

UNIVERSITÄT TRIENT

---

Abteilung für Bau- und Umweltingenieurwesen und Maschinenbau

---

BEWERTUNG DER AUSWIRKUNGEN DER EMISSIONEN  
DER MÜLLVERWERTUNGSANLAGE BOZEN

CHARAKTERISIERUNG DER EMISSIONEN UND DEREN  
AUSBREITUNG ZUR UNTERSTÜTZUNG  
VON MASSNAHMEN ZUR ÜBERWACHUNG UND  
BEWÄLTIGUNG VON KRITISCHEN SITUATIONEN

---

ZUSAMMENFASSUNG DES TECHNISCHEN BERICHTS

Im folgenden Dokument sind die wichtigsten Ergebnisse, welche im Rahmen der Fachstudie mit dem Titel: *„Bewertung der Auswirkungen der Emissionen der Müllverwertungsanlage Bozen – Charakterisierung der Emissionen und deren Ausbreitung zur Unterstützung von Maßnahmen zur Überwachung und Bewältigung kritischer Situationen“* erzielt wurden, zusammengefasst.

Die gesamte Aufstellung der Ergebnisse ist im technischen Bericht der Studie angeführt, der in italienischer Sprache auf der Internetseite der eco center AG (<https://www.eco-center.it/de/aktivitaeten-dienstleistungen/forschung>) verfügbar ist.

## 1 Einführung

Die Fachstudie wurde mit dem Ziel ausgearbeitet, die Ausbreitung der Emissionen der Müllverwertungsanlage im Talkessel von Bozen und deren am Boden zu bestimmen. In gebirgigen Umgebungen wie dem Bozner Talkessel wird die numerische Modellierung der atmosphärischen Phänomene durch die Wechselwirkung zwischen Wind und komplexer Topographie, das Vorhandensein örtlicher Kreisläufe (e.g. Giovannini et al., 2014a,b, 2017) und durch die Entwicklung thermischer Inversionslagen in den untersten Schichten der Atmosphäre, die von den normalerweise verwendeten Modellen nicht immer in angemessener Weise berücksichtigt werden, erschwert. Um nun diesen Schwierigkeiten zu begegnen, betraf ein bedeutender Teil der Studie:

1. die meteorologisch-klimatische Charakterisierung des Bozner Talkessels und der atmosphärischen Prozesse, die sich hier entwickeln;
2. die Planung und Validierung einer spezifischen Modellkette, die aus meteorologischen Modellen und Schadstoffstreuungsmodellen besteht und für den Bozner Talkessel tatsächlich repräsentativ ist.

Im Besonderen wurde die meteorologisch-klimatische Charakterisierung durch die Analyse der verfügbaren meteorologischen Daten aus bestehenden Beobachtungsnetzen und anderer Daten durchgeführt, die infolge von Messkampagnen gesammelt wurden, welche eigens unter Verwendung ausgeklügelter meteorologischer Instrumente (SODAR und Doppler-Wind-LIDAR) durchgeführt wurden. Außerdem wurden numerische Simulationen mit höchster Auflösung des meteorologischen Feldes angestellt, um ein paar typische atmosphärische Prozesse des Bozner Talkessels, besonders in den für die Luftqualität kritischsten Situationen, besser zu charakterisieren. Dagegen ermöglichten die Durchführung von Messkampagnen mit kontrollierter Freisetzung einer Indikator-Substanz durch den Kamin der Müllverwertungsanlage und die darauffolgende Messung der Konzentrationen dieser Substanz in Bodennähe die Erstellung eines Datensatzes, der für die Kalibrierung und Validierung der Modellkette verwendet wurde.

In die Fachstudie waren folgende Partner miteinbezogen:

1. eco center A.G.: die Betreibergesellschaft der Müllverwertungsanlage und Auftraggeberin der Studie;

2. Eco-Research G.m.b.H.: Analyselabor für organische und anorganische Mikroschadstoffe;
3. Arbeitsgruppe für Physik der Atmosphäre der Abteilung für Bau- und Umweltingenieurwesen und Maschinenbau der Universität Trient;
4. Landesumweltagentur der Autonomen Provinz Bozen, insbesondere das Amt für Luft und Lärm und das Labor für physikalische Chemie.

Im Laufe der Studie wurden außerdem externe Berater miteinbezogen, um sich der qualifizierten Unterstützung derselben zu bedienen:

1. für die numerische Modellierung der Streuungsprozesse der Schadstoffe in der Atmosphäre wurde die Gesellschaft CISMA G.m.b.H. (Zentrum für Umweltingenieurwesen und Entwicklung von Modellen für die Umwelt) herangezogen, da diese über Expertenwissen für Umweltmodelle mit besonderer Bezugnahme auf atmosphärische Prozesse, welche die Gegend von Bozen Kennzeichen, verfügt;
2. für die Laboranalysen, die zur Bestimmung der Indikator-Substanz erforderlich waren, die sich in den während der Versuchskampagnen gesammelten Stichproben befinden kann, bediente man sich der Zusammenarbeit mit dem Institut für pharmakologische Forschung „Mario Negri“.

Auf der Grundlage der Analysen, die im technischen Bericht detailliert wiedergegeben sind, und der erzielten Ergebnisse können folgende Überlegungen bezüglich der meteorologisch-klimatologischen Kennzeichen des Bozner Talkessels und der Ausbreitungsprozesse angestellt werden, denen die vom Kamin der Müllverwertungsanlage ausgestoßenen Schadstoffe unterliegen, um Maßnahmen zur Überwachung und Bewältigung von kritischen Situationen zu unterstützen.

## **2 Meteorologisch-klimatische Charakterisierung des Bozner Talkessels**

Die klimatologische Analyse, welche auf der Grundlage der Daten durchgeführt wurde, die von der Wetterstation von Bozen-Krankenhaus, die vom Meteorologischen Dienst der Autonomen Provinz Bozen geführt wird, sowohl für die Winter- als auch für die Sommerperiode erhoben wurden, zeigt, dass in den Nachtstunden die Atmosphäre dazu tendiert, sehr stabil zu sein, während sie in den zentralen Stunden des Tages in der Winterperiode schwach konvektiv und in der Sommerperiode sehr konvektiv ist. Daher dominiert bezüglich der Ausbreitung der Schadstoffe in den Nachtstunden die horizontale Zufuhr von Luftmassen seitens des durchschnittlichen Windes gegenüber der turbulenten Ausbreitung. Umgekehrt erhöht in den zentralen Stunden des Tages die vertikale Luftströmung die Durchmischung der Atmosphäre und somit die Verteilung der Schadstoffe.

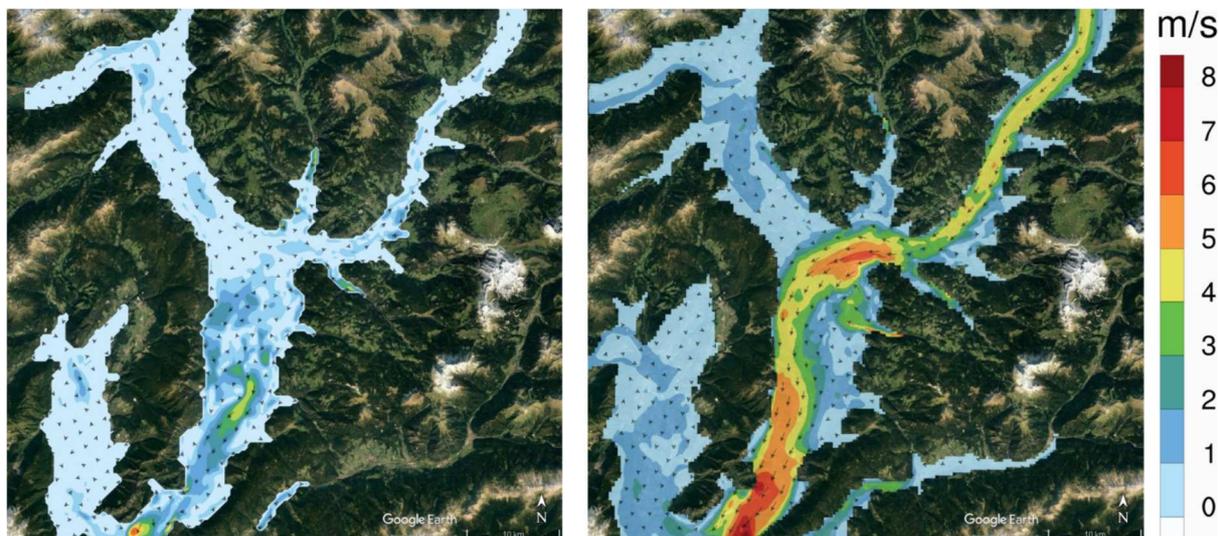


Abbildung 1: Windfeld, simuliert durch das Prognosemodell WRF für das Ereignis des *Valley-Exit Jet*, das in der Nacht vom 28. auf den 29. Januar 2017 (Hintergrundkarte aus Google Earth) beobachtet wurde. Beide Bilder beziehen sich auf denselben Zeitpunkt, geben aber das Windfeld auf zwei verschiedenen Höhenstufen wieder: auf 10 m über dem Boden (links) und auf 750 m ü.d.M. (925 hPa), ca. 450 m über dem Boden (rechts).

Dieses Bild wird noch weiter bestätigt durch die vertikalen Temperaturprofile, die vom thermischen Profiler geliefert werden, welcher beim Flugplatz installiert ist. Im Besonderen ist zu bemerken, dass die atmosphärische Stabilität des Talkessels häufig mit der Entwicklung von thermischen Inversionslagen am Boden verknüpft ist. Diese Inversionslagen sind im Sommer auf die bodennächsten Schichten beschränkt, während sie sich in der Winterperiode nicht nur auf höhere Luftschichten ausdehnen (bei einer Stärke der Inversionsschicht von 400-500 m), sondern auch in der Höhe selbst in den zentralen Stunden des Tages fortbestehen können. In diesem letzteren Fall kommt es infolge der Ansammlung von Schadstoffen in den tiefen Schichten der Atmosphäre zu einer Verschlimmerung der Luftqualität.

Die Windverteilung wurde durch Analyse der vertikalen Windprofile überprüft, die von einem auf dem Dach der Müllverwertungsanlage installierten SODAR und von einem auf dem Dach des Landhauses 12 der Autonomen Provinz Bozen installierten Doppler-Wind-LIDAR gemessen wurden. Die Analyse der Daten hat die Komplexität der Struktur des Windfeldes innerhalb des Talkessels ersichtlich gemacht. Denn in Ermangelung von übergeordneten treibenden Kräften ist das Windfeld durch örtliche thermische Kreisläufe dominiert, die sich in jedem der in den Talkessel mündenden Täler entwickeln; im Talkessel fließen sie zusammen und üben aufeinander eine Wechselwirkung aus. Der bedeutsamste örtliche Kreislauf, auch im Zusammenhang mit den Prozessen der Schadstoffverteilung, besteht ohne Zweifel in dem aus dem Eisacktal kommenden Dränagewind in den tiefen Schichten. Es wurde nämlich beobachtet, dass der aus dem Eisacktal kommende nächtliche Luftstrom in den Bozner Talkessel einströmt und die Merkmale eines Jetstreams annimmt, d.h. einer organisierten Struktur, die durch eine hohe Windstärkespitze gekennzeichnet ist, welche  $10 \text{ ms}^{-1}$  überschreiten kann. Die Analyse der

vom Doppler-Wind-LIDAR gesammelten Daten und die numerischen Simulationen mit höchster Auflösung (1), die zur besseren Kennzeichnung des Phänomens durchgeführt wurden, haben ersichtlich gemacht, dass der Jetstream mit den thermischen Inversionslagen interagiert, die sich innerhalb des Talkessels entwickeln. Im Besonderen flutet der von Osten eintretende Jetstream über der stabilen Atmosphärenschicht dahin, welche über der Stadt ruht (durchschnittlich 450 m über dem Erdboden), und durchquert den Talkessel, um sich dann nach Süden ins Etschtal zu bewegen. Unter diesen Verhältnissen beobachtet man eine Entkopplung des Bewegungsfeldes, denn unterhalb der Luftströmung weht nahezu kein Wind. Daher bleiben die auf Bodenniveau emittierten Schadstoffe auf die tiefen Schichten der Atmosphäre begrenzt und werden vom Jetstream nicht entfernt. Anders verhält es sich mit dem vom Kamin der Müllverwertungsanlage ausgestoßenen Rauch: dank der Höhe des Kamins, dank des Auftriebs aufgrund der hohen Ausgangstemperatur und dank der vertikalen Geschwindigkeit beim Austritt aus der Mündung des Kamins können die Rauchgase in höhere Luftschichten, über der thermischen Inversionslage, gelangen.

### **3 Simulation der Ausbreitungsprozesse mittels numerischer Modelle**

Um die Ausbreitungsprozesse der über den Kamin emittierten Schadstoffe im Detail analysieren zu können, wurde eine Kette von Modellen nach dem aktuellen Stand der Technik verwendet, welche auf internationaler Ebene für Anwendungen im örtlichen Maßstab und an komplexem Terrain anerkannt werden: das meteorologische Modell WRF (Weather Research and Forecasting Model) und das Streuungsmodell CALMET/CALPUFF. Die verwendeten Modelle werden in Kapitel 2 des technischen Berichts beschrieben.

Um ihre Zuverlässigkeit im Umfeld des Bozner Talkessels noch weiter zu verbessern, wurden spezifische Messkampagnen unter Freisetzung von passiven Tracern veranstaltet, welche es ermöglichen sollten, direkte Beobachtungen über die Rückwirkungen der am Kamin emittierten Schadstoffe auf den Boden zu sammeln.

Die Experimente umfassten auch die Freisetzung am Kamin einer Indikator-Substanz, dessen Konzentrationen in Bodennähe an verschiedenen Stellen des Bozner Talkessels und der nahen Täler gemessen wurden. Die am 14. Februar 2017 abgewickelten Messkampagnen haben es gestattet, 79 Stichproben von Umgebungsluft zu sammeln, welche verschiedene Konzentrationen des Tracers enthielt.

Die Konzentrationsmessungen, die in den Labors von Eco-Research mittels Massenspektrometern mit großer Genauigkeit bestimmt wurden, bildeten die Datengrundlage für die Kalibrierung der Modelle. Im Besonderen wurden die gesammelten Informationen dazu verwendet, die bestmögliche Konfigurierung des Modells CALPUFF zu ermitteln, um die Ausbreitung der Indikator-Substanz zeitlich zu bestimmen. Diese Konfigurierung, die durch statistische Analyse der gemessenen und der simulierten Werte ausgearbeitet wurde, konnte dann für die im Zusammenhang mit den von vorliegender Studie geforderten Bewertungen verwendet werden: d.h. für die Simulation von Graphiken, die die durchschnittlichen jährlichen Konzentrationen wiedergeben und für die Simulation von Graphiken, die die Konzentrationen bei potentiell kritischen Szenarien wiedergeben.

Die Ergebnisse dieser Experimente stellen auch eine wertvolle Informations-Datenbank für Untersuchungen der Schadstoffausbreitung in einem komplexen Territorium dar, die aufgrund ihrer Einzigartigkeit und des Umfangs der gesammelten Daten (meteorologische und Konzentrationsmessungen) von internationaler wissenschaftlicher Bedeutung ist.

Die erste Anwendung der so kalibrierten Modellkette WRF/CALPUFF ist die Simulation auf Jahresbasis der Ausbreitung der durch den Kamin emittierten Schadstoffe. Für diese Anwendung wurde als Bezugsjahr das Jahr 2016 gewählt, da es meteorologisch für die Norm repräsentativ und durch Daten aus meteorologischen Messungen und Daten über die Kaminemissionen der Müllverwertungsanlage gut dokumentiert ist. Die Simulation der meteorologischen Werte für das gesamte Jahr 2016, welche mittels des meteorologischen Modells WRF erzielt wurde, und die darauffolgende Simulation der Ausbreitungsprozesse mittels des Modells CALPUFF ermöglichten die Ausarbeitung von Karten der mittleren jährlichen Konzentration für alle durch den Kamin emittierten Schadstoffe (Technischer Anhang 1) und Karten der Stundenhöchstwerte (Technischer Anhang 2) oder Tageshöchstwerte (Technischer Anhang 3), für die gesetzlich normierten Schadstoffe. Die Zuverlässigkeit dieser Ergebnisse ist sehr hoch, da sie durch die besten international anerkannten Modelle für Anwendungen auf komplexem Territorium erzielt wurden, die auch noch durch während der Experimente im Feld erhobenen Daten abgeglichen wurden.

## 4 Überwachung des Niederschlags der Emissionen

Die Konzentrationskarten, die durch die Simulationsgraphiken auf Jahresbasis erzielt wurden, welche in Kapitel 5 des technischen Berichts beschrieben werden, zeigen, dass die Auswirkungen der Emissionen aus dem Kamin der Müllverwertungsanlage auf dem Bozner Talkessel im Vergleich zu anderen Emissionsquellen sehr begrenzt sind.

Diese Simulationen, die als Ziel hatten, Angaben über die Positionierung von fest installierten Messstationen zu liefern, um die Schadstoffkonzentrationen in den Gebieten wo der größte Schadstoff-Niederschlag zu erwarten war, zu bestimmen, haben in Wirklichkeit gezeigt, dass die Emissionen aus dem Kamin so gering sind, dass beispielsweise der Feinstaubanteil (PM10) aus dem Kamin gar nicht messbar ist und bei den Stickoxide (NO<sub>x</sub>) kein Anheben vom Grundwert unterscheidbar ist. Denn:

1. bei den PM10 (Karte in Abbildung 2) beträgt die maximale jährliche simulierte Konzentration  $0.01 \mu\text{g m}^{-3}$  gegenüber einem Umgebungsgrundwert von  $17 \mu\text{g m}^{-3}$  (eingeschätzt auf der Grundlage der bei der Luftqualitätsstation Hadrianplatz Bozen erhobenen Daten) und einem gesetzlichen Grenzwert von  $40 \mu\text{g m}^{-3}$ ;

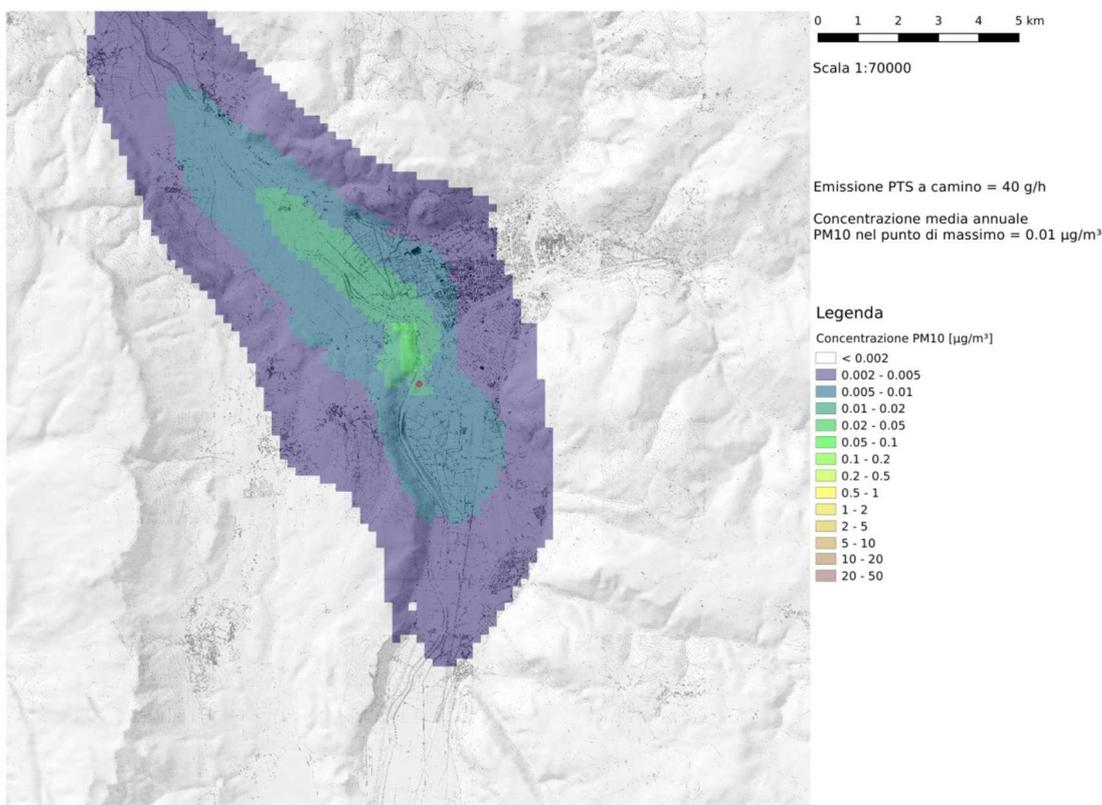


Abbildung 2: Mittlere jährliche PM10-Konzentrationen über dem Bozner Talkessel.

2. beim NO<sub>2</sub> (Karte in Figur 3) beträgt die maximale jährliche simulierte Konzentration 0.36 µg<sup>-3</sup> gegenüber einem Umgebungsgrundwert von 31.3 µg<sup>-3</sup> (immer bezogen auf die Daten der Luftqualitätsstation Hadrianplatz Bozen) und einem gesetzlichen Grenzwert von 40 µg<sup>-3</sup>.

Auch die Konzentrationen der anderen auf die Freisetzung durch die Müllverwertungsanlage zurückzuführenden Schadstoffe sind so niedrig, dass sie nicht feststellbar oder jedenfalls gegenüber dem Grundwert schwer unterscheidbar sind.

## 5 Abstimmung eines spezifischen Modellsystems für die Anlage

Das für die vorliegende Fachstudie umgesetzte Modellsystem kann nicht nur für Planungszwecke, sondern auch zur Abstützung von Tätigkeiten zum Schutz der Bevölkerung bei einem Unfall verwendet werden. Aus diesem Grund wurde die kalibrierte Modellkette dazu verwendet, die Konzentrationsfelder zu rekonstruieren, die durch hypothetische versehentliche Freisetzungen durch den Kamin verursacht werden, wie in Kapitel 6 des technischen Berichts beschrieben. Angesichts der sehr veränderlichen Beschaffenheit des Bewegungsfeldes der Zone sowohl auf Tagesbasis als auch auf Jahreszeitenbasis hat man sich dafür entschieden, einige kritische Fälle zu ermitteln, in denen sich sehr hohe Konzentrationen in Gebieten hoher Wohndichte ergeben könnten.

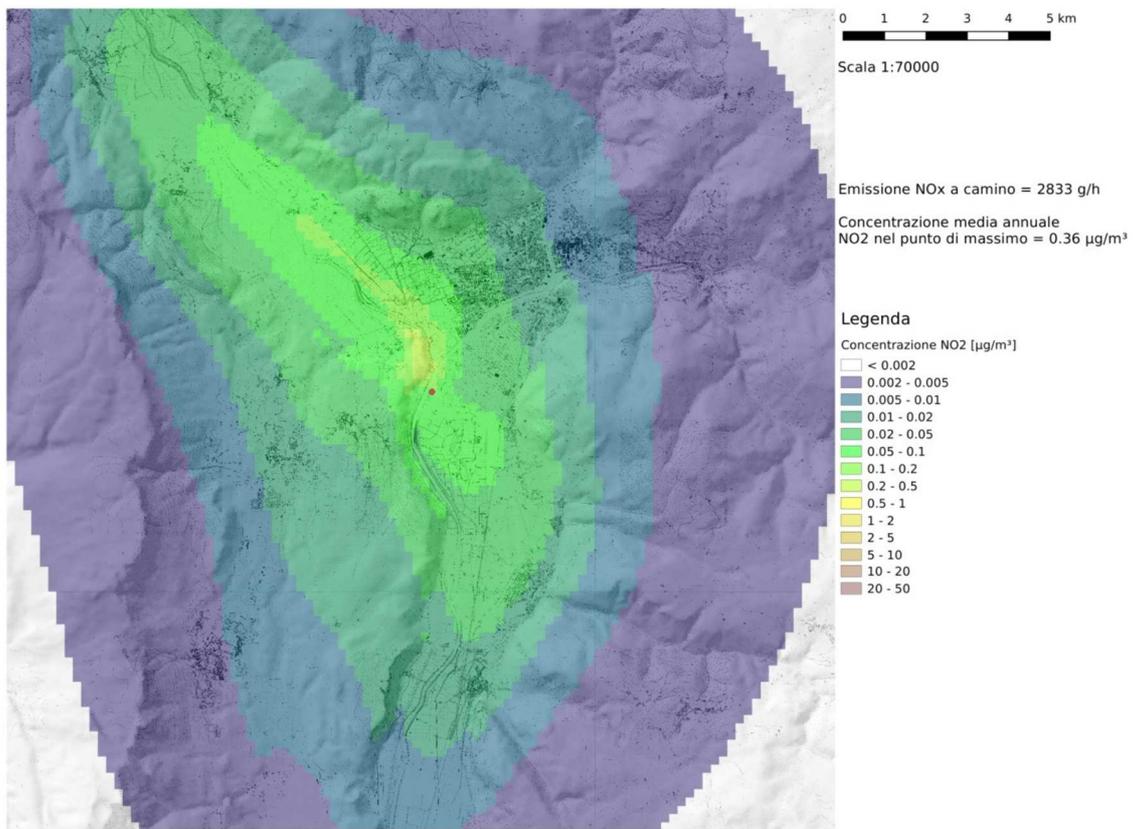


Abbildung 3: mittlere jährliche NO<sub>2</sub>-Konzentrationen über dem Bozner Talkessel.

Die erzielten Ergebnisse (Technischer Anhang 4) zeigen eine erhebliche Zunahme der Konzentrationen am Boden im Zusammenhang mit den verschiedenen Bedingungen von Zunahme der Kaminemissionen. Die umgesetzte Modellkette kann in Echtzeit mit sehr kurzen Durchführungszeiten operativ gemacht werden, zur Abstützung von Maßnahmen im Falle unbeabsichtigter Ereignisse, welche Schadstofffreisetzungen verursachen können, die erheblich über den Gefahrenschwellenwerten liegen.

## Bibliographie

Giovannini, L., Antonacci, G., Zardi, D., Laiti, L., & Panziera, L. (2014b). Sensitivity of simulated wind speed to spatial resolution over complex terrain. *Energy Procedia*, 59, 323–329.

Giovannini, L., Laiti, L., Serafin, S., & Zardi, D. (2017). The thermally driven diurnal wind system of the Adige Valley in the Italian Alps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.

Giovannini, L., Zardi, D., de Franceschi, M., & Chen, F. (2014a). Numerical simulations of boundary-layer processes and urban-induced alterations in an Alpine valley. *International Journal of Climatology*, 34 (4), 1111–1131.