Im Auftrag des:
Hessischen Ministeriums für Wirtschaft,
Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum

HANDREICHUNG ANFORDERUNGEN AN LOKALE KLIMAANALYSEN

Methodische Vergleichbarkeit mit der landesweiten Klimaanalyse

iMA
Richter & Röckle

Immissionen
Meteorologie
Akustik

Auftraggeber:	**Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum Kaiser-Friedrich-Ring 75 65185 Wiesbaden**
Bericht-Nr.:	**1.0**
Umfang:	**23 Seiten**
Datum:	**14. April 2025**
Auftragnehmer:	**iMA Richter & Röckle GmbH & Co. KG Eisenbahnstraße 43 79098 Freiburg**
Bearbeiter:	**Dr. Christine Ketterer, M. Sc. in Climate Sciences Dr. Rainer Röckle, Diplom-Meteorologe**
Telefon:	**0761/ 400077-09**
E-Mail:	**ketterer@ima-umwelt.de**
Internet:	**www.ima-umwelt.de**

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3

2 Kriterien für lokale Klimaanalysen 5

2.1 Anwendungsgebiete 5

2.2 Methodische Vergleichbarkeit mit der landesweiten Klimaanalyse 5

2.3 Simulationsmodelle 6

2.4 Größe des Simulationsgebiets und räumliche Auflösung 6

2.5 Eingangsdaten, Ansätze und Annahmen des Gutachters 7

2.6 Wahl des Modells 7

2.7 Bewertung der Ergebnisse 10

3 Kriterienkatalog/Checkliste 14

4 Glossar 16

5 Literatur 20

Anhang 1: Allgemeine Grundlagen zu den Unterschieden der Modelle 22

1 Einleitung

Wetter und Klima können das Wohlbefinden des Menschen und damit seine Leistungsfähigkeit und Gesundheit stark beeinflussen. Durch den anthropogenen Klimawandel wird im 21. Jahrhundert neben dem Anstieg der mittleren Lufttemperaturen auch eine Zunahme der Dauer, Intensität und Häufigkeit von Hitzewellen und der Anzahl an heißen Tagen* sowie Tropennächten* erwartet (Calvin et al. (2023); Perkins-Kirkpatrick & Lewis (2020); Revi et al. (2014)).

In verdichteten Siedlungsräumen liegt bei windschwachen Hochdruckwetterlagen (autochthone Wetterlage*) die Lufttemperatur nachts 4 – 10 K[1] höher als in den umliegenden ländlichen Gebieten, in Einzelfällen kann die Intensität der urbanen Wärmeinsel* nochmals deutlich höher liegen (Santamouris (2020)). Tagsüber sind die Unterschiede in der Lufttemperatur zwischen Stadt und Umland geringer. Allerdings ist auch tagsüber die human-biometeorologische* Wärmebelastung* in der Stadt höher als im ländlichen Umland (Matzarakis, Muthers & Graw (2020)). Im Jahr 2022 lebten mit 60 Millionen Personen die Mehrheit der Bevölkerung Deutschlands (71 %) in Großstädten und deren Umland[2].

Maßnahmen zur Klimaanpassung werden dringlicher. Für die Raumplanung stellt die Sicherung und der Erhalt klimarelevanter Ausgleichsflächen* eine wichtige Aufgabe dar. Gemäß den landesplanerischen Vorgaben sind in den Regionalplänen „die regional bedeutsamen Luftleitbahnen* sowie die für das Siedlungsgebiet bedeutsamen Flächen des Freiraums (Kaltluft- und Frischluftentstehungsgebiete), die im räumlichen Zusammenhang mit lufthygienisch und/oder thermisch belasteten Siedlungsräumen stehen und wichtige Aufgaben für den Klima- und Immissionsschutz wahrnehmen“, als Vorrang*- bzw. Vorbehaltsgebiete* für besondere Klimafunktionen festzulegen (Planziffer 4.2.3-3 (Z) der 3. Änderung des Landesentwicklungsplans Hessen 2000). Grundlage für die Festlegung dieser Vorrang- bzw. Vorbehaltsgebiete ist die landesweite Klimaanalyse Hessen, in der flächendeckend die Belastungssituation und die Kaltluftabflussverhältnisse ermittelt wurden. Die Bewertung der Ausgleichsräume erfolgte unter einem anthropozentrischen Ansatz, d.h. je größer die thermische Betroffenheit des Wirkraumes* ist, desto höher ist die Bedeutung des Ausgleichsraums anzusetzen. Dabei stehen die regionalplanerisch bedeutsamen thermisch belasteten Siedlungsgebiete (regionalbedeutsame Wirkräume) im Fokus. Die zur Abkühlung dieser Bereiche beitragenden Kaltluftentstehungsgebiete und zugehörigen Luftleitbahnen können durch die o.g. raumordnerischen Festlegungen gesichert werden. Die konkrete Festlegung der Vorrang- bzw. Vorbehaltsgebiete für besondere Klimafunktionen[3] ist dem Träger der Regionalplanung unter Berücksichtigung weiterer Gesichtspunkte vorbehalten.

Aufgrund des Bedarfs an zusätzlichen Siedlungsflächen können in den Regionalplänen in Einzelfällen Vorranggebiete Siedlung Planung oder Vorranggebiete Industrie und Gewerbe Planung festgelegt sein, die mit einem Vorbehaltsgebiet für besondere Klimafunktionen überlagert sind. Bei der Realisierung dieser Vorranggebiete Siedlung Planung oder Industrie und Gewerbe Planung kommt dem Belang Klima im Zuge der Bauleitplanung eine besondere Bedeutung zu. Für großflächige Planungen in diesen Vorranggebieten (i.d.R. ab 5 ha, ggf. auch in Addition mehrerer kleiner Gebiete) ist entsprechend den oberen Landesplanungsbehörden ein Klimagutachten vorzulegen. Ein

---

* Mit einem Stern gekennzeichnete Begriffe sind im Glossar (Kapitel 4) erläutert.

[1] Temperaturdifferenzen werden in Kelvin (K), die Temperatur in Grad Celsius (°C) angegeben.

[2] https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Demografischer-Wandel/Aspekte/demografie-grossstadtregionen.html, (27.05.2024)

[3] Die Regionalplanung verfügt über zahlreiche freiraumsichernde Instrumente, mit denen weitere klimabedeutsame Freiflächen planerisch gesichert werden können.

Klimagutachten ist auch in Zielabweichungsverfahren und Raumverträglichkeitsprüfungen vorzulegen, wenn Vorranggebiete für besondere Klimafunktionen für entgegenstehende Nutzungen oder Maßnahmen in Anspruch genommen werden sollen. In den Klimagutachten haben die Gemeinden oder die Träger einer Planung zu belegen, dass die geplante Nutzung oder Maßnahme zu keinen erheblichen Auswirkungen der betroffenen klimatischen Belange führt. Die Herausforderung besteht darin, die eingereichten Gutachten hinsichtlich der Qualität und Belastbarkeit zu beurteilen.

Diese Handreichung mit Anforderungen an lokale Klimaanalysen soll die oberen Landesplanungsbehörden dabei unterstützen, in den oben genannten Fällen, die Qualität, Belastbarkeit und die Vergleichbarkeit der vorgelegten Gutachten beurteilen zu können. Gleichzeitig kann sie den Kommunen und Vorhabenträgern als Hilfestellung bei der Beauftragung bzw. Bearbeitung von lokalen Klimaanalysen aber auch zur Überprüfung, ob bestehende Klimaanalysen ausreichend sind oder der Ergänzung/Überarbeitung bedürfen, dienen.

Zu berücksichtigen ist, dass für diese Fragestellung keine verbindlichen Kriterien oder absoluten Grenzwerte vorliegen, da sowohl die Ausprägung der Klimafunktionen als auch die Beeinflussungen durch die jeweiligen Planungen von den lokalen bzw. regionalen Rahmenbedingungen abhängen. Es kann jedoch eingegrenzt werden, welche Methodik aus fachlicher Sicht sinnvoll und zielführend für eine Bewertung ist.

Aus den Anforderungen an entsprechende Gutachten, nämlich

- der Ausweisung der Kaltluftabflusssituation für den Nullfall und den Planfall,
- der Darstellung der Beeinträchtigung des Wirkungsraumes,
- der Beurteilung der Erheblichkeit,

ergibt sich bereits ein breites Spektrum an Methoden zur Bestimmung entsprechender Beurteilungsgrößen und der Bewertung der Ergebnisse.

Bei Fragen der Luftreinhaltung sind entsprechende Beurteilungen in der TA Luft (2021) oder in der 39. BImSchV (2020) klar definiert. So sind der anzuwendende Modelltyp, die Lage der Beurteilungspunkte und der Zeitbezug festgelegt.

Bei klimatischen Fragestellungen fehlen entsprechende Setzungen. Die Handlungsempfehlung zur „Modellbasierten Bestimmung hitzegefährdeter Siedlungsräume“ (VDI (2024)) enthält eine Prüfliste zur qualitativen Bewertung von Stadtklimagutachten, d.h. ob ausreichend dokumentiert wurde, wie die Ergebnisse erzielt wurden. Eine Bewertung aus fachlicher Sicht (richtige Modellwahl, Modellauflösung und Modellgebietsgröße, Zeitbezug) ist darin nicht enthalten.

Daraus ergeben sich für die Regionalplaner bei der Bewertung des eingereichten Gutachtens Herausforderung in Bezug auf

- die Vergleichbarkeit mit der landesweiten Klimaanalyse,
- die richtige Wahl des eingesetzten Modells,
- die Größe des betrachteten Simulationsgebiets und die räumliche Auflösung,
- die Ansätze und Annahmen des Gutachters,
- und die letztendliche Bewertung der Ergebnisse.

Daneben spielt auch die fachliche Qualifikation des Gutachters eine Rolle. Die Bedienung der in Frage kommenden Modellsysteme ist nicht trivial und erfordert Erfahrung beim Aufsetzen von Simulationen und bei der Interpretation der Ergebnisse.

2 Kriterien für lokale Klimaanalysen

Aus der Festlegung als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiet für besondere Klimafunktionen geht hervor, dass die Fläche einen wichtigen Beitrag zur Frisch- und Kaltluftversorgung überwärmter Siedlungsbereiche liefert.

Insbesondere bauliche Maßnahmen in einem solchen ausgewiesenen Gebiet reduzieren durch die Rauigkeit* der Baukörper den Volumenstrom und somit die Belüftung. Zudem wird durch die Gebäude und Versiegelungen der Strahlungshaushalt* geändert. Erwärmung und Wärmespeicherung der Baukörper und versiegelten Flächen führen nachts zu einem Wärmeeintrag in den Kaltluftstrom bzw. reduzieren die Kaltluftproduktion.

Die Belüftungssituation angrenzender Siedlungsräume wird dadurch geschwächt. Der Einfluss eines einzelnen Gebäudes ist dabei deutlich geringer als wenn eine große Fläche in Anspruch genommen wird. Um herauszufinden, wie intensiv und weitreichend der Eingriff ist, müssen Modellrechnungen für den Istzustand (bzw. Nullfall) und den Planfall durchgeführt werden. Der Gutachter hat die Aufgabenstellung und sein Vorgehen detailliert zu dokumentieren.

2.1 Anwendungsgebiete

Anwendungsgebiete für lokale Klimaanalysen sind:

1. Im Rahmen eines Zielabweichungsverfahrens, wenn eine Kommune ein Gebiet, das in einem **Vorranggebiet für besondere Klimafunktionen**[4] liegt, z.B. wohnbaulich oder gewerblich nutzen möchte und daher eine Befreiung von der Zielbeachtenspflicht erforderlich wird.
2. Im Rahmen der Bauleitplanung, wenn ein **Vorbehaltsgebiet für besondere Klimafunktionen** ein Vorranggebiet Siedlung, Planung oder Vorranggebiet Industrie und Gewerbe, Planung überlagert. In diesem Fall hat die wohnbauliche bzw. gewerbliche Nutzung Vorrang, sie ist jedoch in klimaangepasster Weise zu realisieren. Die lokale Klimaanalyse dient hier insbesondere als Grundlage für die konkreten Festsetzungen.

2.2 Methodische Vergleichbarkeit mit der landesweiten Klimaanalyse

Die landesweite Klimaanalyse Hessen basiert auf einer regionalen Analyse einer hochsommerlichen autochthonen Wetterlage (vgl. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015); VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2024)) mit dem dreidimensionalen prognostischen Modell FITNAH. Dafür wurden die Kaltlufteinzugsgebiete*, unabhängig von ihrer räumlichen Ausdehnung, vollständig erfasst, da das Simulationsgebiet ganz Hessen und die angrenzenden Bereiche umfasst.

Auswirkungen auf die Volumenstromdichte und die Windgeschwindigkeit in unterschiedlichen Höhen können durch lokale Klimaanalysen nur dann abgeschätzt werden, wenn nicht nur das Plangebiet selbst, sondern die Gesamtheit der Kaltlufteinzugsgebiete des Plangebiets und der Umgebung (also ggf. auch von Gegenströmungen) im Modell (mit zusätzlichem Randbereich) dargestellt werden. Dazu kann das Kaltlufteinzugsgebiet auch durch das Wassereinzugsgebiet abgeschätzt werden. Bei großen Einzugsgebieten (z.B. Flusstäler) kann in der Regel das Einzugsgebiet auf 20 km talaufwärts begrenzt werden, da Kaltluft aus weiter entfernten Kaltluftproduktionsräumen

[4] Gemäß der 3. Änderung des Landesentwicklungsplans Hessen 2000 hat in Vorranggebieten für besondere Klimafunktionen der Schutz von Kaltluftentstehungsgebieten und Luftleitbahnen Vorrang vor entgegenstehenden Nutzungen. Maßnahmen, welche die Kaltluftentstehung oder Durchlässigkeit verschlechtern können, sind nicht zulässig.

den Wirkungsbereich im Laufe einer Nacht kaum noch erreicht. Ausnahmen stellen regionale Windsysteme dar, hier ist von einem Einzugsgebiet >50 km auszugehen. In Hessen sind hier als regionale Windsysteme z.B. der Wetterauwind oder die Strömung im Rheintal hervorzuheben.

Die in den Simulationen zu berücksichtigenden Eingangsdaten und die zugrunde zu legende Wetterlage werden in Kapitel 2.5 beschrieben. Orografie, Landnutzung, Gebäude und Bewuchs sind zu berücksichtigen.

Bei bestehenden Stadtklimaanalysen ist – sofern diese in Zielabweichungsverfahren als Bewertungsgrundlage eingesetzt werden – zu prüfen, ob eine methodische Vergleichbarkeit zur landesweiten Klimaanalyse vorliegt.

2.3 Simulationsmodelle

Mit numerischen Simulationsmodellen können sehr unterschiedliche Szenarien (z.B. räumliche Phänomene oder Auswirkungen des Klimawandels) berechnet und somit die klimatischen Auswirkungen von geplanten Nutzungs- und Bebauungsänderungen quantifiziert werden. „Aufgrund der diskreten Darstellung der Variablen auf einem numerischen Gitter hängen die Ergebnisse eines solchen Modells allerdings sehr stark von der gewählten Maschenweite und der Art und Weise der Beschreibung von nicht auflösbaren Strukturen und Prozessen (Parametrisierung) ab“ (Foken et al. (2023)).

Typische räumliche Auflösungen der **Mesoskalenmodelle** (Gitterweite) liegen im Bereich von 25 m bis 100 m (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2023)).

Mikroskalige, gebäude- und vegetationsauflösende Klimamodelle werden mit einer Auflösung ≤ 10 m betrieben. Dabei werden die Modellgebiete in der Regel kleiner, da nur eine gewisse Anzahl an Gitterzellen bei vertretbarem Aufwand berechnet werden können.

2.4 Größe des Simulationsgebiets und räumliche Auflösung

Das Modellgebiet umfasst das gesamte, mit dem Modell gerechnete, Gebiet. Dieses sollte zumindest das komplette Kaltlufteinzugsgebiet des Beurteilungsgebiets umfassen. Ansonsten können, z.B. wegen Unterschätzung des Zuflusses, Abweichungen bei den Strömungsverhältnissen auftreten.

Die Modellauflösung richtet sich nach der zu beurteilenden Planung. In der Flächennutzungsplanung (FNP) sind noch keine Gebäude festgelegt. Es ist deshalb nicht sinnvoll, diese Fragestellung hochaufgelöst zu behandeln, d.h. die Anwendung eines Mesoskalenmodells ist zielführend. Ist dagegen eine Bebauungsplanung zu beurteilen, sollte ein mikroskaliges Modell zum Einsatz kommen.

Insbesondere bei mikroskaliger, hochaufgelöster Modellierung kann häufig das komplette Kaltlufteinzugsgebiet des Beurteilungsgebiets nicht in derselben Auflösung berücksichtigt werden, da dies die Rechenkapazität sprengen würde. Deshalb wird auf die Methodik des Nesting* zurückgegriffen. Dabei wird je nach Umsetzungsart im Modell entweder ein Kerngebiet im Untersuchungsbereich feiner aufgelöst als die Umgebung, oder ein kleinräumiges Untersuchungsgebiet wird mit den Ergebnissen einer übergeordneten Modellierung angetrieben.

Für die Regionalplanung mit einem typischen Maßstab von 1:50.000 (z.B. Baden-Württemberg) bzw. 1:100.000 (z.B. Hessen) eignen sich mesoskalige Klimamodelle am besten (Gerhards et al.

(2013); VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 (2008), VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015)). Auch die lokalklimatischen Auswirkungen von geplanten FNP-Flächen werden mit Mesoskalenmodellen quantifiziert.

2.5 Eingangsdaten, Ansätze und Annahmen des Gutachters

Im Gutachten sollten die Eingangsdaten und modellspezifischen Ansätze (z.B. Modelltyp, Verwendung des RANS*- oder LES*-Verfahren) aufgeführt werden.

Orografie und Landnutzung (ggfs. auch die Gebäude und Vegetation) stellen wichtige Eingangsdaten dar. Die Aktualität und Auflösung der verwendeten Daten (Geländemodell, Landnutzung) sollte geprüft werden.

Die Startbedingungen sind auf Basis der betrachteten Wetterlage zu setzen. Hitzewellen entstehen meist bei länger andauernden sommerlichen Hochdruckwetterlagen und meist verbunden mit hoher Sonneneinstrahlung, geringen Bedeckungsgraden und geringen Windgeschwindigkeiten. Dies ist eine Wetterlage, bei der kaum großräumige Luftdruckunterschiede vorhanden sind. Da aus diesem Grund keine dominierende übergeordnete bzw. überregionale Strömung auftritt, können sich lokale thermische Strömungssysteme, wie z.B. nächtliche Kaltluftströmungen, im Untersuchungsgebiet besonders ausprägen. Deshalb ist hinsichtlich der Wärmebelastung eine autochthone Wetterlage zu betrachten, (z.B. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015); VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 - Entwurf (2024)).

Die Simulation für die landesweite Klimaanalyse wurde für einen typischen Hochsommertag durchgeführt, den 1. August. Die Sonne steht mittags um 12:00 Uhr (wahre Ortszeit* WOZ) im Zenit (Sonnenhöchststand), der Sonnenuntergang erfolgt an diesem Tag um 19:30 Uhr WOZ, der Sonnenaufgang am nächsten Tag um 4:30 Uhr WOZ.

Die meteorologischen Bedingungen für den Anfangszustand in der landesweiten Klimaanalyse sind:

- bodennahe Lufttemperatur um 15:00 Uhr im Mittel 29°C,
- relative Feuchte (20 %),
- kein übergeordneter Wind und
- wolkenlos.

Modellspezifische Daten, wie z.B. die Oberflächeneigenschaften ((spezifische) Wärmekapazität*, Albedo*, etc.) unterscheiden sich von Modell zu Modell. Eine Prüfung der Plausibilität solcher Daten gestaltet sich deshalb schwierig. Trotzdem sollten die Ansätze nachvollziehbar dargestellt sein.

2.6 Wahl des Modells

In Deutschland, aber auch weltweit, wurden in den letzten Jahren eine Vielzahl an verschiedenen hochwertigen Modellen entwickelt. Aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse schreitet diese Entwicklung weiter voran. Die Modelle können nach ihrer Komplexität und ihren physikalischen Eigenschaften unterschieden werden:

Dreidimensionale prognostische Modelle

Am oberen Ende in der Praxis eingesetzter numerischer Verfahren stehen dreidimensionale prognostische Modelle. Diese berechnen durch die Lösung der Erhaltungsgleichungen für Impuls (Bewegungsgleichung), für Masse (Kontinuitätsgleichung), für Feuchte und für die innere Energie (1. Hauptsatz der Thermodynamik) die Entwicklung der meteorologischen Größen (Temperatur, Feuchte, Strahlung, Wind) in Abhängigkeit vom Relief, der Landnutzung und der meteorologischen Ausgangssituation.

Dabei wird nochmals unterschieden in

1. Modelle, die dabei die atmosphärische Turbulenz vollständig parametrisieren (RANS-Modelle).
2. Modelle, die die atmosphärische Turbulenz größtenteils explizit auflösen (LES-Modelle). Dabei kann der Grad der naturgetreuen Modellierung ansteigen, für die Interpretation ist jedoch eine zeitliche Mittelung der Daten erforderlich.

Dreidimensionale prognostische Modelle werden unterteilt in Modelle, die die Einflüsse von Gebäuden und Vegetation nur indirekt über eine klassifizierte Landnutzung berücksichtigen (mesoskalig, Qualitätssicherung VDI-Richtlinie 3783, Blatt 7 (2017)). Um die Einflüsse von kleinräumigen Strukturen explizit zu berechnen sind mikroskalige Modelle einzusetzen (mikroskalig, Qualitätssicherung VDI-Richtlinie 3783, Blatt 9 (2017)).

1. Mesoskalige Modelle, bei denen nur Nutzungsstrukturen (Anteil von Bäumen, Grünflächen, Wasser und Versiegelungsgrad, mittlere Gebäudehöhe und Baumhöhe je Rasterzelle) Eingang finden, kommen zum Einsatz, wenn die vielfältigen Wechselwirkungen der Stadt mit ihrer Umgebung, wie Landnutzung und insbesondere der Orografie, von Bedeutung sind. Die Stadtstrukturen werden dabei nur in sehr vereinfachter Form (Rauigkeitslänge, Widerstandskonzept, Porositätsansatz) berücksichtigt. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und Strömung werden daher nicht explizit aufgelöst, aber in ihrer Klimawirkung abgebildet.
2. Bei den mikroskaligen Modellen können in der Regel sehr feinskalige Stadtstrukturen wie Gebäude, Bäume, Dachbegrünung explizit aufgelöst und deren Auswirkungen auf die verschiedenen meteorologischen Parameter wie Wind, Temperatur und Feuchte studiert werden.

Die Effekte auf die Volumenstromdichte sind bis in mindestens 3-fache mittlere Gebäudehöhe darzustellen (VDI-Richtlinie 3783, Blatt 10 (2015)). In der landesweiten Klimaanalyse wurde hier das Integral bis 65 m ü. Grund betrachtet.

Die Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden in der landesweiten Klimaanalyse bodennah (in der landesweiten Klimaanalyse ca. 5 m ü. Grund) und im Überdachniveau (in der landesweiten Klimaanalyse ca. 28 m über Grund) dargestellt. Die bodennahe Strömung kann durch Hindernisse so verformt sein, dass die Grundstruktur und die größeren räumlichen Zusammenhänge der Kaltluftabflüsse nicht mehr erfasst werden.

Die dreidimensionalen prognostischen Modelle werden vom Fachzentrum Klimawandel und Anpassung (HLNUG) (2024) als Methode „M3 Stadtklimamodellierung“ bezeichnet. Des Weiteren werde die Modelltypen in folgenden Publikationen behandelt: Gerhards et al. (2013) ab S. 23 ff., Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2023) auf S. 16 ff. oder das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2023) auf S. 5.

Dreidimensionale prognostische Modelle sind z.B.:

- FITNAH (RANS)
- MUKLIMO_3 (RANS)
- ENVI-met (RANS)
- PALM-4U (LES + RANS)
- METRAS PCL (RANS)
- MITRAS (RANS)
- MISKAM (RANS)

Flachwassermodelle

Einen anderen Modelltyp stellen Flachwassermodelle dar, welche die Erhaltungsgleichungen vertikal integriert (d.h. nicht in verschiedenen Höhenschichten, sondern gemittelt über die Kaltlufthöhe) lösen und auch als Kaltluftabflussmodelle bezeichnet werden.

Die Ergebnisse für die Strömung stellen deshalb vertikal über die Kaltluftmächtigkeit gemittelte Werte dar, während die dreidimensionalen Modelle die Ausweisung der Strömungsverhältnisse in verschiedenen Höhen ermöglichen. Außerdem sind Flachwassermodelle nur für die Untersuchung der Nachtstunden geeignet.

Da Flachwassermodelle reine Strömungsmodelle sind, berücksichtigen sie die Energiebilanz nur sehr pauschal. Die Abkühlungsrate hängt aber in der Natur von den atmosphärischen Zuständen und dem Boden ab. Die Modelle berechnen weder den Strahlungshaushalt, noch die Lufttemperatur und Luftfeuchte. Damit können auch keine Aussagen zur Human-Biometeorologie getroffen werden. Gebäude werden nur sehr rudimentär berücksichtigt, indem dort die Kaltluftproduktion ausgesetzt oder reduziert wird und die Kaltlufthöhe um die Gebäudehöhe verringert wird. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen Gebäuden und der Strömung werden nicht explizit aufgelöst, sondern nur stark vereinfacht in ihrer Klimawirkung abgebildet. Auch Wechselwirkungen zwischen verschiedenen meteorologischen Größen werden nicht berücksichtigt.

Vertikal integrierte Modelle berechnen standardmäßig die Kaltluftvolumenströme in der gesamten Kaltluftschicht. In Tälern oder in der zweiten Nachthälfte ist die simulierte Kaltluftschicht oft sehr mächtig (>50 m) und die über die gesamte Schicht berechneten Volumenströme überschätzen die planungsrelevante Belüftung, die überwiegend in Höhen bis zur dreifachen mittleren Gebäudehöhe stattfindet (VDI-Richtlinie 3783, Blatt 10 (2015)).

Vertikal integrierte Modelle können keine Vertikalkomponenten des Windes berechnen. Um die Massenerhaltung zu gewährleisten, kommt es zu nicht zwingend realitätsgetreuen, horizontalen Ausgleichsströmungen. Wechselwirkungen zwischen dynamischen Kanalisierungseffekten durch großräumige Druckgradienten und Kaltluftströmungen können in ihrer Gesamtheit nicht mit vertikal integrierten, sondern nur mit dreidimensionalen prognostischen Modellen wirklichkeitsnah abgebildet werden (z.B. alpines Pumpen (Graf et al. (2016); Lugauer & Winkler (2005)) oder Strömung im Rheintal (Hartwig et al. (2022)).

Treten in der nächtlichen Kaltluftschicht höhenabhängig unterschiedliche Windrichtungen auf, zum Beispiel durch einen bodennahen Hangabwind und einen darüber liegenden Talabwind, dann können Flachwassermodelle diese höhenabhängige Drehung der Kaltluftströmung nicht simulieren.

Flachwassermodelle werden durch das Fachzentrum Klimawandel und Anpassung (HLNUG) (2024) auf S. 14 ff als Methode „M2 Klimatope nach VDI“ beschrieben. Das Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2023) beschreibt die Kaltluftmodellierung mit Flachwassermodellen auf S. 12-15. Dazugehörige Modelle werden ebenso in Gerhards et al. (2013) S. 24 ff aufgeführt und beschrieben.

Aufgrund der Modellvereinfachungen ist für Simulationen mit Flachwassermodellen der Rechenaufwand deutlich geringer als bei dreidimensionalen prognostischen Modellen. Sie weisen allerdings aus den genannten Gründen auch eine geringere fachliche Wertigkeit auf. Für bestimmte planerische Fragestellungen zur nächtlichen Belüftung können Flachwassermodelle dennoch sinnvoll eingesetzt werden, wenn bei der Kaltluftsimulation und der Ergebnisinterpretation die Grenzen der Modellanwendbarkeit berücksichtigt werden. So können Flachwassermodelle bei gering mächtigen Hangabwinden zum Einsatz kommen, da sie hier vergleichbare Ergebnisse zeigen zu dreidimensionalen prognostischen Modellen. Aussagen zur bodennahen Lufttemperatur oder Wärmebelastung können mit Flachwassermodellen nicht getroffen werden.

Flachwassermodelle sind u.a.:

- KLAM_21
- DFM
- KALM

Einfache Modellansätze

Einfache Modellansätze werden unter Methode M1 durch das Fachzentrum Klimawandel und Anpassung (HLNUG) (2024) eingegliedert. Aussagen zu den thermischen Verhältnissen werden indirekt aus der Berechnung von stadtmorphologischen Parametern, wie z.B. Versiegelungsgrad, Schattenwurf, den Sky View Factor* (SVF) oder Gebäudedichten abgeleitet. Eine Einstufung der thermischen Belastung erfolgt z.B. anhand des Versiegelungsgrades und ggf. anderer stadtmorphologischer Parameter. Eine räumliche Darstellung der Lufttemperatur oder PET kann auch – oftmals in Zusammenhang mit Messfahrten oder einem kleinen städtischen Messnetz – über statistische Verfahren, Interpolationen oder künstliche Intelligenz auf Grundlage der berechneten stadtmorphologischen Parameter als Eingangsdaten erzeugt werden. Dabei wird jedoch die Wirkung von Kaltluftabflüssen oder die Auswirkungen von umgebenden Grünflächen auf die thermische Belastung nicht adäquat dargestellt.

Aufgrund des eher qualitativen Charakters ist eine physikalisch fundierte Beurteilung von Auswirkungen nicht möglich. Die Ergebnisse sind nicht vergleichbar mit der modellierten Lufttemperatur durch dreidimensionale prognostische Modelle.

2.7 Bewertung der Ergebnisse

Die Umsetzung eines Plangebiets kann einen erheblichen Eingriff in das Lokalklima eines Stadtteiles bis hin zur Gesamtstadt darstellen. Je nach Ausprägung des Eingriffs findet eine Veränderung der klimatischen Verhältnisse auf der Mikro- bzw. Mesoskala statt. Davon betroffen sind zunächst alle meteorologischen Parameter und die daraus abgeleitete human-biometeorologische Bewertung. Thermisch relevant ist insbesondere die Veränderung des Strahlungshaushaltes der Stadt, sowie die Modifizierung des lokalen Windfeldes durch die veränderte Rauigkeit. Erwärmung und Wärmespeicherung der Baukörper und versiegelten Flächen führen nachts zu einem Wärmeeintrag

in den Kaltluftstrom bzw. reduzieren die Kaltluftproduktion. Durch die erhöhte Rauigkeit reduziert sich die Windgeschwindigkeit und damit auch die Volumenstromdichte. In der Regel verringert ein Eingriff das Belüftungspotenzial eines Kaltluftstroms aufgrund der geplanten Bebauung und der damit einhergehenden Erhöhung der Oberflächenrauigkeit.

Sofern in den Regionalplänen ein Vorranggebiet Siedlung, Planung bzw. Vorranggebiet Industrie und Gewerbe, Planung mit einem **Vorbehaltsgebiet für besondere Klimafunktionen** überlagert ist, hat bereits eine Abwägung zugunsten der Siedlungsentwicklung stattgefunden. Die lokale Klimaanalyse dient hier insbesondere als Grundlage für die konkreten Festsetzungen in Bebauungsplänen.

Ist in einem **Vorranggebiet für besondere Klimafunktionen** eine entgegenstehende Nutzung geplant, dient die lokale Klimaanalyse im Rahmen des erforderlichen Zielabweichungsverfahrens, der Beurteilung der Erheblichkeit der Eingriffe.

Um die **Erheblichkeit eines Eingriffs** zu bewerten, sind die Veränderungen der Volumenstromdichte sowie der Kaltluftströmungsgeschwindigkeit zwischen Ist-Zustand und Planfall zu bestimmen. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003) beschäftigt sich mit der Bewertung der Erheblichkeit eines Eingriffs. Diese derzeit noch gültige Richtlinie befindet sich in der Überarbeitung, wobei der Gründruck bereits 2024 erschienen ist. In den folgenden Absätzen wird die Bewertung der derzeitig gültigen Richtlinie aus dem Jahr 2003 (siehe Tabelle 2-1) und des Gründrucks aus dem Jahr 2024 (siehe Tabelle 2-2, Tabelle 2-3) dargestellt.

In der derzeit noch gültigen Richtlinie steht, dass „eine Verringerung der Abflussvolumina oder der Abflussgeschwindigkeiten von mehr als 10 % [..] [im Vergleich zum Ist-Zustand] bereits ein starker Eingriff mit weitreichenden – meist negativ zu bewertenden – Auswirkungen“ darstellt. „Ist der Eingriff als relevant anzusehen, so sind geeignete Maßnahmen zur Erhaltung der bisherigen Situation anzustreben.“

Tabelle 2-1: Beurteilung der planerischen Auswirkungen von Kaltluftflüssen (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003)).

Prozentuale Änderung gegenüber dem Ist-Zustand	**≤ 5 %**	**≤ 10 %**	**> 10 %**
Auswirkungen	gering	mäßig	hoch

Veränderung der Häufigkeit des Auftretens (in Jahresstunden)			
Prozentuale Änderung gegenüber dem Ist-Zustand	**≤ 5 %**	**≤ 10 %**	**> 10 %**
Auswirkungen	gering	mäßig	hoch

Die Schwäche der bestehenden VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003) besteht darin, dass nicht festgelegt wurde, in welchen Höhen (über Grund) und Zeiträumen die Kaltluftströmung zu bewerten ist, zudem fehlt die Definition der zu bewertenden Abflussvolumina. Wird die Änderung der Volumenstromdichte bewertet, so sollte diese in einer Höhe vom Boden bis zur dreifachen mittleren

Gebäudehöhe (VDI-Richtlinie 3783, Blatt 10 (2015)) berechnet werden. Die Bewertung der Windgeschwindigkeit einer Kaltluftströmung kann in Analogie zur landesweiten Klimaanalyse in zwei Höhen erfolgen: bodennah und im Überdachniveau.

In der VDI 3787 Blatt 5 (2024) wird empfohlen, die Bewertung in den ersten Stunden nach Sonnenuntergang und eine Berechnung zum Zeitpunkt des maximalen Kaltluftstroms zum Ende der Nacht durchzuführen. Zu diskutieren sind dabei die Auswirkungen des Eingriffs auf den Bestand, sowie auch die zu erwartenden Einflüsse auf das Plangebiet selbst.

Für die Bewertung der Veränderung der thermischen Verhältnisse durch die geplante Bebauung existieren bislang keine Richtlinien.

Die Wirkung einer Kaltluftströmung kann durch das Kaltluftbelüftungspotenzial erfolgen (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 - Entwurf (2024)), das über die Volumenstromdichte (Tabelle 2-2) und die Kaltluftströmungsgeschwindigkeit (Tabelle 2-3, für Siedlungsränder in Hanglagen) bewertet werden kann.

Im Allgemeinen muss die Wirkung der Kaltluft über die Volumenstromdichte und ihre Durchlüftungsfunktion in bewohnten Siedlungsgebieten abhängig von der thermischen Belastung, der Bevölkerungsdichte und unter Berücksichtigung von klimasensiblen Nutzungen (z.B. Krankenhäuser oder Pflegeheime) im Wirkraum bewertet werden. In der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 - Entwurf (2024) wird jedoch die Bewertung des Kaltluftbelüftungspotenzials rein über die Volumenstromdichte vorgenommen (Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Bewertung des Kaltluftbelüftungspotenzials in Abhängigkeit der Volumenstromdichte (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 - Entwurf (2024)).

Volumenstromdichte ($m^3/(s \cdot m)$)	Kaltluftbelüftungspotenzial
≥ 50	extrem gut
≥ 25	sehr gut
≥ 15	gut
≥ 7,5	mäßig
< 7,5	gering

Für Siedlungsränder in Hanglagen, die nicht innerhalb gesammelter Kaltluftströmungen liegen, können Hangabwinde Belüftungswirkungen aufweisen. Aufgrund der geringen Kaltluftmächtigkeit sind diese überwiegend mit geringen Volumenstromdichten verbunden. Für Siedlungsränder in Hanglagen wird ergänzend als quantitative Größe die bodennahe Kaltluftströmungsgeschwindigkeit (5 m über Grund) herangezogen (Tabelle 2-3).

Tabelle 2-3: Bewertung des bodennahen Kaltluftbelüftungspotenzials in Abhängigkeit der Kaltluftströmungsgeschwindigkeit (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 - Entwurf (2024)).

Kaltluftströmungsgeschwindigkeit (m/s)	Kaltluftbelüftungspotenzial
≥ 2,0	sehr intensiv
≥ 1,5	sehr gut
≥ 1,0	gut
≥ 0,5	mäßig
< 0,5	gering

„**Die Auswirkungen einer Maßnahme oder eines Eingriffs ist als wesentlich zu bewerten“, […] wenn** „sich die Einordnung der Vergleichsgröße so stark ändert, dass „beispielsweise ein Sprung in die übernächste Klasse nach unten oder oben stattfindet“ (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 - Entwurf (2024)). „Intensive Änderungen liegen vor, wenn sie im Mittel zu einer Änderung der Bewertungseinstufung führen; das entspricht einer Reduktion um mindestens 30 % bzw. einer Zunahme um mindestens 40 %“ (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 - Entwurf (2024)).

Befindet sich die Planung in einem Gebiet mit einem geringen bis mäßigen Belüftungspotenzial, so ist ein weiterer Eingriff als ungünstig zu bewerten; diesbezüglich sind höchstens unwesentliche Einschränkungen tolerabel, die mit Reduktionen der Volumenstromdichte bzw. der Kaltluftströmungsgeschwindigkeit um höchstens 5 % aufzufassen sind. Relative Änderungen bis 5 % sind als geringe bzw. unwesentliche Änderungen aufzufassen. Im Detail sind die Kriterien in der VDI-RL 3787 Blatt 5 (2024) dargestellt. Dabei ist zu bedenken, dass zwar Schwellen definiert wurden, nicht aber die Methodik der Bestimmung festgelegt wurde.

Wird der Siedlungsbereich von einer vertikal mächtigen Strömung erreicht, so spielt für die bodennahe Belüftung die Strömungsgeschwindigkeit im Überdachniveau die entscheidende Rolle. Sie bewirkt durch das Heruntermischen aus dem Überdachniveau eine bodennahe Durchlüftung. Diese hängt von der Bebauungsdichte (vgl. Abbildung 2-1) und der Intensität der Strömung im Überdachniveau ab. In Straßenschluchten kann es zu Wirbelbildungen oder Kanalisierungseffekten kommen (wird nach Freigabe des Weißdruckes der VDI 3787 Blatt 5 konkretisiert).

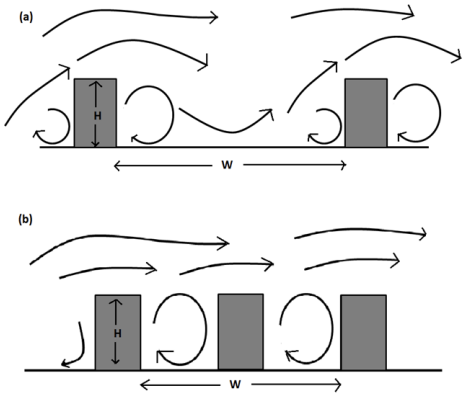

Abbildung 2-1: Herabmischung der Strömung im Überdachniveau in das Bodenniveau einer Siedlung (idealtypisch, Oke, 1988).

Die Ergebnisse sind grafisch aufzubereiten (z.B. Volumenstromdichte, hochaufgelöste Darstellung der Strömungspfeile in Bodennähe und im Überdachniveau, Lufttemperatur und Human-Biometeorologie). Auch die Darstellung der Differenzen Planfall-Nullfall ist erforderlich. Zudem ist darzulegen, wie die Bewertung erfolgte.

3 Kriterienkatalog/Checkliste

Die wesentlichen Prüfpunkte sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Es sollte sichergestellt werden, dass die Methodik und die Ergebnisse beschrieben und nachvollziehbar sind. Nicht alle Punkte sind ohne einen gewissen Grad an Fachwissen überprüfbar. In solchen Fällen wäre auf externe Hilfe zurückzugreifen.

Tabelle 3-1: Zusammenstellung der wesentlichen Prüfpunkte:

Aufgabenstellung ○ Ziel des Klimagutachtens erläutert? Zielgrößen der Untersuchung umfasst thermisch induzierte Windsysteme (Kaltluft, Flurwind)? ○ Beurteilungsgrundlagen dargestellt (z.B. VDI-Richtlinien)?	
Örtliche Verhältnisse ○ Ortsbesichtigung durchgeführt und dokumentiert? ○ Geländestruktur und Kaltlufteinzugsgebiet (vgl. Kap. 2.2) analysiert und beschrieben? ○ Beschreibung der verwendeten Geodaten vorhanden? Entspricht deren Auflösung mindestens der Modellauflösung? ○ Aktualität der Daten überprüfen: Sind z.B. alle Konversionen/Neubaugebiete abgebildet? ○ Werden örtliche Messdaten (insb. Windmessungen) des DWDs/der HLNUG ausgewertet und für die Evaluierung der Modellsimulationen herangezogen?	
Welche Eingangsdaten wurden verwendet? ○ Vorhabenbeschreibung dargelegt? ○ Wurde gebäude- und vegetationsauflösend gemäß dem Detailierungsgrad der Planung gerechnet? ○ Wenn Plangebiet Industrie- und Gewerbegebiet mit großem Energiebedarf ist (z.B. Keramikfabrik, Rechenzentren): Wurde die Abwärme ausreichend berücksichtigt? Wo und wie wird die Abwärme im Modell freigesetzt? ○ Wurde die Grünplanung im Plangebiet, sofern vorhanden, berücksichtigt?	
Wie wird modelliert? ○ Wurde die angewandte Methodik nachvollziehbar beschrieben? ○ Wurde das gewählte Modell beschrieben? ○ Wurde ein dreidimensionales prognostisches Modell verwendet (z.B. FITNAH, MUKLIMO_3, ENVI-met, PALM-4U))? ○ Grenzen des Modells bzgl. Zielsetzung benannt?	wenn nicht, dann ist die Beurteilung in Frage zu stellen. wenn nicht, dann sind die Ergebnisse nicht vergleichbar mit der landesweiten Klimaanalyse.
Modellierung ○ Ist die Rechengitterweite der untersuchten Planung angemessen: bei Untersuchung einer FNP-Fläche typischerweise ≥ 25 m? bei städtebaulichem Entwurf oder Bebauungsplan ≤ 10 m (Auflösung von Hindernissen)?	Mesoskaliges Modell Mikroskaliges Modell

○ Ist die Rechengitterweite dem Modelltyp angepasst (Meso- oder Mikroskalenmodell)? ○ Umfasst das Simulationsgebiet alle für die Beurteilung relevanten Kaltlufteinzugsgebiete? ○ Wurde ein Nesting angewandt? (siehe Kap. 2.4)	
Ergebnisse und Bewertung der Ergebnisse nachvollziehbar? ○ Auswertung bodennah (Wind in ca. 5 m ü. Grund) und im Überdachniveau (28 m ü. Grund). Volumenstromdichte bis in 3-fache mittlere Gebäudehöhe (VDI-Richtlinie 3783, Blatt 10 (2015), in der landesweiten Klimaanalyse bis 65 m ü. Grund). Auswertung der Lufttemperatur in 2 m ü. Grund und der humanbioklimatischen Bedingungen (z.B. Physiologisch Äquivalenten Temperatur, „gefühlte Temperatur“ oder UTCI in 1,1 m ü. Grund). ○ Wurden die Ergebnisse für den in der VDI 3787 Blatt 5 vorgegebenen Zeitpunkt (Abendstunden und die 2. Nachthälfte) analysiert? ○ Wenn ein Nesting angewandt worden ist, sollten Abbildungen zur Kaltluftströmung (Darstellung der Volumenstromdichte, Windgeschwindigkeit und -richtung) in dem das Nestinggebiet umfassenden großen (mesoskaligen) Modellgebiet im Gutachten vorhanden sein. ○ Wurden regionale Windsysteme (z.B. Wetterauwind, Wind im Rheintal) abgebildet? ○ Wurden die Ergebnisse grafisch aufbereitet und gibt es Darstellungen der Differenzen Planfall-Nullfall? ○ Zu welchem Zeitpunkt ist die Bewertung erfolgt und über welche Höhe wurde der Volumenstrom berechnet (integrale Maße, wo und wie bestimmt)? ○ Wurden die Modellergebnisse mit repräsentativen lokalen Messungen verglichen und die Ergebnisse diskutiert? (Findet die Messung in der Bebauung statt (da sie Teil eines lufthygienischen Messnetzes ist), ist die Windmessung nicht zwingend repräsentativ und für eine Modellvalidierung heranzuziehen).	

Daneben spielt sicher auch die Qualifikation des Gutachters eine Rolle. In erster Linie können Ausbildung, Berufserfahrung und Mitarbeit in entsprechenden Gremien (z.B. des VDI) herangezogen werden.

4 Glossar

Albedo	Rückstrahlvermögen diffus reflektierender Oberflächen, angegeben als Verhältnis von reflektierter zu einfallender kurzwelliger Strahlung.
Ausgleichsraum/-flächen	Landschaftsraum mit möglichst intakten Umweltbedingungen, der gegenüber Gebieten mit beeinträchtigten Umweltbedingungen eine Ausgleichsfunktion wahrnehmen soll (z.B. Erholung, Klimaausgleich, Biotop- und Artenschutz). Im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse werden als Ausgleichsräume die regional bedeutsamen Luftleitbahnen sowie die für das Siedlungsklima bedeutsamen Flächen des Freiraums betrachtet.
autochthone Wetterlagen	Autochthone Wetterlagen sind bewölkungsarme, großräumig windschwache Wetterlagen, fast immer unter Hochdruckeinfluss. Sie werden auch „Strahlungswetterlagen“ genannt, weil die nächtliche langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche wegen der fehlenden Bewölkung nahezu ungehindert ins Weltall abgestrahlt wird. Die Wetterlage erlaubt die Ausbildung des →Mikro- und →Mesoklimas, sie erlaubt die markanteste Ausprägung lokaler und regionaler thermischer Windsysteme. In den Nachtstunden entwickelt sich oft eine Bodeninversion, eine stabile Schichtung mit gehemmter Durchmischung, weshalb sie auch als „austauscharme Wetterlage“ bezeichnet wird.
Frischluft	Weist eine (zugeführte) Luftmasse eine deutlich geringere Belastung mit Luftschadstoffen auf als eine vorhandene Luftmasse oder als die umgebende Luftmasse, so wird diese gering belastetere Luft häufig als „Frischluft“ bezeichnet.
Heißer Tag	Ein Tag wird in den amtlichen Statistiken als „heißer Tag“ registriert, wenn die Tageshöchsttemperatur 30,0 °C erreicht oder überschreitet.
Human-Biometeorologie	Die Human-Biometeorologie ist ein Teilgebiet der Meteorologie, das sich mit der Wirkung des Klimas, der Luftschadstoffe und der Strahlung auf den Menschen beschäftigt.
Kaltluft	Unter lokaler Kaltluft versteht man bodennahe Luft, die kälter als die Luft in ihrer Umgebung ist. Kaltluft wird entweder vor Ort auf Grund des Energieumsatzes an der Erdoberfläche gebildet oder durch kleinräumige Zirkulation transportiert. Kaltluftentstehung und -abfluss hängen von den meteorologischen Verhältnissen, der Flächennutzung sowie von der Geländeform und -exposition ab (Meyers Kl. Lexikon, Lex. D. Geogr.).
Kaltluftabfluss	Unter Kaltluftabfluss versteht man den orographisch bedingten nächtlichen Abfluss von örtlich gebildeter Kaltluft, dabei wird genügend Gefälle vorausgesetzt. Dies trifft insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen zu.
Kaltlufteinzugsgebiet	Das Kaltlufteinzugsgebiet umfasst nur diejenigen Kaltluftproduktionsgebiete, in denen Kaltluft gebildet wird, die für einen bestimmten Standort oder eine Siedlung (Wirkraum) von Bedeutung sind. (VDI 3787 Blatt 5: 2024)
Kaltluftentstehung/ Kaltluftbildung (Kaltluftproduktion)	Bei windschwachen Strahlungswetterlagen infolge nächtlicher Ausstrahlung örtlich entstehende Kaltluft. Die durch Ausstrahlung abkühlende Erdoberfläche kühlt ihrerseits die darüber liegende bodennahe Luftschicht ab. Es bildet sich bodennahe Kaltluft. Die Kaltluftbildung ist abhängig von den physikalischen (z.B. Wärmeleitung) und topographischen (z.B. Bewuchs, Bebauung, Geländeform) Eigenschaften der Erdoberfläche.
Kaltluftproduktionsrate Kaltluftproduktionspotential	Bei wolkenarmen und windschwachen Wetterlagen führt die nächtliche Ausstrahlung der Erdoberfläche zur → Kaltluftbildung. Die Angabe der

	Stärke der Kaltluftbildung (Kaltluftproduktions*rate*) erfolgt als über das pro Sekunde abgekühlte Luftvolumen pro Grundfläche (m^3/s). Alternativ verwenden Kaltluftabflussmodelle auch ein Kälteproduktions-*potential* (Energieflussdichte) an der Oberfläche in Kilowattstunde pro Quadratmeter (kWh/m^3).
LES	Large Eddy Simulation (LES) ist ein Verfahren zur numerischen Berechnung von turbulenten Strömungen.
Luftleitbahn	Parallel zur Windrichtung ausgerichtete Fläche von geringer → Rauigkeit, d.h. frei von flächenhafter Bebauung und hoher, dichter Vegetation (z.B. Wälder).
Mesoklima	Das Mesoklima (z.B. Stadt-, Gelände- und Regionalklima) erstreckt sich subregional bis lokal innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht und schließt Städte, Berge und Täler ein. Es wird von Relief, Klima, Oberflächenbedeckung und menschlichen Aktivitäten geprägt (Weischert & Endlicher 2008).
Mikroklima	Atmosphärische Prozesse der bodennahen Luftschicht mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern. Der atmosphärische Zustand in diesem Bereich wird von den Eigenschaften der Oberfläche maßgebend geprägt, ist aber dennoch in das Großklima eingebettet. Die mikroklimatischen Phänomene sind bei autochthonen Wetterlagen am stärksten ausgeprägt.
Nesting	Nesting ist die Möglichkeit, einen hoch aufgelösten Kernbereich auszuwählen und diesen in einen gröber aufgelösten Einflussbereich mit den regionalen Ausgleichsströmungen einzubetten
Rauigkeit	Charakterisierung der durchschnittlichen Unebenheit der Erdoberfläche, die die Reibung der Luftströmung am Boden beeinflusst. Maß der Rauigkeit, die Rauigkeitslänge ist der z_0-Wert, der in Meter angegeben wird.
Rechengitter	Bei den numerischen Simulationen wird das Rechengebiet mit einem Gitternetz überzogen, an dessen Knotenpunkten die meteorologischen Variablen mit dem zugrundeliegenden Gleichungssystem berechnet werden.
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes Gleichungen (RANS) werden zur Annäherung (Approximation) turbulenter Strömungen verwendet.
Sky View Factor (SVF)	Der Sky View Factor (Horizontüberhöhung) beschreibt die von einem Punkt aus sichtbaren Bereiche des Himmels. Er wird mathematisch als dimensionsloser Parameter zwischen 0 und 1 angegeben. Eine Ebene erhält den Wert 1, wenn die komplette obere Himmelshälfte (Hemisphäre) sichtbar ist. In engen Tälern oder zwischen Gebäuden ist dagegen nur ein Teil des Himmels sichtbar, der Faktor ist somit deutlich kleiner als 1.
Stadtklima	Unter Stadtklima versteht man das gegenüber dem Umland durch die Bebauung und anthropogene Emissionen (wie z.B. Luftschadstoffe oder Abwärme) modifizierte Klima von Städten und Ballungsräumen. Während windschwacher Hochdruckwetterlagen reichert sich über der Stadt die Luftschadstoffkonzentration an. Das Stadtklima ist insbesondere durch die Eigenschaften von Baustoffen bezüglich Wärmespeicherung und Reflexion von Sonnenstrahlung, durch die starke Versiegelung des Bodens und durch das Fehlen von Vegetation gekennzeichnet. Am Nachmittag bildet sich deshalb eine urbane Wärmeinsel aus, welche nachts im Vergleich zur Umgebung am ausgeprägtesten ist. Im Sommer kann die Wärmeinsel zu einer erhöhten Wärmebelastung gegenüber dem Umland beitragen und die nächtliche Regeneration der Stadtbevölkerung beeinträchtigen. Die Windgeschwindigkeit wird durch die hohe Hinderniswirkung der Bebauung gegenüber dem Umland im Mittel reduziert, die Turbulenz jedoch

	erhöht. Aufgrund der vielfältigen Landnutzungen und Bebauungsstrukturen weist das kleinräumige Klima innerhalb der Stadt allerdings eine hohe räumliche Variabilität auf. Durch die tagsüber stärkere Konvektion über der Stadt kann es lokal zu stärkeren konvektiven Niederschlagsereignissen kommen.
Strahlungshaushalt	Strahlungshaushalt beschreibt die abwärts und aufwärts gerichteten Strahlungsflüsse in der Atmosphäre und deren Änderungen durch Reflexion, Streuung, Absorption und Emission.
Tropennächte	Eine Tropennacht ist eine Nacht in der das Minimum der Lufttemperatur ≥ 20 °C beträgt (täglicher Messzeitraum: 18 UTC bis 06 UTC). UTC: Coordinated Universal Time, Koordinierte Zeitzone (Weltzeit)
urbane Wärmeinsel	Siedlungsraum, der vor allem abends und nachts während → autochthoner Wetterlagen eine höhere Lufttemperatur aufweist als die ländliche Umgebung.
Volumenstromdichte	Die Kaltluft-Volumenstromdichte, die das Produkt aus Geschwindigkeit und Schichtdicke ist, ist ein Maß für die Menge an abfließender Kaltluft. Sie wird angegeben in Kubikmeter pro Sekunde und Querschnitt der Breite 1 Meter über die gesamte betrachtete Luftschichtmächtigkeit. In der vorliegenden Untersuchung wurde sie ausgegeben für: ▪ bodennahe Verhältnisse (math. Integral vom Boden bis in 5 m über Grund), ▪ vom Boden bis ins Überdachniveau (math. Integral vom Boden bis in 28 m über Grund) und ▪ als „Gesamtvolumenstrom“ (math. Integral vom Boden bis in 65 m Höhe über Grund – dieser Bereich soll die für die Bevölkerung und die Bebauung einflussreiche belüftungswirksame bodennahe Schicht erfassen).
Vorbehaltsgebiet	In Vorbehaltsgebieten ist bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen bei nachfolgenden Abwägungen mit konkurrierenden raumbedeutsamen Nutzungen ein besonderes Gewicht beizumessen. Es handelt sich bei Vorbehaltsgebieten um Grundsätze der Raumordnung. Solche Grundsätze sind gemäß § 4 ROG zu berücksichtigen, d.h. ihre inhaltliche Ausrichtung ist bei weiteren, auf der Ebene der Raumordnung noch nicht abschließend vollzogenen Abwägungen mit anderen örtlichen oder sektoralen Belangen zu berücksichtigen.
Vorranggebiet	Vorranggebiete geben bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen Priorität und schließen andere raumbedeutsame Nutzungen in diesem Gebiet aus, soweit Letztere mit den vorrangigen Funktionen, Nutzungen oder Zielen der Raumordnung nicht vereinbar sind. Es handelt sich dabei um Ziele der Raumordnung. Ziele der Raumordnung sind gemäß § 4 ROG zu beachten. Dies bedeutet, dass sie bereits letztverbindlich abgewogen sind. Sie können deshalb in Bauleitplänen und in Fachplanungen nicht erneut abgewogen (respektive: „weggewogen“) werden, sondern nur noch in dem jeweiligen Planungsmaßstab entsprechend konkretisiert werden.
Vulnerabilität	Vulnerabilität beschreibt, wie empfindlich das jeweilige Objekt auf innere und äußere Störereignisse reagiert. Dies schließt die Wahrscheinlichkeit für mögliche Schäden ein (Turner et al. 2003), aber auch die Fähigkeit, wie das System mit den Einflüssen umgeht, um die Systemdienstleistungen weiterhin aufrechterhalten zu können (Birkmann et al. 2013). In Bezug auf den Klimawandel, kann die Vulnerabilität als ein Maß dafür verstanden werden, inwieweit ein System anfällig für die Auswirkungen von Klimaextremen, -schwankungen und -veränderungen ist bzw. nicht fähig ist, diese zu bewältigen (Parry et al. 2007). Gemäß dieser Definition setzt sich die Vulnerabilität aus den Teilen Exposition (z.B. veränderte

	Niederschlags- oder Temperaturbedingungen), Sensitivität (Empfindlichkeit) und Anpassungskapazität zusammen.
Wahre Ortszeit	Die wahre Ortszeit beschreibt die Sonnenzeit bezogen auf einen bestimmten Ort, hier: im Berechnungsgebiet. Charakteristisch für die wahre Ortszeit ist, dass zum Mittagstermin – 12:00 Uhr – der Sonnenhöchststand eintritt (Durchgang der Sonnenmitte durch den lokalen Meridian).
Wärmebelastung (des Menschen)	Um weder zu stark auszukühlen noch aufzuheizen, müssen sich Wärmegewinn und Wärmeabgabe des Menschen die Waage halten. Dazu besitzt der Organismus eine Reihe unwillkürlich ablaufender Regulationsmechanismen. Die gesundheitliche Bedeutung hängt insbesondere mit der engen Vernetzung von Thermo- und Kreislaufregulation zusammen. Ist die Wärmeabgabe behindert – was hauptsächlich bei sommerlichen, gering bewölkten Wetterlagen mit hohen Temperaturen, hoher Luftfeuchte und schwachem Wind der Fall ist – droht Überhitzung und die Thermoregulation muss verstärkt wirksam werden. Die Umgebung wird dann als belastend empfunden, man spricht von Wärmebelastung.
Spezifische Wärmekapazität	Die spezifische Wärmekapazität gibt das Vermögen eines Stoffes an, Wärme zu speichern. Diese Stoffgröße entspricht der Wärmemenge, die benötigt wird, eine bestimmte Menge einer Substanz um ein Kelvin zu erwärmen.
Wassereinzugsgebiet	Hier gemeint ist der oberirdische Wassereinzugsbereich, der definiert ist als der Bereich, aus dem einem Gewässer Wasser zugeführt wird. Dieser ist näherungsweise oft deckungsgleich mit dem Kaltlufteinzugsgebiet einer Raumschaft.
Windfeld	Als „Windfeld“ wird ein für einen bestimmten Zeitraum gültiger Datensatz im dreidimensionalen Rechengitter bezeichnet, der Informationen zu Windrichtung und Windgeschwindigkeiten enthält. Das Windfeld wird auch als „Strömungsfeld“ bezeichnet.
Wirkraum	Besiedelter Raum, in den die Kaltluft oder Frischluft eindringt. Er kann thermisch und/oder lufthygienisch belastet sein. Im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse werden als Wirkräume die regionalplanerisch relevanten thermisch belasteten Siedlungsgebiete betrachtet.

5 Literatur

39. BImSchV (2020): Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065), die zuletzt durch Artikel 112 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2023): Grundlagen für die klimaangepasste Stadtplanung schaffen. Methoden und Werkzeuge der Klimaanalyse im besiedelten Raum.

Calvin, K., D. Dasgupta, G. Krinner, A. Mukherji, P.W. Thorne, C. Péan, et al. (2023): IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Fachzentrum Klimawandel und Anpassung (HLNUG) (2024): Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse.

Foken, T., E. Parlow, G. Gross & B. Leitl (2023): Untersuchungsmethoden zum Stadtklima. promet (106): 97–114.

Gerhards, I., S. Philippi, N. Scheck, S. Singer-Posern & M. Voll (2013): Modellgestützte Klimaanalysen und –bewertungen für die Regionalplanung. Modellvorhaben der Raumordnung „Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel“ (klamis).

Graf, M., M. Kossmann, K. Trusilova & G. Mühlbacher (2016): Identification and Climatology of Alpine Pumping from a Regional Climate Simulation. Frontiers in Earth Science (4).

Hartwig, C., Y. Wieczorrek, S. Birkenstock, M. Langen, S. Ginzel & M. Koßmann (2022): Lokale und regionale Windsysteme in der Kölner Bucht sowie der kanalisierende Effekt des Rheintals. Immissionsschutz 1: 3.

Lugauer, M. & P. Winkler (2005): Thermal circulation in South Bavaria climatology and synoptic aspects. Meteorologische Zeitschrift (14)1: 15–30.

Matzarakis, A., S. Muthers & K. Graw (2020): Thermische Belastung von Bewohnern in Städten bei Hitzewellen am Beispiel von Freiburg (Breisgau). Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz (63)8: 1004–1012.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2023): Anforderungen für die Erstellung von kommunalen Klimaanalysen im Fördermodul B von KLIMOPASS.

Perkins-Kirkpatrick, S.E. & S.C. Lewis (2020): Increasing trends in regional heatwaves. Nature Communications (11)1: 3357.

Revi, A., D.E. Satterthwaite, F. Aragón-Durand, J. Corfee-Morlot, R.B.R. Kiunsi, M. Pelling, D.C. Roberts & W. Solecki (2014): Urban areas. In: C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (Eds), Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S. 535–612.

Santamouris, M. (2020): Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. Energy and Buildings (207): 109482.

TA Luft (2021): Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021.

VDI (2024): Modellbasierte Bestimmung hitzegefährdeter Siedlungsräume - VDI-Handlungsempfehlung.

VDI-Richtlinie 3783, Blatt 7 (2017): Umweltmeteorologie - Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder. VDI-Richtlinie 3783, Blatt 7:2017-05.

VDI-Richtlinie 3783, Blatt 9 (2017): Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisströmung. VDI-Richtlinie 3783, Blatt 9:2017-05.

VDI-Richtlinie 3783, Blatt 10 (2015): Umweltmeteorologie - Diagnostische mikroskalige Windfeldmodelle - Gebäude- und Hindernisumströmung. VDI-Richtlinie 3783, Blatt 10:2015-03.

VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 (2008): Umweltmeteorologie - Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima. VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1:2008-12.

VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (2015): Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1:2015-09.

VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 (2003): Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5:2003-12.

VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 - Entwurf (2024): Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5 - Entwurf:2024-03.

Anhang 1: Allgemeine Grundlagen zu den Unterschieden der Modelle

Lokale Kaltluft bildet sich durch Abkühlung der Oberflächen und den darüber liegenden Luftschichten in den Abend- und Nachtstunden. In geneigtem Gelände setzt sich die Kaltluft infolge der Dichteunterschiede hangabwärts/talwärts in Bewegung. Anders als bei Strömungen, die durch großräumige horizontale Druckunterschiede zustande kommen, bildet sich ein typisches Kaltluftströmungsprofil aus. Bodennah wird die Strömung durch Reibungseinflüsse reduziert. In der Höhe fehlt der Antrieb, so dass mit zunehmender Höhe die Strömungsgeschwindigkeiten ebenfalls zurückgehen.

In Hanglagen liegt das Geschwindigkeitsmaximum etwa in einem Drittel der Kaltlufthöhe. Geht der Antrieb zurück, z.B. weil die Kaltluft in flacheres Gelände strömt, geht durch Reibung die bodennahe Strömungsgeschwindigkeit zurück – das Maximum verlagert sich in größere Höhe (siehe skizzierte blaue Profile in Abbildung A1 – 1).

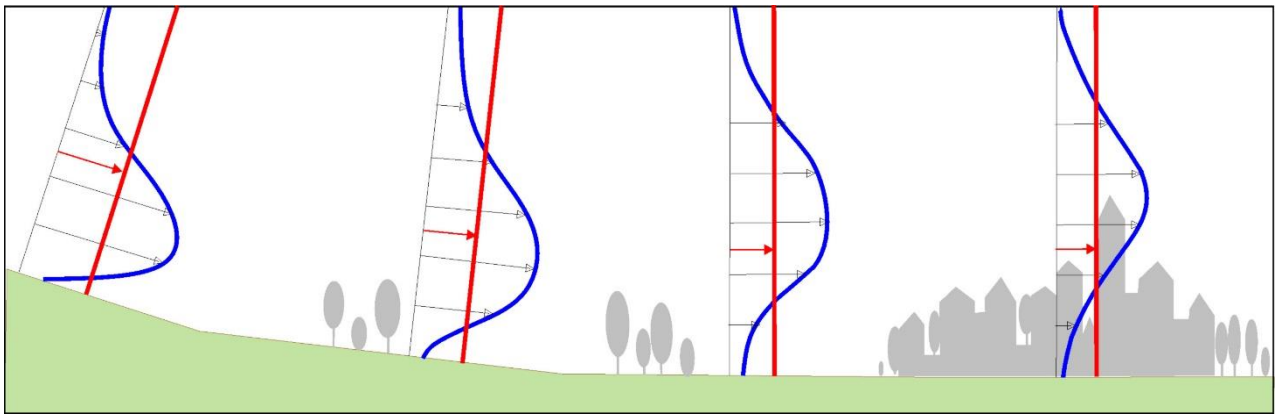

Abbildung A1 – 1: Entwicklung der Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit aus den Hangbereichen in die Ebene hinein unter dem Einfluss der Reibung. Blau – Profile der Strömungsgeschwindigkeit, rot – vertikal integrierte (gemittelte) Strömungsgeschwindigkeit.

Dreidimensionale Modelle können die Vertikalstruktur auflösen. Vertikal integrierte Modelle kennen dagegen nur eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit (rote senkrechte Linien) für die Schicht vom Boden bis zur Kaltlufthöhe. Dadurch wird die maximale Geschwindigkeit unterschätzt, die bodennahe Geschwindigkeit dagegen überschätzt. Für die Belüftung von Siedlungsbereichen sind die Strömungsverhältnisse bis in etwa der dreifachen mittleren Gebäudehöhe maßgebend. Eine direkte Vergleichbarkeit, z.B. der Betrag der Abnahme der Strömung im Siedlungsbereich, ist nicht gegeben, was eine Bewertung der Relevanz von Eingriffen mit einheitlichen Maßstäben verhindert.

Auch bei der Ausweisung von Volumenströmen ergeben sich Problematiken. In Abbildung A1- 2 ist ein Querschnitt durch ein Tal (hellbraun) und die Kaltluft (hellblau) dargestellt. Während der Gesamtvolumenstrom über die Kaltluft (Maß für die Intensität eines Kaltluftstroms) identisch sein kann, ergeben sich bei bodennahen Volumenströmen, die ja für die Belüftung von Siedlungsräumen relevant sind, Unterschiede. Diese sind bei geringen Kaltluftmächtigkeiten (kleiner als dreifache mittlere Gebäudehöhe) unerheblich, bei großen Kaltluftmächtigkeiten aber signifikant.

Eine Bewertung der Erheblichkeit von Eingriffen mit einheitlichen Maßstäben – z.B. einer prozentualen Abnahme – ist insofern als problematisch anzusehen.

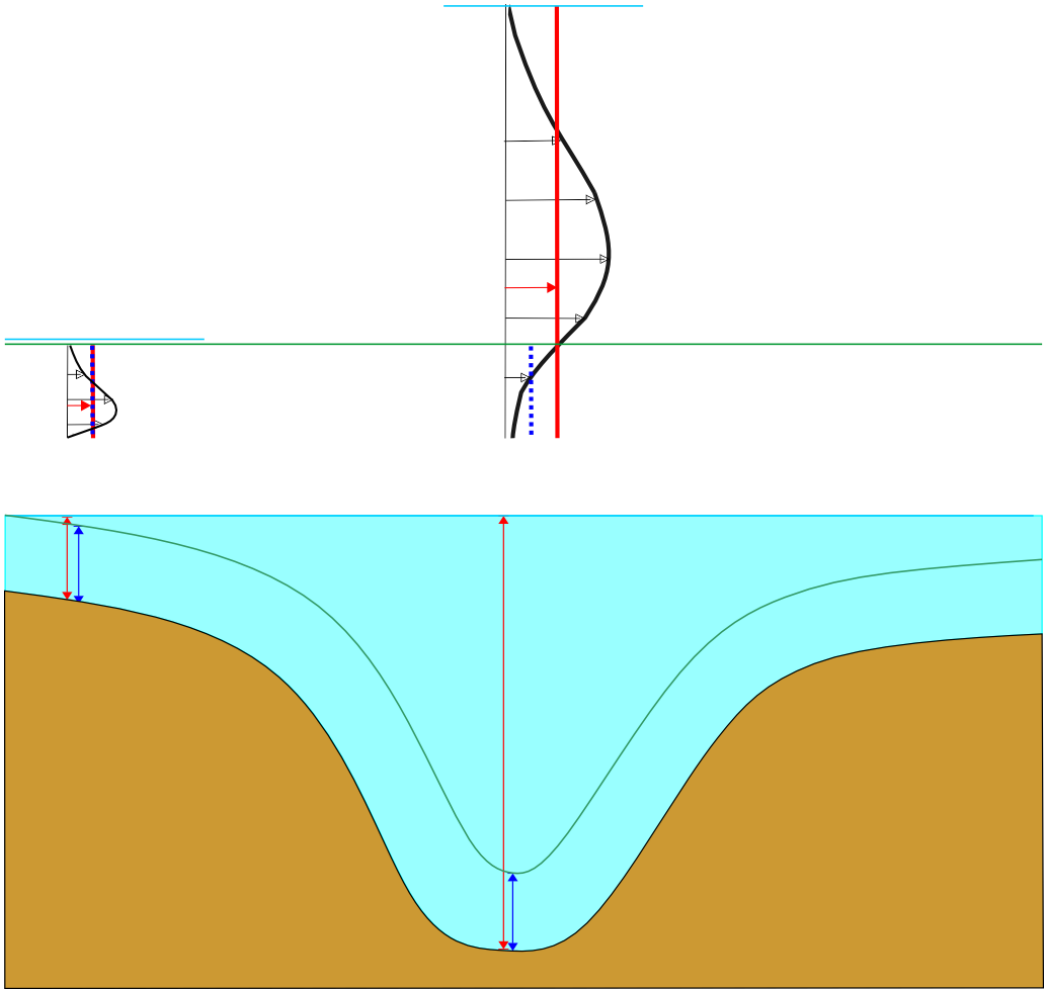

Abbildung A1 – 2: Geländeschnitt durch ein Tal. Hellblau – Kaltluft, rot – Integrationsbereich vertikal integrierter Modelle (Gesamtkaltluftvolumenstrom), grün – bodennaher Integrationsbereich (z.B. doppelte mittlere Gebäudehöhe). Darüber typische Strömungsprofile: rote Linie – vertikal gemittelte Strömungsgeschwindigkeit, blau strichliert – mittlere Strömungsgeschwindigkeit im bodennahen Integrationsbereich.