

Kaltluftgutachten für die Steinbruchvertiefung der Hohenlimburger Kalkwerke

Auftraggeber: SST Prof. Dr.-Ing. Stoll & Partner
Ingenieurgesellschaft mbH
Charlottenburger Allee 39
52068 Aachen

Bearbeiter: M. Sc. Rike Wachsmann

Prüfer: Dr. Klaus Bigalke

Pinneberg, den 25. März 2022

Version 1.0

Projekt-Nr.: 21S803

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	4
2. Datengrundlage der Untersuchung	6
3. Beschreibung des Untersuchungsgebiets und der Planung	7
4. Numerische Kaltluftsimulationen	10
4.1. Allgemeine Modellbeschreibung	10
4.2. Modellgleichungen und Numerik	11
4.3. Modellgebiet und Eingangsdaten	13
5. Ergebnisse	16
5.1. Kaltluftsituation im Gesamtgebiet 1h, 2h, 3h und 4h nach Sonnenuntergang	16
5.2. Plan – Ist - Vergleich	23
6. Zusammenfassung und Bewertung	35
Literatur	37

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Lageplan und Geländere relief (Geländehöhen in m ü. NHN) aus der Umgebung des Steinbruchs Hohenlimburg. Die Lage des Steinbruchs am Steltenberg ist rot markiert.</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 2: Lageplan mit eingezeichneter Genehmigungsgrenze für den Abbau (oben) und dreidimensionale Darstellung des Steinbruch-Geländere liefs (m) im bereits genehmigten Zustand (unten links) und im Planzustand (unten rechts). 9</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 3: Geländehöhen (m ü. NHN) in der Bestandssituation (links) und Flächennutzungsklassen (rechts) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen. Das Kerngebiet ist schwarz umrandet.....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 4: Geländehöhen (m ü. NHN) im Ist-Zustand mit überlagerten Strömungsvektoren (links) und Kaltluftschichtdicke (m) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen (rechts) zu einem Zeitpunkt von einer Stunde nach Sonnenuntergang.</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 5: Geländehöhen (m ü. NHN) im Ist-Zustand mit überlagerten Strömungsvektoren (links) und Kaltluftschichtdicke (m) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen (rechts) zu einem Zeitpunkt von zwei Stunden nach Sonnenuntergang.</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 6: Geländehöhen (m ü. NHN) im Ist-Zustand mit überlagerten Strömungsvektoren (links) und Kaltluftschichtdicke (m) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen (rechts) zu einem Zeitpunkt von drei Stunden nach Sonnenuntergang.</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 7: Geländehöhen (m ü. NHN) im Ist-Zustand mit überlagerten Strömungsvektoren (links) und Kaltluftschichtdicke (m) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen (rechts) zu einem Zeitpunkt von vier Stunden nach Sonnenuntergang.....</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 8: Kaltluftvolumenstrom ($m^3/(m*s)$) und Windvektoren in der Bestandssituation (oben) und in der Plansituation (unten) eine Stunde nach Sonnenuntergang.....</i>	<i>27</i>
<i>Abbildung 9: Relative Änderung (%) des Kaltluftvolumenstroms in der Plansituation im Vergleich zur Bestandssituation eine Stunde nach Sonnenuntergang.....</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 10: Kaltluftvolumenstrom ($m^3/(m*s)$) und Windvektoren in der Bestandssituation (oben) und in der Plansituation (unten) zwei Stunden nach Sonnenuntergang.</i>	<i>29</i>
<i>Abbildung 11: Relative Änderung (%) des Kaltluftvolumenstroms in der Plansituation im Vergleich zur Bestandssituation zwei Stunden nach Sonnenuntergang.</i>	<i>30</i>
<i>Abbildung 12: Kaltluftvolumenstrom ($m^3/(m*s)$) und Windvektoren in der Bestandssituation (oben) und in der Plansituation (unten) drei Stunden nach Sonnenuntergang.</i>	<i>31</i>
<i>Abbildung 13: Relative Änderung (%) des Kaltluftvolumenstroms in der Plansituation im Vergleich zur Bestandssituation drei Stunden nach Sonnenuntergang.</i>	<i>32</i>
<i>Abbildung 14: Kaltluftvolumenstrom ($m^3/(m*s)$) und Windvektoren in der Bestandssituation (oben) und in der Plansituation (unten) vier Stunden nach Sonnenuntergang.</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 15: Relative Änderung (%) des Kaltluftvolumenstroms in der Plansituation im Vergleich zur Bestandssituation vier Stunden nach Sonnenuntergang.</i>	<i>34</i>

1. Aufgabenstellung

Die Hohenlimburger Kalkwerke betreiben in Hagen-Hohenlimburg einen Steinbruch für Kalkabbau. Der Steinbruch liegt nördlich einer Lenne-Schleife und südlich der Autobahn A46 am Steltenberg zwischen Hagen und Iserlohn. Die Hohenlimburger Kalkwerke planen eine Vertiefung des Steinbruchs, wobei die Abbaufäche nicht erweitert werden soll. Derzeit läuft ein Antragsverfahren für die geplante Vertiefung des Steinbruchs.

Über Freiflächen wird bei nächtlichen Strahlungswetterlage, wie sie z.B. während Phasen sommerlicher Hochdruckwetterlagen vorliegen, besonders in den Abendstunden sehr effektiv bodennahe Kaltluft gebildet. Bei entsprechenden topographischen Bedingungen können sich daraus Kaltluftflüsse bilden, die in Richtung niedriger gelegenes Gelände abfließen und für überwärmte und ggf. mit Immissionen belastete Siedlungsgebiete angenehme Abkühlung und Durchlüftung mit Frischluft bedeuten. Sie können deshalb ebenso wie Wälder eine wichtige bioklimatische Funktion für Siedlungsgebiete erfüllen [1].

Durch die geplante Vertiefung des Steinbruchs am Hang des Steltenbergs ist unter Umständen mit Veränderungen der kleinräumigen Strömungssysteme zu rechnen, die sich in Strahlungsnächten während der ersten Nachtstunden ausbilden. Werden Kaltluftabflüsse, die sich an den Hängen des Steltenberg bilden, durch die Vertiefung des Steinbruchs beeinflusst, dann könnte mit klimatischen und lufthygienischen Veränderungen innerhalb der nordwestlich bzw. südlich angrenzenden Bebauung zu rechnen sein.

Die Aufgabenstellung des vorliegenden Gutachtens lässt sich daher folgendermaßen formulieren:

- Hoch auflösende Berechnung des Kaltluftströmungsgeschehens für typische windschwache Strahlungswetterlagen mit einem mesoskaligen Kaltluftmodell für den Istzustand (bereits genehmigter Abbauzustand) sowie den Planzustand nach Vertiefung des Steinbruchs
- Ermittlung typischer Kenngrößen nächtlicher Kaltluftabflüsse sowie deren Veränderung durch die Vertiefung des Steinbruchs in dessen Umgebung, insbesondere in den angrenzenden Wohngebieten
- Bewertung der Ergebnisse, ob und ggf. wie sich die geplante Vertiefung des Steinbruchs auf lokale Kaltluftabflüsse und die Durchlüftung der angrenzenden Wohngebiete auswirkt

Die Berechnung der Kaltluftabflüsse im weiteren Einflussbereich des Untersuchungsgebiets erfolgt mit dem numerischen Simulationsmodell METKAT. Dieses Modell beruht auf einer vereinfachten Form der atmosphärischen Bewegungsgleichungen, den so genannten

Flachwassergleichungen und ist damit speziell an die Simulation nächtlicher Kaltluftabflusssysteme angepasst.

Für die Bewertung möglicher klimatischer Auswirkungen der Planung gibt es derzeit keine verbindlichen rechtlichen Vorgaben oder Normen. In Anlehnung an die VDI 3787 Blatt 5 [1] werden daher die relativen Änderungen in den charakteristischen Kenngrößen des Kaltluftsystems zur Bewertung herangezogen.

2. Datengrundlage der Untersuchung

Die Untersuchung basiert auf den folgenden Unterlagen, die vom Auftraggeber sowie der Stoll & Partner Ingenieurgesellschaft mbH zur Verfügung gestellt wurden:

- Lageplan 1:1250 vom 26.07.2021:
Anl_2_HKW_BlmSchG_Hg_Lageplan.pdf
- Karte benachbarter Schutzgebiete 1:4000 vom 26.07.2021:
Anl_7_HKW_BlmSchG_Hg_Schutzgebiete.pdf
- Plan des theoretischen Tagebauendstands 1:5000 vom 08.09.2021:
Anl_4_HKW_BlmSchG_Hg_Endzustand_neu.pdf
- Höhenmodell des Steinbruchs im bereits genehmigten Zustand (Rasterauflösung 5 m):
grid_5x5m_endmodell_123_stufe_165m_ETRS89.DXF
- Höhenmodell des Steinbruchs im geplanten Endzustand (Rasterauflösung 5 m):
grid_5x5m_hkw_endmodell_15_inkl_parkplatz_ETRS89.DXF

Von der Geobasis NRW wurden unter der „Datenlizenz Deutschland – Zero – Version 2.0“ (<https://www.govdata.de/dl-de/zero-2-0>) folgende Datensätze verwendet:

- Digitales Geländemodell Gitterweite 1 m (Stand: 29.07.2021)
(https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/hm/dgm1_xyz/dgm1_xyz)
- Digitales Basis-Landschaftsmodell (Stand: 30.11.2021)
(https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/basis-dlm_EPSG25832_Shape.zip)

Die Daten des Digitalen Landschaftsmodells wurden von dem gelieferten Shape-Format den Anforderungen des Kaltluftmodells gemäß in ein Arc/Info ASCII Grid Rasterdatenformat mit 5 m Auflösung konvertiert.

3. Beschreibung des Untersuchungsgebiets und der Planung

Der Steinbruch der Hohenlimburger Kalkwerke liegt auf der Nordseite einer Schleife des Lennetals zwischen Hagen und Iserlohn im Sauerland. Aus Abbildung 1 ist die Einbettung des Steinbruchs in die regionale topographische Situation ersichtlich. Das tief eingeschnittene Lennetal verläuft von Altena zunächst in nördliche Richtung, nach Mündung eines östlich gelegenen Seitentals knickt das Lennetal nach Westen ab und bildet eine Talschleife um den Steltenberg. Aus südlicher Richtung mündet das Nahmertal im Ortsteil Hagen-Hohenlimburg in das Lennetal, bevor sich dieses in Richtung der Stadt Hagen aufweitet. Das Lennetal und das Nahmertal bilden Einschnitte in die westlichen Höhenzüge des Lennegebirges, welches sich in südöstliche Richtung weiter bis zu den Höhenzügen des Rothaargebirges erstreckt.

Die höchste Erhebung im dargestellten Gebietsausschnitt bildet der Lohagen mit 495 m ü. NN, der sich zwischen Nahmer- und Lennetal südlich von Wiblingwerde auf einem westlichen Ausläufer des Lennegebirges befindet. Zwischen Nahmer- und Volmetal ist mit dem Stoppelberg ein weiterer Höhenzug mit einer Höhe von 380 m ü. NHN zu finden.

Auf der Ostseite des Lennetals erheben sich zwischen Nachrodt-Wiblingwerde und Iserlohn die sog. Iserlohner Höhen, deren höchste Erhebung in dem hier dargestellten Gebietsausschnitt die Hilkenhöhe mit 442 m ü. NHN ist. Nördlich des Ortsteils Iserlohn-Lemathe erstreckt sich mit dem Heimberg noch ein ca. 300 m hoher Kamm, bevor das Gelände in nordwestliche Richtung auf weniger als 200 m ü. NHN abfällt.

Bodennahe Kaltluft entsteht bei windschwachen und wolkenarmen Wetterlagen über Freiflächen mit hoher langwelliger Ausstrahlung. Wachsen Kaltluftschichten in den Abendstunden an und weist das Gelände ein leichtes Gefälle auf, so setzt sich die im Vergleich zur Umgebungsluft schwerere Kaltluft als Dichteströmung in Richtung des tieferen Geländes in Bewegung.

Insbesondere das lange und enge Lennetal sowie das Nahmertal zwischen Lohagen und Stoppelberg könnten deshalb bei Strahlungswetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten als Kaltluft- und Frischluftleitbahnen fungieren, die in Bezug auf großräumige nächtliche Strömungssysteme Kaltluft durch das Stadtgebiet von Limburg sowie in das Stadtgebiet von Hagen hinein transportieren. Dringt Kaltluft bis in die Siedlungsgebiete ein, so kann sie dort die nächtliche Lufttemperatur herabsetzen, was insbesondere in den Sommermonaten ein erwünschter Effekt ist. Kommt die Kaltluft aus lufthygienisch wenig belastetem Gebiet, so wird darüber hinaus die Luftqualität im Siedlungsgebiet verbessert.

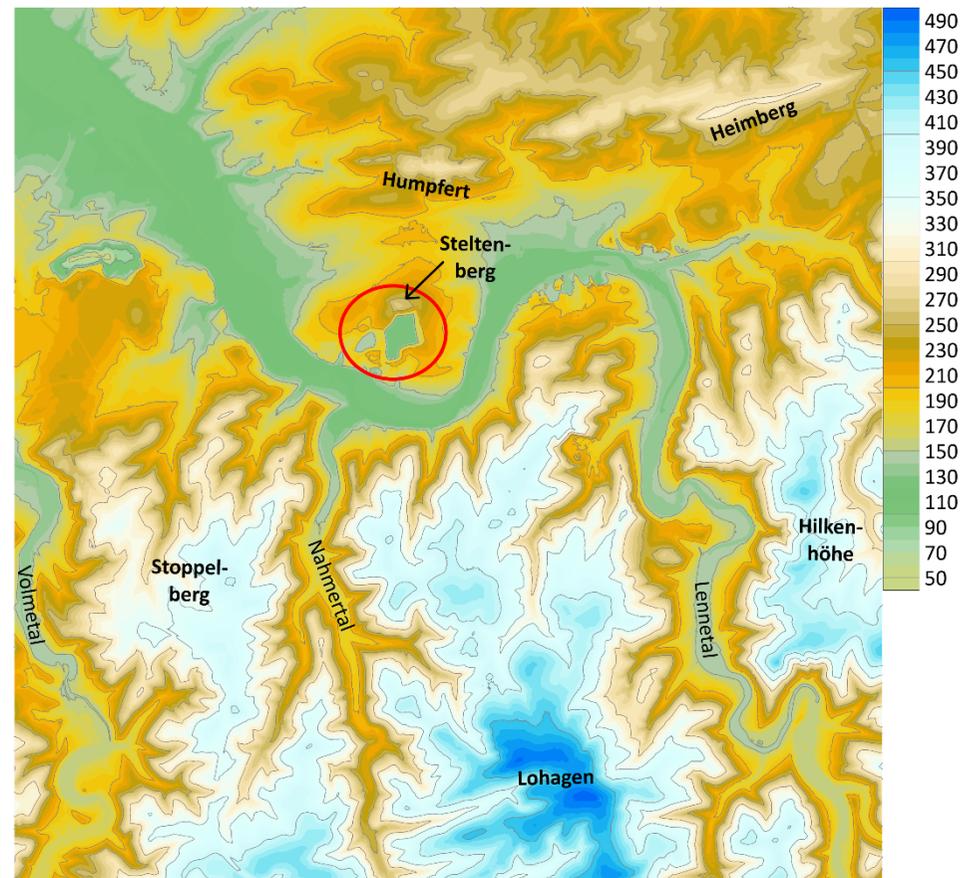
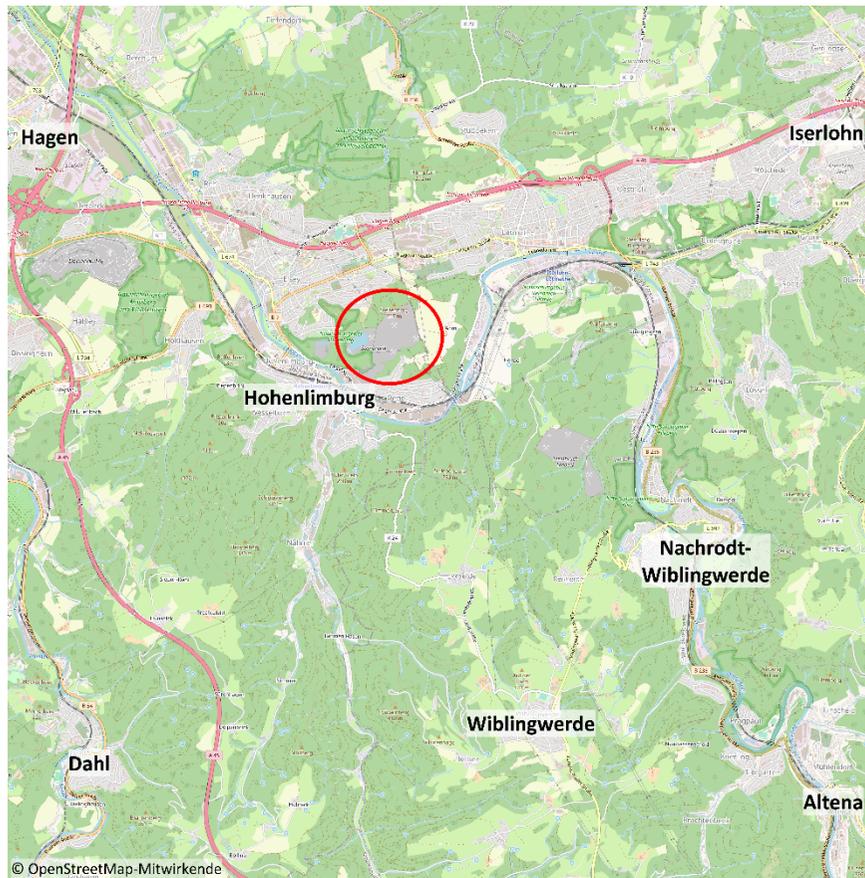


Abbildung 1: Lageplan und Geländere relief (Geländehöhen in m ü. NHN) aus der Umgebung des Steinbruchs Hohenlimburg. Die Lage des Steinbruchs am Steltenberg ist rot markiert.

Die für den Steinbruch vorgesehene Vertiefung begrenzt sich auf die bereits genehmigte Abbaufäche, welche im oberen Bild der Abbildung 2 rot umrandet ist. Im bisher genehmigten Zustand weist der Steinbruch eine minimale Geländehöhe von 123 m ü. NHN. auf. Mit der geplanten Vertiefung soll der Steinbruch bis auf eine minimale Höhe von 15 m ü. NHN abgebaut werden. Die unteren Darstellungen der Abbildung 2 zeigen die beiden Zustände des Steinbruchs am Hang des Steltenbergs im Vergleich.

Die Bebauung an der Feldstraße südlich des Steinbruchs weist mit ca. 100 m die geringste Distanz zur genehmigten Abbaugrenze auf. Weitere Wohngebiete befinden sich zum einen nordöstlich des Steinbruchs am Dümpelacker und zum anderen nordwestlich zwischen Steltenbergstraße und Auf der Heide.

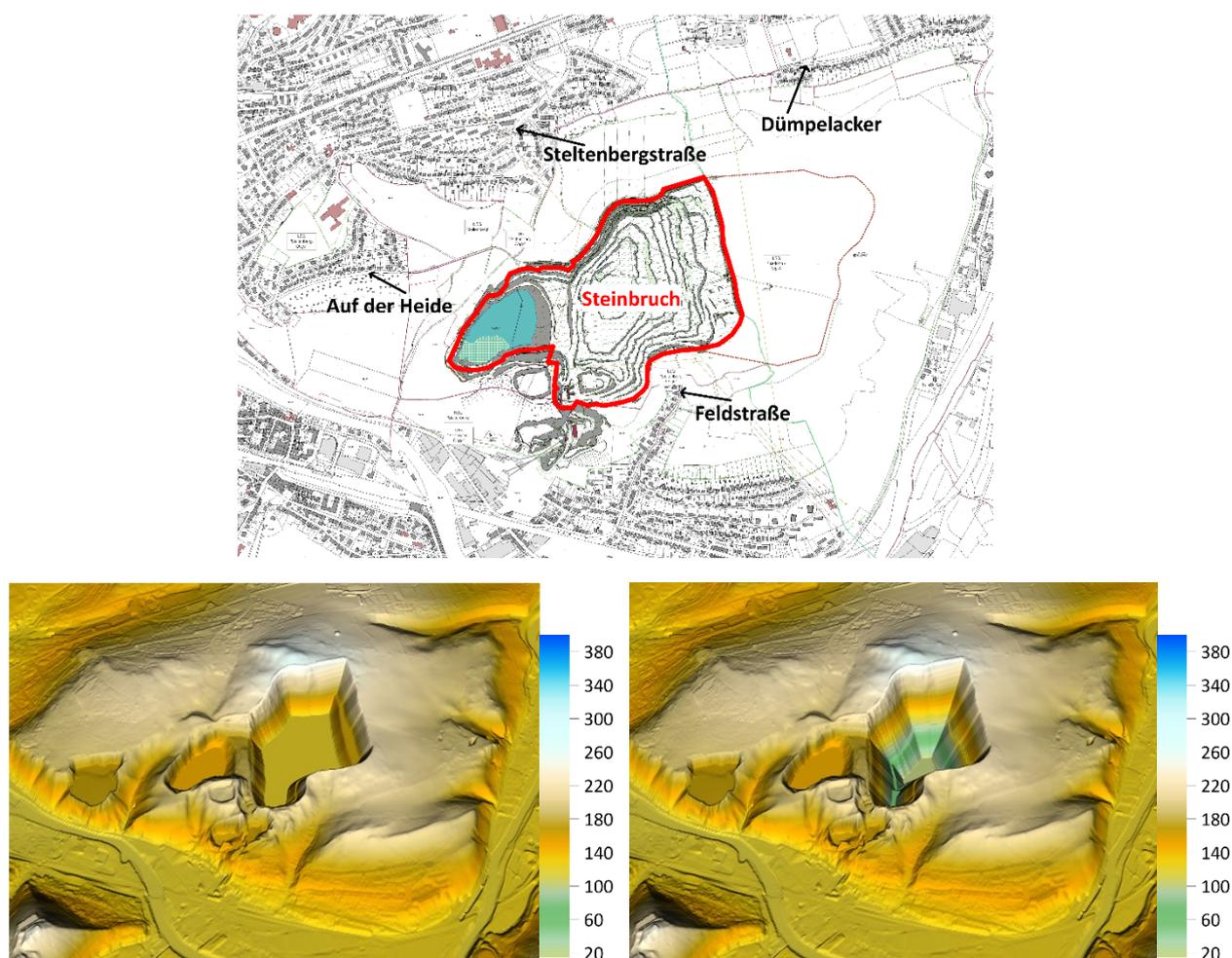


Abbildung 2: Lageplan mit eingezeichneter Genehmigungsgrenze für den Abbau (oben) und dreidimensionale Darstellung des Steinbruch-Geländereliefs (m) im bereits genehmigten Zustand (unten links) und im Planzustand (unten rechts).

4. Numerische Kaltluftsimulationen

Zur Ermittlung der Bedeutung der geplanten Vertiefung des Steinbruchs auf Kaltluftproduktion und Kaltluftabfluss im Untersuchungsgebiet in Bezug auf das großräumige Kaltluftabflussverhalten des umgebenden Reliefs wurden Modellsimulationen mit dem Kaltluft-Simulationsmodell METKAT durchgeführt.

4.1. Allgemeine Modellbeschreibung

METKAT ist ein numerisches Modell zur Simulation von Kaltluftabflüssen in topographisch gegliedertem Gelände. Es basiert auf den so genannten Flachwassergleichungen, die eine vereinfachte, vertikal integrierte Form der Bewegungsgleichungen darstellen [2]. Mit Hilfe dieser Gleichungen ist es möglich, Strömungskomponenten, Schichtdicken und Flüsse als vertikale Integralwerte über die Kaltluftschicht in hoher Horizontalaufösung zu berechnen. Der Vorteil eines solchen Modells liegt in den geringen Anforderungen an Rechenkapazitäten und Speicherplatz.

In METKAT werden folgende Einflüsse auf das Verhalten von Kaltluftabflüssen berücksichtigt:

- landnutzungsspezifische Kaltluftproduktion
- landnutzungsspezifische Strömungsabbremmung aufgrund der Rauigkeit (Reibung)
- Einflüsse der umgebenden Strömung auf die lokalen Verhältnisse (Advektion)
- Einflüsse von Dichtedifferenzen und Erdrotation auf die Strömung (Coriolis- und Auftriebskräfte)
- Einmischen umgebender Luft am Oberrand der Kaltluftschicht aufgrund von Impuls- und Temperaturdifferenzen (Entrainment)

Typische Anwendungsmöglichkeiten von METKAT sind z.B.:

- Analyse lokaler oder regionaler Kaltluftströmungen / Belüftungssituationen
- Messnetzplanung zum Nachweis / zur Quantifizierung von Kaltluftflüssen
- Abschätzung der Auswirkung von Landschaftseingriffen oder Baumaßnahmen auf Kaltluftströme / Belüftungssituationen
- Abschätzung von Immissionen im Einflussbereich von Kaltluftabflüssen
- Bereitstellung von Strömungsdaten zur weiteren Verwendung in Ausbreitungsmodellen

4.2. Modellgleichungen und Numerik

Grundlage des Modells sind die Flachwassergleichungen nach [2], die aus der vertikalen Integration der atmosphärischen Bewegungsgleichungen unter Annahme einer konstanten Dichte und der Kontinuitätsgleichung resultieren und eine ergänzende Gleichung für die Temperatur, abgeleitet aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{C_D U u}{h} - \frac{EV(u - u_a)}{h} - f(v_g - v) - \frac{g\Delta T}{T_0} \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_s}{\partial x} \right) + K_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{C_D U v}{h} - \frac{EV(v - v_a)}{h} - f(u_g - u) - \frac{g\Delta T}{T_0} \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial z_s}{\partial y} \right) + K_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -\frac{\partial u h}{\partial x} - \frac{\partial v h}{\partial y} - \frac{EV\Delta T}{T_0} + Q + K_H \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - A + K_H \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)\end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned}U &= \sqrt{u^2 + v^2} \\ V &= \sqrt{(u - u_a)^2 + (v - v_a)^2} \\ E &= \frac{A_1}{S_1 Ri + A_2} \quad A_1 = 2 \cdot 10^{-3}, A_2 = 2 \cdot 10^{-2}, S_1 = 0.5 \\ Ri &= \frac{g \Delta T h}{T_0 U^2} \\ K_H &= 0.08 \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2}\end{aligned}$$

u und v sind die vertikal integrierten Windkomponenten in x- bzw. y-Richtung innerhalb der Kaltluftschicht, u_a und v_a bzw. u_g und v_g die korrespondierenden Windkomponenten oberhalb der Kaltluftschicht bzw. oberhalb der atmosphärischen Grenzschicht (geostrophischer Wind). Mit h ist die Schichtdicke der Kaltluft, mit z_s die Geländehöhe, mit Q die Kaltluftproduktionsrate und mit A die abendliche Abkühlrate der Luft bezeichnet. ΔT ist die Temperaturdifferenz der Kaltluftschicht T zur umgebenden Referenztemperatur T_0 , C_D der Widerstandsbeiwert bzw. Reibungskoeffizient des Untergrunds, f der Coriolisparameter und g die Erdbeschleunigung. Der Diffusionskoeffizient K_H berechnet sich nach einem Ansatz von [3] aus der Scherung der Strömung.

Die beiden ersten Terme jeder Gleichung entsprechen der Advektion, die folgenden Terme repräsentieren die Vertikaldiffusion (Reibung am Boden, Entrainment am Oberrand), Corioliskraft und Druckgradienten aufgrund von Dichte- bzw. Temperaturdifferenzen sowie die Kaltluftproduktion. Eine Kaltluftdissipation, die über Entrainmenteffekte hinausgeht (z.B. durch Advektion der Kaltluft über warme Wasseroberflächen oder Eindringen in wärmere bebaute Bereiche), kann durch Vorgabe einer negativen Kaltluftproduktionsrate für die entsprechenden Landnutzungstypen realisiert werden. Der letzte Term repräsentiert die Horizontaldiffusion. Entrainment am Oberrand, horizontale Diffusion sowie die Temperaturgleichung werden in METKAT optional berechnet.

Anstelle der prognostisch bestimmten Temperatur kann auch mit einer fest vorgegebenen Temperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung gerechnet werden. Die Temperaturgleichung dient in erster Linie dazu, eine zeitlich und räumlich variable Temperaturdifferenz zwischen Kaltluftschicht und Umgebung bereitzustellen. Sie liefert eine bessere Näherung als eine vorgegebene feste Temperaturdifferenz. Die absoluten Temperaturen sind dagegen weniger verlässlich. Für eine belastbare Temperaturbestimmung mangelt es der Temperaturgleichung jedoch an einer Parametrisierung der Energieflüsse am Boden, deren Richtung vom Vorzeichen der Temperaturdifferenz zwischen Boden / Oberflächen und Luft abhängt. In der vorliegenden Form findet grundsätzlich nur eine Abkühlung der Luft in Abhängigkeit von der lokalen Landnutzung statt.

Dem Modell kann ein Modellgitter vorgegeben werden, in dem innerhalb einer Gitterpunktsfläche die prozentualen Anteile verschiedener Landnutzungen definiert sind. In diesem Fall werden sowohl der Widerstandsbeiwert als auch die Kaltluftproduktionsrate und die Abkühlrate als gewichteter Mittelwert aus den landnutzungsspezifischen Klassenwerten gebildet.

Das Modellgebiet wird durch ein frei wählbares räumliches Gitter definiert, an dessen Gitterpunkten Geländehöhen und Landnutzung digitalisiert vorgegeben werden. Die Grundgleichungen werden gitterbezogen auf einem so genannten Arakawa-C-Gitter diskretisiert und numerisch gelöst. Die Advektionsterme werden mit einem Upstreamverfahren, andere Terme mit zentrierten Differenzen diskretisiert.

Über die Einströmränder erfolgt kein Kaltluftfluss in das Modellgebiet hinein. An Ausströmrändern wird die Normalableitung der Kaltfluthöhe auf 0 gesetzt. Für die Kaltfluthöhen und die randnormalen Windkomponenten wird ein konstanter Gradient angenommen. Alternativ können die randnormalen Windkomponenten mithilfe einer Orlanski-Strahlungsrandbedingung berechnet werden.

4.3. Modellgebiet und Eingangsdaten

Das Modellgebiet wurde so festgelegt, dass der wesentliche Einzugsbereich der Kaltluft für die Umgebung des Steinbruchs und die für die Abflussrichtungen wichtigen Hänge erfasst werden. Es deckt insgesamt eine Fläche von 11,5 km x 11,5 km ab:

UTM Ost: 32 396 500 - 32 408 000

UTM Nord: 5 683 000 - 5 694 500

Die Orographie des ausgewählten Modellgebiets ist in der linken Grafik der Abbildung 3 dargestellt. Es umfasst diejenigen Geländestrukturen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung des Kaltluftsystems im Untersuchungsgebiet haben. Im Süden reicht es bis über die Erhebung des Lohagen südlich von Wiblingwerde hinaus und im Osten werden die Höhenzüge jenseits des schmalen Lennetals erfasst. Die beiden Talsysteme des Nahme- und des Lennetals werden großflächig vom Modellgebiet eingeschlossen, sodass die sich in den Höhenlagen südlich und östlich des Steinbruchs bildende Kaltluft entlang der Täler in Richtung Hohenlimburg abfließen kann.

Die Höhenzüge nördlich des Steinbruchs spielen für die Kaltluftströmungen im Lennetal ebenfalls eine wichtige Rolle. Nach Norden erstreckt sich das Modellgebiet daher bis jenseits des Heimbergs. Neben den relevanten Einzugsgebieten der Kaltluft ist auch die Berücksichtigung der Abflussgebiete wichtig, damit sich die Kaltluftsysteme im Modell voll ausbilden können. In nordwestliche Richtung reicht das Modellgebiet bis an die östliche Stadtgrenze von Hagen, erfasst den aufgeweiteten Mündungsbereich des Lennetals großflächig und ermöglicht somit ein relativ ungestörtes Abfließen der Kaltluft in nordwestliche Richtung.

Die zu untersuchenden Kaltluftströmungen in Umgebung des Steinbruchs Hohenlimburg sind nicht nur abhängig von der Orografie im Untersuchungsgebiet, sondern auch von der Landnutzung auf den umgebenden Flächen. Diese beeinflusst die Kaltluftströme zum einen aufgrund verschiedener Rauigkeiten und damit zusammenhängender Strömungsabbremmung und zum anderen durch von der Landnutzung abhängige Kaltluftproduktionsraten der Oberflächen. Die rechte Grafik der Abbildung 3 zeigt die im Modell angesetzten Flächennutzungsklassen.

Im Plan-Zustand wird der Steinbruch vertieft, sodass sich die Orographie im Modellgebiet im Vergleich zum Ist-Zustand ändert (siehe Abschnitt 3). Die geplante Vertiefung des Steinbruchs geht jedoch nicht mit einer Erweiterung der Abbaufäche einher, sodass sich die Flächennutzungsklassen im Modellgebiet zwischen Plan- und Ist-Zustand nicht unterscheiden.

Die nähere Umgebung des Steinbruchs der Hohenlimburger Kalkwerke ist in Abbildung 3 mit einem schwarzen Rahmen markiert und stellt das Auswertebiet für den Plan-Ist-Vergleich der Kaltluftsituation in Abschnitt 5.2 dar.

Die gewählte Rasterweite von 5 m ermöglicht bei einem möglichst großen Modellgebiet eine ausreichend hohe Auflösung der Geländestrukturen. Mit einer Gebietsgröße von 11,5 x 11,5 km² ergibt sich eine Anzahl von 2300 x 2300 Gitterpunkten in West-Ost- und in Süd-Nord-Richtung.

Mit diesen Eingangsdaten und –parametern wurden zwei Modellrechnungen durchgeführt:

- Bestandssituation mit Geländehöhen des bereits genehmigten Abbauzustands des Steinbruchs Hohenlimburg
- Plansituation mit Geländehöhen nach geplanter Vertiefung des Steinbruchs ohne eine Erweiterung der Abbaufäche des Steinbruchs Hohenlimburg

Die Modellrechnungen werden für eine charakteristische Strahlungswetterlage, d.h. für eine windstille Nacht ohne überlagerten großräumigen Wind durchgeführt. Sie setzen nach Sonnenuntergang ein und werden über vier Stunden fortgesetzt. Nach dieser Zeit haben sich die charakteristischen Verteilungen von Kaltluftabflüssen und Wind ausgebildet und ändern sich nur noch wenig. Die Temperaturdifferenz zwischen Kaltluftschicht und darüber liegender wärmerer Luftschicht wird mit 2,5 K angesetzt.

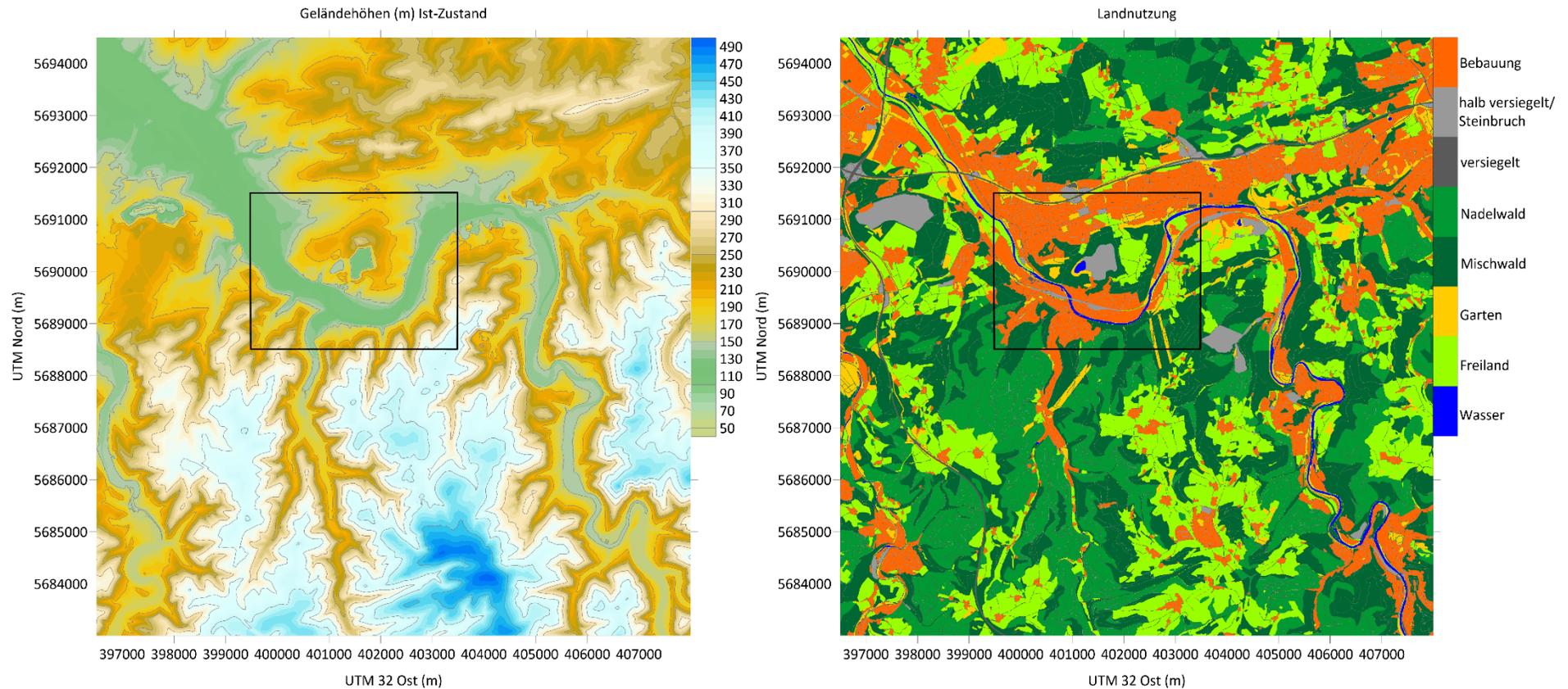


Abbildung 3: Geländehöhen (m ü. NHN) in der Bestandssituation (links) und Flächennutzungsklassen (rechts) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen. Das Kerngebiet ist schwarz umrandet.

5. Ergebnisse

5.1. Kaltluftsituation im Gesamtgebiet 1h, 2h, 3h und 4h nach Sonnenuntergang

Die größtenteils unversiegelten Flächen außerhalb des Stadtgebiets von Hohenlimburg stellen aufgrund ihrer nächtlichen Auskühlung potentielle Kaltluftproduktionsflächen dar. Da die bodennah abgekühlte Luft eine höhere Dichte aufweist, beginnt sie im Bereich der Hanglagen der Geländeneigung folgend in die jeweiligen Talsohlen und von dort aus Richtung Talausgang abzufließen.

Während der ersten Stunden nach Sonnenuntergang spielen dabei die lokalen Kaltluftabflüsse, die sog. Hangabwinde, eine wichtige Rolle. Im weiteren Nachtverlauf werden kleinräumige Kaltluftabflüsse von großräumigen Kaltluftsystemen dominiert. Um mögliche Einflüsse der Vertiefung des Steinbruchs auf das lokale Kaltluftgeschehen sowohl zu Beginn der Nacht als auch nach Ausbildung der großräumigen Kaltluftsysteme in den späteren Nachtstunden bewerten zu können, werden Simulationszeitpunkte von einer Stunde bis vier Stunden nach Sonnenuntergang ausgewertet. In diesem Abschnitt wird zunächst die zeitliche Entwicklung der großräumigen Kaltluftsysteme im gesamten Modellgebiet für die Bestandssituation beschrieben. In Abschnitt 5.2 folgt der Vergleich der Ergebnisse zwischen Ist- und Plan-Zustand in näherer Umgebung des Steinbruchs.

Die Abbildungen 4 bis 7 (links) zeigen die über die Kaltluftschicht gemittelten Strömungsvektoren vor dem Hintergrund der Geländehöhen im gesamten Modellgebiet für Simulationszeitpunkte von einer Stunde (Abb. 4), zwei Stunden (Abb. 5), drei Stunden (Abb. 6) und vier Stunden (Abb. 7) nach Sonnenuntergang. Die jeweils rechten Abbildungen stellen die Schichtdicke der Kaltluft im Modellgebiet zu den entsprechenden Simulationszeitpunkten dar.

In den frühen Abendstunden, insbesondere während der ersten Stunde nach Sonnenuntergang, dominieren Hangabwinde die Strömungssituation im Modellgebiet (Abbildung 4, links). Die höchsten Erhebungen bilden der Lohagen bei Wiblingerwerde im südlichen Bereich des Modellgebiets sowie die Höhenzüge an der Hilkenhöhe östlich des Lennetals. Auch im nördlichen Bereich des Modellgebiets steigt das Gelände jenseits der Lenne zwischen Humpfert und Heimberg nochmal auf knapp 300 m an. Der Geländeneigung folgend strömt die Kaltluft von den Höhenlagen des Lohagen in östliche und nördliche und von der Hilkenhöhe in westliche Richtung in das Tal der Lenne herab. Auch von den Hängen des Heimbergs nördlich sowie mehreren kleinen Seitentälern südlich der Lenne fließt Kaltluft in das Lennetal und beeinflusst die

Strömungsstrukturen innerhalb des Tals. Die von den Höhenzügen am Lohagen in westliche Richtung abfließenden Kaltluftströme münden in das enge Nahmertal, in das auch die Kaltluftabflüsse von den westlich gelegenen Hängen des Stoppelbergs strömen. Der Geländeneigung folgend strömt die Kaltluft entlang des Nahmertals nach Norden und mündet südlich des Steltenbergs in das Lennetal. An den Hängen des Steltenbergs sind in der ersten Nachtstunde Hangabwinde zu erkennen, die zu allen Seiten in Richtung geringere Geländehöhen wehen. In südliche Richtung strömt ein Teil der Kaltluftabflüsse von dem Steltenberg in die Senke des Steinbruchs.

Die beschriebenen Charakteristiken lassen sich auch in der räumlichen Verteilung der Kaltluftmächtigkeit erkennen (Abbildung 4, rechts). Grundsätzlich sind die Schichtdicken der Kaltluft auf den Bergen und an den Hängen gering, weil sie von dort recht schnell abfließen. In den Tälern fließt Kaltluft aus verschiedenen Richtungen zusammen, sodass dort größere Schichtdicken auftreten. Erreicht ein Kaltluftabfluss eine Senke oder flaches Gelände, so nimmt die Strömungsgeschwindigkeit ab und die Kaltluftschicht kann unter Umständen bis auf große Höhe anwachsen („Kaltluftsee“). Steinbrüche stellen solche Senken dar, sodass sich je nach Größe und Tiefe des Steinbruchs unterschiedlich hohe Kaltluftmächtigkeiten ausbilden können. Während die Kaltluftschichtdicke in einem Steinbruch im nordwestlichen Bereich des Modellgebiets bereits auf 70 m angewachsen ist, liegt diese im Steinbruch am Steltenberg noch bei ca. 30 m. An den Hängen der umgebenden Höhenzüge werden nach einer Stunde Simulationszeit großflächig Kaltluftschichtdicken unter 5 m berechnet. Im Lennetal zwischen Altena und der Flussschleife bei Hohenlimburg fließt Kaltluft von mehreren Seiten zusammen, sodass dort Schichtdicken von bis zu 50 m erreicht werden. Im Nahmertal wächst die Kaltluftschichtdicke aufgrund des engeren Talquerschnitts bereits nach einer Stunde bis auf ca. 70 m an. Im Abflussgebiet der Kaltluft nordwestlich von Hohenlimburg weitet sich das Lennetal auf, wodurch sich die Kaltluftschichtdicken trotz weiterer Zuflüsse aus den Seitentälern auf unter 30 m verringert.

Die Abbildung 5 zeigt die Kaltluftsituation zu einem Zeitpunkt von etwa zwei Stunden nach Sonnenuntergang. Im gesamten Modellgebiet sind weiterhin überwiegend der Geländeneigung folgende Winde zu erkennen. Die Kaltluftströmung aus dem Lennetal hat sich weiter verstärkt und weht zwischen Lohagen und Hilkenhöhe entlang des Flusslaufs in nördliche Richtung. Die Kaltluftströmung aus dem Nahmertal hat sich ebenfalls weiter verstärkt und fließt mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten auf Höhe des Steltenbergs in das Lennetal. Zum Teil dreht die Kaltluftströmung dort auf West und strömt weiter verstärkt talabwärts über das Stadtgebiet von Hohenlimburg hinweg in Richtung Hagen. Die vergleichsweise hohen Strömungsgeschwindigkeiten ca. 2 m/s am Talausgang führen jedoch dazu, dass die Strömung

aus dem Nahmertal in der Flussschleife bei Hohenlimburg die Strömungsstrukturen im Lennetal dominiert und die Kaltluftströmung südöstlich des Steltenbergs abschnittsweise sogar talaufwärts fließt. Bevor das Lennetal auf der Ostseite des Steltenbergs nach Süden abknickt, treffen die beiden entgegengesetzt gerichteten Kaltluftströmungen im Lennetal zusammen und lenken die Kaltluft entgegen der Hangneigung an den Höhenzügen des Humpferts in nördliche Richtung. Das beschriebene Strömungsmuster ist auch in den Kaltluftschichtdicken (Abbildung 5, rechts) zu erkennen. Die Kaltluftschicht wächst im engen Nahmertal nach zwei Stunden bereits auf bis zu 100 m an, im Lennetal zwischen Altena und Einmündung des Nahmertals werden zwischen 50 m und 70 m erreicht.

Zu einem Zeitpunkt von etwa drei Stunden nach Sonnenuntergang hat sich das Kaltluftsystem im Lennetal deutlich verstärkt (Abbildung 6, links). Diese Kaltluftströmung ist so mächtig, dass sich die Strömungsrichtung südöstlich des Steltenbergs, im Vergleich zu früheren Nachstunden, umgekehrt hat. Die Kaltluftabflüsse strömen entlang der Lenne talabwärts über das Stadtgebiet von Hohenlimburg hinweg. Dabei weht die Kaltluftströmung im Bereich der nach Süden abknickenden Flussschleife hangaufwärts in den Senkenbereich zwischen Steltenberg und Humpfert. Die Kaltluftströmung, die aus dem Nahmertal in das Lennetal mündet, hat sich ebenfalls weiter verstärkt und wird von dem mächtigen Kaltluftstrom aus dem Lennetal talabwärts in nordwestliche Richtung gelenkt. Die Kaltluftschichtdicken wachsen im Nahmertal auf maximal 110 m an (Abbildung 6, rechts). Im Lennetal werden im Bereich der Flussschleife östlich des Steltenbergs Kaltluftschichtdicken von knapp 90 m berechnet. In Lee der Einmündung des Nahmertals kann die Kaltluft relativ ungestört in nordwestliche Richtung abfließen, sodass sich die Kaltluftschichtdicken dort im Vergleich zu den talaufwärts gelegenen Bereichen auf rund 50 m verringern.

Nach vier Stunden hat sich das großräumige Kaltluftsystem im Vergleich zu dem Zeitpunkt von ca. drei Stunden nach Sonnenuntergang noch weiter ausgebildet (Abbildung 7, links). Die Kaltluftströmung aus dem Lennetal überströmt den Senkenbereich zwischen Steltenberg und Humpfert vollständig und trifft westlich des Steltenbergs wieder auf die Kaltluftströmung im Lennetal. Die Hangabwinde an den seitlichen Hängen des Lenne- und des Nahmertals schwächen sich ab und die Hänge werden von den mächtigen Strömen entlang der Täler überströmt. Auch die Kaltluftströmung im Abflussbereich nordwestlich des Stadtgebiets von Hohenlimburg hat sich weiter verstärkt und strömt mit vergleichsweise hohen Fließgeschwindigkeiten von rund 2 m/s im Maximum in Richtung Hagen. In diesem Talabschnitt werden Kaltluftschichtdicken von bis zu 70 m erreicht (Abbildung 7, rechts). Im Nahmertal steigt die Kaltluftschichtdicke auf bis zu 120 m an, während im vergleichsweise breiteren Lennetal Kaltluftmächtigkeiten von bis zu 100 m erreicht werden.

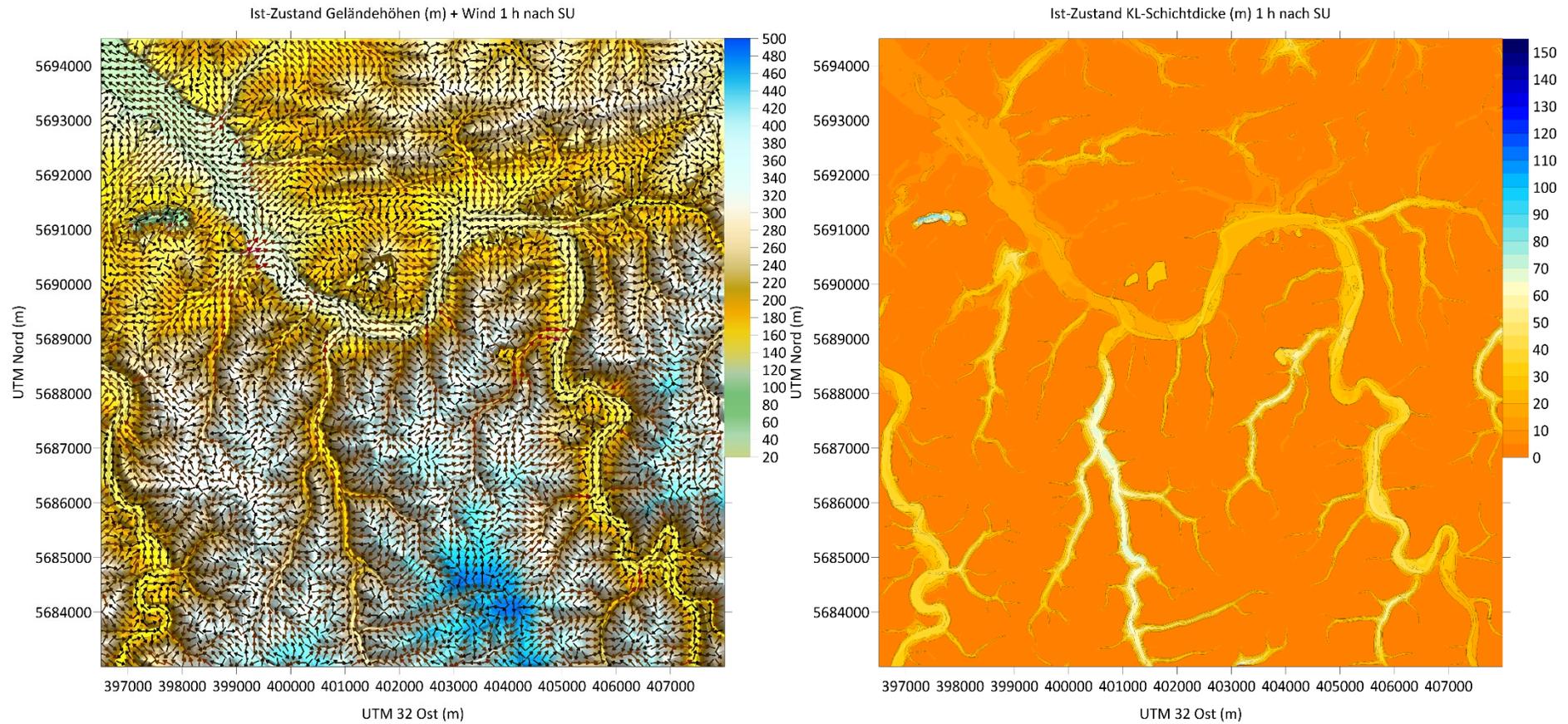


Abbildung 4: Geländehöhen (m ü. NHN) im Ist-Zustand mit überlagerten Strömungsvektoren (links) und Kaltluftschichtdicke (m) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen (rechts) zu einem Zeitpunkt von einer Stunde nach Sonnenuntergang.

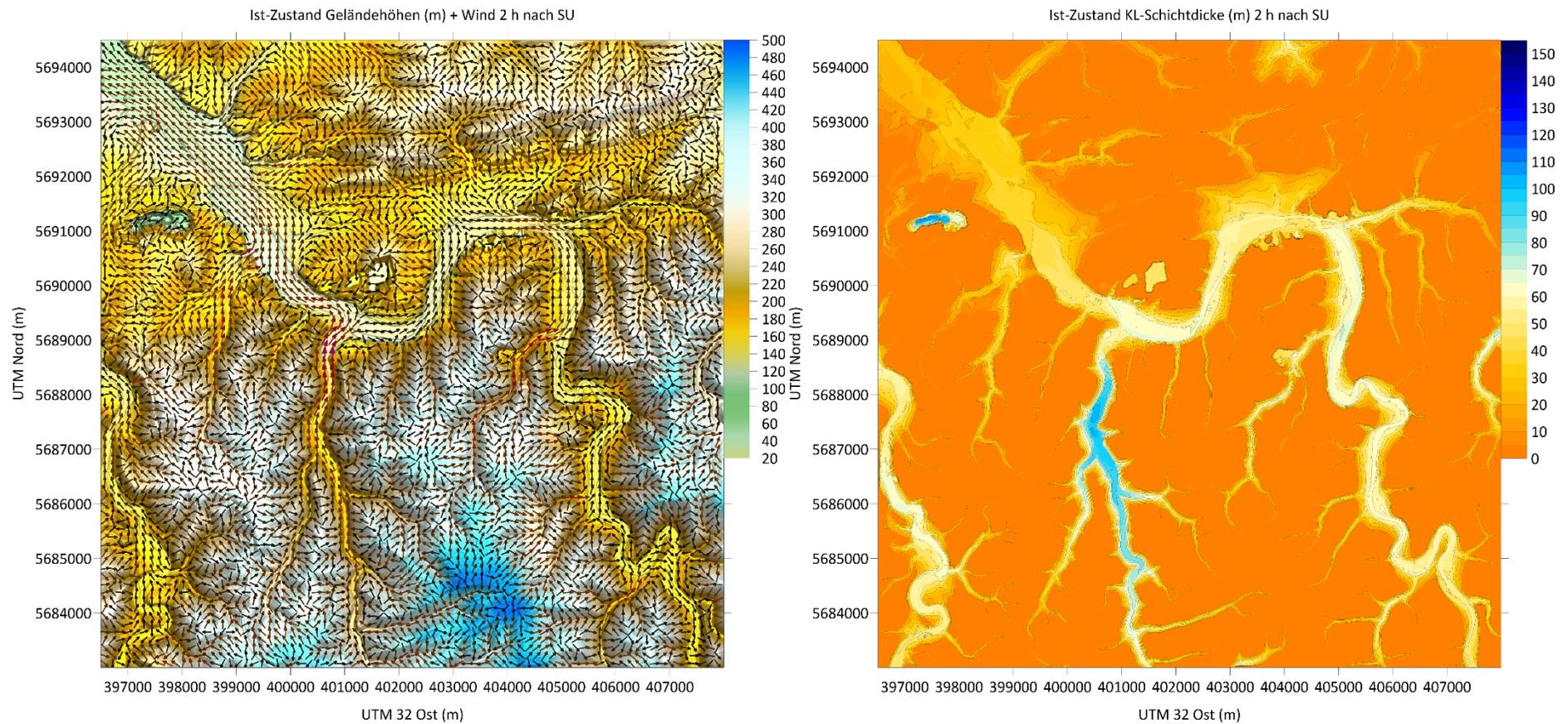


Abbildung 5: Geländehöhen (m ü. NHN) im Ist-Zustand mit überlagerten Strömungsvektoren (links) und Kaltluftschichtdicke (m) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen (rechts) zu einem Zeitpunkt von zwei Stunden nach Sonnenuntergang.

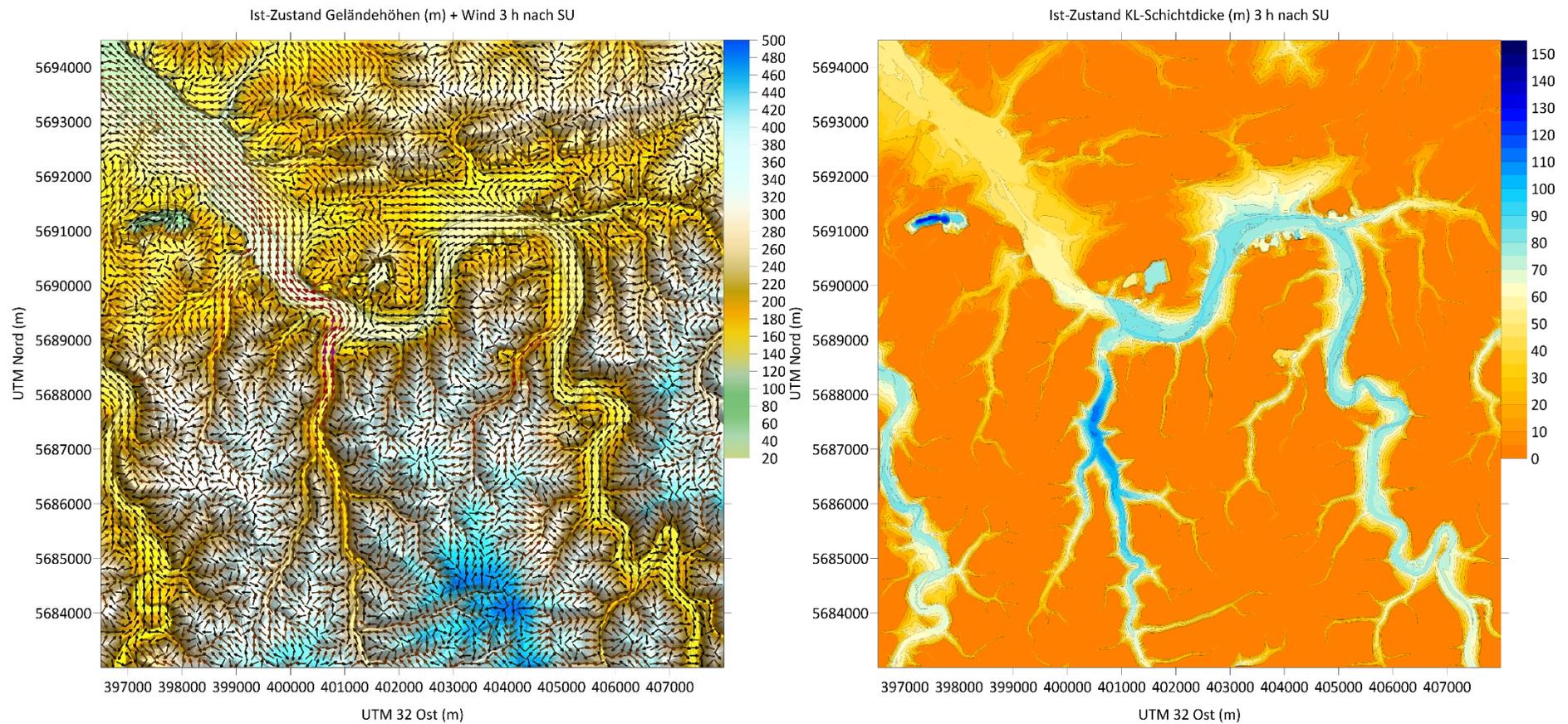


Abbildung 6: Geländehöhen (m ü. NHN) im Ist-Zustand mit überlagerten Strömungsvektoren (links) und Kaltluftschichtdicke (m) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen (rechts) zu einem Zeitpunkt von drei Stunden nach Sonnenuntergang.

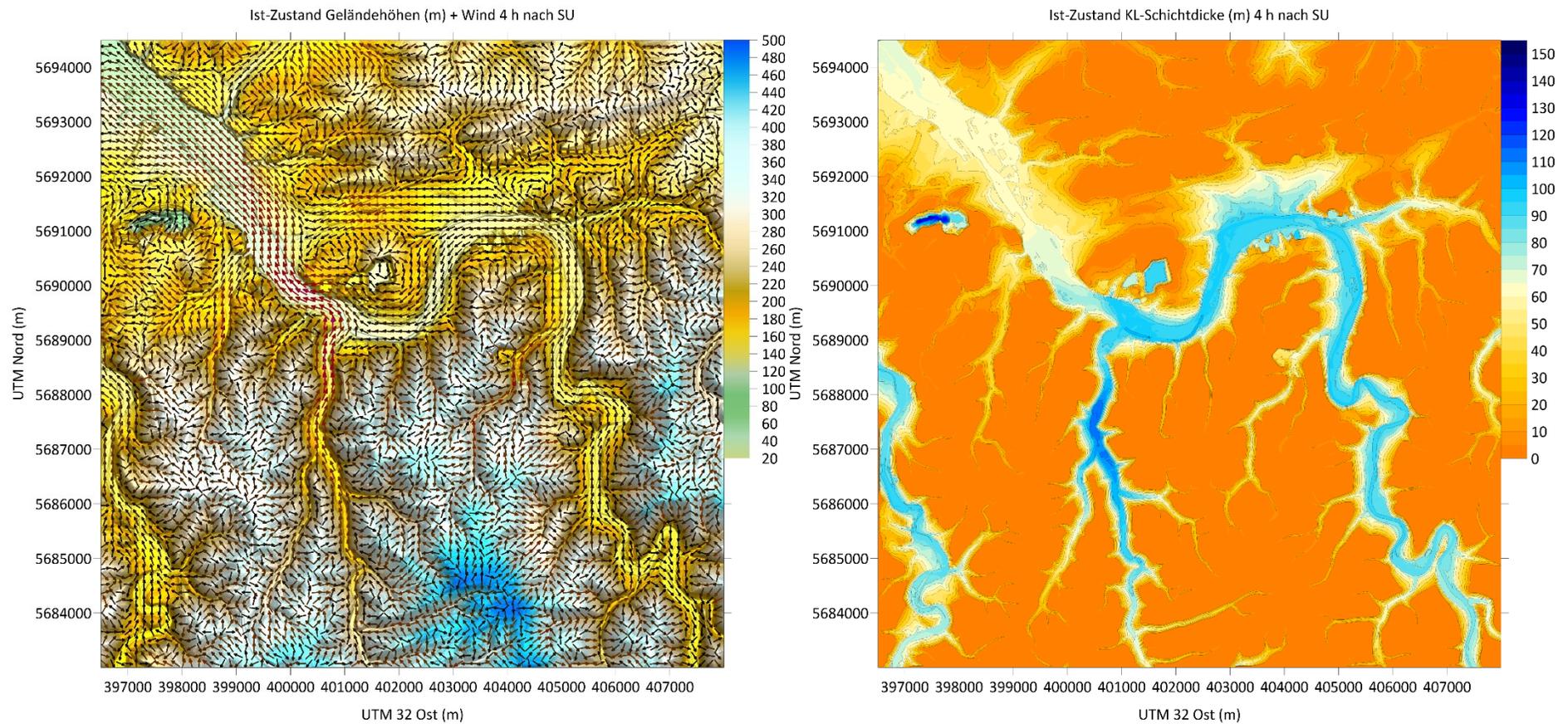


Abbildung 7: Geländehöhen (m ü. NHN) im Ist-Zustand mit überlagerten Strömungsvektoren (links) und Kaltluftschichtdicke (m) im Modellgebiet der Kaltluftsimulationen (rechts) zu einem Zeitpunkt von vier Stunden nach Sonnenuntergang.

5.2. Plan – Ist - Vergleich

Um den Einfluss der geplanten Steinbruchvertiefung auf das Kaltluftgeschehen beurteilen zu können, werden nachfolgend die berechneten Kaltluftvolumenströme in der Bestandssituation mit der Plansituation verglichen. Der Kaltluftvolumenstrom ist das Produkt aus Kaltluftschichtdicke und Windgeschwindigkeit und damit ein integrales Maß für die Kombination beider Kenngrößen. Er sagt aus, welche Mengen an frischer und kühlerer Luft über die Siedlungsgebiete geführt werden. Je geringer der Volumenstrom, umso schneller kann die herangeführte kühlere Luft erwärmt und abgebremst werden. Der Kaltluftvolumenstrom wird im Folgenden als Bewertungsgröße für die Durchlüftungsverhältnisse herangezogen.

Die Abbildungen 8, 10, 12 und 14 zeigen die Kaltluftvolumenströme in der Bestandssituation (oben) und in der Plansituation (unten) mit überlagerten Strömungsvektoren im Kerngebiet für die vier Simulationszeitpunkte von ein, zwei, drei und vier Stunden nach Sonnenuntergang. Die entsprechenden räumlichen Verteilungen der prozentualen Änderungen der Kaltluftvolumenströme zwischen der Plan- und der Bestandssituation sind in den jeweils folgenden Abbildungen 9, 11, 13 und 15 dargestellt. Die Lage des Kerngebiets ist in Abbildung 3 mit einem schwarzen Rahmen gekennzeichnet. Um Artefakte zu vermeiden, die durch vernachlässigbar geringen Variationen der Modellergebnisse bei gleichzeitig geringen absoluten Werten entstehen können, werden die relativen Differenzen der Kaltluftvolumenströme erst ab einer absoluten Differenz zwischen Plan- und Bestandssituation von mehr als $\pm 1 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ dargestellt. Eine negative relative Änderung bedeutet dabei, dass der Kaltluftvolumenstrom in der Planvariante gegenüber der Bestandssituation abgenommen hat.

In den frühen Abendstunden sind die Kaltluftsysteme noch nicht vollständig ausgebildet und Hangabwinde dominieren (vgl. Abschnitt 5.1). Sowohl im Ist- als auch im Plan-Zustand strömt die Kaltluft nach einer Stunde der Geländeneigung folgend von den Hängen des Stellenbergs und aus den Seitentälern in das Lennetal (Abbildung 8). Die Strömungsstrukturen innerhalb des Steinbruchs unterscheiden sich in der Charakteristik zwischen Ist- und Plan-Zustand nicht. In beiden Fällen sind Hangabwinde bis zum Grund des Steinbruchs sowie ein im Uhrzeigersinn drehender Strömungswirbel im Bereich der tiefsten Abbaufäche zu erkennen. Da der Steinbruch im Planfall jedoch vertieft und gleichzeitig eine kleinere ebene Fläche am Grund aufweist, bildet sich im Planfall ein etwas kleinerer Strömungswirbel in der Mitte des Steinbruchs aus.

Die Kaltluftvolumenströme liegen fast im gesamten Gebietsausschnitt bei weniger als $10 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$. Lediglich im Nahmertal sowie weiteren engen Seitentälern südlich der Lenne werden bereits Kaltluftvolumenströme von bis zu $40 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ berechnet. Auch in den Bereichen des

Lennetals, in die die Kaltluftabflüsse der Seitentäler münden, liegen höhere Volumenströme von ca. $20 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ vor.

Die Abbildung 9 zeigt die relativen Änderungen der Kaltluftvolumenströme im Plan-Zustand im Vergleich zum Ist-Zustand in der Umgebung des Steinbruchs zu einem Zeitpunkt von einer Stunde nach Sonnenuntergang vor dem Hintergrund eines OpenStreetMap-Lageplans. Dabei wurden relative Änderungen von mehr als 5 % farblich hervorgehoben. Blaue Farbtöne kennzeichnen eine Zunahme und gelbe Farbtöne eine Abnahme des Volumenstroms im Plan- gegenüber dem Ist-Zustand. Zu dieser frühen Nachtstunde, in der die Hangabwinde dominieren, beschränkt sich die räumliche Ausdehnung der durch die Vertiefung des Steinbruchs hervorgerufenen Änderungen der Kaltluftvolumenströme auf den Bereich des Steinbruchs selbst. Aufgrund der tiefer reichenden Hänge im Steinbruch und zusätzlichen Kaltluftabflüsse entlang der Geländeneigung, stellen sich im Bereich der vertieften Fläche des Steinbruchs andere Strömungsstrukturen ein, die stellenweise zu Zu- und stellenweise zu Abnahmen der Kaltluftvolumenströme führen. Außerhalb der Abbaufäche des Steinbruchs liegen die relativen Änderungen der Kaltluftvolumenströme während der ersten Nachtstunde überall bei weniger als 5 %.

Wie bereits in Abschnitt 5.1 beschrieben, dominieren auch zwei Stunden nach Sonnenuntergang weiterhin Hangabwinde die Kaltluftsituation im Modellgebiet. Die Kaltluftströmungen entlang des Nahmer- und des Lennetals sind im Vergleich zu früheren Zeitpunkten jedoch deutlicher ausgeprägt. Dies spiegelt sich auch in den Kaltluftvolumenströmen in Abbildung 10 wider. Insbesondere die Strömung aus dem Nahmertal hat sich mit Volumenströmen von lokal mehr als $140 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ bereits deutlich verstärkt. Am Talausgang des Nahmertals trifft die Strömung auf den Steltenberg und wird aufgrund des mächtigen Volumenstroms zum Teil in östliche Richtung talaufwärts gelenkt und weht mit Volumenströmen von ca. $20 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ gegen die talabwärts fließenden Ströme aus dem östlicheren Lennetal. Im Abflussbereich des Lennetals nordwestlich des Nahmertalausgangs liegen die Volumenströme bei $40 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ – $70 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$.

Die beschriebenen Charakteristiken der Kaltluftabflüsse sind sowohl im Ist- als auch im Plan-Zustand zu erkennen. Die Strömungsstrukturen unterscheiden sich im Plan-Zustand auch zu einem Simulationszeitpunkt von ca. zwei Stunden nach Sonnenuntergang nur im Bereich der Abbaufäche des Steinbruchs von dem Ist-Zustand. Die Kaltluft fließt im Ist-Zustand nur noch am Rand der Abbaufäche in Richtung des Steinbruchs, im Inneren hat sich die Wirbelstruktur weiter ausgeprägt. Im Plan-Zustand reichen die der Geländeneigung folgenden Windvektoren dagegen noch weiter in die Mitte des Steinbruchs hinein. Diese Strukturen weisen darauf hin, dass das „Auffüllen“ des Steinbruchs mit Kaltluft zu diesem Simulationszeitpunkt im Ist-Zustand schon weiter fortgeschritten ist, als im Plan-Zustand.

Die relativen Änderungen der Kaltluftvolumenströme zwischen Plan- und Ist-Zustand (Abbildung 11) zeigen ein ähnliches Muster wie zu einem Simulationszeitpunkt von einer Stunde nach Sonnenuntergang. Die Bereiche, in denen eine Zu- oder Abnahme der Volumenströme von mehr als 5 % vorliegt, beschränken sich weiterhin auf die Abbaufäche des Steinbruchs. Die Kaltluftvolumenströme in Bereichen der Wohngebiete nordwestlich und südlich des Steinbruchs werden von der Vertiefung des Steinbruchs in den frühen Nachstunden somit nicht nennenswert beeinflusst.

Zu einem Simulationszeitpunkt von ca. drei Stunden nach Sonnenuntergang hat sich das Kaltluftabflusssystem aus dem Lennetal so stark ausgebildet, dass sich die Strömungsrichtung südöstlich des Steltenbergs umkehrt (vgl. Abschnitt 5.1). Die Kaltluftströmung, die aus dem Nahmental in das Lennetal mündet, ist mit Volumenströmen von lokal mehr als $180 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ und am Talausgang noch ca. $130 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ jedoch so mächtig, dass sie die Strömung am Südhang des Steltenbergs abschnittsweise gegen die Geländeneigung in nördliche Richtung umlenkt (Abbildung 12). Diese hangaufwärts gerichtete Strömung erreicht den südwestlichen Rand der Abbaufäche des Steinbruchs. Die Strömung folgt dann wieder der Geländeneigung und fließt somit aus südlicher Richtung über den Hang des Steltenbergs in die Senke des Steinbruchs hinein. Diese Strömungsstruktur stellt sich sowohl im Ist- als auch im Plan-Zustand ein. Dennoch ist bereits im Vergleich der beiden Grafiken in Abbildung 12 zu erkennen, dass der Volumenstrom der aus südwestlicher Richtung in den Steinbruch hineinströmenden Kaltluftabflüsse im Plan-Zustand höher ist, als im Ist-Zustand. Während dort im Ist-Zustand Volumenströme von $10 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ – $20 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ auftreten, liegen diese im Plan-Zustand bei bis zu $30 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$.

Die Abbildung 13 zeigt die entsprechenden relativen Änderungen der Kaltluftvolumenströme in Umgebung des Steinbruchs. Die deutliche Zunahme der Volumenströme im Plan-Zustand gegenüber dem Ist-Zustand im südwestlichen Bereich des Steinbruchs ist auf die bereits beschriebene Strömungsstruktur aus südlicher Richtung in den Steinbruch hinein zurückzuführen. Der im Plan-Zustand tiefere Steinbruch ist zu einem Simulationszeitpunkt von drei Stunden nach Sonnenuntergang noch nicht so weit aufgefüllt, wie der Steinbruch im Ist-Zustand. Dadurch liegt im Plan-Zustand ein höherer Gradient zwischen der umgebenden Kaltluftschichtdicke und der Kaltluftschichtdicke im Steinbruch vor, sodass sich entlang der Strömungsrichtung ein im Vergleich zum Ist-Zustand verstärkter Volumenstrom in Richtung Steinbruch ausbildet. Durch die beschriebenen Unterschiede in den Strömungsstrukturen südwestlich des Steinbruchs liegen in einigen Bereichen auch negative Änderungen der Volumenströme vor, die sich größtenteils auf die Abbaufäche beschränken. Lediglich im Bereich des „alten Steinbruchs“ nördlich der Mühlenbergstraße werden großflächigere Abnahmen des Volumenstroms von maximal 30 % berechnet. Die Kaltluftabflüsse in den Bereichen der

angrenzenden Wohngebiete werden jedoch weiterhin nicht von den Änderungen der Strömungsstrukturen, die durch die Vertiefung des Steinbruchs entstehen, beeinflusst.

In Abbildung 14 ist die räumliche Verteilung der Kaltluftvolumenströme zu einem Simulationszeitpunkt von vier Stunden nach Sonnenuntergang dargestellt. Die Kaltluftströmung aus dem Lennetal ist mittlerweile so stark ausgeprägt, dass sie mit Volumenströmen von bis zu $30 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ über die Wohngebiete nördlich des Steltenbergs hinweg strömt. Auch südöstlich des Steltenbergs haben sich die Kaltluftvolumenströme im Lennetal auf bis zu $30 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ erhöht. In Lee des Nahmertalausgangs betragen die Kaltluftvolumenströme über dem Stadtgebiet von Hohenlimburg stellenweise bis zu $150 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$. Auch weiter nordwestlich, im Abflussbereich der Kaltluft, erhöhen sich die Volumenströme im Vergleich zu früheren Nachtstunden auf $100 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$ - $120 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$.

Im nordöstlichen Bereich des Steinbruchs sind in beiden Fällen am Rand der Abbaufächen Windvektoren entlang der Geländeneigung sowie ein Strömungswirbel zu erkennen, der im Uhrzeigersinn dreht. Dabei unterscheiden sich die Strömungsstrukturen im Bereich der Abbaufäche zwischen Plan- und Ist-Zustand nur noch marginal. Der südwestliche Bereich des Steinbruchs wird sowohl im Ist- als auch im Plan-Zustand von der Strömung entlang des Lennetals überströmt. Dies deutet darauf hin, dass der Steinbruch sowohl mit der bereits genehmigten Abbautiefe als auch mit der geplanten Abbautiefe nach vier Stunden Simulationszeit mit Kaltluft „aufgefüllt“ ist. Die Strömungsstrukturen in Umgebung des Steinbruchs werden von der großräumigen Kaltluftströmung entlang des Lennetals dominiert.

Wie aus Abbildung 15 ersichtlich, sind kleinräumige Differenzen der Kaltluftvolumenströme von mehr als 5 % lediglich innerhalb der Abbaufäche des Steinbruchs noch zu erkennen.

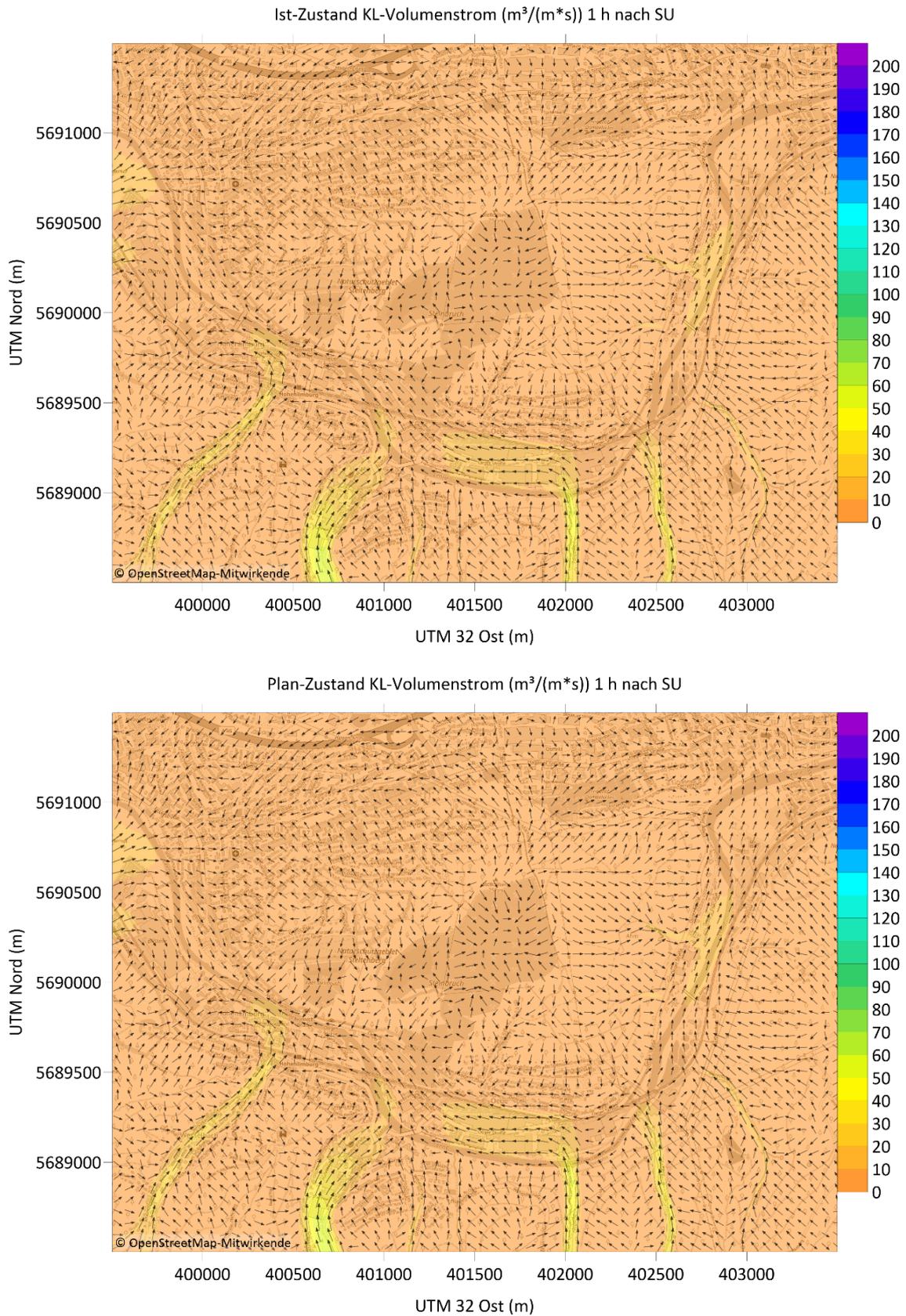


Abbildung 8: Kaltluftvolumenstrom ($\text{m}^3/(\text{m}^*\text{s})$) und Windvektoren in der Bestandsituation (oben) und in der Plansituation (unten) eine Stunde nach Sonnenuntergang.

Rel. Differenz Plan - Ist KL-Volumenstrom (%) 1 h nach SU



Abbildung 9: Relative Änderung (%) des Kaltluftvolumenstroms in der Plansituation im Vergleich zur Bestandssituation eine Stunde nach Sonnenuntergang.

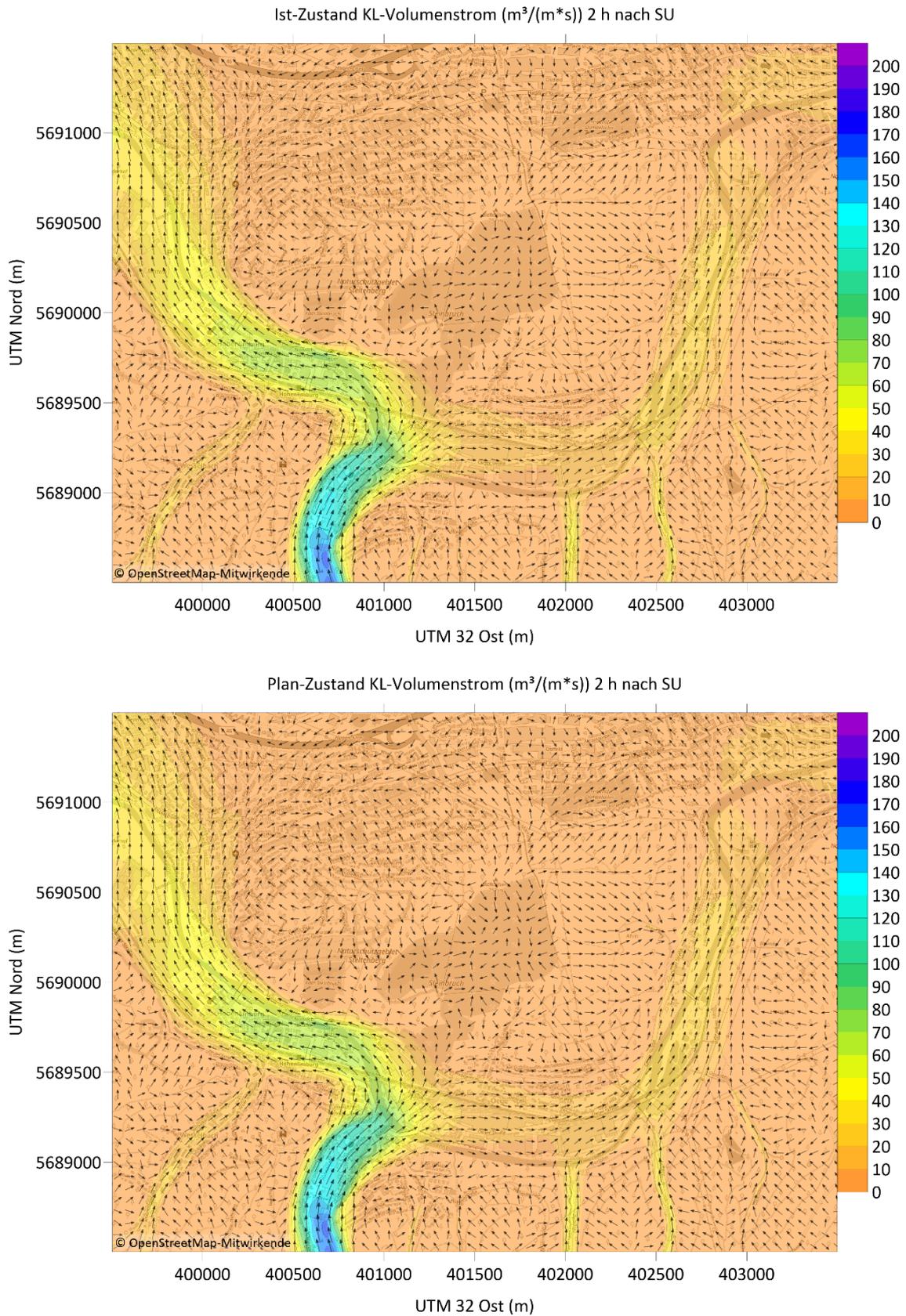


Abbildung 10: Kaltluftvolumenstrom ($\text{m}^3/(\text{m}^*\text{s})$) und Windvektoren in der Bestandsituation (oben) und in der Plansituation (unten) zwei Stunden nach Sonnenuntergang.

Rel. Differenz Plan - Ist KL-Volumenstrom (%) 2 h nach SU

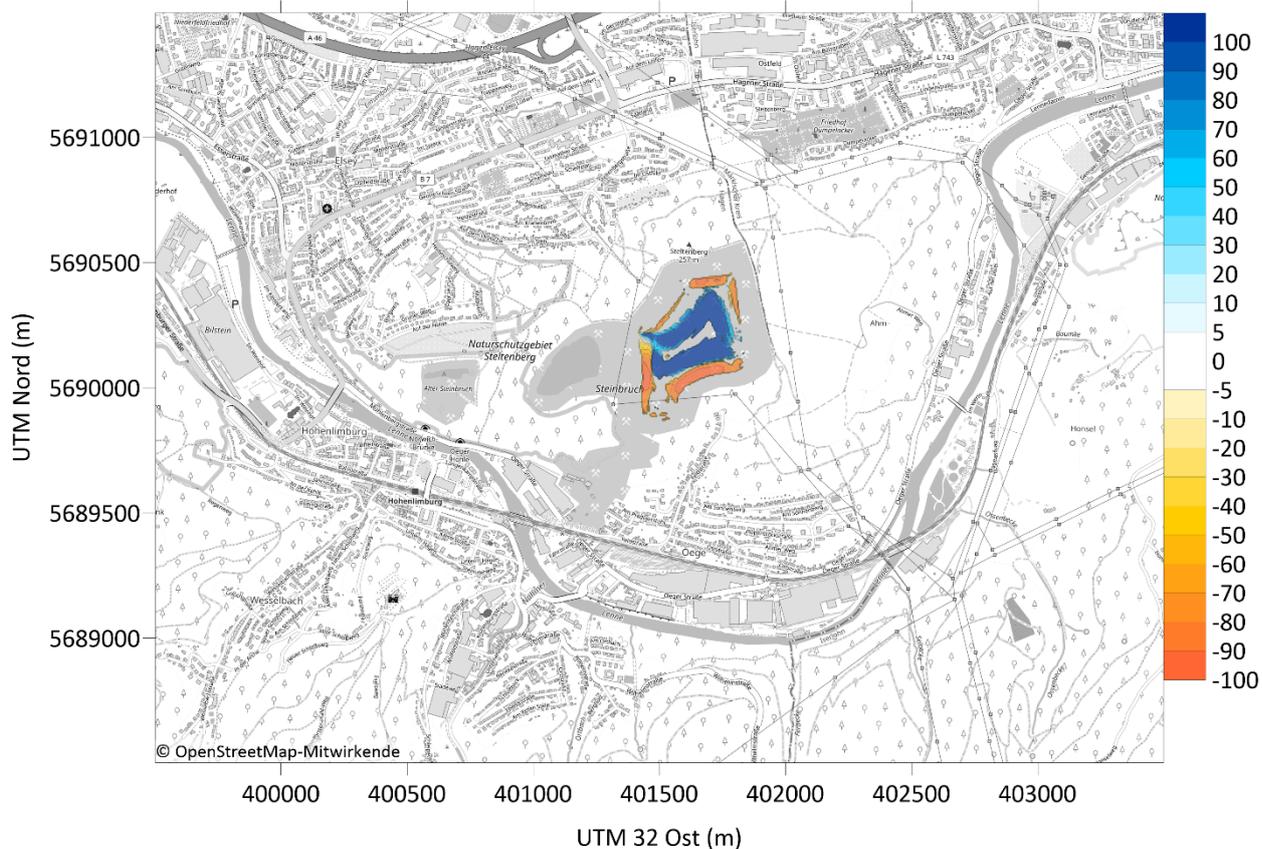


Abbildung 11: Relative Änderung (%) des Kaltluftvolumenstroms in der Plansituation im Vergleich zur Bestandssituation zwei Stunden nach Sonnenuntergang.

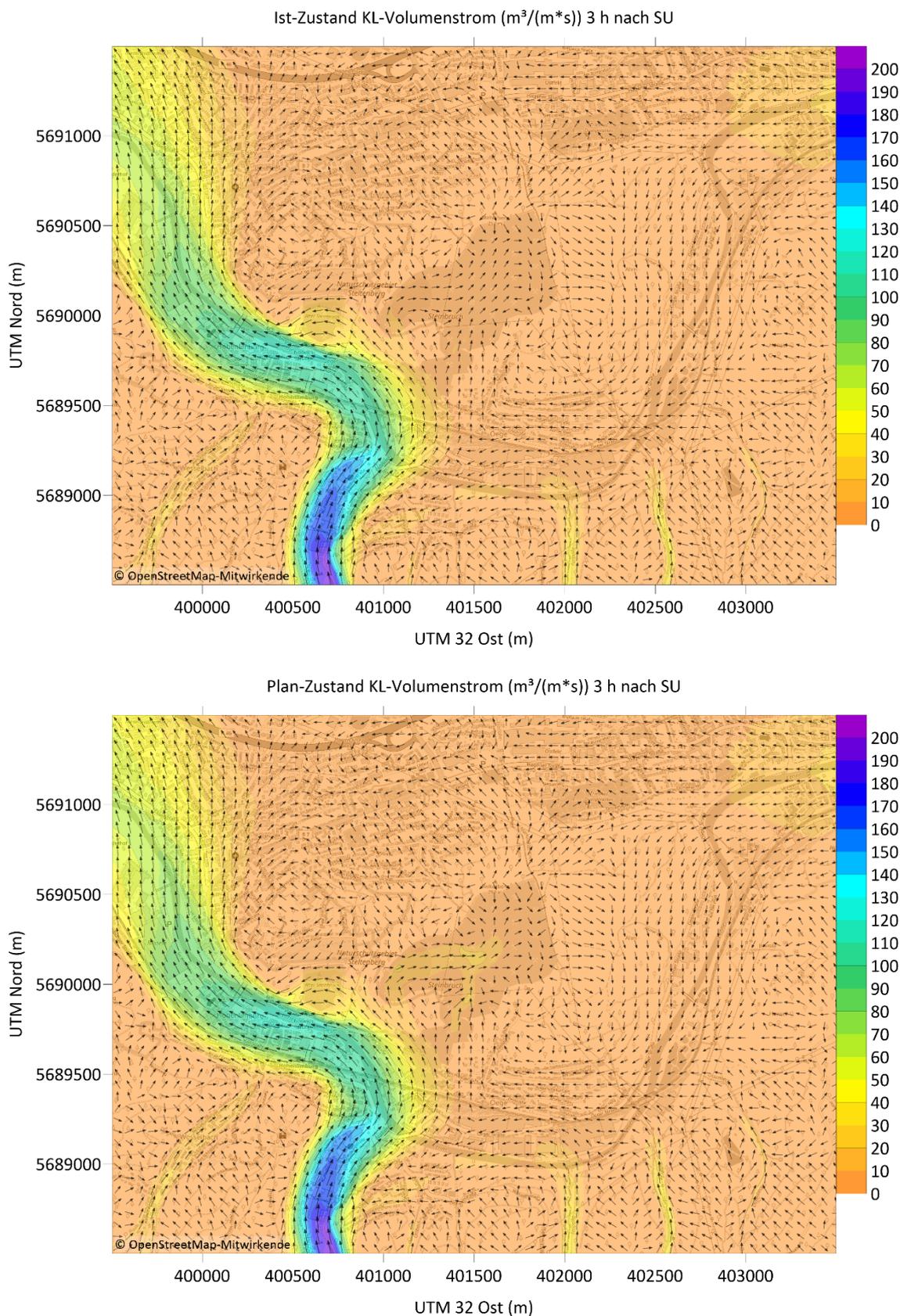


Abbildung 12: Kaltluftvolumenstrom ($\text{m}^3/(\text{m}^*\text{s})$) und Windvektoren in der Bestandsituation (oben) und in der Plansituation (unten) drei Stunden nach Sonnenuntergang.

Rel. Differenz Plan - Ist KL-Volumenstrom (%) 3 h nach SU

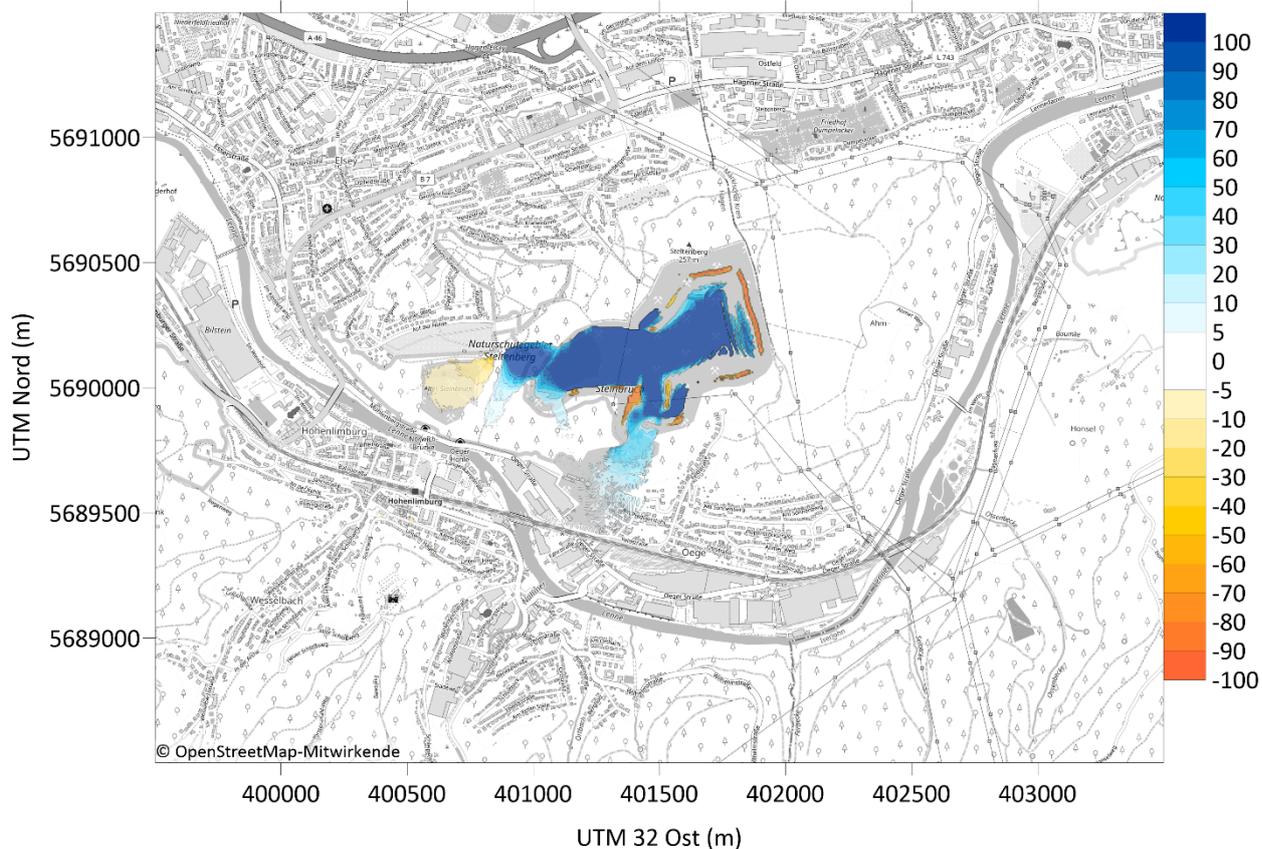


Abbildung 13: Relative Änderung (%) des Kaltluftvolumenstroms in der Plansituation im Vergleich zur Bestandssituation drei Stunden nach Sonnenuntergang.

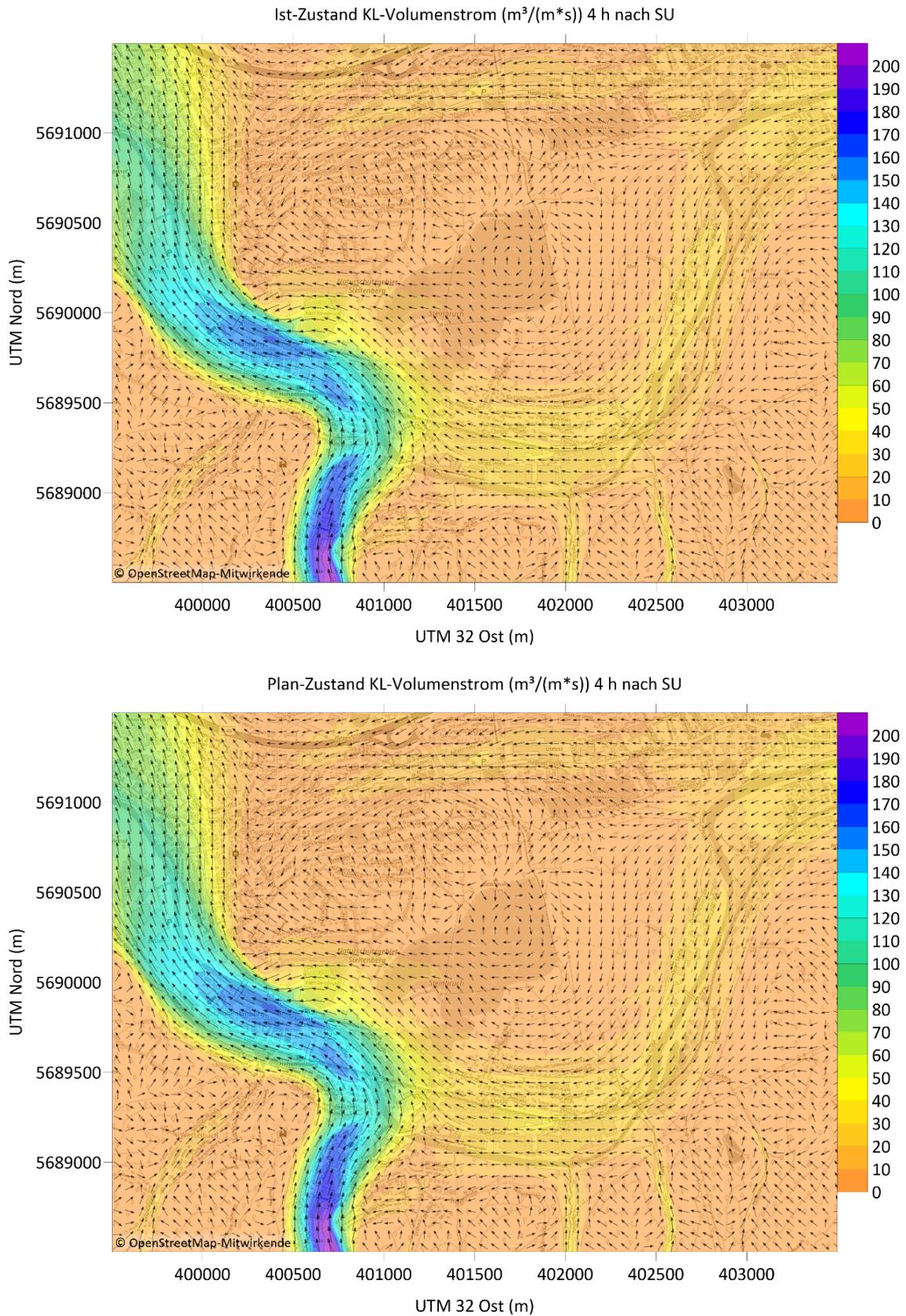


Abbildung 14: Kaltluftvolumenstrom ($\text{m}^3/(\text{m}^*\text{s})$) und Windvektoren in der Bestandsituation (oben) und in der Plansituation (unten) vier Stunden nach Sonnenuntergang.

Rel. Differenz Plan - Ist KL-Volumenstrom (%) 4 h nach SU

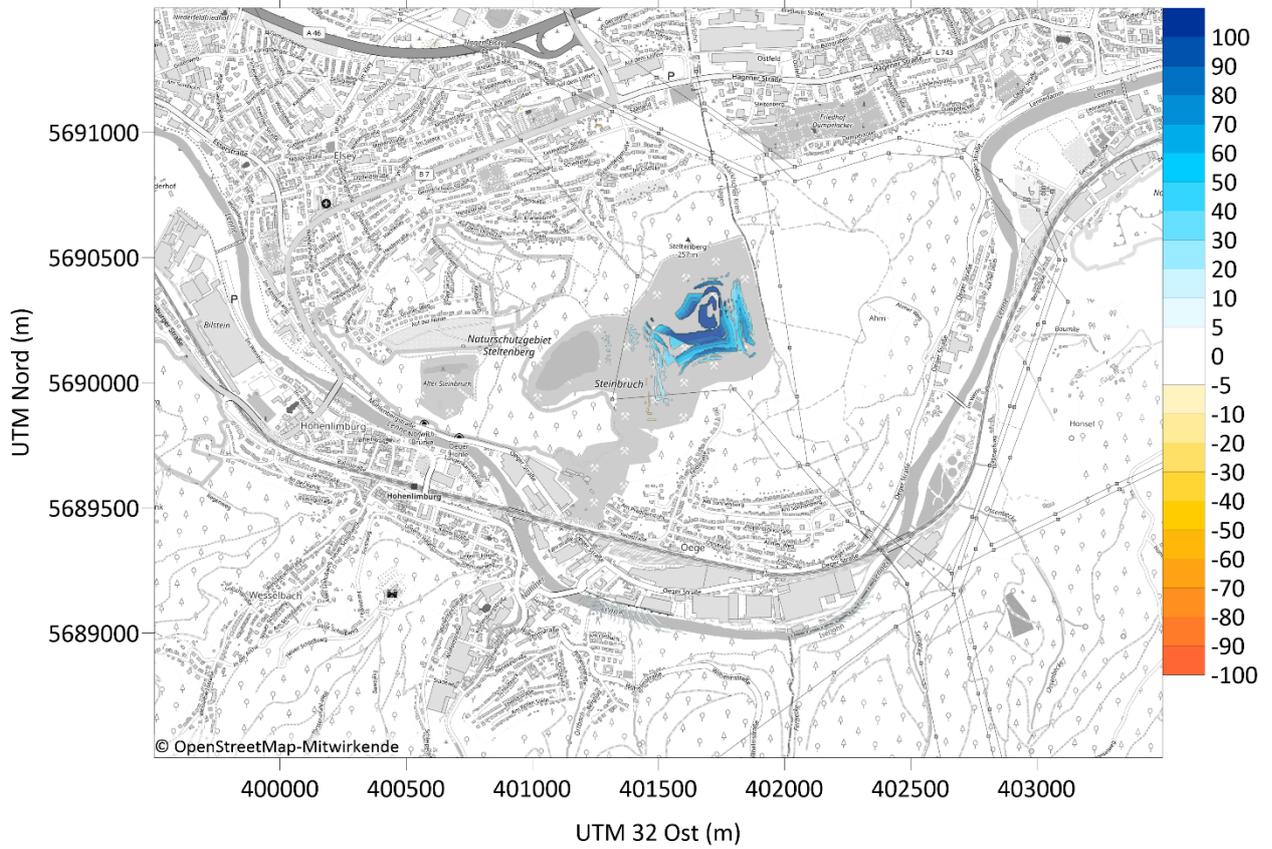


Abbildung 15: Relative Änderung (%) des Kaltluftvolumenstroms in der Plansituation im Vergleich zur Bestandssituation vier Stunden nach Sonnenuntergang.

6. Zusammenfassung und Bewertung

Die Hohenlimburger Kalkwerke planen die Vertiefung des Steinbruchs am Stellenberg. Die Aufgabe des vorliegenden Gutachtens war die Untersuchung der Planung hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf die Kaltluftabflüsse in die Bereiche der umgebenden Wohnbebauung.

Mit dem Kaltluftabflussmodell METKAT wurden Simulationsrechnungen für eine charakteristische windstille Strahlungswetterlage sowohl für den Ist-Zustand als auch den Plan-Zustand durchgeführt. Die Rechnungen erfolgten mit einer hohen räumlichen Auflösung von 5 m, sodass auch kleinräumige Strukturen in Orographie und Landnutzung sowie in den sich ausbildenden Strömungssystemen abgebildet werden konnten. Gleichzeitig wurde das Modellgebiet so groß festgelegt, dass die relevanten regionalen Einflüsse auf die Verhältnisse im Untersuchungsgebiet großflächig erfasst wurden.

Die Simulationsrechnungen zeigen, dass die Vertiefung des Steinbruchs hauptsächlich zu Änderungen der Strömungsstrukturen innerhalb der Abbaufäche führt. Sowohl in den frühen Nachtstunden, wenn die Hangabwinde dominieren, als auch zu späteren Simulationszeitpunkten, wenn das großräumige Kaltluftsystem die Strömungen in Umgebung des Steinbruchs bestimmt, sind außerhalb der Abbaufäche äußerst geringe Einflüsse der Steinbruchvertiefung auf die Kaltluftabflüsse zu erkennen.

Lediglich zu einem Simulationszeitpunkt von ca. drei Stunden nach Sonnenuntergang, also in einem Zeitraum, in dem die Hangabwinde an Bedeutung verlieren und das großräumige System noch nicht vollständig ausgebildet ist, sind Änderungen in den Volumenströmen außerhalb der Abbaufächen zu erkennen. Diese Änderungen lassen sich darauf zurückführen, dass der Steinbruch im Ist-Zustand etwas schneller mit Kaltluft aufgefüllt wird, als im Plan-Zustand. Die dadurch entstehenden Gradienten in der Kaltluftschichtdicke beeinflussen die Strömungsstrukturen in Umgebung des Steinbruchs.

Die Kaltluftabflüsse in Bereichen der benachbarten Wohngebiete werden jedoch weder in den frühen Nachtstunden noch nach vollständiger Ausbildung des großräumigen Kaltluftsystems im Lennetal nennenswert von der Vertiefung des Steinbruchs beeinflusst. Die relativen Änderungen der Kaltluftvolumenströme in den Wohngebieten in Umgebung des Steinbruchs betragen überall weniger als 5 %.

Gemessen an den in der VDI 3783 Blatt 5 [1] vorgeschlagenen Bewertungsmaßstäben ist damit der Einfluss der Vertiefung des Steinbuchs auf das bestehende Kaltluftabflusssystem und die Durchlüftungsverhältnisse in den angrenzenden Siedlungsgebieten insgesamt als „gering“ zu bewerten.

Pinneberg, den 25. März 2022



(M. Sc. Rike Wachsmann)



(Dr. Klaus Bigalke)

Literatur

- [1] **VDI (2003)**: Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5, Beuth Verlag, Berlin.
- [2] **Garret, A.J., Smith III, F.G. (1984)**: Two-Dimensional Simulations of Drainage Winds and Diffusion Compared to Observations. J. Climate Appl. Meteor., 23, 597-610.
- [3] **Smagorinsky, J.S., Manabe, S., Holloway, L. (1965)**: Numerical results from a nine-level general circulation model of the atmosphere. Mon. Wea. Rev., 93, 727-768.