

Amtliches Gutachten
zu den möglichen klimatischen Veränderungen der
nächtlichen Kaltluftflüsse im Fuldataal entlang der A 4
südlich Bad Hersfeld

Auftraggeber: Amt für Straßen- und Verkehrswesen
Eschwege

Unterlage	Nr. 21.2.2
zum	
Planfeststellungsbeschluss	
vom 23.12.2019 Az. 061-k-04#2.168 Wiesbaden, den 15.1.2020	
Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen Abt. VI Im Auftrag	



[Handwritten Signature]
Baudirektor

Abteilung
Klima- und Umweltberatung
Mainz, April 2005

DEUTSCHER WETTERDIENST

Abteilung Klima- und Umweltberatung

AMTLICHES GUTACHTEN

zu den möglichen klimatischen Veränderungen der
nächtlichen Kaltluftflüsse im Fuldataal entlang der A 4
südlich Bad Hersfeld

Auftraggeber: Amt für Straßen- und Verkehrswesen Eschwege
Aussenstelle Bad Hersfeld
Kurt-Holzappel-Strasse 37
37269 Eschwege

Anzahl der Seiten (gesamt)	83
Anzahl der Abbildungen	33
Anzahl der Bilder:	7

wissenschaftliche Bearbeitung: Dr. C. Classen
Dipl.-Met. Johann Hessel
Regionales Gutachtenbüro Mainz

Mainz, den 25. April 2005

gez. Hessel

.....

Dipl.-Met. Johann Hessel
Leiter des Regionalen Gutachtenbüros Mainz

Dieses Gutachten ist urheberrechtlich geschützt; außerhalb der mit dem Auftraggeber vertraglich vereinbarten Nutzungsrechte ist seine Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte sowie die Mitteilung seines Inhalts auch auszugsweise, nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des Deutschen Wetterdienstes gestattet.

EDV-Kennung: 533 - 36251 - 12 - 0405

	Inhalt	Seite
1	Vorbemerkung	5
2	Einleitung	5
3	Lagebeschreibung des Untersuchungsgebiets	7
4	Das Klima im Untersuchungsgebiet	8
4.1	Allgemeine Bemerkungen zum Klima	8
4.2	Wind	9
4.3	Energiebilanz, Strahlung und Lufttemperatur	10
4.4	Luftfeuchte	12
4.5	Das Klima der Region	12
4.6	Das Klima im Untersuchungsgebiet	14
4.7	Kaltluftflüsse	14
4.7.1	Autochthones Klima	14
4.7.2	Definition und Häufigkeit von Strahlungs Nächten	15
4.7.3	Kaltluftentstehung	15
4.7.4	Kaltluftflüsse und Lokalwindzirkulation	16
4.8	Auswirkungen von Brücken und Dämmen auf den Kaltluftstau	17
5	Feldmessungen	18
5.1	Messungen bei Strahlungswetter an ausgewählten Punkten	18
5.1.1	Temperatur	18
5.1.2	Feuchte	19
5.1.3	Wind	19
5.2	Rauchpatronen	20
5.3	Profilmfahrten mit einem Messwagen	24
6	Modellrechnungen	28
6.1	Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21	28
6.2	Das Simulationsgebiet	29
6.3	Die Eingabedaten	30
6.4	Modellergebnisse	31
6.4.1	Die KLAM-Karten	31
6.4.2	Interpretation der KLAM-Karten	32

7	Soll-Zustände	36
7.1	Darstellung der Modellergebnisse als Differenzkarten	37
7.2	Unterschied zwischen der Brückenvariante 3 (getrennte Brücken) mit Lärmschutz 1a und dem Ist-Zustand	38
7.2.1	Situation ohne überlagerten Regionalwind	38
7.2.2	Situation mit überlagertem Nordostwind	38
7.3	Unterschiede zwischen der Brückenvariante 4 (durchgehendes Brückenbauwerk) mit Lärmschutz 1a und dem Ist-Zustand	39
7.4	Unterschiede zwischen den beiden Brückenvarianten bei gleichem Lärmschutz	39
7.5	Unterschiede zwischen den beiden Lärmschutzvarianten bei gleicher Brücke	39
8	Zusammenfassung	41
9	Literatur	43
10	Glossar	44
11	Verzeichnis der Bilder und Abbildungen	50
12	Abbildungen	52

1 Vorbemerkung

Das vorliegende amtliche Gutachten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurde im Geschäftsfeld Klima- und Umweltberatung erstellt. Für die Koordination der Gutachtenbearbeitung war dabei das Regionale Gutachtenbüro (RGB) Mainz zuständig. Die geländeklimatischen Modellrechnungen wurden im Zentralen Gutachtenbüro (ZGB) in Offenbach verantwortlich bearbeitet. Alle Messungen wurden von der Mobilien Messeinheit Essen durchgeführt und ausgewertet.

Unter Mitarbeit von

Dipl.-Met. Hartmut Fuchs (Zentrales Gutachtenbüro Offenbach)

(Modellrechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21)

Klaus-Ullrich Becker (Regionales Gutachtenbüro Essen)

(Leitung der MME Messungen).

Die Genehmigung zur Vervielfältigung der Kartenunterlagen sowie zur Verwendung der topographischen Darstellung auf der Grundlage des digitalen Geländemodells (DGM) wurde für dieses Gutachten vom Hessischen Landesvermessungsamt und der Stadt Bad Hersfeld über das Amt für Straßen- und Verkehrswesen Eschwege dem Deutschen Wetterdienst mit Schreiben vom 11.05.2003, Az. 20 f A / FL-Pf erteilt.

Alle weiteren benötigten Planungsunterlagen wurden vom Amt für Straßen- und Verkehrswesen in Eschwege zur Verfügung gestellt.

2 Einleitung

Das Amt für Strassen- und Verkehrswesen Eschwege, Außenstelle Bad Hersfeld, plant die grundhafte Erneuerung der A 4 mit Anbau von Zusatzstreifen in Steigungsstrecken zwischen dem AD Kirchheim und der AS Wildeck / Obersuhl. Zur Zeit wird das Fuldata bei Bad Hersfeld von der BAB A 4 auf einem 4 m hohen Damm gequert. Im Rahmen des Ausbaus der Autobahn sind im Bereich der Querung des Fuldatales bei etwa gleicher Dammhöhe zusätzlich bis zu 8 m hohe Lärmschutzwände auf der Dammkrone vorgesehen. Das Amt für Straßen- und Verkehrswesen befürchtet nun erhebliche Beeinträchtigungen der Durchlüftung des Hersfelder Beckens besonders bei windschwachen Strahlungswetterlagen. Es sind daher im Rahmen der Voruntersuchung zur geplanten Grunderneuerung fundierte Aussagen zu den lokalklimatischen Auswirkungen der Baumaßnahmen erforderlich.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung beauftragte das Amt für Straßen- und Verkehrswesen Eschwege über seine Außenstelle in Bad Hersfeld den Deutschen Wetterdienst mit der Erarbeitung eines geländeklimatologischen Gutachtens zu den nächtlichen Kaltluftverhältnissen im Bereich der BAB A4 zwischen dem AD Kirchheim und der AS Wildeck / Obersuhl. Der Leistungsumfang der gesamten Untersuchung orientiert sich an dem - in Abstimmung mit dem Auftraggeber - vom Deutschen Wetterdienst im Kosten- und Leistungsplan vom 06.11.2003 beschriebenen Untersuchungsrahmen.

Da die Planungen noch nicht endgültig abgeschlossen und mehrere Planungsvarianten denkbar sind werden hier zunächst zwei verschiedene Höhen des Lärmschutzes und zwei verschiedene Brückenvarianten im Fuldata untersucht:

I. Varianten des Lärmschutzes

- 1a) Lärmschutzwände bis 8,5 m Höhe
- 2b) Lärmschutzwände bis 6,5 m Höhe

II. Brückenvarianten

- 3) Durchlass im NSG bei Bau-km 2+300 und getrennte Fulda-Brücke bei Bau-km 2+550
- 4) Ein großes Brückenbauwerk im Fuldata von Bau-km 2+350 bis 2+600
(d.h. von NSG-Durchlass bis einschließlich Fuldaquerung)

Innerhalb dieses Gutachtens sollen damit insgesamt vier Planungsvarianten in den Kombinationen 1a) mit 3) und 4) sowie 2b) mit 3) und 4) und die jeweiligen Abweichungen zum Ist-Zustand untersucht werden. Es ergeben sich damit ein Ist-Zustand und vier Soll-Zustände, deren jeweilige Auswirkungen auf den nächtlichen Kaltluftfluss dargestellt und verglichen werden.

- Ziel der Untersuchung ist es im ersten Bearbeitungsschritt zunächst eine Bewertung des Ist-Zustandes als Bestandserfassung vorzulegen und so die Grundlage für eine spätere Bewertung des Planungs-Zustandes vorzubereiten.
- Im folgenden Bearbeitungsschritt werden die vorgegebenen Planungsmaßnahmen (Soll-Zustand) in ihrer Wirkung auf die Kaltluftverhältnisse untersucht. Dabei können im Zuge von Überführungen verschiedene Brückenweiten gesondert betrachtet werden (weitere Soll-Zustände bei Bedarf).
- Weiterhin können in einer nächsten Bearbeitungsstufe auf dieser Grundlage Empfehlungen zur planerischen Minimierung von Einflüssen der Planungsmaßnahme auf die lokalen Kaltluftverhältnisse erarbeitet werden.

Zur Lösung dieser Problemstellung wurden Modellrechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell des Deutschen Wetterdienstes KLAM_21 durchgeführt. Zusätzlich wurde zur Erfassung des Grundzustandes und zur Verifikation der Modellergebnisse für den Ist-Zustand eine Falluntersuchung mit temporären Messungen und Profilmessungen während einer 3-tägigen windschwachen Strahlungswetterlage durch eine Mobile Messeinheit des Deutschen Wetterdienstes (im vorliegenden Fall die MME Essen) durchgeführt. Weiterhin konnte die Bewegung bzw. Fließrichtung und Geschwindigkeit der abfließenden Kaltluft an einem Abend durch Rauch markiert und dokumentiert werden.

Die Profilmessfahrten wurden von der Mobilien Messeinheit Essen (MME) mit einem Spezialfahrzeug durchgeführt. Die MME richtete auch die 2 temporären Messstellen im Fuldata ein und wertete die Daten dieser Stationen und der Messfahrten aus. Die Messungen dienen als Ergänzung zu einer flächendeckenden Darstellung der nächtlichen Kaltluftströmung. Dabei handelt es sich um Karten, in denen die Fließrichtung der nächtlichen Kaltluft durch Pfeile von - je nach Fließgeschwindigkeit - unterschiedlicher Länge dargestellt ist und in denen die Höhe bzw. die vertikale Mächtigkeit der Kaltluft zu verschiedenen Zeiten während einer typischen Strahlungsnacht eingetragen ist. Damit kann die Richtung und Ergiebigkeit eines Kaltluftflusses in Abhängigkeit von der Nachtzeit und von den topographischen Umgebungsverhältnissen gezeigt werden.

Die Modellrechnungen mussten für einen sehr großen Bereich durchgeführt werden, damit die Einzugsgebiete der Kaltluft, d.h. das Fulda- und das Haunetal mit den jeweiligen Nebentälern in ausreichendem Maße erfasst wurden. Daher wurde für die Modellrechnungen eine Fläche von 21 mal 24 km gewählt, vom Appenfelder Predigerstuhl im Nordwesten bis zum Wieselsberg bei Malges im Südosten.

3 Lagebeschreibung des Untersuchungsgebiets

Die naturräumliche Gliederung Deutschlands ordnet das Gebiet größtenteils dem Fulda-Haune-Tafelland zu. Nur der nördlichste Teil gehört zum Fulda-Werra-Bergland.

Die wesentlichste Einheit ist die Hersfelder Senke, eine etwa 200 m hoch gelegene und ca. 2,5 km breite Talsenke, zu der sich das Fuldata im Bereich der Haunemündung weitet, in der der größte Teil der Bad Hersfelder Bebauung liegt und auch die Autobahntrasse im Fuldata. Bereits ca. 1 km weiter südlich der Querung des Fuldata durch die A 4 beginnt eine andere Einheit, das Fuldata zwischen Fuldaer Becken und Hersfelder Senke, ein ca. 1 km breites Sohltal mit randlichen Aufschüttungsterrassen. Innerhalb der Talsohle mäandriert der Fluss und hat einige Altarme hinterlassen. Dieser Talbereich mündet von Südsüdwesten her in die Bad Hersfelder Senke, während das Haunetal von Süden bis Südsüdosten innerhalb der Bad Hersfelder Senke in spitzem Winkel in das Fuldata mündet (vgl. **Abbildung 1**).

Von diesen beiden Tälern wird die schmale Wehrdaer Hochfläche begrenzt, die auch die Wasserscheide zwischen Fulda und Haune bildet. Sie ist weitgehend bewaldet und endet im Norden in dem Hersfelder Höhenstadtteil Johannesberg. Die höchste Erhebung dieses Rückens ist die Mengshäuser Kuppe mit 473 m Höhe über NN, die übrigen Kuppen des leicht gewellten Höhenrückens erreichen meist 350 bis 430 m Höhe.

Trotz ähnlicher Fließrichtung unterscheiden sich das Fuldata und das Haunetal deutlich in ihrer topographischen Struktur. Das Fuldata hat eine wesentlich breitere Talsohle. Seine flankierenden Hänge steigen zum Teil nach Westen etwas langsamer an, aber wegen des weit nach Westen reichenden Ottrauer Berglands und des Kirchheimer Berglands steigen die Gipfel auch nach Westen zunehmend höher hinauf und erreichen in etwas größerem Abstand von der Fulda als im Wehrdaer Bergland maximale Höhen von über 480 m (Eisenberg und Steinberg bei Schlitz und Gebrannter Kopf bei Obergeis). Noch weiter westlich werden im Knüllgebirge Höhen über 600 m erreicht.

Für den weiteren Vergleich der beiden Täler ist aber das unterschiedliche Gefälle ausschlaggebend. Während bei der Mündung der Haune in die Fulda die Talau eine Höhe von 200 m über NN aufweist, erreicht der Talboden der Fulda 25 km weiter talaufwärts bei Schlitz nur 220 m, während der Talboden der Haune ebenfalls 25 km weiter talaufwärts bei Hünfeld 250 m Höhe erreicht. Das ergibt ein Gefälle von $0,05^\circ$ im Fuldata und von $0,12^\circ$ im Haunetal. Das geringe Gefälle erklärt auch das Mäandrieren der Flüsse innerhalb der Talauen. In beiden Fällen ist das Gefälle zu gering um einen Kaltluftfluss in Gang zu setzen. Da aber beide Flüsse durch den Kaltluftfluss aus den stark geneigten Seitentälern gespeist werden, die eine Schubwirkung auf die Kaltluft auch noch im Haupttal ausüben, bestehen zumindest im Haunetal wegen der größeren Talenge noch gute Chancen auf einen nächtlichen Kaltluftfluss, während das Fuldata eher als Sammelbecken für die Kaltluft von allen Seiten wirkt, ohne dass diese eine zügige Abflussmöglichkeit hat.

Zur Abschätzung des Einzugsgebietes der Kaltluft sind auch die Nebentäler von Fulda und Haune von Bedeutung. Hier sind besonders Aula, Jossa, Schlitz und Lüder zu nennen, die von Westen her zur Fulda stoßen, und Eitra, Steinbach, Hasel, Nüst, Bieber und Wanne, die von Osten aus der Buchenauer Hochfläche und der Nordwestlichen Kuppenrhön in die Haune münden. Auffallend ist die

Mündungsrichtung der Fulda-Seitentäler. Die Aula kommt von Nordwesten zur Fulda, die Jossa von Westen, Schlitz und Lüder kommen von Südwesten.

Die Bäche, die von der Wehrdaer Hochfläche nach beiden Seiten zu Fulda und Haune fließen, bilden nur kurze, stark eingetieft, enge und bewaldete Tälchen.

Sehr große Einzugsgebiete haben auch der Geisbach, der innerhalb des Stadtbereichs von Bad Hersfeld von Nordwesten her in die Fulda mündet und besonders die Solz, die 2,5 km vom Stadtzentrum aus flussabwärts von Osten her in die Fulda fließt.

Der eigentliche Untersuchungsbereich erstreckt sich auf einen Umkreis von wenigen Kilometern um die Fulda-Querung der A 4. Die Autobahn kommt von Westen aus dem kleinen Seitental des Becherbachs, führt dicht am Stadtteil Eichhof entlang nach Nordosten, überquert die Bahnstrecke nach Grebenau zusammen mit der B 62 mit einer kurzen Auffahrtrampe und einer Brücke und bleibt anschließend auf einem etwa 4 m hohen Damm, um in ostnordöstlicher Richtung die Fuldaaue zu überqueren. Dabei existiert ein Durchlass im Damm im Bereich des Naturschutzgebietes, um beide Teile des Fulda-Altarmbogens zu erreichen, die durch den Autobahndamm getrennt sind. Die Fulda selbst wird - zusammen mit einem ufernahen Fahrweg - von einer Brücke überspannt. Östlich dieser Fuldabrücke verläuft die A4 zunächst noch weiter auf einem Damm um dann den Nordhang des Johannesbergs annähernd höhengleich zu streifen und weiter ostwärts wieder auf einem Damm das Haunetal zu überqueren. Im Haunetal gibt es je einen Durchlass für die Bahnstrecke nach Hünfeld und für die Unterführung der B 27 im Bereich der Anschlussstelle Bad Hersfeld. Östlich des Haunetals steigt die Autobahntrasse an und erreicht bereits am Glasbachrück 340 m Höhe.

4 Das Klima im Untersuchungsgebiet

4.1 Allgemeine Bemerkungen zum Klima

Der Begriff Klima kann folgendermaßen definiert werden (Schirmer, 1980):

Das Klima ist der langfristige Aspekt des Wetters. Die Elemente, die beim Klima betrachtet werden, sind dieselben wie beim Wetter, d. h. Niederschlag, Lufttemperatur, Bewölkung, Strahlung, Wind usw. Der Zeitraum, der zur Darstellung des Klimas verwendet wird, sollte ausreichend lang sein, um statistisch gesicherte Maßzahlen wie Mittelwert, Häufigkeit, Extreme usw. angeben zu können.

Bei der Beschreibung des Klimas muss man zwischen verschiedenen atmosphärischen Größenordnungen, sogenannten Skalen (engl. Scales) unterscheiden:

Im Bereich der Makroskala, deren charakteristische Größenordnung bei 10⁵ bis 10⁸ m liegt (Oke, 1978), spielt sich das "Wetter" ab. Sie umfasst Hoch- und Tiefdruckgebiete sowie Fronten und gegebenenfalls auch tropische Wirbelstürme. Die langfristige Abfolge der verschiedenen Wetterlagen einer Region ist der Faktor, der das Klima eines Ortes hauptsächlich prägt.

Im mesoskaligen Bereich mit einer Ausdehnung von 10⁴ bis 2 x 10⁵ m beeinflussen die Topographie, die Rauigkeit und die Albedo der Erdoberfläche, die Evapotranspiration sowie die Wärmekapazität und -leitfähigkeit des Bodens das Klima. In diesem Bereich lassen sich die Unterschiede zwischen dem Klima einer Stadt und ihrem Umland darstellen.

Die Größenordnung des aktuellen Untersuchungsgebiets liegt im Bereich der lokalen Skala (10² bis 5 x 10⁴ m, OKE, 1978). In ihr lassen sich z. B. die klimatischen Besonderheiten einzelner Stadtteile

oder, wie im vorliegenden Fall, die Verhältnisse in der Umgebung eines geplanten Straßen-Neubau-Abschnitts darstellen.

4.2 Wind

Wind ist horizontal (als Auf- oder Abwind auch vertikal) bewegte Luft. Er wird durch die Angabe seiner Richtung und seines Betrages, der Windgeschwindigkeit, beschrieben. Dabei ist die Windrichtung definitionsgemäß die Himmelsrichtung, aus der der Wind weht. Sie wird in Grad gegen Nord gemessen (Ost = 90°), wobei die Windrichtungen häufig zu Abschnitten (Sektoren) gebündelt werden. In Gebrauch sind unterschiedliche Einteilungen, z. B. in 8, 12 oder 16 Sektoren. Die Windgeschwindigkeit wird in Metern pro Sekunde (m/s), Kilometern pro Stunde (km/h) oder Knoten (kn) gemessen. Die normale Messhöhe für den Wind an den Wetterstationen ist 10 m über Grund.

Der Wind weht als Folge horizontaler Luftdruckunterschiede in der Atmosphäre. Diese entstehen vor allem durch ungleiche Erwärmung der Erdoberfläche infolge ungleicher Sonneneinstrahlung. Beim Bestreben, die Unterschiede auszugleichen, strömt die Luft jedoch nicht direkt in Richtung des Druckgefälles, sondern wird durch den Einfluss der Erdrotation seitlich abgelenkt (auf der Nordhalbkugel nach rechts; Coriolis-Kraft).

In der freien Atmosphäre werden Windrichtung und -geschwindigkeit durch das Druckfeld und die Erdrotation bestimmt. Bei geradlinigem Isobarenverlauf halten sich die Druckgradientkraft, die senkrecht zu den Isobaren - vom hohen zum tiefen Druck gerichtet ist, und die Coriolis-Kraft die Waage. Dadurch weht der (geostrophische) Wind parallel zu den Isobaren. Seine Geschwindigkeit ist umso größer, je mehr die Isobaren sich "drängen", d. h. je stärker der Druck sich in horizontaler Richtung ändert. Bei gekrümmten Isobaren ist der Wind der freien Atmosphäre durch das Gleichgewicht zwischen Druckgradientkraft, Coriolis-Kraft und Zentrifugalkraft bestimmt. Der daraus resultierende Wind wird als Gradientwind bezeichnet.

Im Einflussbereich des Erdbodens, der atmosphärischen Grenzschicht, wird eine Kraft wirksam, die in der freien Atmosphäre keinen Einfluss auf den Wind nimmt: die Reibung. Infolge der Reibung vermindert sich die Windgeschwindigkeit, und der Wind ändert seine Richtung: Er dreht gegenüber dem geostrophischen Wind zurück (d. h. gegen den Uhrzeigersinn). Die Wirkung der Reibung ist direkt über dem Erdboden am größten. Dort nimmt der Wind in guter Näherung nach einem logarithmischen Gesetz mit der Höhe zu:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right).$$

Darin bedeutet

$u(z)$: Windgeschwindigkeit in der Höhe z über dem Boden

u^* : Schubspannungsgeschwindigkeit, hängt vom Höhenwind ab

und ist in Bodennähe höhenunabhängig

κ : von-Kármán-Konstante (Wert ca. 0.4)

d : Verdrängungshöhe

z_0 : Rauigkeitslänge

Der Einfluss der Reibung auf die Windgeschwindigkeit lässt sich also durch zwei den Boden charakterisierende empirische Parameter, die Verdrängungshöhe d und die Rauigkeitslänge z_0 , beschreiben. Dabei hängt die Rauigkeit von der Höhe der auf der Erde befindlichen Hindernisse (Bebauung, Bewuchs) sowie ihrer Form und Verteilung ab. Einige Rauigkeitslängen sowie Verdrängungshöhen sind in der folgenden Tabelle (nach OKE, 1978, S. 48 und 263) angegeben:

Rauigkeitselement	z_0 in m	d in m
Erde, unbewachsen	0.001 bis 0.01	-
Gras, bis 10 cm hoch	0.003 bis 0.01	≤ 0.66
bebaute Felder	0.04 bis 0.2	
Wälder	1 bis 6	≤ 20
Gebäude	0.7 bis 10	

Auch der Winkel zwischen den Richtungen des Boden- und des geostrophischen Windes hängt von der Beschaffenheit der unteren Grenzfläche ab und ist umso größer, je rauher der Erdboden ist. Er liegt in mittleren Breiten über Land normalerweise bei 30° bis 45° , über sehr rauhen Flächen aber bei 35° bis 50° (Halter und Martin, 1957, S. 235).

Außer der Bodenrauigkeit hat auch die Orographie, also die räumliche Verteilung von Hügeln, Gebirgszügen und Tälern, einen wesentlichen Einfluss auf das bodennahe Windfeld. Ein bekanntes Beispiel dafür sind die Windverhältnisse im Oberrheingraben. Dort kanalisiert das Rheintal den Bodenwind, so dass in Ludwigshafen z. B. vornehmlich die Windrichtungen Süd und Nord beobachtet werden.

4.3 Energiebilanz, Strahlung und Lufttemperatur

Die Temperatur der Bodengrenzschicht der Atmosphäre kann in beachtlichem Maße von der Temperatur der darüberliegenden Luftschicht abweichen. Die Differenz wird vom Energieumsatz an der Bodengrenzfläche bestimmt. Die Energiebilanzgleichung für die Bodengrenzschicht verlangt, dass die Differenz zwischen zugeführter und abgegebener Energie als Wärme in der Grenzschicht gespeichert bzw. ihrem Wärmeverrat entzogen wird (bei negativer Differenz). Sie lautet:

$$Q^* + Q_f - \Delta Q_a - Q_h - Q_e = \Delta Q_s$$

- Q^* : Nettostrahlungsflussdichte
- Q_f : Flächendichte der anthropogen erzeugten Wärme
- ΔQ_a : Nettoadvektion fühlbarer und latenter Wärme aus der Umgebung
- Q_h : Flussdichte des turbulenten Wärmestroms
- Q_e : Flussdichte des turbulenten Stroms latenter Wärme

ΔQ_s : Änderungsbetrag der gespeicherten Wärme

Sämtliche Größen haben die Dimension einer Leistung pro Fläche und werden in W/m^2 gemessen.

In Bodennähe können die verschiedenen Energieformen ineinander umgewandelt werden. Das Niveau, in dem dieser Umsatz hauptsächlich stattfindet, heißt die aktive Oberfläche. Sie liegt bei dichter Bebauung in Dachhöhe, bei dichtem Bewuchs kurz unter der Obergrenze der Vegetation und in einem Gelände, in dem die Abstände zwischen den Gebäuden relativ groß sind, an der Erdoberfläche.

Der Nettostrahlungsfluss ist die Bilanz aus den lang- und kurzwelligen Strahlungsflüssen, die aus der Atmosphäre auf die Energieumsatzfläche fallen, und dem reflektierten kurzwelligen Strahlungsfluss sowie der Wärmestrahlung, die von der Energieumsatzfläche in der Atmosphäre gerichtet ist. Die Reflexion der langwelligen Gegenstrahlung beträgt nur wenige Prozent und kann meist vernachlässigt werden. Solange die lang- und kurzwellige Einstrahlung die Ausstrahlung überwiegen, wird der Grenzfläche Energie zugeführt, die teils im Boden und - bei Bebauung - in den Gebäuden gespeichert, hauptsächlich aber an die Atmosphäre abgegeben wird. Die Lufttemperatur nimmt daher zu. Sie erreicht ihr Maximum, wenn die Nettostrahlung Null wird. Das ist am späten Nachmittag, aber noch vor Sonnenuntergang der Fall. Danach wird der Bodengrenzschicht aufgrund des langwelligen Strahlungsdefizits Energie entzogen, teils auf Kosten der tagsüber gespeicherten Wärme, teils zu Lasten der Atmosphäre. Die Lufttemperatur fällt daher, bis sich - kurz nach Sonnenaufgang - Ein- und Ausstrahlung wieder die Waage halten.

Die anthropogene Wärmeproduktion, die mit zur Erhöhung der städtischen Temperaturen gegenüber dem Umland beiträgt, hat eine ihrer Ursachen in der Gebäudebeheizung und weist daher einen Jahresgang mit Minimum im Sommer und maximalen Werten im Winter auf. Weitere Quellen sind der Kfz-Verkehr sowie zahlreiche Prozesse, insbesondere der industriellen Produktion, bei denen Abwärme entsteht. Typische mittlere Werte liegen bei $20 W/m^2$.

Die Nettoadvektion fühlbarer und latenter Wärme beschreibt den horizontalen Energieaustausch zwischen benachbarten Flächen aufgrund der Windgeschwindigkeit. Sie bestimmt, wie sehr sich die Temperaturen eines uneinheitlichen Gebiets unterscheiden können. Größere Differenzen können sich nur bei geringer Windgeschwindigkeit aufbauen.

Der Austausch von Wärme und Feuchte zwischen der Bodengrenzschicht und der darüber liegenden Luftschicht geschieht im Wesentlichen über die turbulenten Flüsse der fühlbaren und der latenten Wärme. Diese sind von den höheren zu den niedrigeren Werten der potenziellen Temperatur bzw. spezifischen Feuchte gerichtet. Ihre Größe wird mitbestimmt vom aerodynamischen Widerstand der Grenzschicht, der von der Windgeschwindigkeit, der Rauigkeitshöhe und der thermischen Schichtung abhängt. Der Austausch ist umso größer, je

- höher die Windgeschwindigkeit
- größer die Rauigkeitslänge,
- labiler die Schichtung ist.

Die Aufteilung des von der aktiven Oberfläche ausgehenden Wärmestroms in fühlbare und latente Anteile hängt stark davon ab, wie viel Wasser der Energieumsatzfläche zur Verdunstung zur Verfügung steht. Je mehr von der Energie, die der aktiven Oberfläche zugeführt wird, für die Verdunstung verbraucht wird, desto weniger erwärmt sich die Luft (Oke, 1982). Nachts, wenn die

Strahlungsbilanz an der Oberfläche negativ ist, kann Kondensation an die Stelle der Verdunstung treten. Dabei wird der Luft die freiwerdende Kondensationswärme zugeführt und die Abkühlung verringert sich (Bullrich, 1982).

Die Wärmespeicherung hängt von der Beschaffenheit der Energieumsatzfläche ab. Bebaute und versiegelte Flächen weisen eine größere Energiespeicherung auf als Grünflächen. Das liegt sowohl an der fehlenden Verdunstung als auch an den Materialeigenschaften. Je größer die Wärmespeicherkapazität ist, desto weniger heizt sich tags die Energieumsatzfläche auf, desto geringer ist aber auch die nächtliche Abkühlung.

4.4 Luftfeuchte

Feuchte Luft besteht aus trockener Luft und Wasserdampf. Solange keine Kondensation eintritt, verhält sich der Wasserdampf in der Atmosphäre wie ein ideales Gas. Er gelangt durch Verdunstung von feuchten Oberflächen (insbesondere Vegetationsflächen und Gewässer) und durch die Wasserdampfemissionen der Industrie sowie der Haushalte, des Hausbrands und des Verkehrs in die Atmosphäre.

Wie viel Wasser die Luft über einer feuchten Fläche aufnimmt, hängt von ihrem bereits vorhandenen Wassergehalt, der Temperatur sowie den Austauschverhältnissen ab: Wasser wird solange in die Atmosphäre transportiert, bis die Luft gesättigt ist. Der Partialdruck des Wasserdampfes (auch einfach Dampfdruck genannt) entspricht dann dem Sättigungsdampfdruck. Dieser ist eine Funktion der Temperatur und umso höher, je höher die Lufttemperatur ist. Warme Luft kann deutlich mehr Wasserdampf aufnehmen als kalte. Wenn die Luft fast mit Wasserdampf gesättigt ist, beginnen die in der planetarischen Grenzschicht immer in ausreichender Zahl vorhandenen Kondensationskerne (z. B. Staubpartikel, salzhaltige Aerosole) zunächst zu quellen. In der Folge setzt Kondensation ein, und es bilden sich Wolken oder Nebel. Bei Überschreitung der Sättigung wird die überschüssige Feuchte von den Wolkentröpfchen aufgenommen. Diese beginnen zu wachsen und vereinigen sich zu immer größeren Tropfen, die schließlich aus der Atmosphäre ausfallen: Es beginnt zu regnen.

Neben dem Dampfdruck sind weitere Feuchtemaße in Gebrauch:

Die absolute Feuchte ist das Verhältnis der Wasserdampfmasse zum Volumen. Sie wird zumeist in g/m³ angegeben.

Davon zu unterscheiden ist die spezifische Feuchte, die das Massenverhältnis des Wasserdampfes zur gesamten feuchten Luft angibt.

Die relative Feuchte schließlich ist das Verhältnis des aktuellen Dampfdrucks zum Sättigungsdampfdruck. Sie beträgt für gesättigte Luft 100 %, liegt in der Regel aber unter diesem Wert. Nebelbildung setzt bei etwa 97 % relativer Feuchte ein.

4.5 Das Klima der Region

Großklimatisch betrachtet gehört der Untersuchungsbereich entsprechend seiner Lage zu der gemäßigten Klimazone "Mitteleuropa", genauer zum Klimabezirk "Westliches Mittel-Deutschland" und hier zu dem Unterbezirk "Nordhessisches Bergland" (Deutscher Wetterdienst, 1949/50).

Ohne Berücksichtigung lokaler orographischer Modifikationen herrschen in Mitteleuropa - und somit auch im Untersuchungsgebiet - während des ganzen Jahres großräumig überwiegend westliche Winde vor. Mit ihnen überqueren feuchte atlantische Luftmassen aus Südwesten bis Nordwesten

Mitteleuropa. Die von dieser Zirkulation gesteuerten Tiefdruckgebiete ziehen vorwiegend über den nördlichen Teil Deutschlands hinweg ostwärts. Ihre Ausläufer beeinflussen das Untersuchungsgebiet gelegentlich nur in abgeschwächter Form.

Maritimes Klima zeichnet sich allgemein durch milde Winter und kühlere Sommer sowie relativ hohe Feuchtigkeit aus, während sich kontinentaler Einfluss durch kalte Winter und warme Sommer bei relativ geringer Feuchtigkeit ausdrückt.

Der jeweilige Witterungstyp im Untersuchungsgebiet wird durch die gerade herrschende Großwetterlage bestimmt.

Bei West- und Nordwestwetterlagen herrscht der maritime Einfluss vor:

- gemäßigte Temperaturen, hohe Luftfeuchtigkeit, wolkenreicher Himmel und wie derholte Niederschläge bestimmen die Witterung.

Bei Ostwetterlagen hingegen macht sich bereits der kontinentale Einfluss stärker bemerkbar:

- im Sommer höhere, im Winter niedrigere Temperaturen, trockenes und vor allem im Sommer wolkenärmeres Wetter.

Lokale Modifizierungen des Klimas treten - wie eingehend erläutert - bei schwachwindigen und wolkenarmen Wetterlagen auf, d. h. bei Hochdruckwetterlagen. Unter diesen autochthonen Bedingungen stellt sich das eigenbürtige Klima ein. Dann spielt das Geländere relief in Verbindung mit der Struktur der verschiedenen Landnutzungen (Wald, Wiese, Bebauung etc.) eine wesentliche Rolle; diese kleineren Effekte, wie Bebauungsdichte, Bodenart und Bedeckungsgrad der Vegetation, können ursächlich für die räumliche Gliederung lokalklimarelevanter Klimatelemente sein. Der regionale Faktor, in dem untersuchten Bereich hier das Geländere relief, wirkt sich hauptsächlich auf die Klimaparameter Temperatur, Niederschlag, Bewölkung und Wind aus.

Nach der effektiven Klimaklassifikation von Köppen (1923) gehört das Gebiet des Fuldata und der weiteren Umgebung makroklimatisch zum feuchtgemäßigten Klima (Cfb), bei dem die mittlere Lufttemperatur des wärmsten Monats unter 22 °C, die des kältesten über -3 °C liegt und das für mindestens 4 Monate eine Mitteltemperatur von über 10 °C aufweist. Diese Einteilung ist jedoch wegen des Fehlens einer direkten orographischen Komponente innerhalb dieser Klassifikation für eine Anwendung im Bereich der Regionalklimatologie wegen der starken Gliederung des Geländes zu wenig differenziert.

Das Klima im Großraum Bad Hersfeld wird in besonderem Maße durch die topographische Struktur des Mittelgebirges und seiner vielen Täler geprägt.

Die weitere Umgebung des Untersuchungsgebiets grenzt im Südosten und Südwesten an Rhön und Vogelsberg und im Westen an das Knüllgebirge, wo jeweils Höhen über 600 m erreicht werden, während im näheren Umkreis Höhen zwischen 200 m in den Tälern und meist nur etwa 400 m auf den umliegenden Höhen vorherrschen.

Die genannten Randgebirge führen neben ihrer abschirmenden Wirkung gegenüber den von Westen nach Osten anströmenden Luftmassen auch zu einer Bündelung der Luftströmung in den breiteren Talbereichen, die besonders in engen Tälern auch als Kanalisierung der Strömung bezeichnet wird. Insgesamt führen diese Besonderheiten der Strömungsverhältnisse im Großraum Bad Hersfeld zu einer deutlichen Modifikation des Mesoklimas.

4.6 Das Klima im Untersuchungsgebiet

Das Klima im Raum Bad Hersfeld ist für mitteleuropäische Verhältnisse bei entsprechender Höhen- bzw. Muldenlage weitgehend typisch. Der mittlere Jahresniederschlag (aus dem Zeitraum 1971 bis 2000) beträgt 687 mm (mit Schwankungen zwischen 450 mm im Jahr 1976 und 958 mm im Jahr 1981). Der Niederschlag verteilt sich über das ganze Jahr mit 2 nur schwach ausgeprägten Minima in den Monaten März und September und 2 breiten und etwas diffusen Maxima im Sommer und Winter. Die Sommerniederschläge verteilen sich auf nur wenige Tage mit zum Teil extrem starken Regenfällen bei Schauern oder Gewittern, während im Winterhalbjahr die Gesamtregenmenge eines Monats auf viele Regentage mit leichtem aber oft länger anhaltendem Regen verteilt ist.

Die mittlere Sonnenscheindauer liegt bei 1391 Stunden pro Jahr und variierte zwischen 1087 Stunden im Jahr 1978 und 1603 Stunden im Jahr 1971. Die höchsten Monatssummen der Sonnenscheindauer werden statistisch im Mai erreicht mit 192 Stunden, dicht gefolgt vom Juli, August und Juni. Die geringste Sonnenscheindauer ist im Dezember (32 Stunden), Januar und November zu erwarten.

Das Jahresmittel der Lufttemperatur beträgt jedoch an der Wetterstation Bad Hersfeld nur 8,8°C mit Schwankungen zwischen 6,7°C (1996) und 10,1°C (1994). Die Temperaturminima sind dort häufig auffallend tief, trotz der Hanglage in ungefähr 70 m über dem örtlichen Talgrund im Haunetal. Das dort gemessene Temperaturminimum von -33°C gehört zu den tiefsten in Hessen je gemessenen Temperaturen. Dies deutet auf lokalklimatische Besonderheiten. Bei Strahlungswetterlagen werden in den umliegenden Bergländern, verursacht durch ihre starke orographische Gliederung, thermische Windsysteme angeregt, die zur lokalen Durchlüftung der Täler und Senken beitragen und dort auch in klaren Nächten zu tiefen Temperaturen führen. Ob die tiefen Temperaturminima an der Wetterstation Bad Hersfeld auf solche Kaltluft Effekte zurückzuführen sind, wird im weiteren Verlauf der Untersuchung erklärt werden können.

Darüber hinaus gehende Informationen zum Klima dieses Gebietes sind den Klima-Atlanten von Hessen (Deutscher Wetterdienst, 1950 und 1999) sowie dem Kartenband "Das Klima von Hessen" (Hessisches Landesamt für Ernährung, Landwirtschaft und Landesentwicklung, 1971) zu entnehmen.

Genauere Aussagen zu den lokalen klimatologischen Verhältnissen im Planungsgebiet liefern die in den Kapiteln 6 und 7 beschriebenen Ergebnisse der Messungen und Modelluntersuchungen.

4.7 Kaltluftflüsse

4.7.1 Autochthones Klima

Der großräumige Ablauf der Witterung ist in unseren Breiten durch die Zufuhr verschiedener Luftmassen bestimmt. Deutschland wird häufig von Tiefausläufern überquert, die in die großräumige Zirkulation eingebettet und oftmals mit auffrischendem, zumeist westlichem Wind verbunden sind. Derartige Wetterlagen kennzeichnen die allochthone, d. h. fremdbürtige Witterung, die eine Ausbildung von lokalklimatischen Besonderheiten behindert bzw. unterdrückt.

Ein eigenständiges (autochthones) Lokalklima, bei dem sich örtliche Besonderheiten ausprägen, entwickelt sich nur im Zusammenhang mit windschwachen und wolkenarmen Wetterlagen. Bei solchen Strahlungswetterlagen spielen die Bildung von bodennaher Kaltluft und die Entwicklung lokaler Windsysteme eine entscheidende Rolle. Eine genauere Betrachtung dieser Vorgänge in den folgenden beiden Kapiteln soll zum Verständnis lokaler Klimabesonderheiten beitragen.

4.7.2 Definition und Häufigkeit von Strahlungsnächten

Die jährliche Häufigkeit von Strahlungsnächten wurde aus den Daten der deutschen Wetterstationen ermittelt. Dazu wurden aus den stündlichen Beobachtungen dieser Stationen die beiden Parameter Windgeschwindigkeit und Bedeckung des Himmels mit Wolken ausgewertet. Der Grenzwert für den Bedeckungsgrad ist auf 4 Achtel festgesetzt, für die Windgeschwindigkeit bei einer Messhöhe bis 15 m über Grund auf 5 Knoten und bei einer Messhöhe ab 16 m auf 6 Knoten. Der Zeitraum wurde durch die Bedingung Sonnenhöhe $< 5^\circ$ begrenzt. Insgesamt standen für diese Auswertemethode 66 Stationen in Deutschland zur Verfügung. Der Raum Bad Hersfeld lässt einen mittleren Wert von ca. 93 Strahlungsnächten pro Jahr erwarten, d. h. im Durchschnitt der ausgewerteten Jahre 1981 bis 90 war jede vierte Nacht eine durch geringe Bewölkung und schwachen Wind definierte Strahlungsnacht. Die entsprechenden Zahlen liegen für die Wetterstation Kassel bei ca. 73 Tagen und auf der Wasserkuppe in der Rhön bei 13 Tagen. Die mittlere jährliche Anzahl der Strahlungsnächte ist aber nicht gleichförmig auf das Jahr verteilt, sondern zeigt deutliche Maxima von April bis September.

Diese für viele Belange kritischen Nächte lassen sich noch auf eine andere Art definieren, nämlich über die Bedeckung und die Temperaturabnahme während der Nacht, (Bedeckung $\leq 4/8$, Temperaturabnahme $\geq 0,3\text{K/Stunde}$ und Zeitraum 17 bis 5 Uhr MEZ). Hierfür standen insgesamt 114 Beobachtungsstationen zur Verfügung. Die mit dieser Methode gewonnenen Nächte (aus Bedeckung und Abkühlung) sind als Abkühlungsnächte definiert, um sie von den Strahlungsnächten (aus Bedeckung und Windgeschwindigkeit) zu unterscheiden. Die Korrelation zwischen den beiden unterschiedlich bestimmten Nächten ist sehr hoch. Für Kassel ergeben sich 82 windschwache Abkühlungsnächte, für Bad Hersfeld 120 und für die Wasserkuppe nur 1 Nacht. Im Folgenden wird immer der bekanntere Begriff der Strahlungsnacht verwendet.

4.7.3 Kaltluftentstehung

In klaren, windschwachen Nächten, d.h. bei autochthonen Wetterlagen, kühlen sich die Erdoberfläche und die bodennahe Luftschicht besonders gut ab. Ursache für die Abkühlung ist die effektive Ausstrahlung, d. h. die Differenz zwischen der Wärmeausstrahlung der aktiven Oberfläche und der (bei klarem Himmel verminderten) langwelligen Gegenstrahlung der Atmosphäre. Letztere ist zu gering, um die Ausstrahlung zu kompensieren, so dass ein Wärmeverlust entsteht. Der Wärmetausch zwischen der sich abkühlenden aktiven Oberfläche und der Atmosphäre führt dann dazu, dass die abgestrahlte Wärme, wenigstens zum Teil, der bodennahen Luftschicht entzogen wird, d.h. es kommt zur Produktion von Kaltluft.

Die Menge der entstehenden Kaltluft hängt einerseits von der Jahreszeit (Andauer der Nacht) und andererseits von der Art der Landnutzung (Bewuchs und Bebauung) ab. Bei vegetationsbedecktem Boden erfolgt die Ausstrahlung hauptsächlich von den Blättern des Bewuchses, wobei der Wärmetausch mit der Atmosphäre (wegen der Größe der gesamten Blattfläche in Verbindung mit ihrer geringen Wärmekapazität) besonders gut funktioniert. Weide- und Ackerland erweisen sich deshalb als gute Kaltluftproduzenten.

Bei Waldgebieten liegen die Verhältnisse etwas komplizierter, weil die Ausstrahlung - und damit die primäre Abkühlung - nicht aus unmittelbarer Bodennähe, sondern hauptsächlich aus dem oberen Kronenbereich der Bäume erfolgt. Die dort produzierte Kaltluft sinkt ab und vermischt sich mit der wärmeren Luft des Stammraumes. Die am Boden messbare Abkühlung der Atmosphäre ist deshalb im Wald, jedenfalls bei geschlossenem Bestand, zumeist geringer als über vegetationsbedeckten Freiflächen. In Lichtungen, die besonders windgeschützt sind und bei denen die Ausstrahlung aus niedriger Vegetation erfolgt, kann es aber auch empfindlich kalt werden. Wälder auf stark geneigten Flächen, wie hier an den Hängen der vielen Täler, haben jedoch eine sehr hohe Kaltluftproduktion, weil die ausstrahlende Oberfläche sehr groß ist und die Kaltluft gut abfließen kann.

Für praktische Zwecke wird die Stärke der Kaltluftproduktion unterschiedlicher Flächen durch empirische Kaltluftproduktionsraten charakterisiert, die in $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (Kubikmeter Kaltluft pro Quadratmeter Oberfläche und pro Stunde) angegeben werden. Nach KING (1973) haben Freiflächen (Wiese, Acker, Brachland etc.) eine Kaltluftproduktionsrate von ca. $12 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$. Demgegenüber liefern Gewässer, versiegelte Oberflächen und dicht bebaute Siedlungs-, Gewerbe- und Industriegebiete keinen Beitrag zur Kaltluftbildung: Die Materialien derartiger Flächen (Wasser, Beton, Asphalt etc.) speichern tagsüber große Wärmemengen, die sie nachts wieder an die Atmosphäre abgeben. Sie sind deshalb in windschwachen Strahlungs Nächten wärmer als ihr Umland (Freiflächen, Wald).

4.7.4 Kaltluftflüsse und Lokalwindzirkulation

Auf unbebauten Hügeln entwickelt sich bei nächtlicher Abkühlung aufgrund des höheren spezifischen Gewichtes der kälteren Luft nach Überwindung der Bodenrauigkeit ein mehr oder weniger starker, hangabwärts gerichteter Kaltluftfluss, dessen Fließgeschwindigkeit von der Hangneigung, der Bodenrauigkeit und der Größe des Kaltlufteinzugsgebietes (Gebiet, in dem die Kaltluft produziert wird) abhängt. Die Hangneigung muss erfahrungsgemäß wenigstens 2° Grad - entsprechend etwa 3 m Gefälle auf 100 m Strecke - betragen. Die Fließgeschwindigkeit erreicht in Gegenden mit mäßiger Reliefenergie meist Werte von 0,5 bis 1 m/s. Die vertikale Mächtigkeit dieser Kaltluftflüsse ist im allgemeinen auf wenige Dekameter beschränkt. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Kaltluftfluss bereits kurz vor Sonnenuntergang beginnt. Bei guten Abflussmöglichkeiten kann ein Kaltluftfluss die ganze Nacht andauern und erst nach dem Sonnenaufgang versiegen. Ebene Flächen produzieren gleichermaßen Kaltluft, diese kann dann aber nicht abfließen, so dass die Höhe der Kaltluftschicht rasch ansteigt.

Kaltluftstaus bilden sich im Luv von Hindernissen (Wald- und Siedlungsrand, Straßendamm, Talsperre u. a.). Die kalte Luft staut sich bis zur Hindernishöhe auf, und bei weiterem Nachfließen von Kaltluft wird das Hindernis schließlich überströmt. Kleinere Hindernisse werden von der abfließenden Kaltluft ohne nennenswerte Staubbildung um- oder überströmt. Kaltluftseen entstehen durch Ansammlung kalter Luftmassen in Mulden und Senken. Bedingt durch die fortdauernde Ausstrahlung und den geringen Austausch mit den höheren Luftschichten kühlen sich die (im Kaltluftstau oder Kaltluftsee) stagnierenden Luftmassen weiter ab, es ist dort (insbesondere im Frühjahr und Herbst) mit erhöhter Frost- und Nebelhäufigkeit zu rechnen.

Kaltluftproduktion und Geländere relief sind die treibenden Kräfte für lokale, thermisch bedingte Windsysteme, auch Lokalwindzirkulationen genannt. Diese entstehen bei autochthonen Wetterlagen durch horizontale Temperaturunterschiede, d. h. sie sind Folge einer unterschiedlichen Erwärmung oder Abkühlung von Luftschichten mit gleicher absoluter Höhe. Da kältere Luft (bei gleichem Druck) schwerer ist als warme, beginnt sie abzusinken. Die Folge ist ein Druckanstieg am Boden unter dem Absinkbereich und eine Druckabnahme in der Höhe, was wiederum zu Ausgleichsströmungen mit zirkulierendem Charakter führt. Solche thermischen Windsysteme sind beispielsweise Hangwinde oder Berg- und Talwinde.

Unter Hangwinden versteht man das nächtliche Abfließen der über Bodenerhebungen abgekühlten Luft (Hangabwinde), bzw. das Aufsteigen der an einem Hang erwärmten Luft bei Tage (Hangaufwinde). Dabei bewegt sich die Luft in Richtung der Hangneigung, d. h. bei Hängen, die ein Tal seitlich begrenzen, senkrecht zur Talachse. Nach dem Zusammenfließen im Talgrund erzeugen die Hangabwinde den zum Talausgang gerichteten Bergwind oder Talabwind. Vormittags entsteht der talaufwärts gerichtete Talwind oder Talaufwind. Beide Lokalwindzirkulationen unterscheiden sich von der grundströmungsbedingten Komponente des bodennahen Windes durch den für sie typischen Tagesgang der Windrichtung.

4.8 Auswirkungen von Brücken und Dämmen auf den Kaltluftstau

Das talquerende Dämme einen Einfluss auf die abfließende Kaltluft haben, ist seit Langem bekannt (King, 1973). Bei weiteren Untersuchungen z.B. zum Stadtklima Worms (Danzeisen, 1983 und 1984) wurden auch die Auswirkungen zweier unterschiedlicher Brücken verglichen. Dabei handelte es sich um eine *Stelzenbrücke* sowie um eine *Dammbrücke*. Es wurde festgestellt, dass bei der untersuchten Stelzenbrücke kein Effekt zu beobachten war. Bei der Dammbrücke war aber eine signifikante Temperaturerniedrigung, in diesem Fall von bis zu $-1,8$ K bei Nacht und eine Erhöhung der relativen Feuchte um 8 % ganztägig talaufwärts vor dem Damm zu beobachten. Danzeisen gibt zusammenfassend an, dass die Ursache dieser Anomalie auf den Damm zurückzuführen sei. Der Damm hat hier offenbar im Gegensatz zur aufgeständerten Brückenführung das lokale Windsystem des Tales unterbrochen und einen Kaltluftstau verursacht, der sich im Temperatur- und Feuchtefeld klar nachweisen lässt. Dabei verschlechtern sich infolge des Kaltluftstaus – bei landwirtschaftlicher Nutzung der betroffenen Fläche – die Wachstumsbedingungen, da die Vegetationszeit verkürzt und die Bodenfrosthäufigkeit erhöht wird. Im Gegensatz zum Autobahndamm konnten bei gleichzeitig auch an der aufgeständerten Autobahnbrücke durchgeführten Messungen keinerlei Hinweise auf eine Störung des dort angetroffenen Abflusssystems durch die Brücke gefunden werden. Daher bleibt nach den Feststellungen Danzeisens die aufgeständerte Trassenführung für das Talwindsystem offenbar ohne nachteilige Folgen.

Dass sich luvseitig eines Hindernisses ein Kaltluftstau mit Bildung eines Kaltluftsees und weitgehend stagnierender Kaltluft bildet, steht außer Zweifel. Über die Dynamik beim Überströmen solcher Hindernisse (insbesondere Straßendämme) hat King (1973) umfangreiche Untersuchungen an künstlichen Talverriegelungen mittels Folienwänden durchgeführt und z.T. anschaulich beschrieben. Auf der Grundlage von Rauchpatronenexperimenten, wie sie der Deutsche Wetterdienst schon wiederholte Male durchgeführt hat, stellt King fest:

In die Kaltluftströmung weit oberhalb des Stauzaunes eingebrachter Rauch floss zunächst längs der Talsole 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 Folienwand hinweg. ... 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.

Die Beschreibung von King zeigt, dass die abströmende Kaltluft über die in der Talmulde liegende stagnierende Kaltluft hinwegströmt. Er stellt weiterhin fest, dass innerhalb des Staubereiches nahezu Luftruhe herrscht. King (1973) resümiert abschließend:

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 Stauzaunes bergauf zu fließen vermag ... , muss das wesentliche Ergebnis dieses Versuches darin gesehen werden, dass der Bereich des Kaltluft-Anstaus (und damit auch der verstärkten Temperaturabsenkung mit erhöhter Frostgefährdung) oberhalb des Hindernisses weit kleiner ist, als bisher angenommen wurde.

5 Feldmessungen

5.1 Messungen bei Strahlungswetter an ausgewählten Punkten

Eine flächendeckende Kartierung der Temperaturverhältnisse durch Messungen in Strahlungsnächten war wegen der Größe des Untersuchungsgebietes nicht möglich. Daher wurden 2 temporäre Messpunkte ausgewählt, an denen automatische Stationen Temperatur und Feuchte in 2 m Höhe und Wind in 2,5 bzw. 9 m Höhe über Grund während einer mehrtägigen Schönwetterphase registrierten. Außerdem fuhr ein spezieller Messwagen während dieser Zeit sowohl tagsüber als auch nachts das gesamte Untersuchungsgebiet entlang einer nach geländeklimatischen Gesichtspunkten ausgewählten Strecke ab. Die beiden automatischen Stationen standen südlich der Autobahn im Fuldata in etwa 20 bzw. 100 m Entfernung von der A 4, unmittelbar westlich der Fulda und östlich eines ufernahen Fahrwegs (vgl. **Abbildung 2** bis **Abbildung 4**).

An diesen 2 Punkten wurden während der Strahlungswetterlage vom 27. bis 30.07.2004 kontinuierlich die Parameter Temperatur, Relative Feuchte, Windrichtung und Windgeschwindigkeit gemessen. Es handelte sich um eine Strahlungswetterlage mit ungehinderter Einstrahlung am Tage und ungehinderter Ausstrahlung bei geringer Bewölkung und schwachem Wind in der Nacht.

Der Verlauf der einzelnen Messparameter wird nun diskutiert anhand der **Abbildung 5** bis **Abbildung 9**, in der die Registrierungen aller temporären Messstationen zusammengefasst sind.

5.1.1 Temperatur

In **Abbildung 5** sind 3 verschiedene Temperaturregistrierungen kombiniert, die der beiden temporären Talstationen in der Fuldaaue (200 m über NN) südlich des A 4 -Damms und die der Wetterstation am Hang östlich des Haunetals in 272 m Höhe. Die Messhöhe betrug in allen Fällen 2 m über Grund.

Die Werte unterscheiden sich besonders in den Nachtstunden nur geringfügig und nicht systematisch. In der 1. Nacht ist die Wetterstation um etwa 1 K wärmer als die beiden Talstationen (die in dieser Nacht im Nebel lagen), in der 2. Nacht aber um 1 K kälter und in der 3. Nacht sind die Tiefstwerte fast identisch mit einer der Talstationen, der Station 1.

Der einzige systematische Unterschied zeigt sich bei der Abkühlung am Abend. Die Temperatur im Tal sinkt abends sehr rasch ab, während bei der Wetterstation, die an einem Westhang liegt, die Abkühlung mit einer deutlichen Verspätung einsetzt, weil hier die Umgebung am Nachmittag noch stark aufgeheizt wird und bei Sonnenuntergang mit einer höheren Ausgangstemperatur in die Abkühlungsphase einsteigt, als die Talstationen, die schon länger im Schatten liegen. Die geringen Unterschiede zwischen der Hangstation und den Talstationen belegen eindeutig, dass im Tal kein massiver Kaltluftstau während der Nacht stattfindet.

Die zahlreichen Fluktuationen, die besonders tagsüber auftreten, werden durch thermische Unruhe (Thermik) und evtl. auch durch einzelne Wolken verursacht. Bei sommerlichen Temperaturen lösen sich warme Luftblasen vom Boden, steigen auf und werden durch kühlere Luft von der Seite ergänzt. Die Thermik ist scheinbar zufällig und wird von der Bodenerwärmung im weiteren Umfeld des Messpunktes bestimmt.

Der Vergleich der Temperaturen in 2 und 9 m Höhe an der Talstation 1 zeigt, dass tagsüber in 9 m Höhe die Luft kälter ist und nachts wärmer als in 2 m Höhe, weil der Erdboden tagsüber als Heizfläche wirkt und nachts infolge der Abstrahlung besonders kalt wird. Die größten Differenzen zwischen der Temperatur in 2 und 9 m Höhe treten abends zu Beginn des Kaltluftflusses auf. Dann wirkt sich bis in 2 m Höhe die bodennahe Kaltluft schon deutlich aus, bis in 9 m Höhe aber noch nicht. Mit dem Anwachsen der Kaltluftschicht im Laufe der Nacht werden die Temperaturunterschiede geringer und bald nach dem lokalen Sonnenaufgang heizt sich der Boden auf. Die bodennahe Luftschicht erwärmt sich daher schneller als die höhere Luftschicht.

Die **Abbildung 6** zeigt den Tagesgang der Temperatur an der Talstation 1 sowohl in der Luft als auch im Erdboden in insgesamt 4 verschiedenen Höhen: 2 und 9 m über Grund, 0,5 cm und 5 cm im Erdboden. Bereits in 5 cm Tiefe im Boden ist der Tagesgang sehr gedämpft. In 0,5 cm Tiefe bzw. dicht unter der Bodenoberfläche ist der Tagesgang extrem, mit den höchsten mittäglichen Maxima und mäßig tiefen Nachtwerten. In 2 und 9 m über dem Boden ist die nächtliche Abkühlung schon viel stärker, allerdings werden mittags nicht mehr so hohe Werte erreicht. Die höchsten Maxima und die tiefsten Minima werden erfahrungsgemäß ganz dicht über dem Erdboden erreicht, in < 1 cm Höhe. Bei dicht bewachsenem Boden liegen die Verhältnisse je nach Bewuchs etwas anders.

5.1.2 Feuchte

Die relative Feuchte (**Abbildung 7**) sinkt bei steigender Temperatur und umgekehrt, solange kein Luftmassenwechsel erfolgt. Tagsüber zeigen sich keine markanten Unterschiede in den Feuchteregistrierungen der 3 Stationen, aber nachts und besonders in der ersten Nachthälfte zeigen die beiden Talstationen 1 und 2 deutlich höhere Feuchtwerte als der Hang der Wetterstation. Feuchteminimum und Temperaturmaximum finden gleichzeitig statt, ebenso wie Temperaturminimum und Feuchtemaximum. Analog zum langsameren Temperaturabfall an der Wetterstation während der Nacht ist auch die Feuchtezunahme nachts verzögert, während die Feuchteabnahme am Vormittag parallel zur steigenden Temperatur rascher vonstatten geht. An der Wetterstation wird das Feuchtemaximum erst am Ende der Nacht erreicht, während die beiden Talstationen schon gegen Mitternacht das Feuchtemaximum fast erreicht haben. Die größten Gradienten werden bei der Temperatur und der Feuchte zwischen dem nachmittäglichen Temperaturmaximum bzw. dem Feuchteminimum und dem Sonnenuntergang erreicht.

5.1.3 Wind

Aus dem Untersuchungsgebiet liegen 4 Windmessungen für den Zeitraum vom 27.07.2004 bis zum 30.07.2004 vor. Die Wetterstation Bad Hersfeld am Hang in 272 m Höhe misst den Wind in 10 m Höhe über Grund. An den beiden temporären Messstellen im Fuldata in 200 m Höhe über NN wurde der Wind an der Station 1 sowohl in 2,5 m Höhe als auch in 10 m Höhe über Grund gemessen und an der Station 2 nur in 2,5 m Höhe. Die Richtungsverteilung des Windes ist in **Abbildung 8** dargestellt. Die Ergebnisse wirken zunächst sehr uneinheitlich. In der 1. Nacht (27./28.2004) überwiegt der Südwestwind im Tal und der Nordostwind an der Wetterstation am Hang, am Vormittag dominieren überall südwestliche und am Abend und in der Nacht nordöstliche Windrichtungen. Am Vormittag des 29. dreht der Wind auf Ost, fluktuiert dann tagsüber sehr stark und am Abend zeigen alle Stationen Nordost- bis Nordwind, der in der Nacht allerdings wieder sehr stark schwankt.

Die wichtigste Aussage der **Abbildung 8** ist die, dass bodennah kein systematischer Richtungswechsel zwischen Tag und Nacht auftritt, wie er bei einem ausgeprägten Hang- oder Talwindssystem bzw. bei einem klar definierten Kaltluftfluss zu erwarten wäre. Die starken nächtlichen Richtungsfluktuationen sind auf die geringe Windgeschwindigkeit zurückzuführen, die meist bei 0,5 m/s liegt. Es handelt sich nachts also häufig auch um Windstillen und um umlaufende

Winde. Die höchsten Geschwindigkeiten treten nachmittags während der Thermik auf mit ca. 2 m/s im Tal und 3 m/s am Hang der Wetterstation (vgl. **Abbildung 9**).

5.2 Rauchpatronen

Aus den temporären Windmessungen, insbesondere der beiden Talstationen, direkt an der Fulda und talauf des Autobahndammes mit seiner starken und dichten Begrünung, lässt sich kein klar erkennbarer Kaltluftfluss ableiten. Es ist aber auch in dieser Entfernung kein durch den Damm bedingter Kaltluftstau in den Temperaturmessungen erkennbar.

Daher wurde eine weitere Untersuchungsmethode eingesetzt, nämlich die Markierung der Luftbewegung durch Rauchpatronen. Die Windrichtungsverteilung oder auch die Änderung der Windrichtung in einem größeren Geländebereich wird durch farbigen Rauch - vorwiegend in den Abendstunden nach Sonnenuntergang, aber bei noch ausreichender Helligkeit - optisch sichtbar gemacht und kann gefilmt oder fotografiert werden. Mit diesem Verfahren kann z.B. auch das Überströmen eines Hindernisses oder der Sog in einem Tunnel optisch aufgezeigt werden.

Am Abend des 9.9.2004 wurden an 4 verschiedenen Punkten im Fuldata Rauchpatronen gezündet (vgl. **Abbildung 2**). Die Punkte lagen alle dicht am -Uferweg zwischen Schloss Eichhof und der A 4. Der Rauch zog anfangs talaufwärts (vor Sonnenuntergang mit dem Talaufwind), schlug aber dann nach Sonnenuntergang um, zog zunächst für kurze Zeit talabwärts in Richtung Autobahndamm, um dann aber nach Westen abzubiegen. Im weiteren Verlauf des etwa 1-stündigen Versuchszeitraums zog der Rauch dann weitgehend quer zum Tal nach Westen, um im Bereich der B 62 dann wieder leicht nach Süden abzuwinkeln. Im Untersuchungszeitraum spielte sich demnach eine sehr flache bodennahe horizontale Zirkulation ein, wobei die Luft erst entlang der Fulda nach Nordnordosten, dann entlang dem Damm nach Westsüdwesten und anschließend entlang der B 62 nach Südsüdwesten zog.

Die folgenden Bilder sollen das veranschaulichen. In **Abbildung 2** sind die 4 verschiedenen Punkte (R1 -R4) der Zündung der Rauchpatronen markiert. Der Übersichtlichkeit halber werden aber hier in einer kurzen Auswahl nur die Rauchfahnen gezeigt, die vom Punkt R1 aus gezündet wurden.

Bild 1, kurz vor dem Sonnenuntergang, zeigt die Luftbewegung noch sehr lebhaft und zeitweise turbulent. Die Luft fließt mit deutlicher Geschwindigkeit von etwa 2 bis 4 m/s talaufwärts, d.h. nach Südsüdwesten. Diese erste Zündung fand um 18:55 Uhr statt. In freien Lagen erfolgte der Sonnenuntergang am 9. September im Bereich Bad Hersfeld um 19:48 Uhr MESZ, wegen der Bergschatten im Tal aber schon deutlich früher. Alle folgenden Zündungen der Rauchpatronen fanden bereits im Schatten statt.



Bild 1: Zündung 18:55, Strömung noch talaufwärts dem Grundstrom folgend

Um 19:08 Uhr (vgl. **Bild 2**) hatte der Wind schon deutlich an Geschwindigkeit nachgelassen. Mit etwa 1 m/s bewegt sich der Rauch bzw. die bodennahe Luft noch langsam talaufwärts (vgl. Abbildung). Die Rauchfahnen beginnt aber schon steil nach oben zu ziehen und wendet sich dann talabwärts. Dies ist der Übergang am Abend von der talaufwärts gerichteten Strömung im Talgrund zu einer talabwärts gerichteten Strömung, die je nach Art des Tals während der ganzen Nacht anhalten kann.



Bild 2: Zündung 19:08, Zeit etwa der Strömungsumstellung, nur noch leichte Strömung talauf

Um 19:19 Uhr (vgl. **Bild 3**) wird aus der langsam talabwärts driftenden Strömung eine Querströmung, die erst parallel der Fulda in Richtung Autobahn, dann nach Norden und anschließend nach Nordwesten gerichtet ist.



Bild 3: Zündung 19:19, Einsetzende Winddrehung

Hierdurch beginnt sich die Stauwirkung am Autobahndamm bemerkbar zu machen. Bei der 4. Zündung um 19:27 Uhr wird schon das Abdriften nach Westen erkennbar (vgl. **Bild 4**).



Bild 4: Zündung 19:27, Rauch dreht talabwärts bodennah in talquerende Richtung

Das letzte Bild am Punkt R1 zeigt die Rauchzündung um 19:55 Uhr. Jetzt zieht der Rauch bereits nach Westen in Richtung der Klimastation der Forschungsanstalt und von dort deutet sich in **Bild 5** ein leichtes Umbiegen in eine Talaufwärtsbewegung nach Südwesten an. Die Fließgeschwindigkeit ist äußerst gering. Hier lässt sich eine eventuelle Gegenströmung durch die Brückenöffnung der B 62 vermuten.



Bild 5: Zündung 19:35, Beispiel für die bodennahe Querströmung

Anschließend konnten wegen der bereits fortgeschrittenen Dämmerung keine Fotos oder Filmaufnahmen mehr gemacht werden. All dies deutet auf einen sehr schnell nach Beginn des Kaltluftflusses einsetzenden Kaltluftstau hin, in dem dann nur noch sehr geringe kriechende und teilweise wohl auch unregelmäßige Luftbewegungen stattfinden.



Bild 6: Zündung 19:42, Stagnation innerhalb des Kaltluftsees

Als Beispiel für die bodennahe Strömungsstagnation im direkten Dammbereich der BAB A 4 soll abschließend das **Bild 6** dienen. Es dokumentiert eine um 19:42 Uhr vor dem Autobahndamm im Bereich der Fuldabrücke gezündeten Rauchkörper. Der Rauch verteilt sich hier diffus am Boden. Eine Wirkung der Fuldabrücke auf die Durchströmung des Autobahndammes ist hier nicht festzustellen. Dies ist sicherlich auch auf den zwischen Autobahndamm/Fuldabrücke und der Bebauung Bad

Hersfelds liegende Bereich mit sehr starker und dichter Durchgrünung zurückzuführen, die die Wirkung der Brücke negiert.

5.3 Profilmfahrten mit einem Messwagen

Während einer geeigneten Hochdruckwetterlage vom 27. bis 30.07.2004 wurden von der Mobilen Messeinheit des Deutschen Wetterdienstes in Essen Profilmessfahrten im Untersuchungsbereich zwischen Bad Hersfeld, Asbach und Unterhaun durchgeführt und ausgewertet. Das **Bild 7** zeigt ein Foto des Messwagens mit der verwendeten Sensorik zur Temperatur- und Feuchtemessung in zwei Höhen über Grund.



Bild 7: Profilmesswagen der Mobilen Messeinheit Essen

Die Fahrtroute ist in der **Abbildung 10** dargestellt, wobei markante Punkte der Strecke mit den roten Zahlen 1 bis 26 gekennzeichnet sind, die in den Grafiken der Temperaturprofile die lokale Zuordnung ermöglichen.

Die Profilmessstrecke (**Abbildung 10**) wurde gemäß der geländeklimatologischen Fragestellung ausgesucht. Außerdem mussten die Wege für das Messfahrzeug befahrbar sein. Es handelte sich durchgehend um betonierte oder asphaltierte Strecken, um keine Temperaturunterscheide infolge unterschiedlicher Bodenverhältnisse zu erhalten.

Die Fahrten starteten jeweils auf der B 62 am Schloss Eichhof. Die Strecke führte dann am Rande der Fulda-Talau nach Asbach, tangierte kurz den Ortskern und zog sich dann nach Nordwesten hangaufwärts zum 351 m hohen Ziegenberg, dem höchsten Punkt der Strecke, der mit 150 m Höhe über dem Talgrund sicher nicht während der ganzen Nacht in die Kaltluftschicht des Fuldatales eintaucht. Dieselbe Strecke wurde hangabwärts wieder bis Schloss Eichhof zurückgelegt und anschließend führte die Route in das Stadtgebiet von Bad Hersfeld. Am Stiftsberg bog sie nach Südosten ab und führte entlang der B 62 zurück zum Schloss Eichhof, von hier entlang der Fulda bis zur Unterführung unter die B 62, dann nochmals im Bogen durch das Stadtgebiet bis zur nächsten

nördlicheren Unterführung der B 62 und von dort durch die breite Talauwe über den Höchster Damm nach Süden bis zur A 4. Die Route biegt dann am Hangfuß des Johannesberges in das Haunetal ein, bleibt am Hangfuß bis Unterhaun, quert hier das Haunetal und folgt auf der rechten Talseite der B 27 zur Sintesiedlung südlich der Anschlussstelle Bad Hersfeld. Von hier aus führt die Route hangaufwärts bis zum Waldrand in etwa 250 m Höhe über NN, um hier Anschluss an die an der nahegelegenen Wetterstation in 272 m Höhe kontinuierlich registrierten Werte zu erhalten, dann wieder hangabwärts zur Sintesiedlung und entlang der B 27 nordwärts bis zur B 62 und auf dieser dann südwestwärts bis zum Startpunkt am Schloss Eichhof.

Insgesamt fanden 7 Fahrten statt, die erste am 28.7.04 in den Frühstunden, um die Endphase der Nacht vom 27. zu 28. 7. zu erfassen. Wegen Talnebel auf einzelnen Strecken war diese Fahrt aber für die weitere Diskussion nicht brauchbar. Die 2. Fahrt fand am 28.7 abends unmittelbar nach Sonnenuntergang statt und die 3. Fahrt gleich anschließend an die zweite. Die 4. Fahrt fand analog zur 1. in den Frühstunden des 29.7.04 statt. Am 29.7.04 abends folgten die Fahrten 5 und 6 und am 30.7. 04 vor Sonnenaufgang die 7. und letzte Fahrt.

Die Temperatur- und Feuchtwerte der einzelnen Fahrten sind in der **Abbildung 11** und **Abbildung 12** dargestellt, wobei die einzelnen Fahrten durch unterschiedliche Farben markiert sind und im unteren Teil der Abbildung die jeweilige Höhenlage der Messroute angegeben ist. Ferner sind die Fahrtkilometer eingetragen und zusätzlich die Nummern der markanten Streckenpunkte, die sich wegen der Routenschleifen gelegentlich wiederholen.

Die jeweiligen Abendfahrten zeigen die meisten Strukturen, während die frühmorgendlichen Fahrten am Ende der Nacht bzw. kurz vor Sonnenaufgang nur noch geringe Unterschiede in Temperatur und Feuchte entlang der Strecke aufweisen. Dies gilt besonders für die Temperaturwerte, die frühmorgens zur Zeit des nächtlichen Temperaturminimums nur noch Differenzen von maximal 2 K aufweisen, aber auch für die Feuchtwerte, die am Ende der Nacht nur noch zwischen 92 und 98 % variieren.

Die Temperaturdaten der Abendfahrten (grüne und rote Linien in der **Abbildung 11** und **Abbildung 12**) lassen sich folgendermaßen interpretieren:

Abgesehen von den zahlreichen kleinen Fluktuationen fallen 2 Bereiche mit relativ hohen Werten auf, das Stadtgebiet von Bad Hersfeld (bei km 9,5 bis 13,5 und nochmals bei km 17,5 bis 19,5 bzw. jeweils zwischen den markanten Punkten 9 und 12), ferner der rund 230 m hohe Punkt am unteren Rand der Johannesbergbebauung (Punkt 18 bzw. km 20) und das Gewebegebiet zwischen der Haunemündung und dem Stadtteil Petersberg. Der Kühnbachhang südwestlich des Militärgeländes nahe der Wetterstation macht sich kaum in der Temperatur bemerkbar, obwohl der Wendepunkt 50 m über dem Talgrund liegt. Die tiefsten Temperaturen wurden dicht an der Fulda (zwischen Punkt 13 und 16 bzw. von km 15 bis 17) und entlang des Haunetals gemessen (zwischen Punkt 19 und 20 bzw. km 21,5), ferner gibt es 2 isolierte Minima, die beim jeweiligen Anfahren des markanten Punktes 23 vor und nach der Auffahrt zur Wetterstation durchfahren wurden. Diese beiden Temperaturminima werden durch den Kaltluftstau im Haunetal am Damm der A 4 verursacht. Es handelt sich dabei um einen großflächigen Stau, der bis fast nach Unterhaun talaufwärts reicht. Er ist hauptsächlich auf den Bereich zwischen Bahngleis und Haune konzentriert, macht sich aber auch noch an den

beschriebenen Stellen der Messroute am Hangfuß des Tals bemerkbar. Dieser Stau wurde bereits im Gutachten des Deutschen Wetterdienstes zum Ausbau der BAB A 4 (Deutscher Wetterdienst, 1995) beschrieben. Bei Punkt 23 wird der Stau am Damm zusätzlich durch einen kleinen lokalen Stau am Rand der Sint-Siedlung verstärkt, der durch den Kühlbachsgrund verursacht wird. Das ist eine vom Wald aus Südosten kommende Hangrinne, in der Kaltluft von den Höhen kanalisiert und auf die Sint-Siedlung geleitet wird. Auch das Temperaturminimum auf der anderen Talseite bei km 21,5 wird durch eine von Südwesten vom Johannesberg zum Haunetal führende Hangrinne verstärkt.

Die Querung des Haunetals innerhalb von Unterhaun zeigt kein klar erkennbares Temperaturminimum mehr, woraus zu schließen ist, dass der Kaltluftstau am Autobahndamm nicht bis zur Ortsbebauung von Unterhaun talaufwärts reicht. Ein weiterer leichter Stau an den Häusern von Unterhaun wirkt sich nur südlich von Unterhaun aus und ist wahrscheinlich nicht stark ausgeprägt. Innerhalb der Bebauung verhindert auch die Wärmeabstrahlung der Häuser eine starke nächtliche Abkühlung, so dass eher ein kleines nächtliches Temperaturmaximum innerhalb des Orts zu erwarten ist. Eine entsprechende leichte Erwärmung macht sich auch zu Beginn der Fahrten am Ortsrand von Asbach bemerkbar, jeweils bei den Bergauf- und Bergabfahrten zum und vom Ziegenberg in der Nähe des Punktes 3 (bei km 2 und 6).

In der Regel verlaufen die Temperaturregistrierungen der jeweils 3 Fahrten der beiden Nächte annähernd parallel. Zwar liegt das Temperaturniveau der ersten Abendfahrt bei ca. 18 °C, das der 2. Fahrt bei ca. 15 °C und das der letzten Nachtfahrt bei ca. 10 °C, aber meist stimmen die jeweiligen Maxima und Minima und die Gebiete mit relativ hohen oder tiefen Temperaturen räumlich überein. Die einzige deutliche Ausnahme bildet der Osthang des Ziegenbergs. Hier ändert sich abends die Temperatur zwischen der ersten und zweiten Fahrt kaum, weil die Kaltluft anfangs noch abfließen kann und nur in den tieferen Lagen für Abkühlung sorgt. Spätestens in der zweiten Nachthälfte sinken aber auch hier die Temperaturen deutlich ab. Weil der Ziegenberg aufgrund seiner Höhenlage (351 m) nicht so weit in den Kaltluftstau der Täler eintaucht, bleibt die nächtliche Tiefsttemperatur hier geringfügig über dem Wert, der im Talgrund erreicht wird.

Die gesamte Höhe der Kaltluftschicht betrug jeweils am Ende der beiden Nächte 300 bis 400 m über Grund, d.h. die Temperatur nahm vom Talgrund bis zu einer Höhe von fast 600 m über NN zu, um erst oberhalb dieses Niveaus wieder abzunehmen. Gemäß den Temperaturregistrierungen der Radiosonden sollte in 150 m Höhe über dem Talgrund die Temperatur in der ersten Nacht 2,5 K und in der zweiten Nacht 4 K wärmer sein als im Talgrund. Am Ende der 1. Nacht erreichte laut Abbildung der Unterschied zwischen Asbach-Talage und Ziegenberg -Waldrand tatsächlich ca. 2 K, in der 2. Nacht war der Unterschied aber kaum größer.

Die wichtigsten Ergebnisse liefern die Fahrten am Ende der Nacht zur Zeit der nächtlichen Tiefsttemperaturen. Die Profifahrten kurz vor Sonnenaufgang geben die Endphase der nächtlichen Kaltluftproduktion wieder. Die hierbei gemessenen Temperaturprofile (schwarze Linien) zeigen die Verteilung der Tiefsttemperatur in Abhängigkeit von der Topographie. Allgemein gilt, dass die tiefsten Werte erfahrungsgemäß in Tälern und in Kaltluftstauseen gefunden werden, während höhere Lagen, die aus der bodennahen Kaltluft herausragen, weniger tiefe Minimumtemperaturen zeigen. Innerhalb

von bebauten Gebieten ist ebenfalls, wegen der Wärmeabgabe beheizter Häuser, mit relativ hohen Temperaturen in der Nacht zu rechnen.

Auch im Untersuchungsgebiet liegen die tiefsten Minima im Haunetal im Stau des Autobahndamms und die höchsten am Ziegenberg und im Stadtkern von Bad Hersfeld. Das Fuldata im Bereich der Autobahnquerung zeigt am Ende der Nacht keine extremen Werte.

Da jeweils 2 Abend-, 2 Nacht- und 2 Frühfahrten gut miteinander übereinstimmen, wird im Folgenden nur die **Abbildung 13** diskutiert, in der die Temperaturen der Abend-, Nacht- und Frühfahrten gemittelt wurden. Kleinere zufällige Fluktuationen während der Einzelfahrten spielen hier keine nennenswerte Rolle mehr. Deutliche Maxima und Minima im Temperaturverlauf sind jetzt signifikant geländeklimatisch bedingt.

Zusammenfassend wird jetzt nochmals der Temperaturverlauf der Frühfahrten beschrieben (schwarze Linie in **Abbildung 13**). Das Temperaturmaximum bei km 4 entspricht dem Ziegenberg, die beiden kleinen flankierenden Maxima bei km 2 und 6 werden durch die Wärmeabstrahlung der Ortsrandbebauung von Asbach verursacht. Das Maximum bei km 8 und 14 und bei km 32 (auf der B 62 zwischen Schloss Eichhof und dem Damm der A 4) kann zur Zeit nicht erklärt werden (evtl. Erwärmung durch Turbulenz infolge Zugverkehr auf dem unmittelbar angrenzenden Bahngleis). Bei km 11 wird die innerstädtische Wärmeinsel durchfahren. Von km 14,5 bis 17,3 wird dreimal die Fuldaaue gequert, was 3 deutliche Minima verursacht. Ab km 18 folgt wieder die städtische Wärmeinsel und erst im Haunetal wird wieder ein Minimum erreicht, der Kaltluftstau am Damm der A 4 im Haunetal verursacht die tiefen Temperaturen bei km 21,5, ferner bei km 25,5 und bei km 27 beiderseits des Maximums auf der Kühnbachhöhe nahe der Wetterstation.

Die letztlich tiefsten Temperaturen werden im Haunetal im Kaltluftstau südlich des Damms der A 4 erreicht. Die Tiefsttemperaturen im Fuldata liegen dagegen - auch im Dammbereich der A 4 - um mindestens 1 K höher. Typische Staueffekte sind hier am Fuldadamm nicht gemessen worden.

Diese Aussagen werden von den KLAM-Modellrechnungen bestätigt, die nach 8 Nachtstunden in diesem Bereich eine ca. 100 m hohe Kaltluftschicht simulieren.

6 Modellrechnungen

6.1 Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21

KLAM_21 ist ein zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen in orographisch gegliedertem Gelände für Fragen der Standort-, Stadt- und Regionalplanung.

KLAM_21 weist folgende Merkmale auf:

Im Unterschied zum Vorgängermodell KLAM_96 wird in KLAM_21 für die Prognose der Kaltluflhöhe über jedem Flächenelement modellintern zunächst der Kälteinhalt der zugehörigen Kaltluftsäule berechnet. Die benötigte Kaltluflhöhe wird dann aus dem Kälteinhalt und einer Annahme über das vertikale Temperaturprofil errechnet. Diese Änderung erleichtert die numerische Sicherstellung des physikalischen Prinzips der Energieerhaltung und beseitigt die Probleme, die damit bei KLAM_96 bestanden haben ("Auseinanderdriften" von Soll- und Ist-Zustand). Des Weiteren wurden physikalisch begründete Änderungen an der Bewegungsgleichung der Kaltluft vorgenommen, die dazu geführt haben, dass die Modellresultate besser den intuitiven Erwartungen entsprechen.

Herausragende Hindernisse wie Schallschutzwände oder Gebäude können als solche behandelt werden und müssen nicht mehr, wie noch bei KLAM_96, als Modifikationen der Orographie angesehen werden.

Bei KLAM_21 kann ein "Regionalwind" vorgegeben werden, der eine vom Kaltluftgeschehen unbeeinflusste Grundströmung im Modellgebiet repräsentiert, die "von oben" auf die Kaltluftflüsse einwirkt und sie modifiziert.

Das Modell simuliert die Entwicklung von Kaltluftflüssen und die Ansammlung von Kaltluft in einem beliebig auswählbaren, rechteckig begrenzten Untersuchungsgelände. Über dieses Gelände wird ein numerisches Gitter gelegt, typische Abstände sind dabei 10 bis 50 m. Beispielhafte Größen für Untersuchungsgebiete liegen bei 50 bis 250 km², es sind jedoch bei einer Rasterweite von 50 m auch Untersuchungsgebiete bis zu 2000 km² möglich.

Jedem Gitterpunkt wird eine Flächennutzung (schematisiert zu insgesamt 9 Nutzungsklassen) sowie seine Geländehöhe zugeordnet. Jeder Landnutzungsklasse wiederum entspricht eine fest vorgegebene Kälteproduktionsrate sowie eine "Rauigkeit" als Maß für den aerodynamischen Widerstand beim Überströmen der Fläche. Außerdem können aus dem Gelände herausragende Hindernisse (z.B. Gebäude, Dämme, Schutzwände) modelliert werden, die von der Kaltluft erst dann überwunden werden, wenn sie eine entsprechende Höhe erreicht hat. Das Zusammenspiel dieser Einflussgrößen bestimmt das Entstehen, Fließen und die Ansammlung der Kaltluft.

Zu Beginn der Simulation wird eine annähernd adiabatisch geschichtete Atmosphäre vorausgesetzt, in der keine horizontalen Gradienten der Temperatur und der Luftdichte vorhanden sind und keine kurzweilige Einstrahlung erfolgt. Weiterhin soll die langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre zeitlich konstant, horizontal homogen und schwach ausgeprägt sein. Feuchtigkeit und Kondensationsprozesse werden nicht berücksichtigt.

Der Simulationszeitraum von 12 Stunden insgesamt entspricht der mittleren Andauer einer klaren Nacht während einer windstillen und trockenen Hochdruckwetterlage, der Start der Simulation liegt

dabei kurz vor Sonnenuntergang, d.h. dem Zeitpunkt zu dem typischerweise die Abkühlung in untersten Luftschichten beginnt.

An den Gitterpunkten werden die dem Modell zugrunde liegenden thermohydrodynamischen Gleichungen gelöst. Die physikalische Basis bilden drei prognostische Gleichungen:

die Bewegungsgleichungen für die zwei Horizontalkomponenten der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Windgeschwindigkeit sowie

die Bilanzgleichungen für den Kälteinhalt der über jeder Gitterfläche befindlichen Kaltluftsäule.

Sie wurden mit den angedeuteten Vereinfachungen und einigen Zusatzannahmen aus den allgemeingültigen Impuls-, Energie- und Massenerhaltungsgleichungen der Atmosphäre durch Integration über die Höhe der Kaltluftschicht abgeleitet. Aus dem Kälteinhalt einer jeden Säule wird dann (unter der Annahme einer bestimmten Höhenabhängigkeit der Abkühlung) die Kaltluflhöhe errechnet.

Die Modellgleichungen stellen ein System gekoppelter, nichtlinearer partieller Differentialgleichungen dar, welches durch die Gittereinteilung in ein umfangreiches System von Differenzgleichungen überführt wird. Diese werden - als Computerprogramm formuliert - mit geeigneten Randbedingungen und bei Vorgabe verschwindender Anfangswerte numerisch gelöst. Als Ergebnis erhält man die flächenhafte Verteilung der Kaltluflhöhe und ihrer mittleren Windgeschwindigkeit zu beliebig abgreifbaren Simulationszeitpunkten, z.B. nach wenigen Minuten oder einer, zwei oder acht Stunden. Unter Annahme eines für Kaltluftströmungen typischen Form des Vertikalprofils des Windes und der Oberflächenrauigkeit, wird für bestimmte Fragestellungen aus der mittleren Windgeschwindigkeit der Kaltluftschicht, die Windgeschwindigkeit in einer bestimmten Höhe (z.B. 2 oder 10 m über Grund) berechnet.

6.2 Das Simulationsgebiet

Die Rechnungen zu den Kaltluftflüssen wurden in einem Gesamtgebiet durchgeführt, das mit 24 km x 21 km etwa einer Fläche von 4 topographische Karten im Maßstab 1 : 25 000 entspricht. Die Größe des Gebietes wurde so festgelegt, um mögliche Wechselwirkungen mit umliegenden Tälern bzw. Höhenrücken noch mit erfassen zu können und war im Wesentlichen am Kaltlufteinzugsgebiet der Täler von Fulda und Haune orientiert. Die meisten Ergebnisse werden wegen der besseren Übersicht allerdings in einem wesentlich kleineren Gebiet dargestellt.

Nachfolgend sind die Koordinaten (Rechtswert, Hochwert in Gauß-Krüger-Koordinaten) der Eckpunkte des KLAM_21-Gesamtgebietes und des zentralen Modellgebiets für die Kaltluftflussberechnungen angegeben:

Die Modellrechnungen wurden im 20 m-Gitter durchgeführt in den Grenzen:

Rechtswert 3536 - 3557 = 21 km

Hochwert 5621 - 5645 = 24 km

dargestellt werden die Ergebnisse der Ist- und Soll-Zustände meist in den Grenzen:

Rechtswert 3546 - 3551 = 7 km

Hochwert 5633 - 5639 = 6 km

Der innerste Kernbereich, in dem auch einige Differenzen dargestellt werden, hat folgende Grenzen:

Rechtswert 3548 - 3549,8 = 1,8 km

Hochwert 3534,5 - 3536 = 1,5 km

Die Daten der verbleibenden Ränder um den letztlich dargestellten Bereich wurden, soweit sie vom Auftraggeber nicht zur Verfügung gestellt wurden, in groben Zügen angefügt, um Randeffekte in den Ergebnissen zu minimieren.

6.3 Die Eingabedaten

Um das Kaltluftabflussmodell anwenden zu können, werden als Eingabewerte digitalisierte topographische Daten in Rasterfeldern benötigt. Für jedes Rasterfeld müssen die Höhe über Normalnull (über NN) und die Flächennutzung (z.B. Bewuchs, Bebauung, Gewässer) bekannt sein. Die Auflösung des Rasters wird in der Regel so groß gewählt, dass alle wesentlichen Strukturen des Geländes auch in den digitalisierten Rasterwerten enthalten sind.

Im vorliegenden Fall erfolgte die Digitalisierung der Landnutzung nach den neuesten amtlichen topographischen Karten im Maßstab 1 : 25 000. Es wurden jeweils Teile der Karten mit den folgenden Nummern digitalisiert:

5023 Ludwigseck,	5024 Rotenburg an der Fulda,
5123 Niederaula,	5124 Bad Hersfeld,
5223 Queck und	5224 Eiterfeld, in der jeweils neuesten Ausgabe.

Jedem Gitterpunkt wurde eine der Landnutzungsclassen Bebauung, Wald, Freiland oder Gewässer zugeordnet. Auch die Autobahn A 4, die Bundesstraße B 62 und die beiden Bahnstrecken von Bad Hersfeld nach Grebenau und nach Hünfeld wurden mit eingetragen.

Die Rasterweite der einzelnen Gitterzellen auf den Abbildungen der Modellergebnisse beträgt 20 m x 20 m. Der dargestellte Kartenausschnitt umfaßt eine Fläche von 20 km x 21 km (siehe die als Anlage gesondert beigefügten Karten 1 bis 3 im Maßstab 1 : 25 000, die den gesamte Modellbereich darstellen). Der Abstand der Höhenlinien beträgt 20 m und erstreckt sich über einen Höhenbereich von etwa 190 m über NN innerhalb der tiefsten Lagen des Fuldata im Norden bis zum 636 m hohen Eisenberg im Westen.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die für die Simulation benutzten Modellparameter in Abhängigkeit von der Landnutzungsklasse:

Landnutzungsklasse	Rauhigkeitslänge z0 in m	Bodenenergiefaktor (Kälteproduktionsrate) 100 % = 30 Watt/m ²
Gewässer	0.0001	0
Autobahn	0.001	0
Bahn- bzw. Gleisanlagen	0.01	28
Freiflächen, landwirtsch. Nutzflächen	0.1	100
Siedlung (offene Bebauung)	0.8	28
Stadtkern (dichte Bebauung)	1.0	0
Wald	1.5	57

6.4 Modellergebnisse

6.4.1 Die KLAM-Karten

Die Simulationen gelten für die Bedingungen einer windschwachen Strahlungsnacht. Der Beginn der Simulation kann mit der Zeit kurz nach Sonnenuntergang gleichgesetzt werden. Von diesem Zeitpunkt an wird über 8 Stunden weiter vorwärtsgerechnet und die Ergebnisse sind im meist halbstündigen Abstand abgespeichert. Die Karten 1 bis 3 (nach 1 Stunde, nach 4 und 8 Stunden Simulationsdauer) stellen das Ergebnis der Simulation der zeitlichen Entwicklung der bodennahen Strömungsverhältnisse während der simulierten Strahlungsnacht im Überblick für den betrachteten Modellbereich dar. Ein möglicher Antrieb durch übergeordnete großräumige Luftströmungen (Regionalwind) wurde hier zunächst nicht berücksichtigt.

Bevor auf die Ergebnisse des Kaltluftabflussmodells eingegangen wird, wird zum besseren Verständnis zunächst die Art der Darstellung in den Karten der Kaltfluthöhe und der Fließgeschwindigkeit im Ist-Zustand erläutert.

In den Karten der Kaltfluthöhe und Fließgeschwindigkeit der Kaltluft werden im Maßstab 1 : 25 000 das Horizontalwindfeld (Windpfeile) und die Kaltfluthöhe (farbige Flächen, die durch Isolinien

eingegrenzt sind) zu 3 verschiedenen Zeitpunkten des jeweiligen Simulationslaufes dargestellt. Die Höhe des Geländes wird durch Isolinien im Abstand von 50 m bzw. 20 m dargestellt. Die Linien gleicher Kaltluflhöhe werden durch unterschiedliche Farben ausgefüllt.

Zugunsten einer übersichtlicheren Darstellung werden die eigentlich im 25 m Abstand vorliegenden Windpfeile im 125 m Abstand gezeichnet. Die Richtung der Pfeile gibt die Richtung an, in die die Kaltluft fließt. Die Länge der Pfeile ist ein Maß für die Fließgeschwindigkeit. Die Legende auf der rechten Seite der Karten beginnt oben mit der Bezeichnung des Simulationslaufes und dem jeweiligen Zeitpunkt. Unter dem Wort "Windfeld" ist ein Windpfeil dargestellt, dessen Richtung und Länge einem Westwind mit der rechts daneben stehenden Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde entspricht und der zur Skalierung der in den Karten dargestellten Windpfeile dient. Darunter befindet sich die Legende der in den Abbildungen mit farbigen Schraffuren eingezeichneten Landnutzungsklassen und eine Farbskala der Klasseneinteilung der Kaltluflhöhen.

6.4.2 Interpretation der KLAM-Karten

6.4.2.1 Ist-Zustand ohne Wind

Das aufgrund der orographischen Gegebenheiten naheliegende großräumige Abfließen der nachts entstehenden Kaltluft, entlang der Hangneigung bzw. über die Hänge und kleineren Talsysteme zum Fuldata und zum Haunetal hin, wird durch die vorliegenden Modellrechnungen bestätigt.

Die KLAM-Simulationen des Kaltluftflusses zeigen aber als wesentliches Ergebnis, dass das Stadtgebiet von Bad Hersfeld nicht hauptsächlich durch das flache Fuldata mit Kaltluft versorgt wird, sondern die Kaltluftflüsse aus dem Geisbach- und Meisebachtal sowie aus dem Haunetal den größten Beitrag leisten. Beide Kaltluftflüsse sind ergiebig und zeigen eine relativ hohe Fließgeschwindigkeit, weil das Geisbachtal und die Seitentäler des Haunetals ein deutliches Gefälle aufweisen. Dadurch erreicht die Kaltluft eine Fließgeschwindigkeit von stellenweise weit mehr als 1m/s und bewirkt eine gründliche Durchspülung der Tallagen mit Frischluft in klaren Nächten.

Das Fuldata kann kein nennenswertes Gefälle aufweisen und ist so breit, dass die Kaltluftflüsse der Seitentäler sich hineingießen, ohne im Haupttal einen spürbaren Abfluss talabwärts in Gang zu setzen. Der Geisbach und die Aula stoßen von Nordwesten her zur Fulda, so dass die Kaltluftflüsse aus diesen Tälern eine Richtung haben, die eher ein Talaufwärtsfließen der Kaltluft im Fuldata bewirkt. Der gesamte breite Talbereich der Fulda zwischen Bad Hersfeld und Solms ist ein Sammelbecken für die Kaltluft der angrenzenden Hänge und Seitentäler, in dem sich die Kaltluftschicht im Laufe einer Strahlungsnacht über 100 m hoch aufbaut, in dem aber kein nennenswerter Abfluss stattfindet.

Im Bereich der Fuldaquerung der Autobahn bewirkt der kräftige Kaltluftfluss aus dem Geisbachtal eher ein leichtes Talaufwärtsfließen der Kaltluft. Der ebenfalls kräftige Kaltluftfluss aus dem Haunetal, der mit relativ hoher Geschwindigkeit von Süden kommt, divergiert im Hersfelder Becken und ein Teil der Kaltluft fließt unterhalb des Johannesberges nach Westen und biegt dann sogar noch nach Südwesten in das Fuldata ein und vermischt sich dort mit der Kaltluft aus dem Geisbachtal. Folglich

kann südlich des Autobahndamms im Fuldata kein Kaltluftstau stattfinden, eher ein sehr schwacher Kaltluftstau im Norden des Damms, aber hier ist die Geschwindigkeit des Kaltluftflusses aus dem Geisbach- und Haunetal schon weitgehend abgebremst. Letztlich findet also beiderseits des Damms in der Fuldaaue in Strahlungsnächten kaum eine spürbare Luftbewegung statt.

Die KLAM-Simulation erlaubt eine detaillierte Analyse des Kaltluftflusses mit hoher zeitlicher Auflösung.

Bereits nach 10 Minuten ist der hangabwärts gerichtete Kaltluftfluss an den Talflanken deutlich ausgeprägt. An den stark geneigten Hängen erreicht die Fließgeschwindigkeit 1 m/s. Im Talgrund von Fulda und Haune ist noch keine Geschwindigkeit zu erkennen.

Nach 30 Minuten ist die Fließgeschwindigkeit und die Richtung im Haunetal schon deutlich erkennbar, im Fuldata jedoch noch nicht.

Nach 60 Minuten (**Abbildung 14**) ist in beiden Tälern eine durchgehende Kaltluftschicht von 10 bis 20 m Höhe vorhanden. Die Fließgeschwindigkeit erreicht im Meisebachtal bis zu 2 m/s, im Geisbachtal stellenweise über 1 m/s, im Haunetal meist 0,5 m/s und im Fuldata meist nur 0,2 bis 0,3 m/s. Die geringsten Geschwindigkeiten sind in der flachen Talaue zwischen der Haunemündung und dem Johannesberg zu finden.

Nach 2 Stunden ist die Kaltluftschicht auf 30 bis 40 m Höhe angewachsen. Die Fließgeschwindigkeit hat im Haunetal auf 1 m/s zugenommen, im Geisbach- und Meisebachtal schon auf fast durchweg 2 m/s. Im Fuldata östlich vom Stadtteil Eichhof hat die Geschwindigkeit aber wieder abgenommen. Im Bereich der A 4 ist keine Fließbewegung mehr zu erkennen. Nach 2,5 Stunden deutet sich nördlich der A 4 eine sehr leichte Talauf-Bewegung an. Südlich der A 4 bis Asbach herrscht in der breiten Talaue Stagnation.

Nach 3 Stunden werden stellenweise 50 bis 60 m Höhe in der Kaltluftschicht erreicht. Die Fließgeschwindigkeiten liegen im Haunetal weiter bei 1 m/s, im Geisbach - und Meisebachtal nach wie vor bei 2 m/s, örtlich sogar bei 3 m/s. Die Kaltluft aus dem Geisbachtal drängt den Kaltluftfluss aus dem Meisebachtal nach Süden ab, so dass dieser etwa parallel zur Bahn in Richtung A 4 fließt, aber infolge der Divergenz im Talkessel von Bad Hersfeld und wegen der dichten Bebauung stark abgebremst wird. Auch ein Teil der Kaltluft aus dem Haunetal wird durch die Divergenz im Talkessel nach Westen umgelenkt und fließt parallel zur A 4 nach Westen und sogar noch teilweise um den Johannesberg herum nach Südwesten in das Fuldata. Daher ist im Bereich der Fuldaquerung nördlich der A 4 eine leichte Talaufkomponente erkennbar. Südlich der A 4 ist zu dieser Zeit keine Fließbewegung mehr zu finden.

Nach 4 Stunden (**Abbildung 15**) ist das Strömungsmuster unverändert. Die Kaltluft reicht aber schon über 60 m hoch, nach 5 Stunden über 70 m, nach 6 Stunden über 80 m und nach 8 Stunden über 90 m hoch. Jetzt erreicht die Obergrenze der Kaltluftschicht meist schon die 300-m-Höhenlinie an den Talflanken von Fulda und Haune und in den Seitentälern reicht sie zum Teil darüber hinaus.

Die Fließgeschwindigkeit wird nach etwa 4,5 Stunden im Meisebachtal wieder schwächer. Die Stadtteile unmittelbar südlich und südwestlich des Stiftsbergs werden in der 2. Nachthälfte schwächer als in der 1. Nachthälfte aus dem Meisebachtal belüftet. Im Geisbachtal bleibt die Geschwindigkeit fast die ganze Nacht unverändert, nur am Talausgang bzw. in der Innenstadt nimmt sie nach 5 Stunden allmählich ab. Im Haunetal lässt die Geschwindigkeit nur wenig nach und sie bleibt bis zum Ende der Nacht noch meist bei 0,5 m/s in Bodennähe. Sie ist am geringsten im Bad Hersfelder Talkessel und steigt in der Fuldaaue nördlich von Bad Hersfeld in der fast geradlinigen Fortsetzung des Haunetals nochmals auf 1 m/s an.

Im Bereich des Wilhelmshofs zeigt sich eine überraschende Anomalie. Nach 4 Stunden reicht die Kaltluft sowohl von Westen vom Bad Hersfelder Talkessel als auch von Osten aus dem Solztal bis dicht an die Sattellage des Wilhelmshofs herauf. Nach 4,5 Stunden fließt die Kaltluft aus dem Fuldataal über den Wilhelmshof hinweg nach Osten in das Solztal. Der Bad Hersfelder Talkessel ist dann mit Kaltluft so aufgefüllt, dass diese an seinem Rand, dort wo er am niedrigsten ist, überläuft und in ein anderes Kaltlufteinzugsgebiet eindringt. Dieses Überlaufen verstärkt sich, so dass am Ende der Nacht (**Abbildung 16**) die Kaltluft aus dem Haunetal in breitem Schwall zwischen Petersberg und Olbersberg ostwärts zur Solz fließt mit Geschwindigkeiten von etwa 0,3 bis 1,5 m/s.

Der für diese Untersuchung wichtigste Teil in der Fuldaaue beiderseits der A 4 zeigt zum Ende der Nacht keine Fließbewegung mehr. Das Stagnationsgebiet reicht bis Niederaula.

Diese Verhältnisse gelten für windstille Nächte. Eine schwache übergeordnete Windkomponente ist aber in den vielen Fällen in Strahlungsnächten vorhanden. In der Regel herrschen dann schwache östliche oder nordöstliche Winde. In einer weiteren Simulation wird daher ein übergeordneter Nordostwind von 3 m/s in 700 m Höhe über NN angesetzt.

6.4.2.2 Ist-Zustand mit überlagerter Grundströmung

Strahlungs- bzw. Hochdruckwetterlagen sind in der Regel mit östlichen oder nordöstlichen Windrichtungen verbunden. Auch nachts muss man in diesen Fällen einen Nordostwind in der freien Atmosphäre annehmen, der im Einzelfall bis in die Täler hinunter wirksam sein kann. Messungen haben in vielen Fällen bestätigt, dass der Kaltluftfluss in westwärts orientierten Tälern deutlicher ausgeprägt ist als in ostwärts orientierten Tälern. Ein Kaltluftfluss, der mit 1 m/s nach Osten fließen will und auf einen ebenfalls schwachen Wind aus Osten von 1 m/s trifft, wird sich nicht durchsetzen können. Ein Kaltluftfluss nach Westen erhält dagegen quasi „Rückenwind“ und wird durch die überlagerte Windkomponente noch beschleunigt.

In einem weiteren Simulationslauf wurde daher in ungefähr 700 m Höhe über NN ein Nordostwind von 3 m/s eingegeben, der sich je nach Geländestruktur und Talorientierung in mehr oder weniger abgeschwächter Form noch bis in die Tallagen auswirkt (vgl. **Abbildung 17** bis **Abbildung 19**).

Das Ergebnis dieser Simulation unterscheidet sich systematisch von dem Kaltluftfluss ohne großräumigen geostrophischen Wind. Von den freien Kuppen im Untersuchungsgebiet fließt die Kaltluft jetzt nicht mehr systematisch nach allen Seiten gleichmäßig ab, sondern bevorzugt nach Südwesten. Der starke Kaltluftfluss im Geisbachtal und im Meisebachtal wird davon kaum

beeinträchtigt, aber im breiten Fuldata zeigt sich jetzt im Bereich der Autobahn eine Talaufkomponente in der Fließrichtung, weil ein Teil der Geisbach-Kaltluft durch den Nordostwind in der Höhe zusätzlich nach Südwesten abgedrängt wird und ebenso ein Teil der Haunetal-Kaltluft am Hangfuß des Johannesbergs in das Fuldata abzweigt. Der Stadtkern von Bad Hersfeld wird nach wie vor von der Kaltluft aus dem Geisbachtal und dem Meisebachtal beliefert. Die Kaltluft aus dem Aulatal, die ohnehin von Nordwesten zur Fulda fließt, ergießt sich jetzt fast ausschließlich in südliche Richtungen, d.h. im Fuldata talaufwärts. Zwischen Asbach und Solms ist auch in diesem Fall keine nennenswerte Fließbewegung erkennbar, höchstens ein leichtes Sickern der Kaltluft nach Südwesten d.h. talaufwärts. Aber im Bereich der Autobahn ist bei Berücksichtigung des überlagerten Windes eine gerade noch erkennbare leichte Talaufwärtsbewegung anzunehmen, die nach den Modellrechnungen eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 0,25 m/s am Ende einer Strahlungsnacht aufweist. Auch im Haunetal wird am Abend anfangs noch eine Talaufkomponente simuliert, dann folgt aber der Übergang zur Stagnation und nach 1 Stunde (**Abbildung 17**) setzt sich im Haunetal der talabwärts gerichtete Kaltluftfluss durch.

Betrachtet man nur die nähere Umgebung von Bad Hersfeld mit hoher zeitlicher Auflösung, so liefert die Simulation folgende Verhältnisse:

Die Strömungsmuster der Kaltluft in den Tälern von Geisbach und Meisebach und im Haunetal südlich der A 4 bleiben von der überlagerten Windkomponente weitgehend unberührt. Hier ändert sich praktisch nichts, weil der durch das Talgefälle bedingte Schwung der Kaltluft durch den sehr schwachen Gegenwind in der Höhe nicht gebremst werden kann. Nur in den ersten 50 Minuten ist auch im Haunetal noch keine durchgehende Strömung nach Norden vorhanden.

Im Fuldata zeigen sich jedoch gravierende Änderungen. Der Wind mit 3 m/s aus Nordosten in 700 m Höhe über NN bewirkt im Fuldata in Bodennähe offensichtlich noch einen Nordostwind mit ca. 0,5 m/s. Im Fuldata nördlich von Bad Hersfeld fließt die Kaltluft in den ersten 2 bis 2,5 Stunden talaufwärts, stagniert nach 3 Stunden (bei einer Schichthöhe der Kaltluft von 40 bis 50 m) und erst nach 3,5 Stunden (bei 50 bis 60 m Höhe) wird ein Talabwärtsfluss mit 0,5 m/s erkennbar. Dieser nimmt im weiteren Verlauf der Nacht an Höhe und Geschwindigkeit zu.

Auch im Fuldata südlich von Bad Hersfeld bis etwa nach Asbach zeigen sich systematische Unterschiede zur windstillen Version. Dieser Talbereich ist dem überlagerten Nordostwind voll ausgesetzt und zeigt bereits nach 10 Minuten einen gleichmäßigen Kaltluftfluss nach Südwesten, d.h. talaufwärts mit 0,5 m/s. Dieses Strömungsmuster bleibt ca. 1 Stunde erhalten.

Aus dem Geisbachtal und aus dem Meisebachtal fließt die gesamte Kaltluft im Fuldata zunächst talaufwärts. Erst nach 3 Stunden, d.h. nach dem Richtungswechsel im nördlichen Fuldata beginnt ein Teil der Kaltluft aus dem Geisbachtal nach Norden umzubiegen. Nach 4 Stunden ist die nordwärts gerichtete Strömung auch im nördlichen Fuldata durchgehend ausgeprägt. Im Haunetal wird die anfänglich schwache Strömung nach Süden sehr schnell durch den einsetzenden Kaltluftfluss abgebremst und nach 1 Stunde hat sich schon im Haunetal der talabwärts gerichtete Kaltluftfluss deutlich ausgeprägt.

Die Geschwindigkeit der Kaltluft in den Tälern ist am höchsten bei Unterhaun und Oberhaun und südlich der Bad Hersfelder Kläranlage, d.h. in den engeren Talabschnitten. Hier beträgt die Fließgeschwindigkeit mindestens 1 m/s. Sie ist am geringsten in der Weitung des Bad Hersfelder Talkessels, wo die Kaltluftzuflüsse divergieren. Im östlichen Teil des Kessels fließt die Haune-Kaltluft fast geradlinig in das Fuldata und von dort weiter nordwärts, während im westlichen Teil des Kessels die Hälfte der Geisbach-Kaltluft und die gesamte Meisebach-Kaltluft südwärts in das Fuldata einbiegen und dort mit höchstens 0,5 m/s nach Südsüdwesten talaufwärts fließen. Südlich der Versuchsanstalt stagniert die Luftbewegung aber nach 4 Stunden (**Abbildung 18**). Zu dieser Zeit ist beiderseits der A 4 im Fuldata noch eine schwache Luftbewegung mit 0,5 m/s nach Südwesten zu erkennen, die immer schwächer wird, weil sich der Stagnationsbereich sowohl im südlichen Fuldata als auch im Hersfelder Kessel ausweitet.

Beiderseits der A 4 im Fuldata ist am Ende der Nacht nur noch eine extrem schwache, kaum merkliche Strömung nach Südwesten zu erkennen, deren mittlere Geschwindigkeit bei ca. 0,2 m/s liegt und die südlich der Versuchsanstalt sowie nördlich der B 62 und südlich der Bahnstrecke fast ganz zum Erliegen kommt.

An den oberen Talflanken im Bereich Eichhof - Asbach fließt die Kaltluft nicht - wie im windstillen Fall - senkrecht zu den Höhenlinien hangabwärts, sondern fast höhenlinienparallel nach Südwesten, weil die seichten Kaltluftflüsse in den oberen Hanglagen durch den überlagerten Nordostwind relativ leicht von Südost auf Südwest umgelenkt werden können.

Kleinere systematische Unterschiede zeigen sich auch auf den Höhen, so dass sich durch die überlagerte Nordost-Komponente stellenweise die Grenzen zwischen den Kaltlufteinzugsgebieten der einzelnen Täler verschieben können, analog zur Verschiebung einer Wasserscheide zwischen 2 Flussläufen durch lokale Hebungen.

Für den Untersuchungsbereich beiderseits der A 4 im Fuldata ergibt sich ein deutlicher Unterschied zwischen windstillen und windschwachen Strahlungsnächten. Im windstillen Fall herrscht auch im Autobahnbereich praktisch keine Luftbewegung während des größten Teils einer Strahlungsnacht. Nach 70 bis 90 Minuten wird die maximale Fließgeschwindigkeit mit etwa 0,3 m/s südlich der A 4 erreicht. Nach 2 Stunden herrscht fast vollständige Stagnation beiderseits der A 4 bis zum Ende der Nacht (**Abbildung 19**). In einer Nacht mit schwachem Nordostwind herrscht dagegen ein Kaltluftfluss aus Nordosten vor, der allerdings auch schwach bleibt, in der ersten Nachthälfte selten mehr als 0,5 m/s erreicht und in der 2. Nachthälfte auf 0,1 bis 0,2 m/s zurückgeht.

7 Soll-Zustände

Die verschiedenen Soll-Zustände wurden für jeweils die gesamte untersuchte Fläche simuliert. Da die Unterschiede zum Ist-Zustand und zwischen den verschiedenen Soll-Zuständen aber jeweils sehr gering sind und sich auch nur in kleinen Flächen bemerkbar machen, erscheint eine vollständige Darstellung der KLAM-Simulationen für den Soll-Zustand nicht sinnvoll. Es werden daher im Folgenden nur jeweils kleine Ausschnitte des Gesamtgebietes gezeigt und zwar in einer Differenz-Darstellung, d.h. es werden nur die Unterschiede zwischen den beiden betrachteten Zuständen

dargestellt. Im Folgenden werden alle möglichen Differenzen zwischen den 4 Varianten (2 verschiedene Lärmschutzhöhen und 2 verschiedene Brücken- bzw. Damm-Varianten) diskutiert.

7.1 Darstellung der Modellergebnisse als Differenzkarten

In den folgenden Abbildungen sind für den Untersuchungsbereich und für verschiedene Varianten die lokalen Änderungen der Kaltfluthöhe und der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft infolge der geplanten Lärmschutzwände und Brückenöffnungen markiert. Es handelt sich jeweils um die Unterschiede zwischen der zur Zeit (Ist-Zustand) herrschenden Kaltfluthöhe oder Fließgeschwindigkeit und den entsprechenden Verhältnissen nach dem Bau der geplanten Maßnahmen. Blau eingefärbte Bereiche zeigen bei den Karten der Kaltfluthöhe einen Höhenzuwachs der Kaltluftschicht und damit eine Temperaturabsenkung im Kaltluftstau an und rosa markierte Gebiete eine Temperaturerhöhung bzw. eine verminderte Kaltluftschichtdicke, wobei der Kaltluftstau im Luv eines Straßendamms entsteht und die Frostentschärfung im Lee des Damms, weil sich dort - zumindest vorübergehend – weniger stagnierende Kaltluft ansammelt. In den Abbildungen werden nur die Differenzen am Abend gezeigt, denn nur dann kann das Rechenmodell Unterschiede im bodennahen Bereich erfassen. Wenn die Kaltluft am Ende der Nacht Luftschichten von zum Teil über 50 m Dicke erfasst, werden die Unterschiede in der mittleren Dicke der Kaltluftschicht verschwindend gering, während zu Beginn der Kaltluftproduktion die bodennahen Verhältnisse in einer noch nicht 10 m hohen Schicht gut erfasst werden. Im Einzelfall muss aber immer überprüft werden, ob der Kaltluftfluss, der sich nach 10 bis 100 Minuten an einem Hindernis staut, auch im weiteren Verlauf der Nacht noch an dieser Stelle gestaut wird, oder ob der Kaltluftfluss in der Nacht seine Richtung so stark ändert (hangabwärts → talabwärts → talaufwärts), dass unter Umständen der anfängliche Kaltluftstau ausgeräumt wird und sich auf der anderen Seite des Hindernisses oder an anderen Hindernissen neu bildet.

Wegen der groben vertikalen Auflösung des Rechenmodells von 1 bis 2 m in Bodennähe darf die Markierung der roten oder blauen Bereiche nur als Abschätzung bewertet werden. Feine Detailstrukturen im Gelände können mit digitalisierten Daten eines 20-m-Rasters nicht mehr dargestellt werden. Daher darf weder die Form noch die Größe der Kaltluftstau-Flächen auf einen höher auflösenden Maßstab übertragen werden.

Entsprechendes gilt für die Abbildungen, in denen die Änderung der Fließgeschwindigkeit dargestellt ist. Dabei kann unterschieden werden zwischen der Änderung der mittleren Fließgeschwindigkeit der gesamten Kaltluftschicht, d.h. der mittleren Abbremsung des gesamten Kaltluftflusses einerseits und der Änderung der Fließgeschwindigkeit in 2 m Höhe, d.h. dem eigentlichen Anstau der Kaltluft in Bodennähe andererseits. Nur mit Letzterem kann die Stauwirkung von Hindernissen beschrieben werden, die niedriger als 10 m sind. Eine Windabschwächung führt im nächtlichen Kaltluftstau in der Regel zu einer Frostverschärfung, am Tage aber verhindert sie den Abtransport der Wärme und bewirkt daher eine Erwärmung. Rot getönte Flächen entlang der Trasse signalisieren eine Windabschwächung, d.h. eine Bremsung bzw. einen Anstau der Kaltluft und blaue Töne eine Geschwindigkeitserhöhung z.B. durch Kanalisierungseffekte.

Im Folgenden werden die Differenzen zwischen den einzelnen Varianten und dem Ist-Zustand oder zwischen verschiedenen Varianten abschnittsweise beschrieben.

7.2 Unterschied zwischen der Brückenvariante 3 (getrennte Brücken) mit Lärmschutz 1a und dem Ist-Zustand

7.2.1 Situation ohne überlagerten Regionalwind

Als Ist-Zustand ist hier die windstille Situation angenommen, als Soll-Zustand die hohe Lärmschutzwand mit 8,5 m Höhe und 2 getrennte Durchlässe im Autobahndamm für die Fulda und für den Weg im Naturschutzgebiet. KLAM_21 liefert folgende Ergebnisse:

Zwischen der Fulda und der Bahnstrecke zeigen sich bezüglich der Kaltfluthöhe kaum Änderungen. Nur östlich der Fulda bzw. nördlich der Johannesberg-Bebauung bilden sich Abweichungen. Nach Aufrichtung der Lärmschutzwand und nur unwesentlicher Veränderung des Dammes ist die Kaltluft hier abends 10 Minuten nach Beginn des Kaltluftflusses (**Abbildung 20**) bereits 2 m höher angestaut als im jetzigen Ist-Zustand. Der Stau befindet sich nördlich des Lärmschutzes beim Stadtteil Eichhof und südlich des Lärmschutzes beim Stadtteil Johannesberg. Auf der jeweils gegenüberliegenden Seite der Autobahn ist die Kaltluft zu diesem Zeitpunkt um 2 m niedriger. Nach 20 Minuten (**Abbildung 21**) hat sich der Stau entlang der A 4 ausgebreitet und reicht beim Stadtteil Eichhof über die Bahnstrecke hinaus nach Osten und beim Stadtteil Johannesberg nach Westen bis fast an die Fulda. Anschließend nimmt die räumliche Ausdehnung des Kaltluftstaus am Lärmschutz wieder ab. Es handelt sich bei diesen Stauwirkungen nicht um den Stau der Kaltluft aus dem Fuldata, denn hier ist ja zu diesem frühen Zeitpunkt noch keine Fließbewegung in Gang gekommen, sondern um die Kaltluft von den Hängen bei Eichhof, die von Nordwesten her ins Fuldata bzw. vom Johannesberg nach Norden in den Bad Hersfelder Talkessel fließen. Nach 45 Minuten (**Abbildung 22**) zeigt sich im Luv der Lärmschutzwände noch ein kleinräumiger Kaltluftstau, aber im Lee keine Änderung, d.h. jetzt ist hier die gleiche Kaltfluthöhe erreicht wie im Ist-Zustand ohne Lärmschutzwand. Daraus folgt, die Kaltluftschicht ist spätestens nach 45 Minuten so hoch geworden, dass sie das Hindernis überspült. Wenn am Ende der Nacht die Kaltluft fast 100 m hoch reicht, kann kein Unterschied mehr in ihrer Höhe vor oder hinter einem etwa 10 m hohen Hindernis sein. Die Stau-Effekte im Luv bleiben aber solange in ihrer maximalen Ausdehnung erhalten, bis sich die Fließrichtung ändert und sich unter Umständen ein neuer Stau auf der anderen Seite des Hindernis oder an ganz anderer Stelle bildet.

Auch in der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft zeigen sich kaum Änderungen infolge des geplanten Lärmschutzes. Nach 10 bis 30 Minuten (**Abbildung 23** bis **Abbildung 25**) wird entlang der Autobahn die Fließgeschwindigkeit leicht erhöht, vermutlich durch Düsenwirkungen zwischen den jeweils parallelen Lärmschutzwänden, in etwas größeren Abständen von der Autobahn ist dagegen die Luftbewegung abgebremst. Nach 1 Stunde sind diese Effekte nur noch westlich der Bahn bei Eichhof und nördlich von Johannesberg erkennbar. Nach 90 Minuten zeigen sich am Johannesberg-Hangfuß und nach 120 Minuten bei Eichhof keine Effekte mehr.

7.2.2 Situation mit überlagertem Nordostwind

Hier zeigen sich stärkere Stauwirkungen in der Fuldaaue als im Fall 7.2.1 ohne überlagerten Nordostwind (**Abbildung 26** und **Abbildung 27**). Die Stauwirkungen sind fast durchgehend entlang der Trasse von Eichhof bis Johannesberg vorhanden. Sie wechseln lediglich im Bereich der Fuldaquerung von der

einen auf die andere Seite der Trasse. Westlich der Fulda ist der Stau nördlich der Autobahn und östlich der Fulda, unterhalb Johannesberg, ist der Stau südlich der Autobahn. Während ohne überlagerten Wind in der Fuldaaue kaum ein Stau vorhanden war - denn die Kaltluft hat ja dort in diesem Fall keine Fließgeschwindigkeit - ist bei überlagertem Nordostwind auch im Talgrund eine Fließbewegung nach Südwesten vorhanden und diese wird am Autobahndamm bzw. an der Lärmschutzwand gestaut. Der Stau ist also im Norden der Autobahn. Bei Eichhof kommt die Kaltluft mit oder ohne überlagertem Wind hangabwärts von Nordwesten und wird daher auch am Nordrand der Lärmschutzwand gestaut. Beim Stadtteil Johannesberg fließt die Kaltluft hangabwärts nach Norden und kann nur am Südrand des Lärmschutzes aufgestaut werden

7.3 Unterschiede zwischen der Brückenvariante 4 (durchgehendes Brückenbauwerk) mit Lärmschutz 1a und dem Ist-Zustand

Bei der Variante 4 wird der zwischen den beiden Durchlässen noch befindliche Damm entfernt und es soll eine durchgehende große Brückenöffnung entstehen, die bei Bau-km 2+350 beginnt und bei Bau-km 2+600 endet. Damit soll eine größere Durchlässigkeit des Straßendamms erreicht werden, die außer aus optischen Gründen speziell für die nächtliche Kaltluft und allgemein für die Belüftung sinnvoll erscheint. Der Ist-Zustand ist wieder die windstille Situation. Als Soll-Zustand wird die hohe Lärmschutzwand (Variante 1a) und eine breite Brückenöffnung angenommen. Zu berücksichtigen ist allerdings bei dieser Variante, dass in diesem Bereich stadtsseitig ein sehr hoher Durchgrünungsgrad vorhanden ist, der mit Sicherheit ein Strömungshindernis für die bodennahen Kaltluftflüsse bildet. Die mögliche Wirkung einer größeren Brückenweite wird hierdurch deutlich eingeschränkt werden. Auch ist in diesem Zusammenhang die lichte Weite relativ gering.

Sowohl die Änderung der Kaltluflthöhe als auch die der Fließgeschwindigkeit zeigen dasselbe Verhalten wie bei Brückenvariante 3. Deshalb wurde die Differenz zwischen Brücke 4 und Brücke 3 bei gleichem Lärmschutz (1a) berechnet, um evtl. minimale Unterschiede zwischen den beiden Brückenplanungen erkennen zu können.

7.4 Unterschiede zwischen den beiden Brückenvarianten bei gleichem Lärmschutz

Bei gleichem Lärmschutz 1a wurde die Differenz zwischen den beiden Brückenvarianten 3 und 4 berechnet (**Abbildung 28** und **Abbildung 29**). Die Kaltluflthöhe ändert sich während der gesamten Nacht nicht. Die Fließgeschwindigkeit wird im Nahbereich des großen Durchlasses (Variante Br4) während der ersten 15 Minuten größer, dann wird sie für weitere 10 Minuten etwas geringer und nach 35 Minuten sind keine Unterschiede mehr zu erkennen. Die größere Brückenöffnung hat daher nur eine räumlich sehr begrenzte lokale Bedeutung und zeigt keine Fernwirkung in die bebauten Gebiete von Bad Hersfeld.

7.5 Unterschiede zwischen den beiden Lärmschutzvarianten bei gleicher Brücke

Bei gleicher Brückenvariante 3 (die quasi dem Ist-Zustand entspricht) zeigen sich bei hoher Lärmschutzwand bereits nach 10 Minuten (**Abbildung 30**) deutliche Änderungen in der Kaltluflthöhe

verglichen mit der niedrigeren Lärmschutzwand. Nach 15 bis 35 Minuten (**Abbildung 31** bis **Abbildung 33**) ist eine maximale Erhöhung der Kaltluft um etwa 1 m sowohl südlich der Lärmschutzwand im Norden von Johannisberg als auch nördlich der Lärmschutzwand beiderseits der Bahnlinie erkennbar. Jeweils nach etwa 15 Minuten ist auch eine Verringerung der Kaltfluthöhe auf der jeweils gegenüberliegenden Seite (im Lee) zu erkennen, die aber sofort verschwindet, sobald die Kaltluft über die Lärmschutzwand hinwegfließen kann. Die Kaltluft wird im Luv jeweils bis zur Oberkante der Lärmschutzwand aufgestaut und dieser Stau bleibt bis zum Wechsel der Fließrichtung erhalten, der wieder abhängig ist von der Annahme, ob ein überregionaler Wind vorhanden ist, oder nicht.

8 Zusammenfassung

Der Kaltluftfluss in Strahlungsnächten zeigt nach den Modellrechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM ein bemerkenswertes Ergebnis. Er fließt bodennah im Fuldata südlich von Bad Hersfeld nicht mit merklicher Geschwindigkeit talabwärts, sondern hat wegen des geringen Talgefälles keine nennenswerte Fließbewegung. Hier sammelt sich nur die Kaltluft aus den Seitentälern und erreicht eine hohe Schichtdicke. Unmittelbar südlich der Autobahn im Fuldata sind daher nur sehr geringe und mehr oder weniger zufällige Geschwindigkeiten und Richtungen zu erwarten und auch gemessen worden. Geht man jedoch von einem überlagerten Nordostwind aus, wie er bei Strahlungswetterlagen in der Regel auch vorhanden ist, dann setzt sich dieser Wind bis in das Fuldata in abgeschwächter Form durch, zumal er talparallel weht. Allerdings bewirkt er eine talaufwärts gerichtete Bewegung der Kaltluft. Im Falle eines überlagerten Nordostwindes tritt dann im Fuldata südlich von Hersfeld der seltene Fall auf, dass die Kaltluft talauf „gedrückt“ wird und der Kaltluftstau zumindest zu Beginn der Nacht nicht wie erwartet südlich, sondern nördlich des Autobahndamms entsteht.

Das Stadtzentrum von Bad Hersfeld wird, nach den Ergebnissen der Modellrechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell für das große Einzugsgebiet, im Wesentlichen nicht von der Kaltluft aus dem Fuldata, sondern von den Kaltluftflüssen aus dem Geisbachtal und dem Meisebachtal beliefert. Der Kaltluftfluss aus dem Haunetal fließt erwartungsgemäß talabwärts und ist der Hauptlieferant der Kaltluft im Fuldata nördlich von Bad Hersfeld. Unter der Annahme eines überlagerten Nordostwindes fließt auch ein Teil der Kaltluft aus dem Geisbachtal südwärts in das Fuldata zur Autobahn. In diesem Fall kann der Kaltluftstau am stadtseitigen Nordrand der Autobahn durch den vermehrten Kaltluftzufluss von Norden her noch verstärkt werden.

Merkliche Differenzen zwischen dem Ist-Zustand und einem Sollzustand mit Lärmschutzwand zeigen sich in den Modellberechnungen für Strahlungsnächte nur an den Stellen der Autobahn, an denen ein hangabwärts gerichteter Kaltluftfluss stattfindet; der während der ganzen Nacht anhält und nicht wesentlich von den Sickerbewegungen im Talgrund beeinflusst wird. Dies sind zwei Bereiche, zum einen am Hang unterhalb des Stadtteils Eichhof, zwischen dem Becherbach und der Bahntrasse und zum anderen am Nordhang des Johannesbergs, etwa in der Mitte zwischen Fulda und Haune. Hier wird die nächtliche Kaltluft - je nach Höhe der Lärmschutzwand - höher aufgestaut als dies im jetzigen Zustand ohne hohe Lärmschutzwand der Fall ist.

Zwischen den beiden Brückenvarianten in der Fuldaaue zeigen sich keine nennenswerten klimatischen Unterschiede. Hierbei ist auch die stadtseitig vorhandene starke Durchgrünung als "Hindernis" für die bodennahe Strömung zu berücksichtigen. Einen deutlich größeren Einfluss auf die nächtlichen Kaltluftabflüsse ist dagegen der Hinderniswirkung der Lärmschutzmassnahme zuzuschreiben. Dabei hat der höhere Lärmschutz deutlich stärkere Auswirkungen auf den lokalen Kaltluftfluss als der niedrigere Lärmschutz, d.h. der hierdurch verursachte Kaltluftstau ist in etwa auch um die Hindernishöhe höher beiderseits der Autobahn anzunehmen. Da die Kaltluft im Luv jeweils bis zur Oberkante aufgestaut wird, wird sich bedingt durch die vorhandene Rückströmung auch der stadtseitige "Stagnationsbereich" weiter ausdehnen je höher die Lärmschutzwand ist. Der Kaltluftfluss aus dem Fuldata in Richtung Bad Hersfeld wird auf Grundlage der Ergebnisse unserer

Modellrechnungen durch die geplanten Maßnahmen in seiner Gesamtheit nur wenig beeinträchtigt, da die Kaltluft für das Stadtgebiet nicht vorrangig aus dem Fuldata sondern überwiegend aus dem Geisbachtal und für die östlichen Stadtteile aus dem Haunetal stammt.

An Tagen mit wechselhaftem Wetter wird der dann überwiegende Südwestwind durch das Fuldata südlich der Stadt kanalisiert und verstärkt auf das Stadtzentrum geleitet. In diesen Fällen ist eine leichte Abbremsung des Windes im Norden bzw. Nordosten (im Lee) der Autobahn anzunehmen und damit wäre eine bodennah etwas verringerte Durchlüftung im Stadtgebiet bzw. der angrenzenden Bebauung möglich. Der Lärmschutz wirkt in diesen Fällen als Windschutz. Als Faustregel kann hier eine horizontale Reichweite des Windschutzes von höchstens der 20-fachen Höhe des Windschutzes angenommen werden. Dies würde bedeuten, dass nur etwa 200 m weit von der Autobahn noch ein Windschutz spürbar ist. Außer im Stadtteil Eichhof wäre keine Wohnbebauung davon betroffen.

9 Literatur

BAUMGARTNER; A., 1956: Untersuchungen über den Wärme- und Wasserhaushalt eines jungen Waldes. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 5, Offenbach am Main.

CHRISTOFFER, J. und M. ULBRICHT-EISSING, 1989: Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 147, 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. Offenbach, 191 S.

DANZEISEN, H.H., 1983: Experimentelle Untersuchung bodennaher Lufttemperatur- und Feuchteverteilungen in Stadtgebieten mit Hilfe eines Messwagens, Beiträge Landespflege Rheinland-Pfalz, Nr.9, Oppenheim, S. 7-34.

DANZEISEN, H.H., 1984: Stadtklima Worms, Gutachten zur klimatischen Situation in Gebiet der Stadt Worms/Rhein. Landesamt für Umweltschutz und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz.

DEUTSCHER WETTERDIENST, 1995: Amtliches Gutachten zur klimatischen Beurteilung des Ausbaus der Bundesautobahn BAB A 4 im Bereich Bad Hersfeld, Offenbach.

DEUTSCHER WETTERDIENST, 1997: Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte, Zentrales Gutachtenbüro Offenbach.

GROSS, G., 1989: Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph. 62, S. 57-72.

HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, 2004: Umweltatlas Hessen. <http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas/>.

KING, E., 1973: Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefahr durch Straßenbauten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 130, Offenbach am Main.

KÖPPEN, W., 1923: Die Klimate der Erde, Grundriß der Klimakunde. Berlin, Verlag de Gruyter, 369 S.

OKE, T.R., 1978: Boundary layer climates. Methuen, London, 372 S.

OKE, T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 108, S. 1-24.

SCHIRMER, H., 1980: Planungsfaktor Klima. Promet 3'80, S. 2-4.

10 Glossar

Anemometer: Windmessgerät. Der gebräuchlichste Anemometertyp, der auch im Windmessnetz des Deutschen Wetterdienstes eingesetzt wird, ist das Schalenkreuzanemometer, bei dem an den Enden eines drei- oder vierarmigen Sterns halbkugelförmige Hohlshalen montiert sind, die durch den → Wind in Rotation versetzt werden. Aus der Drehgeschwindigkeit des Sterns wird die Windgeschwindigkeit bestimmt. Durch eine zusätzliche Windfahne wird auch die Windrichtung erfasst.

antizyklonal: Drehsinn der Luftströmung um ein Gebiet hohen Luftdrucks (auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn). Außerdem Bezeichnung für eine Wetterlage mit überwiegendem Hochdruckeinfluss.

atmosphärische Grenzschicht: → Grenzschicht.

Ausstrahlung: die vorwiegend langwellige Wärmestrahlung der Erde und der Atmosphäre in Richtung Weltraum. Der Energieverlust der Erdoberfläche durch nächtliche A. wird durch die → Gegenstrahlung der Atmosphäre vermindert. Die Differenz beider Strahlungsflüsse heißt effektive A.

Autochthone Witterung: „eigenbürtige“, durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Witterung, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Strahlung gekennzeichnet ist.

Bewölkung: Bedeckung des Himmels mit Wolken. Der Bedeckungs- oder Bewölkungsgrad wird unabhängig von der Art der Wolken geschätzt und in Achteln angegeben.

Böigkeit: Der → Wind weist i.A. eine → turbulente Struktur auf, d.h. der mittleren Windgeschwindigkeit sind kurzzeitige Schwankungen überlagert, deren Spitzen als Böen bezeichnet werden. Bei starken Windrichtungsschwankungen spricht man auch von Richtungsböigkeit.

Coriolis-Kraft (G.G. de Coriolis, franz. Physiker 1792-1843): eine auf die Erdrotation zurückzuführende Scheinkraft. Sie wirkt auf bewegte Körper, die auf der Nordhalbkugel stets nach rechts abgelenkt werden, wobei keine Arbeit geleistet wird.

Diffusion: Ausbreitung von Luftbeimengungen aufgrund der (vor allem → turbulenten) Durchmischung der Atmosphäre.

Druckgradient: das Gefälle des Luftdrucks pro Längeneinheit. I.A. wird unter dem Druckgradienten nur seine Horizontalkomponente verstanden, die senkrecht auf den → Isobaren steht und die maßgebliche Antriebskraft für den → Wind darstellt.

Druckgradientkraft: besitzt die Atmosphäre ein Luftdruckgefälle, so wirken auf die unterschiedlichen Seiten eines Luftvolumens unterschiedliche Druckkräfte. Die resultierende Kraft ist die Druckgradientkraft. Sie ist proportional zum → Druckgradienten.

eindimensionales Modell: vereinfachtes → numerisches Modell, bei dem die atmosphärischen Variablen (z.B. Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit) nur in vertikaler Richtung veränderlich sind, in horizontaler Richtung aber als konstant angenommen werden.

Einstrahlung: Die der Erde und ihrer Atmosphäre von der Sonne zugeführte Strahlung.

Emissionen: Ausstoß von Schadstoffen in die Außenluft.

Energiebilanz: Summe aller Energien, die einem bestimmten Luftvolumen oder einer Luftschicht zugeführt werden. Ist die E. positiv, dann erhöht sich der Energieinhalt des Volumens bzw. der Schicht, und seine Temperatur steigt, andernfalls erfolgt Temperaturerniedrigung.

Energieumsatzfläche: → aktive Oberfläche.

Evaporation: → Verdunstung.

Evapotranspiration: → Verdunstung.

Feld: flächenhafte (zweidimensionales F.), manchmal auch räumliche (dreidimensionales F.) Verteilung eines ortsabhängigen meteorologischen Elements. Das Feuchtefeld z.B. beschreibt die horizontale Verteilung der Luftfeuchtigkeit, das Windfeld die Verteilung von Windrichtung und -geschwindigkeit.

Feuchtefeld: → Feld.

Flussdichte: Die F. einer physikalischen Größe (z.B. innere Energie, sensible Wärme, Wasserdampfgehalt) beschreibt deren räumlichen Transport. Sie ist definiert als das Maß dieser Größe, das pro Zeiteinheit durch eine gedachte, senkrecht zur Transportrichtung orientierte Einheitsfläche hindurchtritt.

freie Atmosphäre: Bez. für die Schichten der Atmosphäre, die nicht mehr dem unmittelbaren Einfluss der Erdoberfläche unterliegen. Die f.A. reicht nach unten bis zur Obergrenze der → atmosphärischen Grenzschicht (im Mittel bei etwa 1000 m), nach oben ist sie offen.

Fühlbare Wärme: → Wärme.

Gegenstrahlung der Atmosphäre: die langwellige Rückstrahlung der Atmosphäre in Richtung Erdoberfläche. Sie beruht hauptsächlich auf der Wärmestrahlung der Wolken sowie der Spurengase Wasserdampf und Kohlendioxid.

geostrophischer Wind: isobarenparallel wehender Wind der → freien Atmosphäre, der (bei geradlinigem Isobarenverlauf) aus dem Gleichgewicht zwischen → Druckgradientkraft und → Corioliskraft resultiert.

Globalstrahlung: gesamte, von einer horizontalen Empfangsfläche registrierte kurzwellige → Strahlung. Sie setzt sich zusammen aus der direkten Sonnenstrahlung und der indirekten Strahlung, die durch Streuung oder Reflexion des Sonnenlichts zum Empfänger gelangt.

Gradientwind: Wind der → freien Atmosphäre, bei dem sich die → Druckgradientkraft, die → Coriolis-Kraft und die → Zentrifugalkraft die Waage halten.

Grenzschicht, auch atmosphärische oder planetarische Grenzschicht: die unterste Schicht der Atmosphäre, in der aufgrund der Rauigkeit der Erdoberfläche und der daraus resultierenden Reibung eine ungeordnete → turbulente Strömung herrscht. Je nach atmosphärischen Bedingungen ist die Grenzschicht unterschiedlich hoch, im Mittel etwa 1000 m. Die große Bedeutung der Grenzschicht liegt darin, dass in ihr der gesamte vertikale Austausch von Wärme, Wasserdampf und Impuls zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre vor sich geht.

indifferente Schichtung: → Schichtung.

Kälteinhalt: Der K. einer Luftschicht mit der (kühleren) Temperatur Θ_z und der (wärmeren) sogenannten "neutralen" Lufttemperatur Θ_a ist proportional zur Lufttemperaturdifferenz $\Theta_z - \Theta_a$. Dabei ist Θ_a diejenige Lufttemperatur, die sich einstellen würde, wenn keine diabatische Abkühlung der Luft stattfinden würde

Kalmen: Windstillen

Kondensation: Übergang des atmosphärischen → Wasserdampfes in den flüssigen Aggregatzustand durch Tröpfchenbildung.

Konvektion: In der Meteorologie das lokal begrenzte Aufsteigen erwärmter Luft bei gleichzeitigem Absinken kälterer Luft in der Umgebung. Konvektion setzt eine labile → Schichtung der Atmosphäre voraus. Ursache ist zumeist die Erwärmung der Erdoberfläche und der bodennahen Luftschicht durch Sonneneinstrahlung.

labile Schichtung: → Schichtung.

latente Wärme: → Wärme.

Lee: L. ist die dem Wind abgewandte Seite eines Gebäudes, Berges, Dammes, o.Ä.

Luv: L. ist die dem Wind zugewandte Seite eines Gebäudes, Berges, Dammes, o.Ä.

makroskalig, mesoskalig, mikroskalig: → Skala.

Modell: → numerische Modelle.

Modellgitter: Zur mathematischen Beschreibung des atmosphärischen Geschehens mit Hilfe eines → numerischen Modells wird das vom Modell erfasste Gebiet in Zellen unterteilt, innerhalb derer den atmosphärischen Variablen jeweils ein repräsentativer Punkt zugeordnet wird. Die Gesamtheit der Zellen und Gitterpunkte bildet das Modellgitter.

Modellparameter: veränderbare, mathematisch-physikalische Einstellgrößen eines → numerischen Modells. Sie ermöglichen dessen flexiblen und vielseitigen Einsatz. Mit ihrer Hilfe wird das Modell an die Gegebenheiten des jeweiligen Modellgebiets und der simulierten synoptischen Situation angepasst.

neutrale Schichtung: → Schichtung.

numerische Modelle: In der Meteorologie Systeme mathematisch-physikalischer Gleichungen zum Zweck der Wettervorhersage oder für sonstige numerische Simulationen. Die Gleichungen beschreiben die atmosphärischen Zustände und die Kausalität der Abläufe. Sie sind so weit vereinfacht, dass sie mit Hilfe von Rechenanlagen bei erträglichem Zeitaufwand gelöst werden können. Je nach dem Anwendungszweck können Art und Grad der vorgenommenen Vereinfachungen recht unterschiedlich sein, wodurch sich die große Vielfalt existierender numerischer Modelle erklärt.

Parametrisierung: in → numerischen Modellen die vereinfachte Behandlung kleinräumiger atmosphärischer Vorgänge, die im gegebenen Gitter nicht detailliert aufgelöst werden können. Man versucht damit, die Auswirkung eines Prozesses zu erfassen, ohne seine Einzelheiten zu behandeln.

potentielle Temperatur: meteorologisches Temperaturmaß, das außer der aktuellen Lufttemperatur auch die in der Atmosphäre auftretenden Druckunterschiede berücksichtigt. Die p.T. eines Luftpakets ist diejenige (hypothetische) Temperatur, die das betrachtete Paket annehmen würde, wenn es ohne Wärmezufuhr von außen auf den Referenzdruck von 1000 hPa komprimiert bzw. entspannt wird.

Rauigkeitslänge: in Formeln zur Beschreibung des Reibungseinflusses der Erdoberfläche auf die Atmosphäre benutzter Parameter von der Dimension einer Länge. Er stellt ein Maß für die Unebenheit oder Rauigkeit der Erdoberfläche dar.

Regionalwind: Wind der durch Luftdruckgradienten auf regionaler Skala (10 km bis 100 km horizontale Entfernung) hervorgerufen wird.

relative Feuchtigkeit: Verhältnis zwischen dem aktuellen \rightarrow Wasserdampfdruck e und dem zur aktuellen Lufttemperatur gehörigen Sättigungsdampfdruck E . Die relative Feuchte wird in Prozent angegeben. Ihr Wert ergibt sich dementsprechend durch Multiplikation des Quotienten e/E mit 100.

Schichtung: vertikale Verteilung eines meteorologischen Elements. Die thermische Sch. insbesondere beschreibt die vertikale Verteilung der Lufttemperatur. Sie bestimmt, wie die Luftpartikel auf vertikale Auslenkung reagieren. Die Sch. heißt stabil, wenn ein aus seiner ursprünglichen Lage verschobenes Luftquantum stets eine rücktreibende Kraft erfährt, weil es schwerer (bei Auslenkung nach oben) bzw. leichter (bei Auslenkung nach unten) als seine jeweilige neue Umgebung ist. Bei labiler Sch. dagegen treten Kräfte auf, die das ausgelenkte Luftpartikel noch weiter aus seiner Ursprungslage zu entfernen trachten. Neutrale oder indifferente Sch. liegt vor, wenn ein vertikal verschobenes Luftteilchen stets dieselbe Dichte aufweist wie seine neue Umgebung. Bei ungesättigter Luft ist die Sch. stabil (trockenstabil), wenn die vertikale Temperaturabnahme geringer als der adiabatische Temperaturgradient von ca. 1 K pro 100 m Höhendifferenz ist. Bei gesättigter Luft liegt die Stabilitätsgrenze niedriger und ist zudem temperaturabhängig (ca. 0.4 K pro 100 m bei hohen Lufttemperaturen, bei tiefen Temperaturen Annäherung an den trockenen Grenzwert von 1 K pro 100 m).

Skala (auch engl. Scale): Bezeichnung für die Größenordnung atmosphärischer Phänomene. Zur Klassifizierung der in ihrer räumlichen Erstreckung recht unterschiedlichen Bewegungsvorgänge und Erscheinungen in der Atmosphäre haben sich die Begriffe makroskalig, mesoskalig und mikroskalig eingebürgert. Phänomene, die das großräumige Wettergeschehen bestimmen wie z.B. Hoch- und Tiefdruckgebiete, gehören der Makroskala an, die auch synoptische Skala genannt wird. Typisch mesoskalig sind z.B. der Land-See-Wind, Berg- und Talwinde sowie der städtische \rightarrow Wärmeinseleffekt. Die Mikroskala umfasst Erscheinungen unterhalb etwa 2 km, z.B. die besonderen Strömungsverhältnisse im Bereich einzelner Gebäudekomplexe.

stabile Schichtung: \rightarrow Schichtung

Strahlung: In der Meteorologie die Energieübertragung zwischen Sonne, Erde und Atmosphäre durch elektromagnetische Wellen. Von fundamentaler Bedeutung ist der Wellenlängenbereich von ca. 0.3 bis etwa 100 μm . Er wird unterteilt in die von der Sonne herrührende kurzwellige S. (Wellenlängen von 0.3 bis 4 μm mit einem Maximum im sichtbaren Bereich bei 0.5 μm) und die langwellige S. der Erde und der Atmosphäre (3.5 bis 100 μm mit einem temperaturabhängigen Maximum bei etwa 10 μm). Die langwellige S. wird auch als Wärmestrahlung oder thermische S. bezeichnet. Bei der auf die Erde auftreffenden kurzwelligen S. ist zu unterscheiden zwischen direkter und indirekter Sonnenstrahlung, die durch Streuung oder Reflexion entsteht und die die Erde aus allen Himmelsbereichen als diffuse S. erreicht. Die Strahlungsbilanz ist die Summe der

auf ein Flächenelement auftreffenden kurz- und langwelligen Strahlung abzüglich der von dem Flächenelement ausgehenden Strahlung.

Strahlungsnächte: → windschwache Strahlungsnächte

Strahlungswetterlage: Wetterlage, die im Wesentlichen durch Strahlungsvorgänge geprägt ist; typisch hierfür sind Hochdruckgebiete. Am Tag erwärmt sich die Luft bei ungehinderter Sonneneinstrahlung sehr stark (Temperaturmaximum etwa 2 Stunden nach Sonnenhöchststand). Nachts kühlt die Luft durch Wärmeausstrahlung des Bodens gegen den wolkenlosen Himmel kräftig ab. (Temperaturminimum bei Sonnenaufgang). Die Luftbewegung ist im allgemeinen schwach, lebt tagsüber durch Konvektion vorübergehend auf.

Turbulenz: Zustand der Atmosphäre, bei dem die Luftbewegung ganz unregelmäßige und scheinbar zufällige Fluktuationen aufweist, so dass man den T.zustand sinnvoll nur durch mittlere Größen beschreiben kann. Eine wichtige Eigenschaft turbulenter Luft ist, dass Wärme und atmosphärische Beimengungen (z.B. Schadstoffe) wesentlich wirkungsvoller ausgebreitet werden als bei gleichförmiger Strömung.

Venturi-Effekt: Horizontale oder vertikale Verringerungen der Strömungsquerschnittsfläche, z.B. in Talverengungen oder bei der Um- und Überströmung von Geländeerhebungen, oder Gebäuden führen aus Kontinuitätsgründen zu einer Strömungsbeschleunigung. Umgekehrt führt eine Vergrößerung der Strömungsquerschnittsfläche zur einer Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit.

Verdunstung: Übergang des Wassers vom flüssigen in den dampfförmigen Zustand. Für den V.vorgang wird Wärme verbraucht, die der Flüssigkeit und ihrer Umgebung entzogen wird und die anschließend im entstehenden Wasserdampf in Form latenter Wärme vorhanden ist. Verdunstung ist deshalb mit Abkühlung verbunden (V.kälte). Von großer Bedeutung für den Wärmehaushalt der Erde ist, dass bei → Kondensation die dann frei werdende latente Wärme des Wasserdampfs der Atmosphäre wieder zugeführt wird. Am Boden unterscheidet man zwischen der V. lebloser Oberflächen (Erdboden, Wasserflächen), der Evaporation, und der V. lebender Objekte (Pflanzen), der biologisch gesteuerten Transpiration. Ist beides nebeneinander vorhanden, so spricht man von Evapotranspiration. Die von einer Oberfläche tatsächlich verdunstende Wassermenge heißt aktuelle V. im Gegensatz zur potentiellen V., die stets von einer optimalen Wasserversorgung der Fläche ausgeht, unabhängig davon, ob die benötigte Wassermenge tatsächlich zur Verfügung steht. Die p.V. entspricht deshalb der unter den klimatischen Gegebenheiten maximal möglichen Verdunstung.

Wahre Ortszeit (WOZ): lokale Zeit, die sich am tatsächlichen Sonnenstand orientiert. Sie ist so definiert, dass der Sonnenhöchststand am betreffenden Ort gerade um 12 Uhr mittags erreicht wird. Wegen der Neigung der Erdachse (Schiefe der Ekliptik) und der nicht ganz gleichförmigen Geschwindigkeit der Erde auf ihrer elliptischen Bahn um die Sonne weicht die wahre Ortszeit im Jahresverlauf um bis zu ± 16,5 min von der gleichförmig laufenden mittleren Ortszeit (MOZ) ab. Die Differenz zwischen WOZ und MOZ heißt Zeitgleichung Z. Die mitteleuropäische Zeit (MEZ) wiederum steht zur WOZ in der Beziehung:

$$MEZ = (WOZ - Z) + A,$$

mit A=Abweichung der MEZ von der MOZ (A=MEZ-MOZ). Diese Differenz ist konstant und allein durch die geographische Länge des Ortes bestimmt; für Frankfurt/Main z.B. gilt: A = + 25 Min.

Wärme: Energieform. In der Meteorologie unterscheidet man zwischen fühlbarer und latenter Wärme. Die fühlbare W. der Luft wird durch ihre Temperatur bestimmt, sie lässt sich direkt spüren.

Die latente W. ist dagegen eine an den atmosphärischen Wasserdampf gebundene Energieform, die erst dann als spürbare Wärme freigesetzt wird, wenn der Wasserdampf kondensiert.

Wärmestrahlung: → Strahlung.

Wasserdampfdruck: Partialdruck des im atmosphärischen Gasgemisch enthaltenen Wasserdampfes. Luft kann Wasserdampf nur bis zu einem temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck aufnehmen, wobei warme Luft mehr Wasserdampf aufnimmt als kalte. Darüber hinaus vorhandener Dampf kondensiert zu Tropfen, so dass Wolken- oder Nebelbildung einsetzt, oder er schlägt sich an festen Oberflächen als Tau nieder.

Wind: horizontal (als Aufwind auch vertikal) bewegte atmosphärische Luft. Der Wind wird charakterisiert durch die Angabe von Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Die Windgeschwindigkeit wird mit so genannten → Anemometern in Meter pro Sekunde (m/s), Kilometern pro Stunde (km/h) oder in Knoten (kn) gemessen. Bezüglich der exakten Umrechnung gilt: 1 kn = 0,514 m/s. Windgeschwindigkeiten in kn werden jedoch nur ganzzahlig angegeben. Bei der Umrechnung wird daher jedem Knotenwert ein sich über mehrere 1/10 m/s erstreckender Wertebereich zugeordnet, z.B. für 3 kn der Bereich von 1,3 bis 1,7 m/s. Die Windrichtung ist die Richtung, aus der der Wind weht. Sie wird im Uhrzeigersinn in Grad gegen Nord gemessen (Ost=90°). Daneben sind noch Einteilungen in 32, 16 oder 8 Abschnitte (Sektoren) in Gebrauch.

Windfeld: → Feld.

windschwache Strahlungsnächte (Definition): von einer windschwachen Strahlungsnacht wird dann ausgegangen, wenn die Windgeschwindigkeit im Stundenmittel höchstens 2,6 m/s und der → Bedeckungsgrad des Himmels mit Wolken höchstens 4 Achtel beträgt (s. auch → Strahlungswetterlage).

Zentrifugalkraft: Trägheitskraft, die auf alle Körper wirkt, welche sich auf einer gekrümmten Bahn (insbes. einer Kreisbahn) bewegen. Sie ist vom Krümmungsmittelpunkt (Kreismittelpunkt) der Bahn nach außen gerichtet, proportional der Masse des Körpers und dem Quadrat der Geschwindigkeit sowie umgekehrt proportional dem Krümmungsradius der Bahn. Damit ein Körper, der sich ohne Kraffteinwirkung von außen aufgrund der Trägheitskraft geradlinig weiter bewegen würde, auf einer Kreisbahn bleibt, muss der Zentrifugalkraft eine genau gleich große Kraft, die Zentripetalkraft, entgegenwirken.

11 Verzeichnis der Bilder und Abbildungen

Bild 1: Zündung 18:55, Strömung noch talaufwärts dem Grundstrom folgend	21
Bild 2: Zündung 19:08, Zeit etwa der Strömungsumstellung	21
Bild 3: Zündung 19:19, Einsetzende Winddrehung	22
Bild 4: Zündung 19:27, Rauch dreht talabwärts bodennah in talquerende Richtung	22
Bild 5: Zündung 19:35, Beispiel für die bodennahe Querströmung	23
Bild 6: Zündung 19:42, Stagnation innerhalb des Kaltluftsees	23
Bild 7: Profilmesswagen der Mobilen Messeinheit Essen	24
Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes, Auszug aus TK 25 Blatt 5124 Bad Hersfeld	52
Abbildung 2: Lage der Messstellen im Untersuchungsgebiet	54
Abbildung 3: Bilder des temporären Messpunktes 1	55
Abbildung 4: Bilder des temporären Messpunktes 2	55
Abbildung 5: Registrierungen der Lufttemperaturen an den zwei temporären Messpunkten und der Wetterstation Bad Hersfeld vom 27. bis 30.07.2004	56
Abbildung 6: Temperaturverlauf an der Station 1 während der Temporärmessungen in 2 und 9 m über Grund und 0,5 und 5 cm Tiefe im Erdboden	56
Abbildung 7: Registrierung der rel. Luftfeuchte an den beiden Messpunkten und der Wetterstation Bad Hersfeld vom 27. Bis 30.07.2004	57
Abbildung 8: Verteilung der Windrichtungen in 2, 2,5 und 10,0 m über Grund	57
Abbildung 9: Verteilung der Windgeschwindigkeit in 2, 2,5 und 10,0 m über Grund	58
Abbildung 10: Fahrtroute zu den Profilmessfahrten mit eingetragenen markanten Punkten	59
Abbildung 11: Temperatur und Feuchte während der Messfahrten mit dem Profilmesswagen	60
Abbildung 12: Temperatur und Feuchte während der Messfahrten mit dem Profilmesswagen	61
Abbildung 13: Temperatur und Feuchte während der Messfahrten mit dem Profilmesswagen	62
Abbildung 14: Simulation von Kaltfluthöhe und Windfeld nach 1 Stunde Simulationszeit	63
Abbildung 15: Simulation von Kaltfluthöhe und Windfeld nach 4 Stunde Simulationszeit	64
Abbildung 16: Simulation von Kaltfluthöhe und Windfeld nach 8 Stunde Simulationszeit	65

Abbildung 17: Simulation von Kaltfluthöhe und Windfeld nach 1 Stunde Simulationszeit mit aufgeprägter Grundströmung	66
Abbildung 18: Simulation von Kaltfluthöhe und Windfeld nach 4 Stunde Simulationszeit mit aufgeprägter Grundströmung	67
Abbildung 19: Simulation von Kaltfluthöhe und Windfeld nach 8 Stunde Simulationszeit mit aufgeprägter Grundströmung	68
Abbildung 20: Änderung der Kaltfluthöhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 10 Minuten	69
Abbildung 21: Änderung der Kaltfluthöhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 20 Minuten	70
Abbildung 22: Änderung der Kaltfluthöhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 45 Minuten	71
Abbildung 23: Änderung der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 10 Minuten	72
Abbildung 24: Änderung der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 30 Minuten	73
Abbildung 25: Änderung der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 90 Minuten	74
Abbildung 26: Änderung der Kaltfluthöhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 10 Minuten mit überlagerter Grundströmung	75
Abbildung 27: Änderung der Kaltfluthöhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 25 Minuten mit überlagerter Grundströmung	76
Abbildung 28: Änderung der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls1aBr4 nach 10 Minuten	77
Abbildung 29: Änderung der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls1aBr4 nach 20 Minuten	78
Abbildung 30: Änderung der Kaltfluthöhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls2bBr3 nach 10 Minuten	79
Abbildung 31: Änderung der Kaltfluthöhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls2bBr3 nach 15 Minuten	80
Abbildung 32: Änderung der Kaltfluthöhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls2bBr3 nach 20 Minuten	81
Abbildung 33: Änderung der Kaltfluthöhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls2bBr3 nach 25 Minuten	82

12 Abbildungen

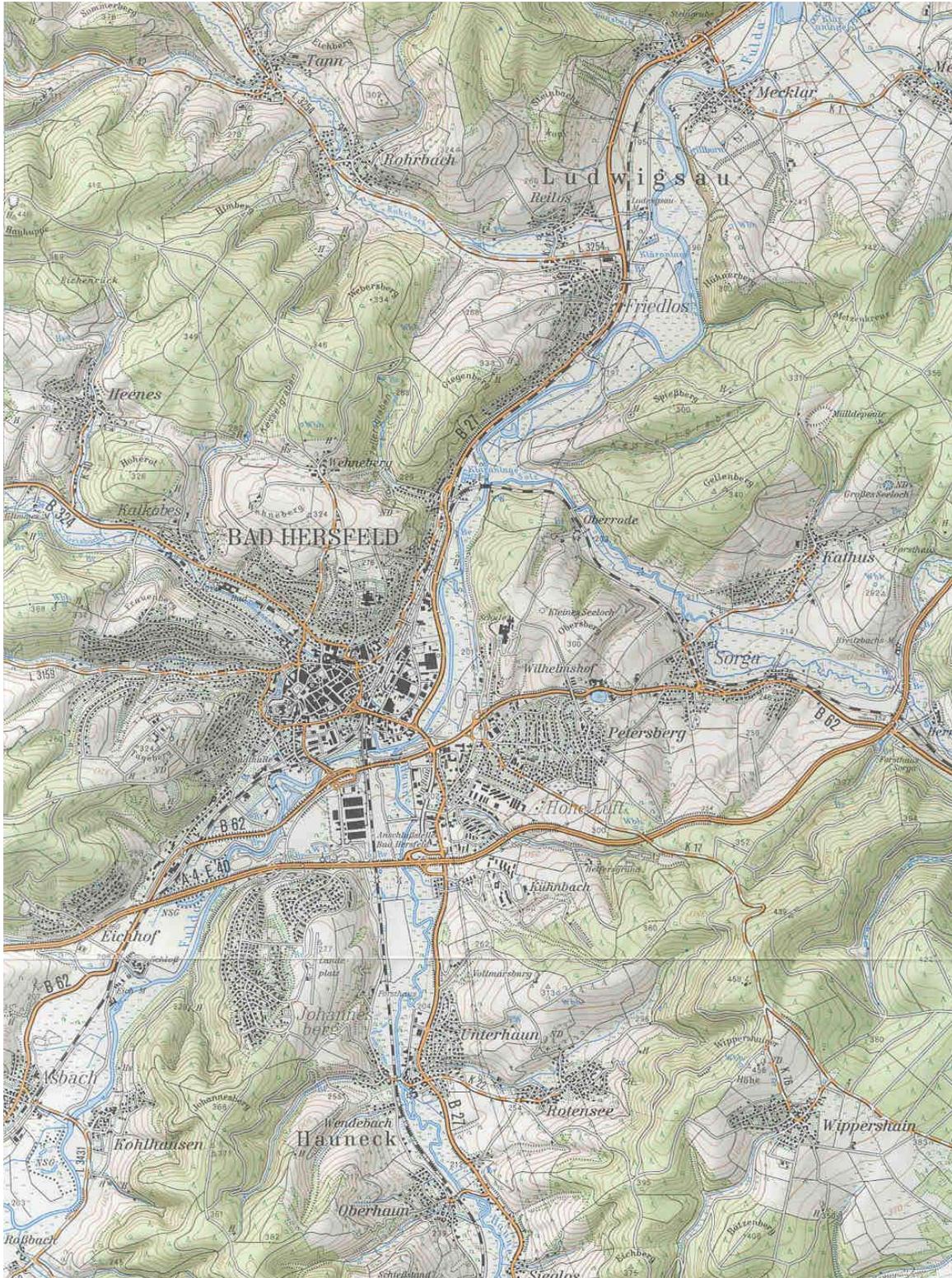


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes, Auszug aus TK 50 Blatt 5124 Bad Hersfeld



Abbildung 2: Lage der Messstellen (blau) 1 und 2 im Untersuchungsgebiet sowie der Rauchpunkte (rot) R1 bis R 4



Abbildung 3: Bilder des temporären Messpunktes 2



Abbildung 4: Bilder des temporären Messpunktes 1

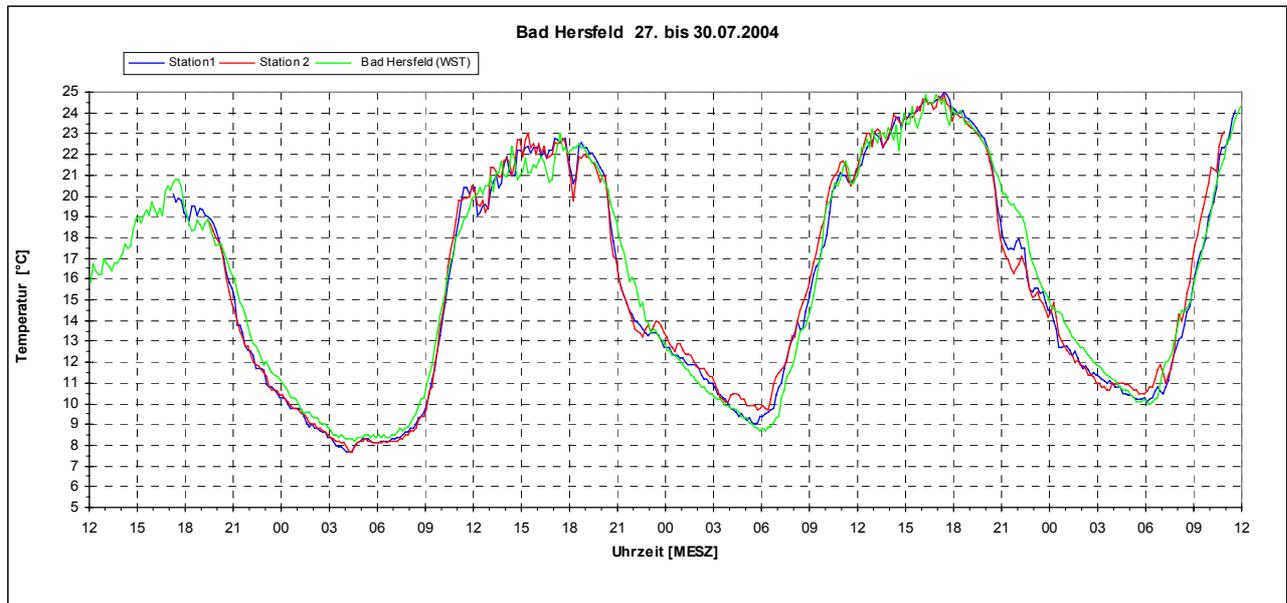


Abbildung 5: Registrierungen der Lufttemperaturen an den zwei temporären Messpunkten und der Wetterstation Bad Hersfeld vom 27. bis 30.07.2004

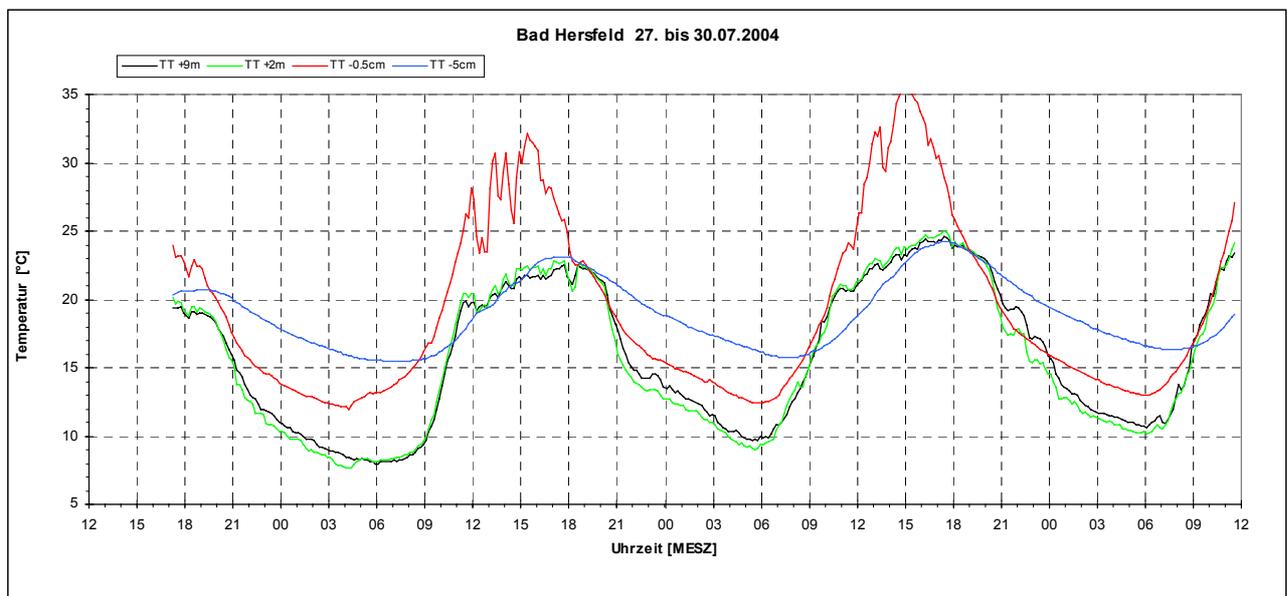


Abbildung 6: Temperaturverlauf an der Station 1 während der Temporärmessungen in 2 und 9 m über Grund und 0,5 und 5 cm Tiefe im Erdboden

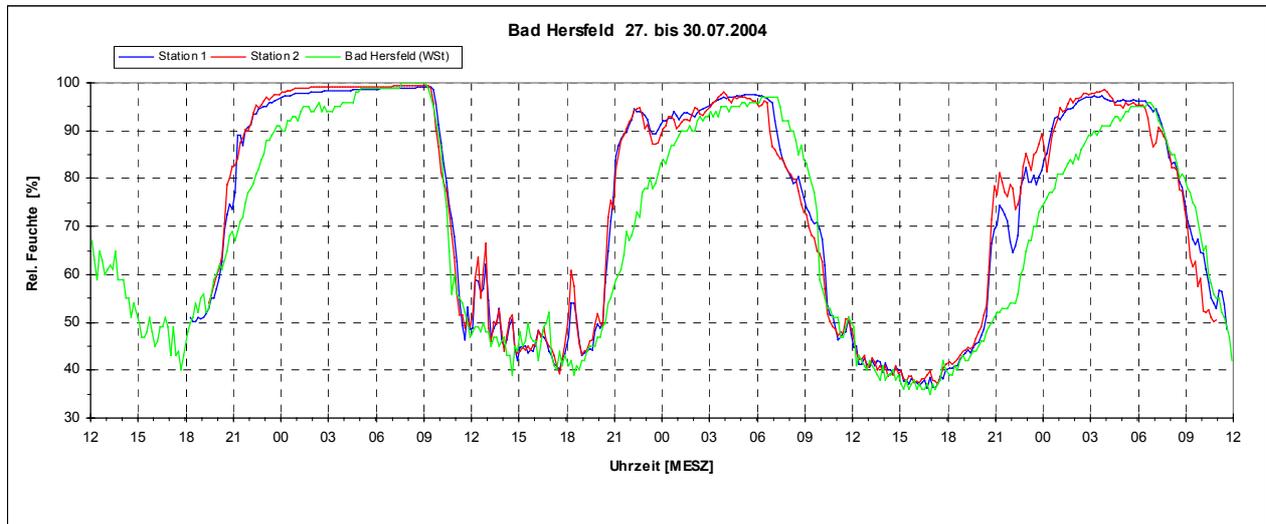


Abbildung 7: Registrierung der rel. Luftfeuchte an den beiden Messpunkten und der Wetterstation Bad Hersfeld vom 27. Bis 30.07.2004

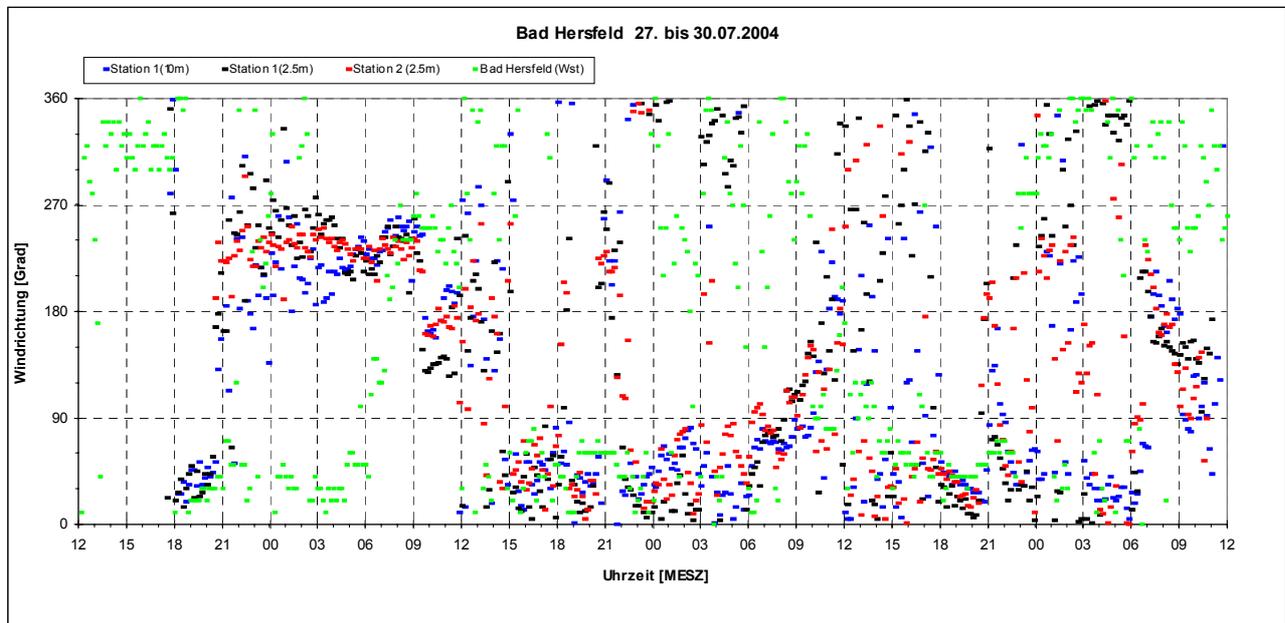


Abbildung 8: Verteilung der Windrichtungen in 2, 2,5 und 10,0 m über Grund

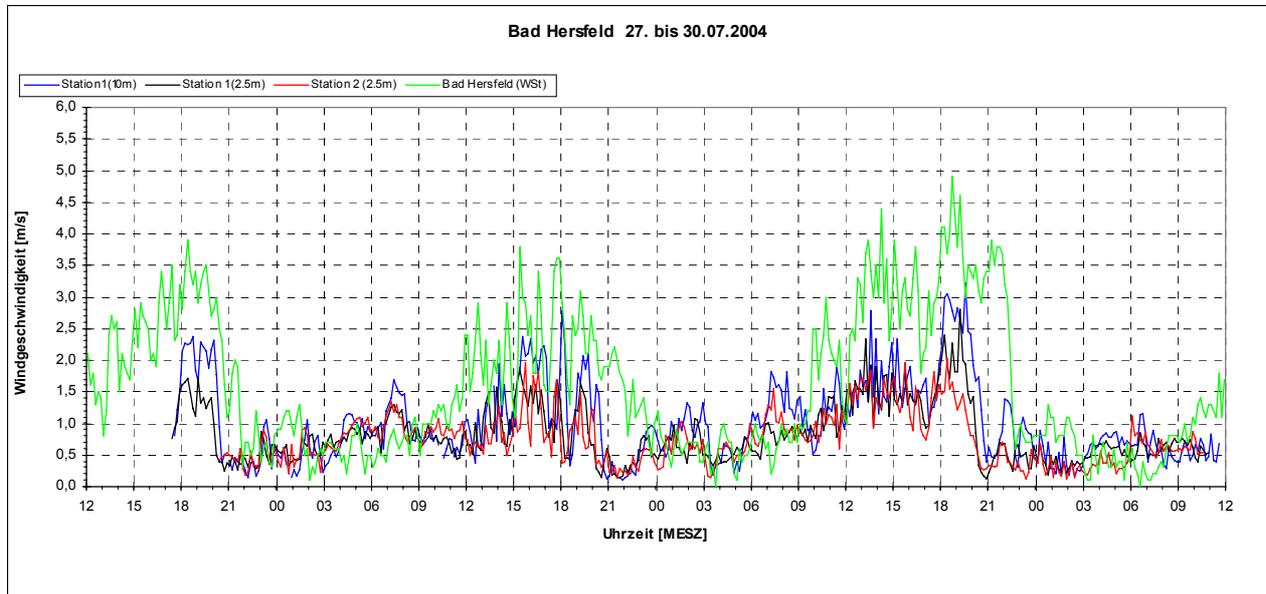


Abbildung 9: Verteilung der Windgeschwindigkeit in 2, 2,5 und 10,0 m über Grund

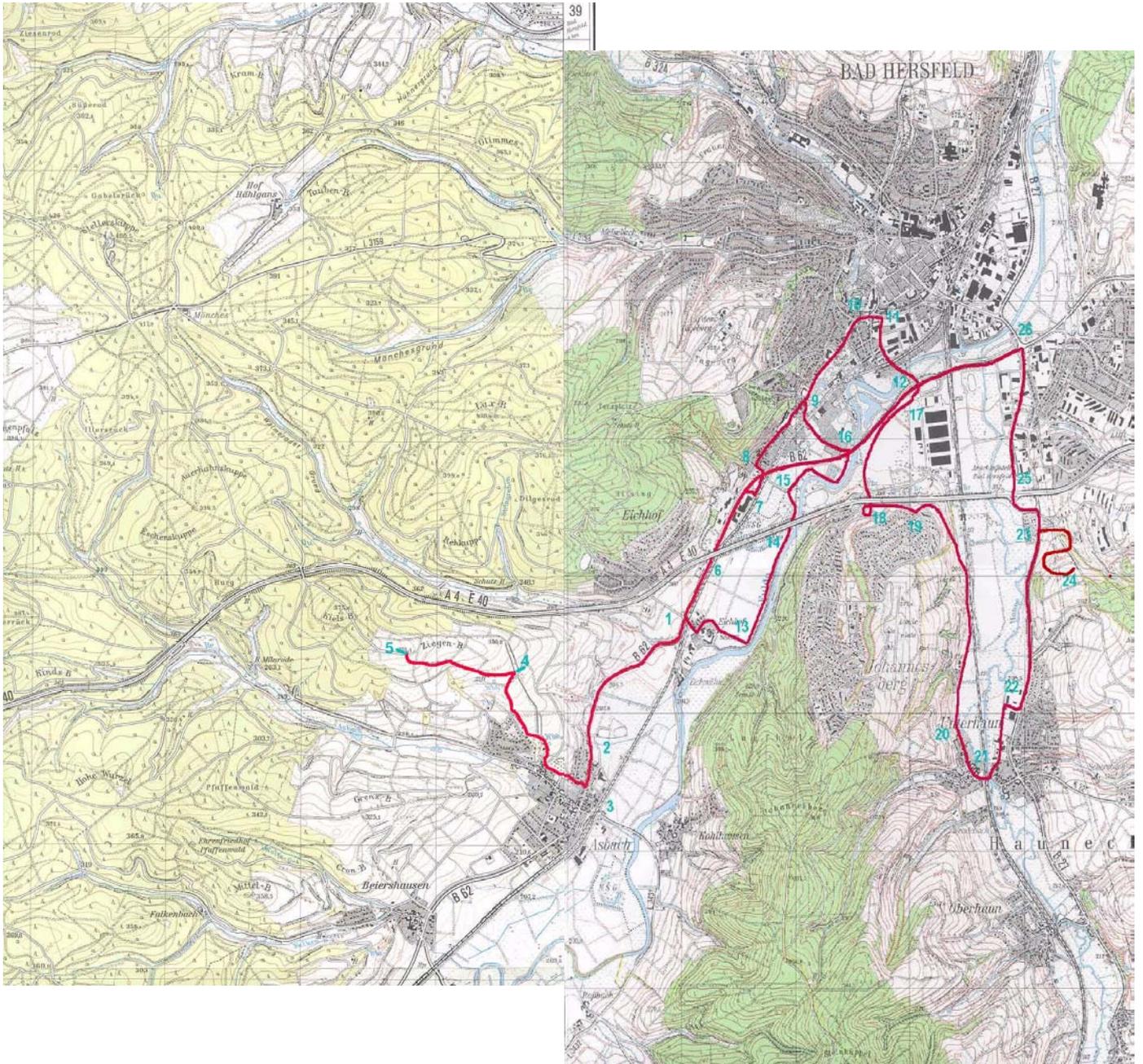


Abbildung 10: Fahrtroute (rot) zu den Profilmessfahrten mit eingetragenen markanten Punkten (blau)

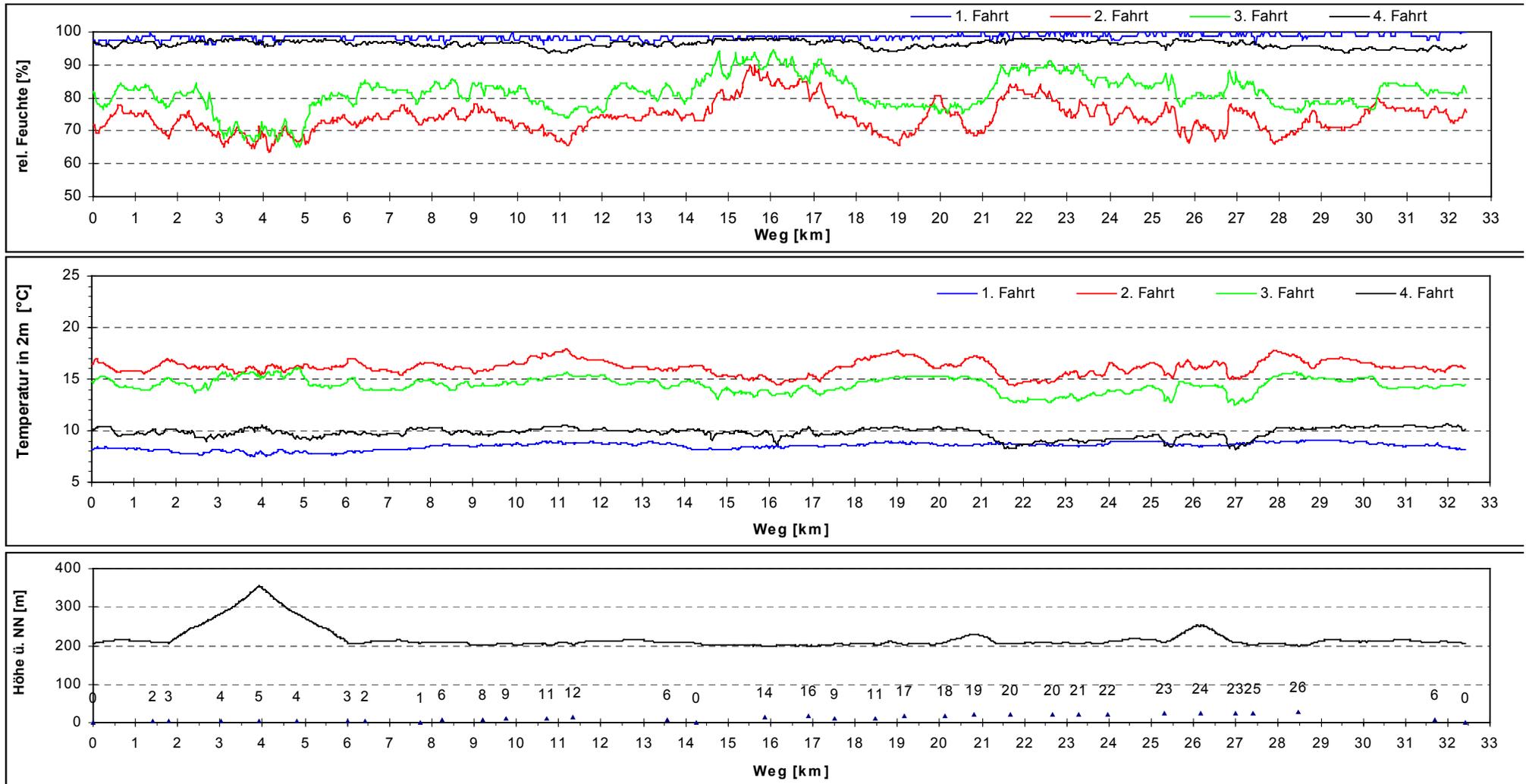


Abbildung 11: Temperatur und Feuchte während der Messfahrten mit dem Profilmesswagen

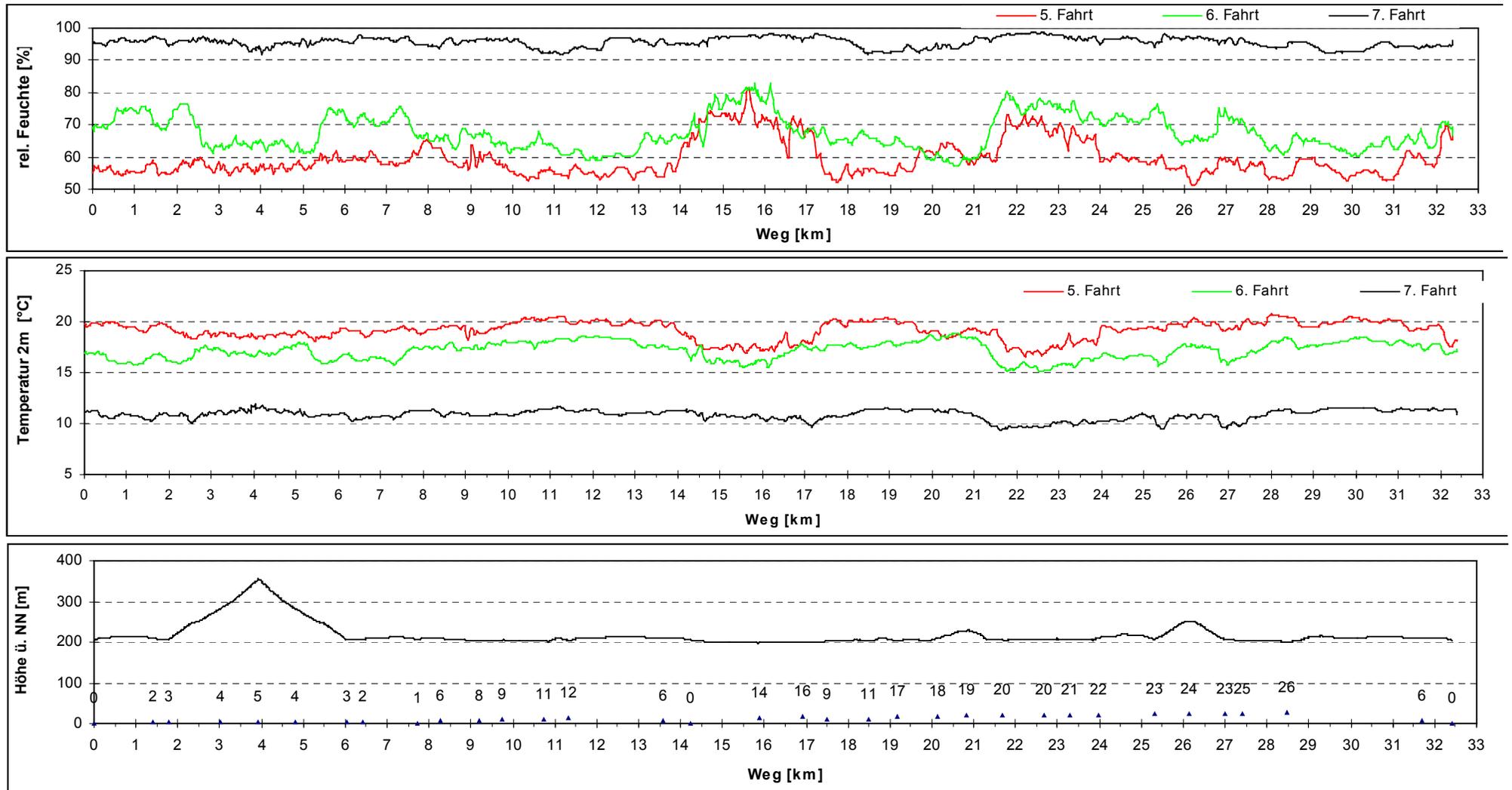


Abbildung 12: Temperatur und Feuchte während der Messfahrten mit dem Profilmesswagen

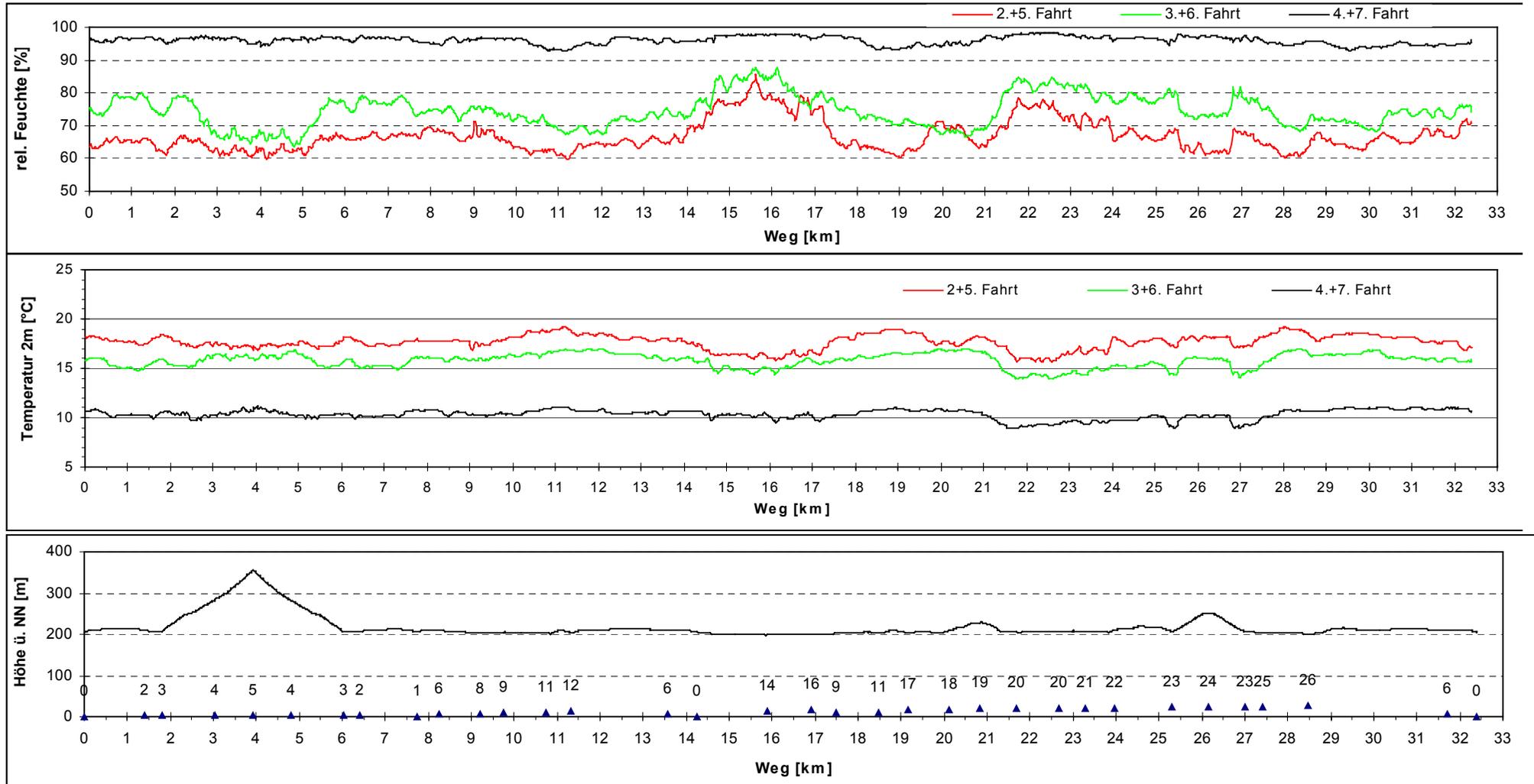
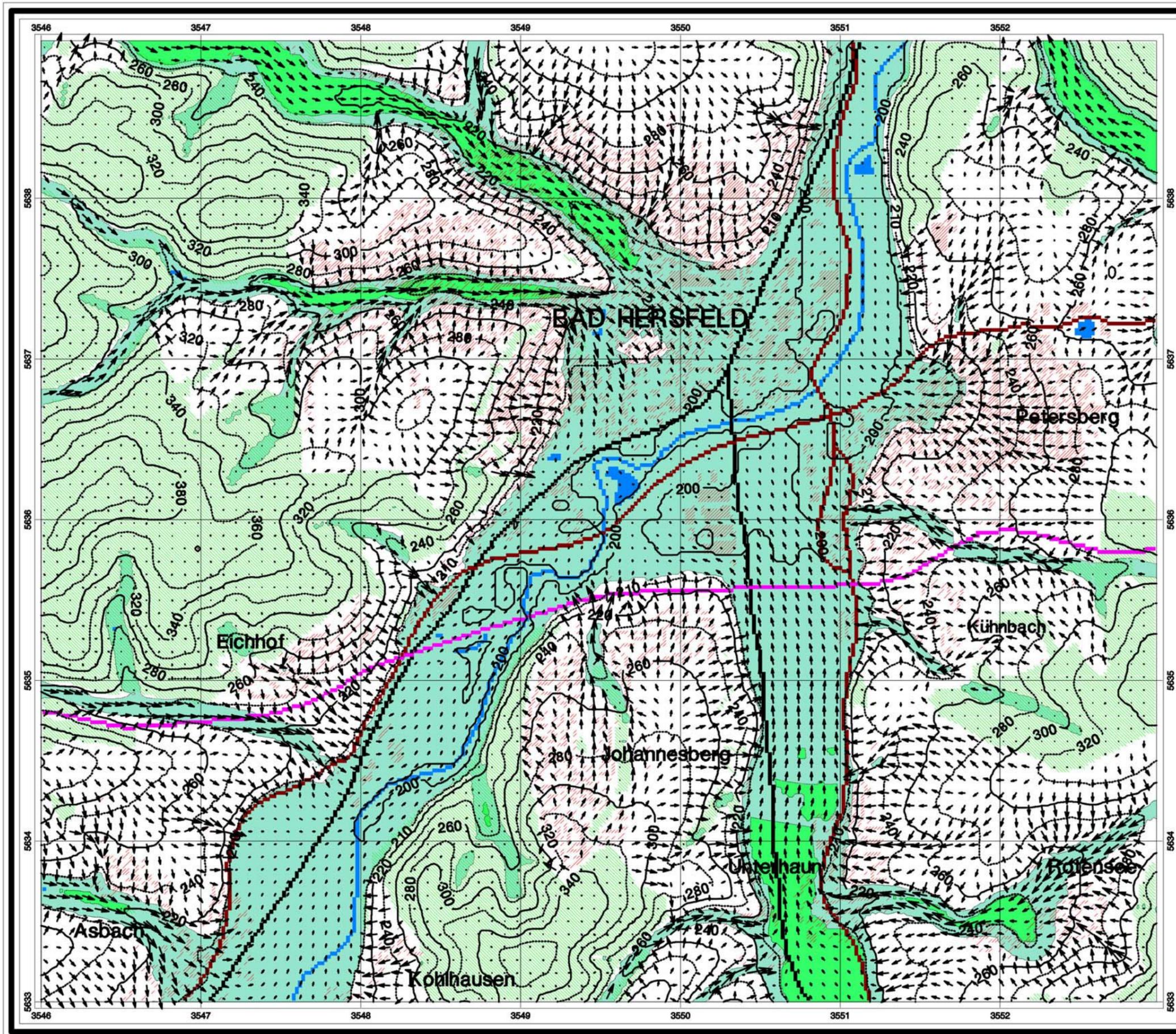


Abbildung 13: Temperatur und Feuchte während der Messfahrten mit dem Profilmesswagen



BAD HERSFELD
IST-ZUSTAND
 nach 1 Stunde
 Kaltlufthöhe
 und Windfeld
 in 2 Meter Höhe
 → $\hat{=}$ 1.0 m/s

Maßstab 1 : 25000



DWD 04/2005

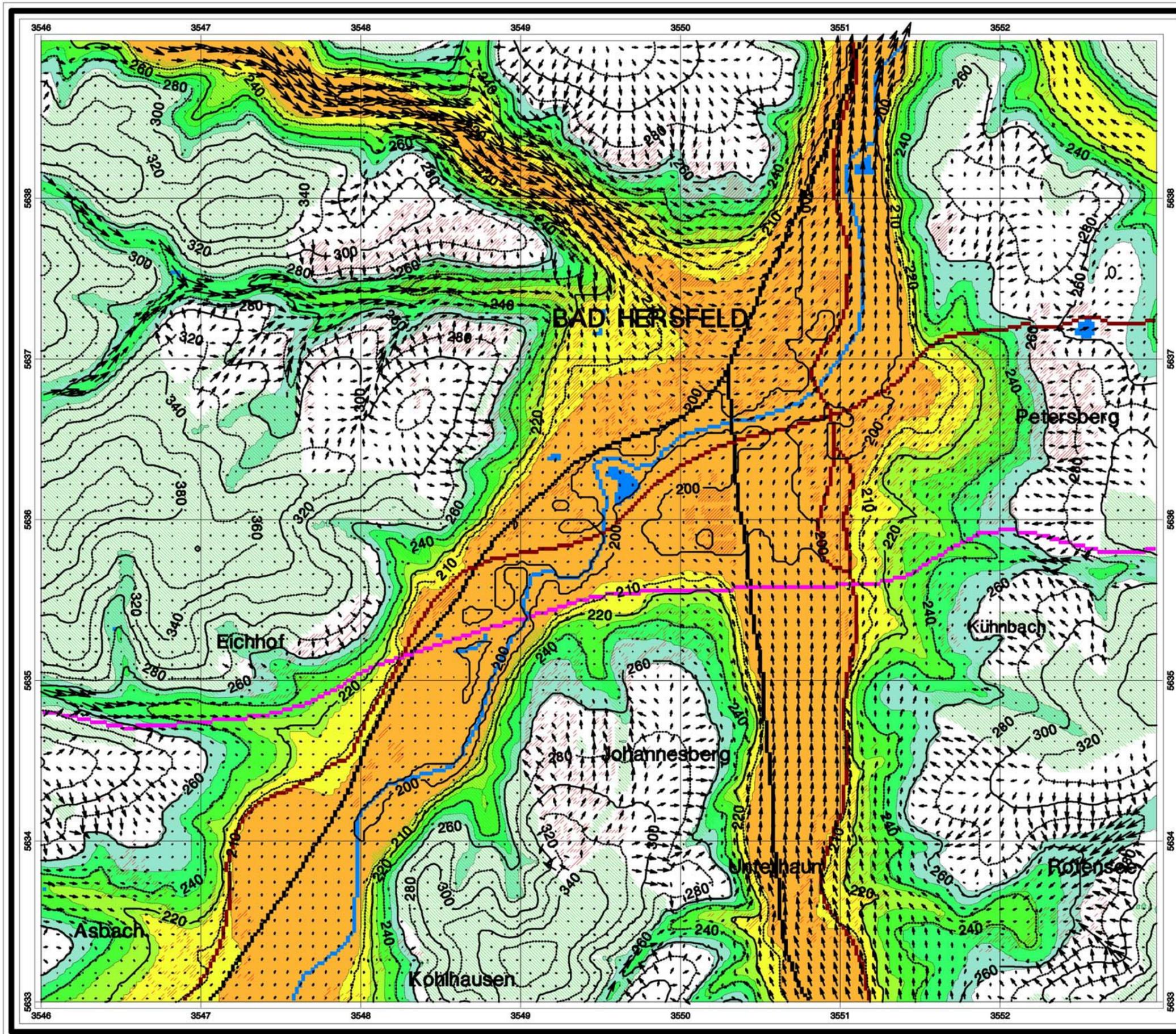
Landnutzung

- Bebauung
- Wald
- Wasser
- Bundesstraße
- Autobahn
- Bahn

**Kaltlufthöhe
in Metern**

- über 90
- 80 - 90
- 70 - 80
- 60 - 70
- 50 - 60
- 40 - 50
- 30 - 40
- 20 - 30
- unter 10

Abbildung 14:
 Simulationsergebnisse
 des Kaltluftabflussmodells
 KLAM_21 für den Ist-
 Zustand nach 1,0 Stunden
 Simulationszeit



**BAD HERSFELD
IST-ZUSTAND
nach 4 Stunden**

Kaltlufthöhe
und Windfeld
in 2 Meter Höhe
→ $\triangleq 1.0 \text{ m/s}$

Maßstab 1 : 25000



DWD 04/2005

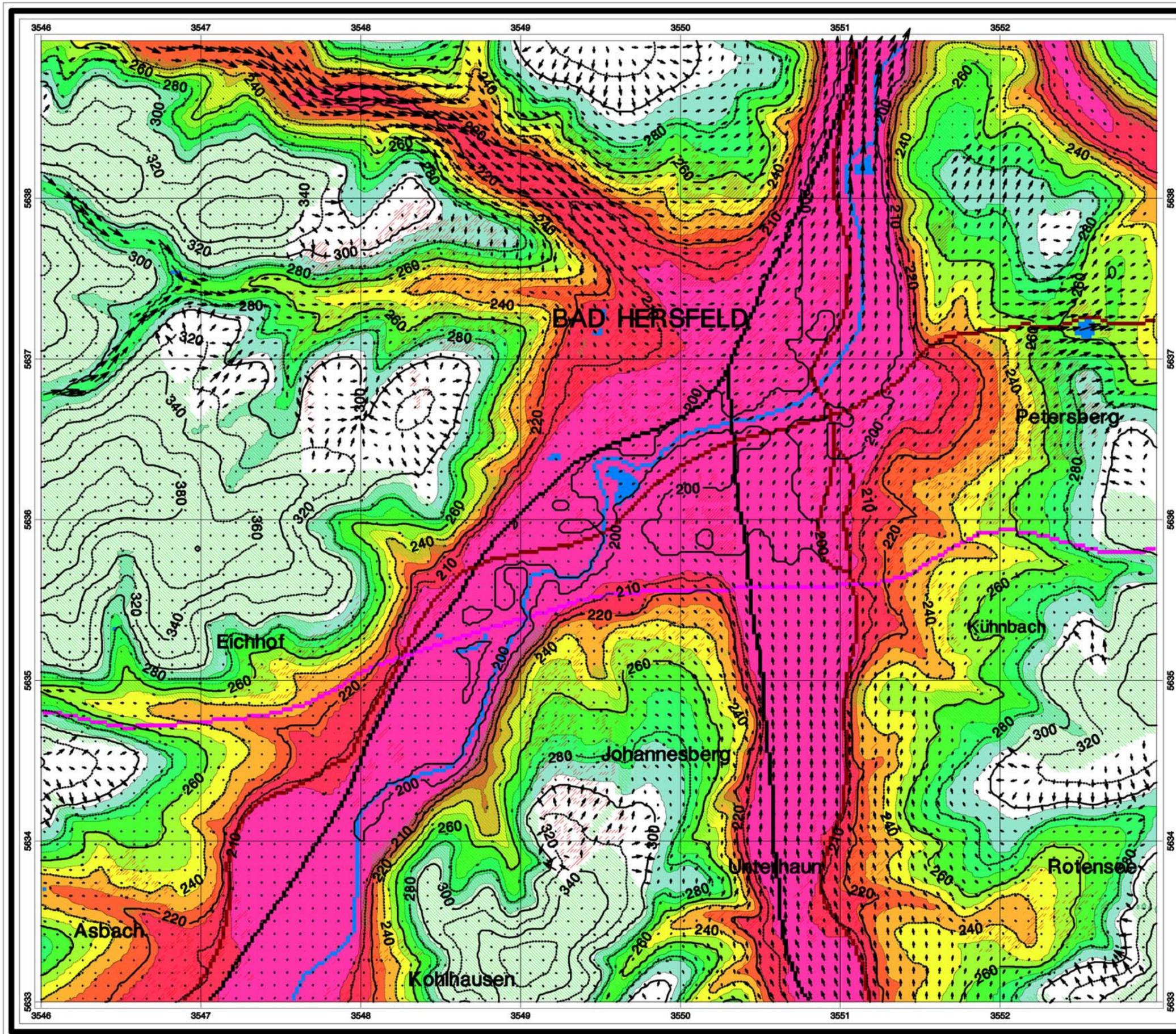
Landnutzung

- Bebauung
- Wald
- Wasser
- Bundesstraße
- Autobahn
- Bahn

**Kaltlufthöhe
in Metern**

- über 90
- 80 - 90
- 70 - 80
- 60 - 70
- 50 - 60
- 40 - 50
- 30 - 40
- 20 - 30
- 10 - 20
- unter 10

Abbildung 15:
Simulationsergebnisse
des Kaltluftabflussmodells
KLAM_21 für den Ist-
Zustand nach 4,0 Stunden
Simulationszeit



**BAD HERSFELD
IST-ZUSTAND
nach 8 Stunden**

Kaltlufthöhe
und Windfeld
in 2 Meter Höhe
→ $\hat{=}$ 1.0 m/s

Maßstab 1 : 25000



DWD 04/2005

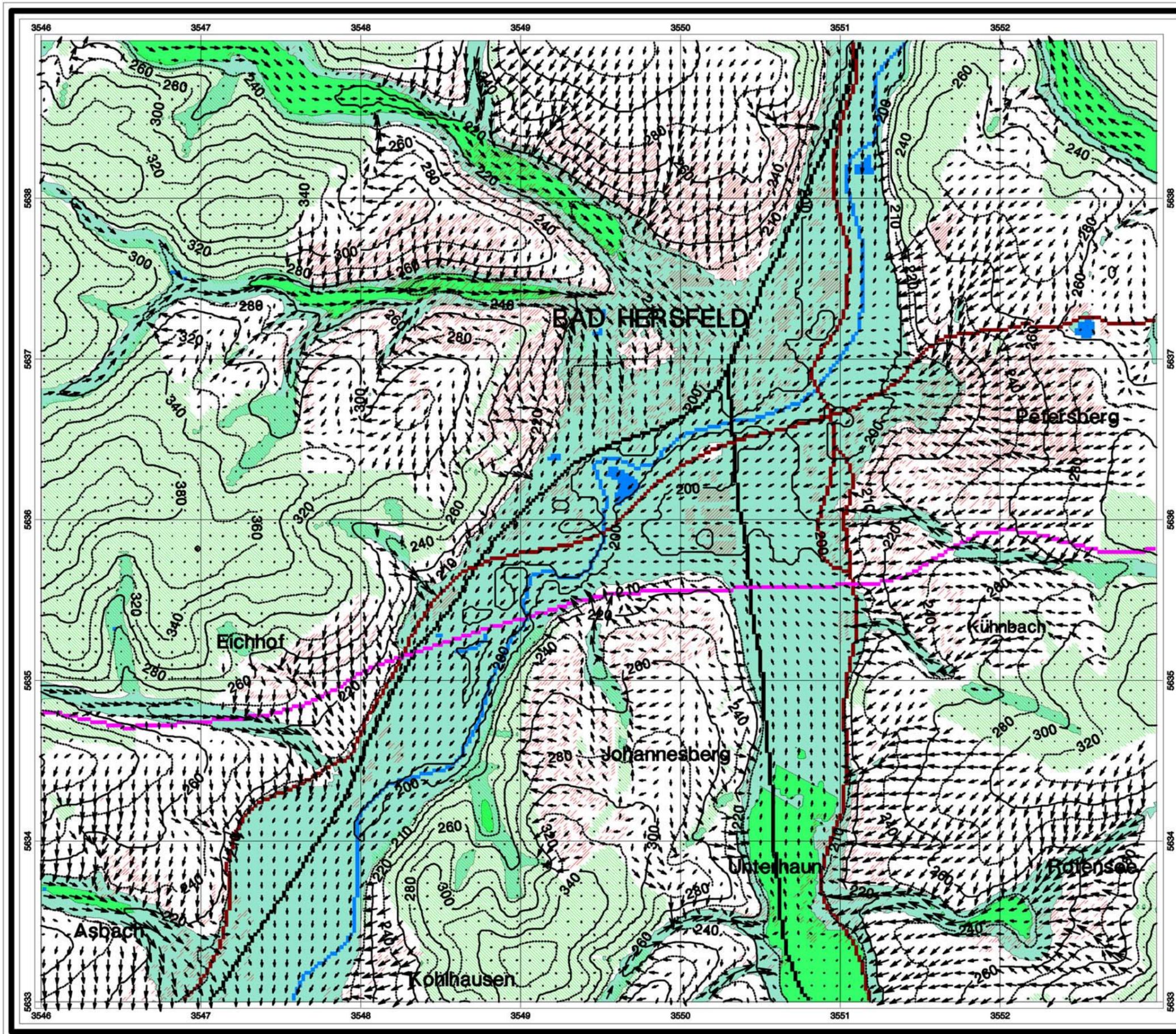
Landnutzung

- Bebauung
- Wald
- Wasser
- Bundesstraße
- Autobahn
- Bahn

**Kaltlufthöhe
in Metern**

- über 90
- 80 - 90
- 70 - 80
- 60 - 70
- 50 - 60
- 40 - 50
- 30 - 40
- 20 - 30
- 10 - 20
- unter 10

Abbildung 16:
Simulationsergebnisse
des Kaltluftabflussmodells
KLAM_21 für den Ist-
Zustand nach 8,0 Stunden
Simulationszeit



BAD HERSFELD

IST-ZUSTAND

nach 1 Stunde

mit Regionalwind aus
45 Grad mit 3.0 m/s
in 700 m ü. NN

Kaltfluthöhe
und Windfeld
in 2 Meter Höhe

→ \triangleq 1.0 m/s

Maßstab 1 : 25000



DWD 04/2005

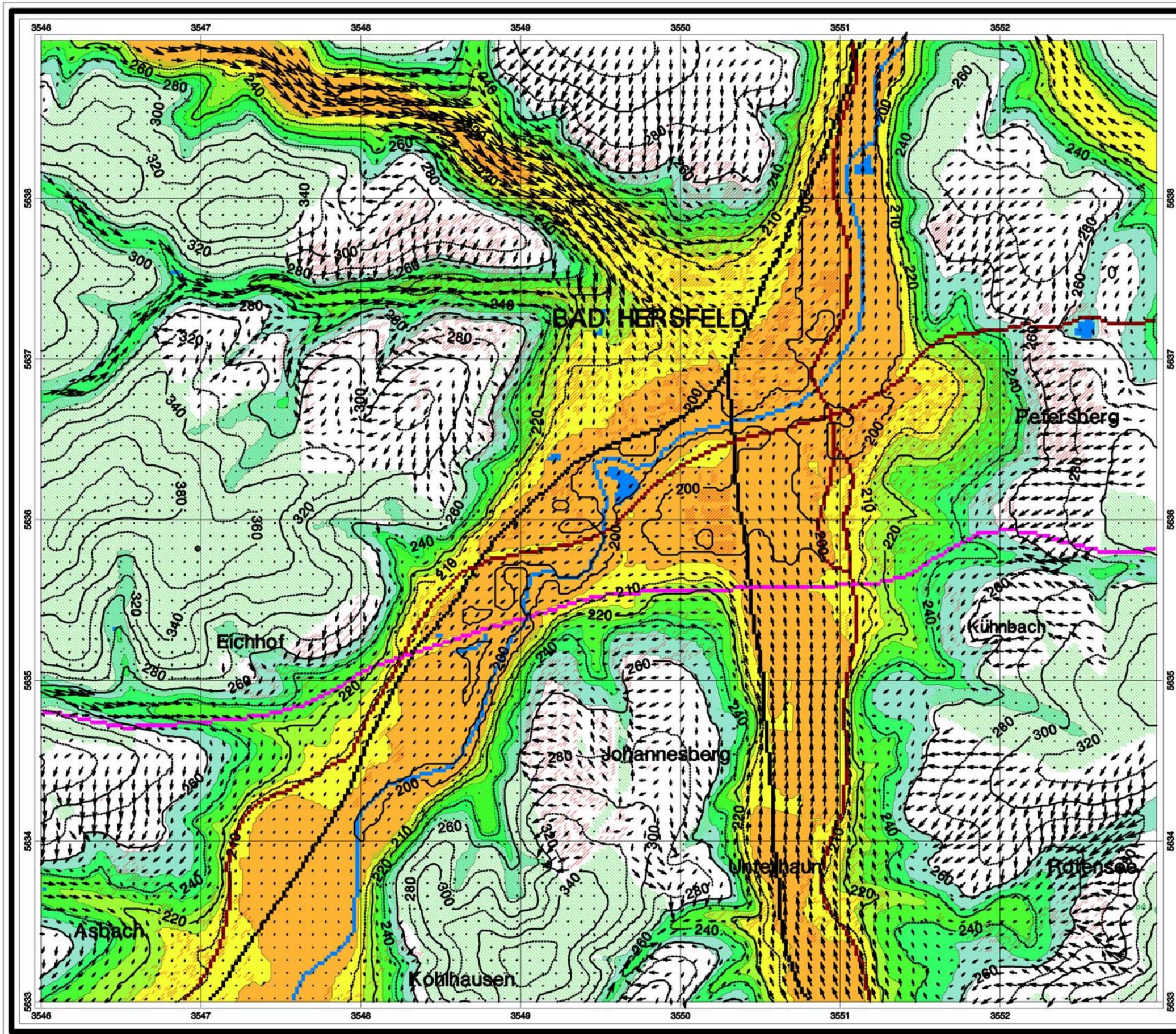
Landnutzung

- Bebauung
- Wald
- Wasser
- Bundesstraße
- Autobahn
- Bahn

Kaltfluthöhe in Metern

- über 90
- 80 - 90
- 70 - 80
- 60 - 70
- 50 - 60
- 40 - 50
- 30 - 40
- 20 - 30
- 10 - 20
- unter 10

Abbildung 17:
Simulationsergebnisse
des Kaltluftabflussmodells
KLAM_21 für den Ist-
Zustand nach 1,0 Stunden
Simulationszeit



BAD HERSFELD

IST-ZUSTAND

nach 4 Stunden

mit Regionalwind aus
45 Grad mit 3.0 m/s
in 700 m ü. NN

Kaltlufthöhe
und Windfeld
in 2 Meter Höhe

→ \triangleq 1.0 m/s

Maßstab 1 : 25000



DWD 04/2005

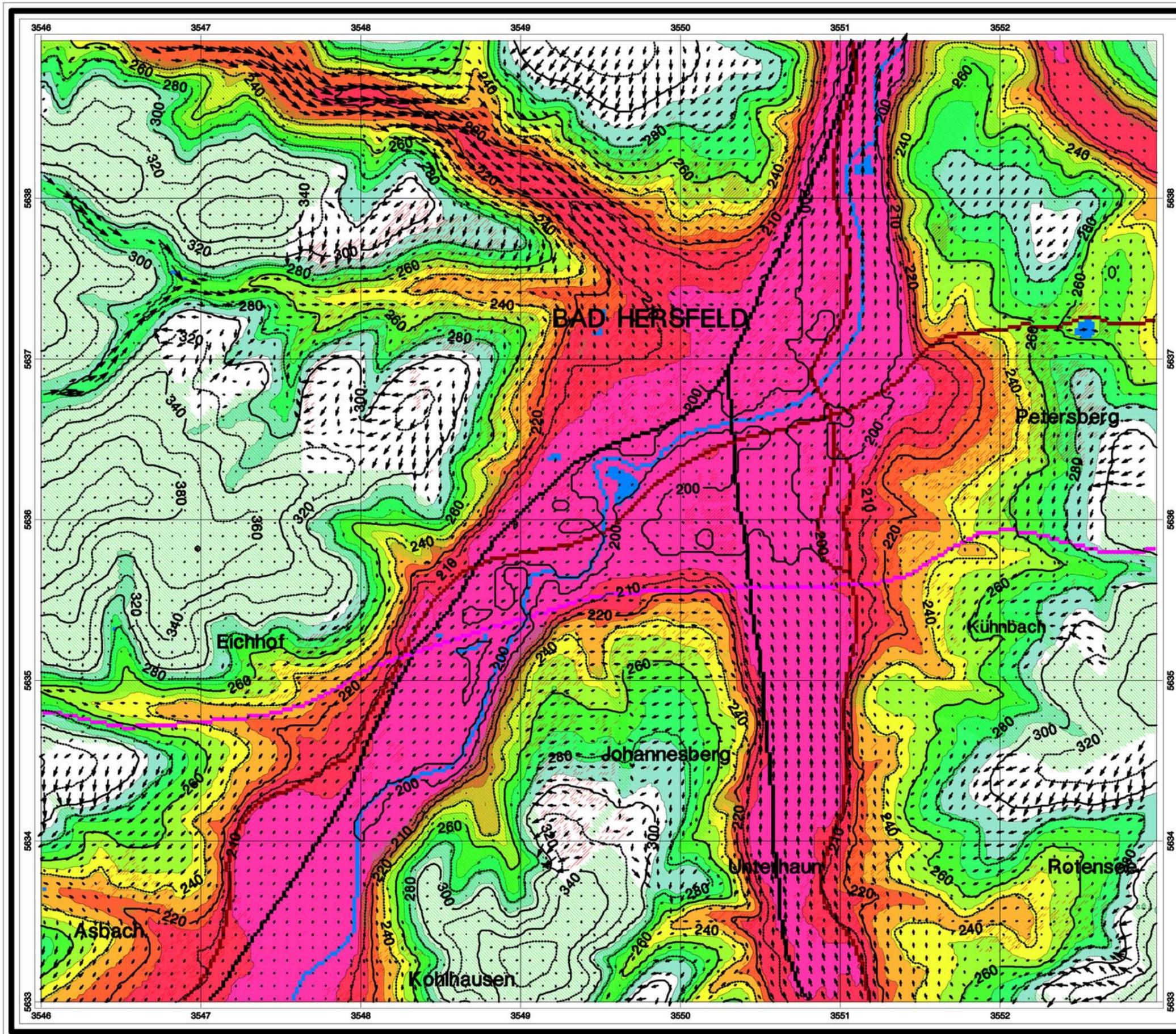
Landnutzung

- Bebauung
- Wald
- Wasser
- Bundesstraße
- Autobahn
- Bahn

Kaltlufthöhe in Metern

- über 90
- 80 - 90
- 70 - 80
- 60 - 70
- 50 - 60
- 40 - 50
- 30 - 40
- 20 - 30
- 10 - 20
- unter 10

Abbildung 18:
Simulationsergebnisse
des Kaltluftabflussmodells
KLAM_21 für den Ist-
Zustand nach 4,0 Stunden
Simulationszeit



BAD HERSFELD

IST-ZUSTAND

nach 8 Stunden

mit Regionalwind aus
45 Grad mit 3.0 m/s
in 700 m ü. NN

Kaltfluthöhe
und Windfeld
in 2 Meter Höhe

→ \triangleq 1.0 m/s

Maßstab 1 : 25000



DWD 04/2005

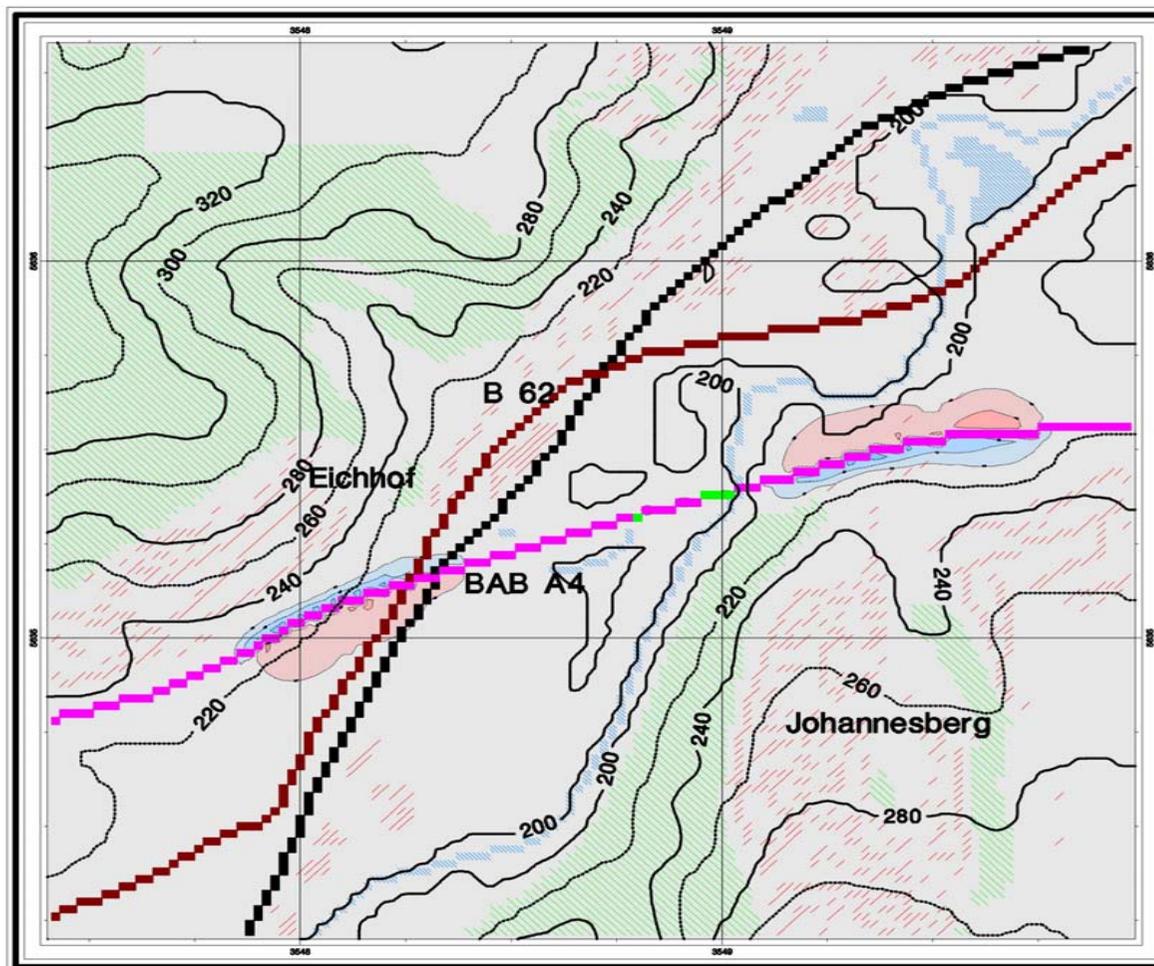
Landnutzung

- Bebauung
- Wald
- Wasser
- Bundesstraße
- Autobahn
- Bahn

Kaltfluthöhe in Metern

- über 90
- 80 - 90
- 70 - 80
- 60 - 70
- 50 - 60
- 40 - 50
- 30 - 40
- 20 - 30
- 10 - 20
- unter 10

Abbildung 19:
Simulationsergebnisse
des Kaltluftabflussmodells
KLAM_21 für den Ist-
Zustand nach 8,0 Stunden
Simulationszeit



BAD HERSFELD

**Ls1aBr3 minus Ist
nach 10 Minuten**

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

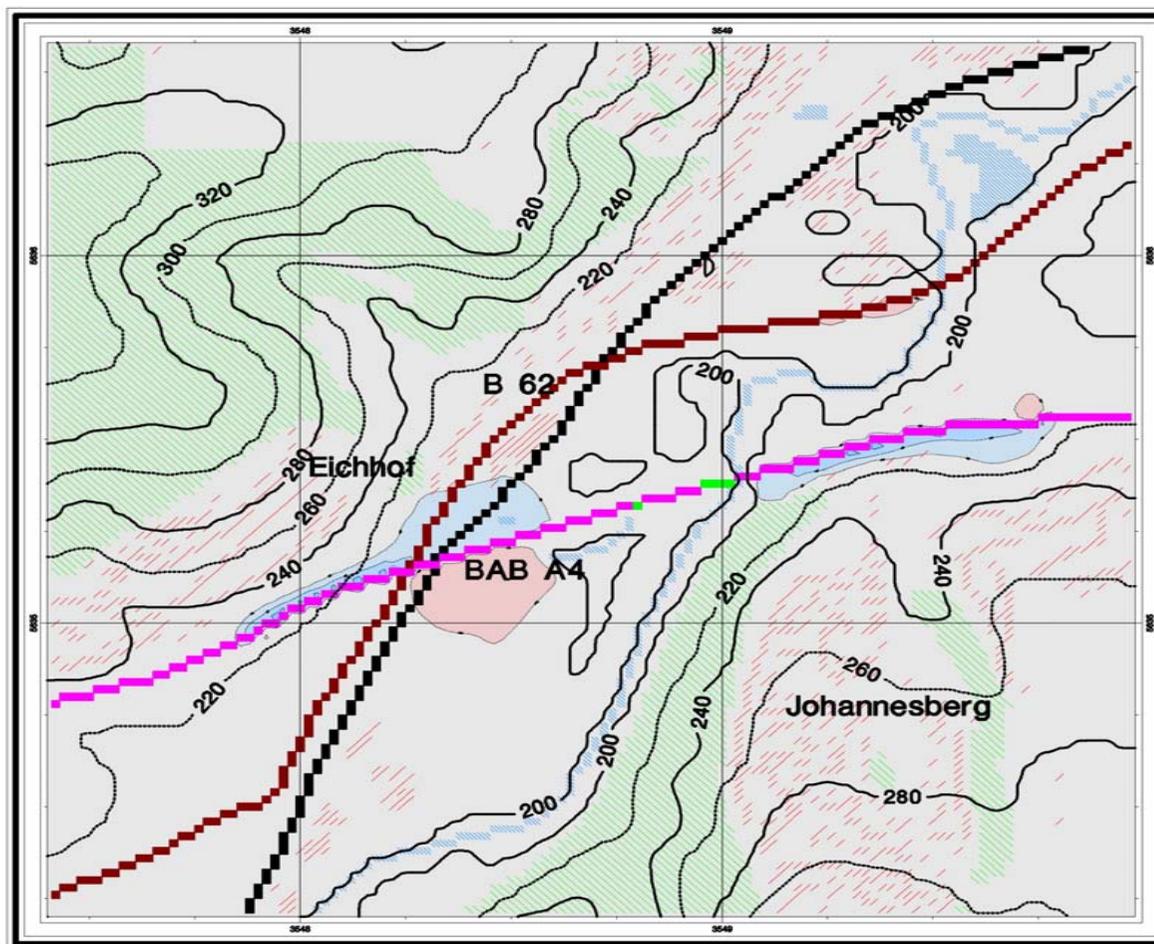
-  Bebauung
-  Wald
-  Wasser
-  Bundesstraße
-  Bahn
-  Autobahn
-  Brücke Br3

**Änderung der
Kaltlufthöhe
in Metern**

-  über 2.5
-  1.5 - 2.5
-  0.5 - 1.5
-  -0.5 - 0.5
-  -1.5 - -0.5
-  -2.5 - -1.5
-  unter -2.5



Abbildung 20: Änderung der Kaltlufthöhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 10 Minuten



BAD HERSFELD

**Ls1aBr3 minus Ist
nach 20 Minuten**

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

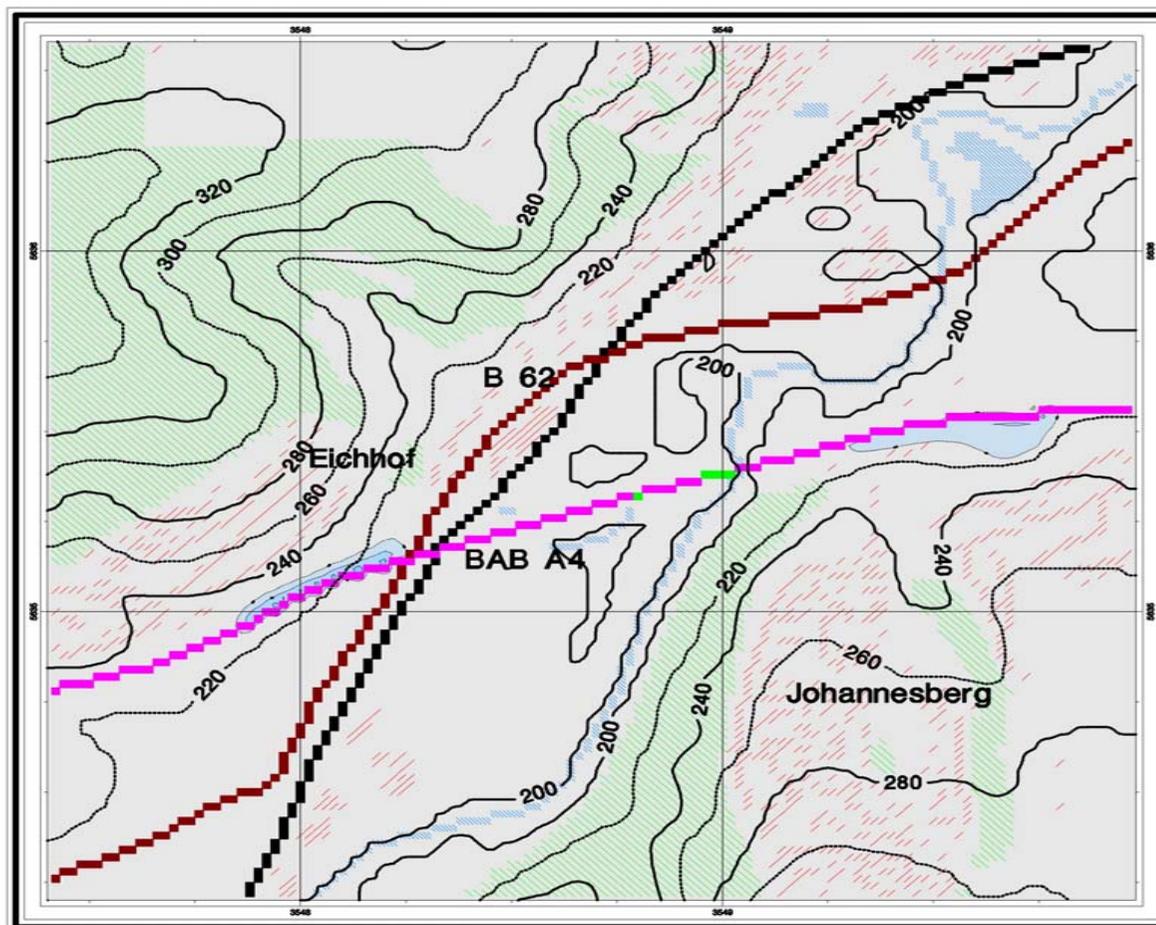
-  **Bebauung**
-  **Wald**
-  **Wasser**
-  **Bundesstraße**
-  **Bahn**
-  **Autobahn**
-  **Brücke Br3**

**Änderung der
Kaltlufthöhe
in Metern**

-  **Über 2,5**
-  **1,5 - 2,5**
-  **0,5 - 1,5**
-  **-0,5 - 0,5**
-  **-1,5 - -0,5**
-  **-2,5 - -1,5**
-  **unter -2,5**



Abbildung 21: Änderung der Kaltlufthöhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 20 Minuten



BAD HERSFELD

**Ls1aBr3 minus Ist
nach 45 Minuten**

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

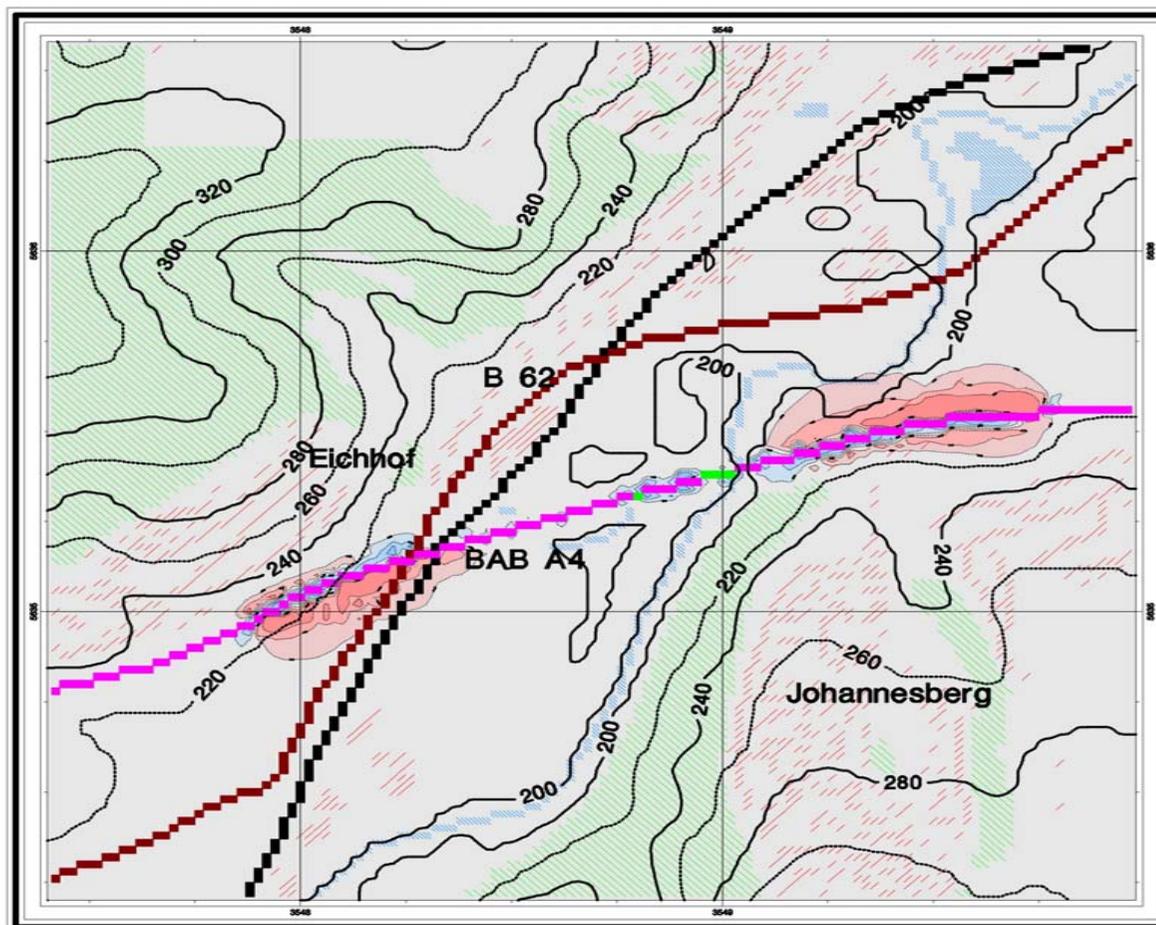
-  **Bebauung**
-  **Wald**
-  **Wasser**
-  **Bundesstraße**
-  **Bahn**
-  **Autobahn**
-  **Brücke Br3**

**Änderung der
Kaltlufthöhe
in Metern**

-  **Über 2.5**
-  **1.5 - 2.5**
-  **0.5 - 1.5**
-  **-0.5 - 0.5**
-  **-1.5 - -0.5**
-  **-2.5 - -1.5**
-  **unter -2.5**



Abbildung 22: Änderung der Kaltlufthöhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 45 Minuten



BAD HERSFELD

**Ls1aBr3 minus Ist
nach 10 Minuten**

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

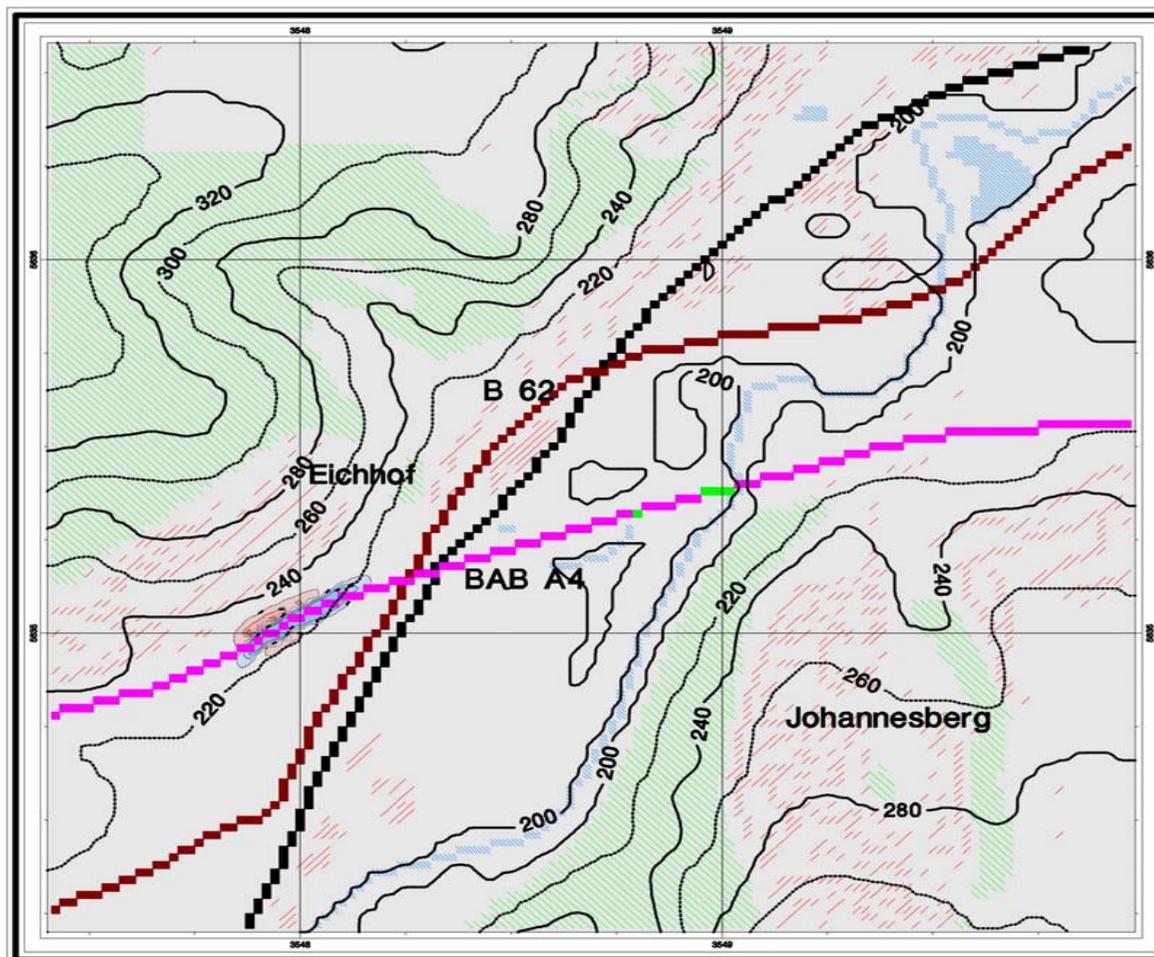
-  **Bebauung**
-  **Wald**
-  **Wasser**
-  **Bundesstraße**
-  **Bahn**
-  **Autobahn**
-  **Brücke Br3**

**Änderung der
Windgeschwindigkeit
in m/s
in 2 Meter Höhe**

-  **Über 0,25**
-  **0,15 - 0,25**
-  **0,05 - 0,15**
-  **-0,05 - 0,05**
-  **-0,15 - -0,05**
-  **-0,25 - -0,15**
-  **unter -0,25**



Abbildung 23: Änderung der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 10 Minuten



BAD HERSFELD

Ls1aBr3 minus Ist

nach 90 Minuten

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

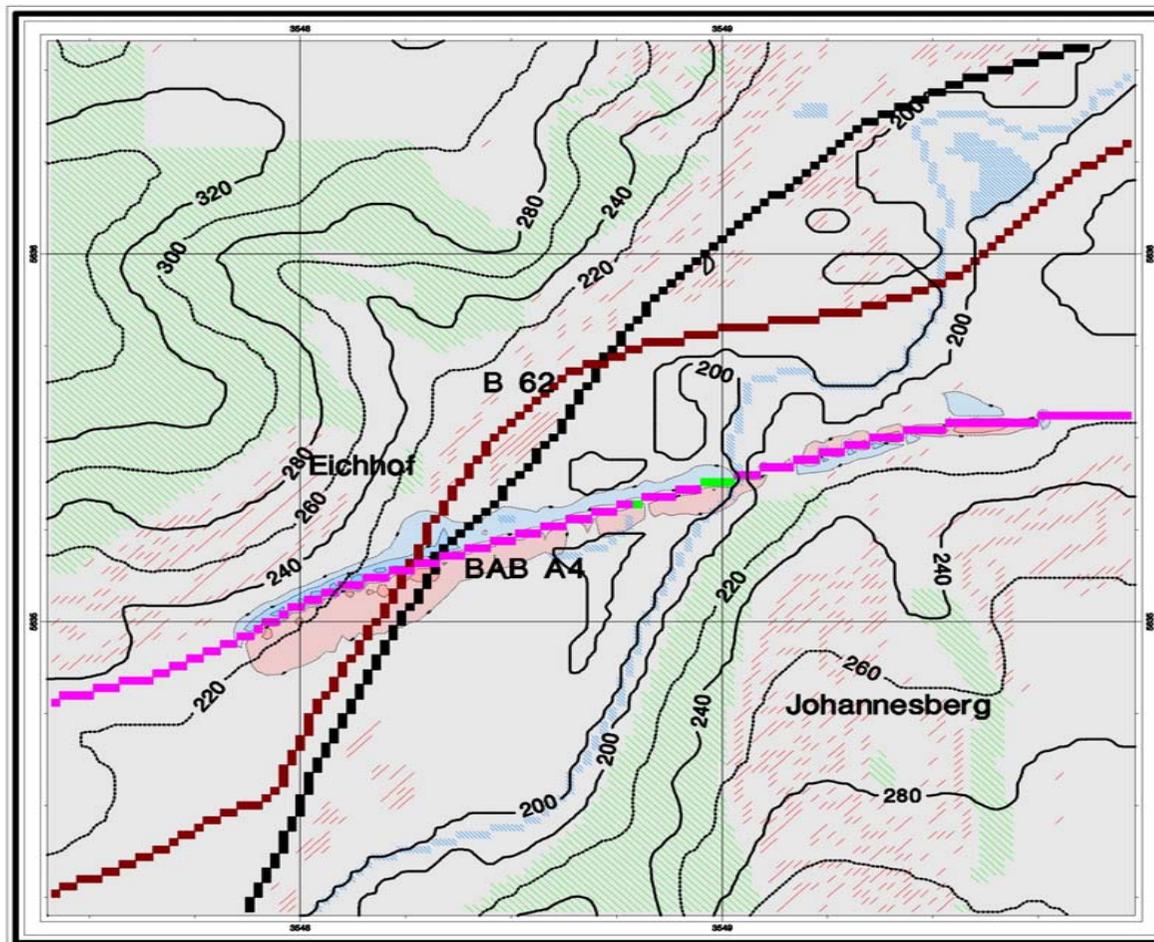
-  **Bebauung**
-  **Wald**
-  **Wasser**
-  **Bundesstraße**
-  **Bahn**
-  **Autobahn**
-  **Brücke Br3**

**Änderung der
Windgeschwindigkeit
in m/s
in 2 Meter Höhe**

-  **Über 0.25**
-  **0.15 - 0.25**
-  **0.05 - 0.15**
-  **-0.05 - 0.05**
-  **-0.15 - -0.05**
-  **-0.25 - -0.15**
-  **unter -0.25**



Abbildung 25: Änderung der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 90 Minuten



BAD HERSFELD
Ls1aBr3 minus Ist
nach 10 Minuten

Regionalwind aus
 Nordost mit 3.0 m/s
 in 700 m ü. NN

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

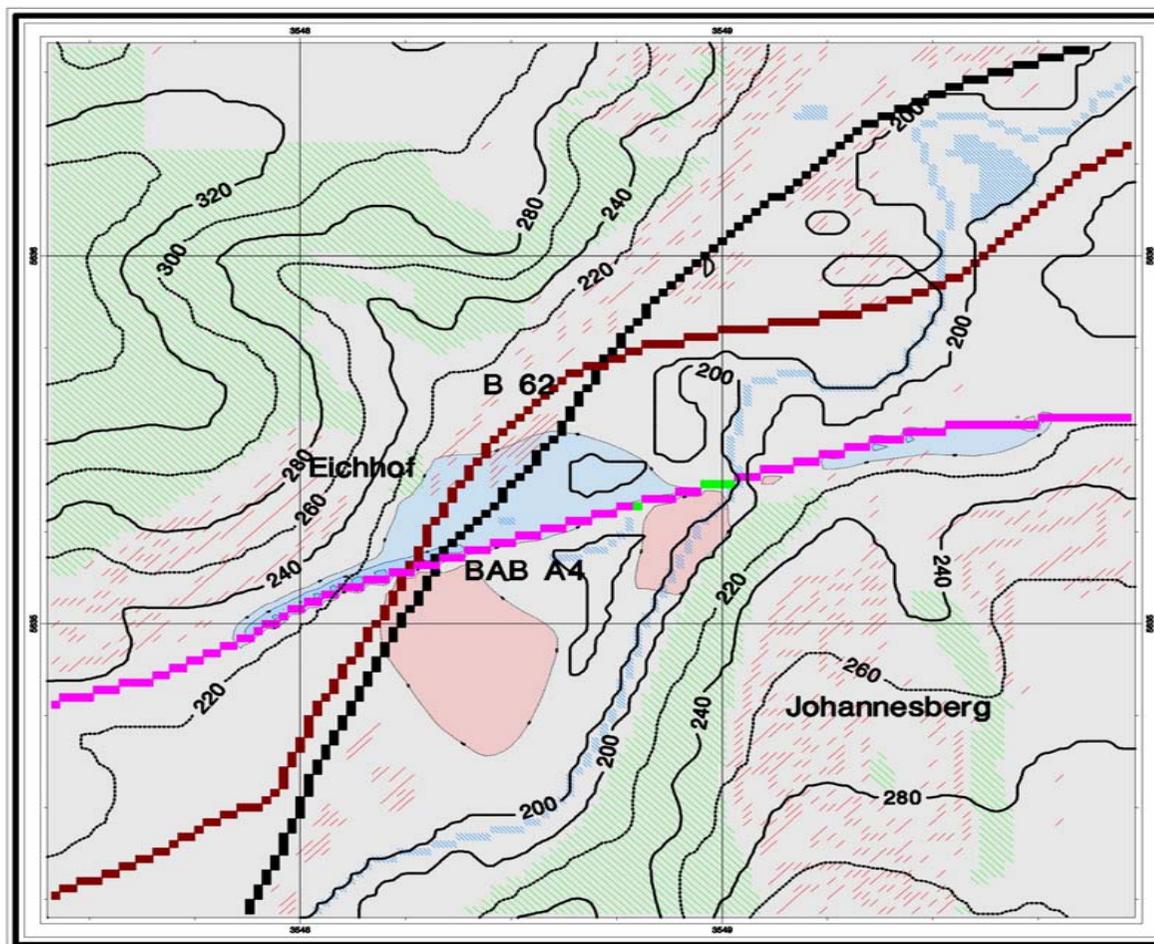
-  Bebauung
-  Wald
-  Wasser
-  Bundesstraße
-  Bahn
-  Autobahn
-  Brücke Br3

Änderung der
 Kaltflughöhe
 in Metern

-  über 2.5
-  1.5 - 2.5
-  0.5 - 1.5
-  -0.5 - 0.5
-  -1.5 - -0.5
-  -2.5 - -1.5
-  unter -2.5



Abbildung 26: Änderung der Kaltflughöhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 10 Minuten mit überlagerter Grundströmung



BAD HERSFELD
Ls1aBr3 minus Ist
nach 25 Minuten

Regionalwind aus
 Nordost mit 3.0 m/s
 in 700 m ü. NN

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

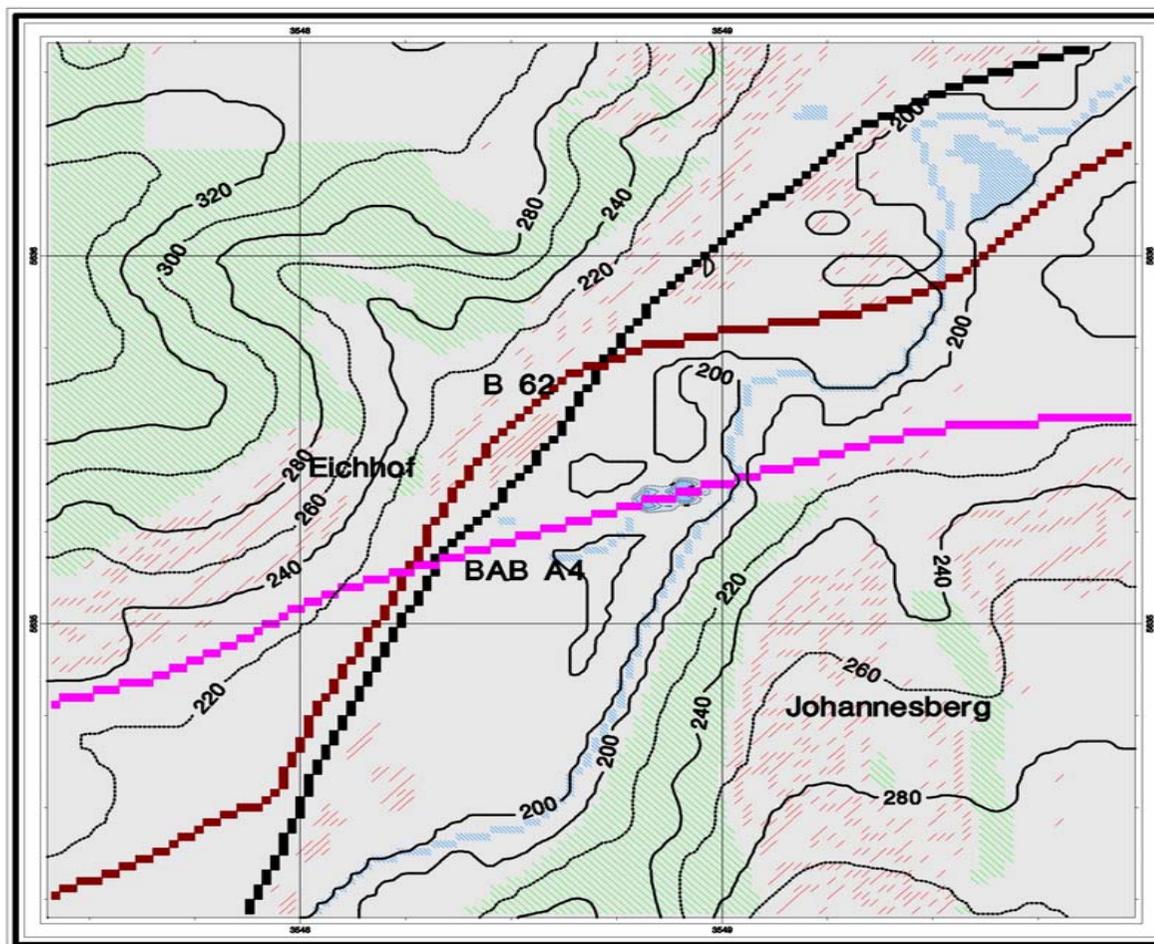
-  Bebauung
-  Wald
-  Wasser
-  Bundesstraße
-  Bahn
-  Autobahn
-  Brücke Br3

**Änderung der Kaltflughöhe
 in Metern**

-  über 2.5
-  1.5 - 2.5
-  0.5 - 1.5
-  -0.5 - 0.5
-  -1.5 - -0.5
-  -2.5 - -1.5
-  unter -2.5



Abbildung 27: Änderung der Kaltflughöhe im Vergleich des Ist-Zustandes mit der Planungsvariante Ls1aBr3 nach 25 Minuten mit überlagerter Grundströmung



BAD HERSFELD
Ls1aBr3 minus Ls1aBr4
nach 10 Minuten
Windgeschwindigkeitsänderung
zwischen geteilter und
durchgehender Brücke

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

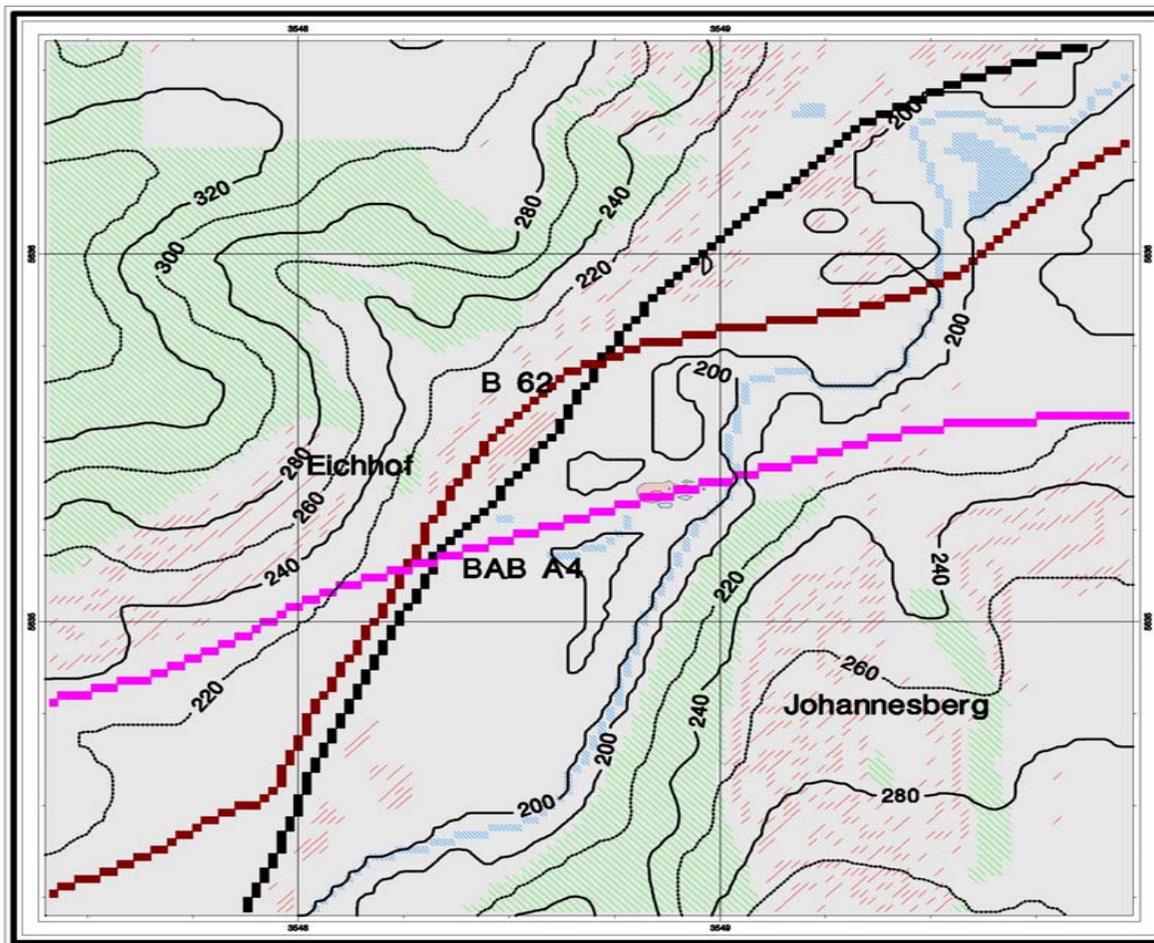
-  Bebauung
-  Wald
-  Wasser
-  Bundesstraße
-  Bahn
-  Autobahn

Änderung der
 Windgeschwindigkeit
 in m/s
 in 2 Meter Höhe

-  über 0.25
-  0.15 - 0.25
-  0.05 - 0.15
-  -0.05 - 0.05
-  -0.15 - -0.05
-  -0.25 - -0.15
-  unter -0.25



Abbildung 28: Änderung der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls1aBr4 nach 10 Minuten



BAD HERSFELD
Ls1aBr3 minus Ls1aBr4
nach 20 Minuten
Windgeschwindigkeitsänderung
zwischen geteilter und
durchgehender Brücke

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

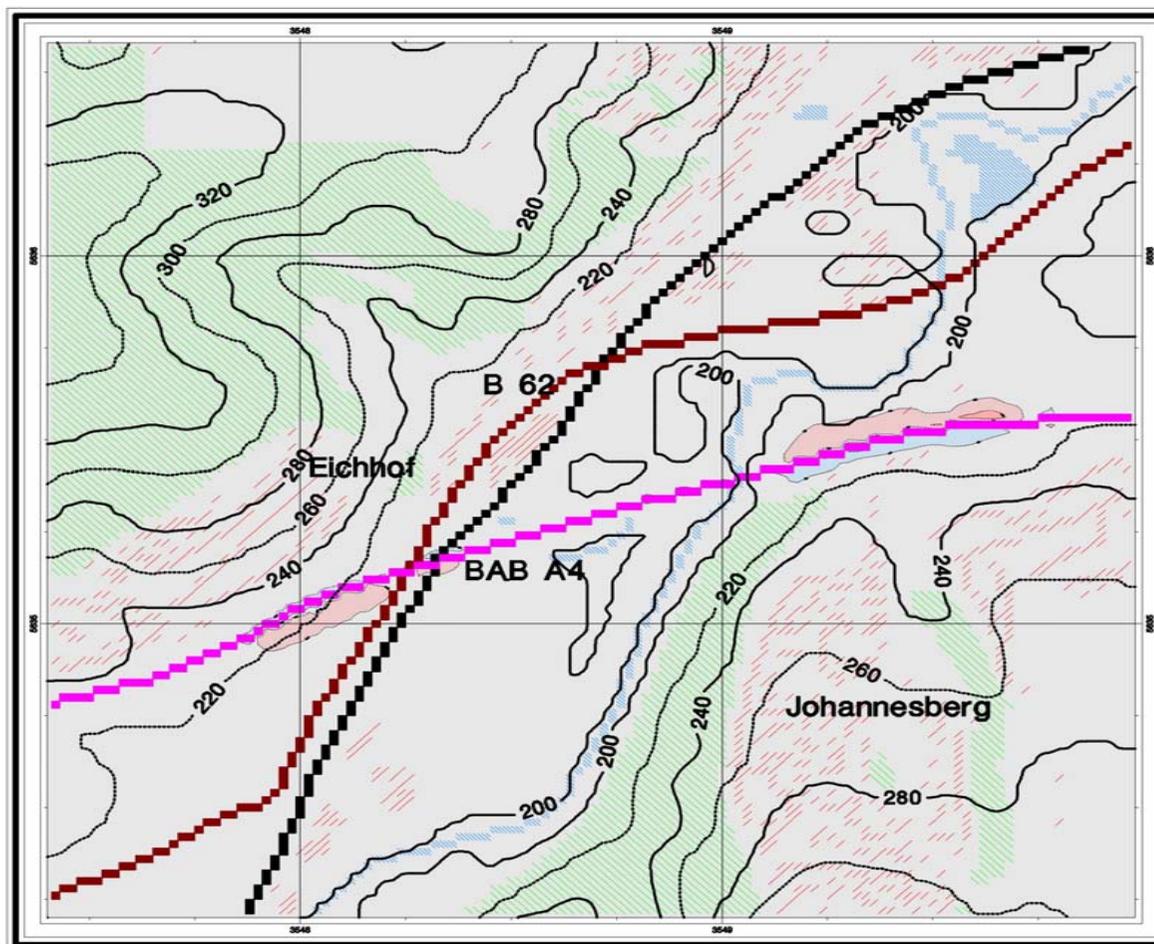
-  Bebauung
-  Wald
-  Wasser
-  Bundesstraße
-  Bahn
-  Autobahn

Änderung der
 Windgeschwindigkeit
 in m/s
 in 2 Meter Höhe

-  über 0.25
-  0.15 - 0.25
-  0.05 - 0.15
-  -0.05 - 0.05
-  -0.15 - -0.05
-  -0.25 - -0.15
-  unter -0.25



Abbildung 29: Änderung der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls1aBr4 nach 20 Minuten



BAD HERSFELD
Ls1aBr3 minus Ls2bBr3
nach 10 Minuten

Kaltluftthöhenänderung
 zwischen hohem und
 niedrigem Lärmschutz

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

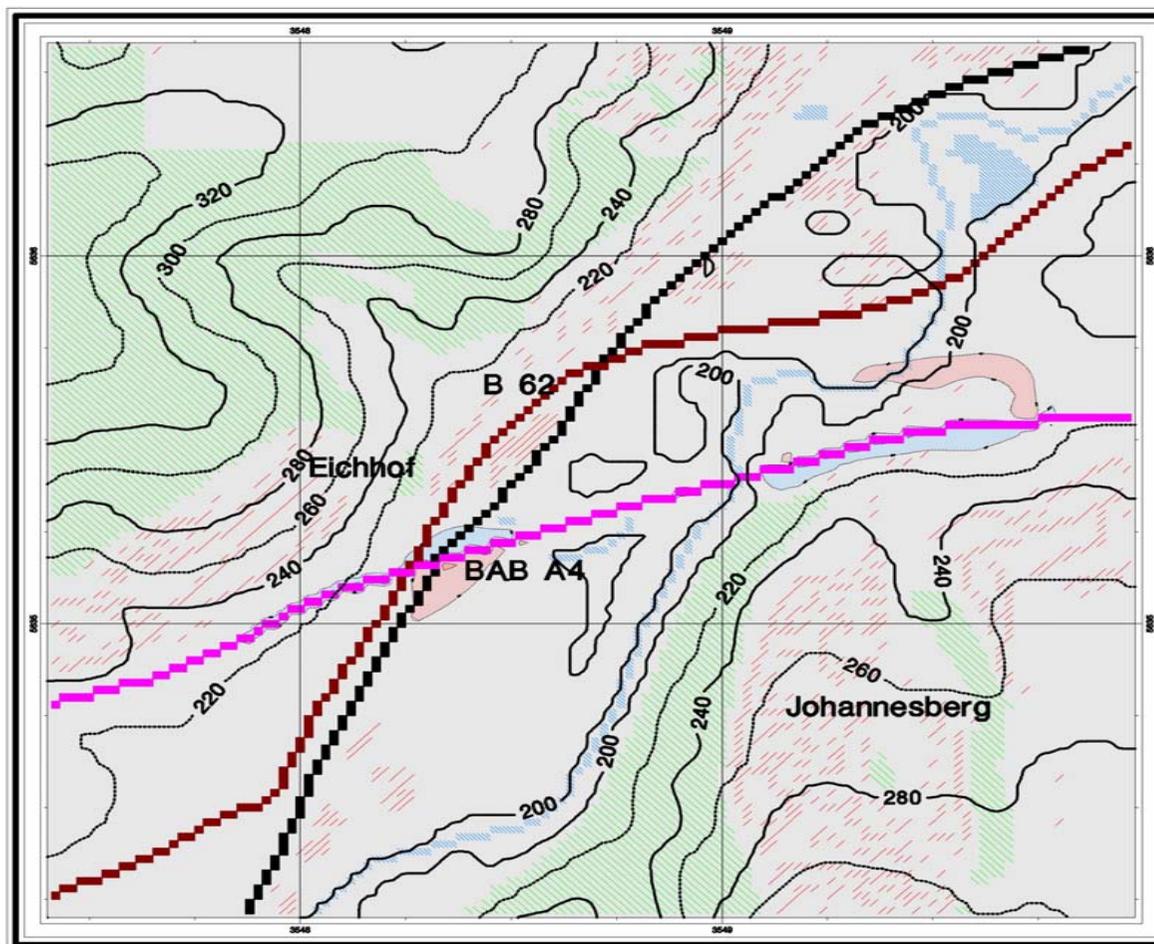
-  Bebauung
-  Wald
-  Wasser
-  Bundesstraße
-  Bahn
-  Autobahn

**Änderung der Kaltlufthöhe
 in Metern**

-  über 2.5
-  1.5 - 2.5
-  0.5 - 1.5
-  -0.5 - 0.5
-  -1.5 - -0.5
-  -2.5 - -1.5
-  unter -2.5



Abbildung 30: Änderung der Kaltlufthöhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls2bBr3 nach 10 Minuten



BAD HERSFELD
Ls1aBr3 minus Ls2bBr3
nach 15 Minuten

Kaltlufthöhenänderung
 zwischen hohem und
 niedrigem Lärmschutz

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

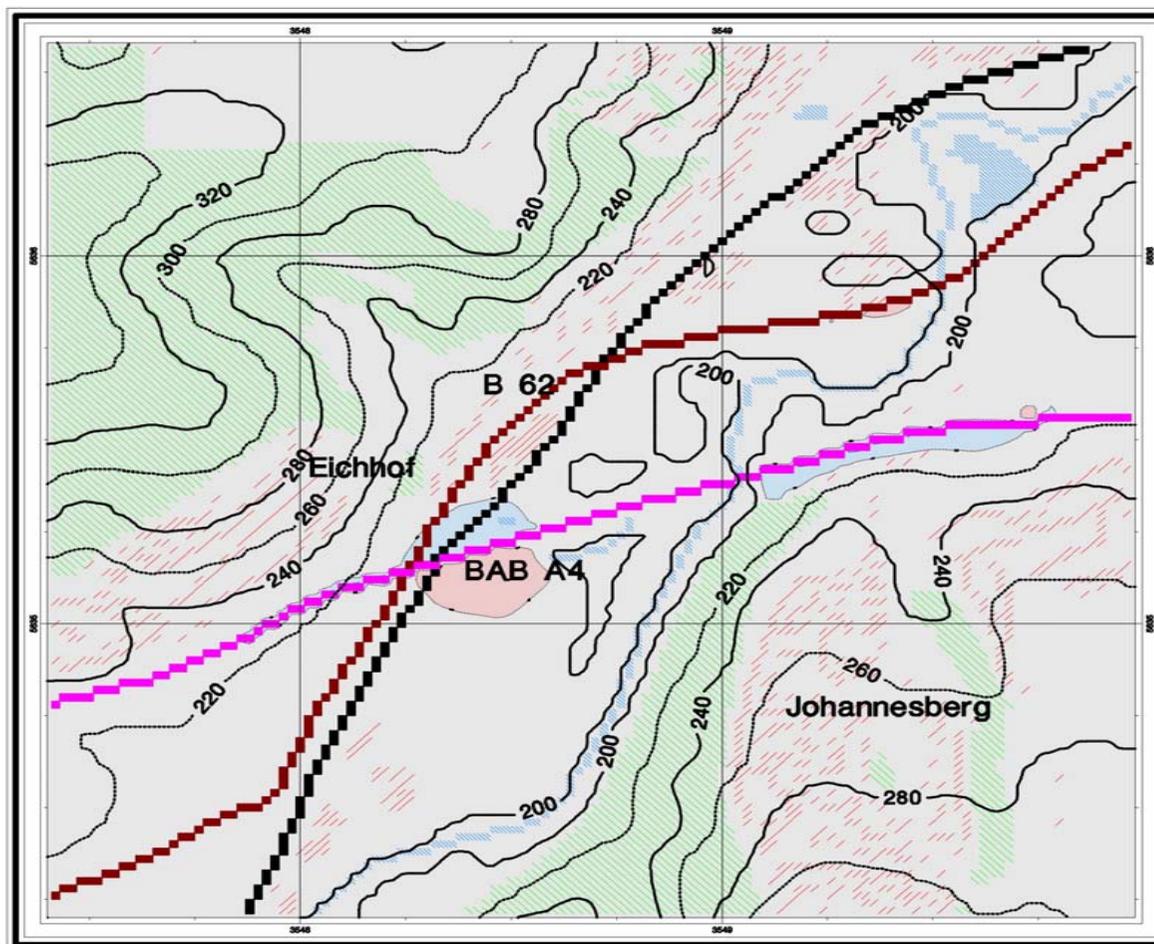
-  Bebauung
-  Wald
-  Wasser
-  Bundesstraße
-  Bahn
-  Autobahn

Änderung der Kaltlufthöhe in Metern

-  über 2.5
-  1.5 - 2.5
-  0.5 - 1.5
-  -0.5 - 0.5
-  -1.5 - -0.5
-  -2.5 - -1.5
-  unter -2.5



Abbildung 31: Änderung der Kaltlufthöhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls2bBr3 nach 15 Minuten



BAD HERSFELD
Ls1aBr3 minus Ls2bBr3
nach 20 Minuten

Kaltluft Höhenänderung
 zwischen hohem und
 niedrigem Lärmschutz

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

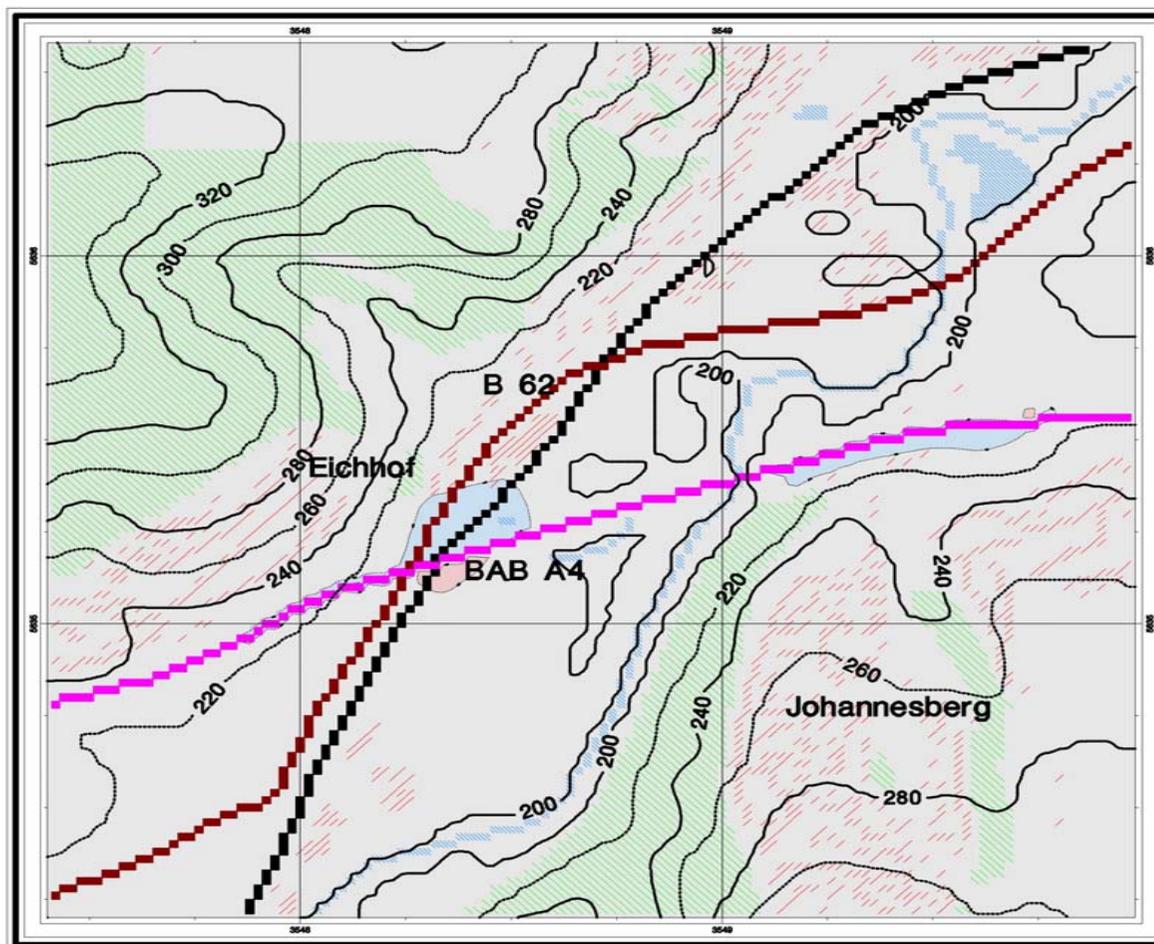
-  Bebauung
-  Wald
-  Wasser
-  Bundesstraße
-  Bahn
-  Autobahn

**Änderung der Kaltlufthöhe
 in Metern**

-  über 2.5
-  1.5 - 2.5
-  0.5 - 1.5
-  -0.5 - 0.5
-  -1.5 - -0.5
-  -2.5 - -1.5
-  unter -2.5



Abbildung 32: Änderung der Kaltlufthöhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls2bBr3 nach 20 Minuten



BAD HERSFELD
Ls1aBr3 minus Ls2bBr3
nach 25 Minuten

Kaltluft Höhenänderung
 zwischen hohem und
 niedrigem Lärmschutz

Maßstab 1 : 15000

DWD 04/2005

Landnutzung

-  Bebauung
-  Wald
-  Wasser
-  Bundesstraße
-  Bahn
-  Autobahn

**Änderung der Kaltlufthöhe
 in Metern**

-  über 2.5
-  1.5 - 2.5
-  0.5 - 1.5
-  -0.5 - 0.5
-  -1.5 - -0.5
-  -2.5 - -1.5
-  unter -2.5



Abbildung 33: Änderung der Kaltlufthöhe im Vergleich der Planungsvarianten Ls1aBr3 und Ls2bBr3 nach 25 Minuten