischer Meßverfahren grundsätzlich möglich, erfordert jedoch gleichartige, sich über einen längeren Zeitraum erstreckende Messungen sowohl vor als auch nach der Aufschüttung des Dammbauwerks. Da aus personellen, finanziellen und vor allem zeitlichen Gründen solche mit erheblichem Aufwand verbundene Untersuchungen i. A. unterblieben, bildeten lediglich die

in Einzelfällen (und daher nicht für den langjährigen Durchschnitt repräsentativen) getroffenen Schadensfeststellungen bzw. meist sogar nur die Schadensvermutungen seitens der sich betroffen fühlenden Anlieger die völlig unzureichenden Argumente für eine Schadensersatzforderung. Andererseits konnten bei der hinsichtlich der Baukosten meist gravierenden Entscheidung zwischen Brückenbauwerk und Damm (mit oder ohne Durchlässe) geländeklimatische Gesichtspunkte mangels fehlender Unterlagen und Kenntnisse nicht berücksichtigt werden.

Das Ziel der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen bestand deshalb darin, allgemein gültige Erkenntnisse über den Bereich und das Ausmaß der durch Dammbauten verursachten Klimaänderungen zu gewinnen, und zwar in Abhängigkeit von der Talform, der Höhe und Breite des Damms sowie seiner Durchlässe und des Einzugsgebiets nebst den Abflußverhältnissen der nächtlich gebildeten Kaltluft. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse sollte dann eine Beurteilung und hinreichend genaue Abschätzung der durch solche Dämme zu erwartenden Änderungen des Kleinklimas auf Grund einer durch einen erfahrenen Agrarmeteorologen durchgeführten Geländebesichtigung und Planeinsichtnahme möglich sein und somit die Unterlage sowohl für evtl. durchzuführende bauliche Anpassungsmaßnahmen als auch für eine ggf. erforderliche Schadensregulierung abgeben.

2. Vorbereitung und Durchführung der Messungen

Nach einer gemeinsam von Vertretern der an der Durchführung des Forschungsprojektes beteiligten agrarmeteorologischen Dienststellen im Mai 1968 durchgeführten Geländebesichtigung wurden die Grundzüge des Meßprogramms erarbeitet und die sich daraus ergebenden technischen (Bedarf und Beschaffung von Instrumenten und Gerät), personellen und finanziellen Maßnahmen festgelegt.

2.1. Das Meßprogramm

Da, wie bereits erwähnt, die Erfassung der Auswirkung von Dammbauten in Tälern auf das Kleinklima der Umgebung sowohl vor als auch nach Errichtung solcher Dämme Untersuchungen zwingend erfordert, kamen bereits vorhandene Objekte hierfür nicht in Frage; auch geplante Objekte schieden aus Gründen des Zeitbedarfs und der Entfernungen sowie der unzureichenden Auswahlmöglichkeit unter verschiedenartigen Talformen aus. Als beste Lösung wurde daher die Errichtung von künstlichen Hindernissen gewählt; hierdurch konnte die Auswirkung eines Damms auf das Verhalten der nächtlichen Kaltluft weitgehend naturgetreu simuliert werden. Die Auswirkung des Damms auf die Lufttemperaturen im bodennahen Bereich sollte mittels strahlungsgeschützten Thermometern in geeigneter Verteilung oberhalb und unterhalb des Hindernisses erfolgen. Ferner waren Messungen von Richtung und Geschwindigkeit der nächtlichen Kaltluftbewegung in der Umgebung des Hindernisses vorgesehen, wobei die vielfach unter der Anlaufgeschwindigkeit üblicher Anemometer liegenden Geschwindigkeitsbereiche den Einsatz spezieller Meßgeräte erforderten. Da bei den weiterhin geplanten Untersuchungen über die Wirksamkeit von

Hindernis-Durchlässen auf den Kaltluftabfluß die natürlichen Verhältnisse nur unzureichend nachgeahmt werden konnten (fehlender Einfluß der Reibung an den Innenseiten der Durchlässe) sollten ergänzende Messungen an entsprechenden Objekten durchgeführt werden.

Die Untersuchungen sollten sich einerseits auf möglichst verschiedenartige Täler hinsichtlich des Kaltfluteinzugsbereichs, der Talform und der Abflußbedingungen für die Kaltluft erstrecken, wobei andererseits weitgehend gleichartige Verhältnisse in bezug auf die Kaltluftentstehung sowie die Reibungsverhältnisse (Rauhigkeit der Oberfläche) gefordert wurden, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander zu ermöglichen.

Da Messungen im Winter kaum repräsentativ für die Zeit der Früh- und Spätfrostgefährdung sind (weil eine Schneedecke völlig andere Voraussetzungen für die Entstehung nächtlicher Kaltluft schafft) und sich Messungen im Sommer wegen der kurzen Nächte ebenso wie aus Gründen der landwirtschaftlichen Nutzung des Meßgeländes verbieten, kamen hierfür allein windstille, bzw. windstille Nächte mit merklicher Ausstrahlung, d. h. weitgehend wolkenfreiem Himmel, in den Frühjahrs- und Herbstmonaten in Frage.

2.2. Meßorte

Da die Überquerung sehr tief eingeschnittener Täler auf Brückenbauwerken erfolgt, kamen als Untersuchungsobjekte nur räumlich relativ eng begrenzte Täler in Betracht, bei welchen die Einschnitttiefe in einem vernünftigen Verhältnis zur Höhe des zu errichtenden Hindernisses stand. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1. gestellten Forderungen hinsichtlich der Oberfläche und der Rauhigkeit wurden insgesamt 3 Nebentäler der Kyll östlich von Losheim (Eifel) ausgewählt. Alle diese Täler wurden im Zuge der nach 1960 durchgeführten Flurbereinigung weitgehend ausgeräumt, d. h. von Flurgehölzen und Strauchwerk befreit. Sie werden fast ausschließlich weidewirtschaftlich genutzt. Somit waren die Voraussetzungen zu einem Vergleich der Meßergebnisse hinsichtlich der Entstehung sowie des Strömungswiderstandes der nächtlichen Kaltluft weitgehend erfüllt.

Meßgelände A (Hartenbachtal)

Es handelt sich dabei, wie Abb. 1 zeigt, um ein relativ flaches, von WSW nach ENE verlaufendes Tal, dessen Hänge eine Neigung zwischen 5 und 9 Grad aufweisen, wobei die Talschultern dort, wo das Hindernis (Folienwand) aufgestellt wurde, die Talsohle um 16 m (nach SSE) bzw. 25 m (nach NNW) überragen. Die Neigung der vom begradigten Hartenbach durchflossenen Talsohle beläuft sich auf nur 1,5 Grad. Der V-förmige, am Auf-



Abb. 1
Meßgelände A von Süden aus gesehen.

stellungsort der Folienwand rund 500 m breite Talquerschnitt verengt sich weiter talabwärts zunehmend, wobei an der engsten, rund 1200 m von der Folienwand entfernten Stelle das Tal nach N abbiegt. Im Zusammenhang mit der geringen Höhendifferenz von nur 32 m zwischen Neben- und Haupttal (Einmündung in 2,5 km Entfernung vom Hindernis) ließen diese orographischen Verhältnisse auf einen relativ schlechten Abfluß der nächtlichen Kaltluft schließen. Das für die Folienwand maßgebliche Kaltfluteinzugsgebiet wurde im Süden und Norden durch Höhenrücken, im Westen durch einen hohen Bahndamm begrenzt und umfaßte 24,8 ha.

Meßgelände B

Hierfür wurde der obere Talabschnitt eines kleinen, von SW nach NE verlaufenden, etwa 200 m breiten Seitentälchens des Kylltals nordwestlich der Verbindungsstraße Scheid-Frauenkron ausgewählt. Bei einer Neigung der Talsohle von 8 Grad und einer Hangneigung von 5 Grad wird die Talsohle dort, wo die Folienwand errichtet wurde, nur um 5 m (nach SE) bzw. um 8 m (nach NW) von den Talschultern überragt. Da dieses Tal bei einer Höhendifferenz von 60–80 m zwischen dem Kaltfluteinzugsgebiet und der Einmündung in das Kylltal (auf eine Länge von 600 m) nur im unteren Teil Hindernisse in Form von Bebauung aufweist, können hier die Abflußverhältnisse als sehr gut bezeichnet werden; das Kaltfluteinzugsgebiet umfaßt dabei nur 4,8 ha, ist also wesentlich kleiner als im Fall A.

Meßgelände C

Dieses, sich südöstlich an das Meßgelände B anschließende Tal weist an seiner tief eingeschnittenen, von SW nach NE abfallenden Sohle ein Gefälle zwischen 6 Grad im oberen Bereich und 8 Grad dicht oberhalb der Folienwand auf. Bei einer mittleren Hangneigung von 9 Grad liegt die nordwestliche Talschulter um 14 m, die südöstliche um 36 m über der Talsohle am Aufstellungsort der Folienwand. Von einer kleinen Waldparzelle und einem Gehöft im obersten Einzugsgebiet sowie der Bebauung im Bereich der Einmündung in das Kylltal abgesehen, ist das Tal frei von Hindernissen, so daß trotz einer allmählich im unteren Talabschnitt erfolgenden Talbiegung von NE auf N bei einem Höhenunterschied von 50–80 m zwischen Kaltfluteinzugsbereich und Haupttal immer noch mit guten Abflußbedingungen gerechnet werden konnte. Das Einzugsgebiet der nächtlichen Kaltluft nimmt eine Fläche von 8,4 ha ein.

2.3. Meßanordnung

Mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen Meßanordnung sollte sowohl das Verhalten der nächtlichen Kaltluft an Hindernissen als auch die Auswirkung derselben auf die bodennahe Temperaturverteilung möglichst eingehend erfaßt werden.

2.3.1. Der Kaltluftstauzaun

Das Gerippe des Stauzauns bildeten teleskopartig ausziehbar Stahlrohre, wie sie im Baugewerbe bei der Abstützung von Betondecken Verwendung finden. Nach horizontaler Überspannung des Tals mit einem Draht, dessen Abstand von der Talsohle 5,0 m betrug, wurden diese Rohre im seitlichen Abstand von 4,0 m unter dem Draht eingepaßt und sturmsicher verankert. Die seitlich an die Rohre dicht anschließenden Kunststoffolien konnten mittels Zugvorrichtungen zwischen den Trägern rasch empor gezogen oder niedergelegt werden. Somit konnten bei einer Gesamtbreite des Stauzauns von 100–110 m, Kaltluftdurchlässe von 4, 8, 12 usw. Metern Breite beliebig simuliert werden. Abb. 2 zeigt den geschlossenen Stauzaun.

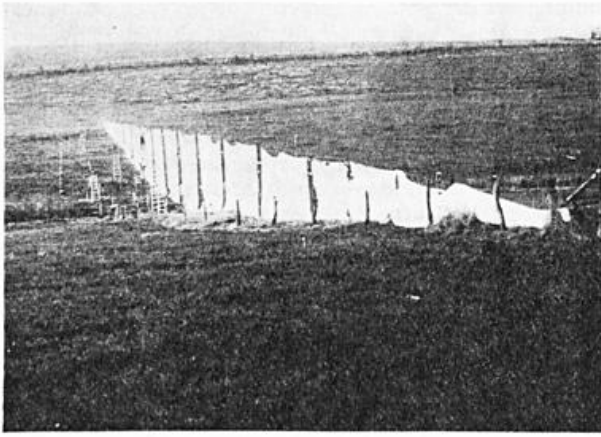


Abb. 2
Geschlossene Folienwand (Kaltluftstauzaun).

Um die Auswirkung der Höhe des Stauzauns auf den Anstaubereich sowie den Abfluß der Kaltluft an Durchlässen zu untersuchen, wurde im Meßgelände C über den beschriebenen Stauzaun zusätzlich ein weiterer Draht in einer Höhe von 10,0 m über der Talsohle gespannt. Mit Hilfe einer über den 10 m hohen Mittelmast geführten Zugvorrichtung konnte nun hier außerdem von beiden Seiten je ein geschlossener Folienvorhang von 5,0 m Höhe über die untere Folienwand gezogen und in der Mitte geschlossen werden. Auf diese Weise entstand ein Stauzaun von maximal 10 m Höhe. Die davon unbehindert im unteren Teil des Stauzauns möglichen Durchlässe entsprachen damit den natürlichen Verhältnissen an einem Damm noch weit besser. Bei einer Gesamtfläche von ca. 650 m² erwies sich diese Anlage als recht aufwendig hinsichtlich ihrer Bedienung und als sehr windgefährdet.

2.3.2. Messung der Temperaturverteilung

Oberhalb des Stauzauns wurden in parallel dazu verlaufenden Meßprofilen Temperaturmeßstellen in 0,7 m Höhe über der Grasoberfläche errichtet. Jede dieser Meßstellen war mit einer Geigerschen Strahlungsschutzvorrichtung versehen, unter der sich je ein Minimum- und ein Widerstandsthermometer befanden. Mit Hilfe der Widerstandsthermometer konnte der aktuelle Temperaturgang in Strahlungsnächten laufend verfolgt werden. Die Registrierung erfolgte mit 6-Farben-Punkt-drucker bzw. Kompensographen. Die Minimum-Thermometer dienten sowohl zur raschen Erfassung von Temperaturänderungen während des Meßprogramms als auch dazu, die Verteilung der nächtlichen Tiefsttemperaturen in 0,7 m Höhe in Zeitabschnitten zwischen den einzelnen Meßnächten zu ermitteln. Um auch Aufschlüsse über den vertikalen Temperaturverlauf zu erhalten, wurde ein Teil dieser Meßstellen mit weiteren strahlungsgeschützten Widerstandsthermometern, die an verspannten Stahlrohrmasten in 2,0 und 4,0 m Höhe über Grund an Auslegern angebracht waren, versehen. Da anzunehmen war, daß die stärksten Auswirkungen der gestauten Kaltluft knapp vor dem Stauzaun auftreten, wurden die Meßstellen innerhalb eines keilförmigen Bereichs oberhalb des Stauzauns angeordnet, wobei der gegenseitige Abstand mit wachsender Entfernung vom Zaun größer wurde. Zur Kontrolle der über bzw. durch das Hindernis fließenden Kaltluft sowie zur Erfassung der vertikalen und horizontalen Temperaturverhältnisse am Stauzaun, wurde knapp unterhalb des Zauns ein weiteres derartiges Meßprofil ausgelegt. An einer frei gelegenen Stelle in Höhe der Talschulter oberhalb des Stauzauns wurde eine Basisstation errichtet. Sie war mit Thermometern in 0,2, 0,7, 2,0 und 4,0 m Höhe, einem Klimaautomaten (zur Registrierung von Windstärke und Windrichtung) und zwei Wetterhütten (in

0,7 und 2,0 m Höhe) ausgestattet, in denen der Temperatur- und Feuchteverlauf mittels Thermohygrographen registriert wurde. Mit einem Strahlungsbilanzmesser an der Basisstation konnten die nächtlichen Ausstrahlungsverhältnisse erfaßt werden. Mit Hilfe dieser oberen Basisstation konnten die von der im Tal abfließenden Kaltluft unbeeinflussten meteorologischen Verhältnisse ermittelt werden. Die Ansicht einer solchen Basisstation zeigt Abb. 3. 50 m unterhalb des Zauns war auf der Talsohle eine weitere solche Basisstation aufgebaut, um somit den gesamten Talbereich meßtechnisch zu erfassen.

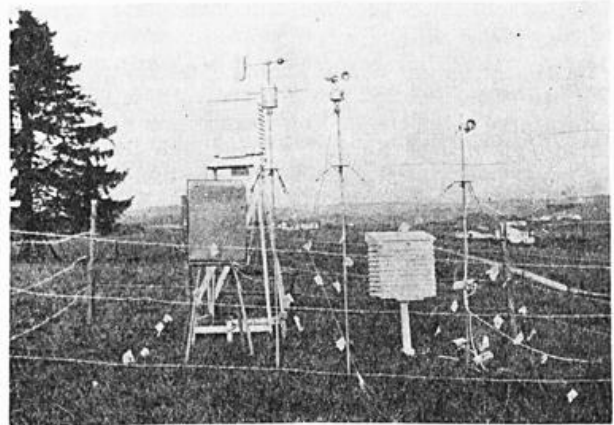


Abb. 3
Obere Basisstation (Meßgelände A).

2.3.3. Beobachtung und Messung der Kaltluftströmung

Da die Strömungsgeschwindigkeit nächtlicher Kaltluft vielfach unterhalb der Anlaufschwelle der üblichen Windmeßgeräte wie z. B. Schalenkreuzanemometer (ca. 1,0 bis 1,5 m/s) liegt, konnten zur Bestimmung der Kaltluftbewegung nur Feinwindmesser eingesetzt werden. Neben einem mechanisch arbeitenden (Prinzip der WILD-schen Windfahne), speziell für solche Untersuchungen konstruierten Registriergerät mit einer Ansprechschwelle von 0,1 m/s, kamen noch zwei sogenannte thermische Anemometer (basierend auf dem Hitzdrahtprinzip) zum Einsatz, deren Anzeigebereich zwischen 0,01 und 15,0 m/s lag. Mit Hilfe dieser Instrumente wurde vor allem die Strömung im Nahbereich von Hindernisdurchlässen, sowie der bodennahen Kaltluftströmung an Hängen und Talsohlen erfaßt. Ergänzt wurden diese nur punktförmigen Messungen durch das Ausbringen von Seifenblasen. Unter Zuhilfenahme von Maßband und Stoppuhr ließen sich Richtung und Geschwindigkeit der mit der Strömung davongetragenen Seifenblasen auf kleineren Flächen bis in Höhen von 2 m relativ rasch bestimmen.

Da sich diese Methoden zur Feststellung der großräumigen Strömungsverhältnisse im gesamten Anstau- und Abflußbereich der Kaltluft aus technischen und personellen Gründen als weniger brauchbar erwiesen, wurde hierfür ein optisches Verfahren angewendet, wie es bereits von L. SCHULZ (1) bei der Untersuchung des Kaltluftabflusses in Mulden mit Erfolg durchgeführt wurde. Mit Hilfe von Rauch, der durch Abbrennen von Rauchpatronen mit geringer Wärmeentwicklung erzeugt wurde, konnte die Strömung der Kaltluft im gesamten Anstau- und Abflußbereich recht gut qualitativ und angenähert auch quantitativ erfaßt werden. Besonders galt dies für den Bereich in der Nähe des Stauzauns und seiner Durchlässe. Aber auch die Abgrenzung zwischen bodennaher Kaltluft und geostrophischem Oberwind war durch das gleichzeitige Abbrennen von Rauchpatronen an verschiedenen Stellen eines Talprofils sowie in verschiedenen Höhen (die Rauchpatronen waren hierbei an der Spitze von 4 m hohen Stangen befestigt) in mehreren Fällen möglich.

2.3.4. Messungen an Stauzaun-Öffnungen

In Nächten mit ausgeprägter Kaltluftbildung setzte alsbald ein Kaltluftstau an der Folienwand ein, welcher die einzelnen Folien, ähnlich wie unter Wind stehende Segel, talabwärts aufwölbte. Die gesamte Folienwand wurde zunächst so lange geschlossen gehalten, bis stationäre Verhältnisse hinsichtlich des Anstaus der Kaltluft eingetreten waren. Als Kriterium hierfür wurden die zwischen den Meßprofilen unmittelbar oberhalb und unterhalb der Folienwand beobachteten Temperaturdifferenzen herangezogen. Erst dann, wenn diese einem Maximalwert asymptotisch zustrebenden Differenzen sich nicht mehr wesentlich änderten, wurden 2 Folienbahnen an der tiefsten Stelle des Tals niedergelegt. Die mit Messungen der Kaltluftströmung an der Stauzaun-Öffnung sowie mit Rauchversuchen ausgefüllte Zeit bis sich erneut stationäre Verhältnisse ausgebildet hatten, belief sich auf maximal 30 Minuten. Mit Rücksicht auf die thermische Trägheit der eingesetzten Temperaturfühler wurde die Folienwand erst nach Ablauf von 45 Minuten wieder geschlossen und damit der Ausgangszustand erneut hergestellt. Diese Versuche wurden nun in gleicher Weise mit zunehmender Durchlaßbreite fortgesetzt bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Kaltluftfluß merklich nachließ. Ergänzend hierzu wurde in weiteren Meßnächten der Einfluß mehrerer, über die Breite der Folienwand verteilter Durchlässe wechselnder Breite auf den Stau bzw. Abfluß der Kaltluft sowie auf die Temperaturen im Staubereich untersucht. Um festzustellen, ob die im Verlauf der Nacht sich einstellenden Verhältnisse auch für den Zeitpunkt des nächtlichen Minimums zutreffen, wurden die zu Beginn der zweiten Nachthälfte eingestellten Durchlaßbreiten bis zum Temperaturanstieg am folgenden Morgen beibehalten.

2.3.5. Messungen an Dammdurchlässen

Da die in einem Dammdurchlaß sich einstellenden Strömungsverhältnisse der nächtlichen Kaltluft mit Hilfe der Folienwand nicht genau genug simuliert werden konnten (fehlender Reibungseinfluß) wurden abschließend entsprechende Messungen in solchen Durchlässen verschiedener Dimensionen im Ahrtal und der Eifel durchgeführt und mit der Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft vor, hinter, sowie über dem Damm verglichen.

3. Meßergebnisse

3.1. Meßort A

Da es zu Beginn der Untersuchungen zunächst einmal darauf ankam, die sich in Strahlungsnächten im Hartenbachtal einstellende Temperaturverteilung in Bodennähe möglichst großflächig zu erfassen und außerdem den horizontalen Wirkungsbereich des 110 m breiten und am tiefsten Geländepunkt 5,0 m hohen Stauzauns kennen zu lernen, wurde ein relativ großes Areal von 420 m Länge (in Talrichtung) und 200 m Breite mit Meßstellen versehen. Sie wurden in 5 quer zum Tal ausgerichteten, d. h. parallel zum Stauzaun verlaufenden, Meßprofilen angeordnet (siehe Abb. 4).

3.1.1. Nächtliche Kaltluftströmung und Temperaturverteilung ohne Stauzaun

Im Herbst 1968 wurden zunächst in diesem Gelände sog. „Grundmessungen“ durchgeführt, d. h. es wurde der nächtliche Kaltluftfluß und die sich dabei einstellende Temperaturverteilung untersucht. Mit Beginn der nächtlichen Ausstrahlung, etwa eine Stunde vor Sonnenuntergang, setzte zunächst am ESE-Hang unterhalb der oberen Basisstation eine Abkühlung der Grasoberfläche ein, die alsbald zur Ausbildung einer sehr flachen Bodenkaltluftschicht führte. Diese setzte sich innerhalb kürzester Zeit, der Schwerkraft folgend, als flacher bo-

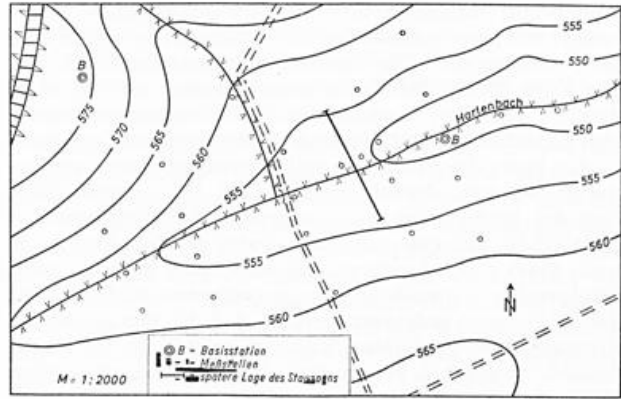


Abb. 4
Topographie von Meßgelände A.

dennaher Kaltluftstrom hangabwärts in Bewegung und floß mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 0,8 bis 1,0 m/s längs der Talsohle ab. Bis etwa zum Zeitpunkt des Sonnenuntergangs wuchs die ursprünglich nur wenige Dezimeter umfassende Höhe dieser bodennahen Kaltluft über der Talsohle auf etwa 1,3 bis 1,6 m Mächtigkeit an, wobei ihre Geschwindigkeit Werte bis zu 1,2 m/s erreichte. Höhe und Geschwindigkeit der abfließenden Kaltluft wuchsen mit zunehmender Ausstrahlung. Erst von einer bestimmten Höhe des talabwärts gerichteten Kaltluftstroms an, trat dann eine Beeinflussung dieser Strömung durch den oberhalb der Tallage herrschenden Wind ein. Ein merklicher, d. h. sich bis in Bodennähe erstreckender Einfluß dieser Oberströmung ließ sich nur bei Werten von mehr als 3,5 m/s (gemessen an der oberen Basisstation) feststellen. Wie sich diese Kaltluftströmung selbst gegenüber einer talaufwärts (also gegen diese) gerichteten Oberströmung durchsetzt, dafür gibt die Abb. 5 ein treffendes Beispiel. Hier zog der bei A erzeugte Rauch zunächst mit der bodennahen Kaltluft talabwärts nach B und wurde dort, nach Anhebung auf etwas über 2 m Höhe mit der talaufwärts gerichteten Oberströmung rasch nach C zurückgetrieben.

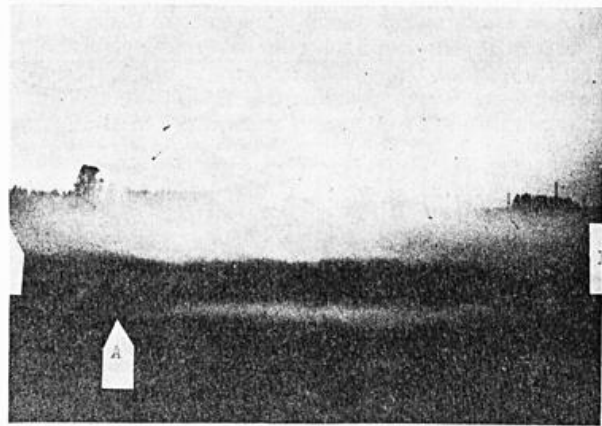


Abb. 5
Gegenläufigkeit von bodennaher Kaltluft und geostrophischer Oberströmung.

Kurz nach Sonnenuntergang erreichten die Temperaturunterschiede zwischen Talsohle und den umliegenden Höhen ihre höchsten Werte. Bei starker nächtlicher Ausstrahlung und Windstille wurden (in jeweils 0,7 m über Grund) über der Talsohle um 7–8° C tiefere Werte gemessen als an der oberen Basisstation und selbst bei mäßiger bis schwacher Ausstrahlung beliefen sich die Differenzen noch auf 4–5° C.

Je nach Stärke der nächtlichen Ausstrahlung hielt diese talabwärts gerichtete Kaltluftströmung in Bodennähe etwa 2 bis 4 Stunden bis nach Sonnenuntergang an,

wobei sich Andauer und Ausstrahlungsstärke angenähert reziprok zueinander verhielten. Dabei nahm ihre Geschwindigkeit in Bodennähe anfangs allmählich, gegen Ende dieses Zeitraums jedoch rascher ab. Die nach diesem Zeitraum beobachtete Ansammlung erstreckte sich zunächst nur auf den bodennahen Bereich, während in der Höhe die Strömung mit allerdings stark verminderter Geschwindigkeit noch anhielt. Im weiteren Verlauf der Nacht stieg die Obergrenze der stagnierenden Kaltluft bis zur Oberkante des Tales an. Aus diesem, je nach Stärke der Ausstrahlung mehr oder minder rasch erfolgenden Anwachsen der angestauten Kaltluft mit der Höhe kann gefolgert werden, daß die Menge der im Einzugsgebiet gebildeten Kaltluft größer ist, als deren Abfluß. Inwieweit an diesem offenbar unzureichenden Kaltluftabfluß das geringe Gefälle der Talsohle, der relativ große Einzugsbereich der Kaltluft oder aber die etwa 1200 m talabwärts vorhandene scharfe Talkrümmung mit gleichzeitiger Talverengung beteiligt ist, ließ sich nicht näher bestimmen.

Die in 0,7 m über Grund gemessenen Temperaturunterschiede zwischen Talsohle und Talschulter, welche zur Zeit des Sonnenuntergangs den höchsten Wert erreichten, nahmen im Laufe der ersten Nachthälfte wieder ab und blieben dann nahezu gleich. Dabei wies die sich zur Zeit des nächtlichen Minimums, also kurz vor Sonnenaufgang, einstellende Temperaturverteilung in den einzelnen Strahlungsnächten (sofern Wind und Bewölkung nicht stärker zunahm) hinsichtlich der Temperaturunterschiede zwischen Schulter, Hang und Sohle des Tals keine größeren Unterschiede auf. Die somit charakteristische (aus 3 Meßnächten gemittelte) Verteilung der Temperaturdifferenzen in Strahlungsnächten zur Zeit des nächtlichen Minimums gegenüber der oberen Basisstation wurde in Form von Isothermen in Abb. 6 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, daß die kälteste Stelle mit einer Abweichung von etwas über 4° C etwa in Höhe der Kreuzung zwischen Fahrweg und Hartenbach liegt, also an der Einmündung eines kleinen Seitentals. Diese Tatsache führte im Zusammenhang mit den Ergebnissen von Rauchversuchen innerhalb der strömenden Kaltluft zu einer Verlegung des Stauzauns um 80 m talaufwärts gegenüber der ursprünglichen Planung.

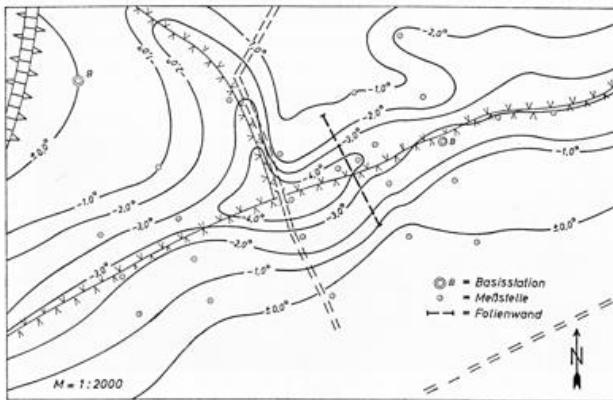


Abb. 6
Temperaturverteilung der nächtlichen Minima ohne Stauzaun
(Mittel aus 3 Strahlungsnächten)
in 0,7 m Höhe im Meßgelände A.

3.1.2. Nächtliche Kaltluftströmung und Temperaturverteilung bei geschlossener Folienwand

Nach Errichtung des Stauzauns von 110 m Breite und einer maximalen Höhe von 5,0 m (Fläche etwa 300 m²) im Frühjahr 1969, wurden die Messungen erneut aufgenommen. Bei völlig geschlossener Folienwand kam es bereits kurze Zeit nach Einsetzen der nächtlichen Kaltluftströmung zu einer talabwärts gerichteten Ausbuchtung der einzelnen Folien. Obschon unmittelbar ober-

halb der Folienwand absolute Luftruhe herrschte, schienen die Folien, ähnlich einem gespannten Segel, unter Wind zu stehen. Daß es sich hierbei eindeutig um einen Anstau der bodennahen Kaltluft oberhalb der Folienwand handelte, ging aus den Temperaturmessungen an zwei zusätzlich dicht ober- und unterhalb des Stauzauns errichteten vertikalen Meßprofilen hervor. Bei Strahlungswetter bildete sich schon etwa 15–20 Minuten nach Beginn des nächtlichen Kaltluftflusses ein Temperatursprung am geschlossenen Zaun aus. Dabei lagen die Temperaturen in allen Höhen oberhalb des Stauzauns immer unter den unterhalb des Stauzauns gemessenen. Bereits etwa eine Stunde nach Einsetzen der Kaltluftströmung, also etwa zur Zeit des Sonnenuntergangs, wurden in Bodennähe Differenzen von etwa 1° C registriert. Sie wuchsen später dann bis auf 1,5° C an. Die größten Temperaturunterschiede wurden dabei mit etwa 2 1/2° C in einer Höhe von 2,0 m über der Talsohle erreicht, wie aus Abb. 7 ersehen werden kann. Erst gegen Ende des Kaltluftflusses sanken die Temperaturen unterhalb des Stauzauns stärker ab als oberhalb (und zwar zunächst in Bodennähe, später auch in höheren Bereichen), so daß damit ein Temperatursgleich zwischen beiden Stauzaunseiten eintrat.

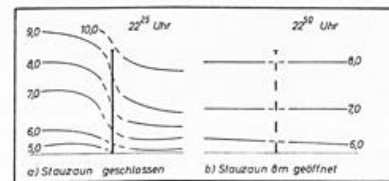


Abb. 7
Vertikales Temperaturprofil am Kaltluftstauzaun
während der Kaltluftströmung (Meßgelände A).

Während der Kaltluftzufuhr erreichten die bodennahen Temperaturen innerhalb eines segmentförmigen Bereichs oberhalb der Folienwand die tiefsten Werte. Aus Abb. 8 kann die hierfür charakteristische Temperaturverteilung, wie sie sich in mehreren Nächten etwa eine Stunde nach Sonnenuntergang ausbildete, ersehen werden. Die dabei festgestellte Reichweite des Temperatureinflusses gab einen ersten Hinweis auf die unerwartet geringe Ausdehnung des durch die Folienwand hervorgerufenen Anstau-Bereichs der nächtlichen Kaltluft.

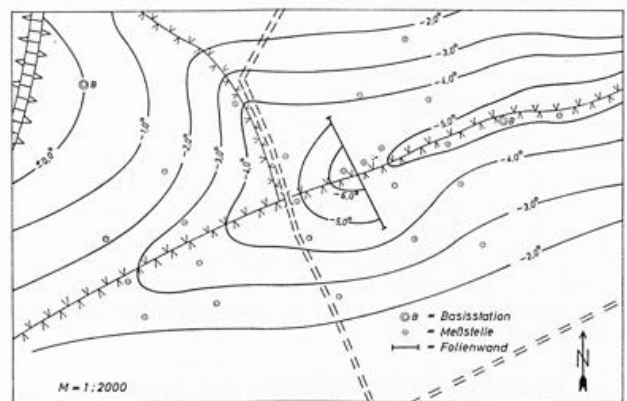


Abb. 8
Temperaturverteilung (Meßgelände A) bei geschlossener
Folienwand während der Kaltluftströmung.

Bestätigt wurde diese Feststellung anhand von Rauchversuchen. In die Kaltluftströmung weit oberhalb des Stauzauns eingebrachter Rauch floß zunächst längs der Talsohle talabwärts, hob sich zu Beginn der Messungen etwa 20–30 m vor der Folienwand in spitzem Winkel vom Boden ab und strömte dann mit erhöhter Geschwindigkeit knapp über die Obergrenze der Folien-

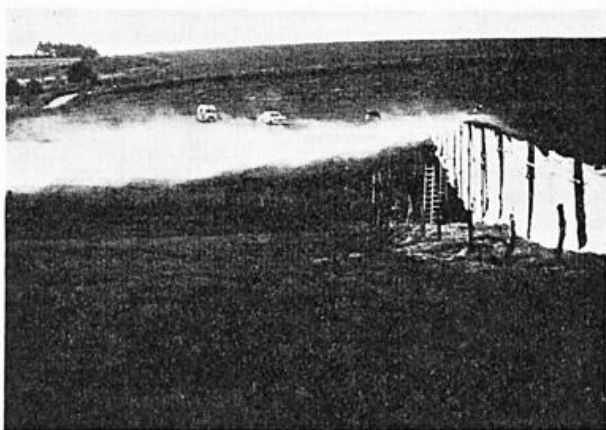


Abb. 9

Kaltluftströmung und Staubereich oberhalb der Folienwand.

wand hinweg. Abb. 9 läßt dieses Verhalten deutlich erkennen. Hinter dem Stauzaun fiel der Rauch in steilem Winkel von etwa 45° zu Boden und floß von da an mit nunmehr verminderter Geschwindigkeit weiterhin in Bodennähe talabwärts, wie aus Abb. 10 ersehen werden kann.



Abb. 10

Hinter der Folienwand abfließende Kaltluft.

Im Verlauf des Abends und der ersten Nachthälfte vergrößerte sich die Entfernung zwischen der Stelle, an welcher der Rauch vom Boden abhob und dem Stauzaun auf etwa 50 m. Mit dem während der Nacht einsetzenden Rückstau der Kaltluft und damit in Bodennähe abnehmenden Kaltluftzustrom floß der Rauch in einem wesentlich flacheren Winkel hinter dem Stauzaun ab und kam, wie Abb. 11 zeigt, nunmehr nicht mehr

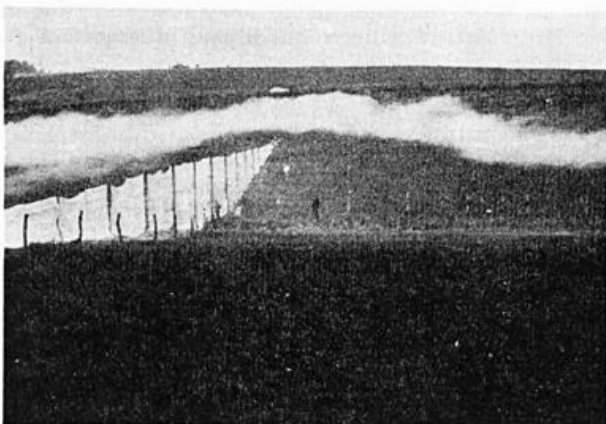


Abb. 11

Rückstau der Kaltluft hat eingesetzt.

bis zum Boden durch. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen von Untersuchungen, die H. BERG (2) im Hohen Venn angestellt hat; auch hier floß die vom Hang abströmende Luft über die sich in Talmulden gebildete, stagnierende Kaltluft hinweg.

Demnach bildet der Kaltluftstau-Bereich im Vertikalschnitt oberhalb des Hindernisses ein nahezu rechtwinkliges Dreieck, wobei der Stauzaun die kürzere Kathete, der Talsohlenabschnitt zwischen dem Abhebungspunkt des Rauches und dem Fußpunkt der Folienwand die längere Kathete und die Unterkante der Rauchfahne die Hypotenuse einnimmt. Dabei beläuft sich das Verhältnis der beiden Katheten zu Beginn der Kaltluftströmung auf etwa 1:5 und später auf 1:10; innerhalb dieses Staubereiches herrscht nahezu absolute Luftruhe.

Abgesehen von der bemerkenswerten Tatsache, daß die über dem Staubereich talabwärts fließende Kaltluft sich vom Boden abhebt und von da an bis zur Oberkante des Stauzauns bergauf zu fließen vermag (was nur als Sogwirkung seitens der hinter dem Stauzaun talabwärts fließenden Kaltluft erklärt werden kann), muß das wesentliche Ergebnis dieser Versuche darin gesehen werden, daß der Bereich des Kaltluft-Anstaus (und damit auch der verstärkten Temperaturabsenkung mit erhöhter Frostgefährdung) oberhalb des Hindernisses unter den vorliegenden Verhältnissen weit kleiner ist, als bisher angenommen wurde.

3.1.3. Kaltluftströmung an Stauzaun-Öffnungen verschiedener Durchlaßbreite

Der Aufbau des Stauzaunes in Form senkrecht verankerter Montagerohre, zwischen denen die 4,0 m breiten und bis zu 5,0 m hohen Kunststoffplanen beliebig aufgezogen und herabgelassen werden konnten, ermöglichte die Simulation von Durchlässen mit von 4 zu 4 m wachsender Breite.

Wurden nach vollzogenem Anstau der Kaltluft (kenntlich gemacht durch die talabwärts gerichtete Wölbung der Folien sowie durch Rauchversuche) 2 Folienbahnen herabgelassen, so strömte die angestaute Kaltluft sofort mit einer Geschwindigkeit von rund 1,0 m/s durch die 8 m breite Öffnung ab. Dabei wurden längs der Öffnungsmittelachse, also quer zum Stauzaun 16 m vor dem Durchlaß 0,2 m/s, im Durchlaß selbst hingegen 1,0 m/s gemessen. Die größte Strömungsgeschwindigkeit herrschte in 6–10 m Entfernung hinter dem Stauzaun mit 1,2–

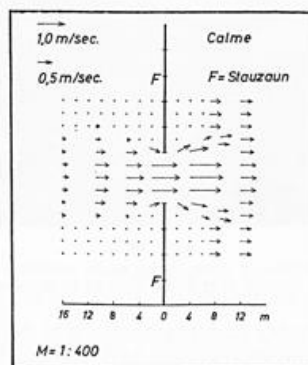


Abb. 12

Strömung am Kaltluft-Stauzaun bei 2 geöffneten Toren in 1,5 m Höhe.

1,4 m/s. Aus Abb. 12, welche die gesamte Strömungsverteilung in Höhen von 1–2 m wiedergibt, kann auch ersehen werden, daß sich die Strömungsgeschwindigkeit weiter talabwärts wieder auf 0,5 bis 0,6 m/s verringerte. Offensichtlich übt der Durchlaß eine gewisse Düsenwirkung aus, wobei die Verlagerung des Geschwindigkeitsmaximums hinter den Durchlaß durch das Zusammen-

treffen der direkt durchgeströmten Kaltluft mit der seitlich hiervon über die stehengebliebenen Teile des Stauzauns geflossene Kaltluft zu erklären ist. Abb. 13 kann als Hinweis sowohl für die Durchlässigkeit der Öffnung selbst, als auch für das seitliche Einströmen oberhalb des Durchlasses (erkenntlich an der starken Verwirbelung des Rauchs) gelten.

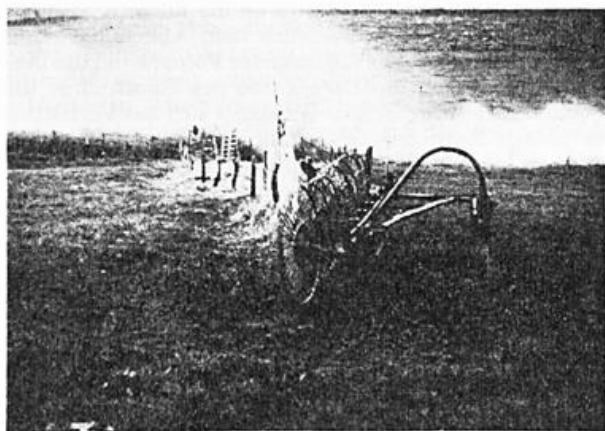


Abb. 13
Kaltluftströmung (von links nach rechts gerichtet) bei 8 m breitem Durchlaß.

Etwa 10–15 Minuten nach der Öffnung des Stauzauns nahm die Strömungsgeschwindigkeit im Durchlaß auf etwa $\frac{2}{3}$ ihres anfänglichen Wertes ab, ohne daß sich der Strömungsverlauf merklich änderte. Demnach stellte sich nach dieser Zeitspanne ein Gleichgewichtszustand zwischen abströmender und neu ankommender Kaltluft ein. Dieser Zeitraum verkürzte sich mit wachsender Durchlaßbreite sukzessiv. So dauerte bei einer maximalen Durchlaßweite von 32 m der verstärkte Anfangsfluß nur noch 2–4 Minuten an. Gleichzeitig damit verlagerte sich das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit talwärts bis dicht an den Stauzaun heran.

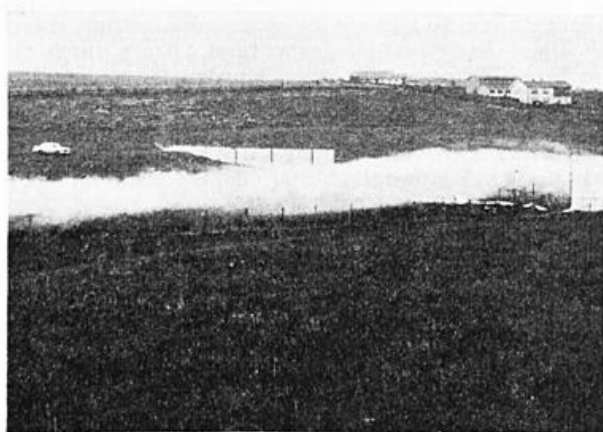


Abb. 14
Kaltluftströmung (von links nach rechts gerichtet) bei einem Durchlaß von 32 m Breite.

Mit zunehmender Durchlaßweite läßt der zu einer Anhebung der Rauchobergrenze mit starker Verwirbelung führende seitliche Anstau sichtbar nach. Bei einer Öffnungsweite von 32 m fließt, wie Abb. 14 zeigt, der Rauch und damit die bodennahe Kaltluft völlig ungehindert durch. Sofort, nachdem der 32 m breite Durchlaß geschlossen wurde, staute sich der Rauch zunächst vor dem Hindernis und floß oberhalb auf gleicher Höhe weiter (die bodennahe Kaltluft hinter dem Zaun war noch nicht abgeflossen), wobei sich bereits der Ansatz zum Wiederaufbau eines Anstaus vor der Folienwand zeigte. Schon 3 Minuten später trat wieder das für den geschlossenen Zaun charakteristische Bild des steilen Herabfallens der

Strömung hinter dem Stauzaun in Erscheinung; mittels direkt in den Stauraum eingebrachtem Rauch konnte der inzwischen bereits wieder vollzogene Anstau nachgewiesen werden.

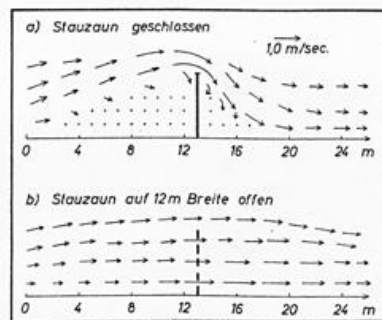


Abb. 15
Strömung (Vertikalschnitt) am Kaltluftstauzaun (Meßgelände A).

Aus Abb. 15 können die sich bei geschlossenem und z. T. geöffneten Stauzaun einstellenden stationären Strömungsverhältnisse im Vertikalschnitt ersehen werden.

Die im Mittel aller Messungen über die gesamte Durchlaßbreite in Höhe des Stauzauns festgestellte Strömungsgeschwindigkeit stieg von rund 0,7 m/s bei 4 m breiter Öffnung auf 1,0 m/s bei 8 m an und erreichte, wie aus Abb. 16 entnommen werden kann, bei einer Durchlaßbreite von 24 m ihren höchsten Wert von etwa 1,4 m/s. Bei noch größeren Durchlässen sanken diese Werte wieder geringfügig ab; so wurden bei 32 m weitem Durchlaß noch etwas über 1,1 m/s gemessen (Meßhöhe 1,5 m).

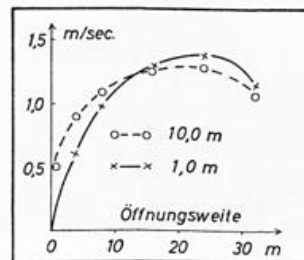


Abb. 16
Kaltluftströmung in 1,0 bzw. 10,0 m Entfernung hinter dem Stauzaun in Abhängigkeit von der Öffnungsweite.

Da der geländebedingte Rückstau der Kaltluft innerhalb des Hartenbachtals schon wenige Stunden nach Beginn des Kaltluftflusses einsetzte, wurden zur Durchführung des umfangreichen Meßprogramms eine beachtliche Zahl von Meßnächten benötigt, so daß sich trotz relativ günstiger Witterungsbedingungen die Messungen bis zum Spätherbst 1969 erstreckten. Aus Abb. 17 kann an Hand der unmittelbar am Zaun (und zwar in der Mitte der jeweiligen Durchlässe) durchgeführten

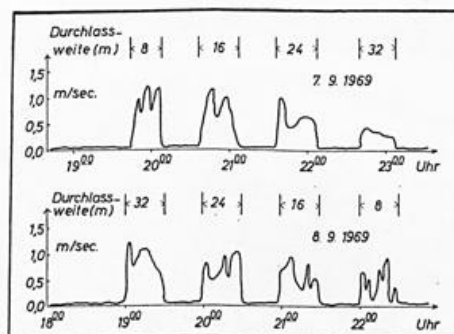


Abb. 17
Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft in Strahlungsnächten innerhalb von Durchlässen (Meßgelände A).

Windregistrierung das allmähliche Abflauen der Strömung innerhalb der jeweils 4stündigen Meßprogramme ersehen werden.

Die Auswirkung der in halbstündigem Wechsel vorgenommenen Öffnung und Schließung des Stauzauns auf den Temperaturverlauf an den einzelnen Meßstellen beschränkte sich dabei auf den eigentlichen Staubereich, wobei ein mit wachsendem Abstand von der Folienwand immer schwächer ausgeprägter Temperaturanstieg bei Öffnung derselben und ein entsprechender Temperaturrückgang bei Schließung beobachtet wurde. Bereits 50 m oberhalb des Zauns war dieser Temperatureffekt kaum mehr nachzuweisen und beschränkte sich dabei auf den unmittelbaren Talsohlenbereich. Die unterhalb des Stauzauns umgekehrt hierzu verlaufenden Temperaturänderungen bei Öffnung bzw. Schließung des Stauzauns waren nur auf eine Entfernung von maximal 20 m nachzuweisen, wobei auch hier ausschließlich der Talsohlenbereich betroffen wurde.

3.1.4. Schlußfolgerungen aus den Messungen im Gelände A

Als wesentliche Erkenntnis aus den Versuchsergebnissen muß zunächst einmal die Tatsache angesehen werden, daß unter den vorliegenden Bedingungen sich zur Zeit der nächtlichen Kaltluftströmung bereits relativ schmale Durchlässe von weniger als 10 m Breite als recht wirkungsvoll in bezug auf den Durchfluß der angestauten Kaltluft erwiesen haben. Da sich dieser Wirkungsbereich mehr in die Tiefe als auf die Breite erstreckte, dürften bei breiter Talsohle mehrere schmale Durchlässe wirkungsvoller sein, als ein einzelner Durchlaß entsprechend großer Weite.

Diese Erfahrung steht scheinbar im Widerspruch zu den Ergebnissen anderer Autoren. So fand z. B. F. SCHNELLE (3) bei Untersuchungen der Frostgefährdung von Obstbaulagen in Odenwaldtälern, daß Talverengungen regelmäßig Staustufen der Kaltluft bildeten. Es ist anzunehmen, daß das von den hier dargelegten Ergebnissen abweichende Verhalten der nächtlichen Kaltluft durch die ungleich höheren Strömungswiderstände, denen die Kaltluft in den Odenwaldtälern unterliegt, verursacht wurde.

Daneben haben die Messungen im Hartenbachtal zwar den Nachweis eines Kaltluftstaus an quer zur Talrichtung verlaufenden Hindernissen erbracht, doch erwies sich die horizontale Ausdehnung dieses Anstaubereichs von maximal 10facher Hindernishöhe wesentlich geringer, als ursprünglich vermutet. Hinzu kommt noch, daß in solchen Tälern mit mangelhafter Kaltluftdrainage die ökologische Wirkung eines anfänglich an einem geschlossenen Hindernis hervorgerufenen Kaltluftstaus entfällt, da der vom Haupttal her einsetzende Rückstau der Kaltluft in der zweiten Nachthälfte und somit während der Eintrittszeit der nächtlichen Temperaturminima, einen völligen Temperatureausgleich zu beiden Seiten des Hindernisses zur Folge hat. Abgesehen davon, daß innerhalb des Staubereichs der Frost früher einsetzt und somit die Dauer der Frosteinwirkung verlängert wird (wodurch u. U. die Frostschäden verstärkt werden können), bleibt das Hindernis im Hinblick auf eine Erhöhung der Frostgefährdung durch den Kaltluftstau (nächtliches Temperaturminimum) demzufolge wirkungslos. In Abb. 18 wurde die bisherige Auffassung über die Stauwirkung von Hindernissen auf die nächtliche Kaltluft in einer schematischen Darstellung den im Hartenbachtal gefundenen Ergebnissen gegenüber gestellt. Daraus resultiert die zwingende Notwendigkeit, bei der Beurteilung der Wirksamkeit eines quer zum Tal verlaufenden Hindernisses auf die Erhöhung der Frostgefährdung in dessen Staubereich zunächst einmal die Abflußverhältnisse der nächtlichen Kaltluft in diesem Tal zu erfassen bzw. zu beurteilen.

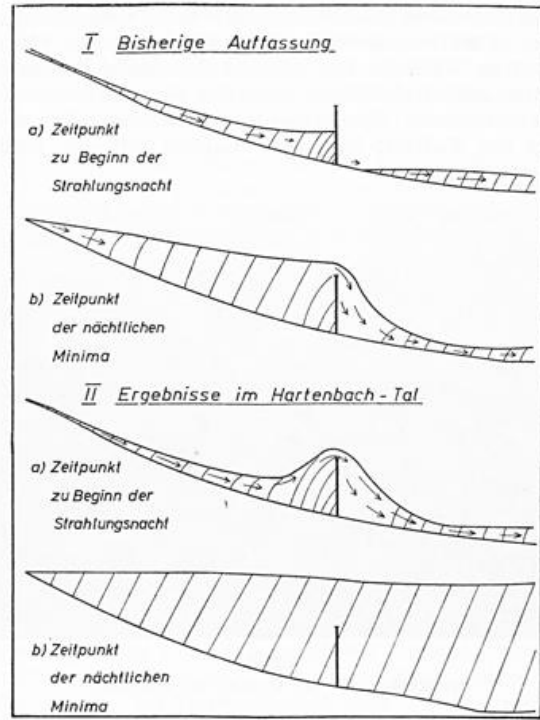


Abb. 18
Kaltluft-Stau in Strahlungsnächten an quer zum Tal verlaufenden Hindernissen.

3.2. Meßort B

Auf Grund der im Hartenbachtal (Meßort A) gewonnenen Erkenntnisse über den horizontalen Staubereich der Kaltluft oberhalb der Folienwand, wurde am folgenden Meßort B das Meßstellennetz wesentlich engermaschiger angelegt. Wie aus Abb. 19 entnommen werden kann, handelte es sich um 5 Temperatur-Meßprofile oberhalb der Folienwand, welche parallel zu ihr in wachsenden Abständen bis zu einer Entfernung von 100 m errichtet wurden. Um auch die Obergrenze der gestauten Kaltluft erfassen zu können, kamen zu den Meßpunkten in 0,70 m über Grund auch noch solche in 2,0 m und 4,0 m Höhe.

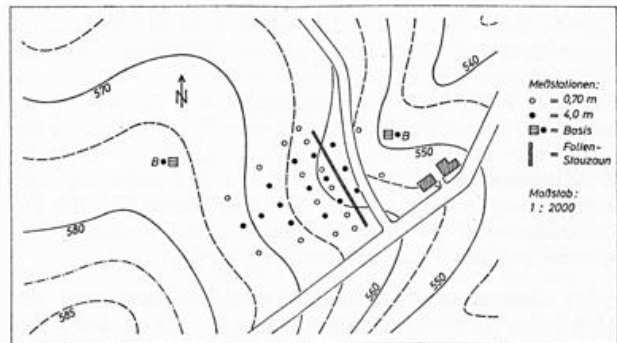


Abb. 19
Topographie und Meßstellen-Verteilung im Meßgelände B.

Die zusammen mit den 5 Meßstellen unterhalb der Folienwand aus insgesamt 66 Meßfühlern bestehende Anordnung diente zur Erfassung der horizontalen und vertikalen Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Beeinflussung der nächtlichen Kaltluftströmung durch den Stauzaun und dessen Durchlässe. Die Registrierung der Meßwerte erfolgte über neun Sechsfarbensreiber und einen 12-fach-Kompensographen. Die beiden Basisstationen erhielten dieselbe Ausrüstung wie im Hartenbachtal.

Die markanten Unterschiede zum Meßgelände A bestanden im wesentlich kleineren Kaltluft-Einzugsgebiet,

einem bedeutend stärkeren Gefälle der Talsohle und vor allem in weitaus besseren Abflußbedingungen für die nächtliche Kaltluft. Die Ansicht des Meßgeländes aus Westen zeigt Abb. 20. Im weiteren Gegensatz zum tief eingeschnittenen Hartenbachtal schloß hier der obere Rand des Kaltluft-Stauzauns nahezu mit den beiden Talschultern ab.

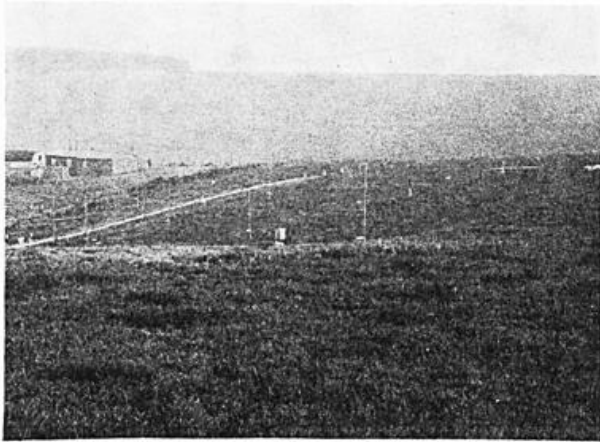


Abb. 20
Meßgelände B von Westen aus gesehen.

3.2.1. Stärke, Andauer und Häufigkeit der nächtlichen Kaltluft

Während im Hartenbachtal selbst bei mäßigem geostrophischen Wind bis zu 3 Beaufort auf den umliegenden Höhen und geringer Bewölkung schon etwa eine Stunde vor Sonnenuntergang ein deutlicher Kaltluftfluß an der Talsohle einsetzte, unterblieb in diesem, wesentlich freier gelegenen Meßgelände selbst bei Windgeschwindigkeiten von nur 1,5 m/s an der oberen Basisstation eine entsprechende Kaltluftströmung völlig. Erst bei Absinken der Windgeschwindigkeit auf 1,2 m/s setzte ein mittels Rauchpatronen nachweisbarer Kaltluftfluß ein, der sich allerdings auf eine ganz flache bodennahe Schicht von 0,5 bis 0,8 m Mächtigkeit beschränkte, in welcher Geschwindigkeiten von 0,7 bis 1,0 m/s gemessen wurden. Blieb die Windgeschwindigkeit während der Strahlungsnacht unter dem kritischen Wert von 1,2 m/s, dann hielt, im Gegensatz zum Hartenbachtal, dieser Kaltluftfluß als Folge wesentlich besserer Abflußbedingungen sowie des weitaus kleineren Einzugsgebiets bis kurz nach Sonnenaufgang an. Da wegen der hohen Windanfälligkeit solch freier Höhenlagen in der Eifel, wie sie das ausgewählte Meßgelände darstellt, Windgeschwindigkeiten von 1,2 m/s und darunter auch nachts nicht gerade häufig sind, erstreckte sich die zur Durchführung des Meßprogramms erforderliche Zeitspanne auf das Frühjahr und den Herbst 1970.

Im Gegensatz zum Hartenbachtal, in welchem das nächtliche Temperaturminimum fast immer kurz vor Sonnenaufgang eintrat, wurden die tiefsten Temperaturen im vorliegenden Meßgelände in Nächten mit wechselnder Windstärke häufig zum Zeitpunkt der spätesten Flaute, d. h. dann, wenn die Windgeschwindigkeit an der oberen Basisstation für wenigstens eine halbe Stunde unter 1,2 m/s absank, beobachtet. Aus Abb. 21 kann die Temperaturverteilung in 0,70 m über Grund, wie sie sich zur Zeit der nächtlichen Minima von insgesamt 8 Strahlungs Nächten im Mittel ergab, ersehen werden. Dabei wurden die Differenzen der einzelnen Meßstationen zur unteren Basisstation aufgetragen. Mit einem Betrag von nur rund 2,0° C Temperaturdifferenz auf 22 m Höhenunterschied erweist sich damit der in diesem Gelände festgestellte Temperatur-Höhengradient als nur etwa halb so groß wie im Hartenbachtal mit rund 4° C pro 20 m Höhendifferenz. Als ursächlich verantwortlich für

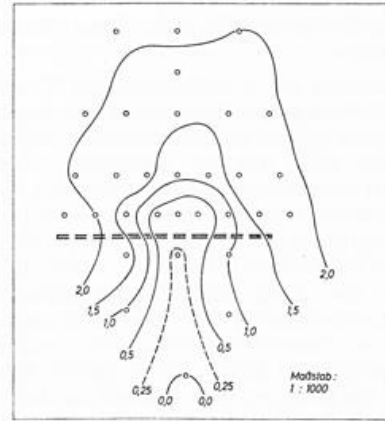


Abb. 21
Minimumtemperatur-Verteilung in Strahlungs Nächten im Meßgelände B (ohne Stauzaun).

diese wesentlich schwächer ausgeprägte Temperaturschichtung ist neben dem kleineren Kaltlufteinzugsgebiet sowie dem weitaus flacheren Taleinschnitt vor allem der weitaus bessere Kaltluft-Abfluß anzusehen. Gegenüber der ruhenden, d. h. gestauten bodennahen Kaltluft vermag die strömende Kaltluft offensichtlich einen Teil ihres Energieverlustes infolge Ausstrahlung durch turbulenten Wärmeaustausch mit den über ihr liegenden Luftschichten zu ersetzen.

3.2.2. Strömungsprofile und Temperaturverteilung am geschlossenen Stauzaun

Bei Windgeschwindigkeiten zwischen 1,2 und 1,5 m/s an der oberen Basisstation setzte zwar bereits unmittelbar über dem Boden eine flache Kaltluftströmung ein, doch verhinderte die am Stauzaun durch die Oberströmung verursachte Verwirbelung und Durchmischung mit dieser flachen Kaltluftschicht einen meßbaren Stau-effekt. Erst dann, wenn die Oberströmung weiter abschwächte, kühlte in Bodennähe die Luft oberhalb der Folienwand stärker ab als unterhalb. Selbst bei Oberströmungen im Bereich der Anlaufgeschwindigkeit der Anemometer (etwa 1,0 m/s) wurde der Anstau der Kaltluft hiervon noch beeinflußt. Die sich unter solchen Bedingungen ergebenden Strömungsverhältnisse am geschlossenen Stauzaun wurden mittels Rauchpatronen, Seifenblasen und Feinwindmessern in Bodennähe erfaßt. Dabei ergaben sich, je nachdem, ob der geostrophische Wind talauf- oder talabwärts gerichtet war, grundlegende Unterschiede, wie aus Abb. 22 ersehen werden kann. Bei talabwärts gerichteter Oberströmung hob der in Höhe des obersten Meßprofils (also 100 m oberhalb des Stauzauns) erzeugte Rauch etwa 25 m vor dem Hindernis vom Boden ab, überströmte dessen Oberkante und fiel dahinter in steilem Winkel zu Boden, also genau so wie im Hartenbachtal beobachtet wurde. Bei talaufwärts gerichtetem Wind hingegen floß der gesamte Rauch mit der bodennahen Strömung in den Staubereich

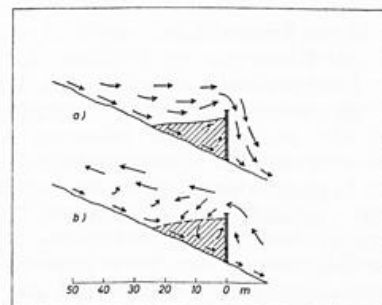


Abb. 22
Strömung und Kaltluftstau bei talabwärts (a) und talaufwärts (b) gerichtetem schwachen Wind.

und wurde dort, besonders an der Oberkante, verwirbelt; die Rückseite des Stauzauns blieb dabei rauchfrei. Die sich an der Oberkante vollziehende Vermischung von gestauter Kaltluft mit der freien Oberströmung hatte einen weitgehenden Ausgleich der Temperaturen in 4,0 m Höhe vor und hinter der Folienwand zur Folge. Während in 0,7 m Höhe die Luft unmittelbar oberhalb des Zauns um 1,2 bis 1,6° C kälter war als unterhalb, verringerte sich dieser Betrag in 2,0 m Höhe auf etwas weniger als die Hälfte. Daraus geht hervor, daß im Gegensatz zum Hartenbachtal (dort traten noch in 4,0 m Höhe Temperaturunterschiede von über 2° C zu beiden Seiten des Stauzauns auf) die Kaltluft bei schwacher Oberströmung nur eine vertikale Mächtigkeit von 3–4 m aufwies.

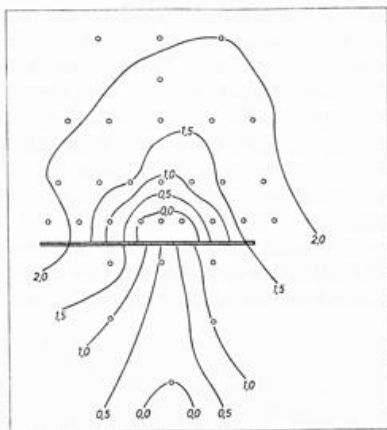


Abb. 23

Verteilung der Minimum-Temperaturen in Strahlungs Nächten (Meßgelände B) bei geschlossenem Stauzaun.

Die sich aus 4 Strahlungsnächten bei geschlossenem Stauzaun zur Zeit der Tiefsttemperaturen aus den Registrierungen ergebenden Temperaturdifferenzen zur unteren Basisstation wurden in Abb. 23 aufgezeichnet. Ein Vergleich mit Abb. 21 (ohne Stauzaun) läßt erkennen, daß sich der Anstau-Bereich der Kaltluft maximal bis zu einem Abstand von 35 m oberhalb der an der tiefsten Stelle 5,0 m hohen Folienwand erstreckt. Die Breite dieses kreissegmentförmigen Staubereichs an der Basis, d. h. der Folienwand, betrug knapp 60 m. Aus Abb. 24 kann die seitliche Begrenzung dieses Staubereichs (ge-

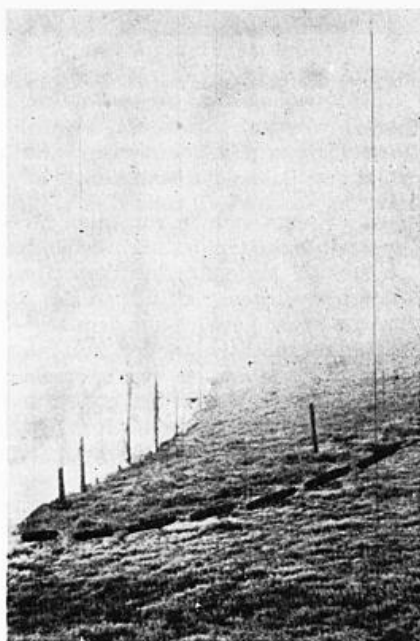


Abb. 24

Reifbildung innerhalb des Kaltluftstau-Bereichs.

kennzeichnet durch die gestrichelte Linie) direkt ersehen werden; während der an die Folienwand angrenzende Bereich im Morgengrauen Reifbildung aufwies, war im außerhalb gelegenen Bereich lediglich kräftiger Tau- belag festzustellen.

Somit hat sich, entsprechend den geringeren vertikalen Temperaturgradienten gegenüber dem Hartenbachtal, demnach auch der Staubereich der Kaltluft oberhalb der Folienwand (bei einem Verhältnis zur Hindernishöhe von 7:1) hinsichtlich Länge und Breite verringert. Allerdings hält dieser Stau dank der gegenüber dem Meßgelände A wesentlich besseren Abflußbedingungen bei entsprechend schwachem geostrophischem Wind die ganze Strahlungsnacht hindurch an und ist somit auch zur Zeit der Tiefsttemperaturen wirksam.

3.2.3. Kaltluftströmung und Temperaturverteilung bei teilweise geöffnetem Stauzaun

Zur Untersuchung der Auswirkung von Durchlässen auf den Kaltluftstau oberhalb der Folienwand wurden einzelne Folienbahnen von je 4,0 m Breite für 30 Minuten niedergeholt. Sofort nach Öffnung einer Bahn stieg die Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe des Stauzauns an, wobei sich hinsichtlich der Richtung und Geschwindigkeitsverteilung weitgehend die gleichen Verhältnisse wie im Hartenbachtal ergaben. Die mit der Öffnung der Durchlässe einsetzende Erwärmung beschränkte sich auf den Staubereich, d. h. auf 35 m Entfernung oberhalb des Stauzauns längs der Talsohle, und erreichte in Stauzaun-Nähe die größten Beträge. Wurde an der tiefsten Stelle des Stauzauns nur 1 Folienbahn niedergelegt (= 4 m Durchlaßbreite), dann dauerte der Abfluß der gestauten Kaltluft etwa 10–12 Minuten; bei Öffnung von 2 Bahnen etwa 6 Minuten. Die mit der sukzessiven weiteren Verbreiterung des Durchlasses (nach zwischenzeitlicher Schließung des Stauzauns) zu erwartende Verringerung der Abflußzeiten konnte nicht nachgewiesen werden, da in bezug auf den Temperaturverlauf nunmehr die Trägheit der verwendeten Widerstandsthermometer deren Zeitverhalten überwiegend bestimmte.

Bei Durchlässen von 4 und 8 m Breite an der Talsohle blieben vom ursprünglichen Staubereich 2 kleine Bereiche an den Talhängen zu beiden Seiten des Durchlasses unmittelbar vor dem Stauzaun erhalten, deren größte Tiefe (in etwa 30 m seitlicher Entfernung von den Durchlässen) allerdings kaum 10 m überschritt. Wurden die Durchlässe von der Talsohle an die Talhänge verlegt, dann nahm ihre Abflußwirkung mit wachsender Entfernung von der Talsohle zunächst mäßig, dann stärker ab. Im Gegensatz zum Hartenbachtal, in welchem der bereits noch vor Mitternacht vom Haupttal her einsetzende Rückstau eine Stagnation des Kaltluftflusses zur Folge hatte, konnten in diesem Hochtal (sofern der Wind unter der o. a. Grenzgeschwindigkeit von 1,2 m/s blieb) die beschriebenen Vorgänge bis kurz nach Sonnenaufgang beobachtet werden.

3.2.4. Schlußfolgerungen aus den Messungen im Gelände B

Ein Vergleich der an den beiden Meßorten gewonnenen Ergebnisse zeigt, daß die Intensität des Kaltluftflusses, soweit es dessen vertikale Mächtigkeit betrifft, weitgehend von der Größe des Einzugsgebiets und soweit es die Geschwindigkeit betrifft, wesentlich von der Neigung der Hänge und der Talsohle abhängt. Die Häufigkeit nächtlicher Kaltluftbildung ist dabei umso geringer, je stärker der geostrophische Wind von den Talschultern bis zur Talsohle durchzugreifen vermag; je windoffener die Talschultern und je geringer der Taleinschnitt, desto seltener tritt ein Kaltluftfluß ein.

Die Ausdehnung des Staubereichs der Kaltluft oberhalb eines quer zur Talsohle verlaufenden Hindernisses nimmt dabei mit wachsendem Gefälle der Talsohle ab. Dagegen wird die Dauer des Kaltluftflusses und damit auch des Anstaus der Kaltluft vor einem Hindernis mit der daraus resultierenden Erhöhung der Frostgefährdung im Staubereich zur Zeit der nächtlichen Tiefsttemperaturen ausschließlich von den Abflußverhältnissen bestimmt. Nur dann, wenn auch gegen Ende der Strahlungsnacht noch ein entsprechendes Gefälle zwischen dem Hindernis und der Obergrenze der Kaltluft im Haupttal besteht und gleichzeitig diese Gefällstrecke frei von Hindernissen, scharfen Biegungen und Einengungen ist, sind gute Abflußbedingungen für die nächtliche Kaltluft als Voraussetzung für eine Beeinflussung der Minimum-Temperaturen durch Hindernisse quer zum Tal in Strahlungsnächten gegeben.

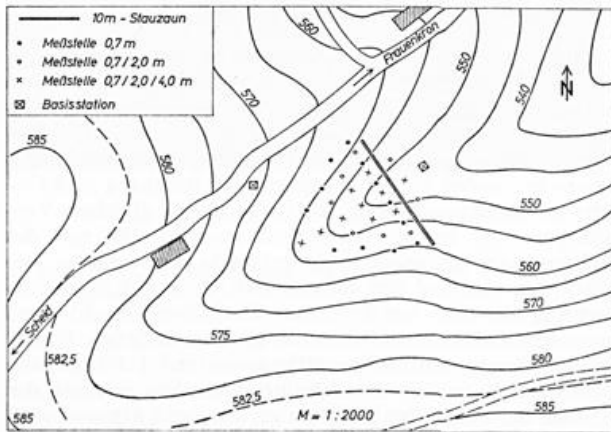


Abb. 25

Topographie und Meßstellen-Verteilung von Meßgelände C.

3.3. Meßort C

Im Gegensatz zu Meßort B handelte es sich hier um ein recht tief eingeschnittenes V-förmiges Tal mit einem nahezu doppelt so großen Kaltluft-Einzugsbereich. Wie aus Abb. 25 entnommen werden kann, verläuft die mäßig geneigte Talsohle von SW nach NE, wobei der nordwestlich von ihr gelegene Hang mit 90 m Breite und knapp 15 m Höhe kaum halb so groß ist, wie der südöstliche Hang mit etwa 200 m Breite und 36 m Höhe. Bei einer gegenüber Meßort B nahezu unveränderten Meßanordnung bestand das Ziel der im Frühjahr 1971 durchgeführten Messungen darin, die Abhängigkeit des Anstaus und des Abflusses der nächtlichen Kaltluft von der Höhe des Stauzauns zu untersuchen. Hierzu wurde mittels entsprechender Vorrichtungen der bereits beschriebene Stauzaun um weitere 5 m aufgestockt, so daß bei einer Gesamtfläche von ca. 650 m² die maximale Höhe der Folienwand über der Talsohle nunmehr 10 m betrug. Dabei konnte mittels einfacher Zugvorrichtungen die Stauzaunhöhe während der Messungen zwischen 5 und 10 m variiert werden, wobei sich allerdings die Möglichkeit zur Öffnung einzelner Bahnen auf den unteren Bereich des Stauzauns beschränkte.

3.3.1. Kaltluftströmung zu Beginn einer Strahlungsnacht

Im Gegensatz zum relativ frei gelegenen Meßort B setzte sich in diesem, wesentlich tiefer eingeschnittenen Tal die in Bodennähe gebildete Kaltluft auch dann durch, wenn in der Höhe talaufwärts gerichteter Wind bis etwa 2,8 m/s (gemessen an der oberen Basisstation) Geschwindigkeit herrschte. So konnte z. B. bei NE-Wind (d. h. talaufwärts gerichtet) von 2,5 m/s an der oberen Basis und klarem Himmel schon etwa 20 Minuten vor Sonnenuntergang mittels Rauchpatronen, die längs eines Querprofils des Tals ca. 70 m oberhalb des niedergeleg-

ten Stauzauns entzündet wurden, aufschlußreiche Feststellungen über die beiden gegenläufigen Strömungen im bodennahen Bereich getroffen werden. Während der Rauch an der Talsohle mit einer Geschwindigkeit von rund 1,3 m/s talabwärts strömte, floß der Rauch im oberen Hangdrittel eindeutig talaufwärts. Allein schon aus dem Rauch ließ sich dabei erkennen, daß die Luftströmung am oberen Hangbereich wesentlich turbulenter war, als diejenige an der Talsohle. Eine Zwischenstellung nahm das untere Hangdrittel ein. Hier floß der Rauch zunächst in Bodennähe hangabwärts und schwenkte erst, nachdem er infolge thermischen Auftriebs eine Höhe von etwa 2 m erreicht hatte, mit der geostrophischen Oberströmung nach rechts ein, d. h. talaufwärts. Etwa 10 Minuten später wurde an der Talsohle je eine Rauchpatrone am Boden und in 4,0 m Höhe (mittels einer Stange, an deren Spitze ein Behälter befestigt war) angesteckt. Aus Abb. 26 wird die Gegenläufigkeit von bodennaher Kaltluft und geostrophischem Wind klar erkennbar. Die bodennahe Kaltluft erreichte hierbei Geschwindigkeiten bis zu 1,5 m/s innerhalb einer Gesamthöhe von etwa 1 m. Bereits in Augenhöhe herrschte fast absolute Luftruhe. Nahezu gleichartige Feststellungen traf bereits F. W. NITZE (4) bei Untersuchungen der Kaltluftströmung an einem Hang der Neigung 1:12 mittels ausgewogener Ballone, deren Bahnen stereophotogrammetrisch vermessen wurden.

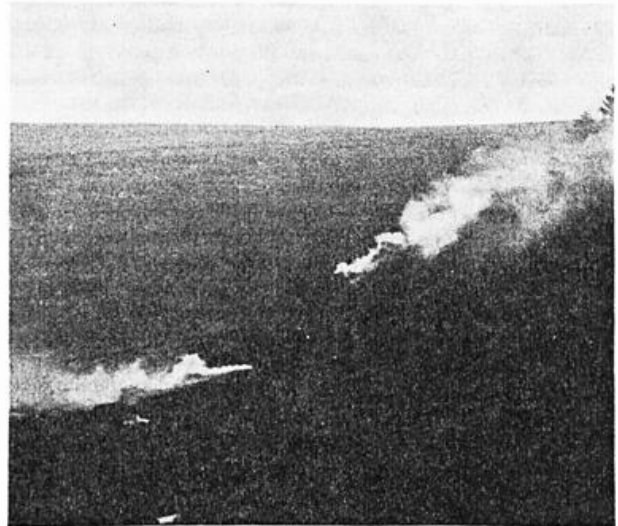


Abb. 26

Strömungsverhältnisse über der Talsohle zu Beginn einer Strahlungsnacht (Meßgelände C).

3.3.2. Kaltluftströmung und Temperaturverteilung ohne sowie bei geschlossenem Stauzaun

Ohne Stauzaun wurden hier von allen Meßorten die höchsten Geschwindigkeiten der nächtlichen Kaltluft gemessen. Aus Abb. 27 kann das vertikale Geschwindigkeitsprofil der nächtlichen Kaltluft an der Talsohle in Höhe des Stauzauns, wie es sich aus dem Mittel von insgesamt 4 Strahlungsnächten in der Zeit von Sonnenuntergang bis 1 Stunde danach ergab, ersehen werden. Die entsprechenden Werte wurden bis 1,5 m Höhe mit Feinwindmessern, darüber mittels Rauchfahnen gemessen, wobei die Zeitspanne des Rauchdurchgangs zwischen 2 Meßprofilen bekannten Abstandes gestoppt wurde. Mit nahezu 3 m/s trat dabei das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit in etwa 1,2 m Höhe auf, während in Höhen von über 4 m praktisch Windstille herrschte. Im Laufe der Nacht nahm diese Geschwindigkeit allmählich ab, und zwar bis auf etwa die Hälfte zur Zeit des nächtlichen Temperatur-Minimums, ohne daß sich dabei die Form des Geschwindigkeitsprofils wesentlich änderte.

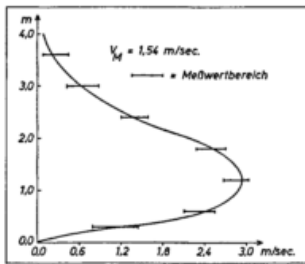


Abb. 27
Vertikales Geschwindigkeitsprofil über der Talsohle
in Strahlungsnächten (Meßgelände C).

Die entsprechenden vertikalen Geschwindigkeitsprofile an den beiden Talabhängen, wie sie sich unter gleichen Voraussetzungen wie o. a. ausgebildet hatten, wurden in Abb. 28 dargestellt. Die beiden Meßpunkte lagen hierbei je 5,0 m über der Talsohle an der Stelle, an welcher das Hindernis aufgebaut wurde. Beachtlich ist neben der geringeren Geschwindigkeit und der tieferen Lage des Maximums in etwa 0,6 m Höhe vor allem die unterschiedliche Geschwindigkeit an den beiden Hängen. Verglichen mit dem Unterschied der beiden Hänge hinsichtlich ihrer Breite oberhalb der Meßpunkte (160 : 70 m) und ihrer entsprechenden Höhe (31 : 9 m) ist dieser Unterschied allerdings weit geringer, als erwartet.

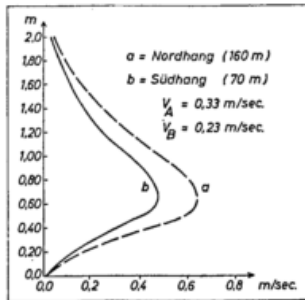


Abb. 28
Vertikales Geschwindigkeitsprofil der von den Hängen
abfließenden Kaltluft in Strahlungsnächten (Meßgelände C).

Die sich zur Zeit des nächtlichen Minimums ohne Stauzaun ausbildende Temperaturverteilung wurde in Abb. 29 (A) aufgezeichnet. Mit einer Temperaturdifferenz von nur $1,7^\circ\text{C}$ zwischen oberer und unterer Basisstation werden selbst die an Meßort B gefundenen Differenzen noch unterboten. Diese, in Anbetracht der orographischen Verhältnisse unerwartet schwach ausgeprägte vertikale Temperaturverteilung findet ihre mögliche Erklärung allein darin, daß die bis nach Sonnenaufgang anhaltende Kaltluftströmung zum vertikalen Austausch in Bodennähe wesentlich beiträgt und damit die Ausbildung extremer Temperaturgradienten in den unteren Luftschichten verhindert. Daß die Kaltluftströmung, wenn auch mit verminderter Geschwindigkeit, bis zu diesem Zeitpunkt anhielt, konnte mehrfach mittels Rauchversuchen nachgewiesen werden; der Rauch zog längs der Talsohle unbehindert ab und paßte sich auch deren Biegung oberhalb von Frauenkron an.

Bei völlig geschlossenem Stauzaun erstreckt sich, wie aus Temperaturmessungen und der Entfernung des Punktes vom Stauzaun, an welchem sich der talabwärts strömende Rauch vom Boden abhebt, eindeutig hervor, der Staubereich zu Beginn der Strahlungsnacht auf eine Strecke von 20 m bei 5,0 m Hindernishöhe und auf etwa 40 m bei einer Höhe der Folienwand von 10,0 m. Mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit der bodennahen Kaltluft im Laufe der Strahlungsnacht nahm die Erstreckung des Staubereichs zu und belief sich zur Zeit des Sonnenaufgangs auf etwa 35 m bei 5,0 m hohem Hindernis bzw. 65 m bei 10 m Höhe der Folienwand. Die sich

im zuletzt genannten Fall ausbildende Temperaturverteilung (dargestellt in Abb. 29 (B)) weist Differenzen bis zu $3,3^\circ\text{C}$ zwischen Stauzaunnahe und oberer Basisstation auf. Bemerkenswert ist hierbei, daß die tiefste Temperatur etwas zum Hang mit der größten Breite sowie Höhe (und damit intensiverem Kaltluftzufluß) hin verschoben erscheint.

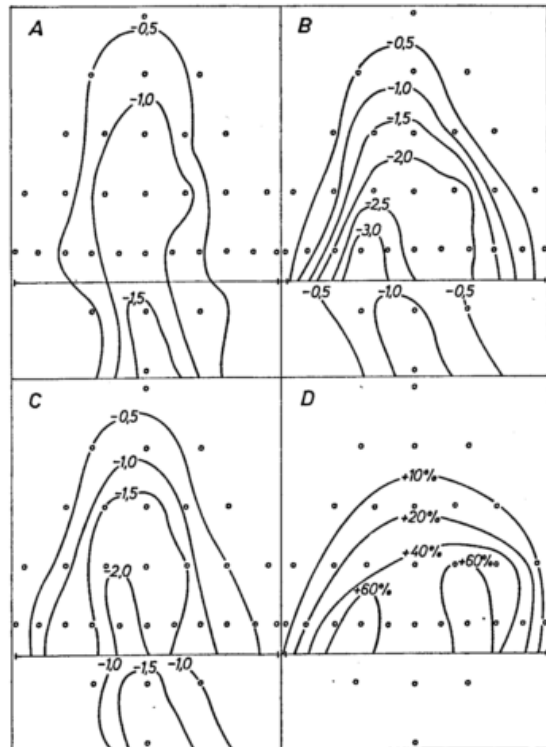


Abb. 29
Temperaturdifferenzen (Minima in 0,7 m Höhe) zur oberen
Basisstation in Strahlungsnächten (Meßgelände C)
A: ohne Stauzaun B: Stauzaun geschlossen
C: 3 Tore offen D: Relativer Temperaturanstieg
durch 3 Tore.

Als Ergebnis dieser Messungen und Beobachtungen wird somit festgestellt, daß der Staubereich vor einem quer zum Talverlauf errichteten Hindernis etwa proportional mit der Hindernishöhe anwächst, dabei jedoch umso größer ist, je langsamer die Kaltluft an der Talsohle fließt; diese Beobachtung steht auch mit den Ergebnissen der Meßorte A und B in Übereinstimmung.

3.3.3. Kaltluftströmung und Temperaturverteilung bei teilweise geöffneter Folienwand

Schon wenige Minuten, nachdem die Folienwand hochgezogen, d. h. der Stauzaun geschlossen wurde, hob der talaufwärts erzeugte Rauch in einer Entfernung von etwa 40 m vor dem Zaun vom Boden ab und strömte über das Hindernis hinweg. Wurde nun im unteren Teil des Stauzaunes eine Folienbahn herabgelassen, so strömte durch die so entstandene Öffnung von 4 m Breite und 5 m Höhe zwar ein Teil der Kaltluft sofort ab, ohne daß sich jedoch dadurch die Überströmung der Oberkante des Stauzauns merklich änderte. Die Feinwindmessungen längs der Öffnungsachse ergaben 10 m oberhalb der Öffnung Werte von etwa 0,5 m/s. Mit Annäherung an den Stauzaun nahm diese Geschwindigkeit bis auf etwa 1,5 m/s zu, erreichte ihren Höchstwert von etwa 3 m/s allerdings erst etwa 7 m unterhalb des Stauzauns. Die bereits am Meßort A beobachtete Düsenwirkung einer solchen, vergleichsweise kleinen Öffnung, war demnach hier, als Folge der doppelt so großen Stauzaunhöhe noch wesentlich stärker ausgeprägt.

Bereits mit der Öffnung von 2 Folienbahnen, also einer Verdoppelung der Durchlaßöffnung, konnte an der zu-

vor gerade verlaufenden Oberkante des Rauchs zwischen dem Abhebungspunkt vom Boden und dem Stauzaun eine merkliche Einbuchtung etwa 10 m vor der Stauzaunoberkante beobachtet werden. Nach etwa 15 Minuten spaltete sich vom ankommenden Rauch ein bodennaher Teil, welcher durch die Öffnung abfloß, ab, während der andere, etwa gleich große Teil weiterhin über den Zaun floß. Erst bei Öffnung von 3 Folienbahnen überwog der Abfluß durch diesen 12 x 5 m großen Durchlaß. Wurde innerhalb des Staubereichs bei noch geschlossenem Stauzaun Rauch erzeugt, und dann 3 Folienbahnen niedergelegt, dann floß der Rauch zunächst teils durch die Öffnung, teils aber auch noch über den Stauzaun hinweg. Nach 10 Minuten hatte sich die Obergrenze des Rauchs schon merklich abgesenkt, so daß nunmehr kein Rauch mehr über den Zaun floß; der Abfluß des Rauchs durch die Öffnung führte dabei zu einem weitgehend rauchfreien Keil oberhalb der Folienwand. Nach weiteren 10 Minuten floß nahezu der gesamte Rauch längs der Talsohle durch die Öffnung ab. Es kann somit angenommen werden, daß der längs der Talsohle gestaute Kaltluftvorrat innerhalb einer Zeitspanne von 15–20 Minuten bei dieser Durchlaßgröße abgeführt wird. Darauf weist auch der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit hin. So wurden kurz nach der Öffnung des Durchlasses 10 m oberhalb des Zauns etwa 0,8 m/s, in Höhe der Folienwand knapp 2,0 m/s und 5 m unterhalb derselben 3,5 bis 4,0 m/s gemessen. Eine halbe Stunde danach hatte die Strömung oberhalb des Zauns auf etwa 1,5 m/s zugenommen, dagegen gleichzeitig unterhalb desselben auf knapp 3 m/s abgenommen, während in Höhe des Durchlasses keine merkliche Änderung eintrat. Mit zunehmender Erweiterung des Durchlasses verkürzte sich die Zeitspanne, welche bis zum Abfluß der gestauten Kaltluft verging, entsprechend. Die Wirkung von Einzelöffnungen (je 4 m breit), zwischen denen je eine Folienbahn stehen blieb, entsprach nur dann etwa derjenigen einer entsprechend großen Einzelöffnung, wenn es sich um den unmittelbaren Bereich der Talsohle handelte. Öffnungen am Hang waren praktisch ohne Wirkung.

In bezug auf den Temperatureffekt wirkten sich die Durchlässe auf den Staubereich oberhalb des Stauzauns (wenn auch mit der Entfernung von ihm rasch abnehmend) in Form eines Anstiegs aus. Gleichzeitig gingen die Temperaturen unterhalb des Stauzauns etwas zurück.

Um den Temperatureffekt eines Durchlasses zur Zeit des nächtlichen Temperaturminimums, also der stärksten Frostgefährdung zu ermitteln, blieben in 2 Strahlungs Nächten je 3 Tore (= Folienbahnen) in der zweiten Nachthälfte geöffnet. Aus Abb. 29 (C) kann die sich hierbei einstellende Temperaturverteilung ersehen werden. Im Vergleich zum völlig geschlossenen Stauzaun (B) ergibt sich eine um 1° C höhere Temperatur unmittelbar oberhalb des Stauzauns. Um den durch diesen Durchlaß erzielten Temperatureffekt E relativ, d. h. prozentual ausdrücken zu können, wurde von jeder Meßstelle das Verhältnis

$$E = \frac{(T_C - T_B) \cdot 100}{T_A - T_B} \%$$

gebildet, wobei für die Temperaturdifferenzen T zur oberen Basis gilt:

T_A : ohne Stauzaun

T_B : geschlossener Stauzaun

T_C : Stauzaun auf 12 x 5 m geöffnet.

Der so ermittelte durch die Öffnung erzielbare relative Temperaturanstieg wurde in Abb. 29 (D) aufgezeichnet. Daraus ergibt sich, daß bereits eine Öffnung von etwa 9% der Stauzaunfläche (60 von 650 m²) im unteren Teil des Staubereichs einen relativen Temperaturanstieg und somit einen Gesamteffekt zwischen 40 und

60% aufweist. Da bei den Zwischenmessungen im Laufe der Strahlungsnacht weitgehend dieselben Werte ermittelt wurden, konnten somit auch die im Wechsel zwischen geschlossenem und teilweise geöffnetem Stauzaun ermittelten Temperaturwerte zur Beurteilung der Wirksamkeit von Durchlässen verschiedener Breite herangezogen werden.

3.3.4. Schlußfolgerungen aus den Messungen im Gelände C

Die bereits aus dem Vergleich der Meßergebnisse an den Meßorten A und B gewonnene Erkenntnis, wonach die Häufigkeit des Auftretens des Kaltluftflusses in Strahlungsnächten mit der Einschnitttiefe eines Tals anwächst, wurde hier bestätigt. Dasselbe trifft auch auf die ausschließliche Abhängigkeit der Andauer des nächtlichen Kaltluftflusses von den Abflußverhältnissen zu.

Aus den Profilmessungen der bodennahen Kaltluft an den Hängen und der Talsohle ging eindeutig hervor, daß Geschwindigkeit und damit Menge der abfließenden Kaltluft sowohl mit der Größe des Einzugsgebiets als auch mit dem Gefälle zunehmen, wobei Höchstwerte bis zu 3,0 m/s erreicht wurden.

Während die Temperaturunterschiede zwischen Tal Schulter und Talsohle ohne Hindernis als Folge der mit der Talsohlenneigung steigenden Geschwindigkeit der abfließenden Kaltluft noch geringer ausfielen als an Meßort B, sanken hier die Temperaturen im Anstaubereich unmittelbar vor dem geschlossenen Stauzaun weit stärker ab; dies kann als Auswirkung des tieferen Taleinschnitts und der damit geringeren Windoffenheit gegenüber Meßort B angesehen werden.

Die als Folge erhöhten Talsohlengefälles gegenüber Meßort A verringerte Tiefe des Kaltluftstau-Bereichs wächst zwar etwa proportional zur Höhe des Stauzauns an, doch verstärkt sich damit der durch das Hindernis verursachte Temperaturrückgang im Staubereich nur geringfügig.

Neu war die Erkenntnis, daß die Abflußgeschwindigkeit in Durchlässen vergleichbarer Größe mit der Höhe des Hindernisses zunimmt und dadurch auch der mit dem Durchlaß erzielbare Temperatureffekt. Während in einem relativ flachen Talquerschnitt (wie am Meßort A) mehrere kleine, über die Talsohle verteilte Durchlässe den besten Temperatureffekt aufweisen, kommen in V-förmigen steileren Tälern nur Durchlässe über der Talsohle selbst zur Wirkung.

4. Vergleichende Analyse der Kaltluftentstehung und des Kaltluftflusses an den 3 Meßorten

In klaren und windschwachen Nächten ist die auf Grund der langwelligigen Ausstrahlung gemäß dem STEFAN-BOLTZMANNschen Gesetz ($A = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$) erfolgende Energieabgabe der Boden- bzw. Pflanzenoberfläche in den oberen Halbraum i. A. größer als die nach unten gerichtete Gegenstrahlung der Luft. Dieser Energieverlust, der sich bei den durchgeführten Messungen auf Werte zwischen 0,082 und 0,103 cal/cm²min belief, verursacht eine Abkühlung der Pflanzenoberfläche unter die Lufttemperatur. Durch molekularen und turbulenten Wärmeaustausch zwischen Pflanze und Umgebungsluft bildet sich somit eine bodennahe Kaltluftschicht, und zwar umso ausgeprägter je negativer die Strahlungsbilanz, je geringer die Wärmezufuhr aus dem Boden und je schwächer der Massenaustausch mit der darüber liegenden Luftschicht ist. Während diese bodennahe Kaltluft haut im ebenen Gelände infolge ihrer Lagerungsstabilität an Ort und Stelle verbleibt, unterliegt sie im geneigten Gelände einer hangabwärts gerichteten Vortriebskraft, deren Größe mit der Hangneigung und dem Dichtegefälle (als Folge der Temperaturdifferenz) senkrecht zur Hangoberfläche ansteigt. Dieser Vortriebskraft steht

die hangparallel wirkende Reibungskraft entgegen. Die Geschwindigkeit der Kaltluft ist somit von der Stärke der Kaltluftbildung, dem Hanggefälle und der Bodenrauigkeit abhängig. Eine umfassende Darstellung dieser Vorgänge erfolgte von R. GEIGER (5) und A. BAUMGARTNER (6) mit ausführlichen Literaturhinweisen.

4.1. Geschwindigkeit der Kaltluft am Hang

Für den stationären Fall einer Kaltluftströmung am Hang leitete A. DEFANT (7) theoretisch folgende Beziehung ab:

$$u = \sqrt{\frac{g \cdot z}{\mu} \cdot \frac{\Theta' - \Theta}{\Theta}} \cdot \sin \alpha$$

wobei u = mittlere hangparallele Geschwindigkeit der bodennahen Kaltluft.

- Θ/Θ' = pot. Temperatur in bzw. über der Kaltluftströmung
- μ = Reibungskonstante
- α = Hangneigung
- g = Schwerebeschleunigung
- z = mittlere Höhe der strömenden Kaltluft

Werden die an Meßort C anl. der an den beiden Hängen durchgeführten Abflußmessungen ermittelten Werte eingesetzt, so ergibt sich, wenn für beide Hänge $z = 2,0$ m und $\mu = 0,002$ (als der von DEFANT bestimmte Wert für sehr geringe Reibung) eingesetzt werden, für den S-Hang ($\Theta' - \Theta = 1,3^\circ \text{C}$, $\Theta' = 273^\circ \text{C}$, $\sin \alpha = 0,127$) $u = 2,44$ m/s und für den N-Hang ($\Theta' - \Theta = 1,6^\circ \text{C}$, $\Theta' = 273^\circ \text{C}$, $\sin \alpha = 0,190$) $u = 3,30$ m/s. Ein Vergleich mit den sich aus Abb. 28 ergebenden mittleren Geschwindigkeiten von 0,23 m/s für den S-Hang bzw. 0,33 m/s für den Nordhang läßt erkennen, daß die theoretisch berechneten Werte fast genau zehnmal größer sind als die tatsächlich beobachteten Werte.

Diese Diskrepanz läßt sich sicherlich nur zum geringen Teil aus einer falschen Annahme der Reibungskonstante erklären; die wesentliche Ursache liegt darin begründet, daß A. DEFANT seinen Überlegungen stationäre Luftströmungen zugrunde legt, die im vorliegenden Fall solch kleiner Hänge bestimmt nicht gegeben sind. Dasselbe trifft auch auf die Ableitungen von L. PRANDTL (8) und F. DEFANT (9) zu.

Die in der Formel von DEFANT nicht enthaltene Fallhöhe (h), mit der die Kaltluftgeschwindigkeit anwächst, wurde von M. REIHER (10) berücksichtigt gemäß:

$$u = \sqrt{2gh \frac{T - T'}{T}}$$

Werden die entsprechenden Werte für h (9 m für den S-Hang, 31 m für den N-Hang) aus Meßort C eingesetzt, dann ergeben sich Geschwindigkeiten von $u = 0,94$ m/s für den S-Hang bzw. 1,89 m/s für den Nordhang. Obschon diese Werte weitaus niedriger sind, als die auf Grund der DEFANTschen Formel berechneten und damit der Wirklichkeit etwas besser entsprechen, stimmt ihre gegenseitige Relation von 1:2,0 weniger mit den gefundenen Werten überein, als dies bei der Auswertung nach DEFANT der Fall ist.

Ausgehend von der Überlegung, daß es sich beim Abfluß der sich am Hang bildenden bodennahen Kaltluft um die Umwandlung von potentieller in Bewegungs-Energie handelt, ergibt sich folgende Beziehung:

Angenommen, es habe sich an einem Hang der horizontal gemessenen Breite B und der Neigung α durch Ausstrahlung eine bodennahe Kaltluftschicht der Dicke d gebildet, dann berechnet sich die Höhe H des Schwerpunkts dieser Kaltluftschicht über dem Hangfuß zu

$$H = \frac{B \cdot \text{tg} \alpha + d}{2}$$

Die mittlere Geschwindigkeit u der sich von der darüber liegenden Luftschicht mit der Temperatur T' um

den Betrag $T - T'$ unterscheidenden Kaltluflthaut ergibt sich dann zu

$$u = \sqrt{2g \cdot H \cdot \frac{T - T'}{T}}$$

Daraus folgt
$$u = \sqrt{g \cdot \frac{(T - T')}{T} \cdot (B \text{tg} \alpha + d)}$$

Durch Einsetzen der am Meßort C gefundenen Werte ergibt sich für den Südhang $u = 71$ cm/s und für den Nordhang $u = 138$ cm/s. Vergleicht man diese theoretisch zu erwartenden Geschwindigkeiten mit den tatsächlich gemessenen Werten (23 bzw. 33 cm/s) so fällt auf, daß das Verhältnis der berechneten zu den gemessenen Werten mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt. Dies läßt den Schluß zu, daß entweder der Reibungseinfluß oder aber der Austausch stärker zunimmt als die Geschwindigkeit. Die an zweiter Stelle genannte Möglichkeit würde mit dem von GEORGI (11) gefundenen Ergebnis, wonach der Austausch in Mulden und Gruben überproportional zur Windgeschwindigkeit ansteigt, in guter Übereinstimmung stehen.

Wird der Reibungseinfluß R als Exponent zur Geltung kommend angesehen, so gilt der Ansatz:

$$u^R \text{ berechnet} = u \text{ gemessen}$$

Da sich für den Südhang $R = 0,73$ und für den Nordhang $R = 0,71$ ergibt, gilt somit für die Geschwindigkeit der Kaltluft im vorliegenden Fall mit recht guter Annäherung:

$$u = \sqrt[0,72]{g \cdot \left(\frac{T - T'}{T}\right) \cdot (B \cdot \text{tg} \alpha + d)} \text{ cm/s}$$

Auch die an den Meßorten A und B gefundenen Werte weisen mit obiger Berechnung zufriedenstellende Übereinstimmung auf.

4.2. Abflußmenge der Kaltluft über der Talsohle

Aus der Integration der in Abb. 28 dargestellten vertikalen Geschwindigkeitsprofile der bodennahen Kaltluft im unteren Hangdrittel zum Zeitpunkt des stärksten Kaltluftflusses ergibt sich für den Nordhang ein mittlerer Abfluß von 0,65 m³/s und für den S-Hang von 0,46 m³/s je lfdm Hang. Unter der Annahme, daß es sich hierbei um für den ganzen Hang gültige Mittelwerte handelt, errechnet sich somit bei einer effektiven Länge der Talsohle von 250 m eine Gesamtkaltluftproduktion P von $P = 250 \cdot (0,65 + 0,46) = 278$ m³/s. Bei einer mittleren Temperaturdifferenz der abfließenden Kaltluft zur darüber liegenden Luftschicht von $\Delta T = 1,8^\circ \text{C}$ und einem Einzugsgebiet F von 8,4 ha entspricht dies einer auf die Flächeneinheit bezogenen Energieabgabe L von

$$L = \frac{P \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{F} \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$$

wobei

- ρ = spez. Gewicht der Luft
- c_p = spez. Wärme der Luft

Auf den vorliegenden Fall bezogen, ergibt sich für L

$$L = \frac{278 \cdot 1,20 \cdot 0,24 \cdot 1,8 \cdot 60 \cdot 10^3}{8,4 \cdot 10^4} = 0,0103 \text{ cal/cm}^2 \text{ min.}$$

Demzufolge werden nur etwa 10–12 Prozent der abgestrahlten Energie zur Produktion der bodennahen Kaltluft, welche an der Talsohle abfließt, benötigt. (H. SCHULTZ (12) berechnete auf gleiche Weise für das wesentlich höhere Reibungswerte aufweisende Wisperthal einen Wert von 0,007 cal/cm² min.)

Die Kaltluftproduktion pro Flächeneinheit beläuft sich dabei im Mittel auf

$$\frac{278 \cdot 60}{8,4 \cdot 10^4} = 0,20 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ min.}$$

Dieser Wert, dem ein Anstieg der Kaltluftobergrenze bei fehlendem Abfluß von 0,20 m/min entsprechen würde, stimmt mit den Angaben von P. LEHMANN (13) recht gut überein.

Die Vermessung des vertikalen Geschwindigkeitsprofils der an der Talsohle abfließenden Kaltluft (Abb. 27) ergab eine mittlere Geschwindigkeit von 1,54 m/s bei einer Höhe von 4 m. Bei einer mittleren Breite der Talsohle, in welcher sich der Abfluß vollzieht, von rund 40 m (dabei wurde die Auskeilung des Kaltluftflusses an den Hängen berücksichtigt) entspricht dies einer Abflußmenge von etwa

$$4,0 \cdot 1,54 \cdot 40 = 247 \text{ m}^3/\text{s}$$

mithin ein Wert, der nur etwa 11% unter demjenigen liegt, welcher sich aus dem Abfluß der beiden Hänge ergab. Die bei 3 geöffneten Folienbahnen beobachtete mittlere Abflußgeschwindigkeit von 2,2 m/s entspricht mit $12 \cdot 5 \cdot 2,2 = 132 \text{ m}^3/\text{s}$ etwa der Hälfte des Abflusses, wie er sich ohne Stauzaun einstellt; wie aus

Abb. 29 entnommen werden kann, beläuft sich der durch diesen Abfluß bewirkte Temperatureffekt E im unmittelbar oberhalb des Hindernisses gelegenen Staubereich ebenfalls auf etwa die Hälfte. Weitere Auswertungen bestätigen die Übereinstimmung zwischen der relativen Abflußleistung eines Durchlasses und dem dadurch erzielten Temperatureffekt.

Aus dem Vergleich der an allen 3 Meßorten beobachteten Abflußmengen untereinander ließ sich zunächst nur erkennen, daß (gute Abflußverhältnisse vorausgesetzt) diese von folgenden orographischen Faktoren im Zuflußbereich abhängen:

- a) Größe des Einzugsgebiets
- b) Hangneigung
- c) Neigung der Talsohle
- d) Rauigkeit der Oberfläche.

In der nachfolgenden Tabelle wurden die an den 3 Meßorten gegebenen Zahlenwerte dieser Faktoren aufgeführt:

Tab. 1

Orographische Faktoren im Zuflußbereich der drei untersuchten Täler

Meßort:	A	B	C	
Hangneigung α	5,8	4,8	9,1	Grad
Talsolehneigung β	1,5	7,7	6,9	Grad
Einzugsgebiet E	248.000	48.000	84.000	m ²
$\sin \alpha$	0,101	0,083	0,158	—
$\sin \beta$	0,026	0,134	0,120	—
\sqrt{E}	498	219	307	—
$\sin \alpha \cdot \sin \beta \sqrt{E}$	1,3	2,4	5,9	—
$(400 \cdot \sqrt{E} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta)^{0,72}$	89	141	269	m ³ /s

Auf Grund der Beobachtung, daß der Kaltluftzufluß mit zunehmender Neigung von Hängen und Talsohle weit rascher anwächst, als mit der Vergrößerung des Einzugsgebiets, sowie der in Abs. 4.1. gefundenen Beziehung zur Geschwindigkeit der Kaltluft an den Hängen, ergab sich für den Abfluß A in Tälern der Ansatz

$$A \sim (\sqrt{E} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta)^{0,72}$$

Wird der in Klammern stehende Ausdruck mit dem Faktor 400 versehen, dann ergeben sich die in der letzten Zeile angeführten Werte, welche mit den gemessenen Abflußmengen im Rahmen der Meßgenauigkeit recht gut für alle 3 Meßorte übereinstimmen. Selbstverständlich kann diese, weitgehend empirisch gefundene Beziehung nur grobe Anhaltswerte für die unter günstigen Abflußverhältnissen zum Abfluß gelangende Kaltluftmenge liefern, und zwar ausschließlich unter vergleichbaren Rauigkeitsverhältnissen. Da die Bodenrauigkeit an allen drei Meßorten Minimalwerte aufwies (kurzgehaltene Grasweide), stellen die o. a. Zahlen somit Maximalwerte dar, welche in rauherem Gelände mit Sicherheit nicht erreicht werden.

4.3. Abhängigkeit des Kaltluftflusses in Durchlässen von der Hindernishöhe

Fließt ein unter Überdruck stehendes Gas aus einer am Boden des Gefäßes angebrachten Öffnung, so gilt für die Austrittsgeschwindigkeit in die Luft, nach der in (14) angeführten Formel

$$v = \sqrt{\frac{2g \cdot p_0 \cdot \Delta p}{\rho_0 (p + \Delta p)}} \text{ cm/s}$$

Daraus folgt für $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $p_0 = 1033 \text{ gr/cm}^2$, $\rho_0 = 0,001293 \text{ gr/cm}^3$,

$$v = 396 \sqrt{\frac{\Delta p}{p + \Delta p}} \text{ m/s}$$

wobei Δp der Überdruck im Gefäß und p der außerhalb des Gefäßes herrschende Luftdruck bedeuten.

Wird diese Beziehung auf die vor einem Hindernis gestaute Kaltluft angewandt (auch hier besteht ja als Folge der Temperatur- und damit Dichteunterschiede zu beiden Seiten des Hindernisses ein Druckunterschied), so gilt für den 10 m hohen Stauzaun

(bei $p = 940 \text{ mb}$, $T = 0,0^\circ \text{ C}$, $\Delta T = 2,0^\circ \text{ C}$)

$$\Delta p = 2,0 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ gr/cm}^2$$

woraus folgt:
$$V = 396 \sqrt{\frac{9,0 \cdot 10^{-3}}{\frac{940 \cdot 10}{9,81} + 9,0 \cdot 10^{-3}}} = 1,21 \text{ m/s}$$

Dieser Wert stimmt recht genau mit der durch die Aufstockung der Folienwand auf 10 m beobachteten Steigerung der Durchflußgeschwindigkeit in einem Durchlaß von 1,0 auf 2,2 m/s überein und bestätigt damit die in Abs. 3.3.4. dargelegte Erhöhung der Durchlaßquote mit wachsender Hindernishöhe.

4.4. Zusammenfassung der Meßergebnisse

Werden die an den 3 Meßorten A, B und C durchgeführten Beobachtungsergebnisse miteinander verglichen, dann ergeben sich unter Berücksichtigung der in den Abs. 4.1. bis 4.3. dargelegten Ansätzen folgende Erkenntnisse:

- a) Im Gegensatz zu flachen, und damit windoffenen Talformen setzt bei tiefer eingeschnittenen Tälern der nächtliche Kaltluftfluß auch dann ein, wenn in Höhe der Talschultern noch mäßige Luftbewegung

vorherrsch. Mit zunehmendem Verhältnis von Einschnitttiefe zu Talbreite erhöht sich demnach die Dauer und Häufigkeit des nächtlichen Kaltluftflusses.

- b) Die Menge der von den Talhängen zur Talsohle abfließenden Kaltluft steigt mit der Neigung der Talhänge an. Bei vergleichbarer Hangneigung nimmt die Abflußmenge etwa mit der Wurzel der Länge des Hanges zu. Dagegen wird die Geschwindigkeit des Kaltluftflusses längs der Talsohle allein von deren Gefälle bestimmt. Bei sehr geringer Bodenreibung und entsprechend großem Gefälle wird dabei an der Talsohle der bislang als Grenzwert für die Geschwindigkeit fließender Kaltluft angenommene Betrag von 1,5 m/s weit überschritten.
- c) Je schneller der Kaltluftabfluß erfolgt, desto geringer fallen die dabei gemessenen Temperaturunterschiede zwischen Talschulter und Talsohle aus. Dies rührt offensichtlich von dem mit der Geschwindigkeit der fließenden Kaltluft zunehmenden Austausch mit den wärmeren Luftschichten über der bodennahen Kaltluft her. Die Andauer der nächtlichen Kaltluftströmung wird vom Verhältnis des Zuflusses zur Kapazität des Aufnahmegebiets und somit auch von der Höhendifferenz zum Haupttal bestimmt; erreicht der Rückstau aus dem Haupttal die Obergrenze des Nebental-Einzugsgebiets, dann endet die Kaltluftströmung.
- d) Je höher die Geschwindigkeit der ungestörten Kaltluft, desto tiefer sinken die Temperaturen im unmittelbar vor einem eingebrachten Hindernis liegenden Bereich ab; gleichzeitig verkürzt sich der Staubeereich mit zunehmender Geschwindigkeit des Kaltluftflusses. Mit zunehmender Hindernishöhe wächst der sich vom Hindernis talaufwärts erstreckende Stau-Bereich zwar etwa proportional zur Hindernishöhe an, jedoch vergrößert sich dabei die durch das Hindernis verursachte maximale Temperaturdifferenz nur noch geringfügig.
- e) Die Geschwindigkeit der innerhalb von Durchlässen abströmenden Kaltluft nimmt mit der Höhe des Hindernisses zu. Damit verstärkt sich auch der durch solche Durchlässe erzielbare Temperaturanstieg gegenüber einem vollständig geschlossenen Hindernis. In Abb. 30 wurde der Verlauf der sich aus allen Messungen ergebenden, nach Abschnitt 3.3.3. berechneten Temperatureffekte E in Abhängigkeit von der jeweiligen Durchlaßgröße aufgetragen, wobei die in %/Öffnung dargestellte Durchlaßgröße das Verhält-

10 m hohen Stauzaun schon ein Durchlaß von 9% der Hindernisfläche, während bei einem 5 m hohen Stauzaun eine Öffnung von 23% benötigt wird.

5. Messungen an Dammdurchlässen

Während in Bezug auf die Temperaturverhältnisse und den Staubeereich der nächtlichen Kaltluft die an künstlichen Hindernissen gefundenen Werte auch als repräsentativ für entsprechende Dämme angesehen werden können, trifft dies auf die Wirkung von Durchlässen mit Sicherheit nicht zu. Im Gegensatz zu den Durchlässen in der Folienwand, welche nur eine zwei-dimensionale Öffnung darstellen, handelt es sich bei Dammdurchlässen um Tunnels, also dreidimensionale Durchlässe, bei denen die Reibung der durchfließenden Kaltluft an den Tunnelwänden zusätzlich wirksam wird. Da die Simulation eines solchen Reibungsflusses mittels Folienwände sich technisch als zu schwierig erwies, wurden für die entsprechenden Messungen deshalb bereits vorhandene Dammdurchlässe im Gebiet des Ahrtals und der Südeifel herangezogen.

5.1. Meßprogramm und Durchführung

Bei den im Herbst 1971 durchgeführten Messungen sollte lediglich das Verhältnis der Geschwindigkeit der ungestörten, im Tal abfließenden Kaltluft zur Geschwindigkeit im Durchlaß festgestellt werden. Auf Grund der Vermutung, daß diese Verhältnisse von den Dimensionen der Durchlässe beeinflusst wurde, erfolgte die Auswahl der Untersuchungsobjekte weniger nach der Größe und Form des jeweiligen Tals bzw. Einzugsgebiets, als vielmehr nach den Ausmaßen der Durchlässe sowie der Dammhöhe. Bei den insgesamt 9 Objekten, welche untersucht wurden, handelte es sich ausschließlich um Straßen- sowie Eisenbahn-Unterführungen in Dämmen zwischen 4,5 und 16,5 m Höhe. Bei Durchlaßquerschnitten zwischen 19 und 340 m² lagen die Durchlaßtiefen (= Tunnellängen) im Bereich zwischen 9 und 32 m. Diese breite Streuung konnte als notwendige, aber auch hinreichende Voraussetzung zur Erfassung des Einflusses der Durchlaßform auf den Kaltluftdurchfluß angesehen werden.

Die Messungen erfolgten ausschließlich in windschwachen bzw. windstillen Strahlungs Nächten, nachdem der Kaltluftfluß voll in Gang gekommen war. Dabei wurde das Strömungsprofil innerhalb des Tunnels mittels Feinwindmesser aufgenommen und synchron hierzu die Geschwindigkeit der ungestörten Kaltluft in 1,5 m Höhe über der Dammkrone gemessen. Schon die ersten Meßreihen ließen erkennen, daß die auf der Dammkrone beobachteten Schwankungen der Kaltluftströmung sich praktisch ohne zeitliche Verzögerung entsprechend auf die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Durchlasses auswirkten. Das Verhältnis der beiden Strömungsgeschwindigkeiten erwies sich dabei im Rahmen der Meßgenauigkeit als weitgehend konstant und damit unabhängig von der Absolutgeschwindigkeit der Strömung auf der Dammkrone. Obwohl die Geschwindigkeit der Kaltluft an allen Stellen des Tunnelquerschnitts geringer war als über der Dammkrone, überraschte doch deren hoher Absolutwert, besonders bei den längeren Durchlaßstrecken.

In Abb. 31 wurden einige Beispiele der ermittelten Ergebnisse aufgetragen. In beiden Fällen handelte es sich um Durchlässe in einem Bahndamm in der Höhe von Einmündungen von Seitentälern in das Ahrtal. Trotz des relativ großen Einzugsgebiets und erheblicher Hangneigungen (bis zu 26 Grad) war die Strömung über der Dammkrone mit 1,4 bzw. 1,7 m/sec als Folge der größeren Reibung (Hänge meist mit Reben, teils auch mit Buschwerk bestanden) weit schwächer als in den zuvor untersuchten, völlig ausgeräumten Eifeltälern.

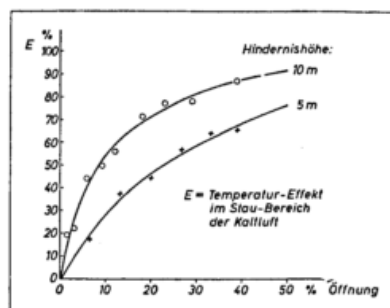


Abb. 30

Abhängigkeit des Temperatur-Effekts eines Durchlasses von dessen relativer Öffnungsweite bei Hindernishöhen von 5 und 10 m.

nis des Durchlasses zur Gesamtfläche des Hindernisses angibt. Daraus wird ersichtlich, daß der erzielte Temperatureffekt E entsprechend der abfließenden Kaltluftmenge mit der Durchlaßgröße ansteigt. Gleichzeitig nimmt der Temperatureffekt mit der Höhe des Hindernisses zu. So genügt z. B. zur Erzielung eines Temperatureffekts von 50% bei einem

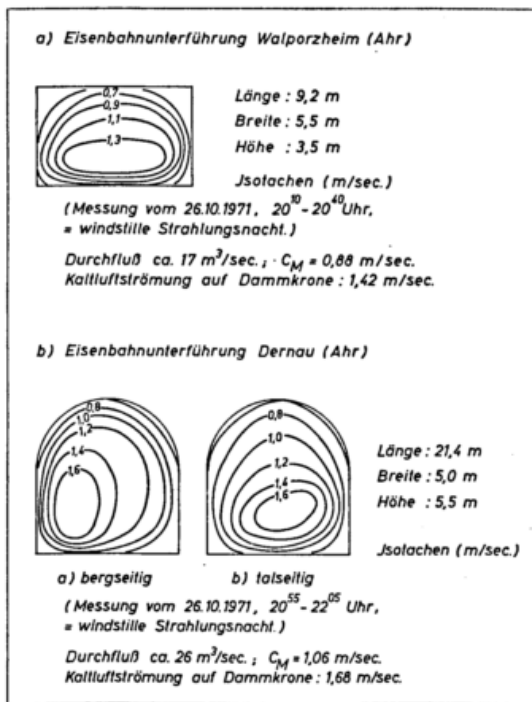


Abb. 31

Kaltluftfluß in Dammdurchlässen.

Die auf Grund der Einzelmessungen (mit fünffacher Wiederholung) gezeichneten Isotachen zeigen im ersten Fall ein Maximum im unteren Drittel des Tunnelquerschnitts. Die im zweiten Fall beobachtete seitliche Verlagerung der Zone größter Geschwindigkeit in der Nähe des luvseitigen Tunnelleingangs hat ihre Ursache darin, daß die Tunnelachse mit der Talsohle (und damit der ankommenden Kaltluft) einen Winkel von etwa 20 Grad bildet und sich demnach eine Tunnelseite als Prallfläche für die schräg einfließende Kaltluft erweist. Bereits kurz vor dem leeseitigen Tunnelausgang hat sich jedoch die auch bei allen anderen Untersuchungsobjekten beobachtete Strömungsverteilung wieder eingestellt.

5.2. Meßergebnisse

Aus der folgenden Tabelle können sowohl die Innenmaße der untersuchten Tunneln, als auch die beobachteten Kaltluftströmungen ersehen werden.

Tab. 2

Dimensionen, Strömungsgeschwindigkeiten und Durchlaßquotienten von neun untersuchten Dammdurchlässen

Objekt	B (m)	H (m)	T (m)	D (m)	V ₀ (m/s)	V _i (m/s)	DQ
1	5,5	3,5	9,2	1,0	1,42	0,88	0,116
2	5,0	5,5	21,4	ca. 11	1,68	1,06	0,062
3	5,0	4,0	10,0	1,5	1,41	0,93	0,111
4	5,0	4,5	32,3	6,5	1,65	0,84	0,037
5	40,0	8,5	20,5	1,5	1,04	0,95	0,171
6	5,0	6,5	25,0	8,5	1,43	0,83	0,057
7	8,0	5,0	28,5	1,0	1,42	0,61	0,054
8	12,0	8,0	17,0	1,0	1,35	0,97	0,141
9	7,0	6,0	30,5	1,0	1,38	0,65	0,053

Hierbei bedeuten:

B/H/T = Breite / Höhe / Tiefe des Durchlasses

D = Höhe des Damms zwischen Tunneloberkante und Dammkrone

V₀ = Kaltluftströmung über der Dammkrone

V_i = Kaltluftströmung (Mittel über den gesamten Querschnitt) im Tunnel.

Um eine Maßzahl für die Reibung der Kaltluft innerhalb des Tunnels zu erhalten, wurde das Verhältnis des Querschnitts (d. h. der Öffnungsfläche) zur Innenwandfläche gebildet und als Durchlaßquotient (DQ) bezeichnet. Diese dimensionslose Größe, welche sich für rechteckige Querschnitte zu

$$DQ = \frac{B \cdot H}{2(B + H) \cdot T}$$

berechnet, wurde in der letzten Spalte der o. a. Tab. 2 aufgeführt. Sie weist mit Werten zwischen 0,04 und 0,17 eine große Schwankungsbreite innerhalb der untersuchten Objekte auf.

Werden nun die für den Durchlaßquotienten DQ gefundenen Werte gegen das Verhältnis V_i/V₀ aufgetragen (Abb. 32), so ergibt sich für 6 der untersuchten Objekte eine angenähert lineare Beziehung (a), welche ausdrückt, daß mit wachsendem Durchlaßquotienten die Relativgeschwindigkeit der Kaltluft im Tunnel zur Kaltluftströmung über der Dammkrone entsprechend ansteigt. Lediglich die Objekte Nr. 2, 4 und 6 weichen hiervon ab. Da es sich hierbei ausnahmslos um Durchlässe handelt, bei denen der Damm wesentlich höher ist als der Tunnel (und somit entsprechend Abschnitt 3.3.3. ein verstärkter Durchfluß als Folge der höher angestauten Kaltluft auftritt), wurde eine weitere Kurve (b) gezeichnet, welche für relative Dammhöhen (gemessen ab Oberkante Tunnel) von etwa 10 m die entsprechende Beziehung zwischen Durchlaßquotienten und Relativgeschwindigkeit der Kaltluft im Tunnel angibt.

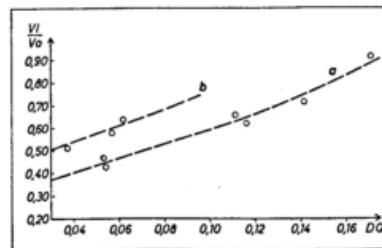


Abb. 32

Abhängigkeit der relativen Durchflußgeschwindigkeit (V_i : V₀) in Dämmen vom Durchlaßquotienten DQ für relative Dammhöhen von 1—2 m (a) und 6—10 m (b).

Unter der plausiblen und durch die vorangegangenen Untersuchungen bestätigten Annahme, daß der durch einen Durchlaß bewirkte Temperatureffekt in unmittelbarem Staubereich der Kaltluft oberhalb des Hindernisses weitgehend proportional zur Menge der innerhalb des Durchlasses abfließenden Kaltluft ist, kann damit aus der Kombination der in den Abb. 30 und 32 dargelegten Diagramme der durch einen Tunnel bewirkte Temperatureffekt bestimmt werden. Hierfür sei ein Berechnungsbeispiel angefügt:

Für einen Durchlaß, dessen Querschnittsfläche 20 % der gesamten Dammläche einnimmt, beträgt bei einem Damm, der nicht wesentlich höher ist als der Durchlaß selbst, der Temperatureffekt ohne Reibungsverluste (lt. Abb. 30) 47 %. Bei einem angenommenen Durchlaßquotienten DQ von 0,10 verringert sich die Durchlässigkeit auf 59 %. Der mithin zu erwartende Temperatureffekt beläuft sich demnach auf 0,59 × 47 = 28 %. Handelt es sich um einen wesentlich höheren Damm, dann ergäbe sich ein Temperatureffekt von 0,76 × 72 = 55 %; dabei muß allerdings berücksichtigt werden, daß mit der größeren Dammhöhe und Durchlaßtiefe bei gleicher prozentualer Öffnung und gleichem Durchlaßquotienten auch der Tunnelquerschnitt entsprechend ansteigt.

Aus diesen Beziehungen allein wird bereits deutlich, daß der Temperatureffekt eines Durchlasses mit dessen Querschnitt zu- und mit dessen Tiefe abnimmt. Auf gleiche Durchlaßquerschnitte bezogen, ist deren Temperatureffekt umso kleiner, je breiter das Tal, je geringer die Hangneigung und je breiter die Dammkrone

Tab. 3

Temperatureffekt E (%) von Durchlässen bei Dämmen von 6–7 m Höhe.

F	B	Tiefe T					
		≤10	20	30	40	50	60
500	10	24	15	13	11	10	10
	30	58	36	29	26	24	23
	50	76	49	40	35	32	30
	80	92	60	49	43	39	37
1000	10	13	08	07	06	06	05
	30	38	24	19	17	16	15
	50	53	34	28	24	22	21
	80	68	44	36	32	29	27
1500	10	08	05	04	04	03	03
	30	28	17	14	13	12	11
	50	41	26	21	19	17	16
	80	55	36	29	26	23	22
2000	10	06	04	03	03	03	03
	30	22	14	11	10	09	09
	50	33	21	17	15	14	13
	80	47	31	25	22	20	19

Tab. 4

Temperatureffekt E (%) von Durchlässen bei Dämmen von 10–15 m Höhe.

F	B	Tiefe T				
		20	30	40	50	60
500	10	38	33	30	29	27
	30	63	53	48	45	43
	50	74	62	55	52	50
	80	82	68	60	56	54
1000	10	25	22	20	19	18
	30	51	42	38	36	34
	50	62	52	46	43	42
	80	72	60	53	49	48
1500	10	18	16	14	13	13
	30	43	36	32	30	29
	50	54	45	40	38	36
	80	64	53	47	44	42
2000	10	14	13	12	11	10
	30	37	31	28	26	25
	50	48	40	36	34	32
	80	59	49	43	40	39
3000	10	10	09	08	08	07
	30	28	23	21	20	19
	50	39	33	29	27	26
	80	51	42	37	35	33

ist. Da der Staubereich der Kaltluft etwa proportional zur Dammhöhe anwächst, weisen somit kaltluftabführende Durchlässe von hohen Dämmen mit schmaler Dammkrone in engen und steilen Tälern hinsichtlich der Reduktion des Frostrisikos im Staubereich der nächtlichen Kaltluft ein Maximum der Wirksamkeit und damit auch evtl. der wirtschaftlichen Rentabilität auf. Im umgekehrten Fall, d. h. bei niedrigen Dämmen mit breiter Dammkrone in Tälern mit schwach geneigten Hängen wird ein Minimum des Temperatureffekts bei gleichem Durchlaßquerschnitt erreicht.

Da in der Praxis, d. h. bei der Planung von Dämmen, die sich aus der Streckenführung und dem Gelände ergebenden Dammhöhen und somit auch Hindernisflächen F vorgegeben sind, handelt es sich bei der mit vielfach großer finanzieller Tragweite verbundenen Entscheidung „Durchlaß oder nicht“ um die Frage, welcher Durchlaßquerschnitt sich als notwendig erweist, um einen gewünschten Temperatureffekt E zu erzielen. Um hierfür Anhaltswerte und damit Entscheidungshilfen zu geben, wurden die sich für verschiedene Hindernisflächen F (m^2), Durchlaßtiefen T (m) und Durchlaßbreiten B (m) ergebenden Temperatureffekte E angeführt, und zwar für niedrige Dämme von 6–7 m und höhere Dämme von 10–15 m Höhe. Zur Vereinfachung wurde die Durchlaßhöhe H konstant zu 5,0 m angenommen.

5.3. Einfluß von Dämmen in ebenem Gelände auf das Temperaturfeld der Umgebung

Die sich im Staubereich der nächtlichen Kaltluft an quer zum Tal verlaufenden Hindernissen innerhalb der bodennahen Kaltluft einstellenden tiefen Temperaturen haben ihre Ursache zunächst einmal im Zustrom der Kaltluft aus der Umgebung. Hinzu tritt dann allerdings noch ein für die weitere Abkühlung verantwortlicher Faktor in Form eines durch das Hindernis verringerten Austausches mit den höheren und damit wärmeren Luftschichten. Bekanntlich nimmt der Temperaturgradient bei nächtlicher Ausstrahlung in Bodennähe mit wachsendem Austausch ab. Somit bewirkt jede Einschränkung des Austausches unter solchen Bedingungen einen Rückgang der Temperaturen in Bodennähe und damit eine Erhöhung der Frostgefährdung. Weil der Austausch in der bodennahen Schicht umso geringer ist, je mehr der Wind in dieser Schicht gebremst wird, d. h. je größer die Rauigkeit des Geländes ist, steigt demnach die Frostgefährdung eines Geländes mit dessen Rauigkeit an.

Da ein im ebenen Gelände errichteter Damm (z. B. bei der Kreuzung von Verkehrsstraßen) ebenfalls zur Erhöhung der Geländerauigkeit beiträgt, konnte somit eine dadurch verursachte Erhöhung der Frostgefährdung im angrenzenden Bereich nicht ausgeschlossen werden.

Um Aufschlüsse über das Ausmaß dieser Temperaturbeeinflussung zu erhalten, wurde in ebenem Gelände (Rheintal zwischen Bonn und Bad Godesberg) eine Folienwand errichtet und die nächtlichen Minimumtemperaturen in 0,50 m Höhe über Grund längs der Mittelsenkrechten zu dieser Folienwand während einer mehrwöchigen Schönwetterperiode im Spätwinter und Frühjahr 1972 gemessen.

Die Auswertung ergab, daß sowohl bei absoluter Windstille als auch bei Winden von mehr als 2 Beaufort zur Zeit der nächtlichen Tiefsttemperaturen keine signifikanten Temperaturunterschiede innerhalb des Meßprofils auftraten; im ersten Fall wurde das einheitliche Temperaturniveau von den längs des gesamten Meßprofils einheitlichen Ausstrahlungs- und Bodenverhältnissen bestimmt, während im zweiten Fall der Wind auch in der Nähe der Folienwand noch bis zum Boden hin durchgriff und somit eine Kaltluftschichtung ver-

hinderte. Dagegen konnten bei Winden zwischen 1 und 2 Beaufort in der Nähe der Folienwand etwas tiefere Minima beobachtet werden, als in der ungestörten Umgebung. Die aus den 7 Meßnächten mit den größten Temperaturunterschieden gebildeten Mittelwerte der Temperaturdifferenzen gibt die folgende Tabelle an, wobei die Entfernung vom Hindernis durch dessen Höhe H ausgedrückt wurde.

Tab. 5

Differenzen der nächtlichen Minima (° C) an einem Hindernis im ebenen Gelände zur ungestörten Umgebung in schwach windigen Strahlungsnächten.

Entfernung (H)	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0
Luvseite	-0,37	-0,30	-0,21	-0,07	0,00	0,00
Leeseite	-0,57	-0,36	-0,31	-0,21	-0,04	0,00

Daraus kann ersehen werden, daß der durch das Hindernis verursachte Temperatureffekt in Form einer Absenkung zwar auf der Leeseite stärker und ausgedehnter ist als in Luv, insgesamt jedoch weit geringere Werte aufweist, als sie an Hindernissen in Tälern beobachtet wurden; dies gilt sowohl für die Temperaturbeträge, als auch für den Bereich. Mit einer wesentlichen Frostverschärfung ist damit selbst unter ungünstigen Umständen (schwacher Wind senkrecht zum Hindernis wehend) bei solchen Dammbauwerken nicht zu rechnen.

6. Schlußfolgerungen aus den gesamten Meßergebnissen

Ergibt sich aus der geplanten Streckenführung einer neu zu errichtenden Verkehrs-Trasse die Notwendigkeit der Anlage eines Dammes, dann sollte ein erfahrener Agrarmeteorologe zur Beurteilung der hierdurch zu erwartenden Verschlechterung des Kleinklimas in Form einer erhöhten Frostgefährdung durch den Anstau nächtlicher Kaltluft oberhalb dieses Dammes herangezogen werden. Auf Grund der Einsichtnahme in die Planungsunterlagen sowie einer unbedingt erforderlichen Ortsbesichtigung wird sodann zunächst das weitgehend von den Boden- und Bewuchsverhältnissen abhängige Ausmaß der Kaltluftbildung in Strahlungsnächten innerhalb des Kaltluft-Einzugsgebietes abgeschätzt. Die orographischen Gegebenheiten des Einzugsgebietes ermöglichen dann unter Berücksichtigung der Reibungsverhältnisse auf Grund der in den Abs. 3 und 4 dargelegten Meßergebnisse eine Beurteilung der Stärke des zu erwartenden Kaltluftflusses nach Richtung, Menge und Geschwindigkeit. Daraus, sowie aus der Höhe und Lage des geplanten Dammes ergibt sich dann die Ausdehnung des durch den Damm verursachten Kaltluftanstaues sowie die dadurch bewirkte Erhöhung der Frostgefährdung. Während für die Häufigkeit dieses Anstaues die Windoffenheit des betreffenden Geländes maßgeblich ist, entscheiden die von der Form, der Reibung innerhalb der bodennahen Luftschicht und dem Gefälle des Talabschnitts unterhalb des Dammes abhängigen Abflußverhältnisse über die Andauer des Kaltluftflusses in Strahlungsnächten ebenso wie ein aus dem Haupttal einsetzender Rückstau der Kaltluft. Auch die Beurteilung dieser für die frostverschärfende Wirkung eines Dammes ganz entscheidenden Kriterien bedarf gründlicher geländeklimatologischer Kenntnisse und Erfahrungen, wozu die vorliegenden Meßergebnisse einen Beitrag leisten. Nur dann, wenn Kaltluftfluß und damit Kaltluftanstau bis zum Zeitpunkt der nächtlichen Tiefsttemperaturen, d. h. bis kurz vor Sonnenaufgang anhalten, kann sich die im Staubereich des Hindernisses ergebende Temperaturerniedrigung voll auswirken; hört der Kaltluftfluß aus den o. a. Gründen vorher auf, dann ist nur u. U. mit einer Verfrühung des Frostbeginns, jedoch nicht mit einer Frostverschärfung innerhalb des Kaltluftstau-Bereichs zu rechnen.

Ergibt sich aus der auf diese Weise durchgeführten Beurteilung eine solche Erhöhung der durch den Damm verursachten Frostgefährdung im Anstaubereich der nächtlichen Kaltluft, daß unter Berücksichtigung von Frostempfindlichkeit und Ertragswert der dort angebauten Kulturen mit Frostschäden von wirtschaftlicher Tragweite nach der Errichtung des Damms gerechnet werden muß, dann bietet sich neben der (finanziell meist recht aufwendigen) Aufständerung des betreffenden Trassenabschnitts als Zwischenlösung die Schaffung von Durchlässen an. Aus den graphischen Darstellungen und Tabellen in Abschnitt 5 kann die von der Dammhöhe und Dammlänge sowie der Weite und Tiefe des Durchlasses abhängige Wirkung solcher Durchlässe auf den Kaltluftabfluß und die damit verbundene Minderung der Frostgefährdung entnommen werden.

Literatur

- (1) SCHULZ, L.: Lokalklimatische Untersuchungen im Oberharz. Bioklimat. Beibl. Meteor. Z. H. 3 (1936) S. 25-29.
- (2) BERG, H.: Kleinmeteorologische Messungen im Hohen Venn. Z. Meteor. 5 (1951) S. 229-235.
- (3) SCHNELLE, F.: Kleinklimatische Geländeaufnahme am Beispiel der Frostschäden im Obstbau. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone 12 (1950) S. 99-104.
- (4) NITZE, F. W.: Untersuchung der nächtlichen Zirkulationsströmung am Berghang durch stereophotogrammetrisch vermessene Ballonbahnen. Bioklimat. Beibl. Meteor. Z. H. 3 (1936) S. 125-127.
- (5) GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig: Vieweg u. Sohn 1961.
- (6) BAUMGARTNER, A.: Einfluß des Geländes auf Lagerung und Bewegung der nächtlichen Kaltluft. In: SCHNELLE, F.: Frostschutz im Pflanzenbau. München: Bayer. Landwirtschaftsverl. 1963. Bd. 1, S. 151-194.
- (7) DEFANT, A.: Der Abfluß schwerer Luftmassen auf geneigtem Boden nebst einigen Bemerkungen zu der Theorie stationärer Luftströme. Sitz.-Ber. Preuß. Akad. Wiss. Phys.-math. Klasse. 18 (1933) S. 624-635.
- (8) PRANDTL, L.: Strömungslehre. Braunschweig: Vieweg u. Sohn 1942.
- (9) DEFANT, F.: Zur Theorie der Hangwinde, nebst Bemerkungen zur Theorie der Berg- und Talwinde. Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. Ser. A 1 (1949) Nr. 3-4, S. 421-450.
- (10) REIHER, M.: Nächtlicher Kaltluftfluß an Hindernissen. Bioklimat. Beibl. Meteor. Z. H. 3 (1936) S. 152-163.
- (11) GEORGI, H. W.: Untersuchung über die Durchmischung bodennaher Luft in Mulden. Diss. Univ. Frankfurt/M. 1955.
- (12) SCHULTZ, H.: Über Klimateigentümlichkeiten im unteren Rheingau unter besonderer Berücksichtigung des Wisperwindes. Frankfurter Geogr. H. 7 (1933) Nr. 1.
- (13) LEHMANN, P.: Abkühlung und Erwärmung im nächtlichen Kaltluftfluß. Ber. Dt. Wetterd. US-Zone 38 (1952) S. 113-116.
- (14) MAHLER, G.; MAHLER, K.: Physikalische Formelsammlung. In: Sammlung Göschen, Bd. 136. Berlin: Walter de Gruyter 1941.