

# ENERGIESPEICHER RIEDL

DONAU-  
KRAFTWERK  
JOCHENSTEIN  
AKTIENGESELLSCHAFT

## Planfeststellungsverfahren Umweltverträglichkeitsstudie

### Klima



Anlage 1: Oberbecken „Energiespeicher Riedl“, Bericht über die meteorologischen Messungen und Kaltluftabflussrechnungen (Deutscher Wetterdienst)



Erstellt	Deutscher Wetterdienst	G. Hofmann	29.03.2011
Geprüft	Deutscher Wetterdienst	G. Hofmann	29.03.2011
Freigegeben	DKJ/ ES-R	D. Mayr	29.03.2011
	Unternehmen / Abteilung	Vorname Nachname	Datum

Fremdfirmen-Nr.:												Aufstellungsort:				Bl. von Bl.		
												+						
Unterlagennummer																		
SKS			Projekt-Nr.			Ersteller			Zählteil			KKS						DCC(UAS)
Vorzeichen	S1	S2	S3	Gliedernszeichen	Ö	Gliedernszeichen	Dokumenttyp	Nummer	Gliedernszeichen	Blattnummer	Gliedernszeichen	GA	Funktion/ Bauwerk	Aggregat/ Raum	Vorzeichen	A3	Vorzeichen	
*	A	A	A	~	A	N	N	N	/	A	A	F0	F1	F2	F3	FN	A1A2	AN
*	J	E	S	-	A	0	0	1	-	D	W	D	-	B	4	0	0	1
*	J	E	S	-	A	0	0	1	-	D	W	D	-	B	4	0	0	1
*	J	E	S	-	A	0	0	1	-	D	W	D	-	B	4	0	0	1



**DEUTSCHER WETTERDIENST**  
**Abteilung Klima- und Umweltberatung**



## Amtliches Gutachten

### Oberbecken „Energiespeicher Riedl“ Bericht über die meteorologischen Messungen und Kaltluftabflussrechnungen

Auftraggeber:

Donaukraftwerk Jochenstein AG  
Innstrasse 121  
94036 Passau

Wissenschaftliche Bearbeitung: Dipl.-Met. Gerhard Hofmann  
Dipl.-Met. Gudrun Schlaf

München, den 29. März 2011

Dipl.-Met. Gerhard Hofmann  
Leiter des Regionalbüros München



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

Inhalt	Seite
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2 Lagebeschreibung und Allgemeines zum Klima der Region</b>	<b>3</b>
<b>3 Kaltluftflüsse</b>	<b>5</b>
3.1 Autochthones Klima	5
3.2 Definition und Häufigkeit von Strahlungsnächten	5
3.3 Kaltluftentstehung	7
3.4 Kaltluftflüsse und Lokalwindzirkulation	8
3.5 Auswirkungen von Brücken und Dämmen auf den Kaltluftstau	9
<b>4 Modellrechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21</b>	<b>10</b>
4.1 Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21	10
4.2 Das Simulationsgebiet	12
4.3 Die Eingabedaten	12
4.4 Darstellung der Modellergebnisse	14
4.5 Modellresultate	15
4.5.1 <i>Der IST-Zustand</i>	15
4.5.2 <i>Der SOLL-Zustand</i>	17
4.5.3 <i>Differenzen „SOLL minus IST“</i>	17
4.5.4 <i>Zusammenfassung</i>	19
<b>5 Nebelverhältnisse</b>	<b>20</b>
5.1 Datengrundlage	21
5.2 Auswertung der Daten	22
5.3 Abschätzung der Häufigkeit nach Abschluss der Messungen	24
<b>6 Literatur</b>	<b>26</b>
<b>7 Glossar</b>	<b>27</b>
<b>8 Verzeichnis der Abbildungen</b>	<b>33</b>

## 1 Einleitung

Mit Schreiben vom 03. März 2010 wurde der Deutsche Wetterdienst, RKB München, von der Donaukraftwerk Jochenstein AG mit der Erstellung eines Fachbeitrages zur Umweltverträglichkeitsstudie „Luft, Klimatologie und Meteorologie“ für die geplante Errichtung des „Energiespeichers Riedl“ in der Gemeinde Untergriesbach beauftragt.

Es sollen die klimatologischen Auswirkungen der geplanten Baumaßnahme auf die Umgebung untersucht und beschrieben werden. Dazu ist im ersten Schritt die detaillierte Beschreibung des momentan vorhandenen IST-Zustandes (Situation vor Beginn der Baumaßnahme) erforderlich. Es soll dabei auf Niederschlagsverteilung, Nebelsituationen, Temperatur und Feuchte, Windströmungsverhältnisse und Inversionswetterlagen eingegangen werden. Die möglichen Auswirkungen des Energiespeichers auf diese meteorologischen Größen werden anschließend teilweise betrachtet. Während einer Regionalstudie zum Energiespeicher Riedl traten aus der Bevölkerung zudem Fragen zu Änderungen von Kaltluftströmungen auf, die hier mittels Modellrechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM\_21 des Deutschen Wetterdienstes für den IST- und den SOLL-Zustand (Situation nach Fertigstellung der Baumaßnahme) betrachtet werden. Vergleiche (Differenzen) zwischen dem IST- und dem SOLL-Zustand dienen dem Nachweis möglicher Einflüsse der geplanten Bebauung auf das Lokalklima.

Die benötigten Höhen- und Landnutzungs- Daten, Planunterlagen und das Kartenmaterial für die Modellrechnungen zu den Auswirkungen der geplanten Ortsumgehung wurden vom Auftraggeber bereitgestellt. Die Digitalisierung der Höhen- und Landnutzungsdatensätze im 50 Meter-Raster erfolgte durch Mitarbeiter des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach (ZKB) im Zuge der Erstellung eines Bemessungswindgutachtens für das geplante Oberbecken. Die Genehmigung zur Nutzung der Daten auch für Kaltluftabflussrechnungen für dieses klimatologische Gutachten erfolgte durch die Jochenstein AG mit Schreiben vom 09. Januar 2011 (Herr Duda).

Bezüglich der verwendeten meteorologischen Fachausdrücke wird auf das Glossar am Ende dieses Gutachtens verwiesen.

## 2 Lagebeschreibung und Allgemeines zum Klima der Region

Zur Beschreibung der Lage und allgemein des Projektes werden Auszüge aus dem Gutachten „Bemessungswind Oberbecken PSW Riedl“ des Deutschen Wetterdienstes (Offenbach, 2011) verwendet (vgl. auch **Abbildung 1, Abbildung 2 und 3**).

Das Oberbecken „Energiespeicher Riedl“ (RW 46 27 475, HW 53 78 175) befindet sich in exponierter Lage auf der Wegscheider Hochfläche, die nördlich des Donaudurchbruchs bei Engelhartszell im südöstlichsten Teil des Bayerischen Waldes ausläuft. Es liegt etwa 21 km ost-südöstlich der Stadt Passau, etwa 7 km südöstlich der Stadt Untergriesbach sowie ca. 1.5 km nordöstlich des an der Donau gelegenen Kraftwerks Jochenstein. Das in der „Riedler Mulde“ südwestlich der Ortschaft Gottsdorf und nördlich der Ortschaft Riedl liegende und aufgestaute Oberbecken „Energiespeicher Riedl“ ist im Nahbereich von 500 m eingebettet zwischen flache das Becken nur geringfügig überragende Hügel, so z.B. der Mühlberg (656 m) im Nordnordos-

ten und der Eichenbichel (ca. 640 m) im Westnordwesten des geplanten Speicherbeckens. Nur weiter im Norden und vor allem in Richtung Nordwesten vom Speichersee aus gesehen steigt das Gelände stärker an. Hier finden sich im Nordnordwesten in 1,5 Kilometern Entfernung der Höhenberg (762 m über NN) und in etwa 2,5 Kilometern Entfernung der Kleine Vorholzberg mit 744 m über NN. Im Norden des Speichersees liegt zudem in etwa 3,5 Kilometern Entfernung der Vorholzberg mit einer Höhe von 745 m über NN. In Richtung Südwesten liegt dann erst jenseits des Donautals in ca. 4,5 km Entfernung der mit bis zu 895 m Höhe über NN mächtige und nach Südwesten abschirmende Haugstein-Rücken als größte Erhebung im Umfeld. Das Oberbecken „Energiespeicher Riedl“ liegt ca. 350 m über dem mit 280 m Höhe über NN tief eingeschnittenen Donauhauptlauf (Unterbecken) des Kraftwerks Jochenstein in ca. 1400 m nördlicher Entfernung.

Bei Vollstau mit einem Stauziel von 630 m ü. NN weist das Oberbecken „Energiespeicher Riedl“ eine Wasseroberfläche von ca. 0,24 km<sup>2</sup> auf. Die nahezu ovale Wasserfläche ist mit einer Längsachse von etwa 700 m Länge von Südsüdost nach Nordnordwest orientiert. Die Breite der Wasserfläche beträgt im nördlichen Mittelteil des Beckens etwa 500 m und im mittleren und südlichen Teil etwa 525 bis 550 m. Das Absperrbauwerk des Oberbeckens besteht wegen der natürlichen Gegebenheiten aus einem Ringwall unterschiedlicher Höhe, der vor der Ortschaft Riedl mit ca. 30 m seine größte Höhe erreicht und in den zwei Bereichen an den erwähnten zwei Hügeln die geringsten Höhen. Der Ringwall besteht aus einem ca. 2000 m langen Zonendamm aus Steinschüttmaterial auf allen Flanken des Speichersees. Er ist damit komplett ringförmig von Absperrbauwerken umgeben.

Die Stauanlage PSW Oberbecken Riedl wird an fast allen ihren Ringdammbereichen um den Stausee herum direkt von Flächen eingeschlossen, die großenteils aus landwirtschaftlichen Nutzflächen und Wiesenflächen bestehen, die örtlich durch kleine Siedlungen, Gehöfte oder Waldflächen unterbrochen sind. Sehr große Waldflächen befinden sich vor allem südwestlich des Speicherbeckens hinter der dortigen Gelände-Kuppe ab etwa 450 m Entfernung im kompletten Bereich der sehr steilen Hänge nördlich und südlich der Donau. Weitere Waldgebiete von Belang finden sich auf den Flanken der Höhenrücken direkt nördlich des Speicherbeckens bei Kriehäusl und weiter nördlich am Rand des Höhenbergs und Vorholzbergs sowie im Osten des Beckens ab ca. 600 m Entfernung westlich und östlich von Haitzendorf.

Nach der Klimaklassifikation von Köppen und Geiger (Köppen, W., 1936) liegt Bayern in der warm-gemäßigten Klimazone mit Niederschlägen in allen Jahreszeiten. Dabei ist der Jahresgang des Niederschlages abhängig vom Grad der Kontinentalität und der Höhenlage. Innerhalb dieser Zone liegt Bayern im Übergangsbereich vom maritimen Klima Westeuropas - gekennzeichnet durch milde Winter, kühle Sommer und hohe Luftfeuchtigkeit – zum kontinentalen Klima Osteuropas mit seinen kalten Wintern, warmen Sommern und geringer Luftfeuchtigkeit. Der Grad der Kontinentalität wird durch die Differenz des Temperaturmittels des wärmsten und des kältesten Monats bei gleichzeitiger Berücksichtigung der geographischen Breite charakterisiert und nimmt in Bayern von Nordwest nach Ost und Südost allmählich zu. Diese Differenz der Temperatur liegt im Rhein-Main-Gebiet bei 17 – 19 K und nimmt bis zum Donaugebiet östlich von Regensburg auf 20 bis 21 K zu. In den höheren Lagen der Mittelgebirge und den Alpen sind diese Amplituden etwas geringer. Ein weiteres Indiz für die nach Südosten zunehmende Kontinentalität ist der Anwachsen der sommerlichen und Abnehmen der winterlichen Niederschlagshöhen in dieser Richtung.

Der geplante Anlagenstandort des Kraftwerks Jochenstein liegt klimatisch gesehen im südwestlichen Randbereich des Bayerischen Waldes am Übergang zum Niederbayerischen Hügelland und umfasst zudem die Donauniederung. Im Bereich des Bayerischen Waldes, welcher im Arber-Gebiet Höhen von 1500 m erreicht, bewirken Stauerscheinungen bei Westwetterlagen und Aufgleitniederschläge, die von Tiefdruckgebieten im Mittelmeerraum ausgelöst werden, eine Erhöhung der Jahresniederschlagsmenge. In den höheren Lagen treten entsprechend niedrigere Temperaturen auf als in Niederungen und die Hochlagen sind zudem öfters in Wolken eingehüllt.

Die Donauniederung nimmt in klimatischer Hinsicht eine Sonderstellung ein. Sie senkt sich von ca. 480 m über NN bei Neu-Ulm bis auf 280 m über NN bei Passau ab, wo die Donau Bayern wieder verlässt. Die Jahresmitteltemperaturen entlang der Donau liegen vielerorts über 8 °C. In der windschwachen Flussniederung tritt zudem in den Wintermonaten oft lang andauernder Nebel auf. Im Gegensatz dazu ist in den Sommermonaten oft mit erhöhter Wärmebelastung zu rechnen.

Der Untersuchungsraum ist also durch seine Lage in einem orographisch stark gegliederten Gelände, welches sich von der Donauniederung mit einer Höhe von etwa 300 m über NN bis zu den Randhöhen von deutlich über 600 m über NN erstreckt, geprägt. Der geplante Energiespeicher liegt oberhalb der Donauniederung und ist daher klimatisch gesehen den Randgebieten des Bayerischen Waldes zu zuordnen. Es treten auch deutlich höhere mittlere Windgeschwindigkeiten auf, als im Donautal. Daher ist nicht mit einer derart hohen Anzahl Nebelereignisse zu rechnen, wie innerhalb der Donauniederung.

### 3 Kaltluftflüsse

#### 3.1 Autochthones Klima

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

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

#### 3.2 Definition und Häufigkeit von Strahlungsnächten

Unterschiedliche Strahlungseigenschaften können nur dann die horizontale Verteilung der Lufttemperatur beeinflussen, wenn die Ausstrahlungsbedingungen gut und die horizontale Durchmischung gering ist. Eine windschwache Strahlungsnacht zeichnet sich deshalb durch geringe Windgeschwindigkeiten und wenig Bewölkung aus.

Für den Planer ist die Häufigkeit wichtig, mit der windschwache Strahlungsnächte zu erwarten sind, in denen sich lokale Kaltluftflüsse oder Windsysteme mittlerer Größenordnung einstellen. In diesen Nächten entstehen aufgrund der unterschiedlichen Strahlungseigenschaften verschiedener Landnutzungen horizontale Differenzen der Lufttemperatur.

Die jährliche Häufigkeit von Strahlungsnächten wurde aus den Daten der stündlichen Beobachtungen der Wetterstation Fürstenzell des Deutschen Wetterdienstes ermittelt (Deutscher Wetterdienst, 1997). Eine Nacht gilt als windschwache Strahlungsnacht, wenn in der Zeit von 17 bis 5 UTC mindestens 7 zusammenhängende Stunden oder mindestens 10 Gesamtstunden auftreten, in denen die Windgeschwindigkeit kleiner oder gleich  $2,6 \text{ ms}^{-1}$  und die stündliche Temperaturabnahme größer oder gleich 0,3 Kelvin je Stunde ist, bzw. der Bedeckungsgrad kleiner oder gleich 4 Achtel ist.

Der Bereich des niederbayerischen Hügellandes – im Übergang zum Bayerischen Wald - zwischen Donau und Inn bei Passau lässt im aktuellen Bezugszeitraum einen Bandbreite von etwa 50 bis 75 Strahlungsnächten pro Jahr erwarten, d. h. im Durchschnitt der ausgewerteten Jahre (2001 bis 2010) war etwa jede fünfte bis sechste Nacht eine durch geringe Bewölkung, bzw. eine durch entsprechende Temperaturabnahme und schwachen Wind definierte Strahlungsnacht. Im zehnjährigen Durchschnitt traten in Fürstenzell knapp 60 Strahlungsnächte pro Jahr auf.

Die mittlere jährliche Anzahl der Strahlungsnächte ist aber nicht gleichförmig auf das Jahr verteilt, sondern zeigt deutliche Maxima von Mai bis September (vgl. **Tabelle 1** unten).

Station	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Fürstenzell (2001-2010)	2,7	3,7	4,4	4,0	5,2	6,7	9,4	7,6	6,5	4,5	2,0	1,7	58,4

**Tabelle 1:** Mittlere monatliche und jährliche Anzahl windschwacher Strahlungsnächte

Von Jahr zu Jahr kann diese Anzahl zudem erheblich schwanken (vgl. **Tabelle 2**, nächste Seite).

So traten in Fürstenzell im Beurteilungszeitraum im Jahr 2010 nur 31 Strahlungsnächte auf, während im Jahr 2005 76 Strahlungsnächte registriert wurden. Die hohe Anzahl von Strahlungsnächten im Jahr 2005 könnte beispielsweise mit den im damaligen Sommer aufgetretenen lang anhaltenden und stabilen, wolkenarmen Hochdruckwetterlagen begründet werden..

Ähnliche Verhältnisse wie an der Station Fürstenzell sind auch für den Energiespeichers Riedl anzunehmen, wobei im Bereich des Energiespeichers Riedl von einer etwas höheren Anzahl Strahlungsnächten auszugehen ist, da die Station in Fürstenzell sehr exponiert liegt und verhältnismäßig selten Schwachwindsituationen aufweist, in der Umgebung des Energiespeichers in Riedl durch die Lage innerhalb einer (leicht windgeschützteren) Mulde jedoch etwas häufiger Schwachwinde auftreten.

Jahr	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Summe
2001	0	4	1	2	4	7	13	10	0	8	3	0	52
2002	2	3	8	1	5	9	8	10	7	1	2	2	58
2003	2	9	6	3	4	8	7	9	11	3	2	4	68
2004	2	1	6	3	6	7	8	6	7	3	1	0	50
2005	4	1	8	6	13	8	7	8	9	9	0	3	76
2006	6	2	2	4	5	10	14	3	10	11	2	5	74
2007	3	5	5	6	6	8	8	8	9	9	2	2	71
2008	2	12	4	5	4	5	9	7	0	0	4	0	52
2009	6	0	0	6	5	1	10	12	8	1	3	0	52
2010	0	0	4	4	0	4	10	3	4	0	1	1	31

**Tabelle 2:** Mittlere monatliche und jährliche Anzahl windschwacher Strahlungsnächte Fürstenzell 2001-2010

### 3.3 Kaltluftentstehung

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

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

Bei Waldgebieten liegen die Verhältnisse etwas komplizierter, weil die Ausstrahlung – und damit die primäre Abkühlung – nicht aus unmittelbarer Bodennähe, sondern hauptsächlich aus dem oberen Kronenbereich der Bäume erfolgt. Die dort produzierte Kaltluft sinkt ab, vermischt sich mit der wärmeren Luft des Stammraumes und wird z. T. durch die Wärmeabgabe von Stämmen, Zweigen und Blättern sowie den Waldboden aufgezehrt. Die am Boden messbare Abkühlung der Atmosphäre ist deshalb im Wald – jedenfalls bei geschlossenem Bestand – zu meist geringer als über vegetationsbedeckten Freiflächen. In Lichtungen, die besonders windgeschützt sind und bei denen die Ausstrahlung aus niedriger Vegetation erfolgt, kann es aber auch empfindlich kalt werden.

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

### 3.4 Kaltluftflüsse und Lokalwindzirkulation

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

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

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

Unter Hangwinden versteht man das nächtliche Abfließen der über Bodenerhebungen abgekühlten Luft (Hangabwinde), bzw. das Aufsteigen der an einem Hang erwärmten Luft bei Tage (Hangaufwinde). Dabei bewegt sich die Luft in Richtung der Hangneigung, d. h. bei Hängen,

die ein Tal seitlich begrenzen, senkrecht zur Talachse. Nach dem Zusammenfließen im Talg- rund erzeugen die Hangabwinde den zum Talausgang gerichteten Bergwind oder Talabwind. Vormittags entsteht der talaufwärts gerichtete Talwind oder Talaufwind. Beide Lokalwindzirkulationen unterscheiden sich von der grundströmungsbedingten Komponente des bodennahen Windes durch den für sie typischen Tagesgang der Windrichtung.

### 3.5 Auswirkungen von Brücken und Dämmen auf den Kaltluftstau

Das Errichten von Gebäuden und Straßendämmen hat einen Einfluss auf abfließende Kaltluft. Das lokale Windsystem des Tales wird dadurch unterbrochen und ein Kaltluftstau verursacht, der sich im Temperatur- und Feuchtefeld nachweisen lässt. Dabei verschlechtern sich infolge des Kaltluftstaus – bei landwirtschaftlicher Nutzung der betroffenen Fläche – die Wachstumsbedingungen, da die Vegetationszeit verkürzt und die Bodenfrosthäufigkeit erhöht wird. Dass sich luvseitig eines Hindernisses ein Kaltluftstau mit Bildung eines Kaltluftsees und weitgehend stagnierender Kaltluft bildet, steht außer Zweifel. Über die Dynamik beim Überströmen solcher Hindernisse hat King (1973) umfangreiche Untersuchungen an künstlichen Talverriegelungen mittels Folienwänden durchgeführt und z.T. anschaulich beschrieben. Auf der Grundlage von Rauchpatronenexperimenten, wie sie der Deutsche Wetterdienst schon häufig durchgeführt hat, stellt King fest:

*In die Kaltluftströmung weit oberhalb des Stauzaunes eingebrachter Rauch floss zunächst längs der Talsohle talabwärts, hob sich zu Beginn der Messungen etwa 20–30 m vor der Folienwand in spitzem Winkel vom Boden ab und strömte dann mit erhöhter Geschwindigkeit knapp über die Obergrenze der Folienwand hinweg. ... Im Verlauf des Abends und der ersten Nachthälfte vergrößerte sich die Entfernung zwischen der Stelle, an welcher der Rauch vom Boden abhob und dem Stauzaun auf etwa 50 m.*

Die Beschreibung von King zeigt, dass die abströmende Kaltluft über die in der Talmulde liegende stagnierende Kaltluft hinwegströmt. Die über dem Staubereich talabwärts fließende Kaltluft hebt vom Boden ab und kann von da an bis zur Oberkante des Stauzaunes bergauf fließen. Im Staubereich der Kaltluft sinkt (bei nahezu Luftruhe) die Temperatur und führt dadurch zu erhöhter Frostgefährdung oberhalb des Hindernisses. Spät- und frühfrostgefährdete Sonderkulturnen sind hiervon besonders betroffen.

Bei Straßenbauten sind neu geschaffene Dämme und Brückenbauten, Geländeinschnitte und gelegentlich Lärmschutzbauten die wesentlichen Reliefveränderungen.

Gerade bei autochthonen Wetterlagen kommt daher den thermisch induzierten Windsystemen verschiedener Größe (Flurwinde, Lokalwinde, Regionalwinde) eine besondere Bedeutung zu. Vor allem nachts transportieren diese in der Regel kühlere Luftmassen (Kaltluft) entlang sogenannter Ventilationsschneisen und führen lokal zu einer Verbesserung der Luftqualität. Bauwerke, abriegelnde Bebauungen oder auch Verkehrstrassen können diese fließende Luft und damit deren lufthygienische Wirkung behindern. Dabei entstehen Kaltluftstaugebiete bzw. Kaltluftseen mit stagnierenden Luftmassen.

Über die klimatischen Auswirkungen von Dammbauten gibt es verschiedene Literaturstellen. BEINHAUER und MARTENS (1980) haben die Auswirkungen von Dämmen im ebenen Gelände untersucht. Andere Veröffentlichungen, vor allem von KING (1973) befassen sich mit Auswirkungen von Dammbauten im geneigten Gelände. Diese Untersuchungen sowie Arbeiten von SCULTETUS (1964) und SCHNEIDER (1972) zeigen, dass neben der Geländeform noch viele andere Faktoren (z.B. Windverteilung, Schwachwindhäufigkeit, Bewuchs vor Ort) zu berücksichtigen sind und dass deshalb im Einzelfall Detailuntersuchungen notwendig sind.

Im Gegensatz zu Dammbauten ermöglichen Brückenöffnungen den Abfluss von Kaltluft. Bei vorgegebener Breite und Höhe hängt die Durchströmung einer Brücke in erster Linie von ihrer Tiefe ab und wird umso besser, je geringer die Tiefe des Brückenbauwerkes ist. Die klimatischen Auswirkungen der sich in der Regel an den Brückenenden befindenden Dammbauten hängen in erster Linie von deren Länge ab und sind insbesondere im Bereich empfindlicher landwirtschaftlicher Kulturen oder von Wohnbebauung zu untersuchen.

Auf Brückenoberflächen ist im Herbst und Winter mit einem erhöhten Risiko von Eis- bzw. Reifglätte zu rechnen. Glätte tritt hier häufiger auf, weil sich auf Grund des fehlenden Wärmenachsabschubs aus dem Erdboden die Straßenoberflächen schnell abkühlen.

Künstliche Geländeeinschnitte sind in ihrer Wirkung den Muldenlagen im Gelände etwa gleichzusetzen. Die Veränderungen des lokalen Klimas betreffen das Wind- und das Temperaturfeld. Sie beschränken sich auf die Einschnitte selbst und haben keine Auswirkung auf die Umgebung. Eine Verringerung der Windgeschwindigkeit im Geländeeinschnitt ist wegen des Windschutzes plausibel. Bei einschnittparalleler Windrichtung stellt sich eine Düsenwirkung ein. Ist der Einschnitt eine Gefällestrecke, fließt in windschwachen Strahlungsnächten Kaltluft hinab. Im Winter kann sich bei Schneetreiben verstärkt Schnee ablagnern (Schneeverwehungen). Am Grund des Einschnittes sammelt sich nach Starkniederschlägen Regenwasser, falls es ungehindert die Böschungen herabfließen konnte. Die nächtlichen Tiefsttemperaturen im Geländeeinschnitt verändern sich im Zusammenwirken mehrerer Faktoren, die teils temperatursenkend, teils im Sinne einer Temperaturerhöhung wirken.

## 4 Modellrechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM\_21

### 4.1 Das Kaltluftabflussmodell KLAM\_21

Das Modell KLAM\_21 des Deutschen Wetterdienstes ist ein zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen in orographisch gegliedertem Gelände für Fragen der Standort-, Stadt- und Regionalplanung (SIEVERS, 2005). Es simuliert die Entwicklung von Kaltluftflüssen und die Ansammlung von Kaltluft in einem beliebig auswählbaren, rechteckig begrenzten Untersuchungsgelände. Über dieses Gelände wird ein numerisches Gitter gelegt, typische Abstände sind dabei 10 bis 50 m. Beispielhafte Größen für Untersuchungsgebiete liegen bei 50 bis 500 km<sup>2</sup>, es sind jedoch bei einer Rasterweite von 50 m auch Untersuchungsgebiete bis zu 2000 km<sup>2</sup> möglich.

In KLAM\_21 wird, im Unterschied zu vergleichbaren Modellen, für die Prognose der Kaltlufthöhe über jedem Flächenelement modellintern zunächst (als Bilanz aus Kälteproduktion sowie

aus Kaltluftzu- und -abflüssen) der Kälteinhalt der zugehörigen Kaltluftsäule berechnet. Die benötigte Kaltlufthöhe wird dann aus dem Kälteinhalt und einer Annahme über das vertikale Temperaturprofil errechnet. Dies erleichtert die numerische Sicherstellung des physikalischen Prinzips der Energieerhaltung. Herausragende Hindernisse wie Gebäude oder Schallschutzwände können als solche behandelt werden und müssen nicht als Modifikationen der Orografie angesehen werden. Bei KLAM\_21 kann ein "Regionalwind" vorgegeben werden, der eine vom Kaltluftgeschehen unbeeinflusste Grundströmung im Modellgebiet repräsentiert, die "von oben" auf die Kaltluftflüsse einwirkt und sie modifiziert.

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

Zu Beginn der Simulation wird eine annähernd adiabatisch geschichtete Atmosphäre vorausgesetzt: Es sind keine horizontalen Gradienten der Temperatur und der Luftdichte vorhanden und es erfolgt keine kurzwellige Einstrahlung. Weiterhin soll die langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre zeitlich konstant, horizontal homogen und schwach ausgeprägt sein. Die Differenz der thermischen Ausstrahlung des Bodens und der langwelligen Gegenstrahlung, die sog. effektive Ausstrahlung, bildet dann den Antrieb für die einsetzende Abkühlung der Atmosphäre. Feuchtigkeit und Kondensationsprozesse werden nicht berücksichtigt.

Der Simulationszeitraum von 8 Stunden insgesamt entspricht der mittleren Andauer einer klaren Nacht während einer windstillen und trockenen Hochdruckwetterlage, der Start der Simulation liegt dabei kurz vor Sonnenuntergang, d.h. dem Zeitpunkt, zu dem typischerweise die Abkühlung in untersten Luftsichten beginnt.

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

- die Bewegungsgleichungen für die zwei Horizontalkomponenten der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Windgeschwindigkeit sowie
- die Bilanzgleichungen für den Kälteinhalt der über jeder Gitterfläche befindlichen Kaltluftsäule.

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

Die Modellgleichungen stellen ein System gekoppelter, nichtlinearer partieller Differentialgleichungen dar, welches durch die Gittereinteilung in ein umfangreiches System von Differen-

zengleichungen überführt wird. Diese werden - als Computerprogramm formuliert - mit geeigneten Randbedingungen und bei Vorgabe verschwindender Anfangswerte numerisch gelöst. Als Ergebnis erhält man die flächenhafte Verteilung der Kaltlufthöhe und ihrer mittleren Windgeschwindigkeit zu beliebig abgreifbaren Simulationszeitpunkten, z.B. nach wenigen Minuten oder einer, zwei oder acht Stunden. Unter Annahme einer für Kaltluftströmungen typischen Form des Vertikalprofils des Windes, wird für bestimmte Fragestellungen aus der mittleren Windgeschwindigkeit der Kaltluftschicht die Windgeschwindigkeit in einer bestimmten Höhe (z.B. 2 oder 10 m über Grund) berechnet.

## 4.2 Das Simulationsgebiet

Für die Rechnungen zu den Kaltluftflüssen wurden die Höhen- und Flächennutzungsdaten für ein **Gesamtgebiet** mit 8,2 km x 8,2 km (RW 46 22 000 bis 46 30 200 und HW 53 72 000 bis 53 80 200) bestimmt. Insgesamt umfasst das horizontale Gitter 164 x 164 Zellen im 50 m Raster. Die Größe des Gebietes wurde so festgelegt, dass mögliche Wechselwirkungen mit umliegenden Tälern bzw. Höhenrücken noch mit erfasst werden. Sie ist deshalb im Wesentlichen am Kaltlufteinzugsgebiet der Donau orientiert, in dessen Bereich auch der Untersuchungsstandort fällt.

Zur besseren Visualisierung werden die Ergebnisse teilweise in einem etwas kleineren **Ausschnittsgebiet** von etwa 5,5 km x 5,5 km dargestellt (RW 46 24 500 bis 46 30 000 und HW 55 73 000 bis 53 78 500) oder in einem noch kleineren **Kerngebiet** von 4 km x 4 km (RW 46 25 500 bis 46 29 500 und HW 53 74 000 bis 53 77 500).

## 4.3 Die Eingabedaten

Die Modellierung des Geländes erfolgt aufgrund des unten näher beschriebenen Karten- und Datenmaterials. All dies wird im Folgenden als IST-Zustand bezeichnet. In einem weiteren Schritt wird der geplante Energiespeicher Riedl mit der Wasserfläche, Dämmen und Einschnitten in den Modellrechnungen berücksichtigt. Damit ist der Plan- bzw. SOLL-Zustand erfasst. Zuletzt wird in einem dritten Schritt die Differenz zwischen dem IST- und dem SOLL- bzw. Plan-Zustand gebildet, um Unterschiede im Kaltluftgeschehen hervorzuheben.

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

Im vorliegenden Fall erfolgte die Digitalisierung der **Höhenrasterdatei im 50m-Raster** sowie die **Digitalisierung der Landnutzung** mit Hilfe des TOP50-Viewer von der CD Top 50 „Amtlichen topographischen Karten Bayern, Landesvermessungsamt Bayern, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2004“ im Maßstab 1 : 50 000 durch den Deutschen Wetterdienst (Einzelheiten dazu sind dem „Gutachten zum Bemessungswind Oberbecken PSW Riedl, DWD, 2011“ zu entnehmen). Jedem Gitterpunkt wurde eine der Landnutzungsklassen dichte Bebauung=1, lockere Bebauung=2, Wald=3, Parkähnlicher Bewuchs=4, dichte Industriebebauung=5,

lockere Industriebebauung=6, Freiland=7, Gewässer=9 und Versiegelte Flächen bzw. Verkehrswege=8 zugeordnet (vgl. **Tabelle 3**). Auch das in Planung befindliche Speicherbecken Riedl wurde als Wasserfläche im SOLL-Zustand mit eingetragen.

Die Modellrechnungen wurden für einen relativ großen Bereich durchgeführt, um einerseits mögliche Randeffekte bei den Modellrechnungen mit KLAM\_21 zu vermeiden und um andererseits sowohl die wesentlichen Einzugsgebiete der Kaltluft aus dem Donautal und den angrenzenden Randgebieten möglichst vollständig zu erfassen. Das Rechengebiet schließt eine Fläche von etwas mehr als 67 km<sup>2</sup> (vgl. **Abbildung 4** und **Abbildung 5**) mit den folgenden Rechts- und Hochwerten ein:

Rechtswert	46 22 000	bis 46 30 200
Hochwert	53 72 000	bis 53 80 200

Die Ergebnisse werden allerdings überwiegend im Ausschnittsbereich von etwa 30 km<sup>2</sup> und im Kernbereich von 16 km<sup>2</sup> dargestellt und diskutiert. Dabei handelt es sich zum Teil um Karten, in denen die Fließrichtung der nächtlichen Kaltluft durch Pfeile unterschiedlicher Längen - je nach Fließgeschwindigkeit - dargestellt ist und in denen die Höhe bzw. die vertikale Mächtigkeit der Kaltluft zum Beginn, im Verlauf und zum Ende der Nacht eingetragen ist. Damit kann die Richtung und Ergiebigkeit eines Kaltluftflusses in Abhängigkeit von der Nachtzeit und von den topographischen Umgebungsverhältnissen gezeigt werden.

Landnutzungsklasse	Rauigkeitslänge $z_0$ in m	Bodenenergiefaktor in % (Kälteproduktionsrate) 100 % = 30 Watt/m <sup>2</sup>
Gewässer	0.0001	0
Autobahn	0.001	0
Bahn- bzw. Gleisanlagen	0.01	28
Freiflächen, landwirtsch. Nutzflächen	0.1	100
Gehölzpflanzungen	0.5	71
Siedlung (offene Bebauung)	0.8	28
Stadt kern (dichte Bebauung)	1.0	0
Wald	1.5	57

**Tabelle 3:** Zuordnung der für die Simulation benutzten Modellparameter Rauigkeitslänge und Kälteproduktionsrate in Abhängigkeit von der Landnutzungsklasse

Die Ausführungen des vorangehenden Kapitels zum Modellgebiet beziehen sich auf dessen IST-Zustand. Der Planungs- oder SOLL-Zustand unterscheidet sich davon durch die Einfügung des Speicherbeckens inkl. Randhöhe als Wasserfläche mit entsprechend des Wasserstandes höherem Gelände welches in das Höhenraster integriert wurde (d.h. die bisherige Mulde ist nun mit Wasser aufgefüllt), vergleiche hierzu die **Abbildung 5 und 6**.

Das Modell KLAM\_21 erlaubt allerdings nur eine annähernd „gitterfolgende“ Modellierung derartiger Hindernisse, d.h. sie müssen sich in ihrem Verlauf an den Gitterzellen des Modells orientieren. Das erklärt den rechtwinklig stufigen Verlauf der Außenbegrenzung des Speicherbeckens. Außerdem sind auch die möglichen Hindernishöhen an die Vorgaben des numerischen Gitters gebunden: Sie können im Modell also nur in Stufen von maximal 1 m Unterschied dargestellt werden, die Ausgabe der Höhen erfolgt in Klassen eingeteilt. Der Speichersee ist deshalb so gestaltet, dass seine Modellhöhe in die Höhenklassen von 5 bis 9, 10 bis 19 oder 20 und mehr m fällt, auch wenn der Übergang der Höhen aufgrund der Muldensituation natürlich gleitend erfolgt. Gut erkennbar sind die Höheneingaben für das geplante Speicherbecken für das Modell in **Abbildung 6** im Anhang. Dort ist die Differenz der Geländehöhe zwischen IST- und SOLL-Zustand aufgetragen. Die Geländehöhendifferenz entspricht hier natürlich dem geplanten Speicherbecken.

Die Höhengestaltung des Speicherbeckens hat zur Folge, dass ihre Modellhöhe stets etwas über der tatsächlichen Planung liegt. Da die kleinklimatischen Effekte solcher Hindernisse umso größer sind, je höher die Hindernisse sich darstellen, fallen die vom Modell errechneten Strömungsänderungen also eher zu groß als zu klein aus. Diese Folge ist aber durchaus erwünscht, da man dann davon ausgehen kann, dass die Modellergebnisse bereits einen impliziten „Sicherheitszuschlag“ enthalten.

#### 4.4 Darstellung der Modellergebnisse

Die Modellergebnisse für die Kaltlufthöhe und die horizontale Fließgeschwindigkeit und -richtung der Kaltluft in 2 m Höhe werden zu bestimmten Integrationszeitpunkten für den IST- und den SOLL-Zustand und weiterhin als Differenz zwischen SOLL- und IST-Zustand dargestellt:

##### - Übersichtsdarstellung der Modellergebnisse für den IST-Zustand/SOLL-Zustand

Die Simulationen gelten für die Bedingungen einer windschwachen Strahlungsnacht. Der Beginn der Simulation kann mit der Zeit kurz vor Sonnenuntergang gleichgesetzt werden. Von diesem Zeitpunkt an wird über 8 Stunden weiter vorwärtsgerechnet bzw. über die Zeit integriert und die Ergebnisse können in beliebigen Zeittabständen abgespeichert werden. Um die wichtigsten Charakteristika der Kaltluftströmung im Verlauf der Nacht zu dokumentieren, wurden die Kaltlufthöhe und das Windfeld zu verschiedenen Terminen dargestellt (**Abbildung 7** bis **Abbildung 21**). Die Höhe des Geländes wird durch Schummerungseffekte und Höhenisolinien dargestellt. Die Höhen der Kaltluftschicht werden durch farbige Flächen wieder gegeben. Die wichtigsten Flächennutzungen (Siedlung, Wald, Wasser) sind ebenfalls farbig gefüllt oder schraffiert markiert und den Farben für die Kaltlufthöhe überlagert. Die horizontale Fließgeschwindigkeit der Kaltluft ist durch Pfeile unterschiedlicher Länge dargestellt. Zugunsten einer übersichtlicheren Darstellung werden die eigentlich im 20 m Abstand vorliegenden Windpfeile lediglich meist im Abstand von 200 m gezeichnet. Die Richtung der Pfeile gibt die Richtung an, in die der Wind weht bzw. die Kaltluftströmung fließt. Die Länge der Pfeile ist ein Maß für die Windgeschwindigkeit. Die Legende auf der rechten Seite der Karten beginnt oben mit der Bezeichnung des Simulationslaufes (IST- oder SOLL-Zustand), dem Modellgebiets-Ausschnitt, den dargestellten Größen (z.B. "Kaltlufthöhe und Strömungsfeld in 2 m Höhe"), dem jeweiligen Zeitpunkt nach

Sonnenuntergang, der „Integrationszeit“. Unter der Integrationszeit ist eine Längenskalierung für die Entfernung und darunter ist ein Windpfeil dargestellt, dessen Richtung und Länge einem Westwind mit der rechts daneben stehenden Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde entspricht und der zur Skalierung der in den Karten dargestellten Windpfeile dient. Darunter befindet sich eine Farbskala der Klasseneinteilung der Kaltlufthöhen und die Legende der in den Abbildungen gefüllt oder als farbige Schraffuren eingezeichneten Landnutzungsklassen.

#### - Differenzdarstellungen zwischen SOLL- und IST-Zustand

Zur besseren Illustration der Auswirkungen der geplanten Bebauungen im Bereich der Umgebung auf die Höhe und Fließgeschwindigkeit der nächtlichen Kaltluft werden die Differenzen zwischen SOLL- und IST-Zustand für die Kaltlufthöhe (**Abbildung 22 bis Abbildung 31**) als Karten dargestellt. Hierbei wird der Wert der Kaltlufthöhe für den IST-Zustand von demjenigen für den gleichen Zeitpunkt des SOLL-Zustands abgezogen und als farbige Flächen gezeichnet. Die Flächen mit positiven Differenzen werden grün, die Flächen mit negativen Differenzen gelb/orange eingezeichnet. Bei den Differenzen der Kaltlufthöhe bedeuten somit grüne Flächen, dass die Kaltlufthöhe für den SOLL-Zustand (Planungszustand) größer ist als diejenige für den IST-Zustand. Gelb/orange Flächen zeigen hingegen Gebiete, in denen die Kaltlufthöhe für den SOLL-Zustand geringer ist als für den IST-Zustand. Um die Auswirkungen des geplanten Energiespeichers besser erkenntlich zu machen, werden nur Ausschnitte aus dem Ausschnittsbereich und Kernbereich aufgezeigt.

## 4.5 Modellresultate

### 4.5.1 Der IST-Zustand

Das aufgrund der orographischen Gegebenheiten nahe liegende Abfließen der nachts entstehenden Kaltluft entlang den dominierenden Talsystemen und dabei v.a. entlang der Donau im Untersuchungsgebiet wird durch die vorliegenden Modellrechnungen mit KLAM\_21 bestätigt.

Die Simulationsergebnisse nach 5 Minuten (**Abbildung 7**) zeigen die rasche Entstehung von Kaltluft auf den freien Flächen und ein gleichzeitig ausgeprägtes Abfließen der Kaltluft dem Gefälle der Kuppen und Einkerbungen in die Orographie folgend. Daher kommt es bereits kurz nach Beginn der Strahlungsnacht zu ergiebigen Kaltlufteinträgen in das Donautal. Kaltluft sammelt sich auch in den Muldenlagen der die Donau niederlassenden eingrenzenden Höhen. Aufgrund der ausgeprägten Gefälle des Geländes (welches zudem großflächig unbebaut und unbewaldet ist) erreicht die Kaltluftströmung Fließgeschwindigkeiten von partiell über 1 m/s.

Nach 10 Minuten Simulationszeit (**Abbildung 8**) sind die Kaltlufteinträge in das Donautal schon deutlich ausgeprägter und erreichen eine Mächtigkeit von bis zu 15 m. In einigen Muldenlagen der Randhöhen können Kaltluftseen bereits Höhen von knapp 20 m erreichen. Aufgrund der vielen Freiflächen findet eine sehr rasche und starke Kaltluftbildung statt und entsprechende Kaltluftflüsse und Kaltluftstauungen können sich ausbilden. Gut erkennbar in dieser und den folgenden Abbildungen sind die mit roter Färbung geprägten Kuppen oder kleine Höhenrücken. Die rote Färbung steht für Gebiete in denen keine oder nur sehr schwache Kaltlufthöhen erreicht werden, d.h. Gebiete in denen sich zwar Kaltluft bildet, jedoch aufgrund des Gefälles rasch abfließt und sich nicht aufstaut.

Im Laufe der nächsten 20 Minuten Simulationszeit (**Abbildung 9** nach 15 Minuten und **Abbildung 10** nach 30 Minuten Simulationszeit) setzen sich die oben bereits beschriebenen Effekte weiter rasch fort. Die aufgestaute Kaltluft im Donautal erreicht bereits eine Mächtigkeit von knapp 20 m, in einigen Seitentälern der Donau staut sich die Kaltluft – aufgrund des hier stark verengten Abflusses – auf bis zu 40 bis 60 m Mächtigkeit an (zu erkennen in den Abbildungen an der grünen Einfärbung). Im Bereich des geplanten Speichersees bildet sich aufgrund der dort gelegenen Mulde ebenfalls rasch ein Kaltluftsee aus, der nach einer halben Stunde Simulationszeit bereits eine Mächtigkeit von knapp 30 m erreicht. Dieses Gebiet ist also ein Kaltluftsammelgebiet auch wenn fortwährend ein Teil der Kaltluft durch den die Mulde durchfließenden Bachlauf in Richtung Riedl abfließt. Auch nach Westen geht die Mulde in einen flachen Graben ausläufer über, so dass Kaltluft auch in diese Richtung ausströmt. In **Abbildung 17** kann der zu diesem Zeitpunkt erreichte Betrag und die Richtung der Fliessgeschwindigkeit der Kaltluft abgelesen werden. Flächen mit grüner Färbung weisen höhere Fliessgeschwindigkeiten bis 2 m/s auf. Die sind überwiegend die stärker geneigten Hangbereiche von Kuppen und kleiner Höhenrücken, sowie die Seitentalbereiche, entlang denen die gebildete Kaltluft der Hangneigung folgend (erkennbar an den eingetragenen Pfeilen, welche die Fliessrichtung kennzeichnen) abfließt. Die Gebiete, in denen sich die Kaltluft anstaut (Mulden, Niederungen und dabei auch die Donauunterlage) weisen eine dunkelblaue Färbung auf, d.h. hier herrschen keine ausgeprägten Kaltluftströmungen vor, sondern die Kaltluft stagniert.

Nach einer Stunde (**Abbildung 11**) und danach nach zwei Stunden Simulationszeit (**Abbildung 12**) ist die Kaltlufthöhe im Donautal aufgrund der kräftigen Kaltlufteinträge von den Randhöhen beiderseits der Donau bereits partiell auf bis zu 100 m Höhe angestiegen. Es wird weiterhin auf den freien Flächen oberhalb des Donautals Kaltluft gebildet. Die Kaltluft staut sich auch weiterhin hoch auf in die Seitenarme der Donau. Im Bereich des geplanten Energiespeichers nimmt die Kaltluftmächtigkeit nicht weiter zu, da mit einer Kaltlufthöhe von knapp 30 m die Mulde mit Kaltluft aufgefüllt ist und diese dann sozusagen über den „Muldenrand“ und durch Bachlauf in Richtung Riedl und weiterhin auch nach Westen abfließt.

In **Abbildung 13 und 14** ist die Entwicklung der Kaltluftsituation nach 180 Minuten und 240 Minuten Simulationszeit abgebildet. Die Kaltlufthöhe im Donautal verändert sich nicht gravierend. Aufgrund der großflächigen Rückstaus der Kaltluft auch in den Zuflüssen, ist der Eintrag von neuer Kaltluft durch die einmündenden Bachläufe in das Donautal verzögert, das Einströmen von Kaltluft über die Hangbereiche jedoch weiterhin ausgeprägt. Auch im Bereich des geplanten Energiespeichers bei Riedl ändern sich die Abflussrichtung und Höhe der Kaltluft nicht mehr gravierend. Zum Vergleich wird in **Abbildung 18** wieder der Betrag und die Richtung der Fliessgeschwindigkeit der Kaltluft zu diesem Zeitpunkt abgebildet. An den Hanglagen herrschen weiterhin die höheren Abflussgeschwindigkeiten vor, die Gebiete der stagnierenden Kaltluft haben sich entsprechend ausgedehnt.

Auch bis zum Ende der Simulation (d.h. nach 8 Stunden windschwacher Strahlungsnacht) – siehe dazu **Abbildungen 14 bis 16** – verändert sich an der beschreibenden Situation nicht mehr viel. Die Mächtigkeit der Kaltluft im Donautal nimmt nochmals leicht zu und erreicht damit fast bis zu 150 m. Auch bzgl. Betrag und Richtung der Fliessgeschwindigkeiten gibt es kaum noch Veränderungen (vgl. **Abbildung 19**). Insgesamt betrachtet gibt es in der zu untersuchenden Region großflächige Kaltluftentstehungsgebiete, die gebildete Kaltluft kann durch die vorhandenen Gefälle

zügig und weiträumig Abfließen, Hauptabflussrichtung in Richtung Donau niederung. Die Kaltluft staut sich im Donautal und den einmündenden Seitenbächen mit einer großen Mächtigkeit auf, in Mulden und Niederungen der angrenzenden Höhenlagen bilden sich ebenfalls Kaltluftseen aus.

#### 4.5.2 Der SOLL-Zustand

Die hier nicht gezeigten Ergebnisse des SOLL-Zustandes zeigen auf den ersten Blick keine gravierenden Unterschiede zu den jeweils entsprechenden Abbildungen des IST-Zustandes. Wegen des ausgeprägten Geländegefälles im Untersuchungsraum und den damit auftretenden kräftigen Kaltluftströmungen zeigen sich nur in feiner aufgelösten Abbildungen im direkten Bereich des geplanten Energiespeichers erkennbare Differenzen der Kaltlufthöhe und des Windfeldes der Kaltluft zwischen der Planungsvariante und dem IST-Zustand. Eine Interpretation der Differenzen lässt sich jedoch besser anhand von Differenzdarstellungen der Kaltlufthöhe und der Kaltluftgeschwindigkeit in 2 m Höhe zwischen der Planung und dem IST-Zustand erreichen.

Eine Beschreibung des Sollzustandes außerhalb des eben erwähnten Nahbereiches erübrigt sich, denn die Fließgeschwindigkeit und Höhe der Kaltluft entsprechen dort im Wesentlichen derjenigen des IST-Zustandes. Zur Veranschaulichung werden in den **Abbildungen 20 und 21** der SOLL-Zustand nach 30 bzw. 120 Minuten Simulationszeit abgebildet. Leichte Differenzen der Kaltlufthöhe sind für den direkten Bereich des Speicherbeckens zu erkennen, da sich der im IST-Zustand aufgetretene Kaltluftsee im SOLL-Zustand nicht ausbilden kann, da die Mulde, ja mit dem Wasser des Energiespeichers gefüllt ist. Besser erkennbar wird dies jedoch in den Differenzendarstellungen.

#### 4.5.3 Differenzen „SOLL minus IST“

Im Vergleich zum IST-Zustand wurde bei den KLAM\_21-Modellsimulationen für den SOLL-Zustand zusätzlich der geplante Energiespeicher berücksichtigt. Die Berechnungen mit KLAM\_21 für den SOLL-Zustand wurden (analog zum IST-Zustand) über 8 Stunden Simulationszeit durchgeführt. Der Planungszustand wurde bereits beschrieben.

Differenzdarstellungen der Kaltlufthöhe wurden zwischen der Planung und dem IST-Zustand erstellt und werden erläutert. Auf die Darstellung der Differenzen der Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft wird verzichtet, da die Kaltluft im Beurteilungsgebiet aufgrund des starken Gefälles allgemein ausgeprägte Strömungsgeschwindigkeit aufweist, welche auch durch das neue Speicherbecken nicht beeinflusst werden.

Die durch die geplanten Baumaßnahmen zu erwartenden Veränderungen in der Mächtigkeit der Kaltluftschicht sind aus **Abbildung 22 bis 31** ersichtlich. Die Legende rechts in den Abbildungen klassifiziert die Änderung der Kaltlufthöhe in verschiedenen Zuwachsstufen (grün/blau: 1 bis 9 Meter) und Verringerungsstufen (gelb/orange/rot: minus 1 bis minus 20 Meter). Aufgrund der Anschaulichkeit werden nur Abbildungen aus dem Kerngebiet gezeigt.

Bereits **5 Minuten** nach Beginn der Strahlungsnacht (**Abbildung 22**) sind in der Abbildung deutliche Differenzen bzgl. der Kaltlufthöhe im direkten Bereich des Speichersees zu erkennen. Aufgrund der Tatsache, dass die Mulde, welche bisher ja ungehindert mit Kaltluft „volllaufen“ konnte, nun mit dem Wasser des Speichersees gefüllt ist, kann hier natürlich keine Kaltluft ein-

strömen. Damit ist in diesem Bereich eine negative Kaltluftdifferenz von bis zu 9 m zu verzeichnen. Im Randbereich des geplanten Speicherbeckens treten dagegen schwache positive Kaltluftdifferenzen auf, d.h. hier staut sich Kaltluft leicht an. Dies sind Effekte des Rückstaus am Wasserbecken, da bisher die Kaltluft den Hangbereich hinunter in die Mulde fließen konnte und nun durch den Energiespeicher behindert wird und sich somit etwas an den Begrenzungen des Speichers aufstaut.

Nach einer Simulationszeit von 10 Minuten (**Abbildung 23**) verstärken sich die Staueffekte im südwestlichen Bereich des Speicherbeckens ein wenig und die Differenz in der Kaltlufthöhe beträgt bis zu 9 m. In diesem Sektor hat das Speicherbecken höhere neue Wandbereiche und aus diesem Sektor strömt Kaltluft dem Gefälle folgend in Richtung des vormals dort befindlichen kleinen Bachlaufes, welcher ja an den östlichen Rand des Speicherbeckens verlegt werden soll. Die Auswirkungen auf die Kaltluft beschränken sich jedoch auf den unmittelbaren Bereich des geplanten Energiespeichers.

Die Simulationsergebnisse zeigen nach 15 Minuten (**Abbildung 24**) ähnliche Ergebnisse wie bereits vorher. Dabei strömt nun die Kaltluft in Richtung Südsüdosten – Richtung Riedl -, was durch eine leicht positive Differenz der Kaltlufthöhe erkennbar ist. Dieser Effekt ist jedoch sehr schwach mit 1 m Differenz in der Kaltlufthöhe zwischen SOLL- und IST-Zustand.

Nach einer halben Stunde Simulationszeit (**Abbildung 25**) kehrt sich der Effekt im Südosten des Speicherbeckens um und erkennbar ist jetzt eine leicht negative Differenz in der Kaltlufthöhe. Erklärbar ist dies, da in diese Richtung im IST-Zustand der Abfluss der Kaltluft aus der Muldenlage durch den die Mulde durchfließenden Bachlauf erfolgte. Durch die Errichtung des Speicherbeckens wird Kaltluft an den Rändern des Speichers aufgestaut und der Abfluss der Kaltluft damit etwas behindert. Zudem wird durch die „ebene“ Wasserfläche das leichte Gefälle aus der Mulde ausgeglichen. Zu diesem Simulationszeitpunkt erreicht die Kaltluft im IST-Zustand (vgl. **Abbildung 10**) bereits eine Mächtigkeit von knapp 30 m. Aufgrund der neuen Wasserfläche kann sich nun hier im SOLL-Zustand keine Kaltluft mehr bilden. Die Kaltluft wird am Rand des Speichers gestaut und im Bereich der Wasserfläche ist weiterhin ein Kaltluftdefizit gegenüber dem IST-Zustand zu erkennen.

In den Abbildungen zu den Differenzen in der Kaltlufthöhe nach 60 Minuten Simulationszeit (**Abbildung 26**) sind erstmals leicht Effekte zu sehen, die über den direkten Bereich des geplanten Energiespeichers hinaus gehen. Durch die Störung in der Abflussbahn nach Südsüdosten kommt es dort zu negativen Kaltluftdifferenzen, d.h. im SOLL-Zustand wird hier weniger Kaltluft fließen als im IST-Zustand. Das Kaltluftdefizit beträgt hier partiell bis minus 4 m. D.h. der Effekt ist vorhanden, jedoch in dieser Größenordnung nicht dramatisch. Die Kaltluft fließt nun verstärkt nach Richtung Westen ab, diese Fliessrichtung war auch schon im IST-Zustand zu sehen. Durch die „Anhebung der Geländehöhe“ mittels des Speichersees wird sich das Gefälle nach Westen leicht verändern, d.h. ein Abfluss der Kaltluft in die Richtung ist begünstigter, was auch in der positiven Kaltlufthöhdifferenz erkennbar ist. Aber auch diese Auswirkung ist mit bis zu 4 m eher als gering einzustufen, v.a. wenn man bedenkt, dass zu diesem Zeitpunkt in den Niederungen und im Donautal bereits Kaltlufthöhen mit einer Mächtigkeit von 60 Meter erreicht haben.

In der Zeitspanne bis vier Stunden Simulationszeit (**Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29**) bleiben die oben bereits beschriebenen Effekte erhalten. Dabei schwächt sich das westlich des Speichersees zu erkennende Kaltluft-Plus (gegenüber dem IST-Zustand) ab und erreicht nur noch geringe Mächtigkeiten in der Kaltlufthöhe, d.h. Höhen um etwa 1m. Das südöstlich vom geplanten Speichersee auftretende leichte Kaltluftdefizit bleibt in dieser Art wie nach einer Stunde Simulationszeit erhalten, breitet sich flächenmäßig aufgrund der Staubereiche jedoch etwas aus. Während der gesamten Simulationszeit bleiben Kaltluftstaus entlang der geplanten Speicherbegrenzung erhalten.

Nach 6 Stunden Simulationszeit (**Abbildung 30**) hat sich das Kaltluft-Minus im Südosten des geplanten Speichers bis in das Donautal ausgedehnt. Dabei entsteht eine Differenz in der Kaltlufthöhe zwischen IST- und SOLL-Zustand von etwa 1 m, was in Anbetracht der zu diesem Zeitpunkt im Donautal angestauten Kaltluftschicht mit einer Mächtigkeit von deutlich über 100 m vernachlässigbar gering ist. Die anderen bereits beschriebenen Effekte bleiben annähernd in ihrer Art und Ausprägung erhalten.

Bis zum Ende der simulierten windschwachen Strahlungsnacht nach 480 Minuten (**Abbildung 31**) ändert sich an der bis dahin beschriebenen Kaltluftsituation nichts Gravierendes mehr geändert. Es gibt schwache negative Differenzen zwischen IST- und SOLL-Zustand in der Höhe der Kaltluft im Südosten des geplanten Speichers, sowie im Donautal. Leichte Kaltluftstaus entstehen westlich des Energiespeichers, sowie an den Rändern des Energiespeichers.

#### 4.5.4 Zusammenfassung

Der Bereich der Donauunterung und die angrenzenden Randhöhen bei Jochenstein weisen ein ausgeprägtes Kaltluftgeschehen auf. Auf den freien, unbewaldeten und unbebauten Flächen in dieser Umgebung bilden sich in windschwachen Strahlungsnächten ergiebige Kaltluftmengen, welche aufgrund des ausgeprägten Gefälles und der orographischen Prägung der Landschaft rasch abfließen können und sich im Donautal und in den Mulden und Niederungen der Randhöhenbereiche aufstauen. Nach Durchführung der geplanten Baumaßnahme ergeben sich im unmittelbaren Randbereich des Energiespeichers zusätzliche Kaltluftstaugebiete. Der Speicher an sich ergibt in der Simulation ein Kaltluftdefizit gegenüber dem IST-Zustand, da statt der bisher vorhandenen – Kaltluft aufnehmenden – Mulde eine Wasserfläche vorliegt. Im südöstlichen Abflussbereich des geplanten Speichersees entsteht ebenfalls ein leichtes Kaltluftdefizit, welches sich bis in das Donautal fortsetzt. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass dieses Defizit gegenüber der entstehenden Kaltluft gering ist und somit beispielsweise die im Donautal auftretende Differenz von einem Meter vernachlässigbar ist. Westlich des Energiespeichers erfolgt ein etwas verstärkter Abfluss von Kaltluft. Somit entsteht in diesem Bereich ein leichtes Kaltluft-Plus.

Die stärksten Auswirkungen der geplanten Baumaßnahme auf die Kaltluftströmungen und das Kaltluftgeschehen im Planungsraum entstehen direkt im Bereich des Speicherbeckens. Die Auswirkungen auf das weitere Umfeld des Speichers sind sehr gering und aufgrund des ausgeprägten vorhandenen Kaltluftflusses als vernachlässigbar anzusehen.

## 5 Nebelverhältnisse

Die Bildung von Nebel und vor allem die erhöhte Nebelhäufigkeit in Kaltluft resultiert daraus, dass die Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf von der Temperatur abhängig ist. Bei hohen Temperaturen vermag die Luft wesentlich größere Mengen Wasserdampf aufzunehmen als bei niedrigeren. Die folgenden Zahlen geben einen Überblick über einige Maßzahlen:

Temperatur	maximal möglicher Wasserdampfgehalt (g/m <sup>3</sup> )
-10°C	2.4
0°C	4.8
10°C	9.4
20°C	17.3
30°C	30.4

Dieser absoluten Maßzahl für den Wasserdampfgehalt entspricht näherungsweise der Dampfdruck des Wassers, der in der Klimatologie eingeführt ist. Am häufigsten wird der Wasserdampfgehalt jedoch mit der "Relativen Feuchte" ausgedrückt. Sie gibt den tatsächlichen Wassergehalt der Luft an im Verhältnis zum maximal möglichen bei einer bestimmten Temperatur. Bei 20°C entsprechen z.B. 9.4 g/m<sup>3</sup> Wassergehalt einer relativen Feuchte von 54 %, kühlst sich diese Luft durch die nächtliche Ausstrahlung auf 10°C ab, steigt der Wert der relativen Feuchte auf 100%, und es bildet sich Nebel, da der Wassergehalt bei dieser Temperatur den Maximalwert (s. Tabelle) erreicht hat. In diesem Fall spricht man wegen seiner Entstehung von "Strahlungsnebel".

Nebel kann prinzipiell als eine auf dem Erdboden aufliegende Wolke verstanden werden. Die Nebelbildung erfolgt wie bei einer Wolke durch Kondensation überschüssigen Wassers an den in der Luft befindlichen Kondensationskernen. Dadurch entstehen winzig kleine, in der Luft schwebende Wassertröpfchen, die die Atmosphäre trüben und die Sichtweite vermindern. Bei Frost können sich anstelle von Tröpfchen auch Eiskristalle bilden. Erst wenn die Luftrührung durch Wassertröpfchen soweit zunimmt, dass die Sichtweite auf weniger als 1 km absinkt, handelt es sich nach meteorologischer Definition um Nebel. Nebel ist also ein Phänomen, das im Zusammenhang mit sehr hoher (nahe 100 % liegender) relativer Luftfeuchte steht. Werden die üblichen Messungen eingerechnet, kann Nebel bereits bei einer Anzeige von 95% Relativer Feuchte beginnend vorhanden sein.

Allgemein wird die Sichtweite geschätzt, dazu dienen in der Umgebung verstreut liegende Sichtmarken, deren Entfernung genau bekannt ist, so auch an allen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes. Exakte Sichtweitenmessungen liegen in der Regel nur von den größeren Flugplätzen vor.

Es gibt eine Reihe verschiedener Nebelarten, die sich je nach ihrer Entstehung und Struktur ganz unterschiedlich auswirken. Wasserwolken, die ab einer bestimmten Geländehöhe auf dem Erdboden aufliegen und somit dort als Nebel in Erscheinung treten, bilden eine wichtige Untergruppe, den Wolkennebel. Sie treten häufig im Zusammenhang mit herangeführten, sehr feuchten Luftmassen in Erscheinung. Im Gegensatz zu den anderen Nebelarten ist der Wolkennebel überwiegend mit höheren Windgeschwindigkeiten und teilweise auch Niederschlägen verbunden. Der Wolkennebel ist ein Phänomen, das vor allem herausragende Kuppen und Berge, aber auch freie Hochflächen betrifft. Ein Tagesgang existiert hier im Allgemeinen nicht, da sein Auftreten mit der Großwetterlage gekoppelt ist.

Beim so genannten Strahlungsnebel, der infolge nächtlicher Ausstrahlung bei Hochdrucklagen entsteht, kommt es durch die Sperrsichtwirkung der bodennahen Temperaturinversion zur Luftstagnation und damit zu einer Anreicherung von in die Atmosphäre entlassenen Schadstoffen. Unterstützt wird die Inversionsbildung durch hangabwärts fließende Kaltluft, die sich in Kaltluftseen sammelt. Daher bilden sich besonders in Mulden, Tälern und Becken ausgeprägte bodennahe Temperaturinversionen aus.

Eine übliche Größe zur Beschreibung der Nebelverhältnisse ist die Anzahl der Nebeltage. In der Meteorologie liegt ein Nebeltag vor, wenn zu einem beliebigen Zeitpunkt und auch nur kurzzeitig die horizontale Sichtweite von 1 km unterschritten wird. Demzufolge ist die Anzahl der Nebeltage nur ein grobes Maß für die örtlichen Nebelverhältnisse. Die horizontale Sichtweite ist ein Maß für die Anreicherung der Luft mit trübenden Teilchen (meist Aerosole bzw. Wassertröpfchen). Sie ist definiert als die größte Entfernung, in der am Tag die Umrisse von Sichtzielen (z.B. Berge, Bäume, Häuser) gegen den Horizont erkennbar und in der Dunkelheit gewöhnliche weiße Lampen – keine Scheinwerfer – noch sichtbar sind.

Nach der Entstehungsursache (Wolkennebel oder Strahlungsnebel) wird jedoch nicht unterschieden, dies ist nur möglich, wenn man die weiteren meteorologischen Parameter wie Windgeschwindigkeit oder auch Niederschlag heranzieht.

## 5.1 Datengrundlage

Die Messstation nahe dem geplanten Speicher misst neben der Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit auch die Relative Feuchte. Da dort keine laufenden Beobachtungen stattfinden, ist das Zusammenspiel dieser Größen die einzige Möglichkeit zur Abschätzung der Nebelhäufigkeit.

Zusätzlich kann zwar auf die Beobachtungen der Wetterwarte in Fürstenzell zurückgegriffen werden, diese Messstation ist jedoch rund 28 Kilometer vom geplanten Speicher entfernt; auch aufgrund der unterschiedlichen Orographie ist eine direkte Übertragung der Nebelverhältnisse nicht ohne weiteres möglich. Näher gelegene Mess- und Beobachtungsstationen, die mit ehrenamtlichen Mitarbeitern besetzt sind, können zeitlich nur sehr eingeschränkt den Nebel feststellen. Solche Daten können daher nicht zum Vergleich herangezogen werden.

Zusätzlich wurden die Daten der umliegenden Messstationen hinsichtlich der Übertragbarkeit ihrer Windrichtungsverhältnisse geprüft. Die nächstgelegene Station Passau-Oberhaus wurde

bereits 1996 aufgelöst, so dass keine aktuellen Daten vorliegen. Eine Übertragung der Winddaten wird daher nicht empfohlen. Die Winddaten der Station Fürstenzell spiegeln sehr gut die allgemeinen Windverhältnisse außerhalb der direkten Donauunterführung wieder. Die Windrichtungshäufigkeiten entsprechen den lokal weitgehend unbeeinflussten Strömungsverhältnissen mit einem Maximum aus West bis Südwest und einem sekundären Maximum aus nordöstlichen Richtungen. Bei einer Übertragung der Winddaten in den Untersuchungsraum des Energiespeichers Riedl sollte daher auf einen möglichst freien Anemometerstandort geachtet werden. Dieser ist beispielsweise im Bereich der Messstation nahe dem geplanten Speichersee am Sportplatz zu finden. Weitere Windmessstationen des DWD befinden sich erst in knapp 50 Kilometer Entfernung vom Untersuchungsstandort.

## 5.2 Auswertung der Daten

Zunächst wurden die Beobachtungen der Wetterwarte Fürstenzell für den Zeitraum vom 01.08.2010 bis 31.12.2010 ausgewertet; aufgelistet sind alle Nebelbeobachtungen mit soweit möglich genauem zeitlichem Verlauf.

Als Beispiel sind hier einige Beobachtungen aus dem August 2010 aufgelistet:

Fürstenzell	
Datum	Zeitraum Relative Feuchte >= 95% (MEZ)
10.08.2010	nach 00 Uhr - 07:35
12.08.2010	nach 00 Uhr - 07:30
12.08.2010	vor 24 Uhr
13.08.2010	04:40 - 07:10
14.08.2010	06:10 - 06:23
16.08.2010	06:09 - 06:45
18.08.2010	05:30 - 06:10
19.08.2010	04:00 - 06:15
20.08.2010	nach 00 Uhr - 05:44

Die Dienstzeiten an der Wetterwarte umfassen nicht ununterbrochen 24 Stunden, während der Nacht ist die Station für einige Stunden nicht besetzt. Tritt in dieser Phase Nebel auf, ohne dass Anfang und/oder Ende festzustellen ist, wird folgende Angabe eingetragen, dazu die mögliche Zeitspanne für das Auftreten von Nebel:

Nach 00 Uhr 01:00 bis 07:00 Uhr

Vor 24 Uhr 21:00 bis 01:00 Uhr

Zu jeder dieser Beobachtungen wurden die Daten der Messstation am geplanten Speicher Riedl aufgelistet, wenn der Wert der Relativen Feuchte mindestens 95% betrug.

<b>Fürstenzell</b>		<b>Riedl</b>	
Datum	Zeitraum Relative Feuchte >= 95% (MEZ)	Zeitraum Relative Feuchte >= 95% (MEZ)	mittlere Windgeschwindigkeit in m/s von - bis
01.08.2010	nach 00 Uhr - 07:35	31.07.2010 23:50 - 01.08.2010 05:20	0,6 - 1,8
02.08.2010	07:40 - 08:15	05:30 - 09:20	0,5 - 3,5
02.08.2010	19:38 - 19:48	17:50 - 23:50	1,1 - 4,7
03.08.2010	nach 00 Uhr	00:00 - 23:50	0,6 - 6,3
04.08.2010	nach 00 Uhr - 08:15	00:00 - 10:30	0,0 - 2,3
05.08.2010	19:40 - vor 24 Uhr	17:10 - 23:50	0,0 - 5,5
06.08.2010	nach 00 Uhr - 05:28	00:00 - 06:20	0,2 - 2,1
06.08.2010	06:39 - 09:30	06:30 - 15:00	0,4 - 3,7
06.08.2010	15:10 - 18:30	15:10 - 23:50	0,5 - 3,2
07.08.2010	nach 00 Uhr - 08:35	00:00 - 15:50	1,8 - 6,6
07.08.2010	16:07 - vor 24 Uhr	16:00 - 23:50	0,9 - 5,2
08.08.2010	04:09 - 09:15	00:00 - 10:10	0,4 - 2,1
09.08.2010	nach 00 Uhr - 05:40	08.08.2010 18:10 - 09.08.2010 06:30	0,1 - 3,5
09.08.2010	06:40 - 07:22	06:40 - 12:20	1,1 - 3,2
10.08.2010	nach 00 Uhr - 07:35	09.08.2010 19:10 - 10.08.2010 06:00	0,2 - 1,8
12.08.2010	nach 00 Uhr - 07:30	00:20 - 04:50	0,7 - 1,8
12.08.2010	vor 24 Uhr	19:40 - 13.08.2010 04:30	0,0 - 6,0
13.08.2010	04:40 - 07:10	04:40 - 06:40	0,0 - 0,9
14.08.2010	06:10 - 06:23	13.08.2010 07:50 - 14.08.2010 06:40	0,1 - 4,4
16.08.2010	06:09 - 06:45	15.08.2010 19:20 - 16.08.2010 09:00	0,4 - 5,2
18.08.2010	05:30 - 06:10		
19.08.2010	04:00 - 06:15		
20.08.2010	nach 00 Uhr - 05:44	19.08.2010 19:00 - 20.08.2010 06:20	0,3 - 1,9
21.08.2010	nach 00 Uhr - 06:35	20.08.2010 18:50 - 21.08.2010 06:50	0,1 - 1,1
22.08.2010	nach 00 Uhr - 07:15	21.08.2010 18:50 - 22.08.2010 09:00	0,0 - 1,7
23.08.2010	04:45 - 05:40	22.08.2010 22:20 - 23.08.2010 07:10	0,4 - 1,8
24.08.2010	05:22 - 06:11, 06:27 - 08:37	23.08.2010 19:00 - 24.08.2010 12:20	0,1 - 4,2
28.08.2010	nach 00 Uhr	26.08.2010 19:00 - 28.08.2010 14:00	0,3 - 9,2
30.08.2010	nach 00 Uhr	00:10 - 10:40	1,5 - 7,9
30.08.2010	vor 24 Uhr	30.08.2010 12:20 - 01.09.2010 16:20	1,3 - 7,9

Die linke Spalte zeigt jetzt die Zeiten mit Nebel in Fürstenzell, die rechte Spalte die entsprechende Phase mit mindestens 95% Relative Feuchte an der Messstation Riedl, dazu ganz rechts die Spanne der mittleren Windgeschwindigkeit in diesem Zeitraum, zugrunde gelegt jeweils das Mittel von 10 Minuten.

An diesem Beispiel August ist zu sehen, dass nahezu alle Zeiten, in denen in Fürstenzell Nebel aufgetreten ist, auch an der Station Riedl die Relative Feuchte bei mindestens 95% lag. Nur 2 Ereignisse (18. und 19.08.) mit Nebel in Fürstenzell haben keine vergleichbare Feuchte bei

Riedl. Überraschend ist auch die in einigen Fällen sehr gute Übereinstimmung der Zeiten (07.08., 13.08.). Über die Nebelzeiten in Fürstenzell hinausgehende hohe Feuchtewerte bei Riedl sind in den meisten Fällen auch auf Wolkennebel oder wie in diesem Beispiel eines Sommermonats deutlich häufiger auch auf Niederschlag zurückzuführen. Beispiele hierfür sind der 03.08., 07.08., 28. und 30.08.; eine starke Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit bis über 10 m/s weist auf den Einfluss schlechten Wetters mit Niederschlag hin.

<b>Fürstenzell</b>		<b>Riedl</b>	
Datum	Zeitraum Relative Feuchte >= 95% (MEZ)	Zeitraum Relative Feuchte >= 95% (MEZ)	mittlere Windgeschwindigkeit in m/s von - bis
15.11.2010	14:30 - 17:40	15:10 - 17:40	0,0 - 2,9
15.11.2010	vor 24 Uhr	17:50 - 23:50	0,0 - 1,9
16.11.2010	nach 00 Uhr - 06:25	00:00 - 07:00	0,1 - 1,1
16.11.2010	07:12 - 08:47	07:10 - 09:20	0,0 - 1,3
16.11.2010	09:37 - 11:04	09:30 - 20:50	0,1 - 4,2
16.11.2010	vor 24 Uhr	21:00 - 23:50	0,6 - 2,0
17.11.2010	nach 00 Uhr - 06:15	00:00 - 07:00	0,0 - 1,7
17.11.2010	07:10 - 08:46	07:10 - 20:40	0,0 - 2,5
17.11.2010	20:52 - vor 24 Uhr	20:50 - 23:50	0,0 - 3,3
18.11.2010	nach 00 Uhr - 07:42	00:00 - 14:50	0,9 - 3,6
18.11.2010	vor 24 Uhr	19:30 - 22:10	0,0 - 0,7
18.11.2010	vor 24 Uhr	23:00 - 23:50	0,0 - 0,1
19.11.2010	nach 00 Uhr - 08:35	00:00 - 08:40	0,0 - 1,0
19.11.2010	08:57 - 10:22	08:50 - 23:50	0,0 - 1,7

Dieses Beispiel aus dem November zeigt eine bessere Übereinstimmung der Zeiten. Häufiger als im Sommer treten im Winterhalbjahr Strahlungsnebel auf; da die Großwetterlage ja großräumig die gleiche ist und beide Stationen eine vergleichbare orographische Lage haben, entsteht Nebel im Umfeld beider Stationen.

Grundsätzlich kann man natürlich nicht zwingend davon ausgehen, dass an der Messstation bei Riedl immer Nebel auftritt wenn die Relative Feuchte bei 95% liegt; es ist aber anzunehmen dass dies häufig der Fall ist. Außerdem liegt die Messstation oberhalb der Riedler Talmulde, in der sehr wahrscheinlich noch etwas niedrigere Temperaturen herrschen und damit die Nebelgefahr noch größer ist.

### 5.3 Abschätzung der Häufigkeit nach Abschluss der Messungen

Nach Ende der vorerst einjährig geplanten Messungen nahe dem zukünftigen Speicher kann die Nebelhäufigkeit dort mit Hilfe der Beobachtungen an der Wetterwarte Fürstenzell ausreichend gut abgeschätzt werden. Die Auswertung der Monate August bis Dezember zeigt, dass von den 173 Nebelbeobachtungen in Fürstenzell nur an 40 Tagen die Relative Feuchte an der

Messstation Riedl unter 95% lagen, also während mehr als 75% aller Fälle bei Nebel in Fürstenzell bei Riedl zumindest auch eine hohe Relative Feuchte herrschte.

Wie bereits im Gutachten zum Raumordnungsverfahren Klima (Laboratorium für Umweltanalytik GesmbH und DWD, 2010) vom Deutschen Wetterdienst beschrieben, tritt im Gebiet des geplanten Energiespeichers vorrangig Wolkennebel und Hochnebel auf. Aufgrund des Entstehens von Wolkennebel durch großräumige Advektion oder beispielsweise Stau an Gebirgen hat das geplante Speicherbecken keinen Einfluss auf das Entstehen dieses Nebels. Ebenfalls unbeeinflusst durch das Vorhandensein des Speichersees bleibt die Bildung von Hochnebel. Aufgrund der Verdunstung von vergleichsweise warmen Wasser in kälterer Umgebungsluft kann jedoch sogenannter „Seerauch“ auftreten, eine sehr spezielle Nebelart, welche über der Wasserfläche gebildet werden kann, wenn wärmeres Donauwasser durch den Pumpbetrieb in das Oberbecken eingebracht wird. Bei schwachwindigen Verhältnissen und entsprechend niedrigen Lufttemperaturen (in den kälteren Jahreszeiten) erwärmt sich eine dünne Luftsicht über der Wasseroberfläche und nimmt dabei Wasser durch Verdunstung auf. Diese wärmere Luft steigt auf und vermischt sich mit der darüber befindlichen kälteren Luft – dabei kondensiert das Wasser wieder aus und Nebelschwaden entstehen. Es gibt daher eine geringe Wahrscheinlichkeit zur Ausbildung schwacher Nebeleffekte. Diese werden sich jedoch auf den unmittelbaren Nahbereich des Oberbeckens beschränken und im Vergleich zu den vorherrschenden Wolken- und Hochnebelereignisse als unerheblich einzustufen sein.

Im Rahmen der Beweissicherung mit Messungen nach dem Bau des geplanten Speichers können die Daten erneut mit denjenigen von Fürstenzell abgeglichen werden; die Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der jetzigen ersten Messphase sollte dann ermöglichen, eine eventuelle Zunahme der Nebelhäufigkeit durch die zusätzliche Wasserfläche nachzuweisen.

## 6 Literatur

- BEINHAUER, R. und G.H. MARTENS, 1980:** Kleinklimatische Geländeaufnahme zur agrarmeteorologischen Beweissicherung am Elbe-Seitenkanal. Amtliches Gutachten, Deutscher Wetterdienst.
- CHRISTOFFER, J. und ULRICHT-EISSING, M., 1989:** Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland (2. vollständig neu bearbeitete Auflage), Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 147, Offenbach a.M.
- DEUTSCHER WETTERDIENST, 1997:** Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte, Zentrales Gutachtenbüro, Offenbach.
- DEUTSCHER WETTERDIENST, 2001:** Amtliches Gutachten zur Beurteilung der Öffnungsweite der Rolsbachbrücke im Zuge der geplanten Teil-Ortsumgehung Runkel/Dehrn. Zentrales Gutachtenbüro, Offenbach.
- GERTH, W.-P. und J. CHRISTOFFER, 1994:** Windkarten von Deutschland, Meteorol. Zeitschrift, N.F. 3, S. 67-77.
- KING, E., 1973:** Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefahr durch Straßenbauten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 130, Offenbach am Main.
- KÖPPEN, W., 1923:** Die Klimate der Erde, Grundriss der Klimakunde. Berlin, Verlag de Gruyter, 369 S.
- Laboratorium für Umweltanalytik GesmbH und Deutsche Wetterdienst, 2010:** Energiespeicher Riedl, Raumordnungsverfahren Gutachten Klima, 15 S.
- SCHNEIDER, M, 1972:** Kaltluftstau an Straßendämmen? – Nicht immer! Meteorologische Rundschau 25. Jg. H.6
- SCULTETUS, H.R., 1964:** Auswirkungen eines 12 m hohen Dammes auf das Kleinklima. Angewandte Meteorologie, Bd. XX H. 1-2
- SIEVERS, U., 2005:** Das Kaltluftabflussmodell KLAM\_21. Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 227, 101 S.
- TRAUP, S. und B. KRUSE, 1996:** Winddaten für Windenergienutzer. Deutscher Wetterdienst, Offenbach a.M., 445 S.

## 7 Glossar

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

**allochthon:** an anderer Stelle entstanden

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

**atmosphärische Grenzschicht:** → Grenzschicht.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Emissionen:** Ausstoß von Schadstoffen in die Außenluft.

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

**Energieumsatzfläche:** → aktive Oberfläche.

**Evaporation, Evapotranspiration:** → Verdunstung.

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

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

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

**Fühlbare Wärme:** → Wärme.

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

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

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

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

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

**indifferente Schichtung:** → Schichtung.

**Kalmen:** Windstillen

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

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

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

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

**makroskalig, mesoskalig, mikroskalig:** → Skala.

**Modell:** → numerische Modelle.

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

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

**neutrale Schichtung:** → Schichtung.

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

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

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

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

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

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

**Riegelbebauung:** Anordnung von Baukörpern, die in ihrer Gesamtheit einem Riegel gleichkommen, d.h. die die Luft nicht zirkulieren lassen. Ein geschlossener Talriegel ist in der Hydrologie mit einem Staudamm vergleichbar.

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

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

**stabile Schichtung:** → Schichtung

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

**Strahlungsnächte:** → windschwache Strahlungsnächte

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

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

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

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

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

$$\text{MEZ} = (\text{WOZ} - Z) + A,$$

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

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

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

**Wärmestrahlung:** → Strahlung.

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

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

**Windfeld:** → Feld.

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

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

## 8 Verzeichnis der Abbildungen

**Abbildung 1:** Übersichtsplan zum Bauvorhaben (Unterlagen vom Auftraggeber)

**Abbildung 2:** Lage des Untersuchungsgebietes Quelle: © Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

**Abbildung 3:** Lage des geplanten Energiespeichers Riedl Quelle: © Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

**Abbildung 4:** Geländehöhe mit Flächennutzung IST-Zustand

**Abbildung 5:** Geländehöhe mit Flächennutzung SOLL-Zustand

**Abbildung 6:** Differenz der Geländehöhe mit Flächennutzung SOLL-IST-Zustand

**Abbildung 7:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 5 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 8:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 10 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 9:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 15 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 10:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 30 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 11:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 60 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 12:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 120 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 13:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 180 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 14:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 240 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 15:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 360 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 16:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 480 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 17:** Betrag und Richtung der Fließgeschwindigkeit – Integrationszeit nach 30 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 18:** Betrag und Richtung der Fließgeschwindigkeit – Integrationszeit nach 240 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 19:** Betrag und Richtung der Fließgeschwindigkeit – Integrationszeit nach 480 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)

**Abbildung 20:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 30 Minuten (Gesamtgebiet / SOLL-Zustand)

**Abbildung 21:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 120 Minuten (Gesamtgebiet / SOLL-Zustand)

**Abbildung 22:** Differenz Kaltlufthöhe – Integrationszeit nach 5 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)

**Abbildung 23:** Differenz Kaltlufthöhe – Integrationszeit nach 10 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)

**Abbildung 24:** Differenz Kaltlufthöhe – Integrationszeit nach 15 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)

**Abbildung 25:** Differenz Kaltlufthöhe – Integrationszeit nach 30 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)

**Abbildung 26:** Differenz Kaltlufthöhe – Integrationszeit nach 60 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)

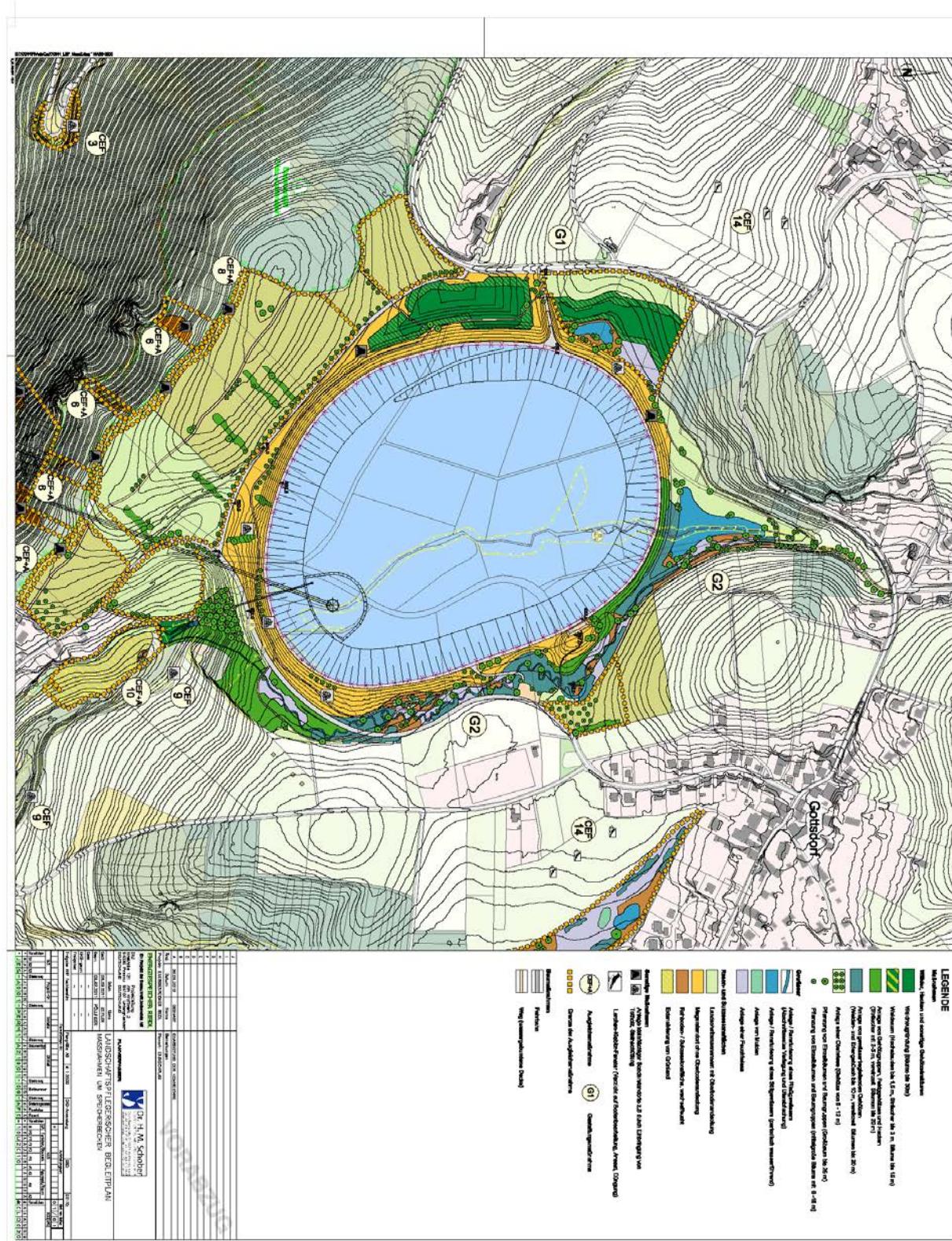
**Abbildung 27:** Differenz Kaltlufthöhe – Integrationszeit nach 120 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)

**Abbildung 28:** Differenz Kaltlufthöhe – Integrationszeit nach 180 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)

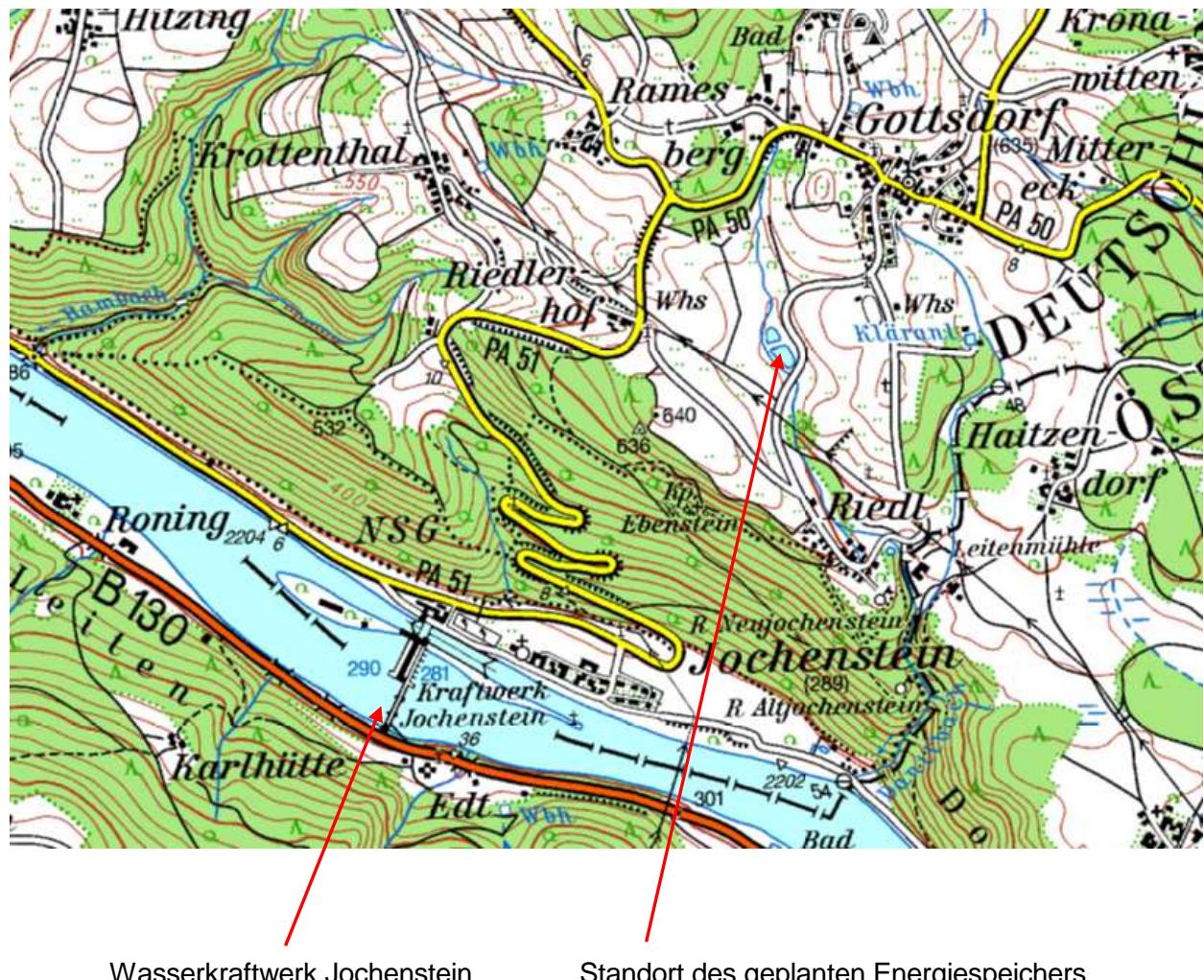
**Abbildung 29:** Differenz Kaltlufthöhe – Integrationszeit nach 240 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)

**Abbildung 30:** Differenz Kaltlufthöhe – Integrationszeit nach 360 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)

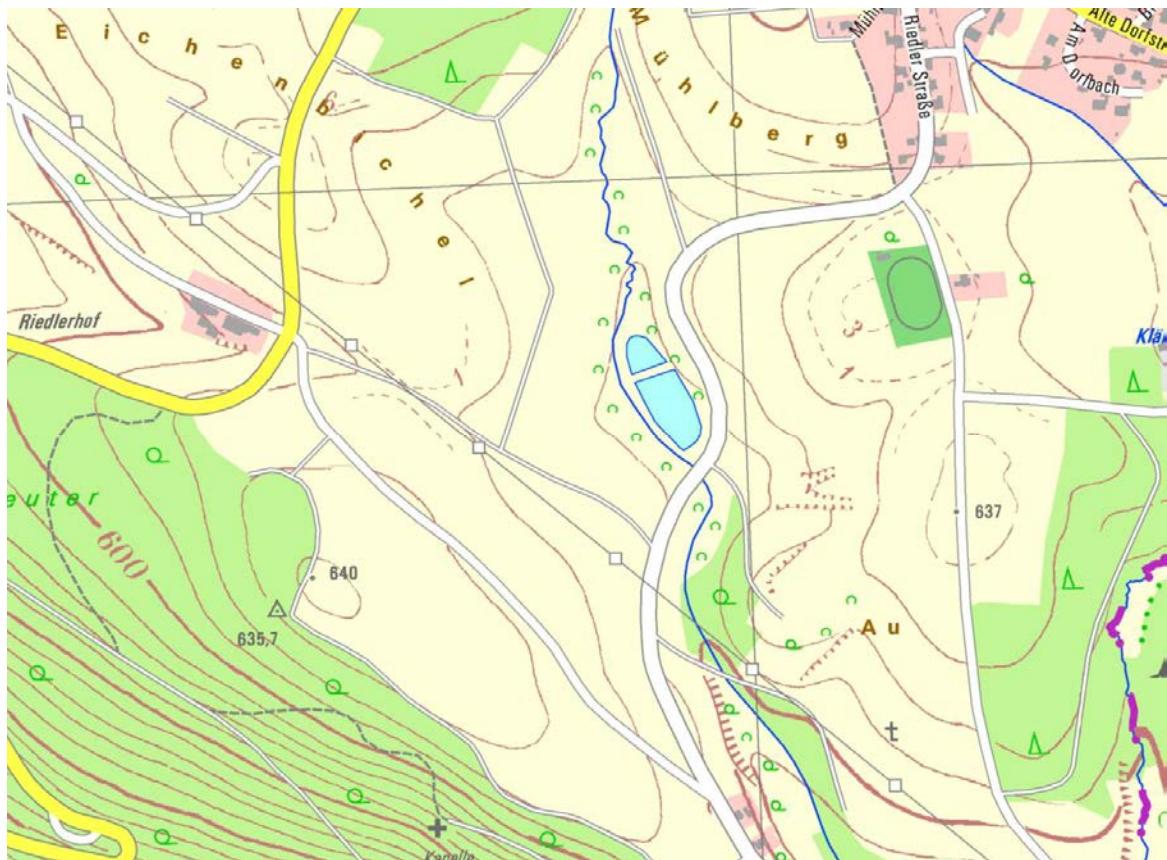
**Abbildung 31:** Differenz Kaltlufthöhe – Integrationszeit nach 480 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)



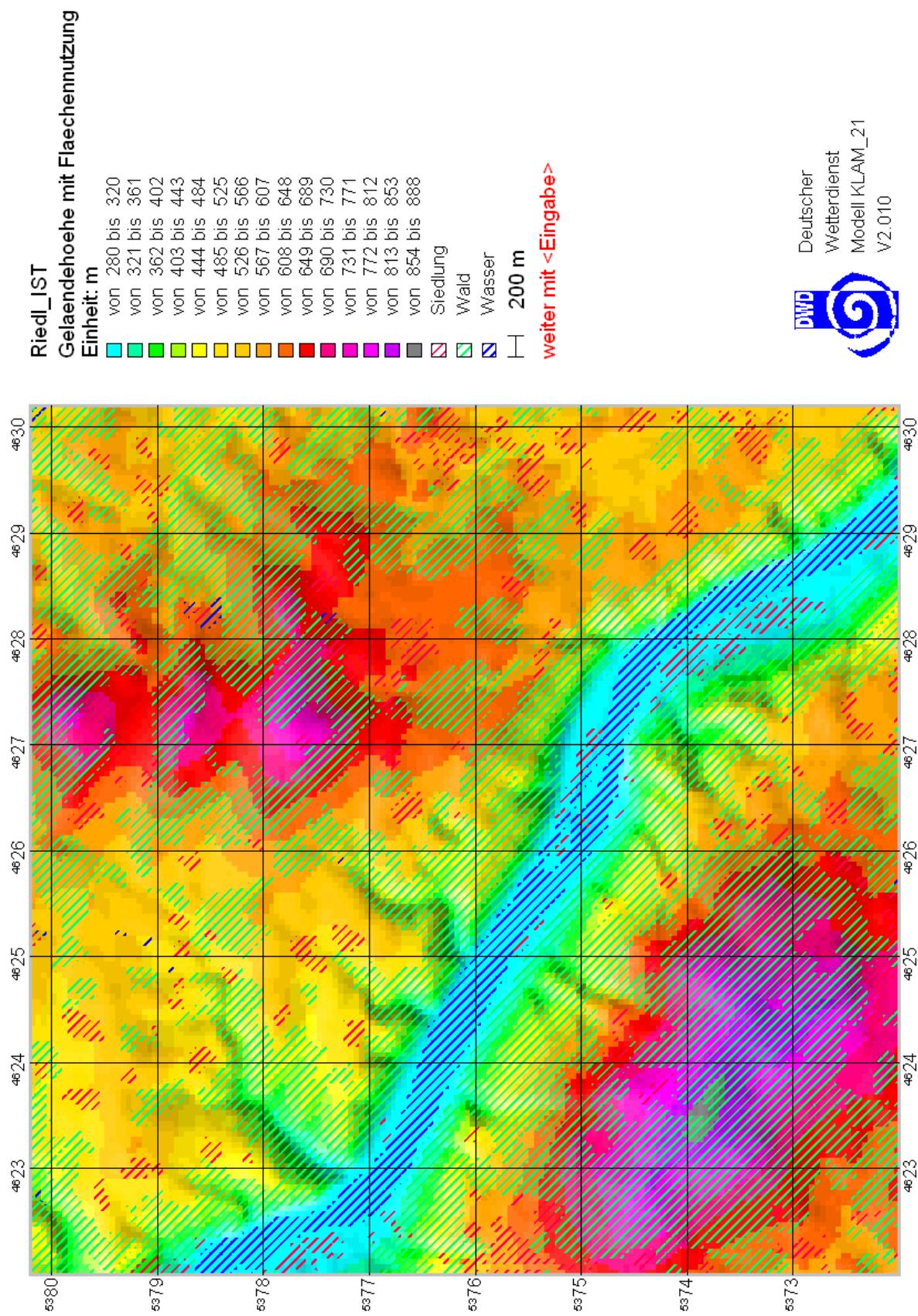
**Abb. 1:** Übersichtsplan des Bauvorhabens „Energiespeicher Riedl“ (Unterlagen vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt)



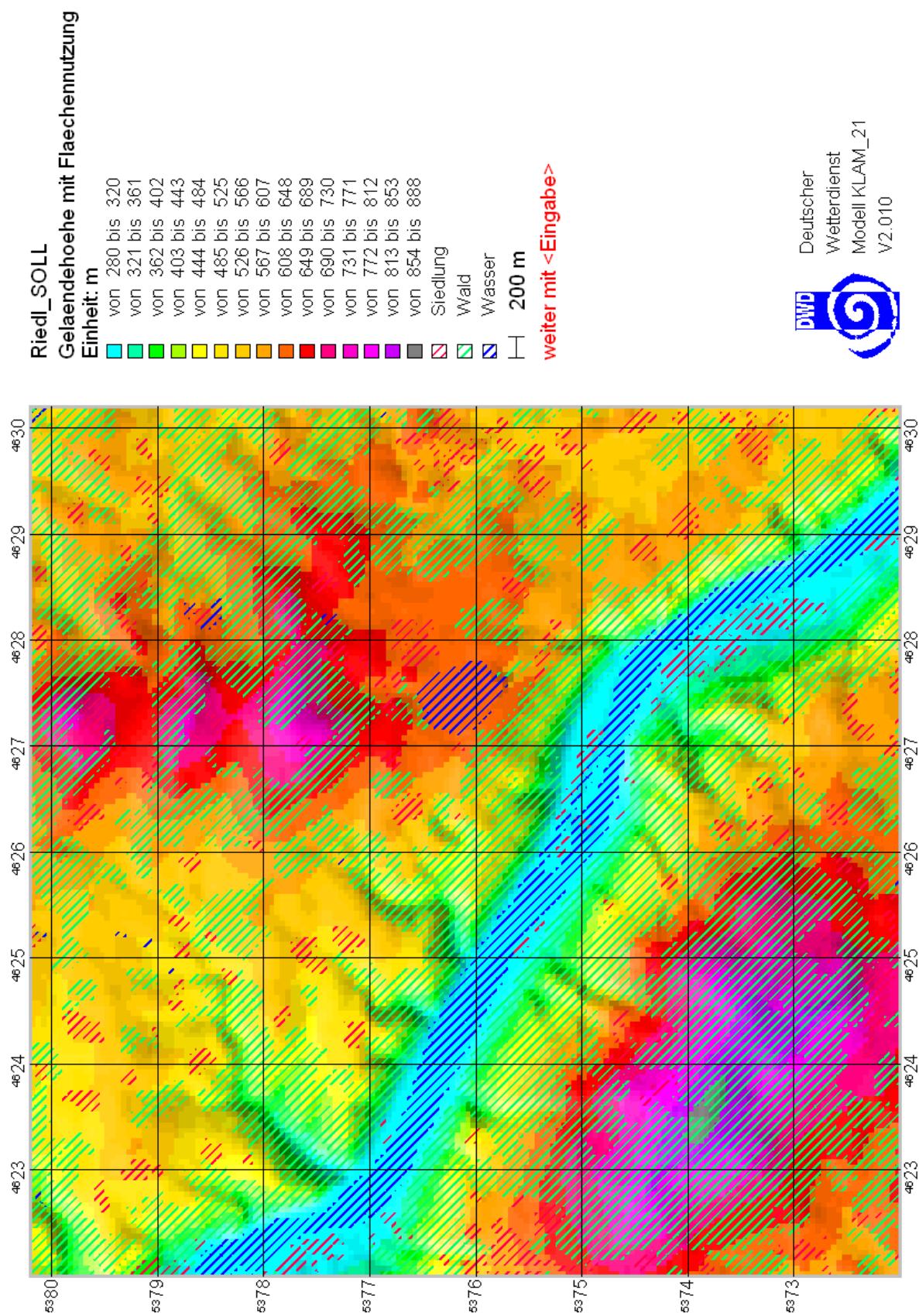
**Abb. 2:** Lage des Untersuchungsgebietes Quelle: © Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie



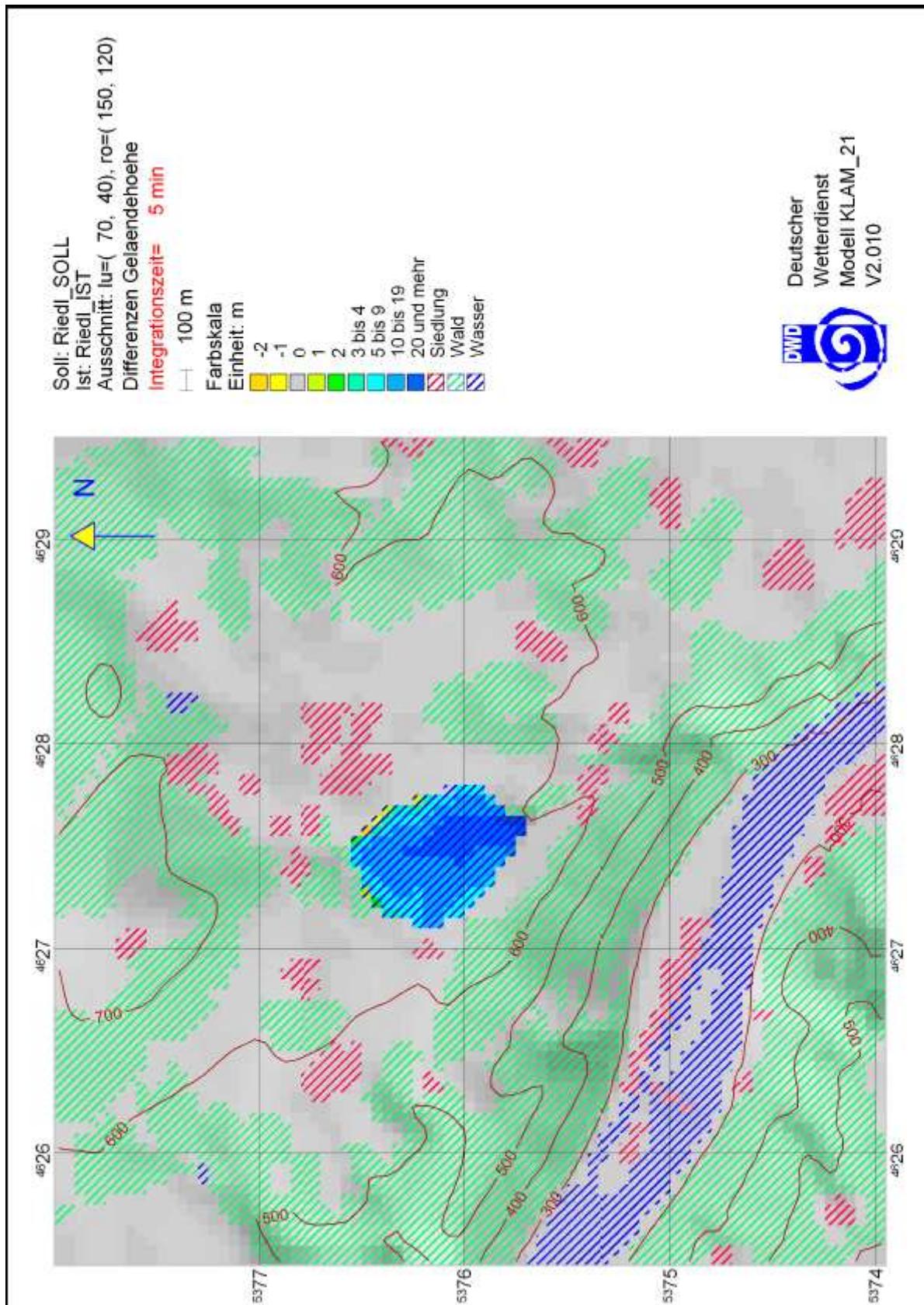
**Abb. 3:** Lage des geplanten Energiespeichers Riedl Quelle: © Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie



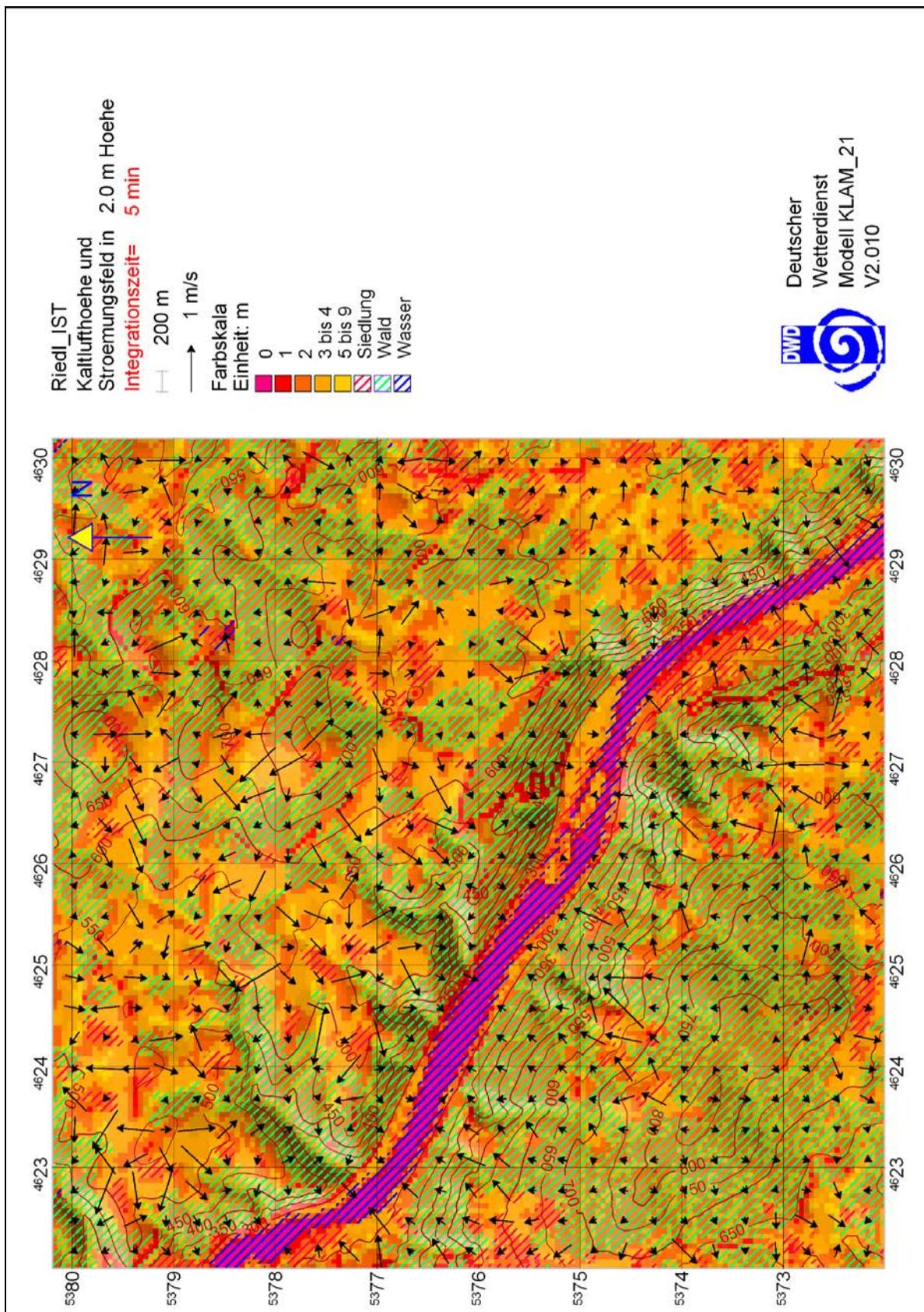
**Abb. 4:** Geländehöhe mit Flächennutzung IST-Zustand



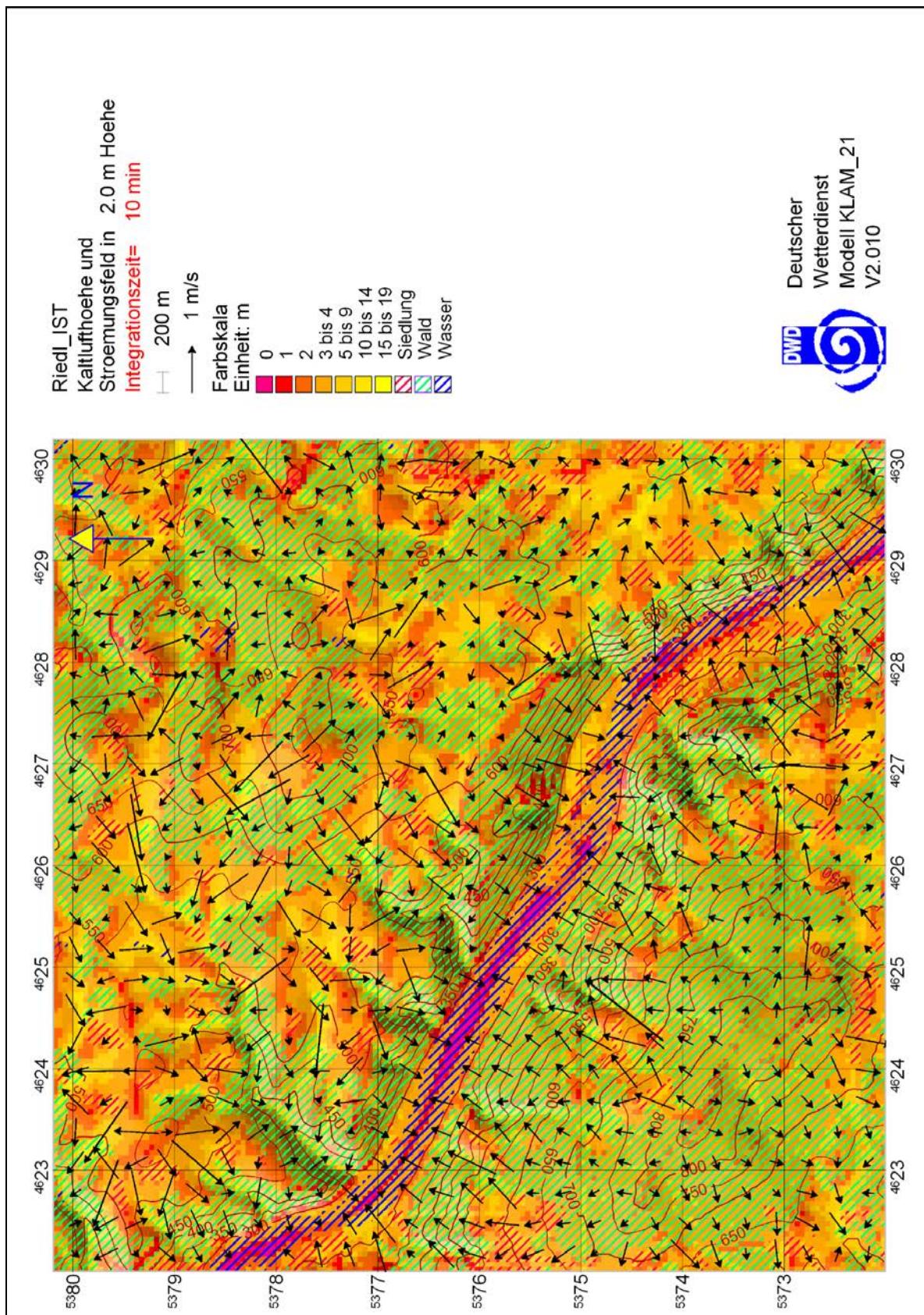
**Abb. 5:** Gelände Höhe mit Flächenutzung SOLL-Zustand



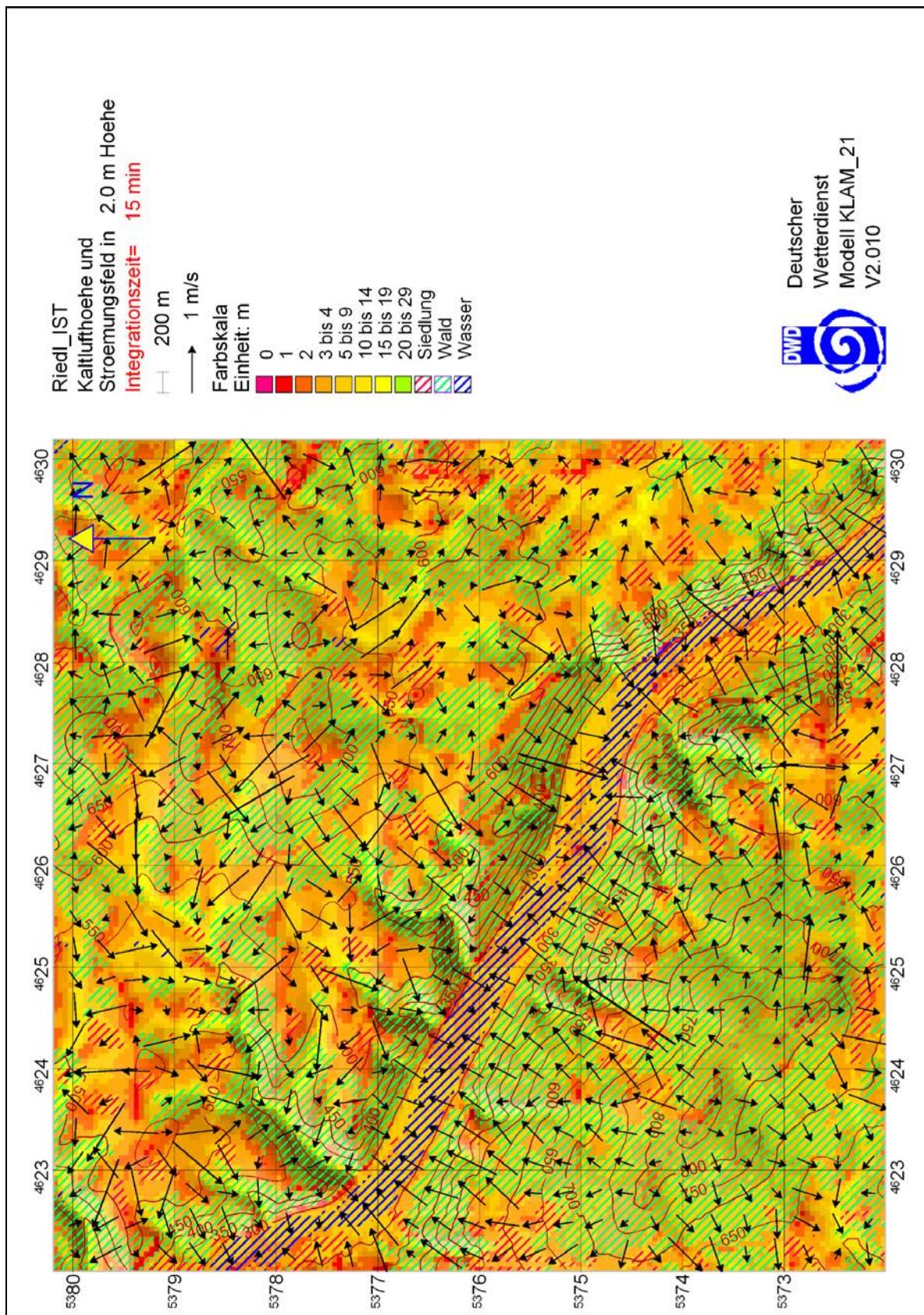
**Abb. 6:** Differenz der Geländeohoehe mit Flächennutzung SOLL-IST-Zustand



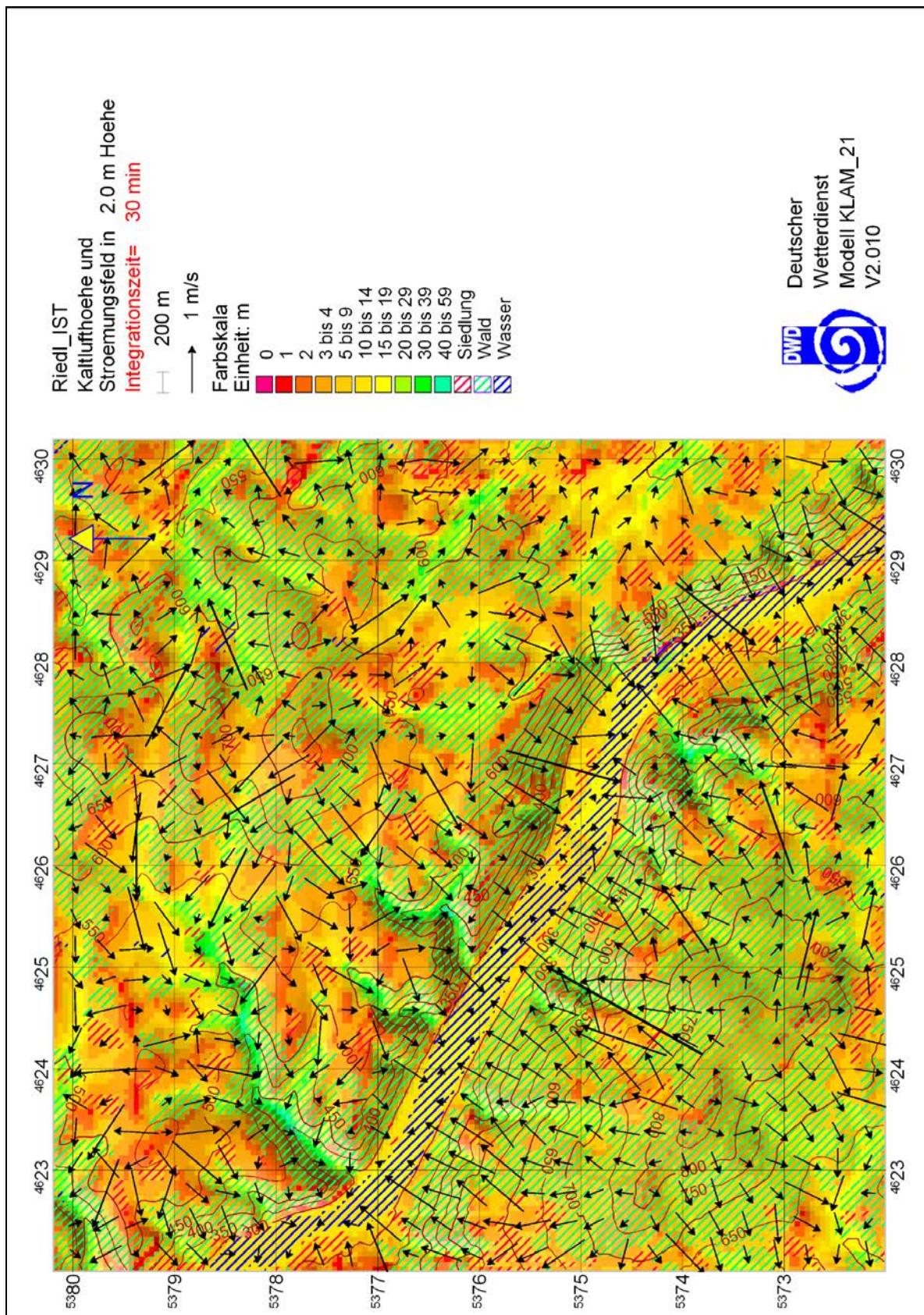
**Abb. 7:** Kaltlufthoehe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 5 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



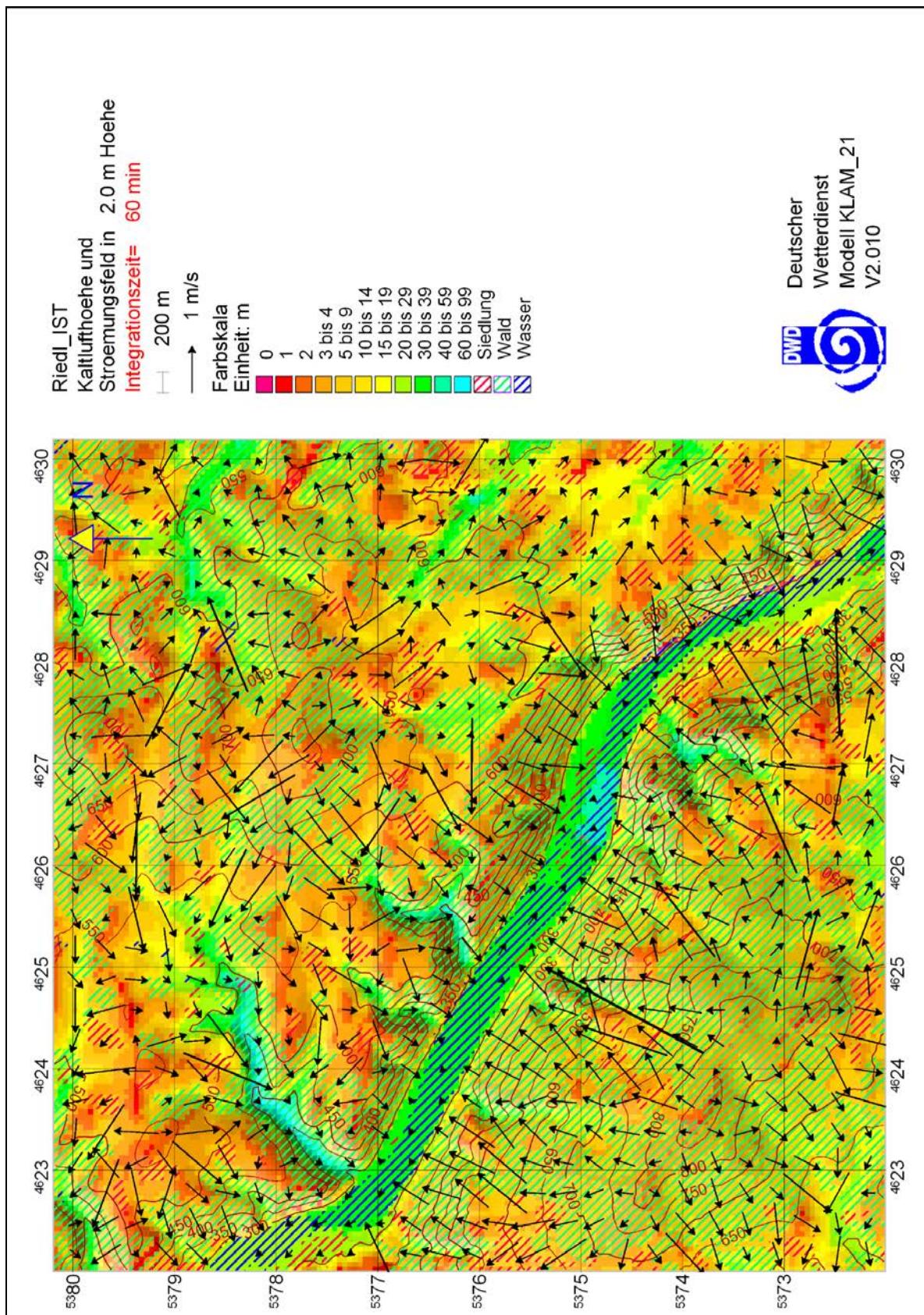
**Abb. 8:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 10 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



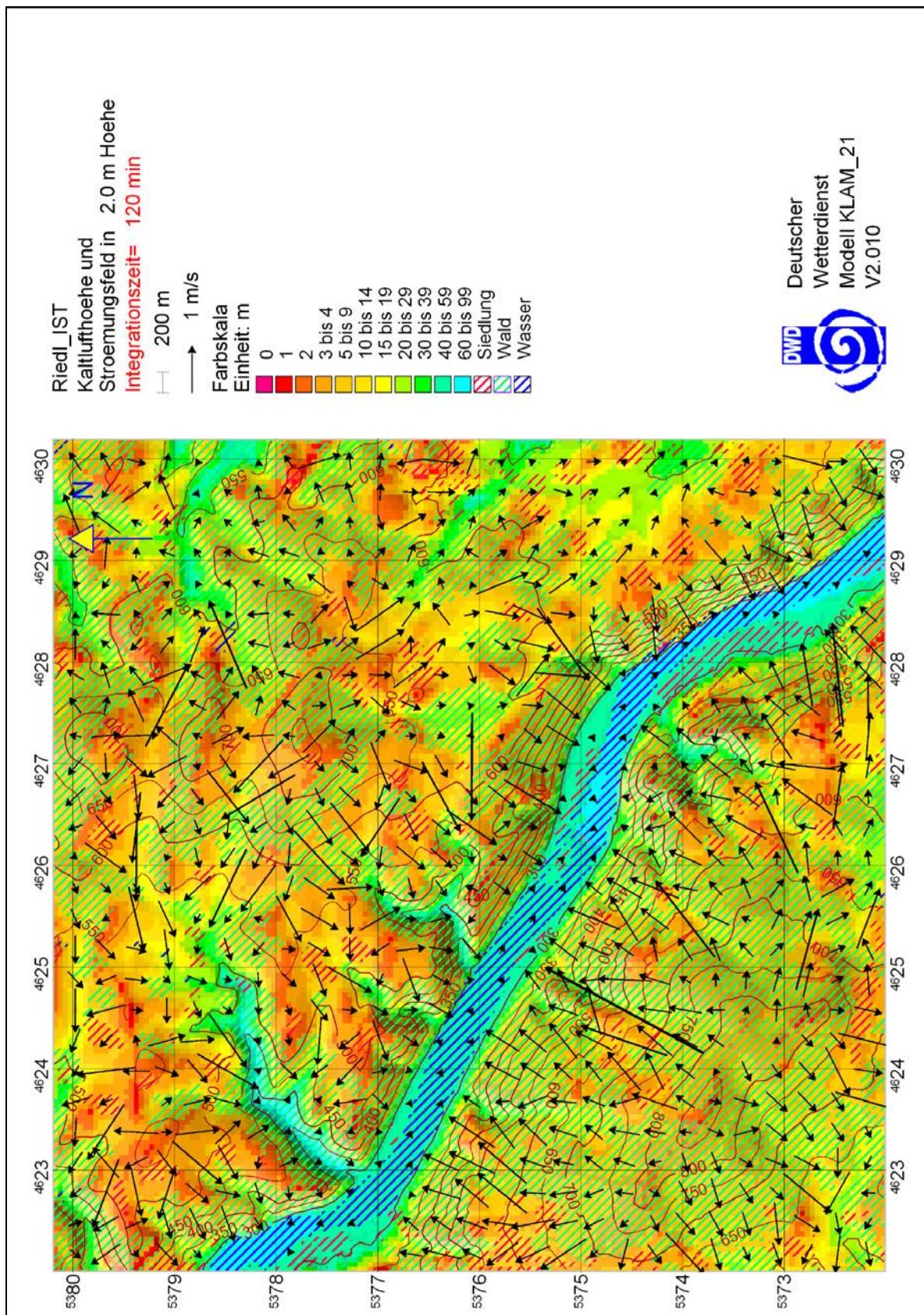
**Abb. 9:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 15 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



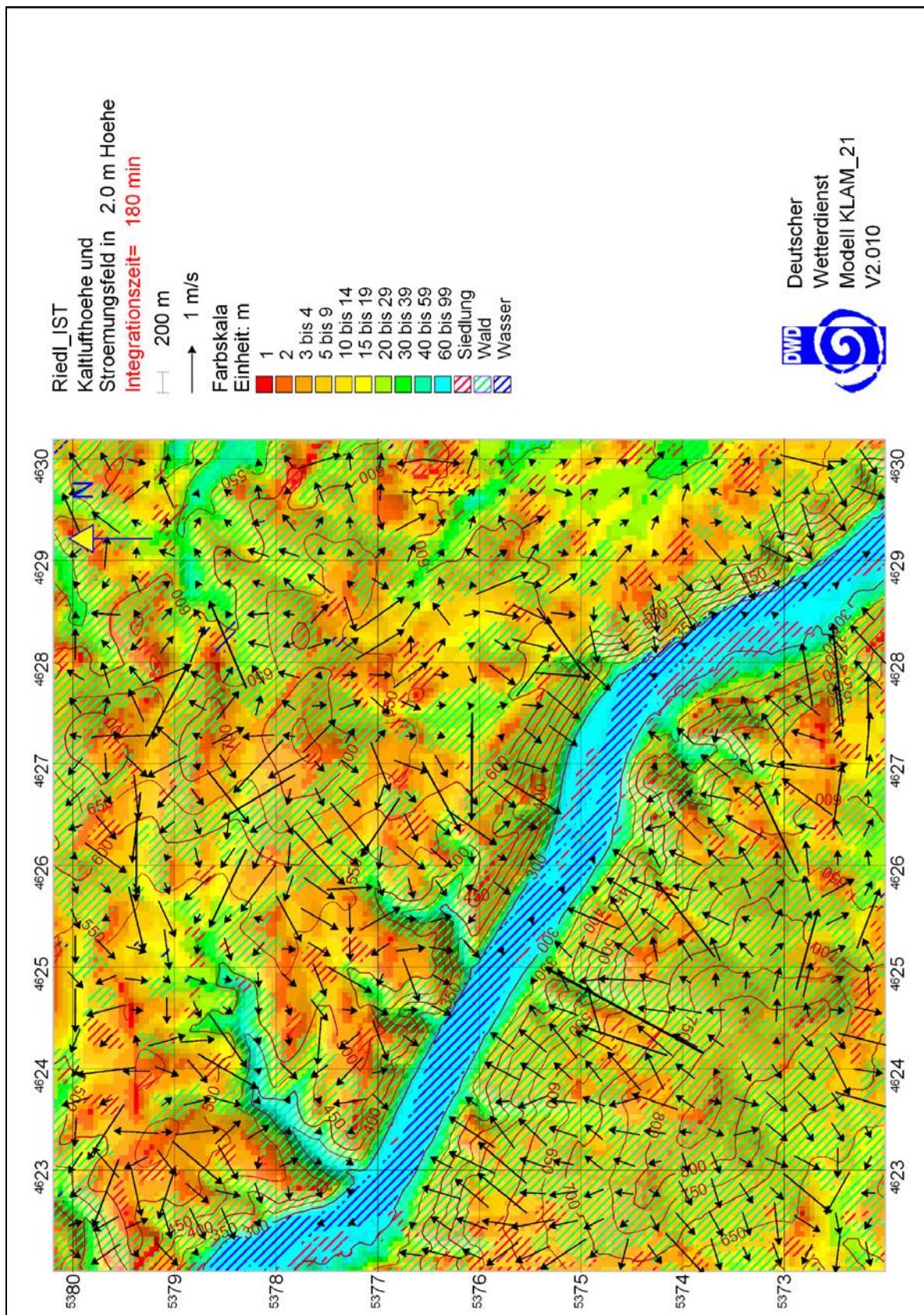
**Abb. 10:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 30 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



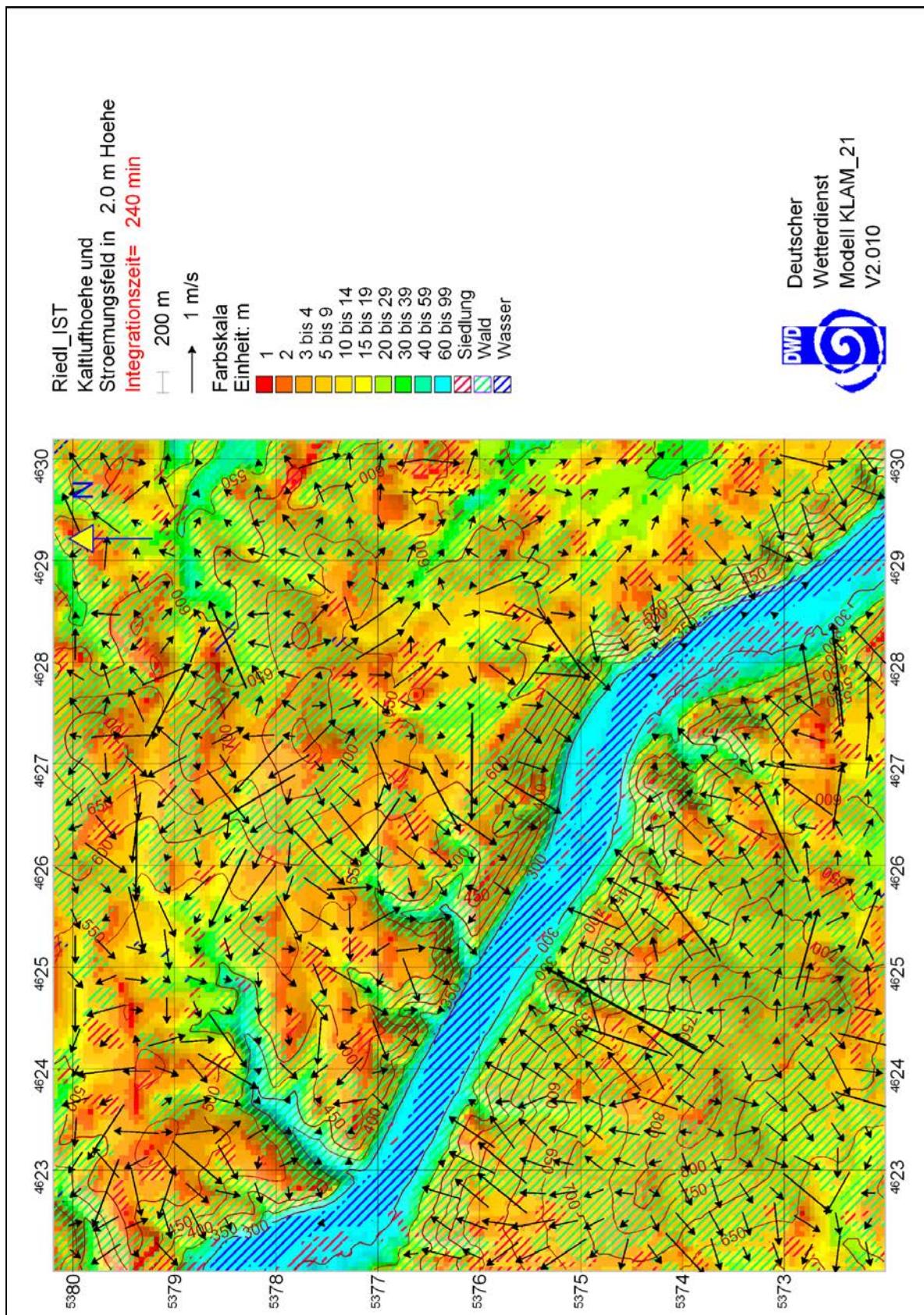
**Abb. 11:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 60 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



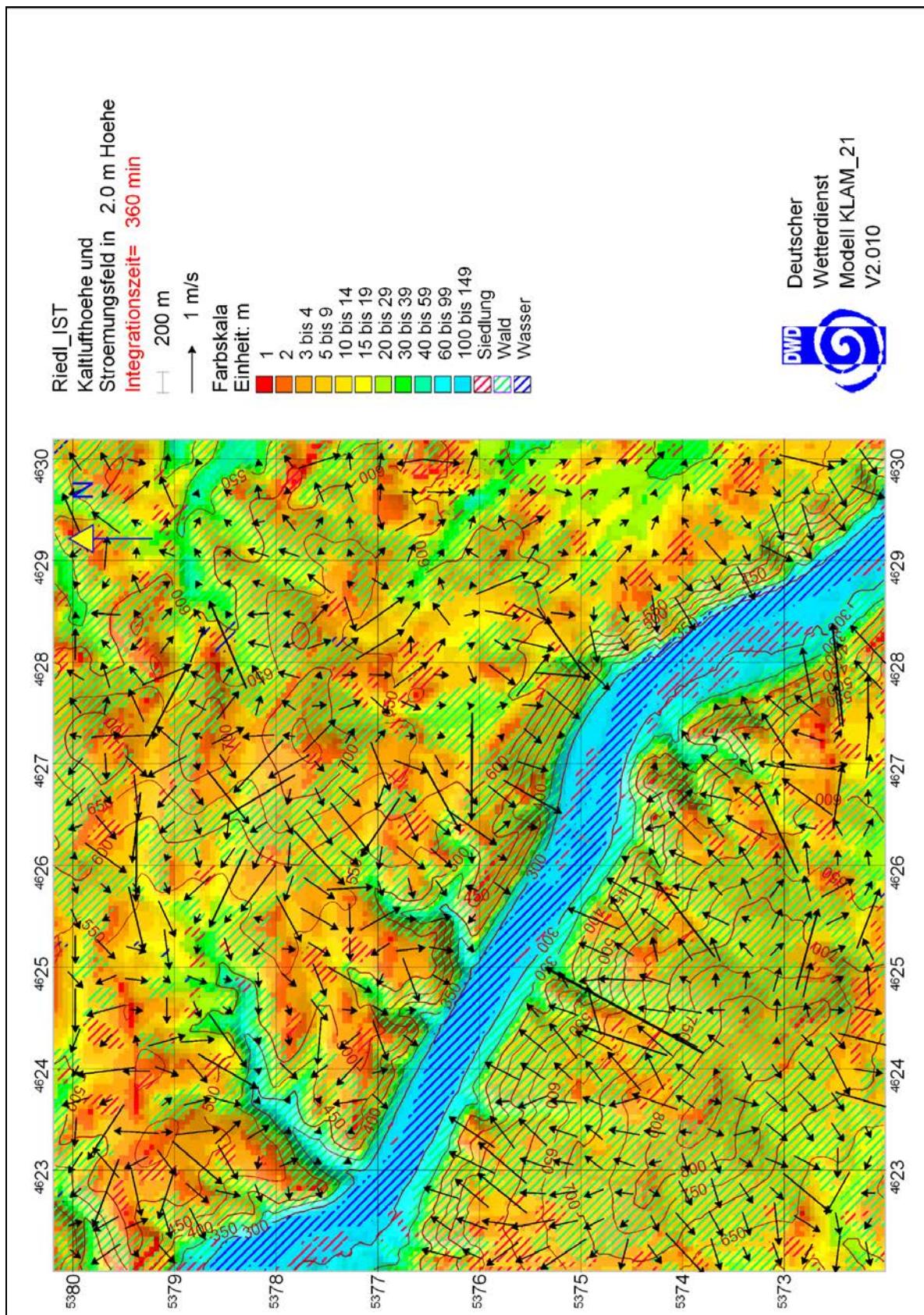
**Abb. 12:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 120 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



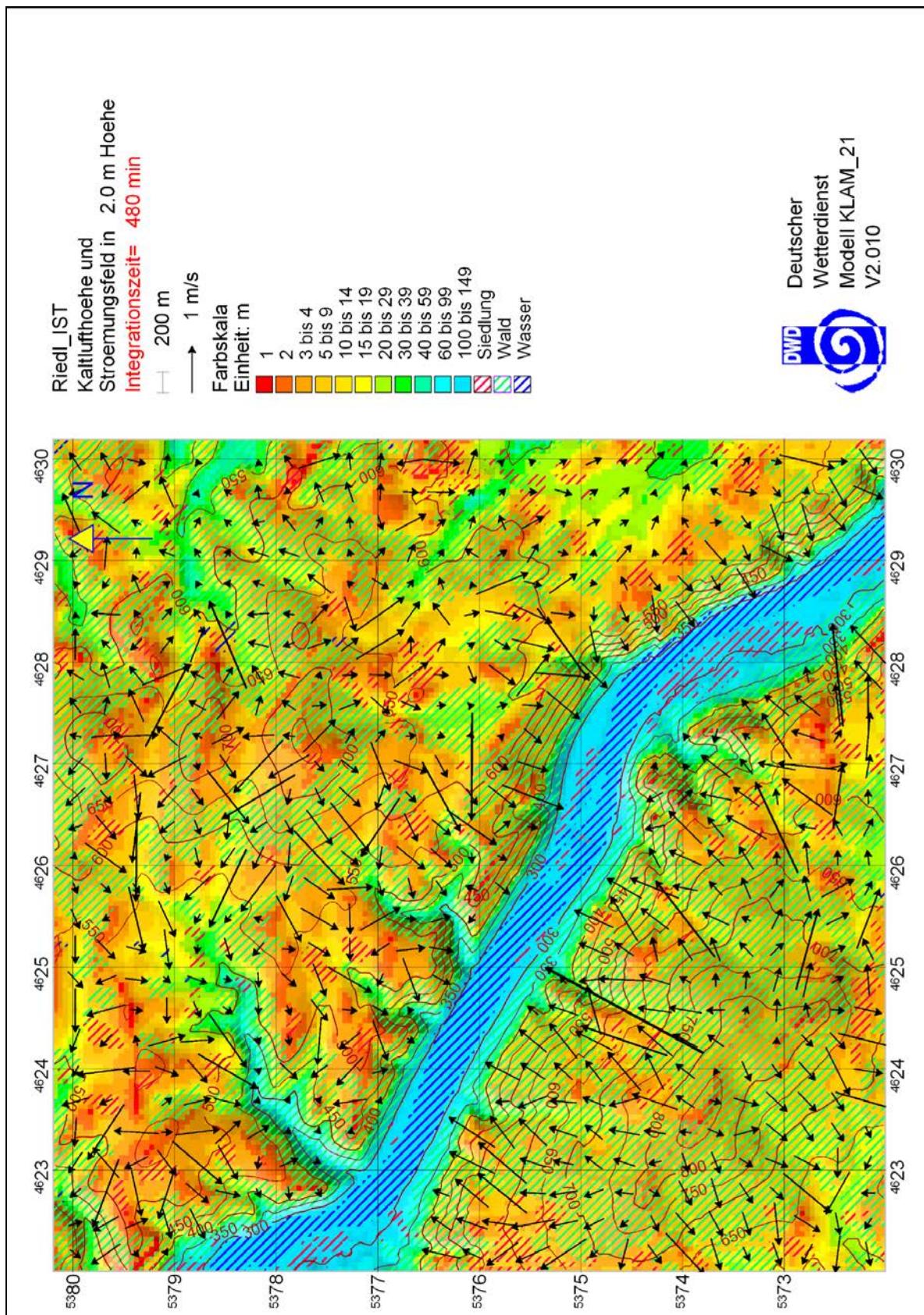
**Abb. 13:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 180 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



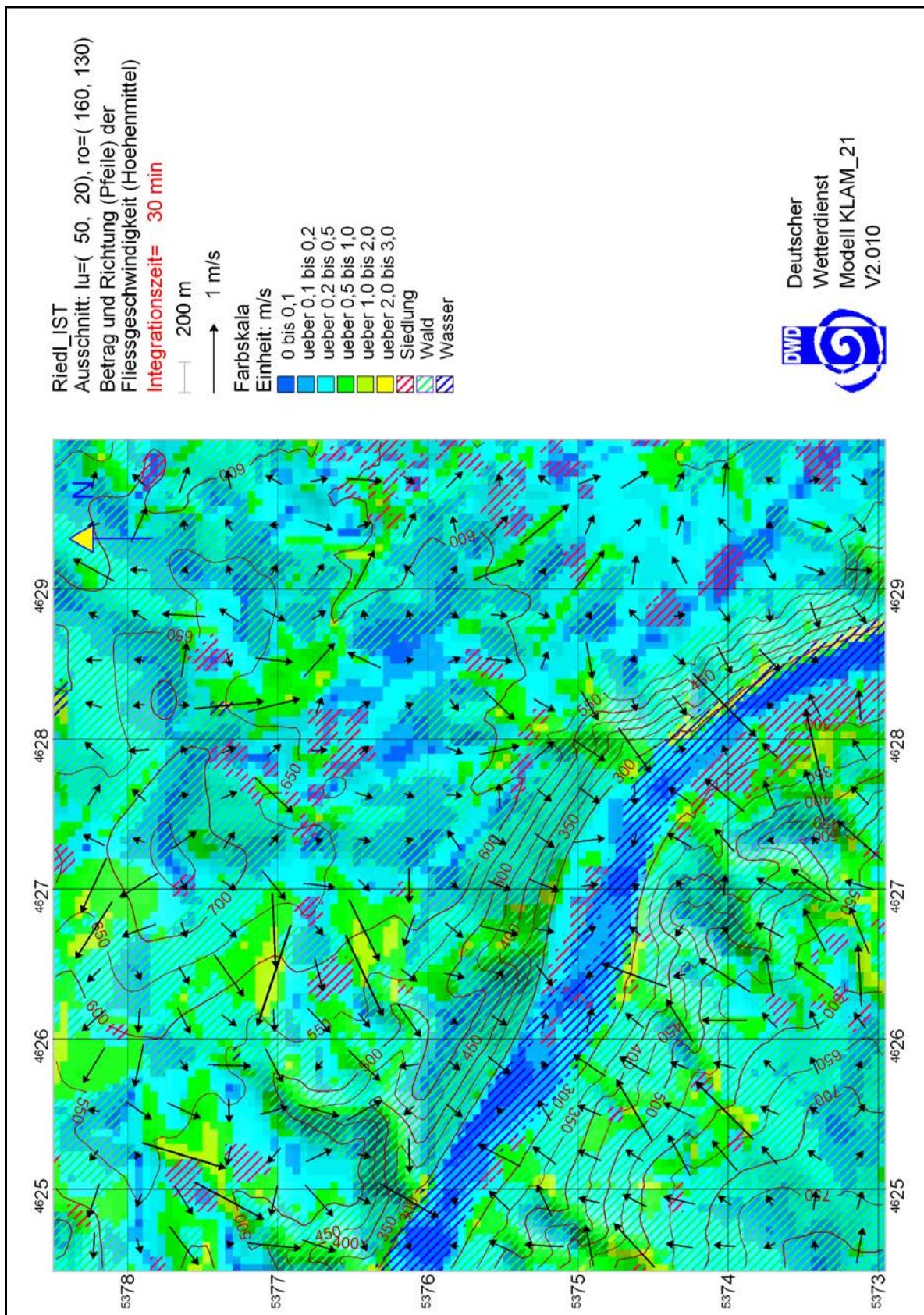
**Abb. 14:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 240 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



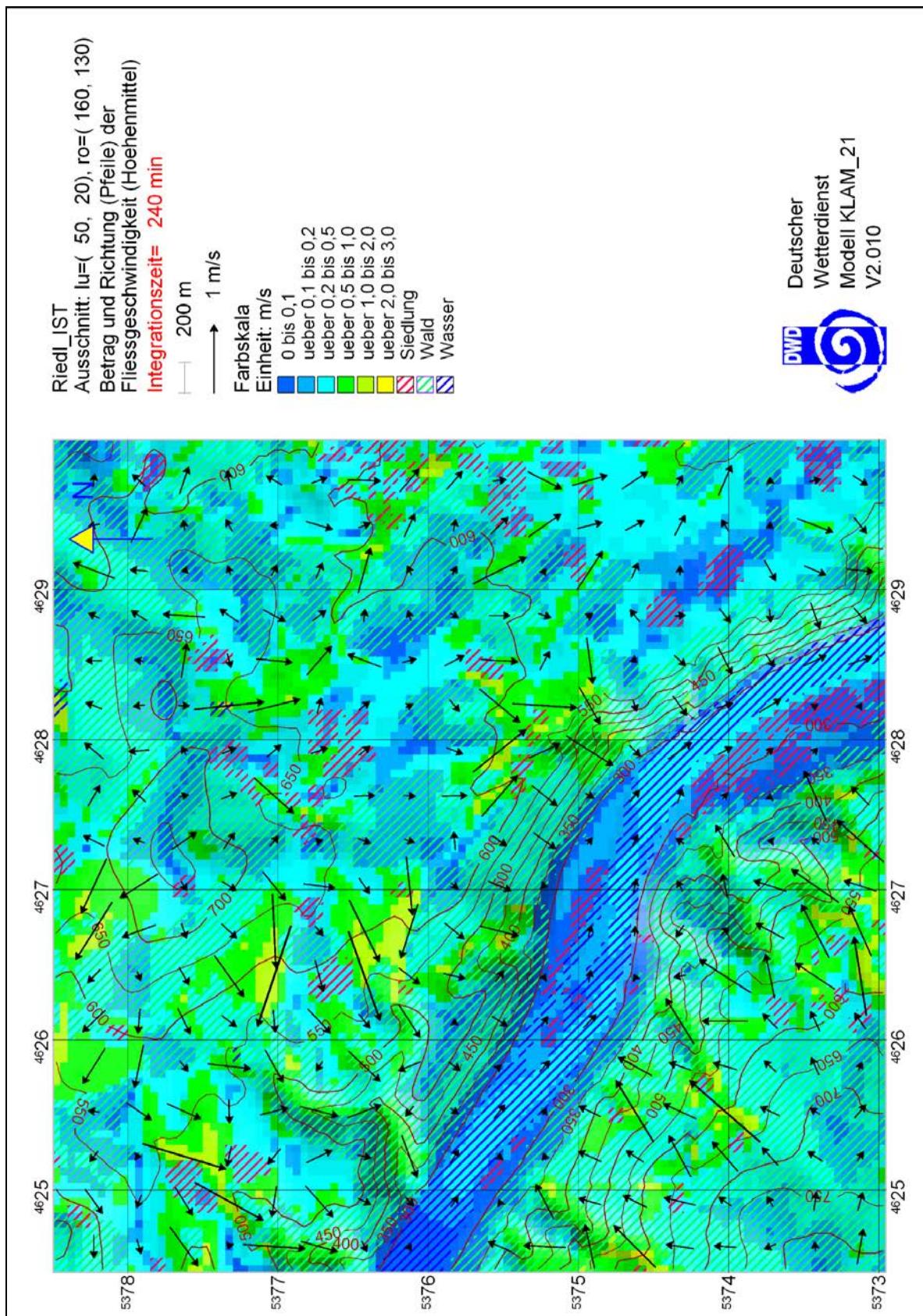
**Abb. 15:** Kaltlufthoehe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 360 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



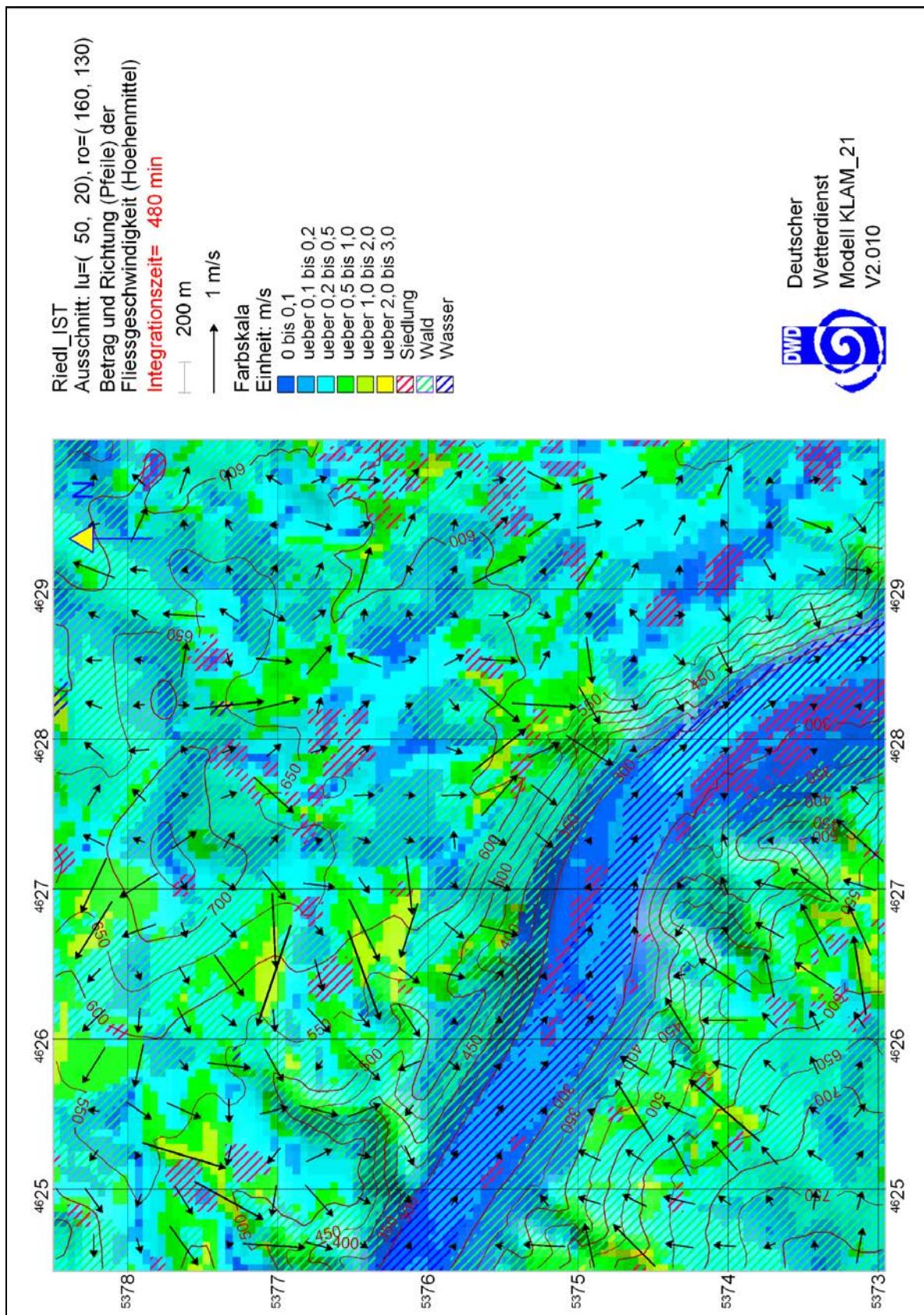
**Abb. 16:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 480 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



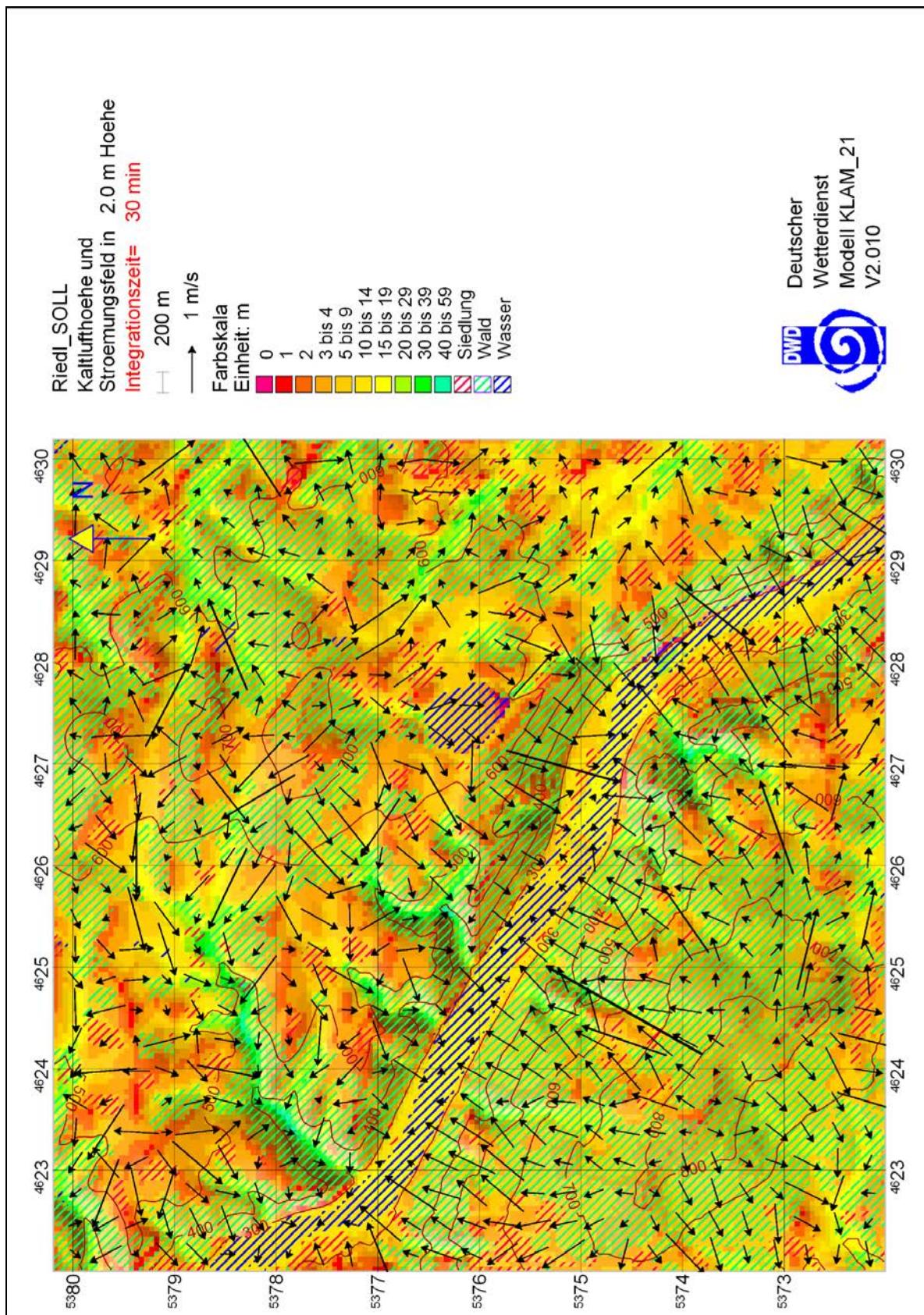
**Abb. 17:** Betrag und Richtung der Fließgeschwindigkeit – Integrationszeit nach 30 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



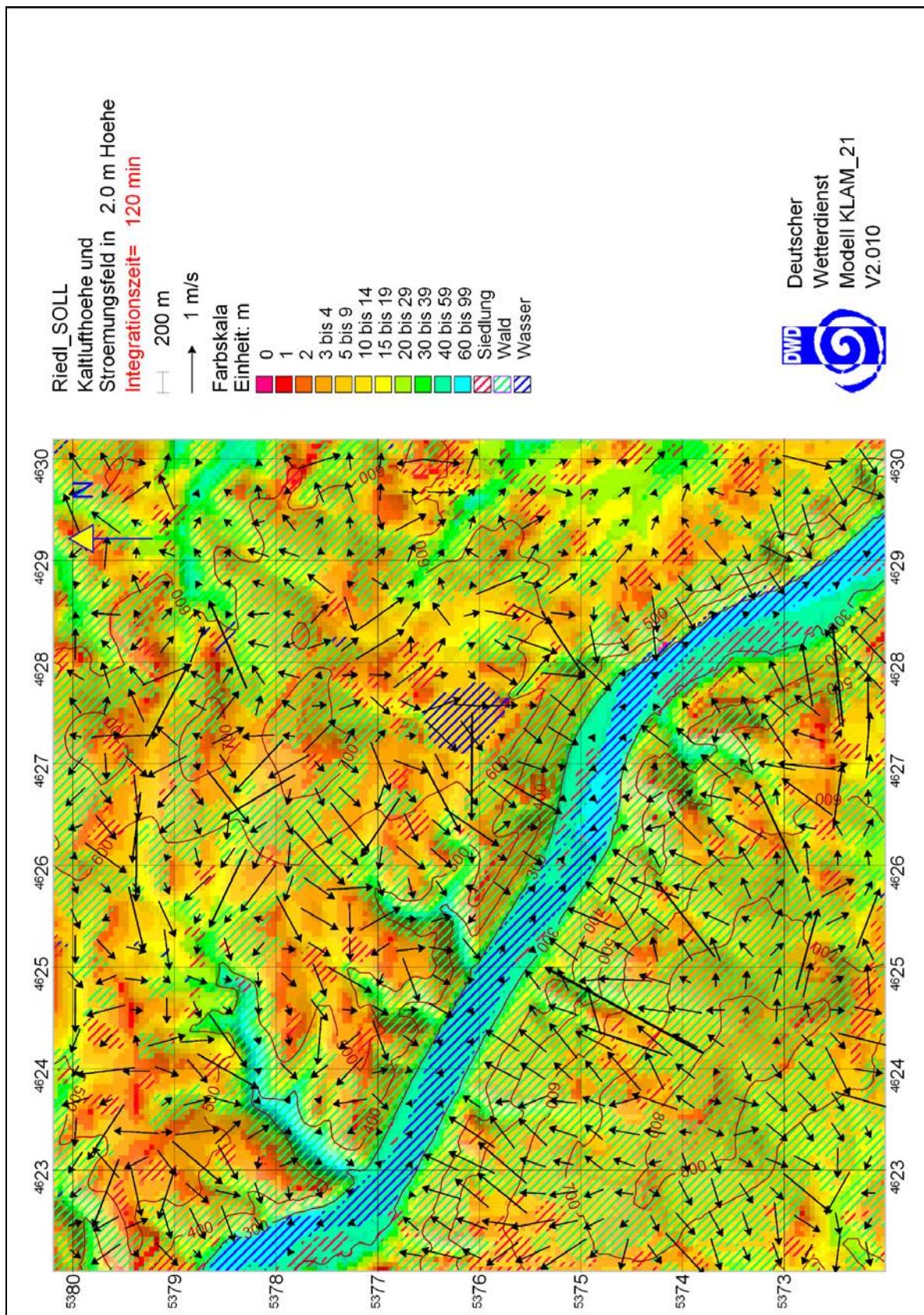
**Abb. 18:** Betrag und Richtung der Fließgeschwindigkeit – Integrationszeit nach 240 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



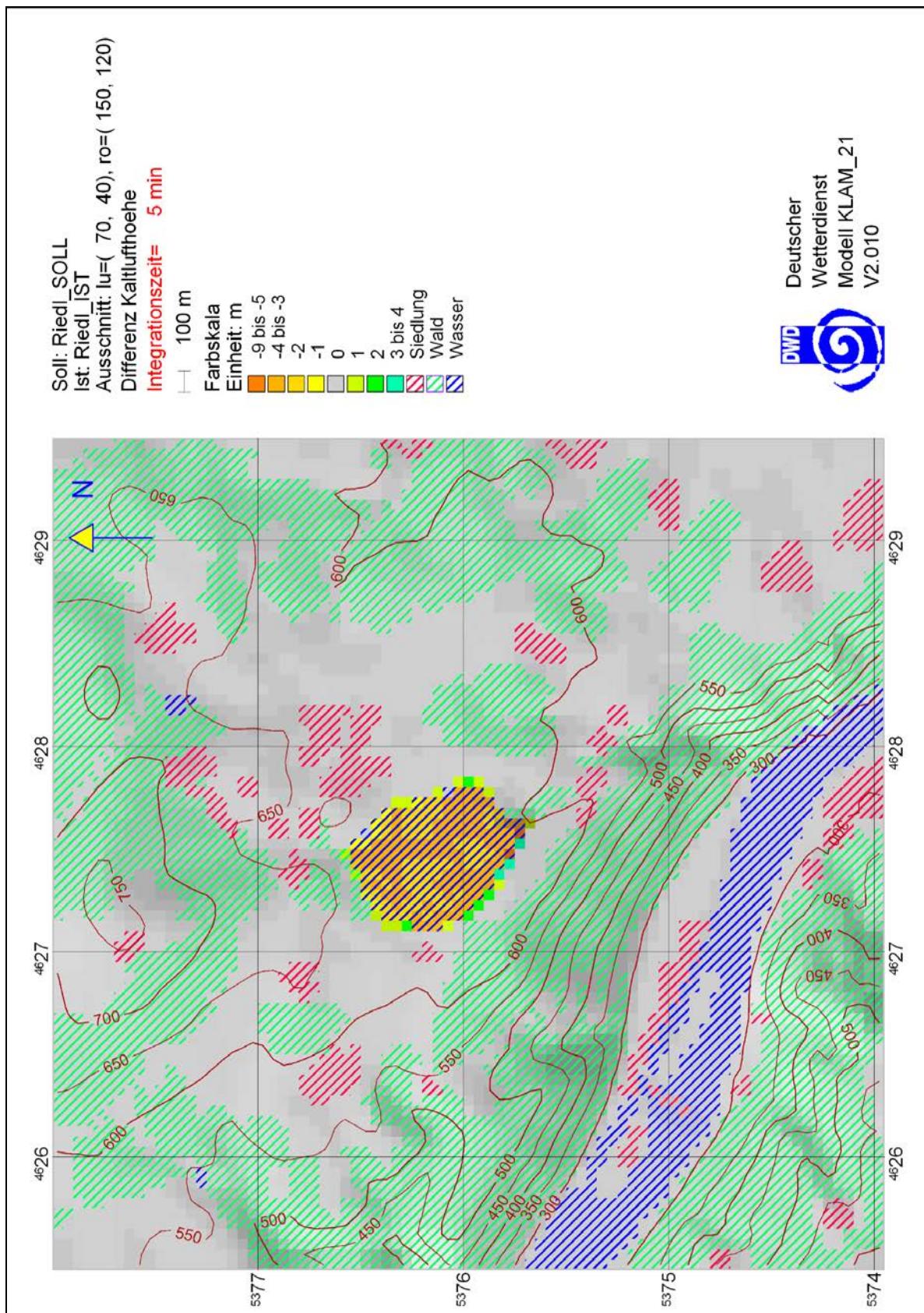
**Abb. 19:** Betrag und Richtung der Fließgeschwindigkeit – Integrationszeit nach 480 Minuten (Gesamtgebiet / IST-Zustand)



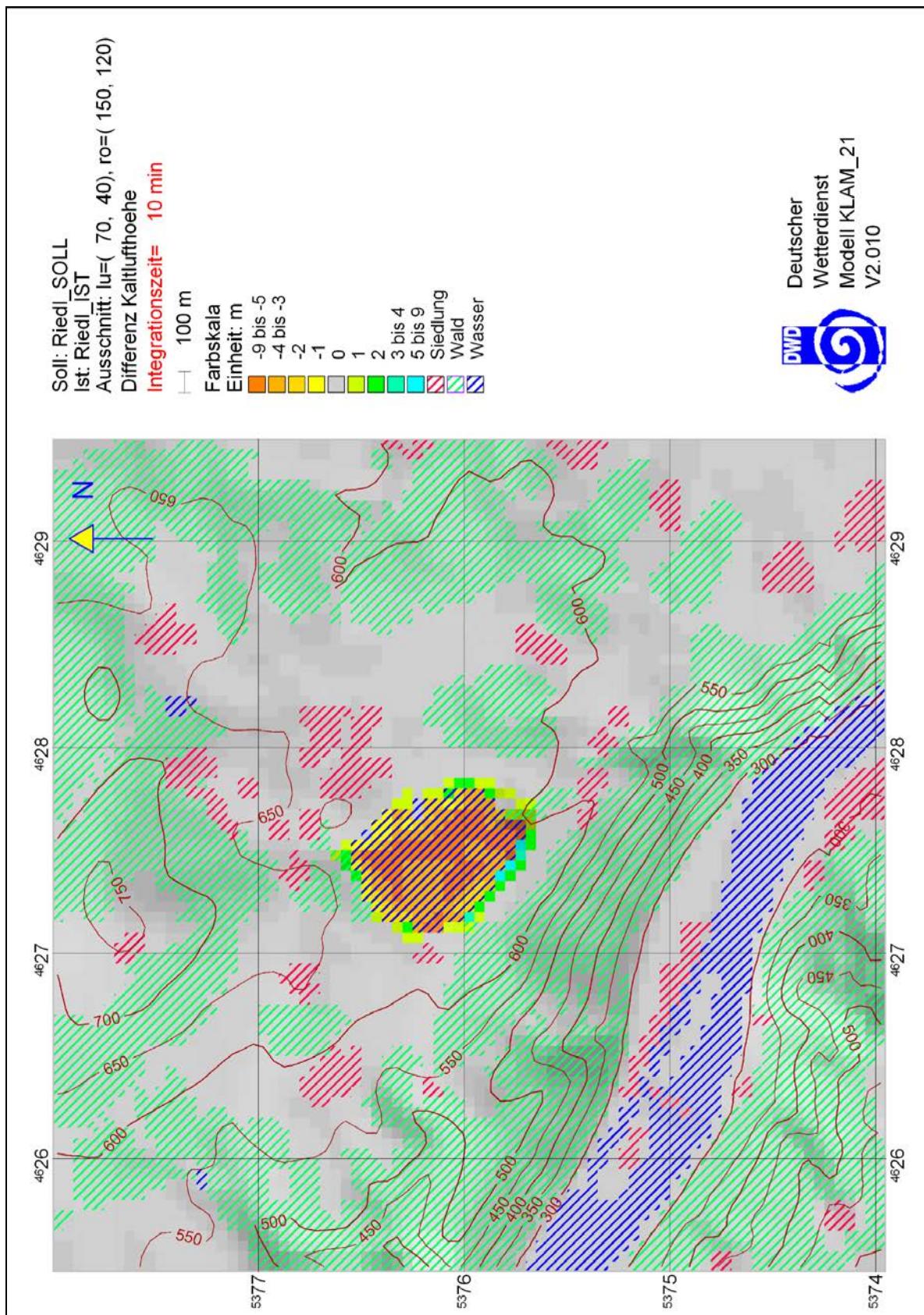
**Abb. 20:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 30 Minuten (Gesamtgebiet / SOLL-Zustand)



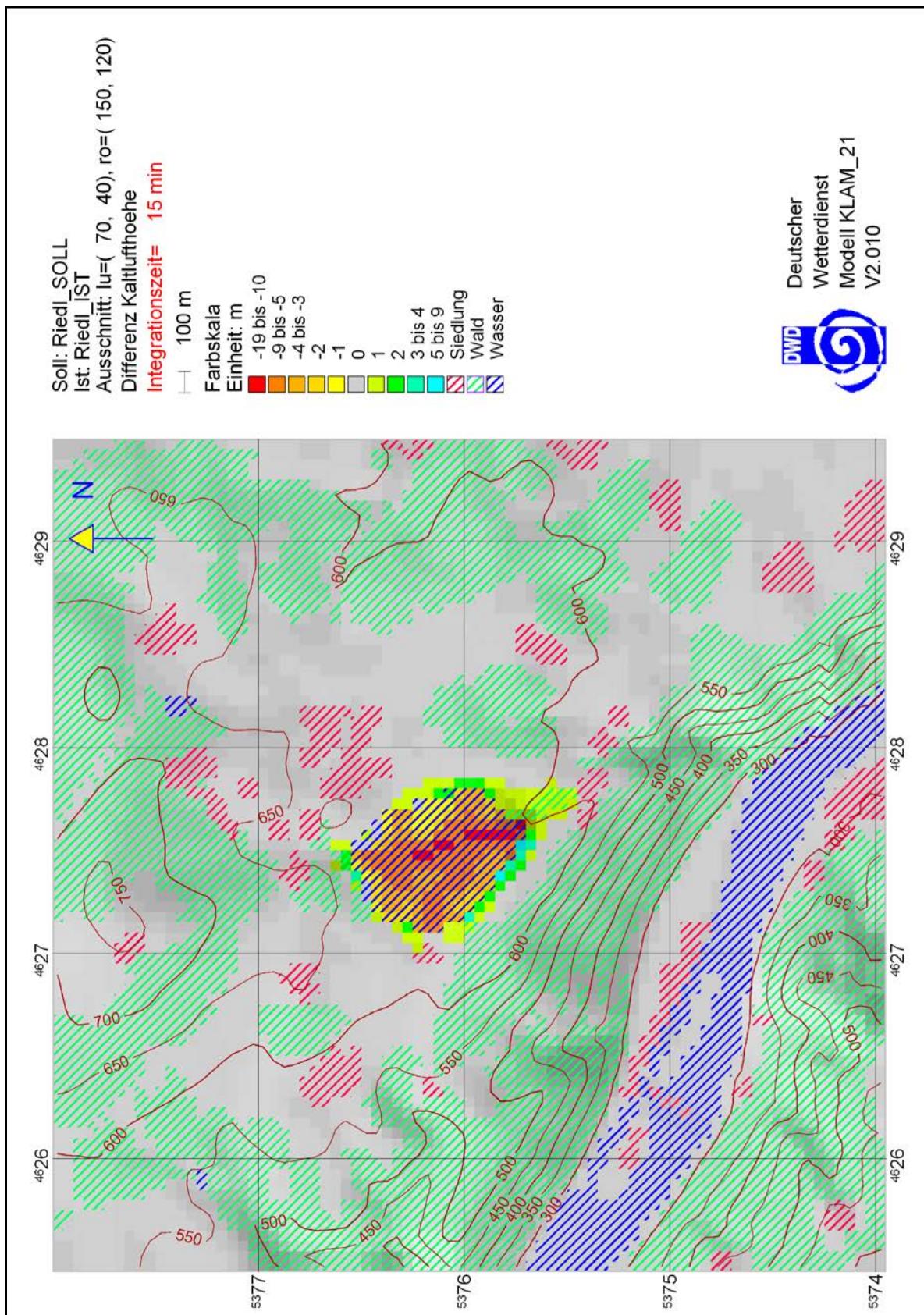
**Abb. 21:** Kaltlufthöhe und Strömungsfeld – Integrationszeit nach 120 Minuten (Gesamtgebiet / SOLL-Zustand)



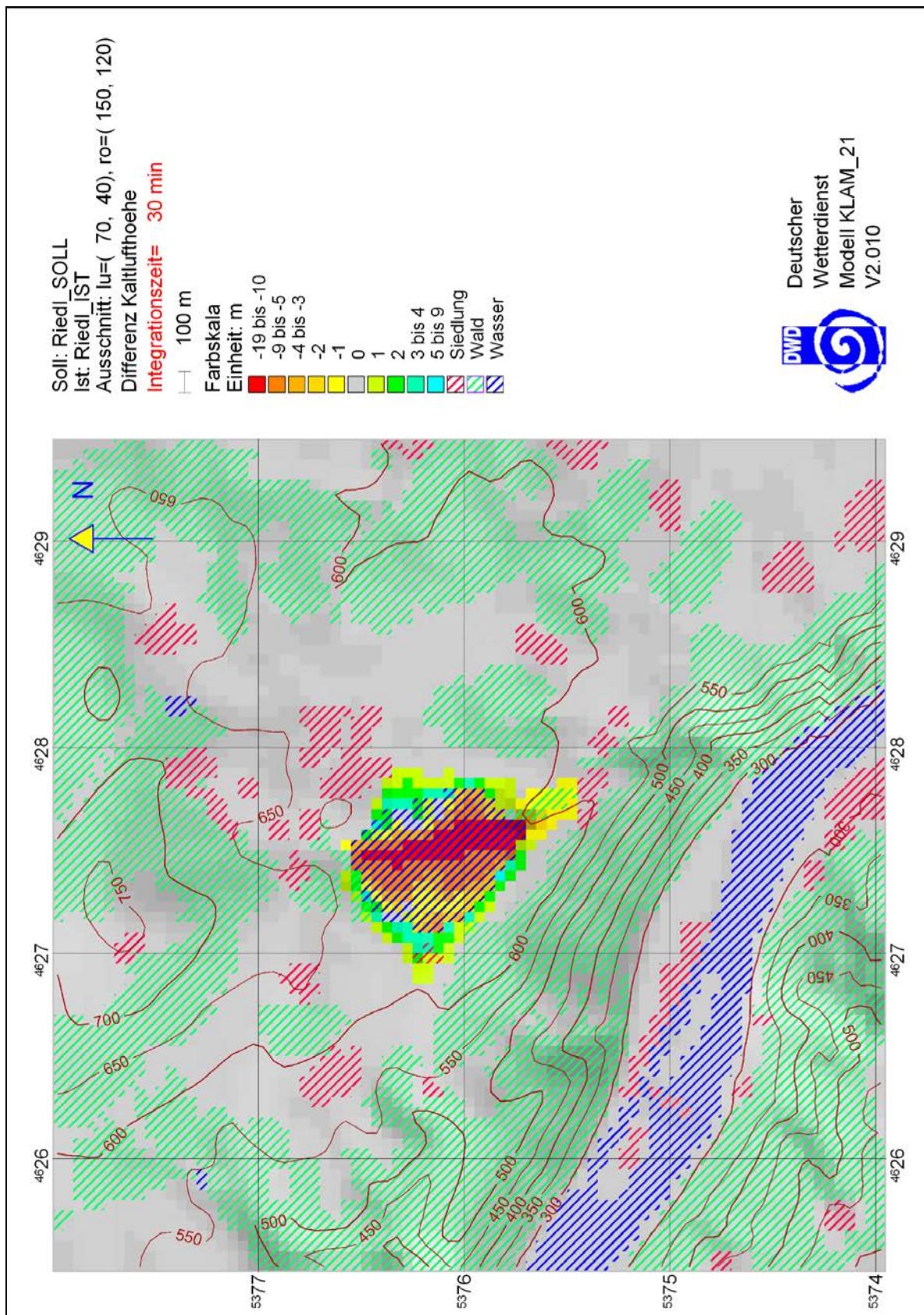
**Abb. 22:** Differenz Kaltlufthöhe – Integrationszeit nach 5 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)



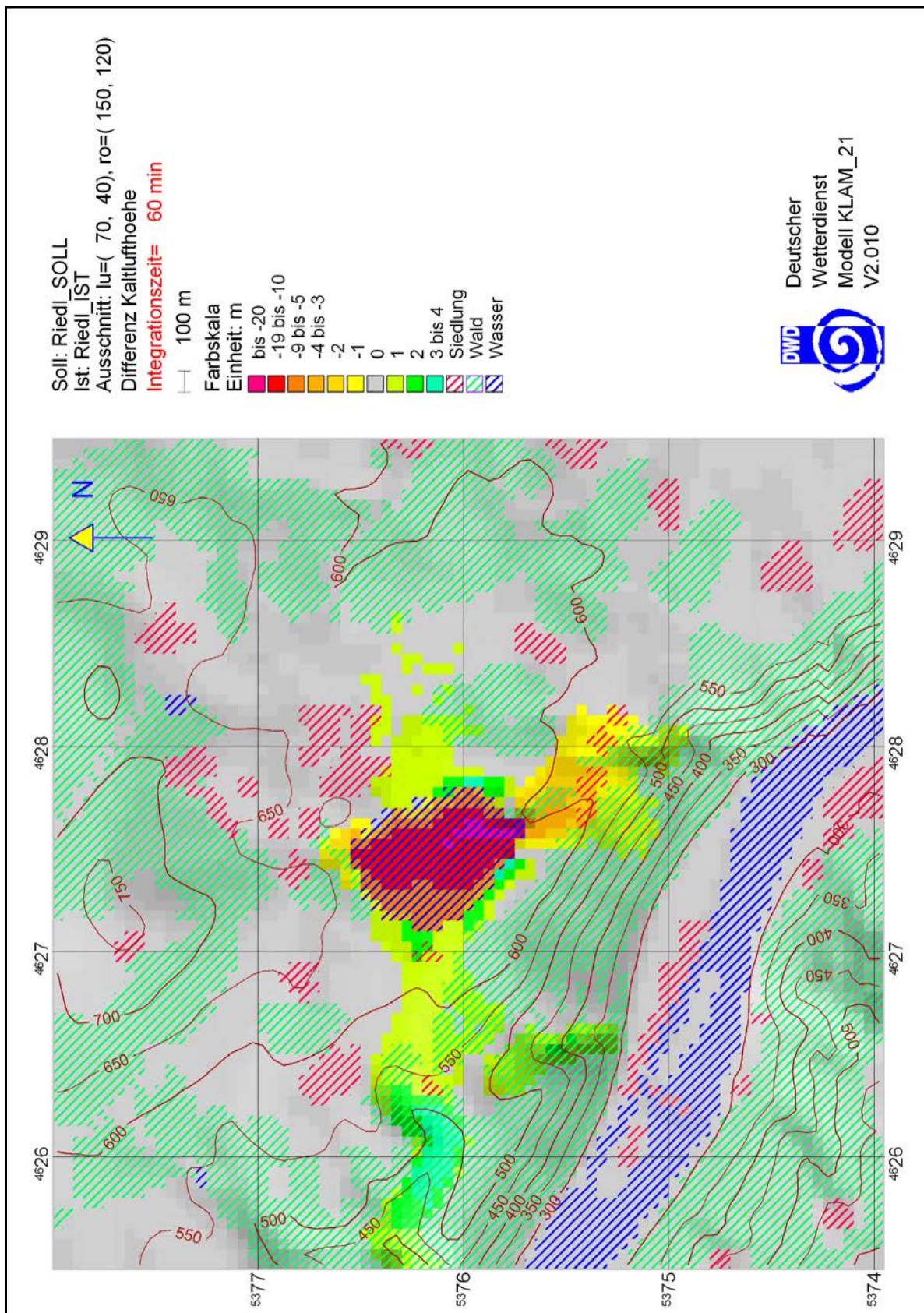
**Abb. 23:** Differenz Kaltlufthoehe – Integrationszeit nach 10 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)



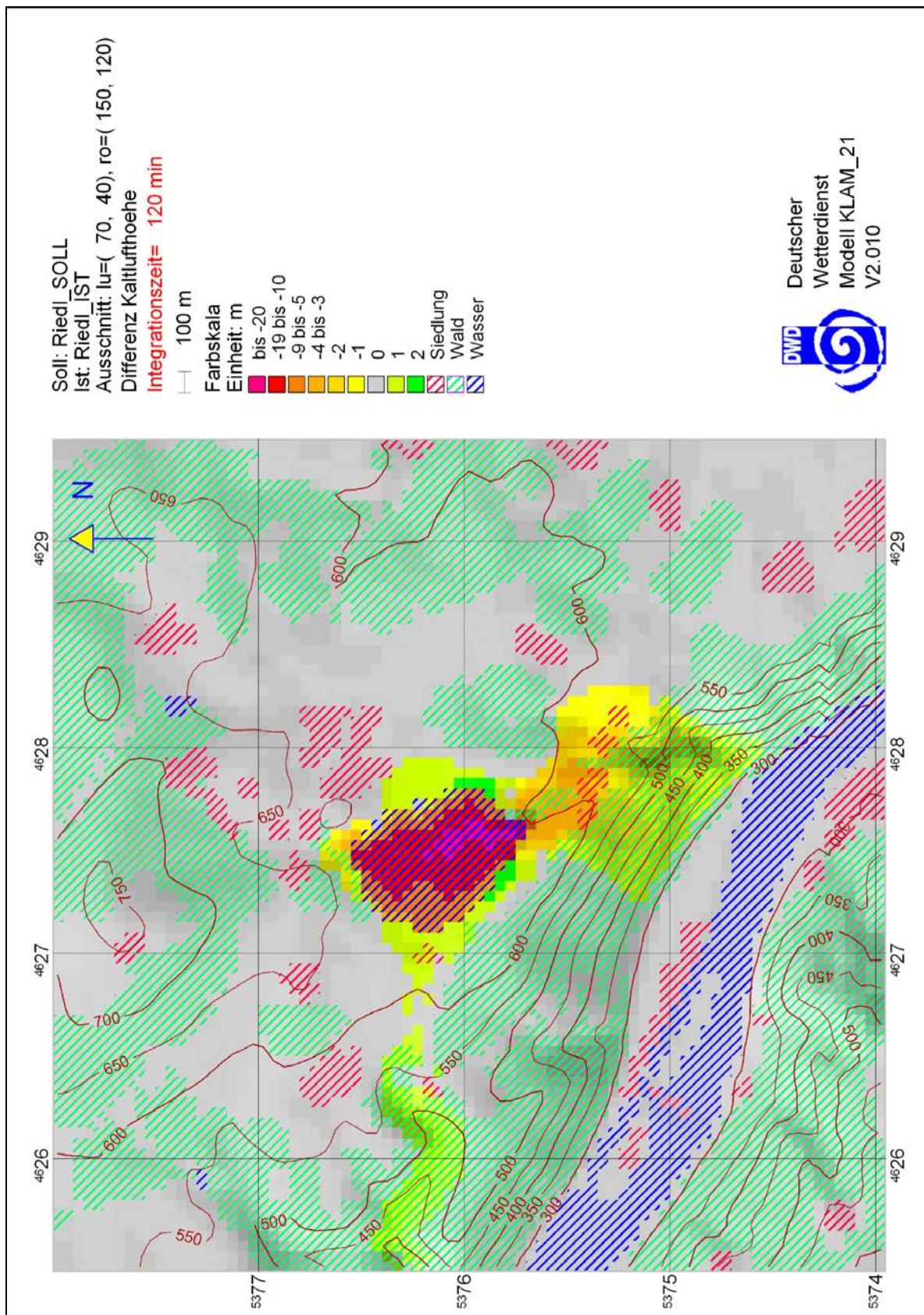
**Abb. 24:** Differenz Kaltlufthoehe – Integrationszeit nach 15 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)



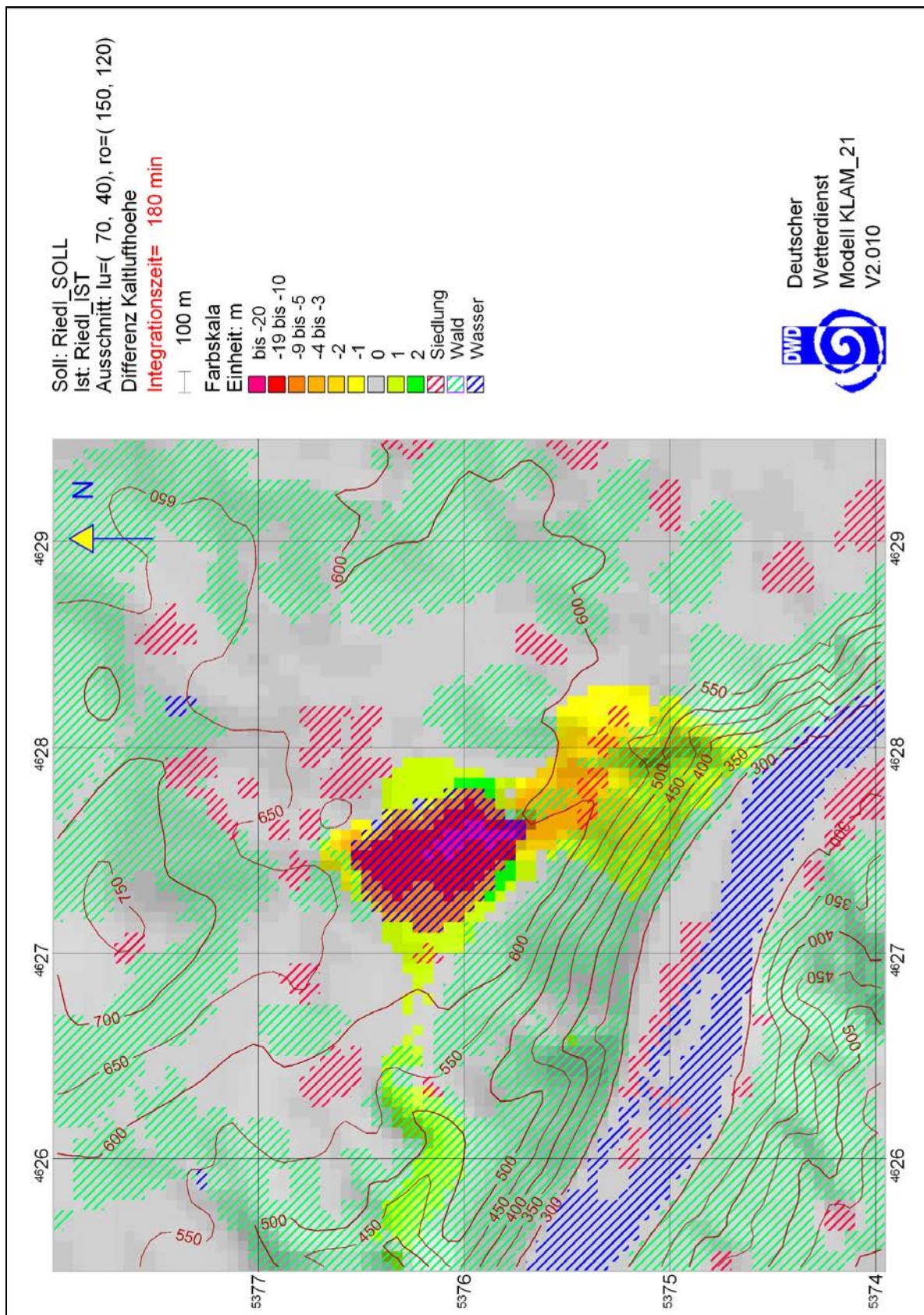
**Abb. 25:** Differenz Kaltlufthoehe – Integrationszeit nach 30 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)



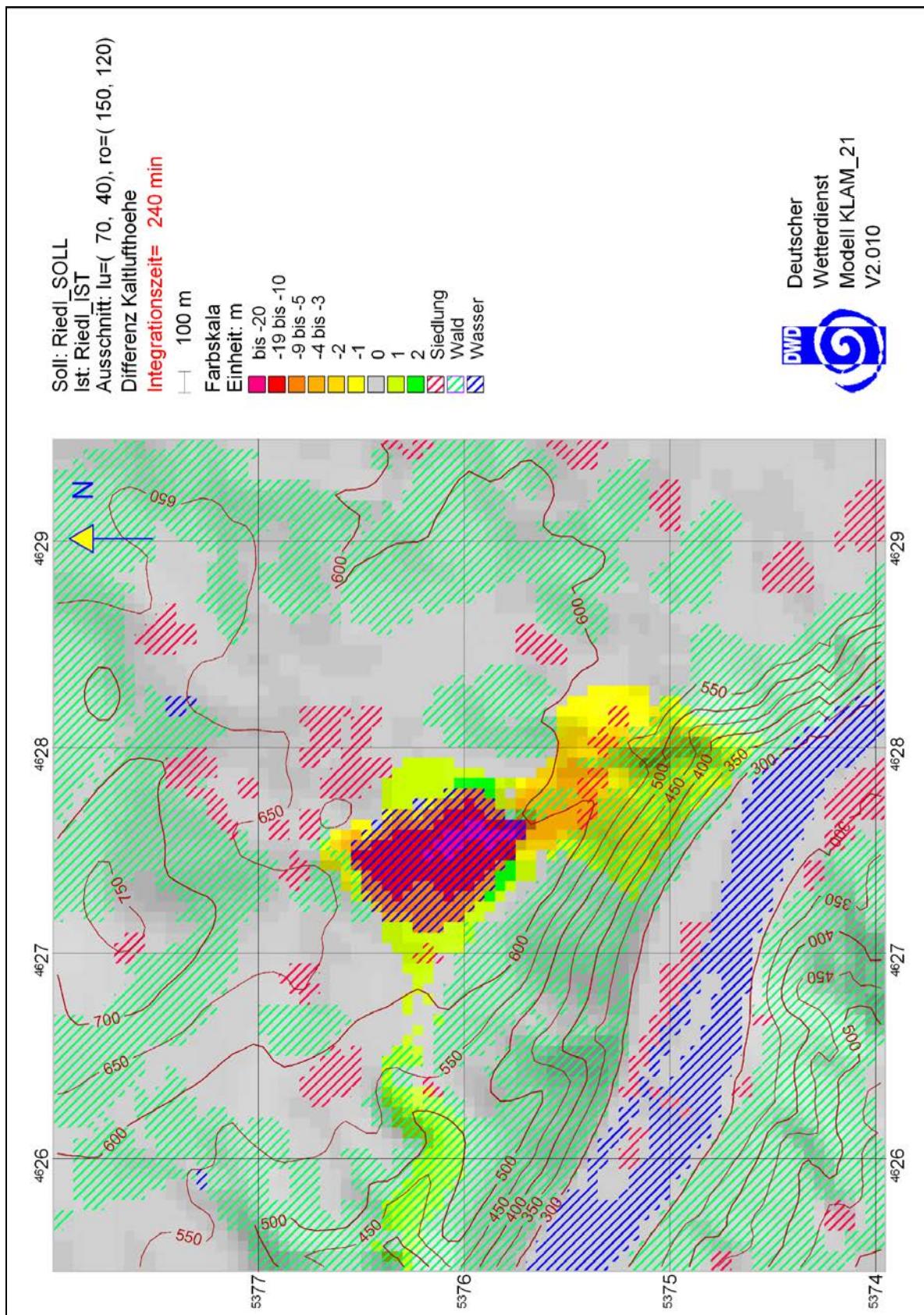
**Abb. 26:** Differenz Kaltlufthoehe – Integrationszeit nach 60 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)



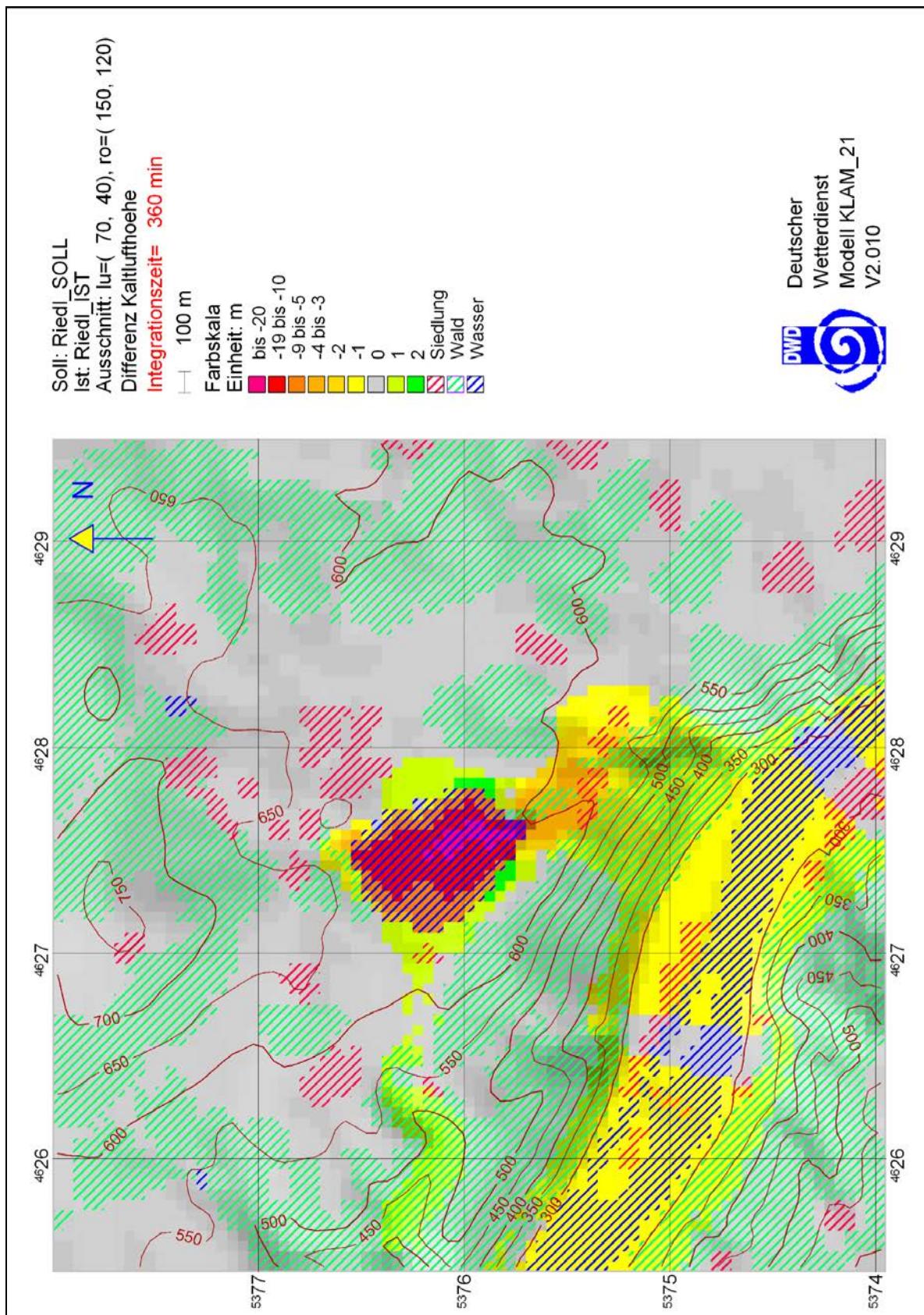
**Abb. 27:** Differenz Kaltlufthoehe – Integrationszeit nach 120 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)



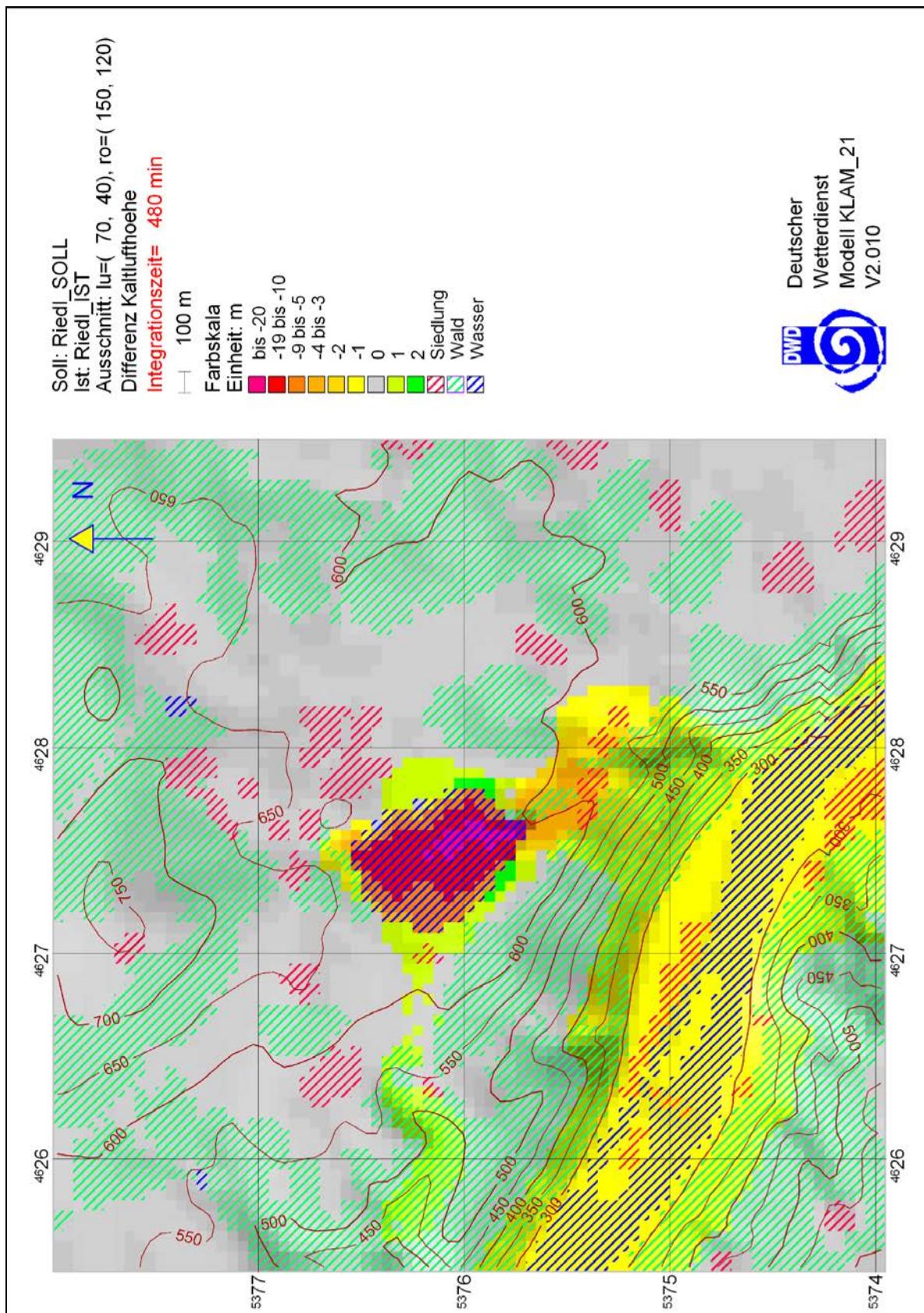
**Abb. 28:** Differenz Kaltlufthoehe – Integrationszeit nach 180 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)



**Abb. 29:** Differenz Kaltlufthoehe – Integrationszeit nach 240 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)



**Abb. 30:** Differenz Kaltlufthoehe – Integrationszeit nach 360 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)



**Abb. 31:** Differenz Kaltlufthoehe – Integrationszeit nach 480 Minuten (Kerngebiet / SOLL-IST-Zustand)