



# Kaltluftabflüsse bei Immissionsprognosen

Schriftenreihe, Heft 27/2012



# Verfahrensweise zur Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen bei Immissionsprognosen im Rahmen der TA Luft

Ralf Petrich

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>6</b>
1.1	Motivation .....	6
1.2	Anwendungsbereich .....	7
1.3	Begriffsbestimmungen .....	7
1.3.1	Ausbreitungsrechnung .....	7
1.3.2	Immissionsprognose nach TA Luft .....	7
1.3.3	Kaltluftmodell .....	7
1.3.4	Kaltluftwindfeldmodell .....	8
1.3.5	Kaltluftabfluss .....	8
1.3.6	Kaltluftepisode .....	8
1.3.7	Windfeldmodell .....	8
1.3.8	Windfeld .....	8
1.3.9	Windfeldbibliothek .....	9
1.3.10	Windfeldzeitreihe .....	9
1.3.11	Advektion .....	10
1.3.12	Katabatischer Wind .....	10
1.3.13	Relevanz von Kaltluftabflüssen .....	10
1.3.14	Wirkung von Kaltluftabflüssen .....	11
<b>2</b>	<b>Verfahrensweise zur Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen in Immissionsprognosen nach TA Luft .....</b>	<b>11</b>
2.1	Ausgangssituation .....	11
2.2	Mehrstufige Verfahrensweise je nach Relevanz und Wirkung der Kaltluftabflüsse .....	12
2.2.1	Feststellung der Relevanz von Kaltluftabflüssen .....	12
2.2.1.1	Betrachtung der Geländeunebenheiten .....	12
2.2.1.2	Prüfung auf Vorhandensein von Kaltluftabflüssen .....	12
2.2.1.3	Vergleich von Quellhöhe und Kaltluftschichtdicke .....	12
2.2.2	Feststellung der Wirkung von Kaltluftabflüssen auf Immissionsorte .....	13
2.2.2.1	Immissionssituation unter Berücksichtigung des katabatischen Windes .....	13
2.2.2.2	Immissionssituation ohne Berücksichtigung des katabatischen Windes .....	15
2.2.2.3	Vergleich der Immissionssituationen mit und ohne Berücksichtigung des katabatischen Windes .....	16
2.2.3	Rechnerische Einbeziehung der Kaltluftabflüsse in die Ausbreitungsrechnung .....	18
2.3	Schematischer Ablauf der Verfahrensweise .....	18
<b>3</b>	<b>Anforderungen an Kaltluftmodelle .....</b>	<b>18</b>
3.1	Anforderungen an Kaltluftmodelle zur Feststellung der Relevanz von Kaltluftabflüssen .....	18
3.2	Anforderungen an Kaltluftmodelle zur Feststellung der Wirkung von Kaltluftabflüssen auf Immissionsorte .....	19
3.3	Anforderungen an Kaltluftmodelle zur rechnerischen Einbeziehung der Kaltluftabflüsse in die Ausbreitungsrechnung .....	19
<b>4</b>	<b>Referenzalgorithmus zur Modellierung von Kaltluftabflüssen .....</b>	<b>20</b>
4.1	Überblick über die Einbindung des Kaltluftwindfeldmodells in das Softwarepaket LASAT .....	20
4.1.1	Funktionsweise .....	20
4.1.2	Anwendung der Kaltluftmodellierung für Ausbreitungsrechnungen .....	21
4.2	Physikalischer Hintergrund und Modellansätze .....	22
4.2.1	Überblick .....	22
4.2.2	Erhaltung von Energie und zeitliche Veränderung der Energieverteilung .....	22
4.2.3	Modellierung der Kaltluftproduktion .....	24
4.2.4	Modellierung der Kaltluftsenken .....	24
4.2.5	Erhaltung von Impuls und zeitliche Veränderung der Geschwindigkeitsverteilung .....	24
4.2.6	Modellierung der Ausgleichsströmung infolge von Druckunterschieden .....	25
4.2.7	Modellierung der Hangabtriebskraft .....	26
4.2.8	Temperaturverteilung und Windfeld im zeitlichen Verlauf .....	26

4.2.9	Weitere Besonderheiten .....	27
4.3	Modellgrenzen .....	27
4.4	Plausibilisierung .....	28
4.4.1	Glatter Hang .....	29
4.4.2	Rinne .....	30
4.4.3	Flacher Hügel .....	31
4.4.4	Hoher Hügel .....	32
4.4.5	Flache Mulde .....	33
4.4.6	Tiefe Mulde .....	34
4.4.7	Flache Rinne .....	35
4.4.8	Hohe Schanze .....	36
4.4.9	Loch in der Ebene .....	37
4.4.10	Talausgang .....	38
4.4.11	Slalom .....	39
4.4.12	Enger Slalom .....	40
4.4.13	Chaos .....	41
<b>5</b>	<b>Beispiele .....</b>	<b>42</b>
5.1	Beispiel 1 .....	42
5.2	Beispiel 2 .....	46
5.3	Beispiel 3 .....	51
5.4	Beispiel 4 .....	55
	<b>Literatur .....</b>	<b>59</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispiel für die Immissionssituation unter alleiniger Berücksichtigung des katabatischen Windes um eine fiktive Anlage südwestlich von Pirna.....	14
Abbildung 2:	Beispiel für ein Rechengebiet um eine fiktive Anlage südwestlich von Pirna, Blickrichtung aus Norden.....	15
Abbildung 3:	Beispiel für die Immissionssituation ohne Berücksichtigung des katabatischen Windes um eine fiktive Anlage südwestlich von Pirna.....	16
Abbildung 4:	Feststellung der belastenden (rot) und entlastenden Wirkung (grün) von Kaltluftabflüssen um eine fiktive Anlage südwestlich von Pirna.....	17
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Verfahrensweise zur Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen in Immissionsprognosen nach TA Luft.....	18
Abbildung 6:	Schema des Ablaufs zur Kaltluftmodellierung für eine Ausbreitungsrechnung.....	21
Abbildung 7:	Orographie für Beispiel 1.....	42
Abbildung 8:	Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung nach einer Kaltluftepisode von sechs Stunden ohne Advektion (Beispiel 1).....	43
Abbildung 9:	Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung für windschwache Nächte nach sechs Stunden als Mittelung über eine repräsentative Richtungsverteilung der Advektion (Beispiel 1).....	44
Abbildung 10:	Prognostizierte Wirkung von Kaltluftabflüssen für Beispiel 1.....	45
Abbildung 11:	Orographie für Beispiel 2.....	46
Abbildung 12:	Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung nach einer Kaltluftepisode von sechs Stunden ohne Advektion (Beispiel 2).....	47
Abbildung 13:	Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung für windschwache Nächte nach sechs Stunden als Mittelung über eine repräsentative Richtungsverteilung der Advektion (Beispiel 2).....	48
Abbildung 14:	Prognostizierte Wirkung von Kaltluftabflüssen für Beispiel 2.....	49
Abbildung 15:	Prognostizierte Kaltluflhöhe für Beispiel 2.....	50
Abbildung 16:	Orographie für Beispiel 3.....	51
Abbildung 17:	Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung nach einer Kaltluftepisode von sechs Stunden ohne Advektion (Beispiel 3).....	52
Abbildung 18:	Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung für windschwache Nächte nach sechs Stunden als Mittelung über eine repräsentative Richtungsverteilung der Advektion (Beispiel 3).....	53
Abbildung 19:	Prognostizierte Wirkung von Kaltluftabflüssen für Beispiel 3.....	54
Abbildung 20:	Orographie für Beispiel 4.....	55
Abbildung 21:	Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung nach einer Kaltluftepisode von sechs Stunden ohne Advektion (Beispiel 4).....	56
Abbildung 22:	Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung für windschwache Nächte nach sechs Stunden als Mittelung über eine repräsentative Richtungsverteilung der Advektion (Beispiel 4).....	57
Abbildung 23:	Prognostizierte Wirkung von Kaltluftabflüssen für Beispiel 4.....	58

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Im anlagenbezogenen Immissionsschutz wird zur Beurteilung der Genehmigungsfähigkeit von Vorhaben regelmäßig die Ausbreitung bodennah freigesetzter Stoffe modelliert, um Immissionskenngrößen für diese Luftbeimengungen zu ermitteln. Die TA Luft [1] regelt in ihrem Anhang 3 die grundlegende Vorgehensweise bei solchen Ausbreitungsrechnungen. In verschiedenen Leitfäden und Merkblättern einzelner Bundesländer [2], [3], [4] und der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 13 [5] werden dabei konkretisierende Regelungen und Vorgehensweisen beschrieben und Hinweise für Fälle gegeben, die in Anhang 3 der TA Luft nicht abschließend geregelt sind.

Im Hinblick auf die Modellierung des für die Ausbreitungsrechnung verwendeten Windfeldes bestätigt die TA Luft in Ziffer 11 des Anhangs 3 die Eignung eines diagnostischen mesoskaligen Windfeldmodells zur Berücksichtigung von Geländeunebenheiten, sofern unter anderem wesentliche Einflüsse von lokalen Windsystemen oder anderen meteorologischen Besonderheiten ausgeschlossen werden können. Für den Fall, dass wesentliche Einflüsse von lokalen Windsystemen oder anderen meteorologischen Besonderheiten nicht ausgeschlossen werden können, werden von der TA Luft keine Regelungen getroffen.

Zu lokalen Windsystemen oder meteorologischen Besonderheiten können Kaltluftabflüsse oder (allgemeiner) thermische Ausgleichsströmungen gezählt werden. Kann für einen Standort also nicht ausgeschlossen werden, dass Kaltluftabflüsse oder thermische Ausgleichsströmungen einen wesentlichen Einfluss haben, so kann ein diagnostisches mesoskaliges Windfeldmodell nicht ohne weiteres zur Berücksichtigung von Geländeunebenheiten eingesetzt werden. Vielmehr ist dann entweder auf den Einzelfall bezogen zu begründen, warum ein diagnostisches mesoskaliges Windfeldmodell dennoch geeignet ist oder es ist eine alternative Berücksichtigung von Geländeunebenheiten vorzunehmen, die Kaltluftabflüsse oder thermische Ausgleichsströmungen einbeziehen kann.

Die VDI-Richtlinie 3783 Blatt 13 [5] zur Qualitätssicherung in der Immissionsprognose benennt prognostische mesoskalige Windfeldmodelle als Ansatz zur Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen. VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5 [6] (Lokale Kaltluft) beschreibt Prozesse und Ansätze zur Beschreibung der Kaltluftproduktion und zur Ausbreitung. Außerdem werden Mindestanforderungen für Kaltluftmodelle formuliert. Eine konkrete Handlungsempfehlung zur Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen bei Ausbreitungsrechnungen, insbesondere für immissionsschutzrechtliche Belange, wird jedoch nicht gegeben.

Der Leitfaden zur Beurteilung von TA Luft Ausbreitungsrechnungen in Baden-Württemberg [2] empfiehlt die Durchführung von Messungen in der Nähe des Anlagenstandortes. Der Leitfaden für die Erstellung und Bewertung von Immissionsprognosegutachten des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie [3] empfiehlt die Korrektur der verwendeten Windfelder mit einem geeigneten Modell oder fordert eine Begründung, weshalb bei Nichtberücksichtigung von Kaltluftabflüssen die Prognoseergebnisse nicht unterschätzend sind. Der Leitfaden zur Erstellung von Immissionsprognosen mit AUSTAL 2000 in Genehmigungsverfahren nach TA Luft und der Geruchsmissions-Richtlinie des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen [4] macht keine allgemeinen Vorgaben zur Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen, sondern gibt nur vor, dass derartige Besonderheiten Berücksichtigung finden müssen.

Im Hinblick auf die Qualitätssicherung bei Immissionsprognosen besteht also Regelungsbedarf. Insbesondere bei Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung wird von Einwendern häufig die mangelhafte Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen vorgetragen. Bei berechtigten Einwendungen ergeben sich daraus unsichere Situationen bei der Entscheidungsfindung über die Genehmigung. Dies ist zeitaufwändig und führt mitunter zu nachträglichen Gutachten und den damit verbundenen Kosten. Sowohl für die Genehmigungsbehörden als auch für die Antragsteller stellt dies eine unbefriedigende Situation dar.

Ziel der im hier dokumentierten Projekt durchgeführten Arbeiten sollte es deshalb sein, eine Verfahrensweise zu entwickeln, mit deren Hilfe bei Ausbreitungsrechnungen eine einheitliche und sachgerechte Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen erfolgen kann.

## 1.2 Anwendungsbereich

Das vorliegende Dokument soll eine Verfahrensweise für Verfasser und Prüfer von Immissionsprognosen vorschlagen. Darüber hinaus werden Mindestanforderungen für Kaltluftmodelle formuliert, um diese Modelle auch sachgerecht für Immissionsprognosen anwenden zu können.

Schließlich wird ein Referenzalgorithmus vorgestellt, der nach gegenwärtigem Erkenntnisstand die Mindestanforderungen an ein Kaltluftmodell erfüllt und geeignet scheint, Windfelder zur Weiterverwendung in Ausbreitungsrechnungen zu erzeugen. Dieser Algorithmus ist für die Verwendung in der Umgebung des Softwarepaketes LASAT<sup>1</sup> vorgesehen und kommt mit einem Minimum an Eingangsdaten und Bedienungsaufwand aus. Mit der Dokumentation dieses Referenzalgorithmus sollen vor allem Ingenieurbüros oder andere Institutionen mit Kompetenz zur Softwareentwicklung in die Lage versetzt werden, eigene Programme zur Modellierung von Kaltluftabflüssen zu erstellen. Während die VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5 [6] (Lokale Kaltluft) auch Aspekte zur Klimaplanung behandelt, wird darauf hier nicht eingegangen.

## 1.3 Begriffsbestimmungen

### 1.3.1 Ausbreitungsrechnung

Unter Ausbreitungsrechnung ist hier die Ermittlung von Immissionskenngrößen von Luftbeimengungen (Schadstoffe, Gerüche) unter Anwendung des in TA Luft Anhang 3 vorgegebenen Formalismus zu verstehen. Gegenwärtig stehen dazu die Softwarepakete AUSTAL 2000 [7] und LASAT<sup>1</sup> [8] zur Verfügung.

### 1.3.2 Immissionsprognose nach TA Luft

Unter Immissionsprognose nach TA Luft ist hier die Durchführung einer Ausbreitungsrechnung im Kontext einer immissionsschutzrechtlichen Fragestellung zu verstehen. Während das Ziel der Ausbreitungsrechnung eine möglichst genaue Ermittlung der Immissionskenngrößen ist, können im Rahmen einer Immissionsprognose auch Abschätzungen in Kauf genommen werden, die zu einer Überschätzung der Immissionskenngrößen führen.

Die Immissionsprognose soll zur Entscheidungsfindung in immissionsschutzrechtlichen Fragestellungen dienen und geht damit über die mathematisch formale Durchführung einer Ausbreitungsrechnung hinaus. Die Immissionsprognose kann beispielsweise eine Bewertung der ermittelten Immissionskenngrößen enthalten, zusätzliche Prozeduren zur Ermittlung von Vorbelastung oder Gesamtbelastung oder, wie oben erwähnt, fallbezogene Abschätzungen oder Vereinfachungen.

### 1.3.3 Kaltluftmodell

Unter Kaltluftmodell ist hier ein Algorithmus zu verstehen, der bei Bereitstellung verschiedener Eingangsdaten (beispielsweise Geländemodell, Kataster der Landnutzung) verschiedene Parameter von Kaltluftabflüssen liefert. Solche Parameter können die Fließgeschwindigkeit, die Mächtigkeit oder die Temperaturverteilung des Kaltluftabflusses sein. Weil es verschiedene Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad gibt, unterscheiden sich

- benötigte Eingangsdaten,
- Bedienungsaufwand und Rechenzeit und
- berechnete Ergebnisse

ihrer Art nach zum Teil wesentlich voneinander.

In Deutschland hat der Deutsche Wetterdienst (DWD) das Modell KLAM [9] im Einsatz. Daneben gibt es mehrere Modelle von Ingenieurbüros (KALM [10], METKAT [11], GAK [12], Meteokart GIS [13], KALAS [14]). Darüber hinaus ist es auch möglich, Kaltluftabflüsse mit Hilfe von prognostischen Windfeldmodellen zu modellieren, beispielsweise mit METRAS [15].

<sup>1</sup> LASAT ist eine eingetragene Marke von Dr. Lutz Janicke.

#### 1.3.4 Kaltluftwindfeldmodell

Unter Kaltluftwindfeldmodell ist hier eine Untergruppe von Kaltluftmodellen (siehe Abschnitt 1.3.3) zu verstehen, mit denen ein Windfeld zur weiteren Verwendung in Ausbreitungsrechnungen erzeugt werden kann. Diese Windfelder können neben dem katabatischen Wind (siehe Abschnitt 1.3.12) auch die Advektion (siehe Abschnitt 1.3.9) beschreiben.

#### 1.3.5 Kaltluftabfluss

Unter Kaltluftabfluss ist hier eine resultierende Strömung zu verstehen, die infolge von katabatischem Wind (siehe Abschnitt 1.3.12) und Advektion (siehe Abschnitt 1.3.9) entsteht. Dabei ist hier von besonderem Interesse, dass diese Strömung die Ausbreitung von Luftbeimengungen beeinflusst.

#### 1.3.6 Kaltluftepisode

Unter Kaltluftepisode ist hier ein zusammenhängender Zeitabschnitt zu verstehen, in dem Kaltluftabflüsse auftreten. Im Allgemeinen ist dies eine bedeckungsarme Nacht. Die Kaltluftepisode beginnt, wenn sich aufgrund der Strahlungsbilanz bodennahe Luftschichten abkühlen (Inversion) und sich dadurch Kaltluftabflüsse beginnen auszubilden. Sie endet, wenn die Inversion durch Sonneneinstrahlung oder andere meteorologische Phänomene (wie beispielsweise auffrischer Wind) aufgehoben wird.

Während einer Kaltluftepisode sind die Strömungsverhältnisse (resultierende Strömung aus katabatischem Wind und Advektion) zu einem konkreten Zeitpunkt im Regelfall von der Vorgeschichte, also von allen vorhergehenden Zeitpunkten innerhalb der Kaltluftepisode abhängig. Beispielsweise kann ein Kaltluftsee aufgefüllt werden und schließlich überlaufen. Der Zeitpunkt des Überlaufens hängt verständlicherweise davon ab, mit welcher Geschwindigkeit der Kaltluftsee im Vorfeld aufgefüllt wurde. Die Strömungsverhältnisse innerhalb einer Kaltluftepisode sind also als nicht stationär anzusehen.

Der zeitliche Verlauf der Strömungsverhältnisse von aufeinanderfolgenden Kaltluftepisoden kann als unabhängig voneinander angesehen werden. Bei Beginn einer neuen Kaltluftepisode muss also nicht berücksichtigt werden, was in vorangegangenen Kaltluftepisoden geschehen ist. Das „Gedächtnis“ der Kaltluftabflüsse reicht nur über jeweils eine Kaltluftepisode.

#### 1.3.7 Windfeldmodell

Unter Windfeldmodell ist hier ein Algorithmus zu verstehen, der bei Bereitstellung verschiedener Eingangsdaten (beispielsweise Geländemodell, Bodenrauigkeit) Windfelder (siehe Abschnitt 1.3.8) liefert, die zur Durchführung einer Ausbreitungsrechnung (siehe Abschnitt 1.3.1) verwendet werden können.

Für immissionsschutzrechtliche Fragestellungen spielen gegenwärtig hauptsächlich diagnostische und prognostische Windfeldmodelle eine Rolle. Beide unterscheiden sich hinsichtlich des Umfangs und des Detaillierungsgrads, mit dem die meteorologischen und physikalischen Prozesse in der Atmosphäre modelliert werden. Diagnostische Windfeldmodelle gehen von Schätzungen (Initialisierungswindfelder) aus, für die dann unter Einfluss von Geländeunebenheiten und gegebenenfalls umströmten Hindernissen Divergenzfreiheit hergestellt wird. Prognostische Windfeldmodelle können darüber hinaus über Modellansätze die Erhaltung von Impuls und Energie berücksichtigen, wobei je nach Detaillierungsgrad bestimmte meteorologische Phänomene besser modelliert werden können als mit diagnostischen Windfeldmodellen. Zu diesen meteorologischen Phänomenen zählen beispielsweise Verwirbelungen in steilem Gelände oder im Lee-Bereich von umströmten Hindernissen, aber auch lokale Besonderheiten wie Kaltluftabflüsse.

Die gegenwärtig hauptsächlich für Ausbreitungsrechnungen eingesetzten Softwarepakete AUSTAL 2000 und LASAT enthalten jeweils ein diagnostisches Windfeldmodell.

#### 1.3.8 Windfeld

Unter Windfeld ist hier ein Datensatz zu verstehen, der für jede Gitterzelle bei einer Ausbreitungsrechnung den dort anzutreffenden Wind beschreibt. Somit sind diese Datensätze dreidimensionale Felder, die das Rechengebiet abbilden. Für jede Gitterzelle sind drei Komponenten der vektoriellen Windgeschwindigkeit abgelegt.

Windfelder sind zumeist Dateien, die nach einem bestimmten Ordnungsprinzip in Windfeldbibliotheken oder Windfeldzeitreihen zusammengefasst sein können.

### 1.3.9 Windfeldbibliothek

Unter Windfeldbibliothek ist hier die Sammlung von Windfeldern zu verstehen, die zur Verwendung für eine Ausbreitungsrechnung meist nach Anströmrichtung und Ausbreitungsklasse vorsortiert sind.

Um die Ausbreitungsrechnung für eine konkrete meteorologische Situation (Anströmrichtung, Ausbreitungsklasse, Windgeschwindigkeit) durchzuführen, wird beispielsweise in der Windfeldbibliothek ein passendes Windfeld gesucht, das möglichst gut mit der konkreten Anströmrichtung und der konkreten Ausbreitungsklasse übereinstimmt. Dieses Windfeld wird dann auf die konkrete Windgeschwindigkeit skaliert und für die Ausbreitungsrechnung verwendet. Meist wird zur besseren Repräsentation der konkreten Anströmrichtung nicht nur das am besten passende Windfeld einer Windfeldbibliothek verwendet, sondern eine gewichtete Überlagerung von zwei Windfeldern gebildet, die die konkrete Anströmrichtung „einrahmen“.

Im Standardfall zur Berücksichtigung von Geländeunebenheiten und umströmten Hindernissen arbeiten die Softwarepakete AUSTAL 2000 und LASAT mit Windfeldbibliotheken, die Windfelder für sechs Ausbreitungsklassen und 36 Anströmrichtungen beinhalten, insgesamt also 36 Windfelder.

Windfeldbibliotheken haben den Vorteil, dass bei Ausbreitungsrechnungen, die für einen größeren Zeitraum und damit für viele einzelne konkrete meteorologische Situationen durchgeführt werden, nicht für jede konkrete Situation ein separates Windfeld vorhanden sein muss. Beispielsweise müssen für die Berechnung einer Jahreszeitreihe mit stündlicher Auflösung nicht 8.760 Windfelder berechnet und vorgehalten werden, sondern nur die (beispielweise) 216 Bibliothekswindfelder. Für jede der 8.760 konkreten meteorologischen Situationen (Stunden eines Jahres) werden dann je nach Anströmrichtung und Ausbreitungsklasse die passenden Vertreter aus der Windfeldbibliothek entnommen, mit der Windgeschwindigkeit skaliert und für die Ausbreitungsrechnung verwendet.

Modellrechnungen haben gezeigt, dass die dabei hinzunehmenden Genauigkeitseinbußen so gering sind, dass sich die Verwendung von Windfeldbibliotheken lohnt. Allerdings können Windfeldbibliotheken insbesondere bei der Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen nur unter Annahme von einschneidenden Kompromissen verwendet werden, die eine sachgerechte Modellierung nicht mehr ermöglichen.

### 1.3.10 Windfeldzeitreihe

Unter Windfeldzeitreihe ist hier die Sammlung von Windfeldern zu verstehen, die zur Verwendung für eine Ausbreitungsrechnung zeitlich sortiert sind, wobei für jede konkrete meteorologische Situation genau ein Windfeld vorgehalten wird.

Bei diesem Konzept müssen für die Berechnung einer Jahreszeitreihe mit stündlicher Auflösung 8.760 Windfelder berechnet und vorgehalten werden. Dadurch steigt der Aufwand für Berechnung und Speicherung der Windfelder gegenüber der Verwendung einer Windfeldbibliothek um ein Vielfaches an. Vorteilhaft dabei ist aber, dass für jede konkrete meteorologische Situation (Anströmrichtung, Ausbreitungsklasse, Windgeschwindigkeit) genau ein Windfeld modelliert wird, das (je nach Güte des Windfeldmodells) eine bestmögliche Beschreibung der tatsächlichen Situation widerspiegelt.

Die Verwendung von Windfeldzeitreihen ist dann unumgänglich, wenn zwischen meteorologischen Situationen unterschieden werden muss, die bei gleicher Anströmrichtung und gleicher Ausbreitungsklasse durch deutlich verschiedene Windfelder beschrieben werden. Dies ist bei der Modellierung von Kaltluftabflüssen der Regelfall. So können bei gleicher Anströmrichtung (bezogen auf die Advektion) und gleicher Ausbreitungsklasse die Windverhältnisse zu Beginn einer Kaltluftepisode und an deren Ende völlig verschieden sein, weil unterschiedliche Mengen an bereits produzierter Kaltluft die Strömung beeinflussen. Bei kleinen Windgeschwindigkeiten, also schwacher Advektion, kann der Einfluss des katabatischen Windes die resultierende Strömung dominieren. Haben Advektion und katabatischer Wind entgegengesetzte Richtung, so kann es für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten der Advektion zu einer Richtungsumkehr der resultierenden Strömung kommen. All diese Effekte lassen sich durch das Konzept der Windfeldbibliothek nicht mehr abbilden.

Das Softwarepaket AUSTAL 2000 kann nicht mit Windfeldzeitreihen arbeiten. Um eine Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen in der Ausbreitungsrechnung zu realisieren, die dem gegenwärtigen Stand der Technik entspricht, muss also auf das Softwarepaket LASAT oder ein vergleichbares Produkt zurückgegriffen werden.

### 1.3.11 Advektion

Unter Advektion ist hier die großräumige Anströmung des Windes auf ein Rechengebiet zu verstehen, die lokale Besonderheiten innerhalb des Rechengebietes noch nicht berücksichtigt. Lokale Besonderheiten können Kaltluftabflüsse sein, die an verschiedenen Stellen im Rechengebiet unterschiedlich stark ausgebildet sein werden.

Im Konzept der Softwarepakete AUSTAL 2000 und LASAT wird die Advektion im Regelfall durch eine Anströmrichtung und Windgeschwindigkeit an einer bestimmten (virtuellen) Anemometerposition (vorgegebener Standort und Höhe) beschrieben. Die Stabilität wird durch zusätzliche Angabe einer Ausbreitungsklasse oder der Monin-Obukhov-Länge beschrieben.

### 1.3.12 Katabatischer Wind

Unter katabatischem Wind (katabatikos = griechisch „herunterfließen“) ist hier der Anteil an einer resultierenden Strömung zu verstehen, der durch laterale Temperaturgradienten in Verbindung mit Geländeunebenheiten entsteht. Er kann auch als thermische Ausgleichsströmung bezeichnet werden. Das Zustandekommen des katabatischen Windes kann durch zwei Betrachtungsweisen erklärt werden.

Einerseits entsteht ein Antrieb, wenn sich auf ebenem Gelände Kaltluft verschieden stark ausbildet, wenn also lokale laterale Temperaturgradienten entstehen. Durch die dann lateral inhomogene Temperaturverteilung unmittelbar über der Erdoberfläche und auch in größeren Höhen, je nach Mächtigkeit der Kaltluftschicht, entstehen Dichteschwankungen und damit verbunden ein lateral inhomogen verteilter Schweredruck. Dieser gleicht sich aus, indem es zu Luftströmungen kommt, einer Form des katabatischen Windes. Anschaulich lässt sich dieser Effekt als „Breitfließen“ der Kaltluft beschreiben. Er findet auch im ebenen Gelände statt, wenn die Kaltluftproduktion und damit die Temperaturverteilung lateral inhomogen sind. Hier wird diese Art des Antriebs als Druckausgleich bezeichnet.

Andererseits entsteht ein Antrieb, wenn Kaltluft mit einer in sich homogenen lateralen Temperaturverteilung aufgrund der Hangabtriebskraft eine geneigte Oberfläche hinabgleitet. Diese Form des katabatischen Windes ist auf Geländeneigung angewiesen, tritt aber dann auch bei einer lateral homogenen Kaltluftproduktion und Temperaturverteilung auf. Hier wird diese Art des Antriebs als Hangabtriebskraft bezeichnet.

Letztlich lassen sich beide Betrachtungsweisen in einem einheitlichen physikalischen Formalismus beschreiben, weil sie auf dem Ausgleich von thermisch induzierten Druckschwankungen beruhen.

### 1.3.13 Relevanz von Kaltluftabflüssen

Unter Relevanz von Kaltluftabflüssen ist hier die Unterscheidung zu verstehen, ob Kaltluftabflüsse die Ausbreitung von Luftbeimengungen aus einer konkreten Anlage spürbar beeinflussen oder nicht. Darin eingeschlossen ist die Fragestellung, ob Kaltluftabflüsse überhaupt auftreten oder nicht.

Beispielsweise können bei Untersuchungen gänzlich innerhalb von ausgedehnten ebenen Siedlungsgebieten Kaltluftabflüsse vernachlässigt werden, weil sich aufgrund der anthropogenen („vom Menschen verursachten“) Wärmeabgabe an die Umwelt keine katabatischen Winde ausbilden. Für eine solche Betrachtung können Kaltluftabflüsse als irrelevant angesehen werden. Weiterhin können selbst bei stark ausgeprägten katabatischen Winden Kaltluftabflüsse für eine konkrete Untersuchung irrelevant sein, weil beispielsweise aufgrund der Quellgeometrie einer Anlage (einzige Quelle hoher freistehender Kamin) nicht davon auszugehen ist, dass die von der Anlage emittierten Luftbeimengungen in die von katabatischen Winden beeinflusste Luftschicht gelangen.

Die Relevanz von Kaltluftabflüssen ist also in erster Linie abhängig von Standort, Umfeld und Quellgeometrie einer Anlage und ist damit in jedem Falle vorhabensbezogen einzuschätzen. Die hier formulierten Unterscheidungskriterien zwischen relevanten und nicht relevanten Kaltluftabflüssen sind nicht auf Fragestellungen der Stadtklimaplanung oder dergleichen übertragbar, weil dafür andere Kriterien maßgeblich sind.

### 1.3.14 Wirkung von Kaltluftabflüssen

Darunter ist hier die Unterscheidung zu verstehen, ob relevante Kaltluftabflüsse zu größeren oder kleineren Immissionskenngrößen führen. Generell können relevante Kaltluftabflüsse je nach Situation eine Belastung mit Luftverunreinigungen vergrößern oder verringern.

Eine größere Belastung kann an Immissionsorten verursacht werden, wenn die von der Anlage aus gesehen in Richtung der Kaltluftabflüsse liegen. Mit den Kaltluftabflüssen werden dann mehr Luftbeimengungen von der Anlage zum Immissionsort transportiert als dies ohne Kaltluftabflüsse der Fall wäre. Eine geringere Belastung kann an Immissionsorten eintreten, die beim Auftreten von Kaltluftabflüssen verstärkt durchlüftet werden, ohne dabei in einer Abflussrichtung von der Anlage aus gesehen zu liegen. Kaltluftabflüsse wirken dann verdünnend auf die Luftbeimengungen.

Je nachdem welche Wirkung Kaltluftabflüsse an einem Immissionsort haben, werden sie hier als belastend oder entlastend bezeichnet. Kompensieren sich belastende und entlastende Effekte oder wirken Kaltluftabflüsse gar nicht auf einen Immissionsort, so werden sie als neutral bezeichnet. Die Wirkung von Kaltluftabflüssen ist also nicht nur abhängig von Standort, Umfeld und Quellgeometrie einer Anlage, sondern auch vom Immissionsort. Die Einstufung im Sinne von belastend, entlastend oder neutral ist also immissionsortbezogen vorzunehmen.

## 2 Verfahrensweise zur Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen in Immissionsprognosen nach TA Luft

### 2.1 Ausgangssituation

Die gegenwärtig auf dem Markt verfügbaren (mit diagnostischen Windfeldmodellen ausgestatteten) Ausbreitungsmodelle LASAT [8] oder das frei verfügbare Referenzmodell AUSTAL 2000 [7] gestatten keine Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen auf der Basis der Windfeldberechnung. Jedoch wird im Rahmen der immer stärker in den Vordergrund tretenden Qualitätssicherung von Immissionsprognosen (siehe dazu VDI-Richtlinie 3783 Blatt 13 [5]) der Bedarf immer größer, diese Effekte realitätsnah zu modellieren und zu berücksichtigen. Bei nahezu allen Immissionsprognosen erheben die prüfenden Behörden zu Recht die Forderung, den Einfluss von Kaltluftabflüssen zu betrachten. Auch Einwander bei Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung greifen in zunehmendem Maße mangelhafte Immissionsprognosen an, die den Aspekt der Kaltluftabflüsse nicht betrachten. Bei berechtigten Einwendungen ergeben sich daraus häufig unsichere Situationen bei der Entscheidungsfindung über die Genehmigung. Dies ist zeitaufwändig und führt mitunter zu nachträglichen Gutachten und den damit verbundenen Kosten. Sowohl für die Genehmigungsbehörden als auch für die Antragsteller und Verfasser von Immissionsprognosen stellt dies eine unbefriedigende Situation dar.

Es kann eingeschätzt werden, dass Kaltluftabflüsse bei mindestens 50 % der Immissionsprognosen, die für orographisch gegliedertes Gelände angefertigt werden, betrachtet werden müssen. Jedoch wäre der Aufwand zu groß, für jeden dieser Fälle eine vollständige Windfeldmodellierung der Kaltluftabflüsse durchzuführen und bei der Ausbreitungsrechnung anzuwenden. Deshalb wird im Folgenden eine mehrstufige Verfahrensweise vorgeschlagen, die eine sachgerechte, einheitliche und mit vertretbarem Aufwand durchführbare Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen in Immissionsprognosen gestattet.

## 2.2 Mehrstufige Verfahrensweise je nach Relevanz und Wirkung der Kaltluftabflüsse

Die mehrstufige Verfahrensweise zur Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen in Immissionsprognosen prüft vorhabensbezogen nacheinander, ob relevante Kaltluftabflüsse vorhanden sind und ob diese eine belastende oder entlastende Wirkung auf die Immissionsorte haben. Im Falle einer belastenden Wirkung hat eine rechnerische Einbeziehung der Kaltluftabflüsse in die Ausbreitungsrechnung zu erfolgen. Dies kann durch ein Kaltluftwindfeldmodell oder eine Abschätzung geschehen, deren Eignung nachzuweisen ist. Im Folgenden sind die einzelnen Schritte detailliert beschrieben.

### 2.2.1 Feststellung der Relevanz von Kaltluftabflüssen

Im ersten Schritt ist festzustellen, ob Kaltluftabflüsse für die bearbeitete Fragestellung relevant sind oder nicht. In Abschnitt 1.3.13 ist beschrieben, dass diese Einschätzung anhand des Anlagenstandortes, des Umfeldes und der Quellgeometrie zu treffen ist.

Zur Feststellung der Relevanz gibt es die im Folgenden beschriebenen Ansätze, die alternativ oder in Kombination zu einer Entscheidung führen. In begründeten Einzelfällen kann die Feststellung der Relevanz von Kaltluftabflüssen auch anhand von darüber hinausgehenden Überlegungen erfolgen, die dann ausführlich und nachvollziehbar zu begründen sind.

#### 2.2.1.1 Betrachtung der Geländeunebenheiten

Wenn im Rechengebiet der Ausbreitungsrechnung keine Geländeunebenheiten aufgrund der Erfordernisse der TA Luft Anhang 3 Ziffer 11 berücksichtigt werden müssen, ist davon auszugehen, dass keine relevanten Kaltluftabflüsse auftreten. Falls innerhalb des Rechengebietes Höhendifferenzen zum Emissionsort von nicht mehr als dem 0,7-Fachen der Schornsteinbauhöhe und keine Steigungen von mehr als 1:20 auftreten, so müssen nach Anhang 3 der TA Luft Geländeunebenheiten nicht mit einem Windfeldmodell berücksichtigt werden.

In Anlehnung an diese Regelung kann im Rahmen der hier pragmatisch vorgenommenen Vereinfachungen postuliert werden, dass Kaltlufteffekte, die auch im ebenen Gelände auftreten können, in der Ausbreitungsrechnung vernachlässigt werden können.

#### 2.2.1.2 Prüfung auf Vorhandensein von Kaltluftabflüssen

Stehen für das Rechengebiet Modelldaten aus vorangegangenen Untersuchungen oder Messungen zur Verfügung, aus denen hervorgeht, ob Kaltluftabflüsse auftreten oder nicht, können diese Daten verwendet werden. Für den Freistaat Sachsen existieren solche Modelldaten für ausgewählte Regionen in Form des Fachinformationssystem METEOKART GIS [13]. Dieses liefert standortbezogen unter anderem die Kaltluftschichtdicke und die mittlere Kaltluftgeschwindigkeit. Wird einer dieser Werte mit Null ausgewiesen, so kann davon ausgegangen werden, dass keine Kaltluftabflüsse zu erwarten sind.

#### 2.2.1.3 Vergleich von Quellhöhe und Kaltluftschichtdicke

Bei vorhandenen Kaltluftabflüssen ist es im konkreten Anlagenbezug möglich, dass diese nicht relevant sind. Wenn die von der Anlage emittierten Luftbeimengungen oberhalb der Kaltluftabflüsse abgegeben werden, kann davon ausgegangen werden, dass die Ausbreitung der Luftbeimengungen hin zu den Immissionsorten nicht spürbar von den Kaltluftabflüssen beeinflusst werden.

Das Fachinformationssystem METEOKART GIS liefert für ausgewählte Regionen des Freistaates Sachsen die zu erwartende Kaltluftschichtdicke. Wenn die niedrigste Quelle einer Anlage wenigstens doppelt so hoch wie die Kaltluftschichtdicke emittiert, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Emissionen nicht in die Kaltluftabflüsse einmischen. Dies setzt aber voraus, dass die Anlage keine niedrigen diffusen Quellen besitzt.

Wenn die Feststellung der Relevanz von Kaltluftabflüssen nicht bereits bei Punkt 1 (Betrachtung der Geländeunebenheiten) ausgeschlossen werden kann, so ist zur Bearbeitung der Punkte 2 bzw. 3 der Einsatz eines Kaltluftmodells unerlässlich. Eine Argumentation zur Relevanz von Kaltluftabflüssen über zu erwartende Vorwärts- oder Rückwärtstrajektorien, die ebenfalls aus einem Kaltluftmodell gewonnen wurden, reicht im Allgemeinen nicht aus. Weil Trajektorien linienförmige Gebilde sind, die Aus-

breitung von Luftbeimengungen jedoch aufgrund von Turbulenz und Diffusion nicht auf eine Linie beschränkt ist, wird dadurch die Ausbreitung nicht korrekt abgebildet.

## **2.2.2 Feststellung der Wirkung von Kaltluftabflüssen auf Immissionsorte**

Falls im ersten Schritt relevante Kaltluftabflüsse festgestellt wurden, wird im zweiten Schritt geprüft, ob diese Kaltluftabflüsse eine belastende oder entlastende Wirkung haben. In Abschnitt 1.3.14 wird beschrieben, dass die Wirkung der Kaltluftabflüsse für jeden Immissionsort separat zu bestimmen ist. Daher bietet sich an, eine flächenhafte Betrachtung über das Untersuchungsgebiet durchzuführen und die Ergebnisse kartografisch zu visualisieren.

Zur Feststellung der Wirkung von Kaltluftabflüssen auf Immissionsorte sind im Regelfall ein Kaltluftwindfeldmodell (siehe Abschnitt 1.3.4) und vergleichende Ausbreitungsrechnungen notwendig. Modellrechnungen haben gezeigt, dass die von Kaltluftabflüssen dominierte Ausbreitung von Luftbeimengungen oftmals so komplex ist, dass Betrachtungen anhand von Kaltluftschichtdicken, Kaltluftgeschwindigkeiten und Trajektorien nicht zu einer belastbaren Aussage führen, ob Kaltluftabflüsse eine belastende oder entlastende Wirkung auf einzelne Immissionsorte haben (siehe dazu auch Abschnitt 1.3.14).

### **2.2.2.1 Immissionssituation unter Berücksichtigung des katabatischen Windes**

Zur Feststellung der Wirkung von Kaltluftabflüssen ist ein Kaltluftwindfeldmodell am zweckmäßigsten so zu betreiben, dass ein Windfeld bzw. eine Windfeldzeitreihe entsteht, worin nur der katabatische Wind abgebildet ist. Es wird also eine fiktive Kaltluftepisode ohne Advektion betrachtet. Die Kaltluftepisode muss ausreichend lang sein, um sicherzustellen, dass sich am Ende der Kaltluftepisode eine stationäre Strömung einstellt. Für die Ausbreitungsklasse ist die stabile Klasse 1 anzusetzen.

Mit dem dabei erzeugten stationären Windfeld bzw. der Windfeldzeitreihe, die die gesamte Kaltluftepisode abbildet, ist eine Ausbreitungsrechnung unter Ansatz der Quellen der Anlage durchzuführen, wie sie auch zur eigentlichen Ausbreitungsrechnung zum Ansatz kommen. Als dabei emittierte Luftbeimengung kann eines der von der Anlage emittierten Gase verwendet werden oder aber eine fiktive Ersatzsubstanz analog zum Stoff xx bei AUSTAL 2000. Von emittierten Gerüchen, sich umwandelnden oder deponierenden Stoffen ist nach Möglichkeit abzusehen.

Als Ergebnis dieser Ausbreitungsrechnung steht eine Immissionssituation zur Verfügung, wie sie sich am Ende einer advektionsfreien Kaltluftepisode einstellt.

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft eine Immissionssituation unter alleiniger Berücksichtigung des katabatischen Windes für das in Abbildung 2 dargestellte Rechengebiet. Die farbliche Abstufung entspricht willkürlichen Einheiten.

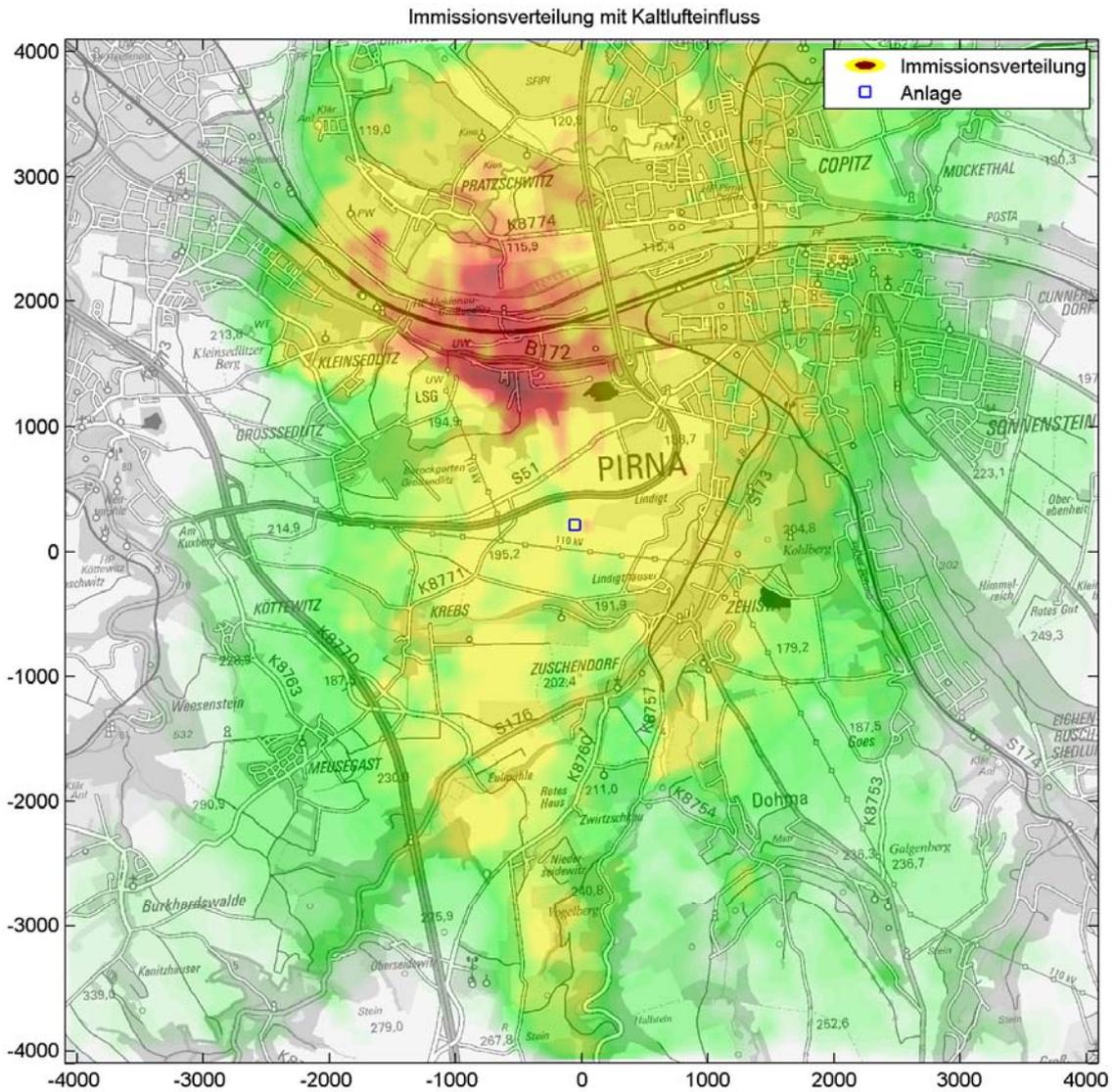


Abbildung 1: Beispiel für die Immissionsituation unter alleiniger Berücksichtigung des katabatischen Windes um eine fiktive Anlage südwestlich von Pirna

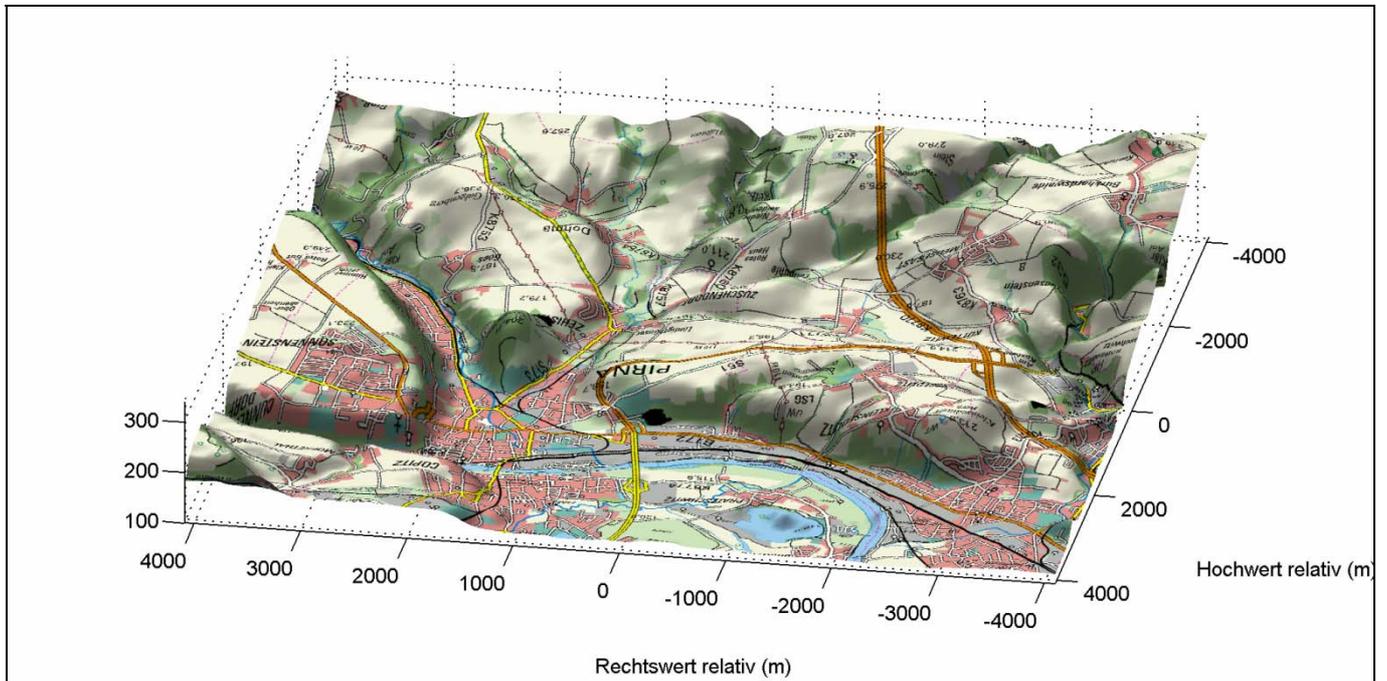


Abbildung 2: Beispiel für ein Rechengebiet um eine fiktive Anlage südwestlich von Pirna, Blickrichtung aus Norden

### 2.2.2.2 Immissionsituation ohne Berücksichtigung des katabatischen Windes

Zur Feststellung der Wirkung von Kaltluftabflüssen ist nun ein Vergleich anzustellen mit Immissionsituationen, die sich bei Ausbreitungsrechnungen ergeben, in denen die Kaltluftabflüsse nicht betrachtet sind.

Zweckmäßigerweise wählt man dazu die Situationen aus einem Modelljahr aus, für die in der Realität tatsächlich Kaltluftabflüsse zu erwarten sind, also Schwachwindsituationen abends und nachts bei Ausbreitungsklasse 1. Führt man für all diese Einzelsituationen ebenfalls Ausbreitungsrechnungen (mit dem diagnostischen Windfeldmodell und unter Ansatz gleicher Quellparameter wie zuvor) aus und mittelt die Ergebnisse, so erhält man eine resultierende Immissionsituation. Diese entspricht anschaulich dem Ergebnis, das eine Ausbreitungsrechnung liefert, die nur die Kaltluftstunden eines Modelljahres repräsentiert. Der katabatische Wind ist darin nicht enthalten.

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft eine Immissionsituation ohne Berücksichtigung des katabatischen Windes für das in Abbildung 2 dargestellte Rechengebiet, in dem nur die Situationen erfasst sind, in denen Kaltluftabflüsse zu erwarten wären. Die farbliche Abstufung entspricht willkürlichen Einheiten.

Immissionsverteilung ohne Kaltlufterfluss

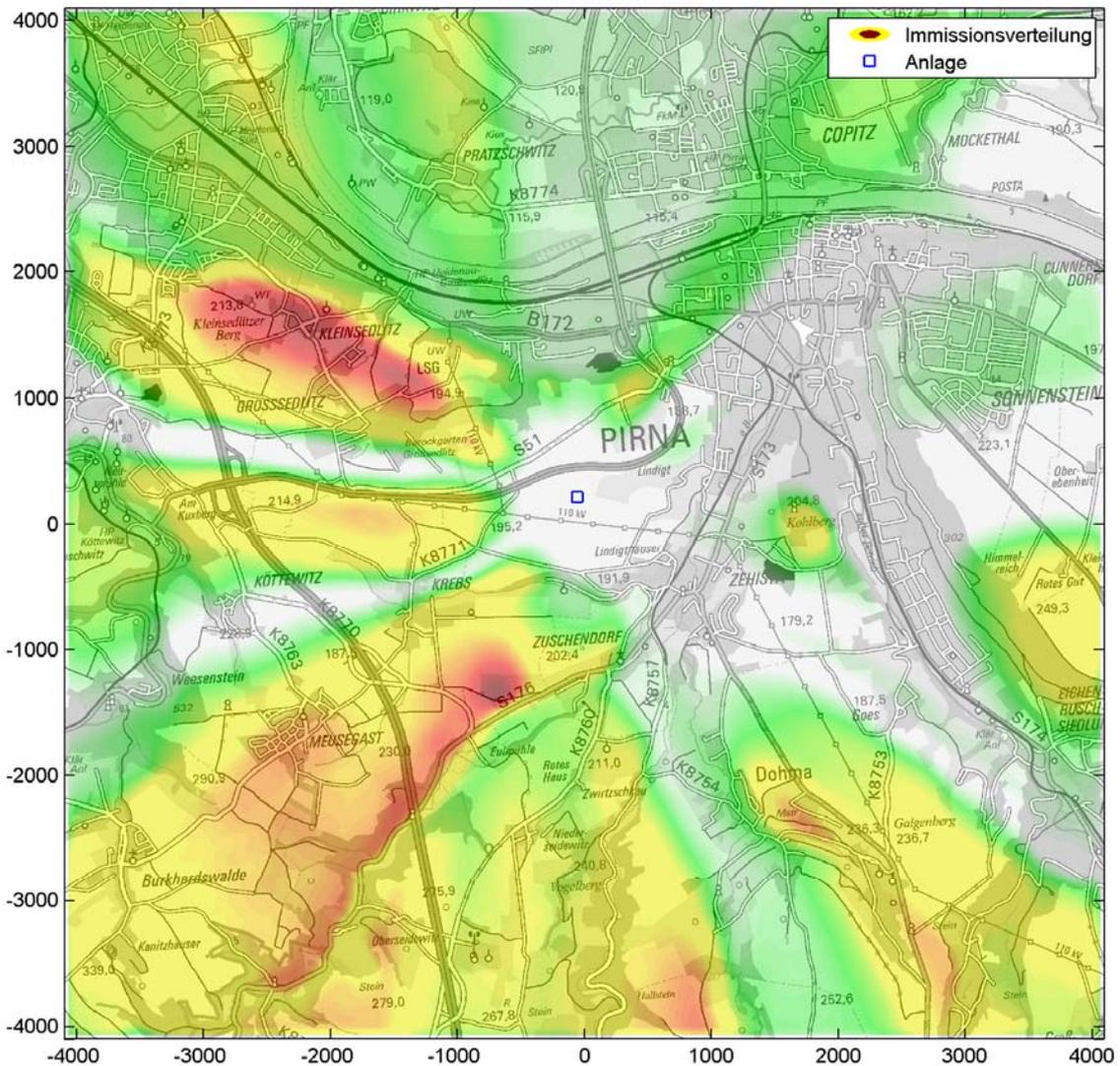
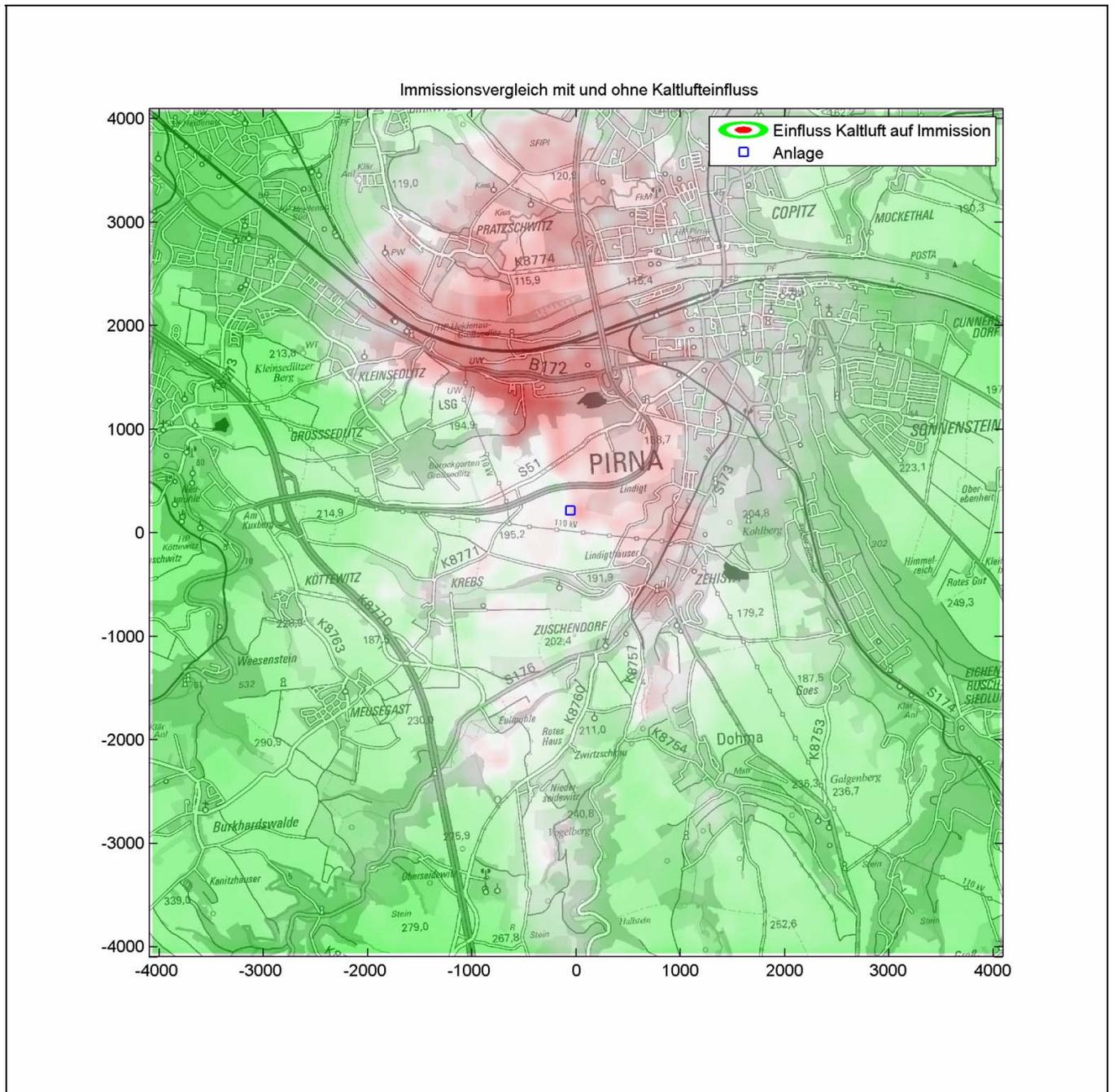


Abbildung 3: Beispiel für die Immissionsituation ohne Berücksichtigung des katabatischen Windes um eine fiktive Anlage südwestlich von Pirna

### 2.2.2.3 Vergleich der Immissionsituationen mit und ohne Berücksichtigung des katabatischen Windes

Aus dem Vergleich der Immissionsituationen, die unter den Punkten 2.2.2.1 und 2.2.2.2 gewonnen wurden, lässt sich die Wirkung der Kaltluftabflüsse abschätzen. Zur Visualisierung kann man das logarithmierte Verhältnis der Immissionskenngrößen flächenhaft darstellen. In Bereichen, für die bei Berücksichtigung des katabatischen Windes eine höhere Immissionskenngröße ermittelt wurde als ohne die Berücksichtigung, ist eine belastende Wirkung durch Kaltluftabflüsse zu verzeichnen, in Bereichen mit umgekehrtem Verhältnis eine entlastende Wirkung.

Dies ist in der folgenden Abbildung beispielhaft dargestellt. Rot eingefärbte Bereiche entsprechen Immissionsorten, für die eine belastende Wirkung abgeschätzt wird, grün entspricht einer entlastenden Wirkung.



**Abbildung 4: Feststellung der belastenden (rot) und entlastenden Wirkung (grün) von Kaltluftabflüssen um eine fiktive Anlage südwestlich von Pirna**

Wird für einen oder mehrere Immissionsorte eine belastende Wirkung von Kaltluftabflüssen festgestellt, ist konsequenterweise eine rechnerische Einbeziehung der Kaltluftabflüsse in die Ausbreitungsrechnung notwendig. Ansonsten besteht die Gefahr, dass durch die fehlende Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen eine Unterschätzung der Immissionssituation eintritt. In Einzelfällen kann für bestimmte Immissionsorte, für die eine belastende Wirkung prognostiziert wird, eine Sonderbetrachtung erfolgen, wenn diese Immissionsorte beispielsweise so weit von der Anlage entfernt sind, dass eine Überschreitung von Immissionswerten auch bei Kaltluftabflüssen nicht zu befürchten ist. Dies ist dann nachvollziehbar zu begründen.

Der Aufwand für die Erlangung der gezeigten Ergebnisse besteht im Wesentlichen in der Erzeugung eines Windfeldes mit Hilfe eines Kaltluftwindfeldmodells und der Durchführung der Ausbreitungsrechnungen mit und ohne Berücksichtigung des katabatischen Windes. Die einzelnen Arbeitsschritte und deren Abfolge lassen sich automatisieren. Die Rechenzeit für das gezeigte Beispiel betrug unter zwölf Stunden auf einem PC mit acht Rechenkernen und unter Verwendung des Kaltluftwindfeldmodells KALAS [14].

### 2.2.3 Rechnerische Einbeziehung der Kaltluftabflüsse in die Ausbreitungsrechnung

Wird bei den vorangegangenen Verfahrensschritten festgestellt, dass für einen oder mehrere Immissionsorte Kaltluftabflüsse eine belastende Wirkung haben, so sind diese Kaltluftabflüsse rechnerisch in der Ausbreitungsrechnung zu berücksichtigen. Dies geschieht im Regelfall durch Verwendung eines Kaltluftwindfeldmodells, das eine Windfeldzeitreihe liefert, die dann für die Ausbreitungsrechnung verwendet wird. Alternativ dazu kann auch eine Abschätzung erfolgen, mit deren Hilfe die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung korrigiert werden.

## 2.3 Schematischer Ablauf der Verfahrensweise

Der schematische Ablauf der Verfahrensweise zur Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen in Immissionsprognosen nach TA Luft ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

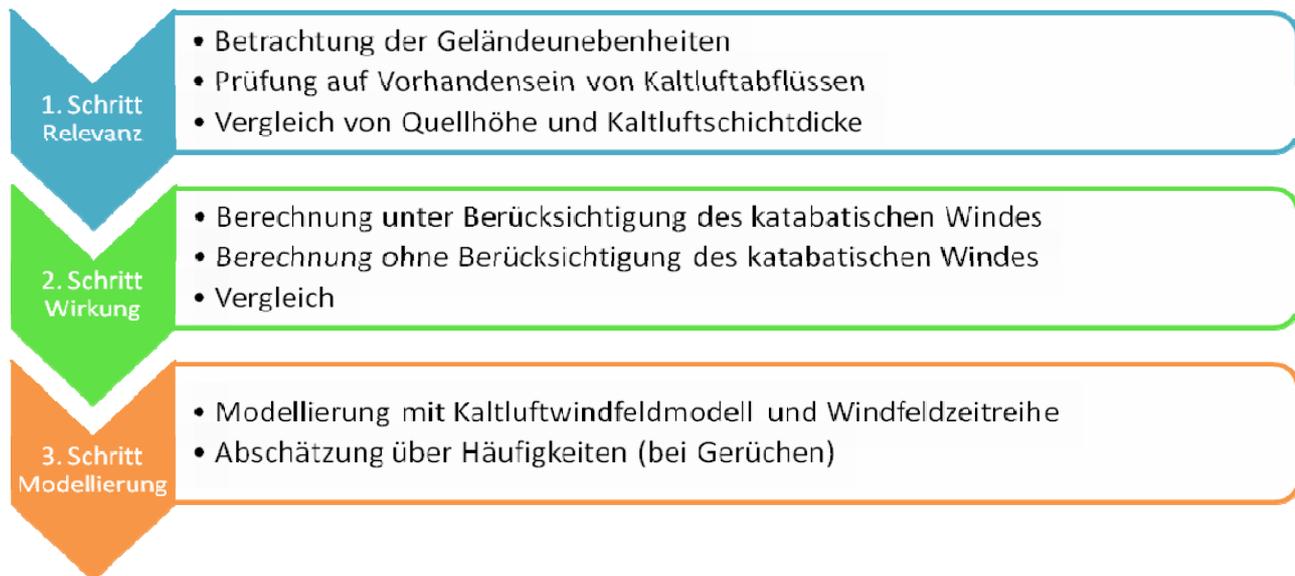


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Verfahrensweise zur Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen in Immissionsprognosen nach TA Luft

## 3 Anforderungen an Kaltluftmodelle

### 3.1 Anforderungen an Kaltluftmodelle zur Feststellung der Relevanz von Kaltluftabflüssen

Kaltluftmodelle, die in Verbindung mit den in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Verfahrensschritten zur Feststellung der Relevanz von Kaltluftabflüssen eingesetzt werden, sollen als Ergebnisse zumindest eine Kaltluftschichtdicke und eine mittlere Kaltluftgeschwindigkeit liefern. Im Kaltluftmodell müssen in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3787 Blatt folgende fünf physikalischen Prozesse bzw. Ansätze berücksichtigt sein:

- Beschreibung der Kaltluftproduktion in Abhängigkeit von Zeit und Landnutzung
- Abfließen der Kaltluft infolge der Hangabtriebskraft in geneigtem Gelände
- Ausgleich von Druckschwankungen infolge von inhomogenen Temperaturverteilungen auch in ebenem Gelände
- Sammeln von Kaltluft in Mulden, Becken und Tälern
- Ausfließen aus Tälern in ebenes Gelände (Berücksichtigung von Trägheitskräften)

## 3.2 Anforderungen an Kaltluftmodelle zur Feststellung der Wirkung von Kaltluftabflüssen auf Immissionsorte

Zur Feststellung der Wirkung von Kaltluftabflüssen auf Immissionsorte wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben eignen sich nur Kaltluftwindfeldmodelle, die als Ergebnis entweder ein stationäres Windfeld liefern oder eine Windfeldzeitreihe liefern, in denen die Kaltluftabflüsse abgebildet sind. Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.1 aufgeführten Anforderungen müssen außerdem noch folgende Aspekte Berücksichtigung finden:

- Abhängigkeit des Fließverhaltens von der Advektion
- Abhängigkeit des Fließverhaltens von der orts aufgelösten Bodenrauigkeit bzw. Landnutzung
- Beschreibung des zeitlichen Verlaufs innerhalb einer Kaltluftepisode
- Erzeugung von stationären Windfeldern oder Windfeldzeitreihen, in denen die Kaltluftabflüsse abgebildet sind und die in einer Ausbreitungsrechnung verwendet werden können

## 3.3 Anforderungen an Kaltluftmodelle zur rechnerischen Einbeziehung der Kaltluftabflüsse in die Ausbreitungsrechnung

Zur rechnerischen Einbeziehung der Kaltluftabflüsse in die Ausbreitungsrechnung nach TA Luft Anhang 3 wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben eignen sich nur Kaltluftwindfeldmodelle, die als Ergebnis eine Windfeldzeitreihe liefern, die sich über den Modellzeitraum erstreckt (beispielsweise Jahreszeitreihe) und in der die Kaltluftabflüsse resultierend aus katabatischem Wind und Advektion abgebildet sind (siehe dazu auch Abschnitt 1.3.10 zur Notwendigkeit einer Windfeldzeitreihe).

Kaltluftabflüsse können sich von einer Stunde auf die nächste deutlich verändern. Beispielsweise können sich Kaltluftseen füllen und dann überlaufen, wobei sich in diesem Bereich der Kaltluftabfluss nicht nur quantitativ ändert, sondern auch qualitativ. Solche Prozesse können sich auf einer Zeitskala abspielen, die mit einer Zeitauflösung von einer Stunde nicht mehr sachgerecht beschrieben werden können. Deshalb muss das Kaltluftwindfeldmodell in der Lage sein, instationäre Zustände mit einer Zeitauflösung von deutlich unterhalb einer Stunde (nach Möglichkeit ein bis fünf Minuten) zu beschreiben.

Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.1 und 3.2 aufgeführten Anforderungen müssen also noch folgende Anforderungen erfüllt sein:

- Erzeugung einer Windfeldzeitreihe, die sich über den Modellzeitraum erstreckt (beispielsweise Jahreszeitreihe) und in der die Kaltluftabflüsse resultierend aus katabatischem Wind und Advektion abgebildet sind
- Beschreibung instationärer Zustände mit einer Zeitauflösung von deutlich unter einer Stunde, nach Möglichkeit ein bis fünf Minuten

# 4 Referenzalgorithmus zur Modellierung von Kaltluftabflüssen

## 4.1 Überblick über die Einbindung des Kaltluftwindfeldmodells in das Softwarepaket LASAT

### 4.1.1 Funktionsweise

Es wurde ein Rechenverfahren auf der Basis von LASAT® (Ing. Büro Janicke) entwickelt. Grundlage dafür bildet ein Hybridmodell, das sowohl diagnostische als auch prognostische Ansätze beinhaltet. Es berücksichtigt Hangabtriebskräfte, Druckausgleich, Reibung und Trägheit der Kaltluft und prognostiziert die Dynamik von der Kaltluftentstehung beginnend in den Abendstunden bis hin zum Abfluss bzw. Auflösen der Kaltluft am Morgen in Folge solarer Einstrahlung. Für die Entstehung von Kaltluft im bodennahen Bereich wurde ein energetischer Ansatz gewählt, der ohne Annahmen zu Kaltluftproduktionsraten auskommt. Nach Anhang 3 der TA Luft ist es notwendig, zeitaufgelöste und orts aufgelöste Daten zur Windgeschwindigkeit und Windrichtung bereitzustellen. Dies geschieht je nach Komplexität des Geländes (Orographie, Bebauung) bei den Lagrange-Ausbreitungsmodellen LASAT und AUSTAL 2000 über ein separates Programm, (LPRWND bzw. TALDIA), das im Standardfall eine sogenannte Windfeldbibliothek erstellt. In dieser ist ein Vorrat an (situationsweisen) Windfelddaten vorhanden, mit dem die eigentliche Lagrange-Ausbreitungsmodellierung durchgeführt werden kann.

Für die Berechnung der Windfelder werden prognostische und diagnostische Windfeldmodelle eingesetzt. Prognostische Windfeldmodelle lösen dabei die Bewegungsgleichung in mehr oder weniger vereinfachter Weise. Diagnostische Windfeldmodelle gehen von einer Schätzung bzw. Annahme für das Windfeld aus und entfernen dann die Divergenz aus dem Windfeld. Damit wird für die anschließende Ausbreitungsrechnung erreicht, dass Massenerhaltung gewährleistet ist. Prognostische Windfeldmodelle gewährleisten je nach Ansatz neben der Massenerhaltung auch noch die Erhaltung von Energie und/oder Impuls.

Der oft vorgebrachte Nachteil von diagnostischen Windfeldmodellen besteht darin, dass nur die Strömungseffekte abgebildet werden, die über die initiale Schätzung bzw. Annahme in das Modell einfließen. Für die Standardanwendungsfälle, die im Anhang 3 der TA Luft geregelt sind, werden bei den Programmsystemen AUSTAL 2000 und LASAT entsprechende Annahmen in die initialen Windfelder eingebracht, bevor aus diesen die Divergenz entfernt wird. Dazu gehören zum Beispiel eine Prandtl-Schicht mit höhenabhängigem Windgeschwindigkeitsprofil oder die Verwirbelungen bei der Gebäudeumströmung, für die eine aus der Elektrodynamik entlehnte Schätzung angesetzt werden kann. Effekte wie Kaltluftabflüsse oder Verwirbelungen bei zu großen Geländesteigungen werden zumindest im Standardumfang der Windfeldberechnung von AUSTAL 2000 und LASAT nicht in diesen Anfangsschätzungen berücksichtigt und können demnach auch nicht in den resultierenden Windfeldern erwartet werden.

Für die hier beschriebene Kaltluftmodellierung wurde ein Ansatz gewählt, der die diagnostische und prognostische Herangehensweise kombiniert. Dabei wird über ein prognostisches Verfahren (vereinfachtes Lösen der Bewegungsgleichung) zunächst eine Schätzung für das Strömungsverhalten der Kaltluft durchgeführt. Danach wird diese Schätzung als Überlagerung zur Advektion hinzugefügt und über das diagnostische Verfahren wieder Divergenzfreiheit hergestellt. Die damit erhaltenen Windfelder enthalten das Strömungsverhalten von Kaltluft (Schätzung aus dem prognostischen Verfahren) und gewährleisten Massenerhaltung bei der Ausbreitungsmodellierung (Divergenzfreiheit). Insgesamt ergibt sich ein iterativer Prozess aus drei Teilschritten:

- Prognostischer Teil mit Lösung der Bewegungsgleichung (Kräftebilanz aus der Temperaturverteilung) zur Ermittlung des für den kommenden Zeitschritt anzuwendenden Windfeldes und Addition des externen Windes (nach Aufprägung der Prandtl-Schicht)
- Diagnostischer Teil zur Entfernung der Divergenz aus diesem Windfeld mit dem Programm LPRWND (Bestandteil von LASAT)
- Verwendung des divergenzfreien Windfeldes zur Ausbreitungsrechnung, um die Temperaturverteilung nach dem Zeitschritt zu ermitteln, mit der dann wieder bei Schritt 1 begonnen wird

Daraus ergibt sich ein iterativer Ablauf, bei dem zunächst aus der momentan vorliegenden Temperaturverteilung auf die Änderung der Windgeschwindigkeit (Antrieb durch Kaltluft) geschlossen wird. Sodann wird vom Programm LASAT die geänderte Windgeschwindigkeit verwendet, um die (negative) Wärmemenge im Rechengebiet zu transportieren. Daraus ergibt sich eine neue Temperaturverteilung, die wiederum zur Berechnung der Änderung der Windgeschwindigkeiten im nächsten Schritt verwendet wird.

Über die abwechselnd stattfindende Berechnung der Windgeschwindigkeit über die Bewegungsgleichung und die Ausbreitung mit LASAT wird der iterative Prozess vorangetrieben. Dabei wird für LASAT jeweils das Windfeld verwendet, das sich im vorhergehenden Schritt aus der Temperaturverteilung mit Überlagerung des externen Windes (beispielsweise aus meteorologischer Zeitreihe für die Anemometerposition) ergeben hat.

#### 4.1.2 Anwendung der Kaltluftmodellierung für Ausbreitungsrechnungen

Der oben beschriebene iterative Prozess bildet den Kern der Kaltluftmodellierung (Hauptprozess). Um diesen Prozess in die Durchführung einer Ausbreitungsrechnung zu integrieren, sind vorbereitende Schritte (Prä-Prozess) und nachfolgende Schritte (Post-Prozess). Der gesamte Ablauf ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

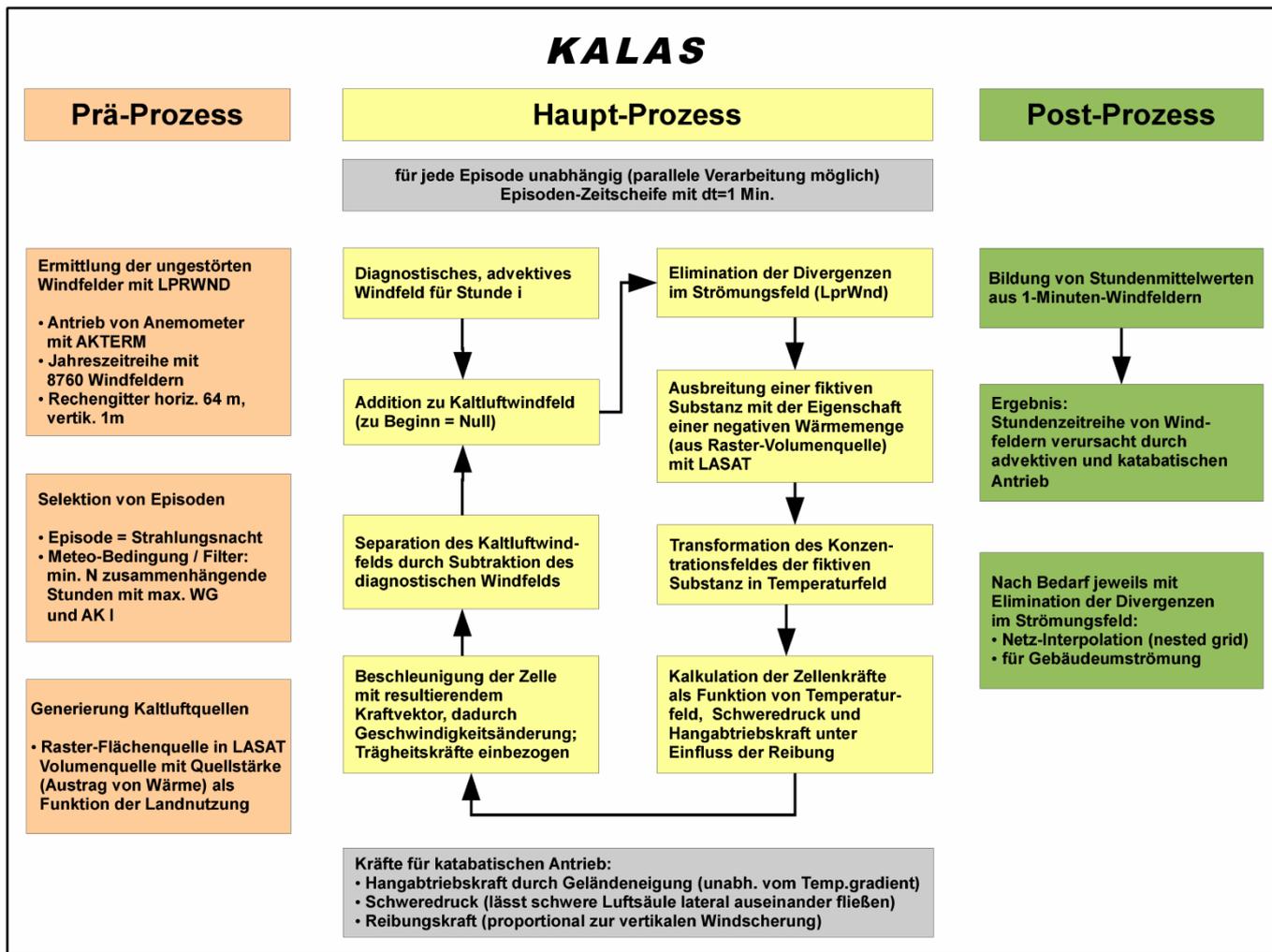


Abbildung 6: Schema des Ablaufs zur Kaltluftmodellierung für eine Ausbreitungsrechnung

Der iterative Hauptprozess von KALAS liefert neben dem zeitlichen Verlauf der Temperaturverteilung auch für jeden Zeitschritt ein resultierendes Windfeld, das die Kaltluftausbreitung und die Advektion beschreibt. Weil der Zeitschritt für die Kaltluftmodellierung in der Größenordnung von einer Minute liegt, können die vorliegenden Windfelder aus dem Hauptprozess nicht ohne weiteres bei einer Ausbreitungsrechnung gemäß Anhang 3 der TA Luft verwendet werden. Weil dort aber für meteorologische Jahreszeitreihen die Verwendung von Stundenmittelwerten für die meteorologischen Eingangsdaten (unter Anwendung be-

stimmter Vorgaben) vorgeschrieben wird, lassen sich aus den vorliegenden Windfeldern die benötigten Stundenmittel erzeugen. Diese können dann unmittelbar für eine Schadstoffausbreitung verwendet werden.

Durch Interpolation und nachträgliche Entfernung der Divergenz aus den interpolierten Windfeldern lassen sich geschachtelte Netze verwenden. Weiterhin ist es möglich, den Windfeldern (aus Advektion und Kaltluftantrieb) mit dem Programm LPRWND Einflüsse aus der Gebäudeumströmung aufzuprägen. Die modellierte Kaltluft umfließt dann die aufgerasterten Gebäudestrukturen ähnlich wie bei einem reinen Ansatz der Advektion. Unberücksichtigt bleibt bei dieser Vorgehensweise jedoch, dass umströmte Hindernisse die Kaltluftabflüsse bereits bei ihrer Entstehung beeinflussen, was jedoch in diesem Kontext eine untergeordnete Rolle spielt (großräumige Landnutzung wie Bewuchs oder zusammenhängend bebaute Gebiete werden bei der Kaltluftmodellierung über ortsveränderliche Bodenrauigkeiten berücksichtigt).

Wichtig bei der Durchführung von Ausbreitungsrechnungen ist, dass nicht wie im Standardfall eine Windfeldbibliothek mit Basisfeldern verwendet werden kann. Vielmehr entsteht aus der oben beschriebenen Vorgehensweise eine Zeitreihe von 8.760 Windfeldern. Eine Ausbreitungsrechnung mit LASAT kann diese Daten verwenden, AUSTAL 2000 jedoch nicht.

Die beschriebenen Arbeitsgänge lassen sich weitestgehend automatisieren. Damit besteht bei einer Ausbreitungsrechnung mit Kaltluftmodellierung kein wesentlicher Mehraufwand, der aus Dateneingabe oder Bedienung resultieren würde. Die Rechenzeiten für typische Szenarien von Ausbreitungsrechnungen im Rahmen der TA Luft (Rechengebiet etwa 8 km x 8 km, Auflösung im größten Gitter 64 m) liegen bei 80 bis 120 Stunden auf einem Rechner mit 3 GHz Taktfrequenz und 24 Prozessorkernen. Weil für die Windfelder keine Bibliotheken, sondern Jahreszeitreihen verwendet werden, muss eine entsprechende Reserve an Speicherplatz vorgesehen sein.

## 4.2 Physikalischer Hintergrund und Modellansätze

### 4.2.1 Überblick

Dem diagnostischen Windfeldmodell des Softwarepakets LASAT liegt ein Konzept zugrunde, das zur Erhaltung von Masse (bei Betreiben des Lagrange-Ausbreitungsmodells) die Divergenz aus dem Windfeld entfernt. Zur Modellierung des katabatischen Windes wird dieses Modell um folgende Aspekte erweitert:

- höhere zeitliche Auflösung, um instationäre Prozesse abbilden zu können (Zeitschritt im Bereich einer Minute)
- Energieerhaltung im dem Sinne, dass sich Temperaturverteilungen durch Transport von Wärmeenergie in der Atmosphäre ergeben und verändern
- Einbeziehung von Kaltluftproduktion und Kaltluftauflösung in die thermische Energiebilanz (Erster Hauptsatz der Thermodynamik)
- Impulserhaltung im dem Sinne, dass der zur Windgeschwindigkeit gehörende Impuls ebenfalls transportiert wird, wodurch sich das Windfeld von einem Zeitschritt zum nächsten ändert (Bewegungsgleichung nach Newton)
- Einbeziehung der katabatischen Antriebskräfte (Hangabtriebskraft und Druckausgleich) in die Impulsbilanz, wodurch Luftvolumina beschleunigt oder abgebremst werden

Durch die Einbeziehung von Energieerhaltung und Impulserhaltung in das Windfeldmodell wird aus einem rein diagnostischen Ansatz ein erweiterter, der auch Bestandteile eines prognostischen Windfeldmodells enthält. Daher ist der hier vorgestellte Algorithmus als Hybridmodell mit diagnostischen und prognostischen Ansätzen anzusehen.

### 4.2.2 Erhaltung von Energie und zeitliche Veränderung der Energieverteilung

Wie bereits beschrieben, wird Energieerhaltung hier auf die thermische (innere) Energie der Luftvolumina im Sinne des Ersten Hauptsatzes der Thermodynamik bezogen. Die Erhaltung bzw. Bilanzierung dieser Energie ist dann äquivalent zur Erhaltung bzw. Bilanzierung von Wärmemengen. Unterschiedliche Energieinhalte (Wärmemengen) in verschiedenen Luftvolumina entsprechen unterschiedlichen Temperaturen. Die Energie (im oben beschriebenen Sinne) in einem betrachteten Luftvolumen  $E_V$  kann in Anlehnung an die Definition der inneren Energie aus der Thermodynamik wie folgt definiert werden:

$$E_V = m_V \cdot c \cdot T = V_V \cdot \rho \cdot c \cdot T_V \quad (1)$$

Dabei ist  $m_V$  die Masse des Luftvolumens,  $T_V$  seine absolute Temperatur,  $V_V$  sein Volumen (Rauminhalt),  $c$  die spezifische Wärmekapazität und  $\rho$  die Massendichte von Luft (abhängig von Temperatur und Druck). Das betrachtete Luftvolumen kann im Terminus der Ausbreitungsrechnung als Gitterzelle verstanden werden. Weil wie oben beschrieben die Energieverteilung (über (1) im Zusammenhang mit der Temperaturverteilung) als zeitlich veränderlich angesehen wird, ist  $E_V$  eine Funktion der Zeit. Die Energieerhaltung über die Zeit lässt sich dann wie folgt aufschreiben:

$$E_G = \sum_V E_V(t) = \text{const.} \quad (2)$$

Dabei ist  $E_G$  die Gesamtenergie im (hier vereinfachend unendlich ausgedehnt) betrachteten Rechengebiet und zeitlich konstant. Die Energie als Erhaltungsgröße lässt sich bei einem vorgegebenen Windfeld im Rahmen einer Ausbreitungsberechnung ähnlich betrachten wie eine Luftbeimengung, für die bei einer Ausbreitungsrechnung nach dem Lagrange-Formalismus Massenerhaltung gilt. Die Masse  $\mu_V$  einer Luftbeimengung in einem betrachteten Volumen ist auch eine Funktion der Zeit, in Summe über das Rechengebiet aber konstant. Analog zu (2) lässt sich aufschreiben:

$$\mu_G = \sum_V \mu_V(t) = \text{const.} \quad (3)$$

Dabei ist  $\mu_G$  die Gesamtmasse der Luftbeimengung im (hier wieder vereinfachend unendlich ausgedehnt) betrachteten Rechengebiet.

Die Veränderung der Masse einer Luftbeimengung in einem betrachteten Volumen nach einem Zeitschritt wird durch den Lagrange-Formalismus beschrieben. Dabei hängt die Masse einer Luftbeimengung in einem betrachteten Volumen zum Zeitpunkt  $t_{n+1}$  von der Verteilung der Luftbeimengung im gesamten Rechengebiet zum Zeitpunkt  $t_n$  ab. Dies lässt sich allgemein folgendermaßen aufschreiben:

$$\mu_V(t_{n+1}) = \sum_{\check{V}} \theta_{V\check{V}}(t_n) \cdot \mu_{\check{V}}(t_n) \quad (4)$$

Die Summation erfolgt über  $\check{V}$  als Laufparameter, der alle Luftvolumina (Gitterzellen) zum Zeitpunkt  $t_n$  überstreicht. Der Faktor  $\theta_{V\check{V}}(t_n)$  ist dabei als Ausbreitungskoeffizient zu verstehen, der den Anteil der Luftbeimengung beschreibt, der zwischen den Zeitpunkten  $t_n$  und  $t_{n+1}$  von Gitterzelle  $\check{V}$  auf Gitterzelle  $V$  übergeht. Die Gesamtheit aller  $\theta_{V\check{V}}(t_n)$  beschreibt also die Ausbreitung einer Luftbeimengung im Rechengebiet unter Einfluss eines Windfeldes zwischen den Zeitpunkten  $t_n$  und  $t_{n+1}$  als Gesamtheit. Aufgrund der Analogie zwischen der Masse einer Luftbeimengung und der Energie in einem betrachteten Luftvolumen lässt sich Gleichung (4) analog für die Energie aufschreiben:

$$E_V(t_{n+1}) = \sum_{\check{V}} \theta_{V\check{V}}(t_n) \cdot E_{\check{V}}(t_n) \quad (5)$$

Die Ausbreitungskoeffizienten  $\theta_{V\check{V}}(t_n)$  werden dabei als die gleichen angesehen wie im Zusammenhang mit der Ausbreitung einer Luftbeimengung. Sie lassen sich aus einer Ausbreitungsrechnung mit einem zum Zeitraum zwischen  $t_n$  und  $t_{n+1}$  gehörenden Windfeld aus LASAT gewinnen, indem beispielsweise die Partikelverfolgung über die Protokolldatei eingeschaltet wird (siehe dazu die LASAT-Handbücher [8]). Anhand der dann nachvollziehbaren Trajektorie eines jeden Partikels kann über deren Gesamtheit bestimmt werden, wie viele Partikel von Gitterzelle  $\check{V}$  auf Gitterzelle  $V$  übergehen. Es sind natürlich hinreichend viele Partikel bzw. Berechnungen notwendig, um die Ausbreitungskoeffizienten  $\theta_{V\check{V}}(t_n)$  mit einer hinreichenden statistischen Sicherheit zu ermitteln.

Wendet man Gleichung (5) im Zusammenhang mit Gleichung (1) an, kann man aus einer bekannten Temperaturverteilung zum Zeitpunkt  $t_n$  die Temperaturverteilung zum Zeitpunkt  $t_{n+1}$  bestimmen. Die Vereinfachung eines unendlich großen Rechengebietes lässt sich in ihrer Wirkung überschauen. Geht man in der Praxis auf ein begrenztes Rechengebiet über, so gilt die zeitliche Erhaltung von  $E_G$  nicht mehr, da durch die seitlichen Grenzflächen und die Deckfläche des Rechengebietes Energie eingetragen bzw. ausgetragen wird. An der Anwendbarkeit von Gleichung (5) ändert dies aber nichts, sofern man die resultierenden Ungenauigkeiten am Rand des Rechengebietes als inhärente Modellungenauigkeiten hinnimmt.

### 4.2.3 Modellierung der Kaltluftproduktion

Die in Gleichung (2) formulierte Energieerhaltung gilt im Sinne des Ersten Hauptsatzes der Thermodynamik nur für abgeschlossene Systeme. Der Einfluss der offenen Grenzflächen des Rechengebietes wurde in diesem Zusammenhang bereits diskutiert. Bei Anwendung auf die Modellierung von Kaltluftabflüssen tritt in diesem Konzept ein weiterer Energiefluss auf, der mit der Kaltluftproduktion einhergeht.

Im hier vorgestellten Algorithmus zur Modellierung von Kaltluftabflüssen tritt die Kaltluftproduktion nicht in Form der Erzeugung von Luftmengen in Erscheinung, die eine geringere Temperatur als die Umgebungsluft haben und sich dann im Gelände in Bewegung setzen. Dies wird häufig bei Anwendung der sogenannten Flachwassergleichungen simuliert [10]. Vielmehr wird hier ein energetischer Ansatz verfolgt, bei dem die Kaltluftproduktion als Energieaustrag aus bodennahen Luftschichten zu verstehen ist. Im Hinblick auf Gleichung (1) führt dies zu einer Verringerung der Temperatur in diesen Luftvolumina, woraus sich schließlich ein katabatischer Antrieb entwickelt, der bei ausreichender Stärke die Luftvolumina in Bewegung setzt.

Diese Herangehensweise ist vergleichbar mit einem Ansatz von WIESNER [16] und SUN [17]. Danach richtet sich der Energieaustrag nach den Temperaturverhältnissen von Luftschichten in Bodennähe und dem Boden selbst sowie nach der Menge der abgestrahlten Energie, die wiederum von der Landnutzung abhängt. Allgemein lässt sich die Änderung der Energie in einem betrachteten Volumen durch Kaltluftproduktion folgendermaßen formulieren:

$$E_V(t_{n+1}) = E_V(t_n) - E_V^P(t_n) \quad (6)$$

Dabei ist  $E_V^P(t_n)$  die im Sinne der Kaltluftproduktion ausgetragene Energie.

Der beschriebene Ansatz lässt sich auch auf spezielle Situationen anwenden. Beispielsweise entsteht Kaltluft in Wäldern nicht in unmittelbarer Bodennähe, sondern vornehmlich im Bereich der Baumkronen. Im Kontext des vorgestellten Algorithmus lässt sich dies modellieren, indem der Energieaustrag nicht in der niedrigsten Luftschicht erfolgt, sondern im Bereich der typischen Höhe von Baumkronen. Weil der Detaillierungsgrad für die Modellierung des Energieaustrags je nach Anwendung verschieden sein kann, sollen hier keine konkreten zahlenmäßigen Vorgaben gemacht werden.

Die aus dem Energieaustrag resultierenden Temperaturunterschiede können über die in den Abschnitten **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebene Antriebe dazu führen, dass sich die betrachteten Luftvolumina in Bewegung setzen.

### 4.2.4 Modellierung der Kaltluftsenken

Analog zur Kaltluftproduktion ist unter Kaltluftsenke ein Energieeintrag in die betrachteten Luftvolumina zu verstehen, der gemäß Gleichung (1) zu einer Temperaturerhöhung im betreffenden Luftvolumen führt.

Diese Effekte treten beispielsweise am Ende einer Kaltluftepisode auf, wenn die Sonneneinstrahlung bodennahe Kaltluftschichten erwärmt. Außerdem können anthropogene Wärmequellen, also Wärmeentwicklung in besiedelten Gebieten durch Gebäudeheizung oder Gewerbebetrieb, zu einer Erwärmung der Luftvolumina führen. Dies spielt häufig bei Fragestellungen zur Stadtklimaplanung eine Rolle, wobei sich die Eindringtiefe von Kaltluftabflüssen in solche Siedlungsgebiete verringert.

Die Modellierung der Kaltluftsenken wurde bei allen bisherigen Untersuchungen zum hier vorgestellten Algorithmus vernachlässigt.

### 4.2.5 Erhaltung von Impuls und zeitliche Veränderung der Geschwindigkeitsverteilung

Die Windfelder zur Beschreibung von Kaltluftabflüssen werden im Rahmen des hier vorgestellten Algorithmus als instationär betrachtet. Dies heißt, dass Windgeschwindigkeit und Windrichtung in einem betrachteten Luftvolumen zu jedem Zeitpunkt  $t_n$  eine andere ist. Betrachtet man den mittleren (vektoriellen) Impuls  $\vec{p}_V$  innerhalb eines betrachteten Luftvolumens, so ergibt sich dieser aus der mittleren Geschwindigkeit der Luft in diesem Volumen wie folgt:

$$\vec{p}_V(t) = m_V \cdot \vec{v}_V(t) = V_V \cdot \rho \cdot \vec{v}_V(t) \quad (7)$$

Auch für den Gesamtimpuls im Rechengebiet lässt sich eine Erhaltungsgleichung analog zu Gleichung (2) aufschreiben:

$$\vec{p}_G = \sum_V \vec{p}_V(t) = \text{const.} \quad (8)$$

Aus Überlegungen analog zu denen in Abschnitt 4.2.2 lässt sich auch ableiten, dass sich für den zeitlichen Verlauf Impulse der betrachteten Luftvolumina  $\vec{p}_V(t)$  eine zu (4) ähnliche Gleichung aufschreiben lässt:

$$\vec{p}_V(t_{n+1}) = \sum_V \theta_{VV}(t_n) \cdot p_V(t_n) \quad (9)$$

Als Besonderheit gibt es hier zu vermerken, dass  $\vec{p}_V(t)$  eine vektorielle Größe ist. Gleichungen (8) und (9) gelten also analog für jede einzelne Komponente. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage, ob die gleichen Ausbreitungskoeffizienten  $\theta_{VV}(t_n)$  wie für die skalaren Größen  $\mu_V$  oder  $E_V$  verwendet werden können. Weil in der Literatur keine stichhaltigen Hinweise gefunden werden konnten, dass sich die Ausbreitungskoeffizienten skalarer Größen von denen vektorieller Größen unterscheiden, wird hier davon ausgegangen, dass die gleichen Ausbreitungskoeffizienten verwendet werden können.

Wendet man Gleichung (9) im Zusammenhang mit Gleichung (7) an, kann man aus einer bekannten Windgeschwindigkeitsverteilung (Windfeld) zum Zeitpunkt  $t_n$  die Windgeschwindigkeitsverteilung zum Zeitpunkt  $t_{n+1}$  bestimmen. Praktisch wird es dadurch möglich, die Trägheit von betrachteten Luftvolumina zu berücksichtigen. Bewegt sich ein betrachtetes Luftvolumen zum Zeitpunkt  $t_n$  mit einer bestimmten Geschwindigkeit und Richtung, so wird es sich zum Zeitpunkt  $t_{n+1}$  zusammen mit seiner Geschwindigkeit und Richtung an einer anderen Stelle befinden. Außerdem wird die räumliche Dissipation von Bewegungsenergie (eigentlich Impuls) dadurch berücksichtigt, dass sich der Impuls eines betrachteten Luftvolumens nicht nur gerichtet im Windfeld fortbewegt, sondern dass Turbulenz und Dispersion überlagert sind. Dies führt zu dem Effekt, dass schnell bewegte Luftvolumina einen Teil ihrer Bewegung an benachbarte, langsamer bewegte Luftvolumina abgeben. Dies ähnelt makroskopisch gesehen einer Reibung, jedoch kommt es hier nicht wie bei Reibung zu einer Umwandlung von Bewegungsenergie in Wärme.

#### 4.2.6 Modellierung der Ausgleichsströmung infolge von Druckunterschieden

Wenn sich auf ebenem Gelände Kaltluft verschieden stark ausbildet, wenn also lokale laterale Temperaturgradienten entstehen, so gleichen sich die daraus resultierenden Druckunterschiede aus, indem sich bestimmte Luftvolumina in Bewegung setzen. Durch die lateral inhomogene Temperaturverteilung unmittelbar über der Erdoberfläche und auch in größeren Höhen, je nach Mächtigkeit der Kaltluftschicht, entstehen Dichteschwankungen und damit verbunden ein lateral inhomogen verteilter Schweredruck. Dieser gleicht sich aus, indem es zu Luftströmungen kommt, einer Form des katabatischen Windes. Anschaulich lässt sich dieser Effekt als „Breitfließen“ der Kaltluft beschreiben. Er findet auch im ebenen Gelände statt, wenn die Kaltluftproduktion und damit die Temperaturverteilung lateral inhomogen sind.

Zur Modellierung dieser Art von Ausgleichsströmung wird folgend dem Konzept der Ausbreitungsrechnung mit LASAT ein Rechengitter aufgespannt. Weisen zwei lateral benachbarte Gitterzellen (hier willkürlich nummeriert mit 1 und 2) einen unterschiedlichen Schweredruck (der darüber befindlichen Luftsäule) auf, so wird es an der (gedachten) Grenzfläche zwischen beiden Gitterzellen zu einer Kraft  $F_{12}^D$  kommen, die bestrebt ist, die betroffenen Volumina zu bewegen, um den Druckunterschied auszugleichen. Diese Kraft lässt sich folgendermaßen bestimmen:

$$F_{12}^D(t) = A_{12} \cdot (P_1(t) - P_2(t)) \quad (10)$$

Dabei ist  $A_{12}$  der Flächeninhalt der Grenzfläche zwischen Volumen 1 und 2,  $P_1(t)$  bzw.  $P_2(t)$  der Schweredruck im Volumen 1 bzw. 2. Das Vorzeichen von  $F_{12}^D(t)$  ist positiv, wenn die Kraft von Volumen 1 in Richtung von Volumen 2 wirkt.

Der Schweredruck  $P_V(t)$  lässt sich aus dem Gewicht der über dem betrachteten Volumen liegenden Luftsäule in Form einer Summe über die Volumina ermitteln:

$$P_V(t) = \sum_{\check{V}} g \cdot h_{\check{V}} \cdot \rho_{\check{V}}(t) = \sum_{\check{V}} g \cdot h_{\check{V}} \cdot \rho_0 \frac{T_0}{T_{\check{V}}(t)} \quad (11)$$

Dabei läuft der Summationsindex  $V$  über alle Volumina (Gitterzellen), die über dem Volumen  $V$  liegen,  $g$  ist die Erdbeschleunigung,  $h_V$  die Höhe der Gitterzelle  $V$  (als Laufvariable) und  $\rho_V(t)$  die Dichte der Luft in der Gitterzelle  $V$  in Abhängigkeit von der Temperatur.  $T_0$  ist die absolute Temperatur des Normzustandes, auf den sich die Dichte  $\rho_0$  bezieht. Eine Abhängigkeit der Dichte von den (geringen) Druckschwankungen aufgrund des veränderlichen Schweredruckes wird der Einfachheit halber außer Acht gelassen.

Verwendet man die Kraft  $F_{12}^D(t)$  in der Bewegungsgleichung nach Newton, so erhält man die Impulsänderung in den beiden betrachteten Volumina:

$$p_1(t_{n+1}) = p_1(t) + \frac{1}{2} F_{12}^D(t) \cdot (t_{n+1} - t_n) \quad (12)$$

Dabei ist  $p_1$  die Impulskomponente, die senkrecht auf der Grenzfläche beider Volumina 1 und 2 steht und von Volumen 1 in Richtung Volumen 2 zeigt. Der Faktor  $\frac{1}{2}$  berücksichtigt dabei, dass sich die an der Grenzfläche wirkende Kraft auf beide Volumina aufteilt. Analog dazu lässt sich für Volumen 2 aufschreiben:

$$p_2(t_{n+1}) = p_2(t) + \frac{1}{2} F_{12}^D(t) \cdot (t_{n+1} - t_n) \quad (13)$$

Die Impulskomponente  $p_2$  ist parallel zu  $p_1$  ausgerichtet, hat jedoch den umgekehrten Richtungssinn.

#### 4.2.7 Modellierung der Hangabtriebskraft

Kaltluft mit einer in sich homogenen lateralen Temperaturverteilung gleitet aufgrund der Hangabtriebskraft eine geneigte Oberfläche hinab. Diese Form des katabatischen Windes ist im Gegensatz zu dem in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebenem Antrieb auf Geländeneigung angewiesen, tritt aber dann auch bei einer lateral homogenen Kaltluftverteilung auf.

In Analogie zu den Betrachtungen in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wird die Kraft ermittelt, die auf ein Luftvolumen  $V$  als Hangabtriebskraft wirkt. Diese Kraft hängt von zwei Termen ab:

- Differenz zwischen der Dichte der Kaltluft im betrachteten Volumen und der Temperatur der Umgebungsluft (ein Luftvolumen mit gleicher Temperatur bzw. Dichte wie die Umgebungsluft würde keine Hangabtriebskraft erfahren)
- Geländeneigung (auf ebenem Gelände käme es nicht zur Hangabtriebskraft)

Als effektives Gewicht, das für ein betrachtetes Luftvolumen zur Hangabtriebskraft  $F_V^H$  führt, ist also nur die Gewichts­differenz zu einem vergleichbaren Luftvolumen bei Umgebungstemperatur anzusetzen. Das Kräfteparallelogramm der geneigten Geländeoberfläche liefert dann den Betrag der Hangabtriebskraft:

$$F_V^H(t) = V_V \cdot (\rho_V(t) - \rho_U(t)) \cdot \sin \alpha = V_V \cdot \left( \rho_0 \frac{T_0}{T_V(t)} - \rho_0 \frac{T_0}{T_U(t)} \right) \cdot \sin \alpha \quad (14)$$

Dabei ist  $\rho_U$  die Dichte der Umgebungstemperatur,  $\alpha$  der Neigungswinkel des Geländes an der Stelle des Volumens  $V$  und  $T_U$  die Temperatur der Umgebungsluft, die zeitlich veränderlich sein kann. Die Richtung von  $F_V^H$  zeigt in die entgegengesetzte Richtung des Gradienten der Geländehöhe (Richtung des stärksten Gefälles).

Analog zu den Gleichungen (12) und (13) lässt sich auch die aus der Hangabtriebskraft resultierende Impulsänderung im Volumen  $V$  bestimmen:

$$\vec{p}_V(t_{n+1}) = \vec{p}_V(t) + \vec{F}_V^H(t) \cdot (t_{n+1} - t_n) \quad (15)$$

Die Impulsänderung (vektoriell) zeigt in Richtung der Hangabtriebskraft.

#### 4.2.8 Temperaturverteilung und Windfeld im zeitlichen Verlauf

Ziel des beschriebenen Algorithmus ist es, die Temperaturverteilung und das Windfeld im zeitlichen Verlauf zu bestimmen. Dies geschieht, indem für aufeinanderfolgende Zeitschritte (praktisch in der Größenordnung einer Minute) die Änderungen der Energieverteilung mit den Gleichungen

- (5) beschreibend die Ausbreitung der Energie,

- (6) beschreibend die Kaltluftproduktion und die Änderungen der Impulsverteilung mit den Gleichungen,
- (9) beschreibend die Ausbreitung des Impulses,
- (12)/(13) beschreibend den Ausgleich des Schweredruckes und
- (15) beschreibend die Hangabtriebskraft

iterativ ermittelt werden. Aus der zeitabhängigen Energieverteilung lässt sich die Temperaturverteilung im Zeitverlauf ermitteln, aus der Impulsverteilung der katabatische Anteil des Windfeldes.

Dabei ist noch eine Besonderheit zu beachten. Die oben dargelegte Bestimmung der Impulsverteilung im Zeitverlauf liefert nur den katabatischen Anteil. Der tatsächlich im Rechengelände vorzufindende Wind enthält zusätzlich noch die Advektion. Das bedeutet, dass die Windfelder zur Ausbreitung der Energieverteilung und Impulsverteilung im Sinne der Gleichungen (5) und (9) eine Superposition aus katabatischem Wind und Advektion darstellen müssen. Damit ist andererseits gewährleistet, dass die Advektion den ihr zustehenden Einfluss auf die Temperaturverteilung und das Windfeld im Zeitverlauf hat.

#### 4.2.9 Weitere Besonderheiten

##### Verwendung divergenzfreier Windfelder

Die Änderungen der Impulsverteilung mit den Gleichungen (9) (Ausbreitung des Impulses), (12)/(13) (Ausgleich des Schweredruckes) und (15) (Hangabtriebskraft) führen bei jedem Iterationsschritt zu einem neuen Windfeld, das die beschriebenen physikalischen Effekte abbildet. Dieses Windfeld wird aber zum Zeitpunkt  $t_{n+1}$  nach Anwendung der Modifikationen durch die genannten Gleichungen nicht divergenzfrei sein. Deshalb muss nach Modifikation des Windfeldes durch die Modellgleichungen die Divergenz entfernt werden, um wieder eine Ausbreitungsmodellierung mit dem Lagrange-Modell durchführen zu können. Das Entfernen der Divergenz modifiziert dabei das Windfeld, sodass es einen Teil der eingprägten physikalischen Effekte wieder verliert. Weil zum Entfernen der Divergenz das Modul LPRWND aus dem Softwarepaket LASAT verwendet wird, kann davon ausgegangen werden, dass nach Entfernen der Divergenz ein Windfeld zur Verfügung steht, das dem ursprünglichen Windfeld (Abbildung der modellierten physikalischen Effekte) möglichst nahe kommt, aber divergenzfrei ist. Anschaulich lässt sich der Prozess der Entfernung der Divergenz dadurch beschreiben, dass zu den modellierten physikalischen Prozessen (beispielsweise Erhaltung der Energie, Erhaltung des Impulses) noch die Erhaltung der Masse sichergestellt wird.

##### Ortsveränderliche Bodenrauigkeit bei der Ausbreitungsrechnung

Die Ausbreitungsmodellierung mit dem Programmsystem LASAT erfolgt in einem Modus, bei dem die Rauigkeitslänge ortsveränderlich angegeben werden kann. Nach Angaben von JANICKE erfolgt die Berücksichtigung ortsveränderlicher Rauigkeiten dann jedoch nur bei der Windfeldmodellierung und nicht bei der Turbulenzmodellierung. In Anbetracht der großen Rechengelände mit sehr großen Rauigkeitsschwankungen und der untergeordneten Bedeutung der Turbulenz bei der Modellierung von Kaltluftsituationen wird dieser Nachteil jedoch in Kauf genommen.

## 4.3 Modellgrenzen

Zu Aspekten, die der vorgestellte Algorithmus nicht berücksichtigt, gehören

- die adiabatische Temperaturänderung von Luftvolumina,
- die Umwandlung von kinetischer Energie in Wärme infolge von Reibung,
- der Entzug von Wärmeenergie aus Luftvolumina infolge von Umwandlung in kinetische Energie und
- Austausch von Wärme (Energie) zwischen Luftvolumina durch Wärmeleitung.

Auch wenn die Umwandlung von kinetischer Energie in Wärme infolge von Reibung nicht betrachtet wird, ist die Dissipation von kinetischer Energie von schnell bewegten Luftvolumina hin zu langsam bewegten Luftvolumina durchaus berücksichtigt. Dies erfolgt durch Turbulenz und Diffusion, die über ihre Modellierung im Grenzschichtmodell des Lagrange-Modells Einfluss auf die Ausbreitung von Impuls nehmen. Darüber hinaus mag sich die Frage stellen, ob die vom vorgestellten Algorithmus gelieferten

Windfelder in Verbindung mit dem Lagrange-Formalismus zur Ausbreitung mit den verwendeten Grenzschichtmodellen die Ausbreitung von Luftbeimengungen in Kaltluftabflüssen korrekt beschreibt. Eine Beantwortung dieser Frage und damit die Validierung des Modellsystems sind ohne aufwändige Messkampagnen nicht möglich.

Dennoch kann eingeschätzt werden, dass die Windfelder für die betrachteten Situationen als plausibel anzusehen sind (siehe Abschnitt 4.4). In den bisher durchgeführten Untersuchungen zur Anwendung des Algorithmus traten keine Situationen auf, die an einer plausiblen Modellierung der Windfelder im Rahmen der zu erwartenden Phänomene und der Größenordnung nach zweifeln lassen. Weil zur Windfeldmodellierung keine empirischen Faktoren oder Ansätze eingeflossen sind, ist auch davon auszugehen, dass die quantitativen Parameter wie Kaltluftgeschwindigkeit oder Kaltluftschichtdicke der Größenordnung nach korrekt ermittelt werden.

Geht man also davon aus, dass die ermittelten Windfelder zur Beschreibung der realen Kaltluftabflüsse brauchbar sind, so steht einer Anwendung im Lagrange-Formalismus (mit seinen Grenzschichtmodellen) nichts im Wege. Weil der Lagrange-Formalismus in der TA Luft als Mittel der Wahl zur Prognose von Immissionskenngößen festgeschrieben ist, sind die damit prognostizierten Immissionskenngößen, auch wie hier unter Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen, als brauchbares Entscheidungskriterium für immissionsschutzrechtliche Fragestellungen anzusehen.

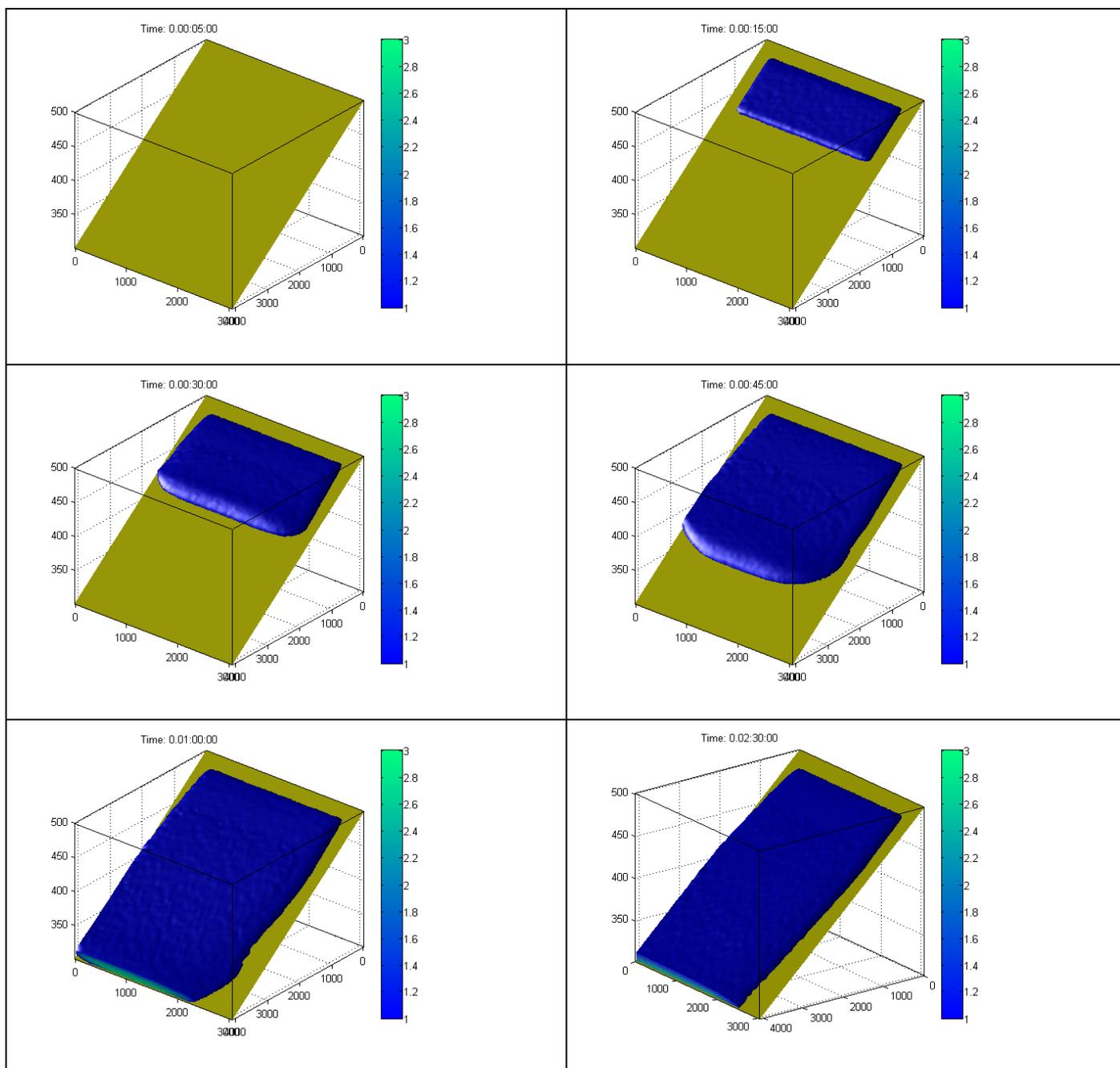
## 4.4 Plausibilisierung

Um die Funktion des Kaltluftausbreitungsmodells zu testen, wurden einfache Geländeformen (glatter Hang, Mulde, Hindernis usw.) angesetzt und eine isolierte Kaltluftquelle (Rechteck im oberen Bereich) eingebracht. Für den Zeitschritt wurde ein Wert von 60 Sekunden angesetzt. Räumlich wurde lateral ein Rechengitter mit 48 m Maschenweite und vertikal ein Gitter mit 1 m Zellhöhe für die ersten 5 m angesetzt, das sich dann mit größer werdender Zellhöhe (insgesamt 22 Zellen) bis in 1.200 m fortsetzt. Als externer Wind wurden 0,7 m/s aus Norden (meist rechts oben in den folgenden Abbildungen) angesetzt, der die Kaltluftausbreitung sichtlich beeinflusst.

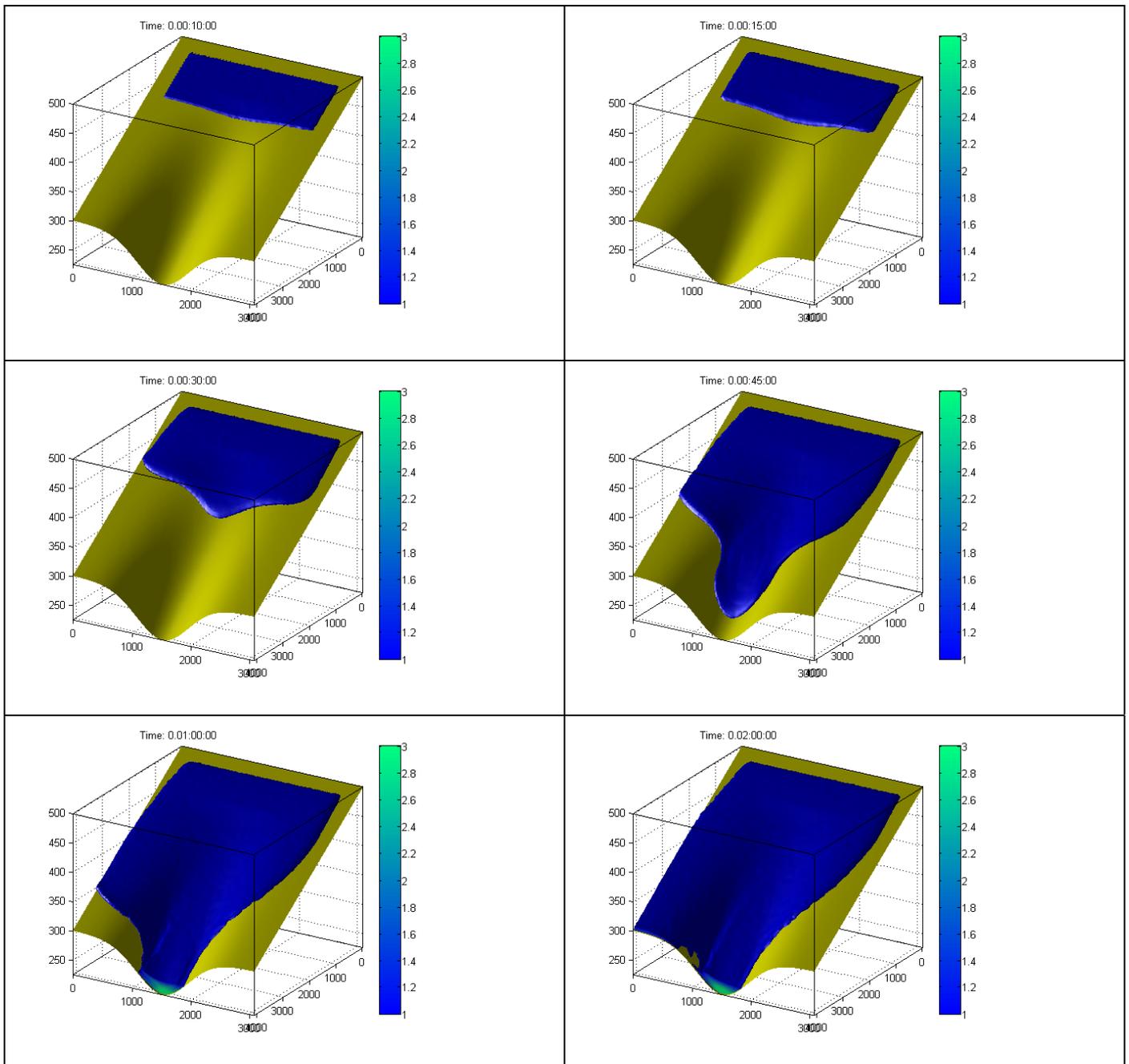
Die folgenden Visualisierungen geben das modellierte Strömungsverhalten wieder. Die Kaltluft wird dabei als blaue Schicht dargestellt, die sich aus der Isofläche im Raum ergibt, die einem Temperaturabfall von einem Kelvin gegenüber der Umgebungstemperatur entspricht.

Die Angaben an den Koordinatenachsen erfolgen in Metern, wobei das Höhenprofil stark übertrieben dargestellt ist. Die Temperaturskala am rechten Rand gibt an, welche Temperatur im Inneren der Kaltluftschicht herrscht, wo diese am Rand des Rechengebietes aufgeschnitten dargestellt ist. Oberhalb der Grafik ist der Zeitpunkt angegeben.

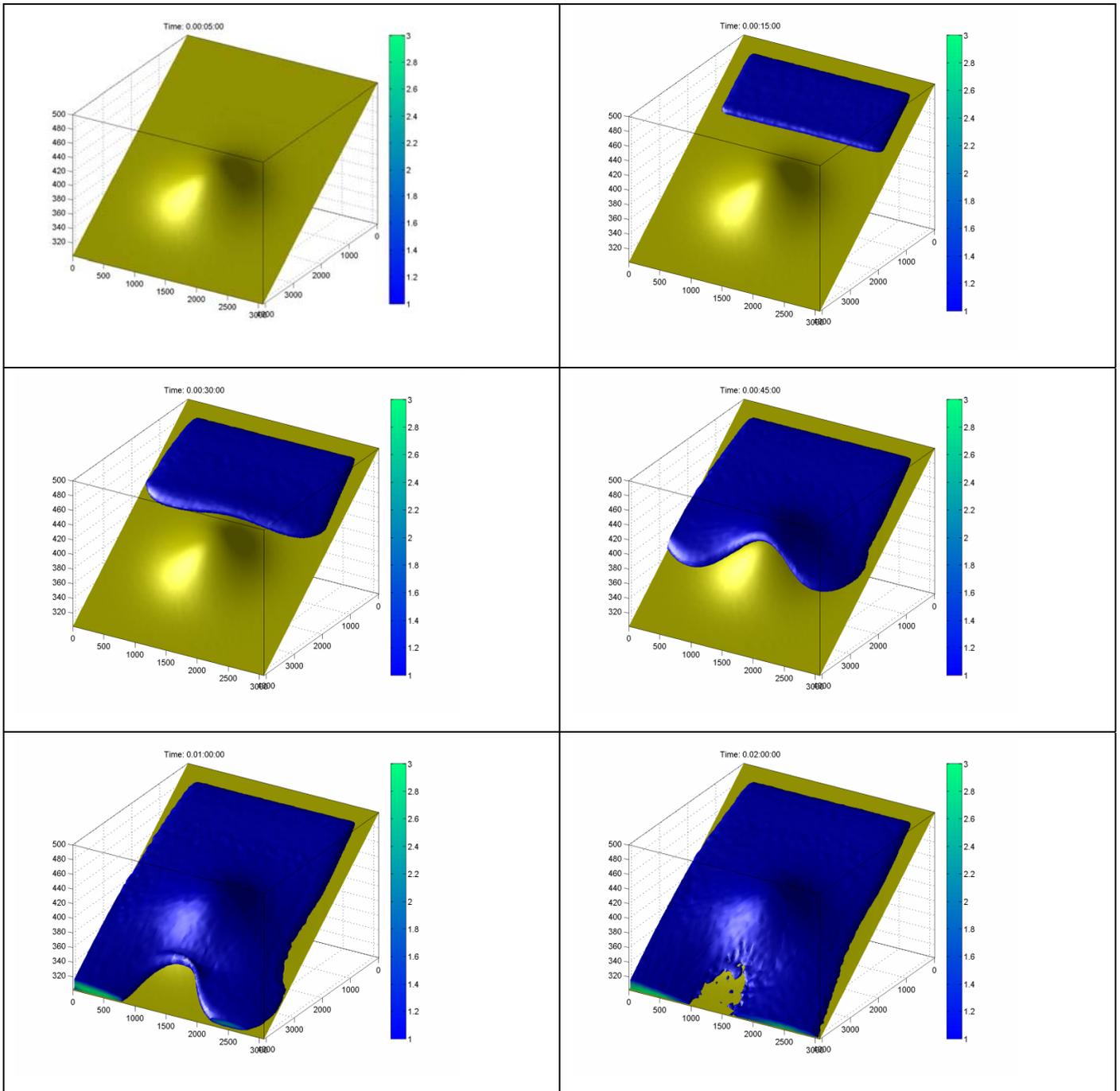
#### 4.4.1 Glatte Hang



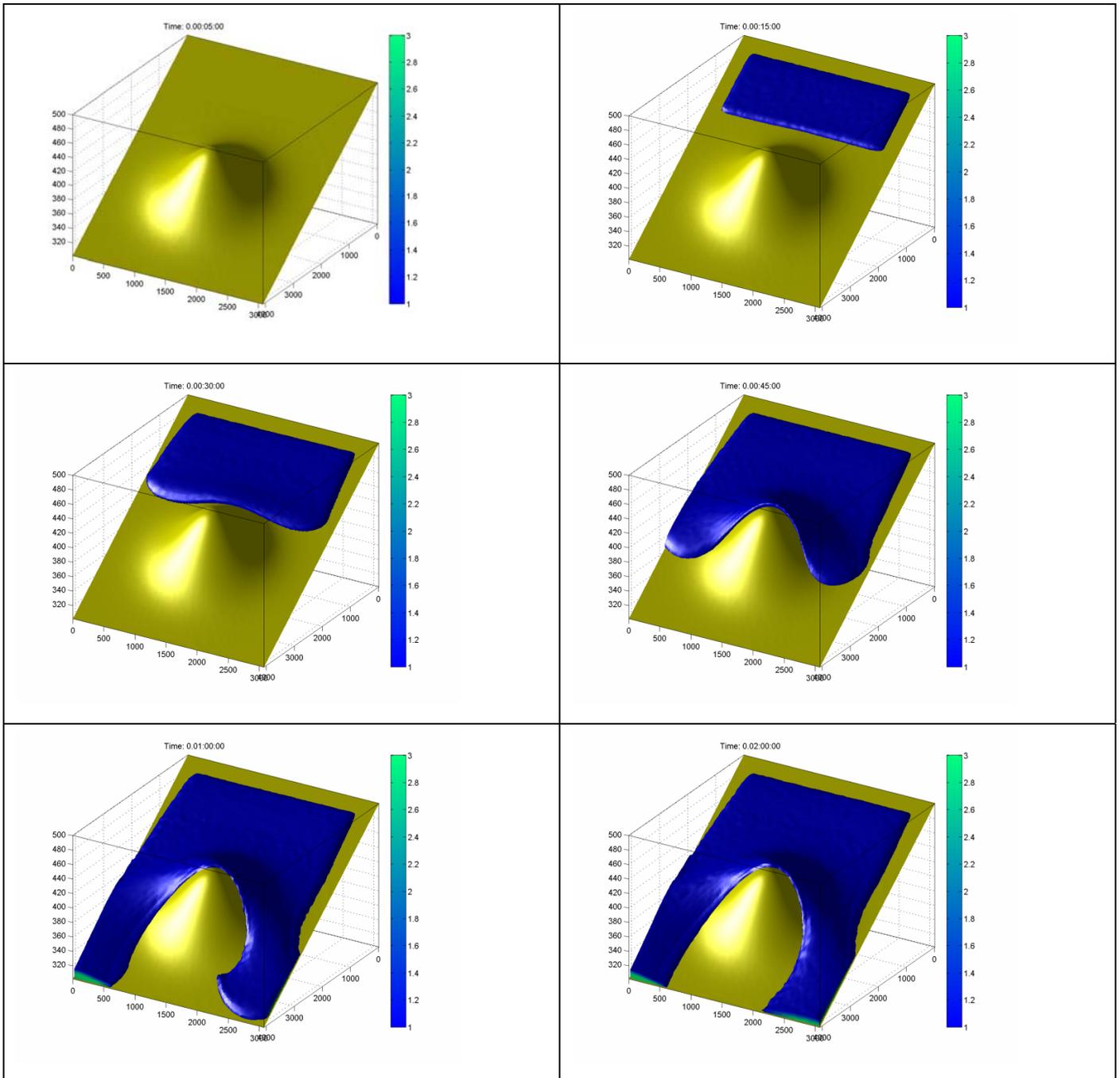
## 4.4.2 Rinne



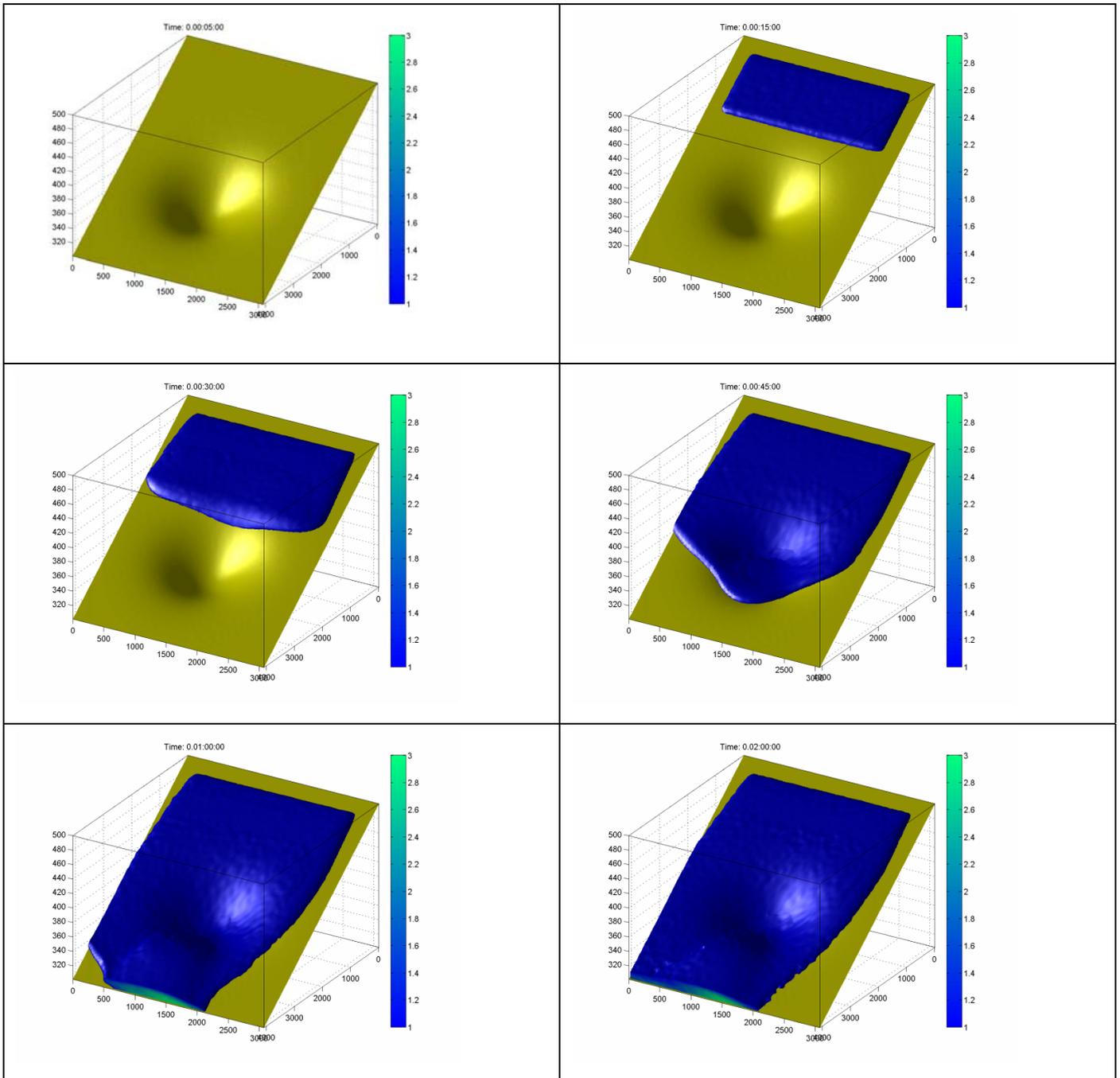
### 4.4.3 Flacher Hügel



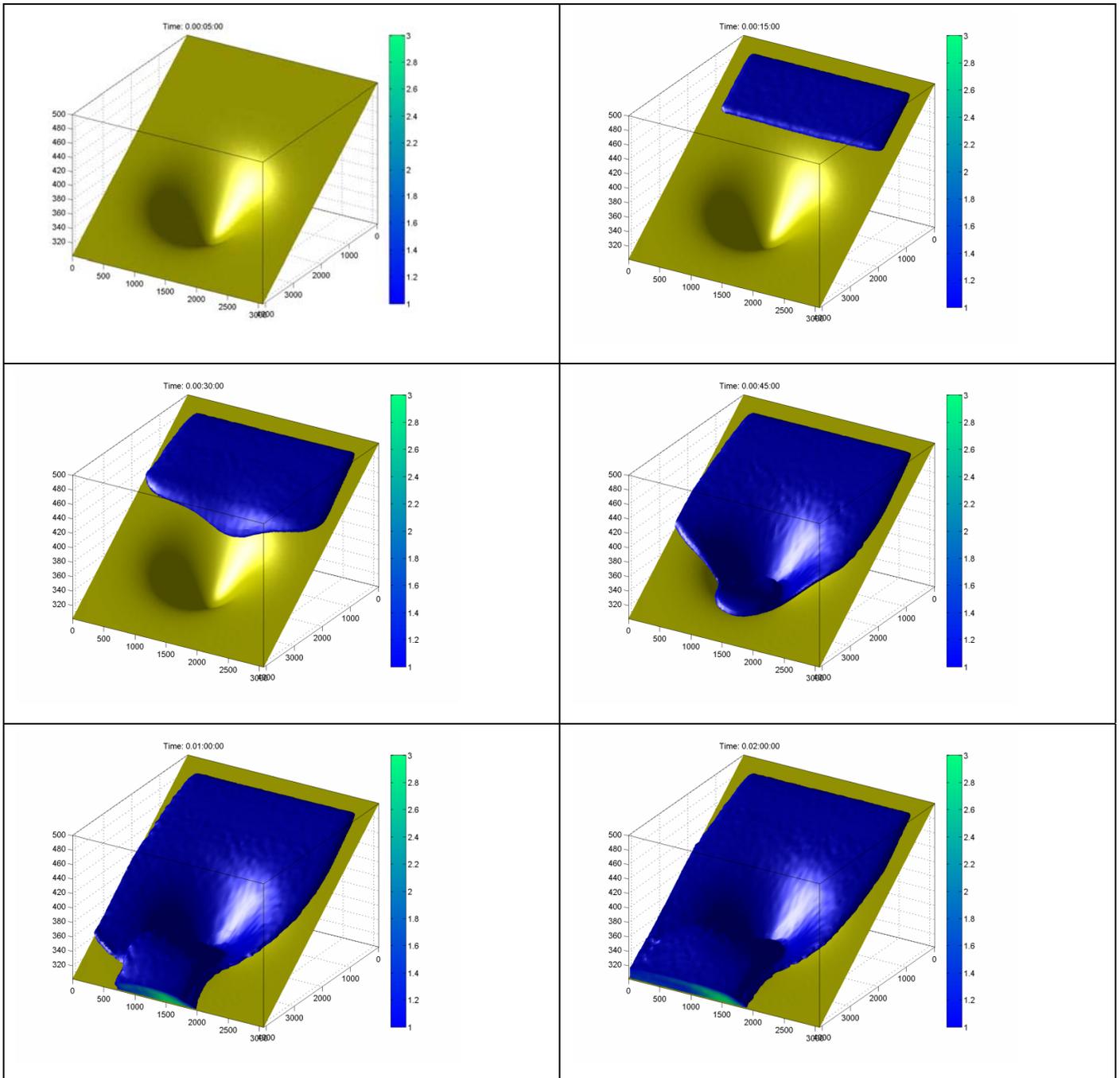
#### 4.4.4 Hoher Hügel



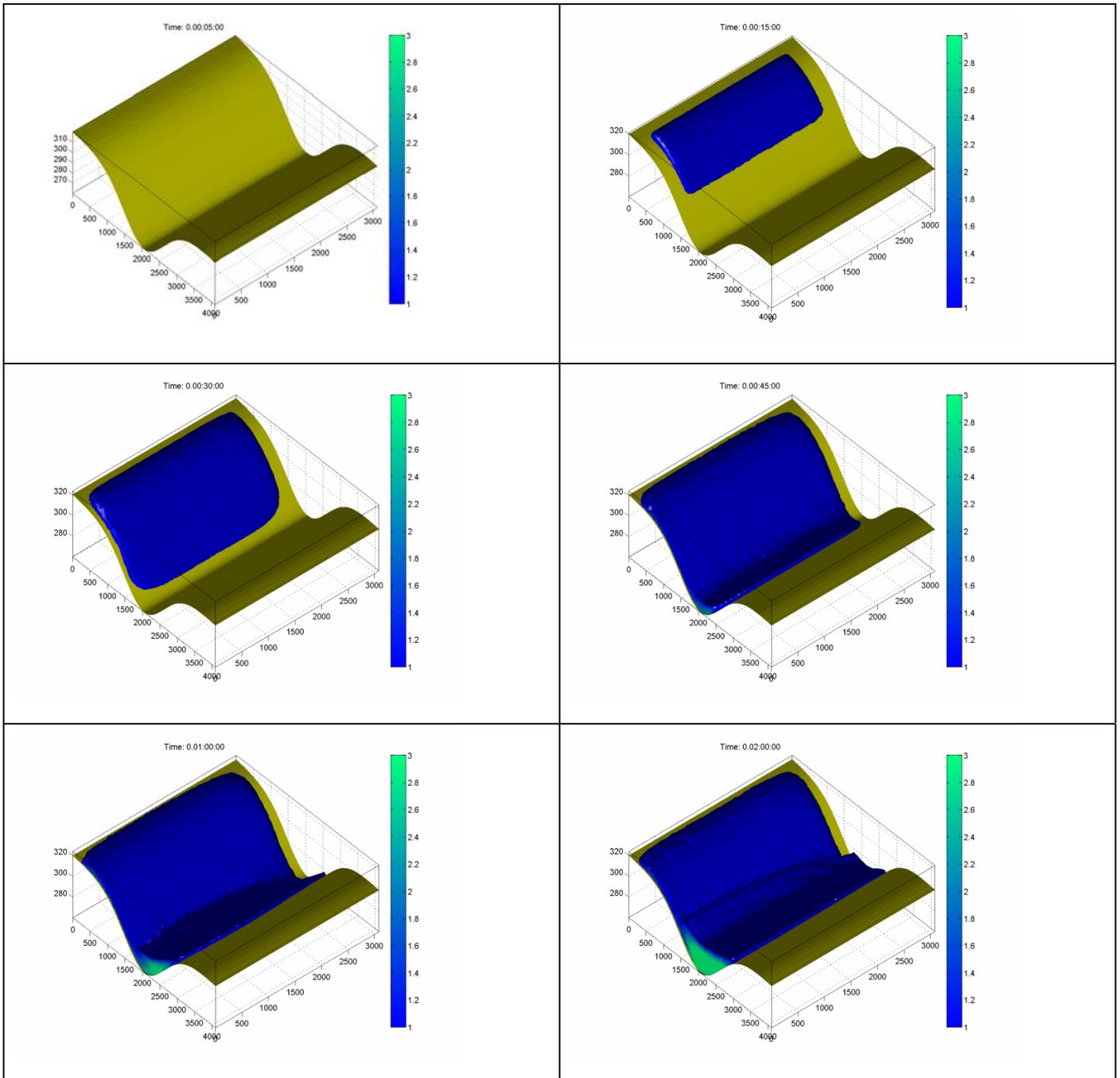
#### 4.4.5 Flache Mulde



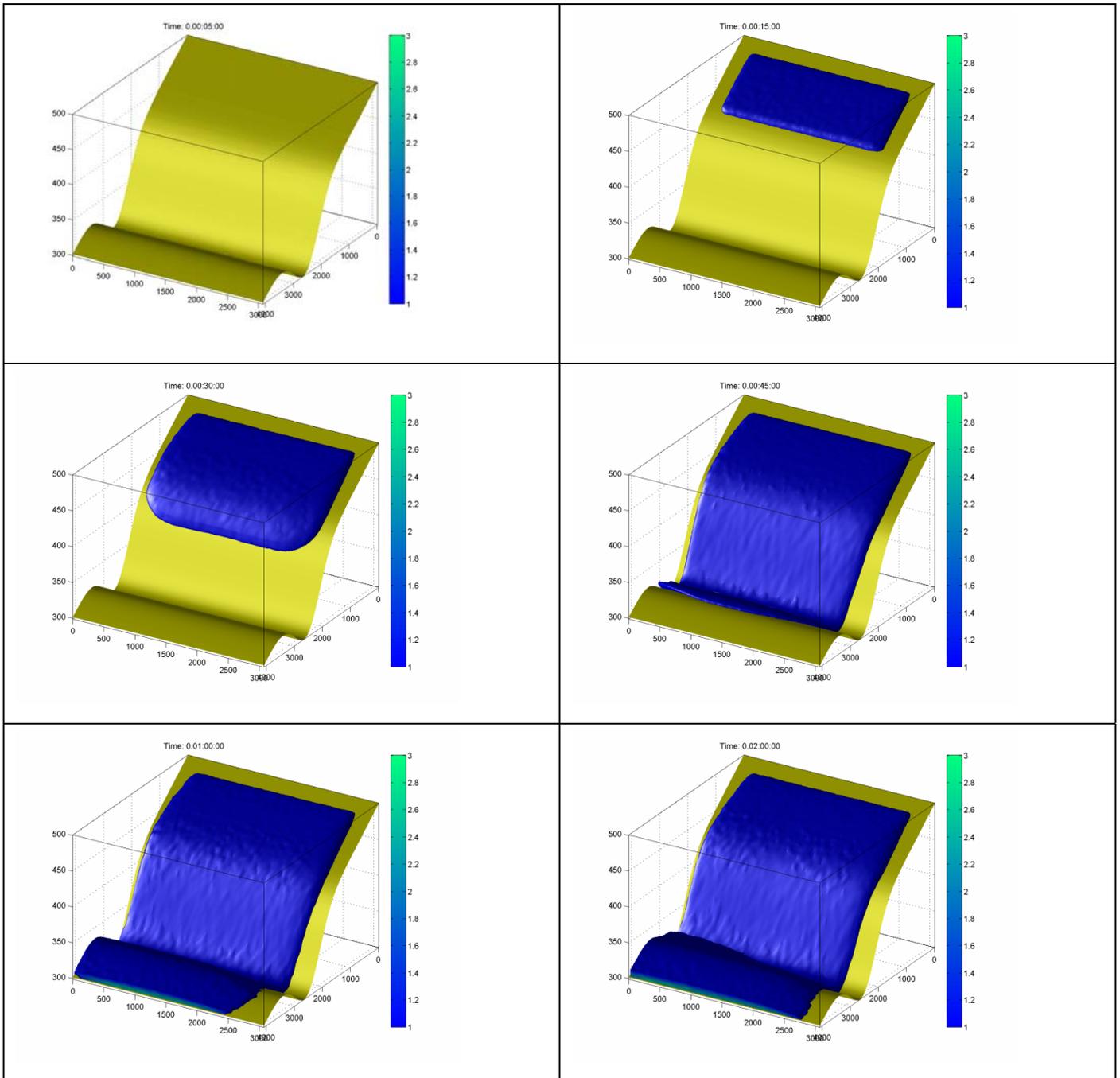
#### 4.4.6 Tiefe Mulde



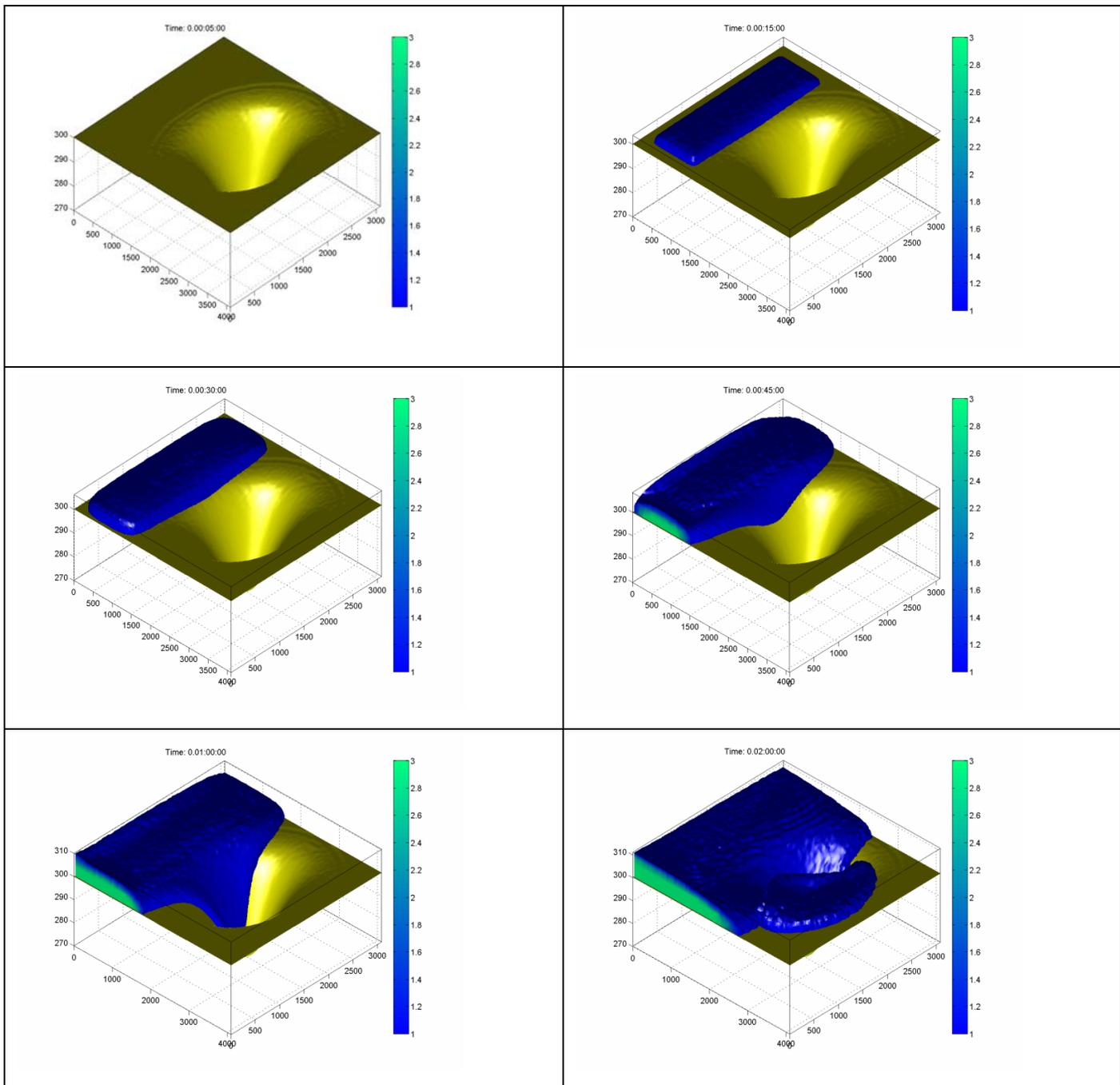
#### 4.4.7 Flache Rinne



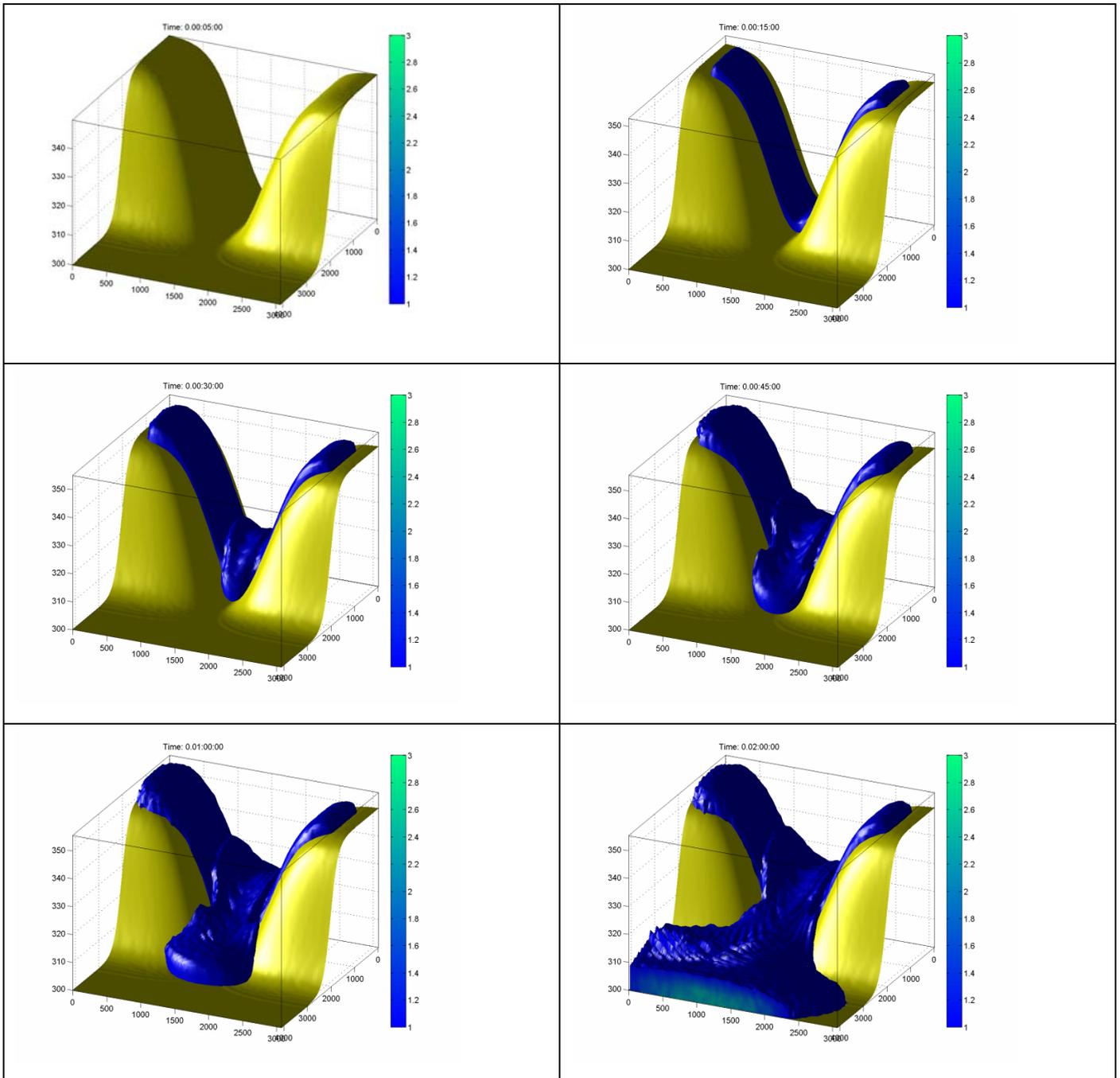
#### 4.4.8 Hohe Schanze



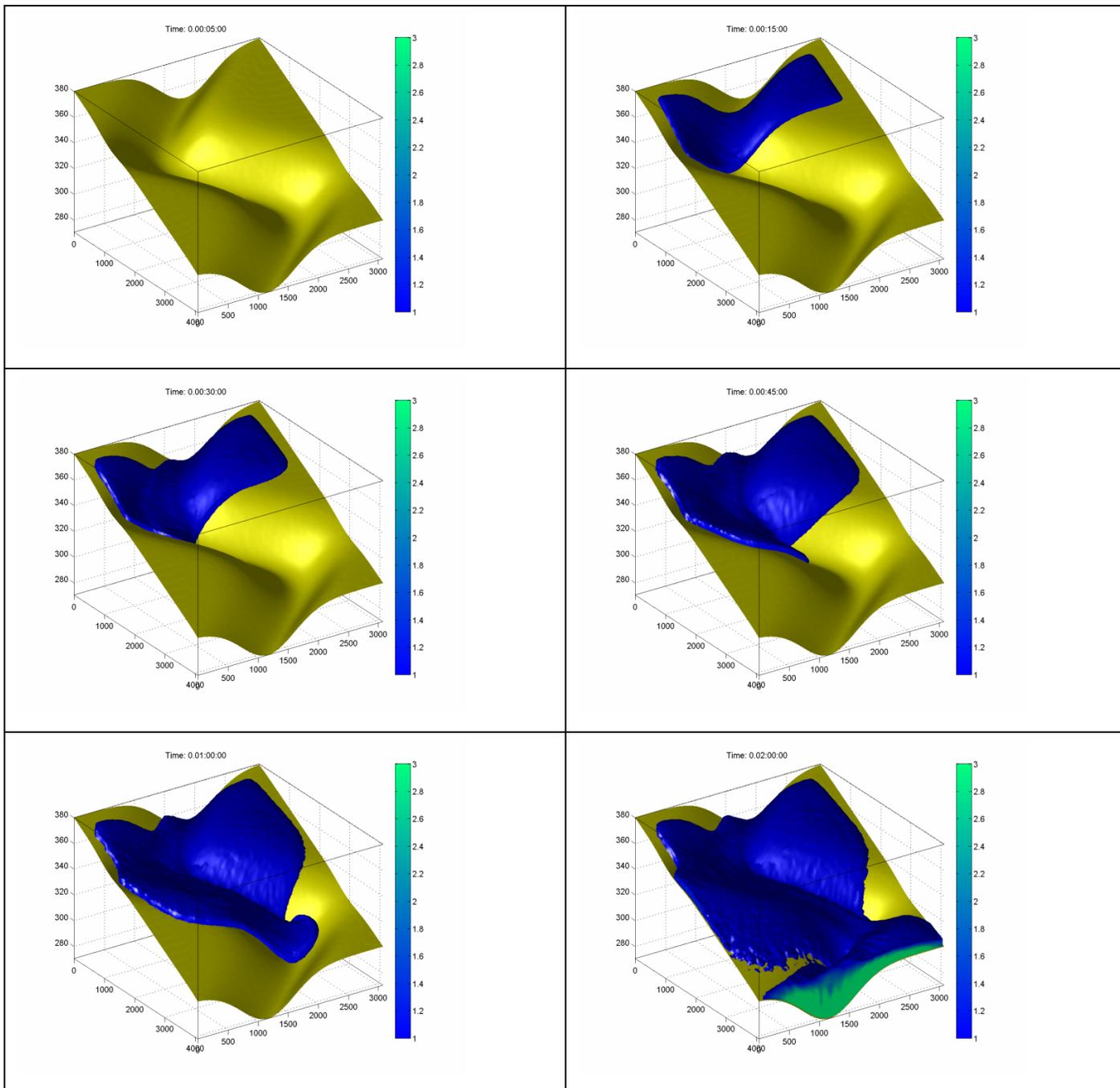
#### 4.4.9 Loch in der Ebene



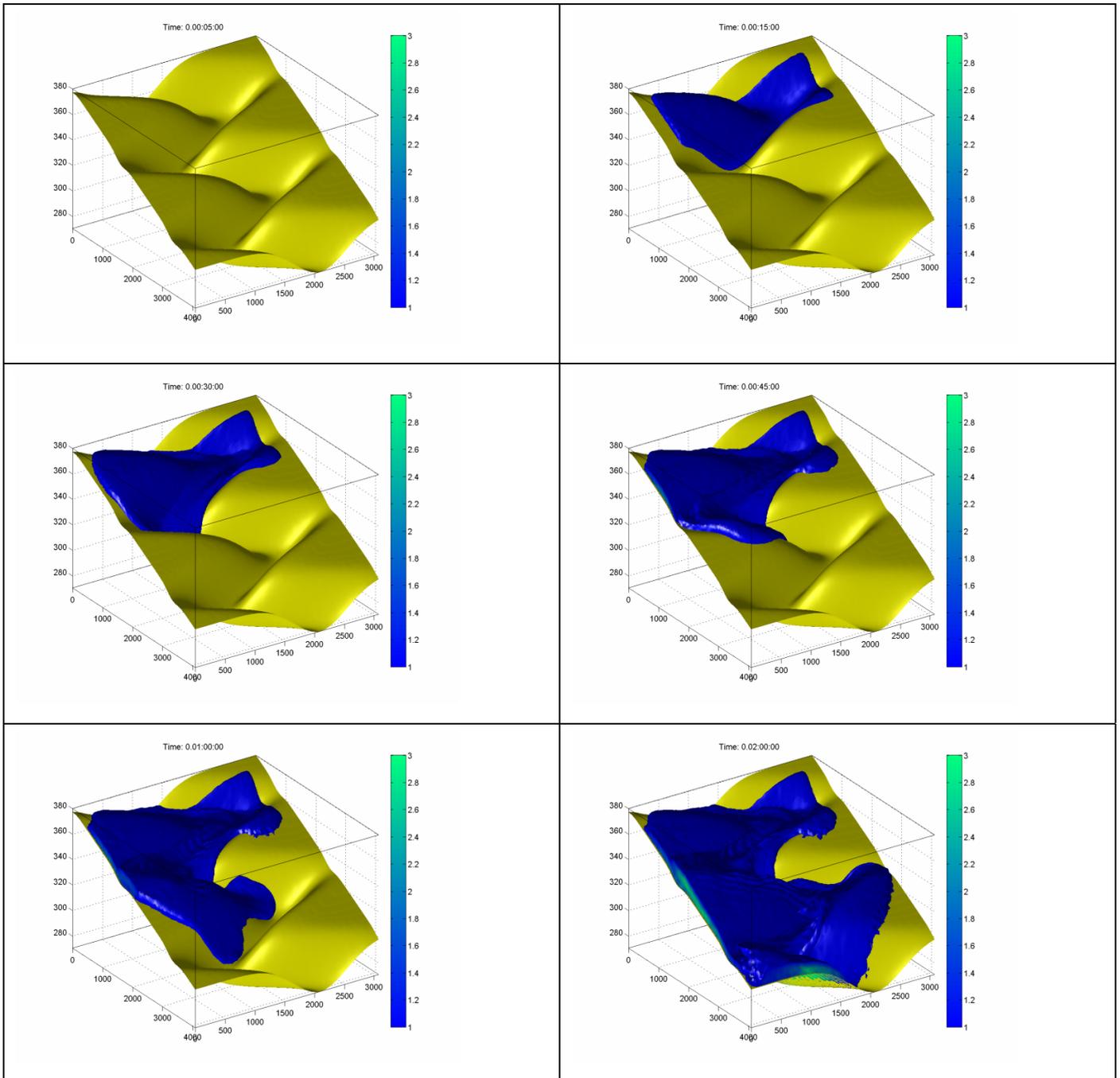
#### 4.4.10 Talausgang



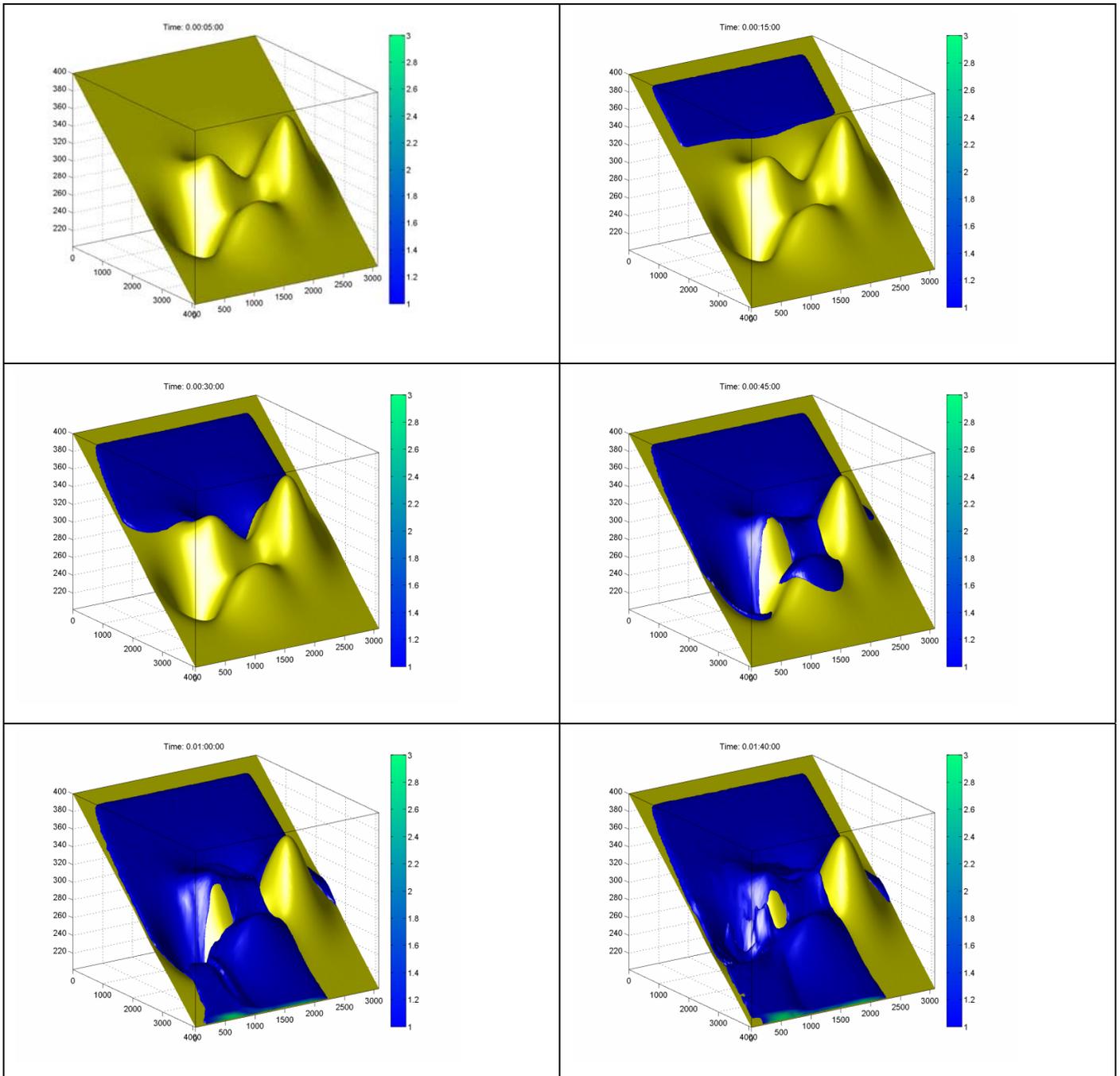
#### 4.4.11 Slalom



#### 4.4.12 Enger Slalom



### 4.4.13 Chaos



# 5 Beispiele

Mit der in Abschnitt 2 beschriebenen Verfahrensweise wurden beispielhaft vier Standorte untersucht. Dabei lag besonderes Augenmerk auf der Ermittlung der Wirkung der Kaltluft (Abschnitt 2.2.2). Im Folgenden sind die Ergebnisse dargestellt, wobei Ortsbezüge im Zuge der Anonymisierung der Standorte entfernt wurden.

## 5.1 Beispiel 1

Die folgende Abbildung stellt die zugrundeliegende Orographie für Beispiel 1 dar.

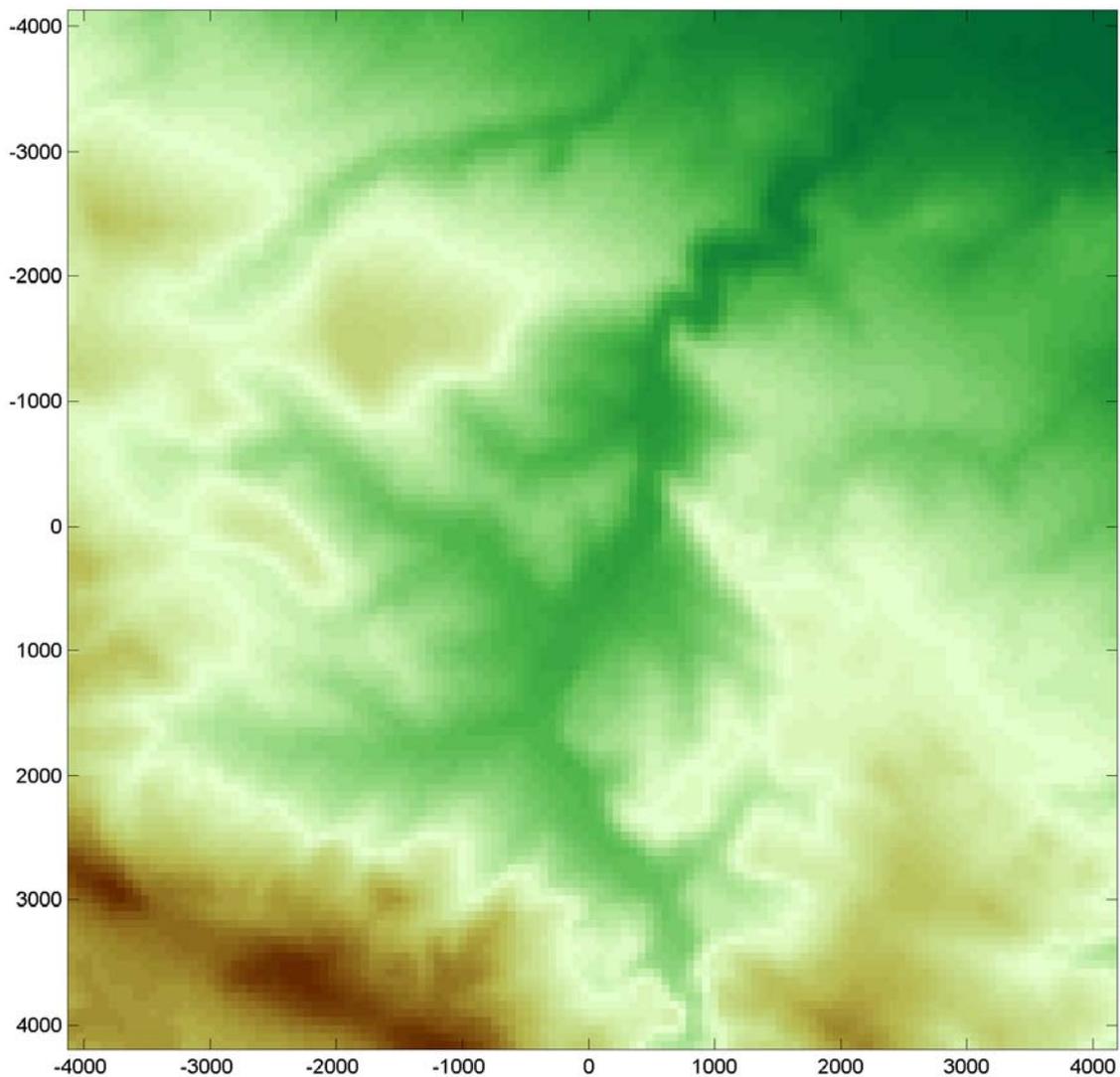
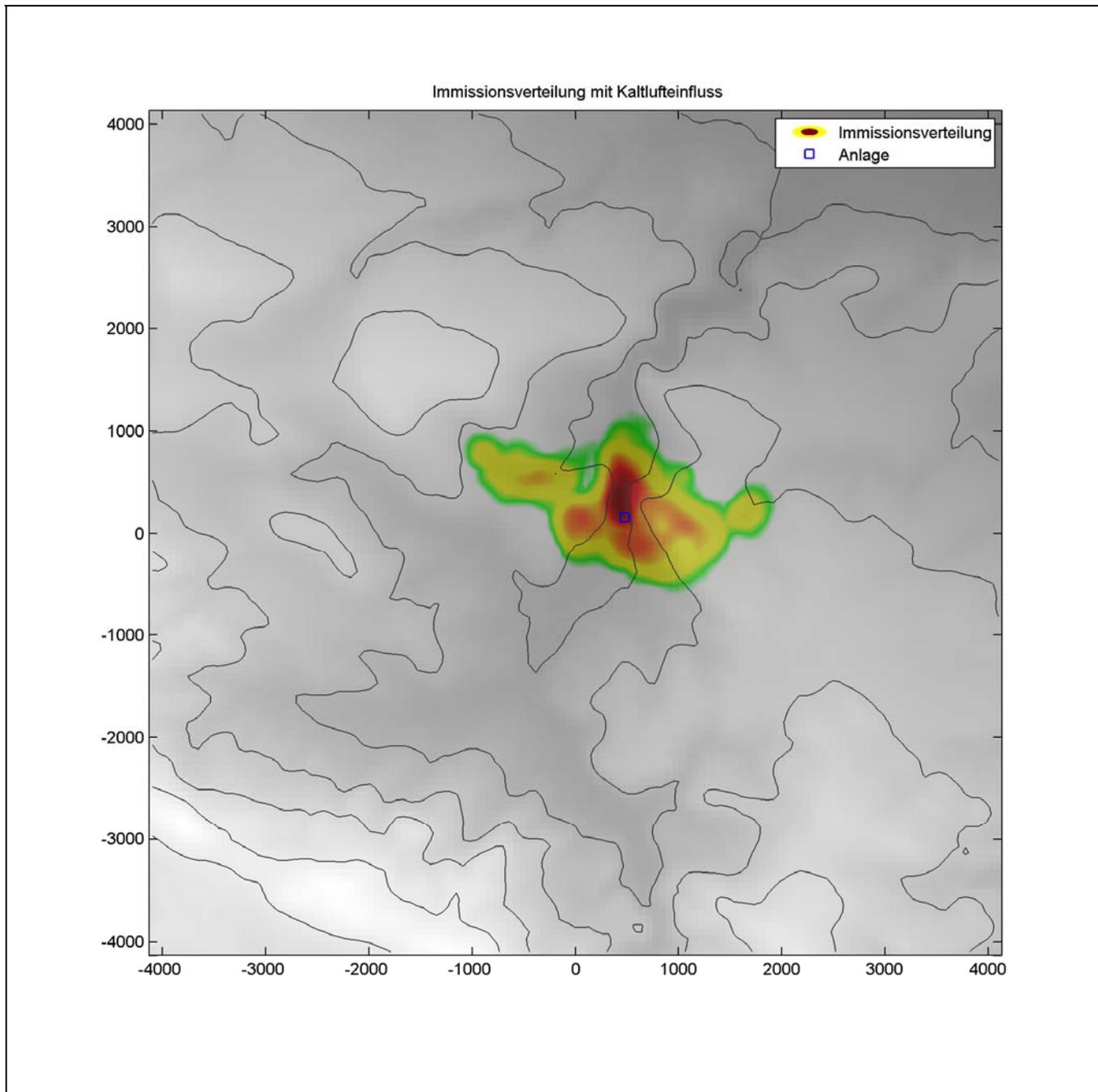


Abbildung 7: Orographie für Beispiel 1

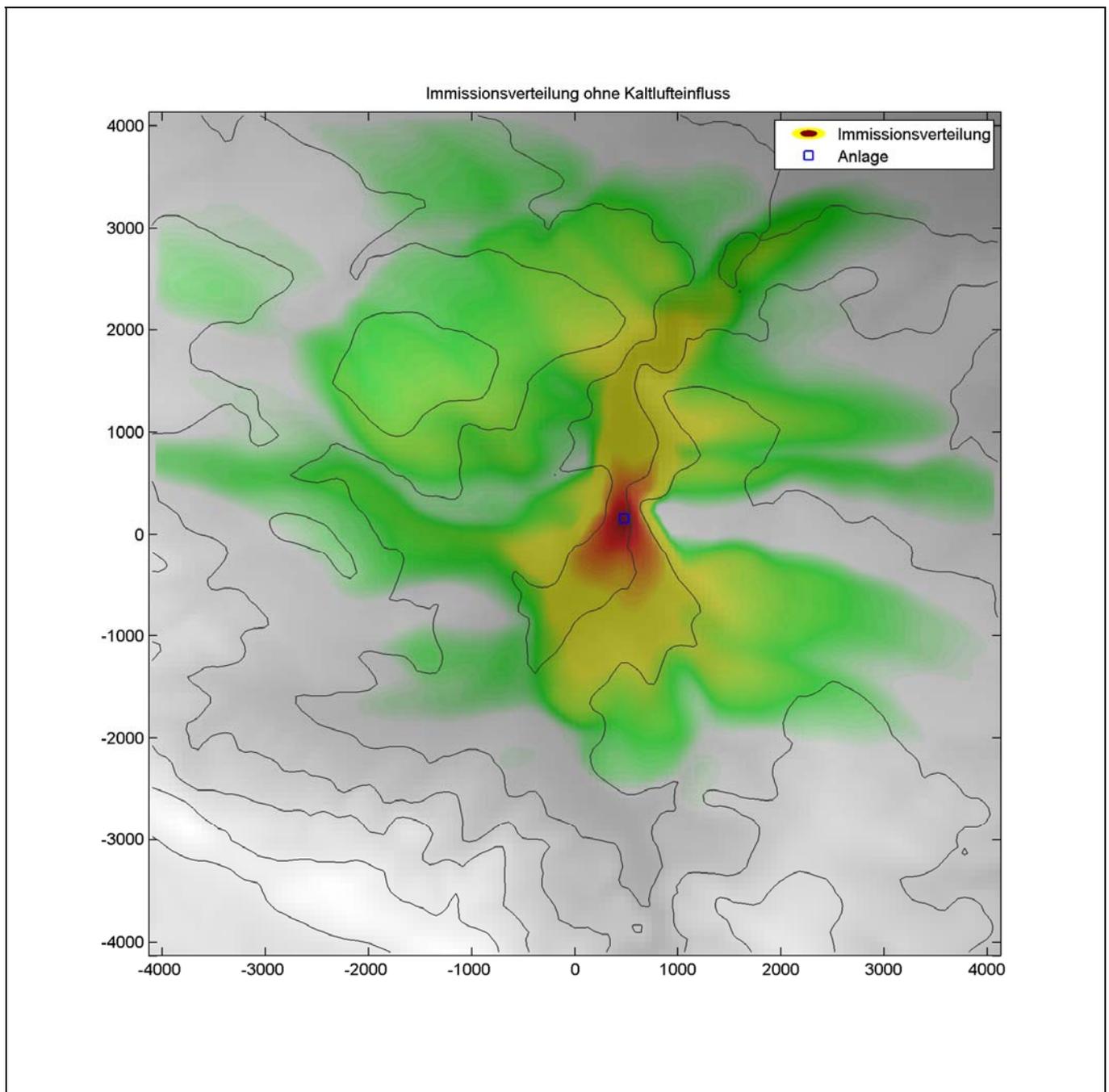
Für eine Anlage mit einer Emissionshöhe zwischen 0 und 7 Metern wurde anhand des beschriebenen Algorithmus die Immissionsverteilung ermittelt, wie sie sich sechs Stunden nach Beginn einer Kaltluftepisode ohne Advektion einstellt. Die Immissionsverteilung der fiktiven Luftbeimengung ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Skala der dargestellten Immissionskonzentration wurde weggelassen, weil hier lediglich die räumliche Verteilung von Interesse ist. Die Orographie wurde als Grauschattierung unterlegt und mit Höhenlinien versehen (hellere Schattierung bedeutet größere Geländehöhe).



**Abbildung 8: Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung nach einer Kaltluftepisode von sechs Stunden ohne Advektion (Beispiel 1)**

Der Emittent befindet sich in einem Tal, die Kaltluft fließt in Richtung Norden an der Anlage vorbei und erzeugt ein starkes Immissionsmaximum im Talbereich unmittelbar nördlich der Anlage (dunkelroter Bereich). Schwächere Ausläufer der Immissionsverteilung befinden sich in östlicher und nordwestlicher Richtung. Dies erklärt sich durch einen Rückstau der Kaltluft im Bereich des Talkessels oberhalb der gewundenen Verengung des Tals nordöstlich der Anlage (siehe dazu auch Abbildung 7).

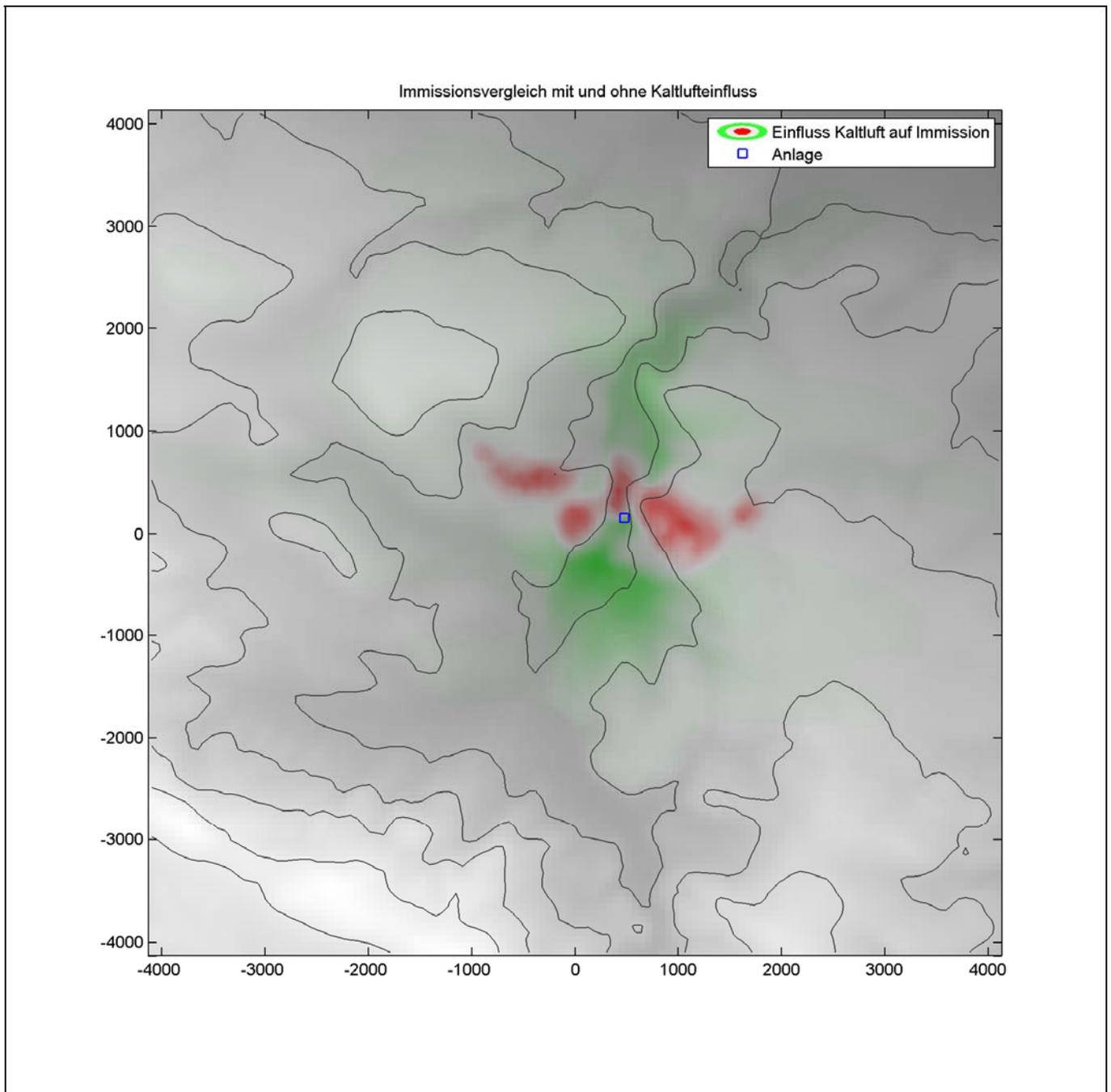
Die folgende Abbildung stellt die Immissionsverteilung dar, wie sie nach sechs Stunden ohne Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen für windschwache Nächte modelliert wird, wobei die Richtungsverteilung der Advektion repräsentativ für den Anlagenstandort ist und über alle Anströmrichtungen entsprechend der Richtungsverteilung gewichtet gemittelt wurde.



**Abbildung 9: Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung für windschwache Nächte nach sechs Stunden als Mittelung über eine repräsentative Richtungsverteilung der Advektion (Beispiel 1)**

Die modellierte Immissionsverteilung wird im Wesentlichen durch das Maximum der Hauptwindrichtung bei Schwachwinden und durch Geländeeinflüsse dominiert.

Aus dem Vergleich der ermittelten Immissionsverteilungen bei Kaltlufteinfluss (ohne Advektion) und durch Advektion (ohne katabatischen Wind) resultiert die in der folgenden Abbildung dargestellte Wirkung von Kaltluftabflüssen.



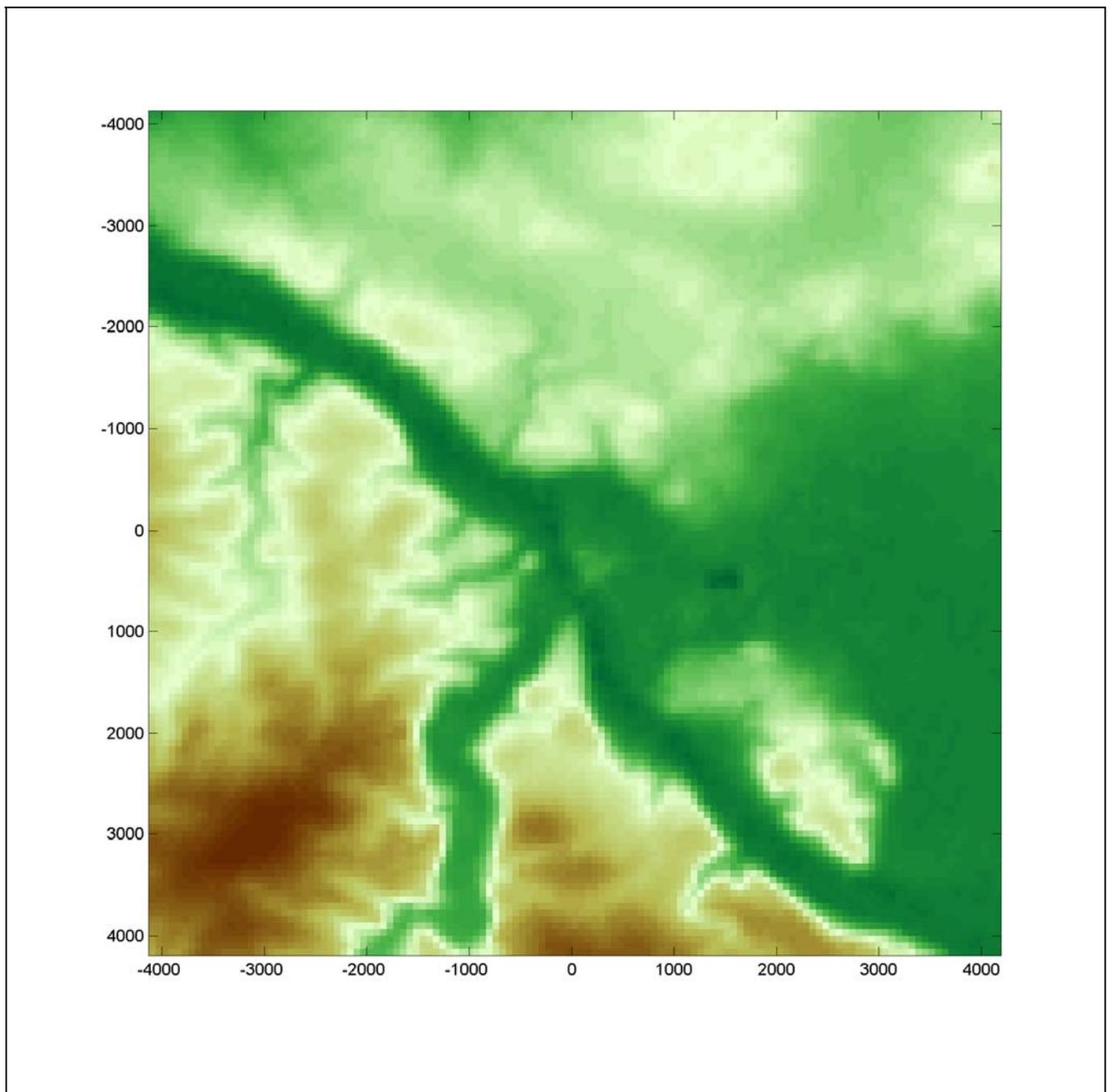
**Abbildung 10: Prognostizierte Wirkung von Kaltluftabflüssen für Beispiel 1**

Erwartungsgemäß tritt talaufwärts der Anlage eine entlastende Wirkung der Kaltluftabflüsse auf. Dort wird durch Kaltluftabflüsse zusätzliche Luft herangeführt, die für eine stärkere Verdünnung der Luftbeimengungen sorgt. Unmittelbar talabwärts der Anlage stellt sich eine belastende Wirkung der Kaltluftabflüsse ein, weil die emittierten Luftbeimengungen durch Kaltluftabflüsse verstärkt zu diesen Immissionsorten transportiert werden (roter Bereich unmittelbar nördlich der Anlage). Weiter entfernt im Talverlauf stellt sich wieder eine entlastende Wirkung ein, weil dort der Effekt der Verdünnung durch zusätzlich von den Talhängen herangeführte Kaltluft überwiegt. Seitlich der Anlage stellen sich Bereiche mit belastender Wirkung der Kaltluftabflüsse ein, weil sich dort ein Rückstau der Kaltluftabflüsse im Talkessel ausbildet (siehe auch Abbildung 8).

Liegen zu beurteilende Immissionsorte in den rot dargestellten Bereichen von Abbildung 10, so wäre es in Beispiel 1 erforderlich, eine rechnerische Einbeziehung der Kaltluftabflüsse in die Ausbreitungsrechnung gemäß Abschnitt 2.2.3 vorzunehmen.

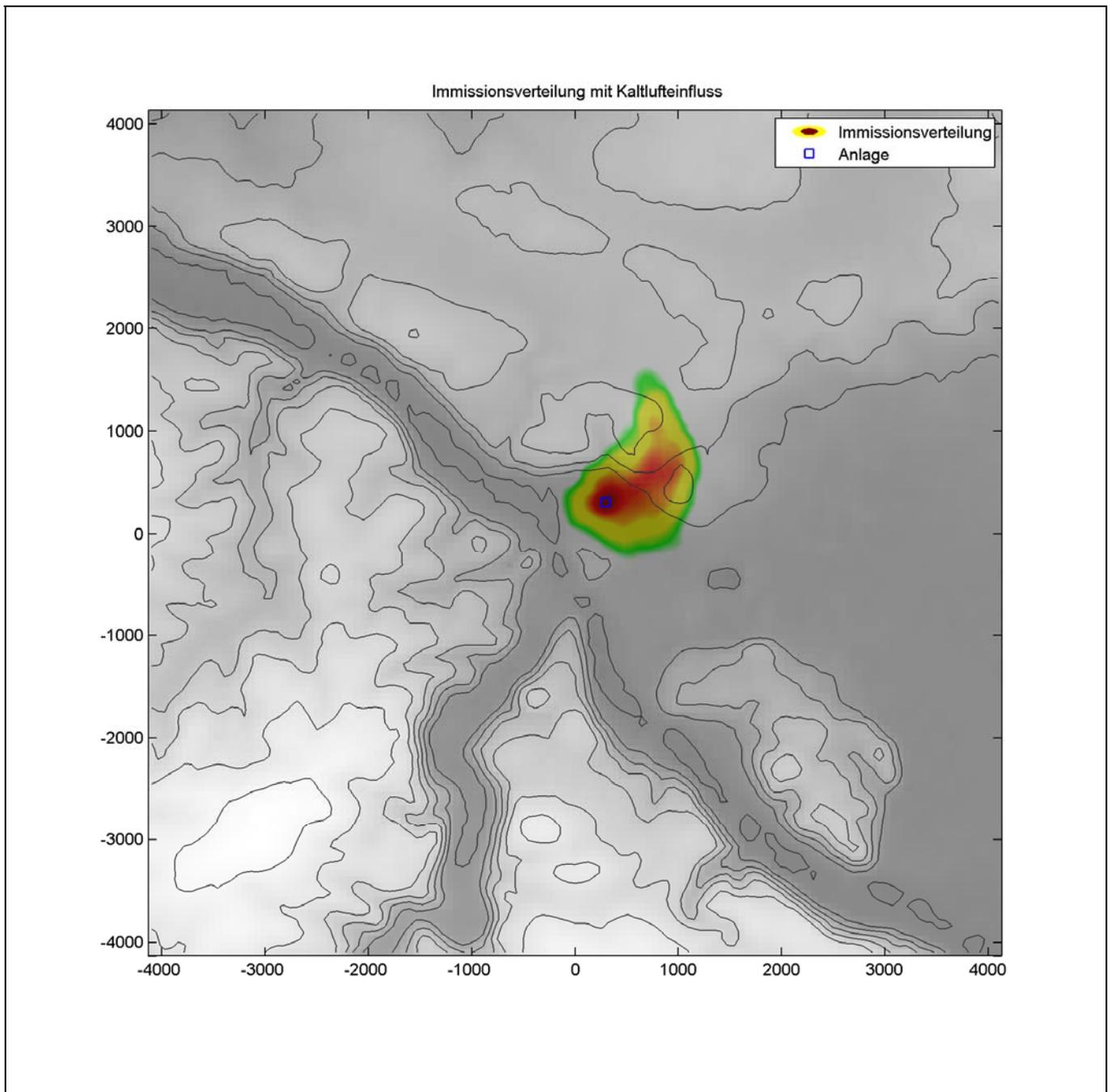
## 5.2 Beispiel 2

Die folgende Abbildung stellt die zugrundeliegende Orographie für Beispiel 2 dar.



**Abbildung 11: Orographie für Beispiel 2**

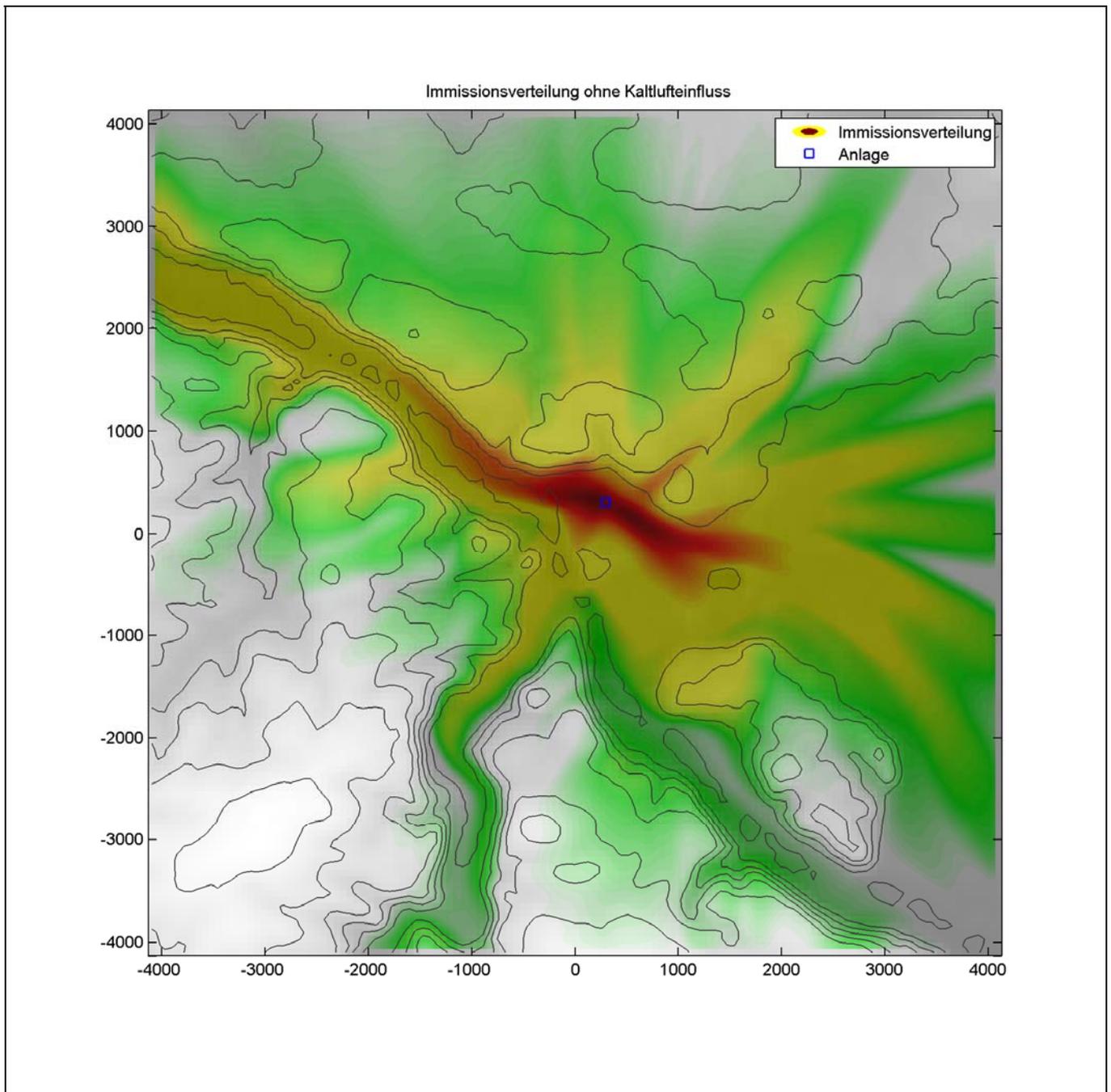
Für eine Anlage mit einer Emissionshöhe bei 19 Metern wurde anhand des beschriebenen Algorithmus die Immissionsverteilung ermittelt, wie sie sich sechs Stunden nach Beginn einer Kaltluftepisode ohne Advektion einstellt. Die Immissionsverteilung der fiktiven Luftbeimengung ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Skala der dargestellten Immissionskonzentration wurde weggelassen, weil hier lediglich die räumliche Verteilung von Interesse ist. Die Orographie wurde als Grauschattierung unterlegt und mit Höhenlinien versehen (hellere Schattierung bedeutet größere Geländehöhe).



**Abbildung 12: Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung nach einer Kaltluftepisode von sechs Stunden ohne Advektion (Beispiel 2)**

Der Emittent befindet sich in einem breiten Tal, wobei seitlich (aus Südwesten) ein weiteres Tal einmündet. Die Kaltluft fließt in Richtung Nordosten an der Anlage vorbei und erzeugt ein starkes Immissionsmaximum im Bereich unmittelbar nordöstlich der Anlage (dunkelroter Bereich). Dabei folgt der katabatisch bedingte Transport der Luftbeimengungen nicht dem Verlauf des Haupttales in Richtung Nordwesten. Dies erklärt sich durch den Einfluss des einmündenden Tales, das im Bereich der Anlage katabatische Winde in Richtung Nordosten verursacht. Möglicherweise kommt es im Bereich der Einmündung des Seitentales in Kombination mit der Erweiterung des Haupttales zu einem Kessel im Bereich der Anlage sogar zu Zirkulationen im Uhrzeigersinn, was hier jedoch nicht näher betrachtet wurde.

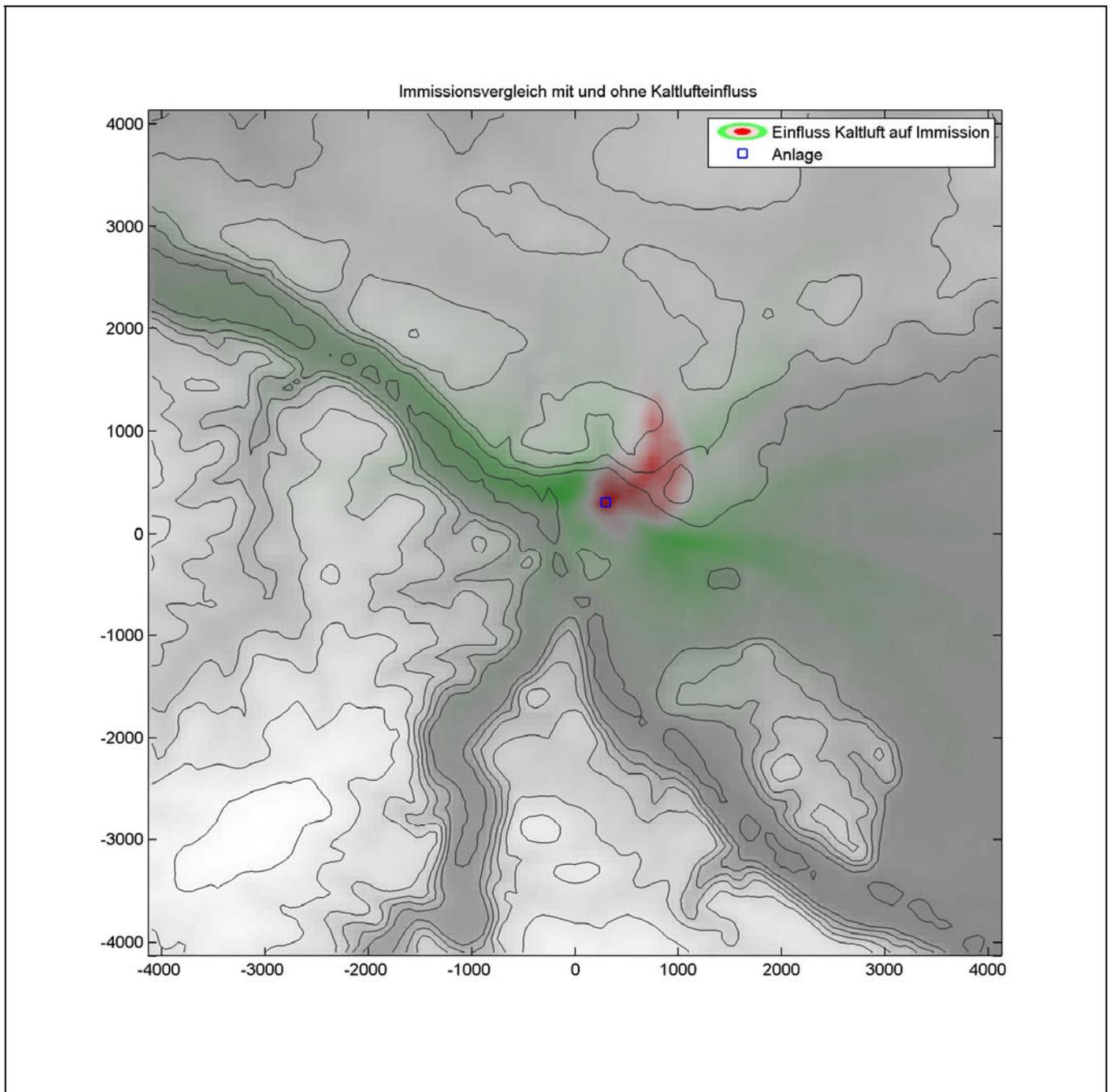
Die folgende Abbildung stellt die Immissionsverteilung dar, wie sie nach sechs Stunden ohne Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen für windschwache Nächte modelliert wird, wobei die Richtungsverteilung der Advektion repräsentativ für den Anlagenstandort ist und über alle Anströmrichtungen entsprechend der Richtungsverteilung gewichtet gemittelt wurde.



**Abbildung 13: Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung für windschwache Nächte nach sechs Stunden als Mittelung über eine repräsentative Richtungsverteilung der Advektion (Beispiel 2)**

Die modellierte Immissionsverteilung wird im Wesentlichen durch das Maximum der Hauptwindrichtung bei Schwachwinden und durch Geländeeinflüsse dominiert.

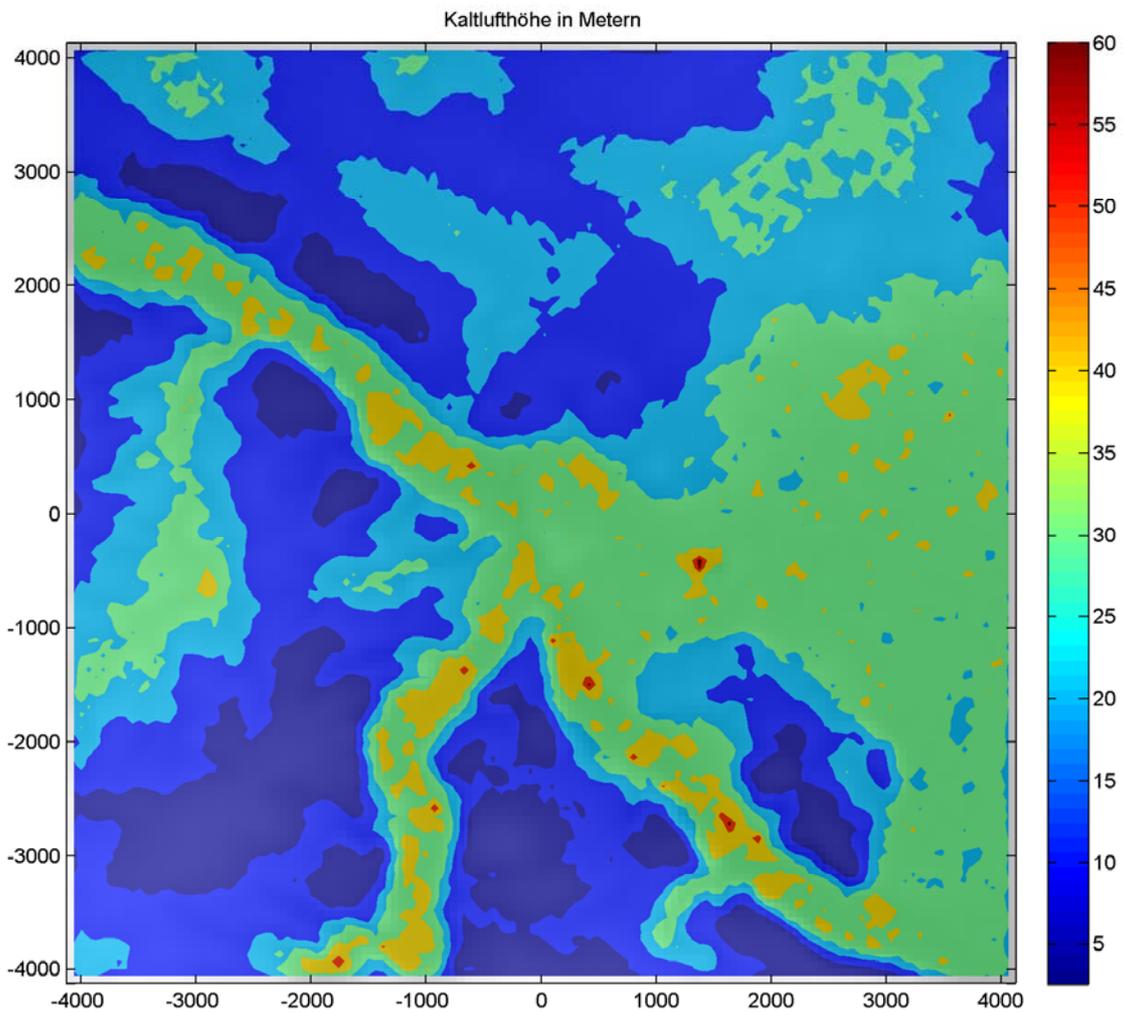
Aus dem Vergleich der ermittelten Immissionsverteilungen bei Kaltlufteinfluss (ohne Advektion) und durch Advektion (ohne katabatischen Wind) resultiert die in der folgenden Abbildung dargestellte Wirkung von Kaltluftabflüssen.



**Abbildung 14: Prognostizierte Wirkung von Kaltluftabflüssen für Beispiel 2**

Erwartungsgemäß tritt talaufwärts der Anlage eine entlastende Wirkung der Kaltluftabflüsse auf. Dort wird durch Kaltluftabflüsse zusätzliche Luft herangeführt, die für eine stärkere Verdünnung der Luftbeimengungen sorgt. Im vorliegenden Beispiel tritt auch talabwärts (bezogen auf das Haupttal in Richtung Nordwesten) eine entlastende Wirkung ein, weil Luftbeimengungen nicht vornehmlich dorthin transportiert werden und ein weiterer Verdünnungseffekt durch die seitlichen Talhänge eintritt.

Nordöstlich der Anlage stellt sich eine belastende Wirkung der Kaltluftabflüsse ein, weil die emittierten Luftbeimengungen durch katabatische Winde aus dem einmündenden Seitental verstärkt zu diesen Immissionsorten transportiert werden (roter Bereich unmittelbar nördlich der Anlage). Dies kann dazu führen, dass sogar (in Bezug auf ihre Geländehöhe) höher als die Anlage gelegene Immissionsorte durch Kaltluftabflüsse stärker von Luftbeimengungen betroffen sind. Als Besonderheit ist in diesem Beispiel noch zu vermerken, dass trotz der großen Abgabehöhe von 19 m die emittierten Luftbeimengungen von den katabatischen Winden beeinflusst werden. Im Anlagenbereich wurden Kaltluflhöhen von bis zu 35 m prognostiziert, was die Beeinflussung erklärt (siehe dazu auch die folgende Abbildung).

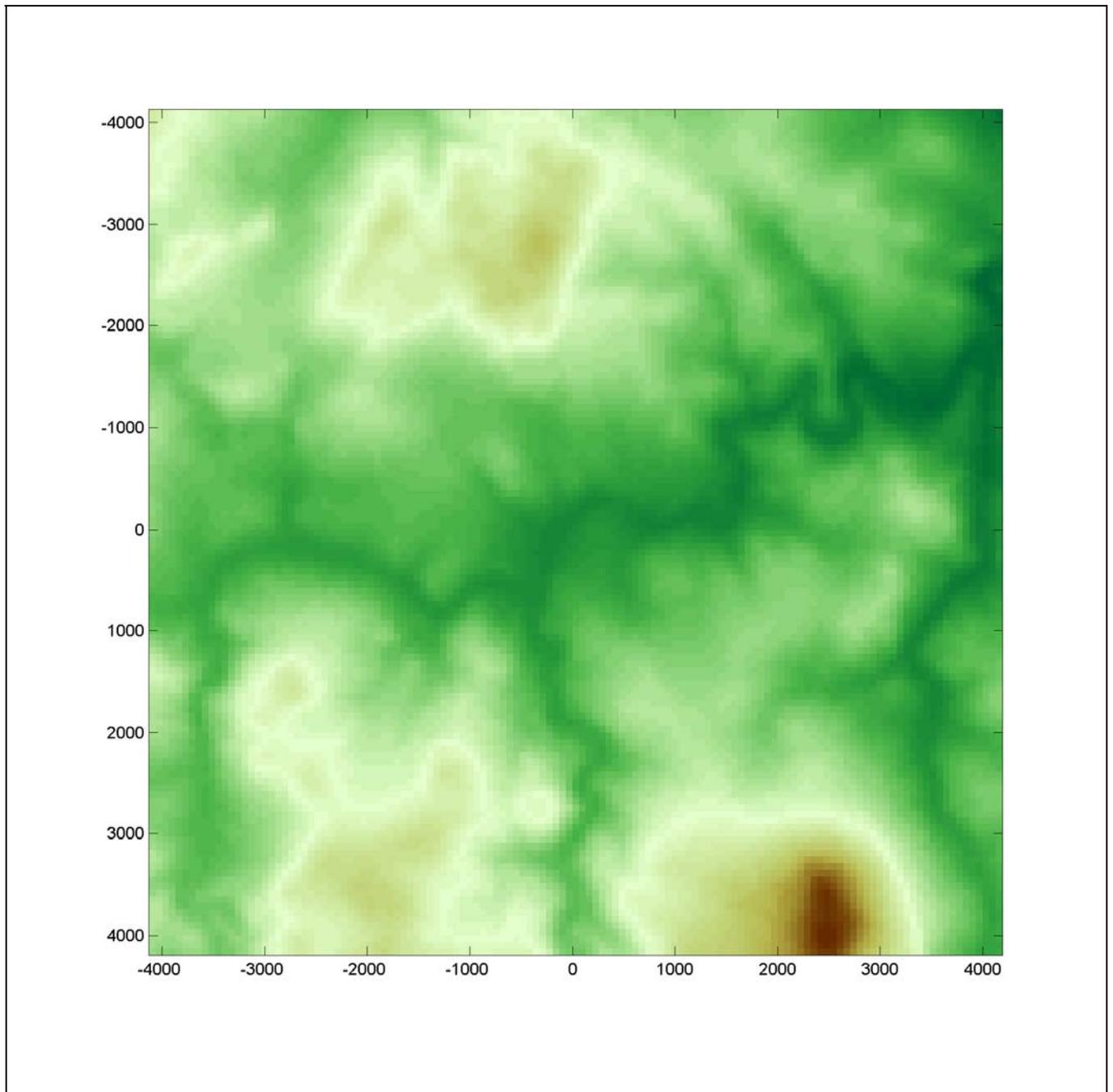


**Abbildung 15: Prognostizierte Kaltlufthöhe für Beispiel 2**

Liegen zu beurteilende Immissionsorte in den rot dargestellten Bereichen von Abbildung 14, so wäre es in Beispiel 2 erforderlich, eine rechnerische Einbeziehung der Kaltluftabflüsse in die Ausbreitungsrechnung gemäß Abschnitt 2.2.3 vorzunehmen.

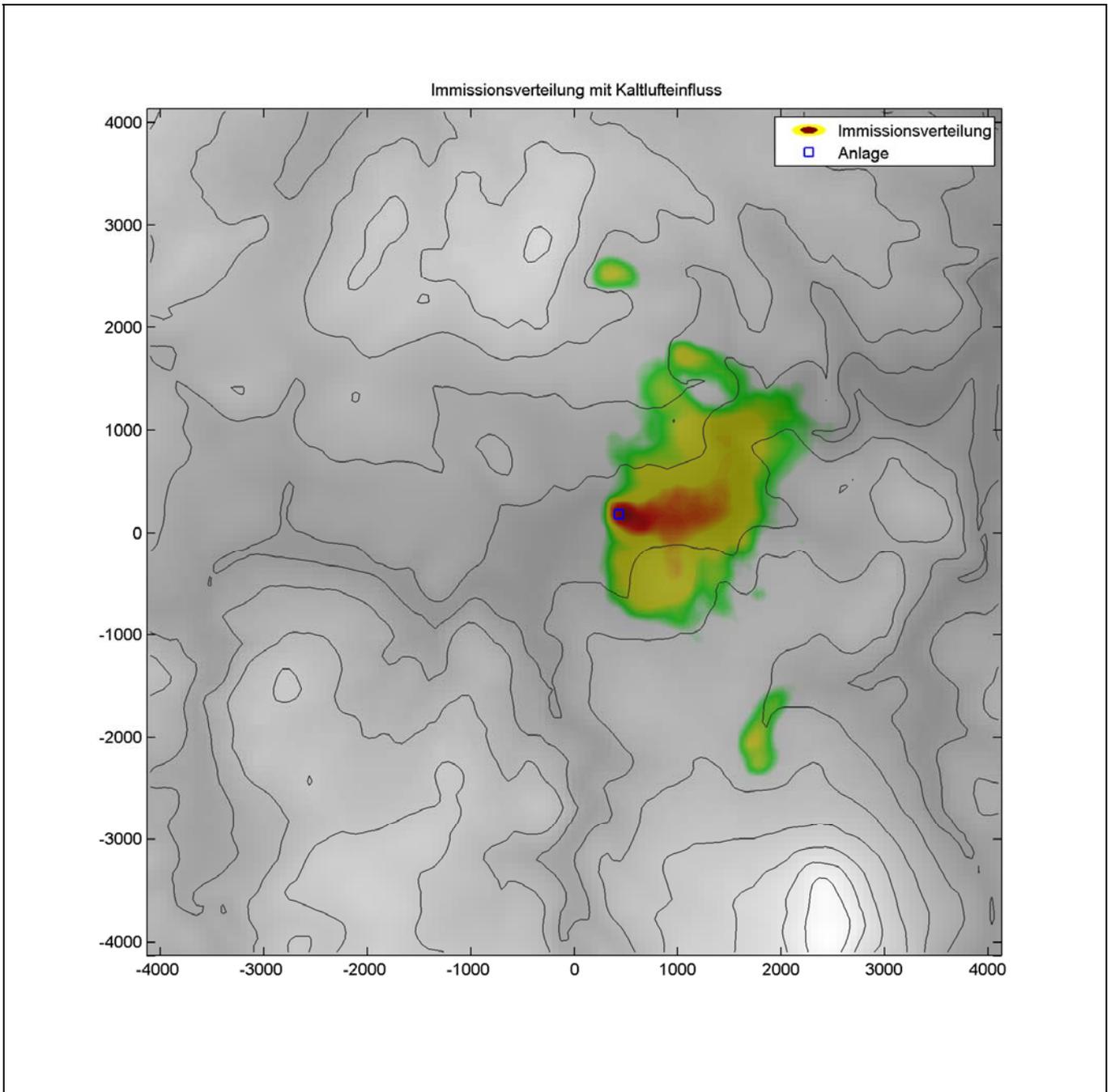
## 5.3 Beispiel 3

Die folgende Abbildung stellt die zugrundeliegende Orographie für Beispiel 3 dar.



**Abbildung 16: Orographie für Beispiel 3**

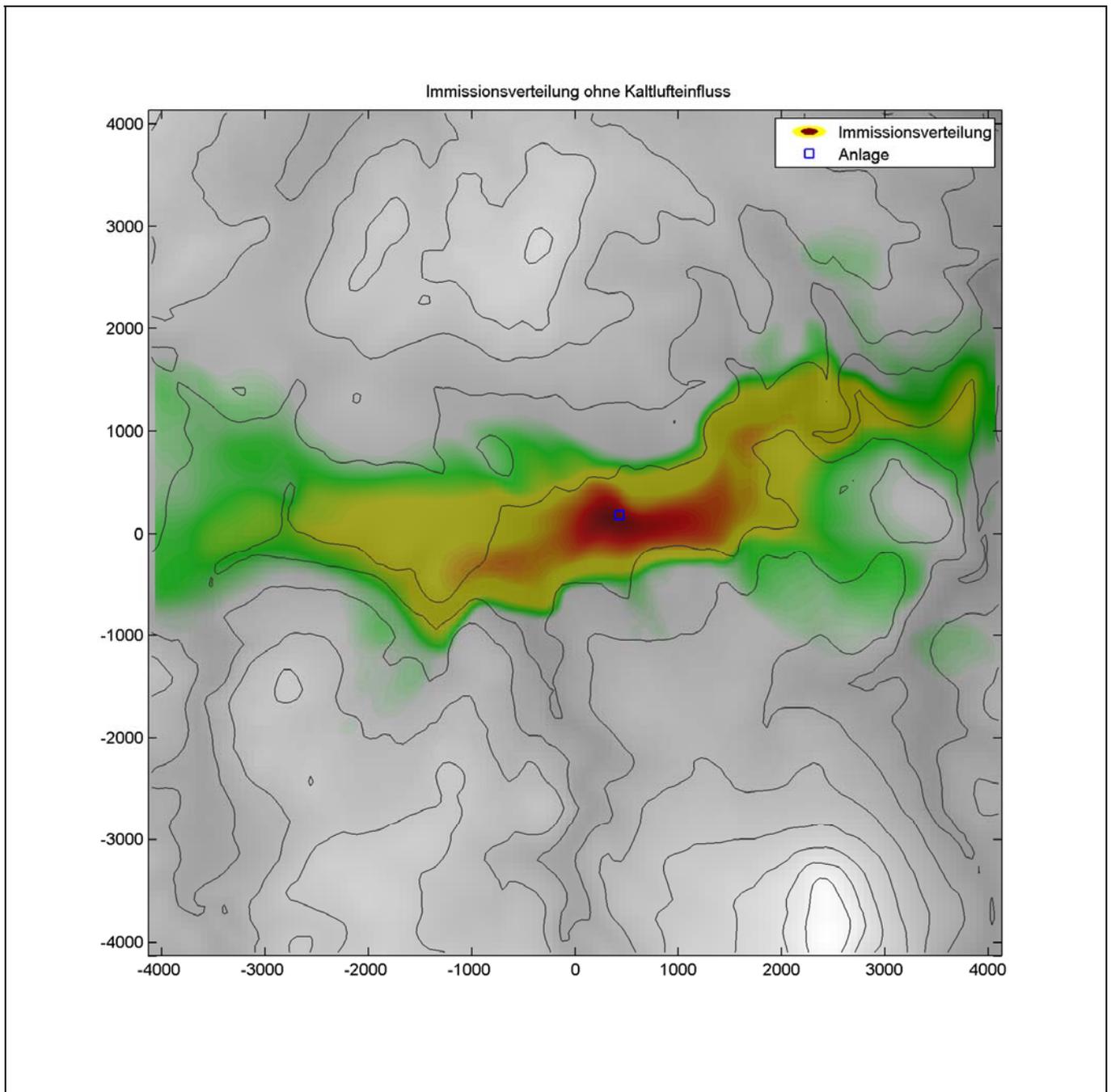
Für eine Anlage mit einer Emissionshöhe bei 13 Metern wurde anhand des beschriebenen Algorithmus die Immissionsverteilung ermittelt, wie sie sich sechs Stunden nach Beginn einer Kaltluftepisode ohne Advektion einstellt. Die Immissionsverteilung der fiktiven Luftbeimengung ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Skala der dargestellten Immissionskonzentration wurde weggelassen, weil hier lediglich die räumliche Verteilung von Interesse ist. Die Orographie wurde als Grauschattierung unterlegt und mit Höhenlinien versehen (hellere Schattierung bedeutet größere Geländehöhe).



**Abbildung 17: Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung nach einer Kaltluftepisode von sechs Stunden ohne Advektion (Beispiel 3)**

Der Emittent befindet sich im östlichen Teil eines Talkessels, wobei zwei Täler aus Süden und Westen münden und ein sich nach Osten hin verengendes und mäanderndes Tal bilden. Die Kaltluft fließt in Richtung Osten an der Anlage vorbei und erzeugt ein starkes Immissionsmaximum im Bereich unmittelbar östlich der Anlage (dunkelroter Bereich). Schwächere Ausläufer der Immissionsverteilung befinden sich in nördlicher und südlicher Richtung. Dies erklärt sich durch einen Rückstau der Kaltluft im Bereich des Talkessels oberhalb der gewundenen Verengung des Tals östlich der Anlage (siehe dazu auch Beispiel 1).

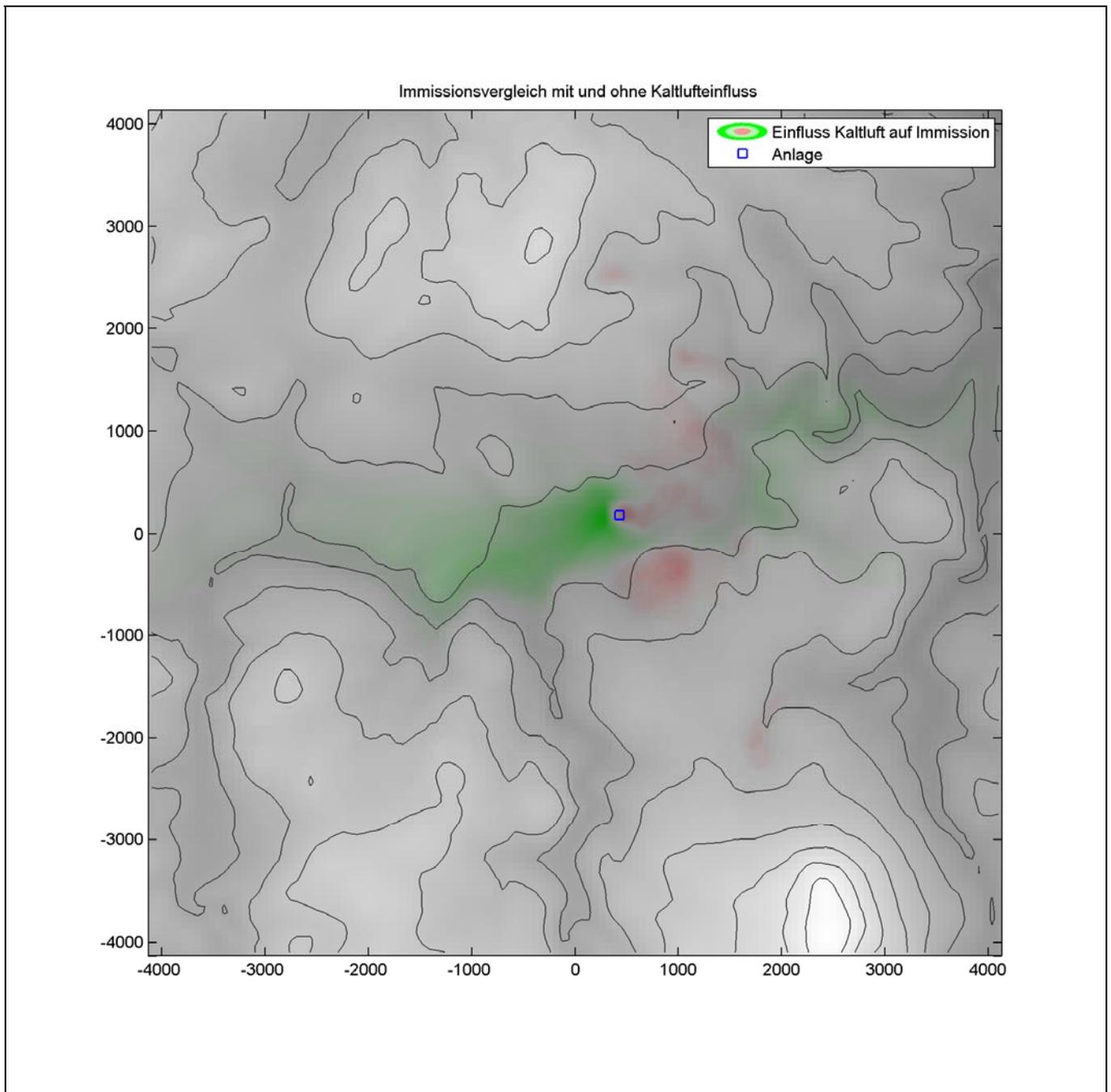
Die folgende Abbildung stellt die Immissionsverteilung dar, wie sie nach sechs Stunden ohne Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen für windschwache Nächte modelliert wird, wobei die Richtungsverteilung der Advektion repräsentativ für den Anlagenstandort ist und über alle Anströmrichtungen entsprechend der Richtungsverteilung gewichtet gemittelt wurde.



**Abbildung 18: Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung für windschwache Nächte nach sechs Stunden als Mittelung über eine repräsentative Richtungsverteilung der Advektion (Beispiel 3)**

Die modellierte Immissionsverteilung wird im Wesentlichen durch das Maximum der Hauptwindrichtung bei Schwachwinden und durch Geländeeinflüsse dominiert.

Aus dem Vergleich der ermittelten Immissionsverteilungen bei Kaltlufteinfluss (ohne Advektion) und durch Advektion (ohne katabatischen Wind) resultiert die in der folgenden Abbildung dargestellte Wirkung von Kaltluftabflüssen.



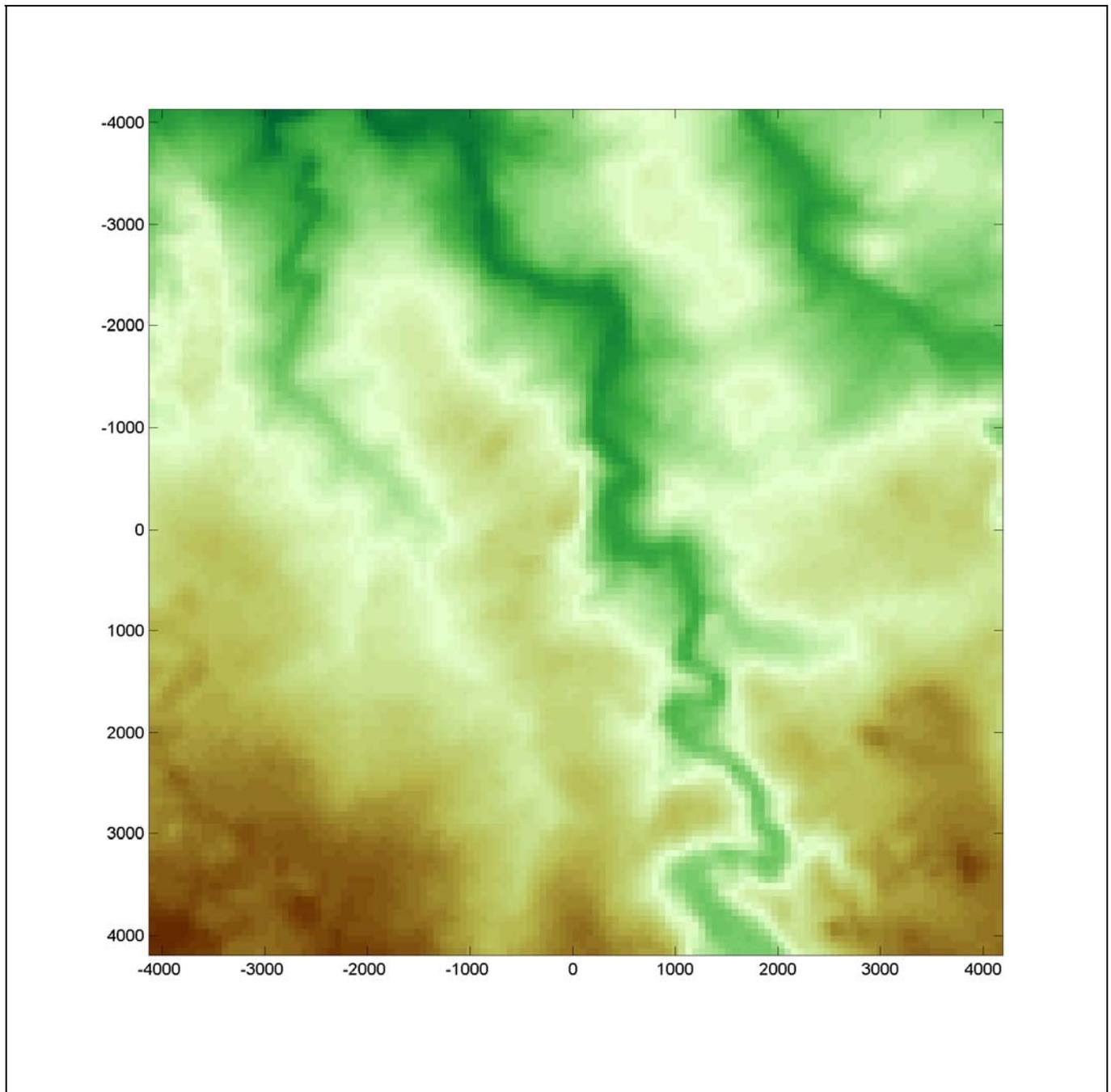
**Abbildung 19: Prognostizierte Wirkung von Kaltluftabflüssen für Beispiel 3**

Erwartungsgemäß tritt talaufwärts der Anlage eine entlastende Wirkung der Kaltluftabflüsse auf. Dort wird durch Kaltluftabflüsse zusätzliche Luft herangeführt, die für eine stärkere Verdünnung der Luftbeimengungen sorgt. Unmittelbar talabwärts der Anlage stellt sich eine belastende Wirkung der Kaltluftabflüsse ein, weil die emittierten Luftbeimengungen durch Kaltluftabflüsse verstärkt zu diesen Immissionsorten transportiert werden (roter Bereich unmittelbar östlich der Anlage). Weiter entfernt im Talverlauf stellt sich wieder eine entlastende Wirkung ein, weil dort der Effekt der Verdünnung durch zusätzlich von den Talhängen herangeführte Kaltluft überwiegt. Nordöstlich und südöstlich der Anlage stellen sich Bereiche mit belastender Wirkung der Kaltluftabflüsse ein, weil sich dort ein Rückstau der Kaltluftabflüsse im Talkessel ausbildet. Die nur schwach rote Einfärbung deutet darauf hin, dass aufgrund der Emissionshöhe von 13 m nur ein kleiner Teil der emittierten Luftbeimengungen von den katabatischen Winden erfasst wird.

Liegen zu beurteilende Immissionsorte in den rot dargestellten Bereichen von Abbildung 19, so wäre es in Beispiel 3 erforderlich, eine rechnerische Einbeziehung der Kaltluftabflüsse in die Ausbreitungsrechnung gemäß Abschnitt 2.2.3 vorzunehmen.

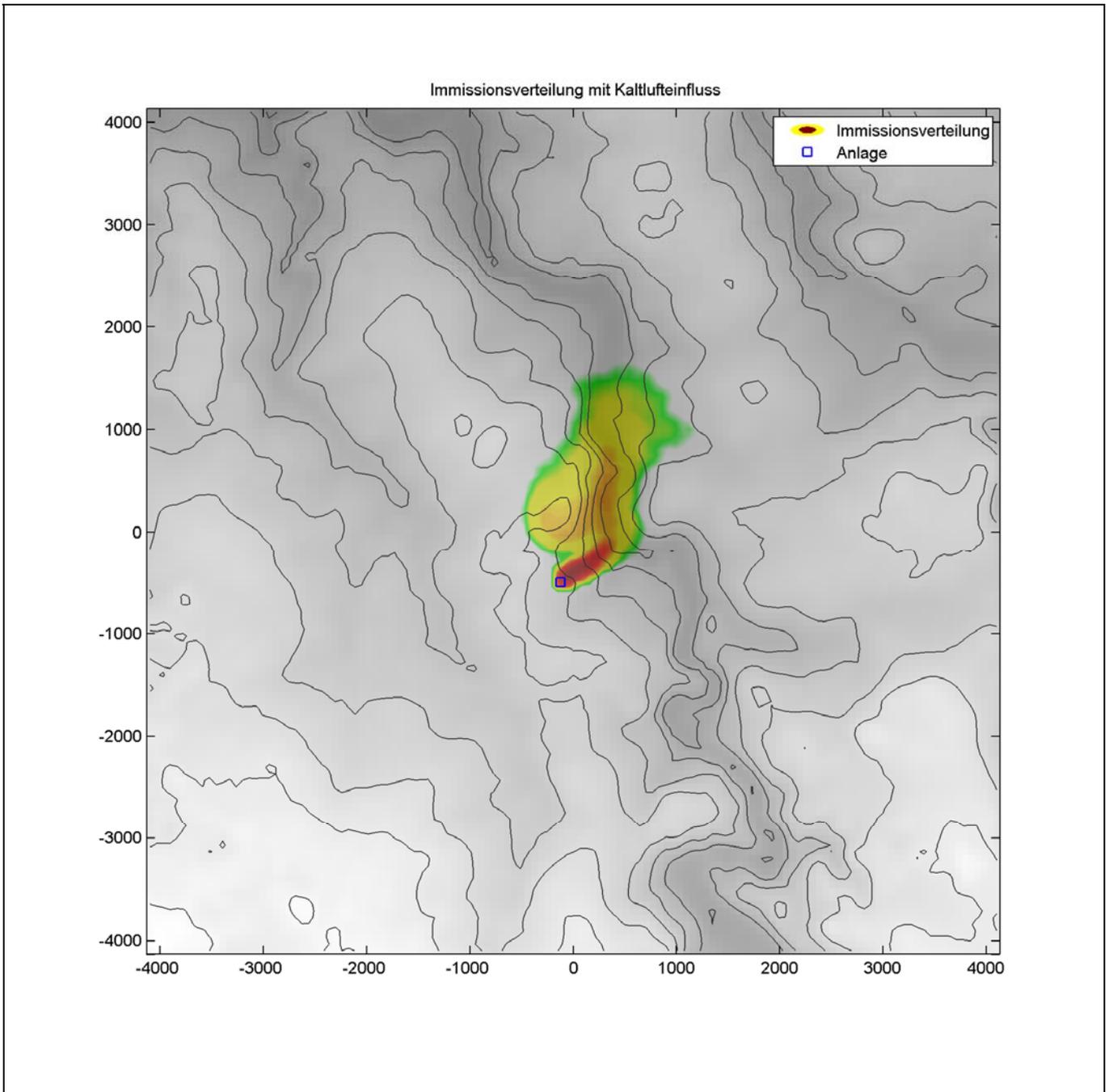
## 5.4 Beispiel 4

Die folgende Abbildung stellt die zugrundeliegende Orographie für Beispiel 4 dar.



**Abbildung 20: Orographie für Beispiel 4**

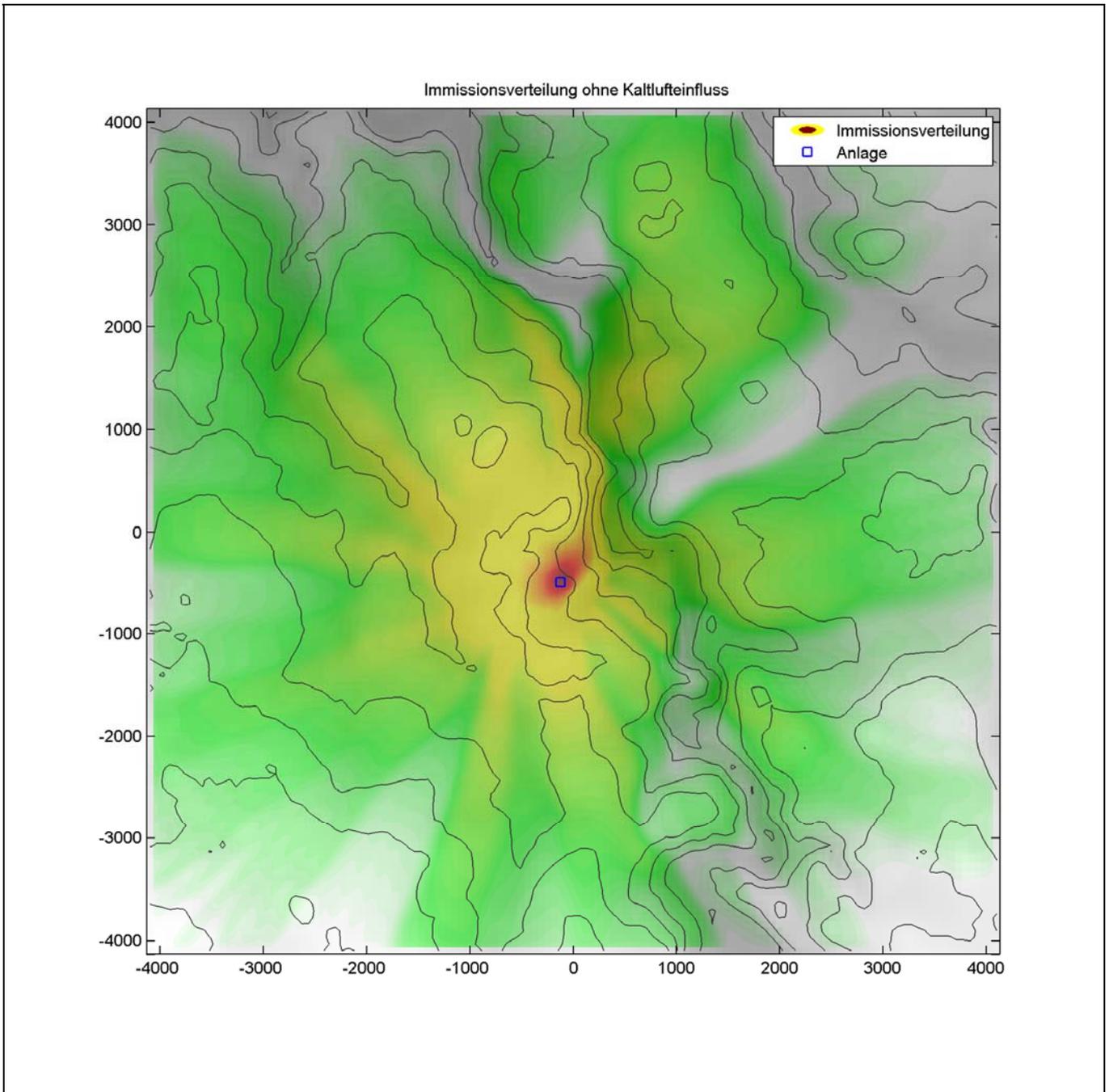
Für eine Anlage mit einer Emissionshöhe bei 3 Metern wurde anhand des beschriebenen Algorithmus die Immissionsverteilung ermittelt, wie sie sich sechs Stunden nach Beginn einer Kaltluftepisode ohne Advektion einstellt. Die Immissionsverteilung der fiktiven Luftbeimengung ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Skala der dargestellten Immissionskonzentration wurde weggelassen, weil hier lediglich die räumliche Verteilung von Interesse ist. Die Orographie wurde als Grauschattierung unterlegt und mit Höhenlinien versehen (hellere Schattierung bedeutet größere Geländehöhe).



**Abbildung 21: Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung nach einer Kaltluftepisode von sechs Stunden ohne Advektion (Beispiel 4)**

Der Emittent befindet sich am westlichen Hang eines ausgeprägten Tals, das sich von Süden nach Norden erstreckt. Die Kaltluft fließt in Richtung Osten an der Anlage vorbei und zunächst den Hang des Tals hinab und erzeugt ein starkes Immissionsmaximum im Bereich unmittelbar östlich der Anlage (dunkelroter Bereich). Danach mündet der mit Luftbeimengungen behaftete katabatische Wind in den Nord-Süd-Strom des Tales. Weil sich im Bereich der Anlage ein Mäander des Tales kurzzeitig in Ost-West-Richtung erstreckt, kommt es durch Trägheit der Kaltluft zu verstärkten Immissionen am Westhang des Tales unmittelbar nördlich der Anlage.

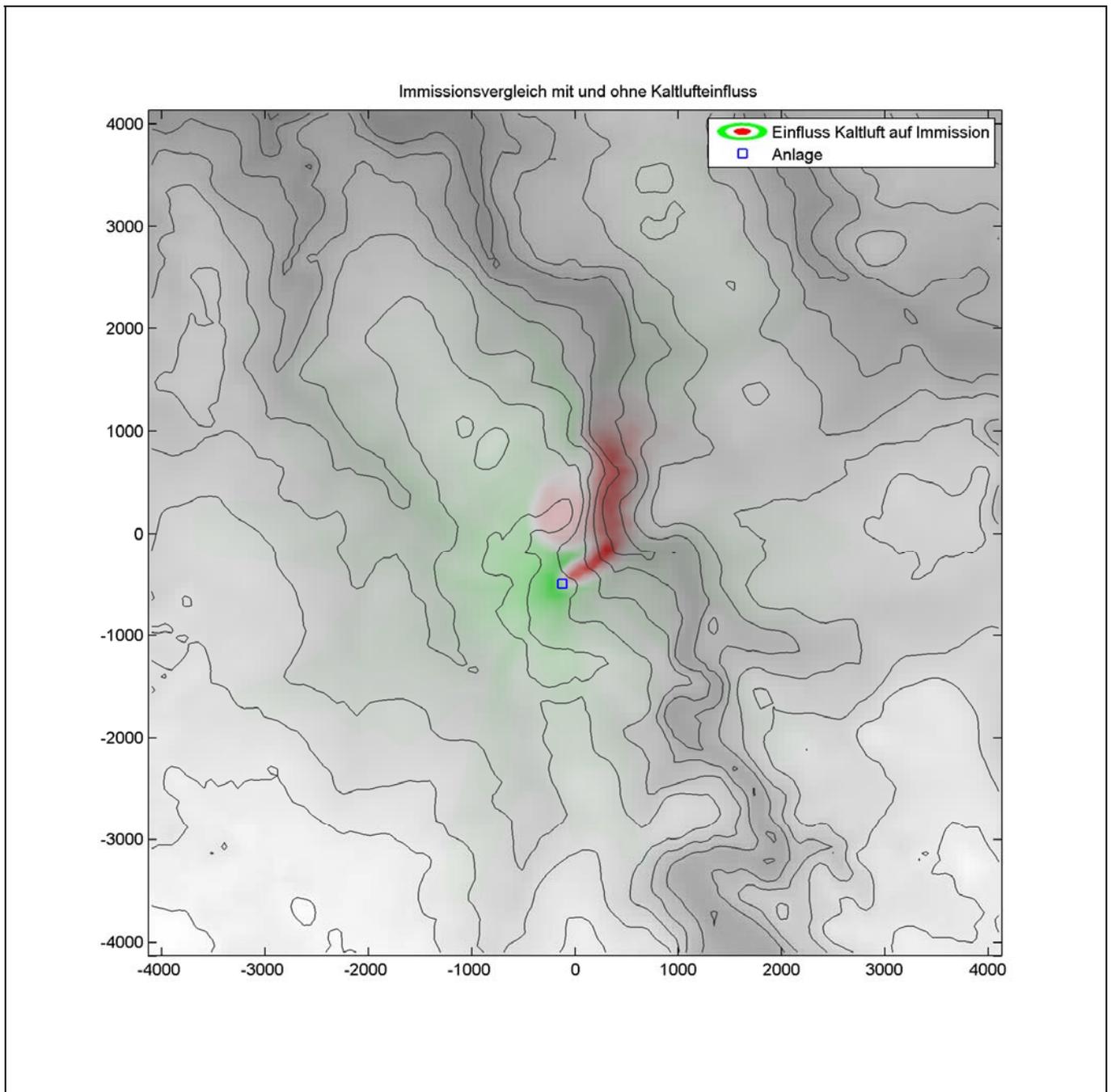
Die folgende Abbildung stellt die Immissionsverteilung dar, wie sie nach sechs Stunden ohne Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen für windschwache Nächte modelliert wird, wobei die Richtungsverteilung der Advektion repräsentativ für den Anlagenstandort ist und über alle Anströmrichtungen entsprechend der Richtungsverteilung gewichtet gemittelt wurde.



**Abbildung 22: Immissionsverteilung einer fiktiven Luftbeimengung für windschwache Nächte nach sechs Stunden als Mittelung über eine repräsentative Richtungsverteilung der Advektion (Beispiel 4)**

Die modellierte Immissionsverteilung wird im Wesentlichen durch das Maximum der Hauptwindrichtung bei Schwachwinden und durch Geländeeinflüsse dominiert.

Aus dem Vergleich der ermittelten Immissionsverteilungen bei Kaltlufteinfluss (ohne Advektion) und durch Advektion (ohne katabatischen Wind) resultiert die in der folgenden Abbildung dargestellte Wirkung von Kaltluftabflüssen.



**Abbildung 23: Prognostizierte Wirkung von Kaltluftabflüssen für Beispiel 4**

Erwartungsgemäß tritt hangaufwärts der Anlage eine entlastende Wirkung der Kaltluftabflüsse auf. Dort wird durch Kaltluftabflüsse zusätzliche Luft herangeführt, die für eine stärkere Verdünnung der Luftbeimengungen sorgt. Unmittelbar hangabwärts der Anlage, danach talabwärts in Richtung Norden und am Westhang des Tales nördlich der Anlage stellt sich eine belastende Wirkung der Kaltluftabflüsse ein, weil die emittierten Luftbeimengungen durch Kaltluftabflüsse verstärkt zu diesen Immissionsorten transportiert werden. Die starke rote Einfärbung östlich der Anlage und der weit dem Tal folgende rote Bereich deuten darauf hin, dass aufgrund der Emissionshöhe von nur 3 m ein beträchtlicher Teil der emittierten Luftbeimengungen von den katabatischen Winden erfasst wird.

Liegen zu beurteilende Immissionsorte in den rot dargestellten Bereichen von Abbildung 23, so wäre es in Beispiel 2 erforderlich, eine rechnerische Einbeziehung der Kaltluftabflüsse in die Ausbreitungsrechnung gemäß Abschnitt 2.2.3 vorzunehmen.

# Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), 2002.
- [2] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Leitfaden zur Beurteilung von TA Luft Ausbreitungsrechnungen in Baden-Württemberg, Karlsruhe, 2004.
- [3] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Immissionsprognosegutachten - Ein Leitfaden für die Erstellung und Bewertung, Dresden, 2006.
- [4] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: Leitfaden zur Erstellung von Immissionsprognosen mit AUSTAL2000 in Genehmigungsverfahren nach TA Luft und der Geruchsimmisions-Richtlinie, Essen, 2006.
- [5] Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL: VDI-Richtlinie 3783 Blatt 13 (Qualitätssicherung in der Immissionsprognose), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2009.
- [6] Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL: VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5 (Lokale Kaltluft), Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [7] Ingenieurbüro Janicke GbR Gesellschaft für Umweltphysik: AUSTAL2000 [Online]. Available: <http://austal2000.de/de/home.html>. [Zugriff am 30.11.2011].
- [8] Ingenieurbüro Janicke GbR Gesellschaft für Umweltphysik: LASAT [Online]. Available: <http://janicke.de/de/lasat.html>. [Zugriff am 30.11.2011].
- [9] SIEVERS, U.: Das Kaltluftabflussmodell KLAM 21, Deutscher Wetterdienst, 2005.
- [10] LOHMEYER, A. & SCHÄDLER, G.: Das Kaltluftabflußmodell KALM [Online]. Available: <http://www.lohmeyer.de/de/system/files/content/download/publikationen/KALMdeutsch.pdf> . [Zugriff am 30.11.2011].
- [11] METCON Umweltmeteorologische Beratung Dr. Klaus Bigalke: METCON: Belüftung und Kaltluft [Online]. Available: <http://www.metcon-umb.de/leistungen/klima/belueftung-und-kaltluft.html>. [Zugriff am 30.11.2011].
- [12] iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG: GAK [Online]. Available: <http://www.ima-umwelt.de/ausbreitungsrechnung/modellpalette/gak.html?L=ffxhkmtampubwtey>. [Zugriff am 30.11.2011].
- [13] Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG: Fachinformationssystem METEOKART GIS [Online]. Available: <http://www.lohmeyer.de/de/system/files/content/download/hauszeitung/ausgabe14.pdf>. [Zugriff am 30.11.2011].
- [14] IfU GmbH Privates Institut für Analytik: Modellierung von Kaltluftabflüssen mit KALAS [Online]. Available: <http://kalas-kaltluft.de>. [Zugriff am 30.11.2011].
- [15] Meteorologisches Institut Universität Hamburg: Mesoscale Model METRAS [Online]. Available: <http://www.mi.uni-hamburg.de/index.php?id=359>. [Zugriff am 30.11.2011].
- [16] WIESNER, K. P.: Programme zur Erfassung von Landschaftsdaten, eine Bodenerosionsgleichung und ein Modell der Kaltluftentstehung; Heidelberger Geographische Arbeiten, Bd. 79, pp. 34-83, 1986.
- [17] SUN, J.; BURNS, S. P.; DELANY, A. C.; ONCLEY, S. P.; HORST, T. W. & LENSCHOW, D. H.: Heat Balance in the Nocturnal Boundary Layer during CASES-99; American Meteorological Society, Bd. 42, pp. 1649-1666, 2003.

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: + 49 351 2612-0  
Telefax: + 49 351 2612-1099  
E-Mail: [lfulg@smul.sachsen.de](mailto:lfulg@smul.sachsen.de)  
[www.smul.sachsen.de/lfulg](http://www.smul.sachsen.de/lfulg)

**Autor:**

Ralf Petrich  
IfU GmbH Privates Institut für Analytik  
Gottfried-Schenker-Straße 18, 09244 Lichtenau  
Telefon: + 49 37208 889-14  
Telefax: + 49 37208 889-23  
E-Mail: [rpe@ifu.de](mailto:rpe@ifu.de)

**Redaktion:**

Peter Fleischer  
LfULG, Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/  
Referat Anlagenbezogener Immissionsschutz, Lärm  
Telefon: + 49 351 2612-5202  
Telefax: + 49 351 2612-5099  
E-Mail: [peter.fleischer@smul.sachsen.de](mailto:peter.fleischer@smul.sachsen.de)

**Fotos:**

Ralf Petrich (Titel)  
Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen  
(landkartenunterlegte Abbildungen)

**Redaktionsschluss:**

31.05.2012

**ISSN:**

1867-2868

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <http://www.smul.sachsen.de/lfulg/6447.htm> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.