

Kathrin Baumann-Stanzer [Red.]

Leitfaden Qualitätssicherung meteorologischer Eingangsdaten in die Ausbreitungsmodellierung

Anleitung für die gutachterliche Praxis in Österreich



Kathrin Baumann-Stanzer [Red.]

Leitfaden Qualitätssicherung meteorologischer Eingangsdaten in die Ausbreitungsmodellierung

Anleitung für die gutachterliche Praxis in Österreich

Berichte der GeoSphere Austria, 154
ISSN 2960-4486 (Print)
ISSN 2960-4893 (Online)

Leitung der Arbeitsgruppe und Redaktion: Kathrin Baumann-Stanzer (GeoSphere Austria)

Autorenschaft: Kathrin Baumann-Stanzer (GeoSphere Austria), Manuel Gutleben (Amt der Tiroler Landesregierung), Silvia Jost (TU Graz), Andreas Krismer (Amt der Tiroler Landesregierung), Michael Mandl (Amt der Salzburger Landesregierung), Klaus Mayer (Stadt Wien, Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22), Dietmar Öttl (Amt der Steiermärkischen Landesregierung), Stefan Oitzl (Amt der Oberösterreichischen Landesregierung), Hannes Schmidt (Amt der Kärntner Landesregierung), Ulrich Uhrner (TU Graz), Cornelius Zeindl (Amt der Niederösterreichischen Landesregierung)

weitere Mitglieder der Arbeitsgruppe: Michael Butschek (GeoSphere Austria), Lukas Dehnert (Stadt Wien, Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22), Veronika Krieger (GeoSphere Austria), Magdalena Kristler (Amt der Niederösterreichischen Landesregierung), Dalibor Martinovic (Amt der Vorarlberger Landesregierung), Gabriele Rau (GeoSphere Austria), Michael Schauer (TU Graz), Johannes Schweiger (Amt der Burgenländischen Landesregierung), Heinz Tizek (Stadt Wien, Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22), Moritz Trichtl (Amt der Niederösterreichischen Landesregierung)

Dank: Die Erstellung dieses Leitfadens wurde gefördert durch das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) Abt. V/11 (Auftrag 2024-0.183.505)

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der GeoSphere Austria und der Autorenschaft ausgeschlossen ist. Rechtsausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorenschaft dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Umschlagbild: Temporäre meteorologische Station in Stübing, Steiermark (Foto: © GeoSphere Austria/Franz Traher)

Impressum:

Alle Rechte für das In- und Ausland vorbehalten
© GeoSphere Austria, Wien
Erscheinungsdatum: 5 / 2025
Erscheinungsort: Wien

Medieninhaber, Herausgeber und Verleger:

GeoSphere Austria
Hohe Warte 38
1190 Wien
www.geosphere.at

Druck: Riegelnik Ges.m.b.H, Neustiftgasse 12, 1070 Wien

Die Autorinnen und die Autoren sind für den Inhalt ihrer Arbeiten verantwortlich und sind mit der digitalen Verbreitung ihrer Arbeiten im Internet einverstanden.

INHALT

1	Einleitung.....	4
2	Wahl der Datengrundlagen und Methodik	5
2.1	Kriterium der Ergebnisrelevanz.....	5
2.2	Meteorologische Messungen.....	7
2.3	Meteorologische Modelle	7
2.3.1	Regionale und lokale Windfeldmodellierung.....	8
2.3.2	Mikroskalige Windfeldmodellierung.....	10
2.4	Datenquellen	11
3	Plausibilität der meteorologischen Eingangsdaten.....	12
3.1	Plausibilitätsprüfung Windmessung.....	12
3.2	Plausibilitätsprüfung Windfeldmodellierung	12
3.2.1	Erwartungswerte.....	12
3.2.2	Qualitative Beurteilung	12
3.2.3	Quantitative Beurteilung.....	13
4	Repräsentativität der meteorologischen Eingangsdaten.....	14
4.1	Prüfung der räumlichen Repräsentativität.....	14
4.1.1	Räumliche Übertragbarkeit von Messdaten	14
4.1.2	Räumliche Repräsentativität von synthetischen Winddaten.....	16
4.1.3	Räumliche Repräsentativität einer Windfeldmodellierung.....	16
4.2	Prüfung zeitliche Repräsentativität.....	17
4.2.1	Bewertung anhand eines mehrjährigen Messzeitraums.....	17
4.2.2	Bewertung einer einjährigen Messreihe	17
4.2.3	Verwendung einer untereinjährigen Messreihe	17
5	Behandlung kleinräumiger meteorologischer Phänomene	19
5.1	Kaltluftabflüsse.....	19
5.2	Inversionen.....	20
5.3	Schwachwindlagen	20
6	Berücksichtigung des Klimawandels	22
7	Literatur.....	23

1 Einleitung

Ziel des Leitfadens ist eine österreichweit homogenisierte, qualitätsgesicherte Vorgehensweise bei der Erstellung der meteorologischen Eingangsdaten für die Ausbreitungsrechnung im Rahmen von Behördenverfahren. Nach ÖNORM M 9440 sind für die Berechnung von Jahresmittelwerten sowie von maximalen Kurzzeitmittelwerten der Immissionskonzentration mit einem Ausbreitungsmodell eine einjährige Zeitreihe mit Stunden- oder Halbstundenmittelwerten der Windrichtung, Windgeschwindigkeit und einer Größe zur Beschreibung des Turbulenzzustandes der bodennahen Atmosphäre oder eine Statistik (Häufigkeitsverteilung) dieser jeweils gleichzeitig auftretenden Größen erforderlich.

In der Praxis wird oft die Häufigkeitsverteilung der stündlichen Ausbreitungssituationen (Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Ausbreitungsklasse) verwendet. Das oben genannte Wertetripel hat sich als „Mindest“-Standard etabliert. Neben der Ausbreitungsklasse kommen auch noch weitere Messgrößen, wie z. B. Niederschlag, Obukhov Länge, oder Grenzschichthöhe als Eingangsdaten je nach Fragestellung und verwendetem Modell in Frage.

Die bei der Erstellung der meteorologischen Eingangsdaten für die Ausbreitungsrechnung erforderlichen Arbeitsschritte umfassen im Wesentlichen

- die Wahl der geeigneten Datengrundlagen und Methodik
- den Nachweis der räumlichen und zeitlichen Repräsentativität meteorologischer Daten
- die Prüfung der Qualität verwendeter meteorologischer Messdaten
- die Kennzeichnung oder Korrektur und Homogenisierung fehlerhafter Messdaten
- die Bewertung eingesetzter Windfeldmodellierung in Hinblick auf die gegenständliche Fragestellung.

Der vorliegende Leitfaden behandelt in **Kapitel 2** die Eignung von meteorologischen Messungen und Modellierungsansätzen und gibt Hinweise zu Datenquellen und Entscheidungsgrundlagen.

Kapitel 3 ist der Plausibilitätsprüfung der meteorologischen Datengrundlagen in Hinblick auf die jeweilige Fragestellung gewidmet.

In **Kapitel 4** werden Vorgehensweisen zur Prüfung der räumlichen und zeitlichen Repräsentativität der meteorologischen Daten erläutern, deren Nachweis nach ÖNORM M 9440 ein wesentlicher Bestandteil der Methodenbeschreibung im Rahmen eines Immissionsgutachtens Luft darstellt.

In **Kapitel 5** werden Aspekte kleinräumiger meteorologischer Phänomene angesprochen, welche für die lokalen Ausbreitungsbedingungen von besonderer Relevanz sein können.

Bei der Beurteilung der Auswirkungen eines Vorhabens auf das Schutzgut Luft in der Betriebsphase wird die Gültigkeit der meteorologischen Eingangsdaten für die Ausbreitungsrechnung in Hinblick auf den Klimawandel zunehmend in Frage gestellt. **Kapitel 6** bietet hierzu einen kurzen Abriss des aktuellen Standes der Klimaforschung.

2 Wahl der Datengrundlagen und Methodik

2.1 Kriterium der Ergebnisrelevanz

Die Wahl der Datengrundlagen und Methodik für die Bewertung eines Vorhabens hat sich grundsätzlich am Ausmaß der zu erwartenden Auswirkungen zu orientieren. Das bedeutet, dass jener Methode zur Ermittlung der meteorologischen Eingangsdaten für die Ausbreitungsrechnung der Vorzug gegeben werden soll, die im jeweiligen Fall eine zweckmäßige sowie ausreichend genaue Beurteilung der Auswirkungen eines Vorhabens zulässt.

Sollten bei einem zu begutachtenden Projekt von vornherein aufgrund der Art und des geringen Umfangs der vorhabensbedingten Luftschadstoffemissionen nur geringe Zusatzbelastungen zu erwarten sein und die lokale Grundbelastung deutlich unter den Grenz- sowie Richtwerten liegen, dann haben die ermittelten Belastungen zumeist einen nur orientierenden Charakter und es können einfachere Methoden gewählt werden.

Abbildung 1 illustriert die empfohlene Vorgehensweise bei Wahl der meteorologischen Datengrundlage und Methodik. Auf die einzelnen Schritte wird in den jeweiligen Kapiteln näher eingegangen.

Leitfaden Qualitätssicherung meteorologischer Eingangsdaten

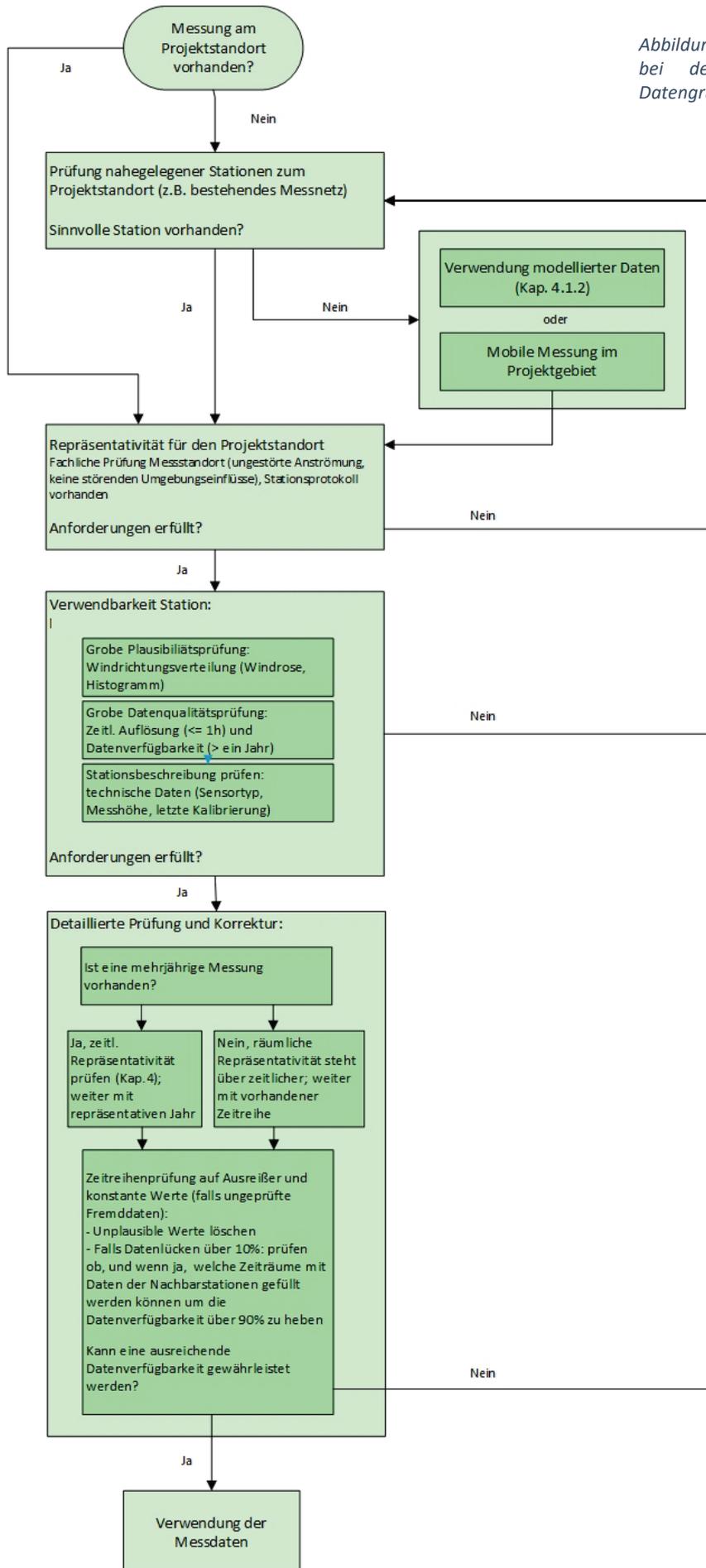


Abbildung 1: Schematische Vorgehensweise bei der Wahl der meteorologischen Datengrundlage und Methodik.

2.2 Meteorologische Messungen

Meteorologische Messdaten für die Ausbreitungsrechnung umfassen die Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit, sowie einen abgeleiteten Parameter zur Beschreibung des Turbulenzzustandes der Atmosphäre. In Abhängigkeit, ob es sich um lufthygienisch günstige oder weniger günstige Bedingungen handelt, werden die Turbulenz- und Schichtungseigenschaften der bodennahen Luftschicht nach der ÖNORM M 9440 (2019) durch Ausbreitungsklassen charakterisiert. Die Bestimmung der Ausbreitungsklassen kann über unterschiedliche Methoden durch die Kombination meteorologischer Parameter erfolgen (Windgeschwindigkeit, Bewölkungsgrad, Strahlungsbilanz, Temperaturgradient, Globalstrahlung).

Gemäß der Definition in der ÖNORM M 9440 (2019) ist entscheidend, dass das Schema der Ausbreitungsklassen den Anforderungen des Ausbreitungsmodells entspricht, für welches die meteorologischen Eingangsdaten verwendet werden. Eine entsprechende Dokumentation der Methodik ist zweckmäßig, um eine Plausibilitätsprüfung zu ermöglichen.

Zur Ermittlung der Ausbreitungsklassen kommen Messdaten der Windgeschwindigkeit in Verbindung mit Bewölkung / Bedeckungsgrad oder Strahlungsbilanz (Klug/Manier-Klassen) oder in Verbindung mit der Globalstrahlung tagsüber und dem vertikalen Temperaturgradienten nachts (US EPA, GRAL-Klassen) infrage.

Meteorologische Daten dürfen nach ÖNORM M 9440 nur dann für die Ausbreitungsrechnung herangezogen werden, wenn sie nach einem anerkannten Verfahren, z. B. auf Basis der ÖNORM M 9490, an repräsentativen Standorten gewonnen wurden, die räumliche Repräsentativität und die Eignung der meteorologischen Messung für das Untersuchungsgebiet sind zu begründen.

Liegen keine repräsentativen, meteorologischen Messungen vor, so dürfen die Daten entweder durch eine geeignete Messung oder durch eine Modellierung erhoben werden. Die Messungen müssen nach ÖNORM M 9440 während eines Zeitabschnitts von mindestens einem Jahr am Standort des Emittenten durchgeführt werden. Die für den jeweiligen Standort räumlich und zeitlich repräsentativen, meteorologischen Daten dürfen auch durch ein Analyseverfahren oder ein prognostisches, mesoskaliges, meteorologisches Modell ermittelt werden, sofern der Nachweis der fachlichen Eignung des verwendeten Verfahrens für das Untersuchungsgebiet erbracht wird.

2.3 Meteorologische Modelle

Die Wahl des meteorologischen Modells oder Windfeldmodells zur Verwendung in Ausbreitungsrechnungen hängt im Wesentlichen von der Aufgabenstellung und somit der notwendigen räumlichen Auflösung und speziell in Österreich von der Komplexität des Geländes ab.

Regionale Modelle die größenordnungsmäßig Gebietsgrößen 100 x 100 km² bis 1000 x 1000 km² abdecken und mit typischen Maschenweiten von $\Delta x, y \approx 5$ km bis zu 1 km operieren, können für moderat gegliedertes Gelände durchaus brauchbare Windfelder liefern. Häufig werden diese Modelle auch zur Initialisierung und Bereitstellung der Randbedingungen oder von Wind- und Turbulenzprofilen für Windfeldmodelle oder Ausbreitungsmodelle auf Lokaler Skala eingesetzt.

Meteorologische Modelle oder Windfeldmodelle die auf der **Lokalen Skala** typischerweise bis 100 x 100 km² operieren und Maschenweite von $\Delta x, y \approx 50$ m bis zu 500 m verwenden, können bei geeigneter Numerik und Physik auch für Simulationen in stark gegliedertem Gelände eingesetzt werden.

Mikroskalige Windfeldmodelle finden vor allem in urbanen Fragestellungen Anwendung, zur Berücksichtigung des Einflusses von Gebäuden oder auch der Vegetation.

Die Initialisierung oder auch der Antrieb von diesen meteorologischen Modellen stellt häufig eine große Herausforderung dar, insbesondere bei stark gegliedertem Gelände, da wechselnde Ein- und Ausströmränder vorliegen und somit geeignete Initialisierungs- und Randbedingungen vorgegeben werden müssen. Insbesondere bei orographisch stark gegliedertem Gelände ist von räumlich und auch zeitlich inhomogenen Randbedingungen auszugehen. Durch Messungen ist dies nicht zu bewerkstelligen, am ehesten noch durch Modellkopplung.

Bei vielen Anwendungen auf der lokalen Skala für kleinere Modellgebiete mit geringeren Inhomogenitäten (Gelände, Landnutzung) wird in der gutachterlichen Praxis oft eine einzige Station zum meteorologischen Antrieb verwendet. Für die Modellierung in komplexem Gelände werden in Österreich immer häufiger sogenannte Windfeldbibliotheken mit der Abdeckung von ganzen Bundesländern verwendet. Die Windfeldbibliotheken können mittels synthetischen Eingangsdaten oder mit einer Mehrfach-Modell-Kopplungsstrategie erzeugt werden.

Werden Zeitreihen, Häufigkeitsverteilungen oder Gitterdaten meteorologischer Größen ohne Messungen vor Ort durch Zusammenführung von topographischen, meteorologisch-statistischen Informationen oder Modellrechnungen berechnet, so werden diese als **synthetische Eingangsdaten** bezeichnet.

Die zur Berechnung der meteorologischen Eingangsdaten gewählte Methodik muss erläutert werden. Die Eignung des meteorologischen Modells in Hinblick auf die jeweilige Fragestellung ist nachzuweisen und die räumliche und zeitliche Repräsentativität des Datensatzes zu begründen.

Der **Nachweis der Eignung der gewählten Modellierung** hat nach ÖNORM M 9440 durch die Vorlage oder den Verweis auf Evaluierungsergebnisse für das Verfahren anhand von geeigneten Datensätzen zu erfolgen (z. B. Testfälle in VDI 3783 Blatt 7:2017, Anhang E für die geländebeeinflusste Windfeldmodellierung und/oder Testfälle in VDI 3783 Blatt 9:2017 für gebäudebeeinflusste Windfeldmodellierung).

2.3.1 Regionale und lokale Windfeldmodellierung

Je höher die Auflösung der horizontalen und vertikalen Gitterdistanz in der Windfeldmodellierung ist, desto besser können kleinskalige Einflüsse der Orographie, Topographie bzw. Landnutzung auf das Strömungsfeld mit dem Modell aufgelöst werden. Die Initialisierung und der Antrieb der Modelle, also die Bereitstellung von Windkomponenten und weiterer meteorologischer Daten an den Rändern stellt gerade in Gebieten mit großen räumlichen Variationen hinsichtlich der Oberflächenform und -beschaffenheit eine große Herausforderung dar.

In weniger stark gegliedertem Gelände können diagnostische Windfeldmodelle eingesetzt werden. Diagnostische Modelle generieren Strömungsfelder durch Interpolation von Messungen und nachfolgender Berechnung eines Massenkonsistenten Strömungsfeldes. Diagnostische mesoskalige Modelle werden in der Regel mit lokalen Beobachtungsdaten initialisiert (z. B. Haiden et al., 2011).

In Deutschland existiert eine strenge Abgrenzung für die Anwendbarkeit eines diagnostischen Windfeldmodells über die maximale Geländesteigung im Modellgebiet von kleiner gleich 1:5 (TA-Luft, 2021 bzw. die VDI 3783-7, 2017). Da die maximale Geländesteigung in der Regel mit höherer räumlicher Auflösung zunimmt, ist die Verwendung von diagnostischen Windfeldmodellen in Österreich nur in beschränktem Umfang möglich.

In stark gegliedertem Gelände ist daher der Einsatz von prognostischen Modellen zur Windfeldberechnung notwendig. Entsprechend VDI 3783-7 sollte die minimale horizontale Gitterweite bei prognostischen Modellen im Bereich zwischen 100 m und 1 km liegen. Zu beachten ist, dass dieser

Bereich in der Wissenschaft gerne als „Terra Incognita“ bezeichnet wird, da insbesondere die Turbulenzmodellierung durch die explizite Auflösung der vertikalen Wirbelstrukturen an ihre Grenzen der Anwendbarkeit kommt. Zudem verlieren Turbulenzparametrisierungen auf Basis der Rauigkeitslänge mit geringer werdender horizontaler Gitterweite zunehmend ihre Gültigkeit, da die meisten verwendeten Turbulenzmodelle auf der Annahme einer voll entwickelten Grenzschicht im Gleichgewichtszustand beruhen. Darüber hinaus nimmt die Wahrscheinlichkeit von numerischen Instabilitäten mit geringerer horizontaler Auflösung zu.

Aufgrund der enorm hohen Rechenzeiten von Large-Eddy Modellen und der schwierigen Vorgabe von Randbedingungen, beschränkt sich die Anwendung von Windfeldmodellen in der gutachterlichen Praxis derzeit auf nicht-hydrostatische prognostische Modelle, basierend auf den Reynolds-gemittelten Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie. Die Initialisierung bzw. der Antrieb dieser nicht-hydrostatischen prognostischen Modellen erfordert geeignete Datengrundlagen, um Wechselwirkungen zwischen der synoptischen Skala („großräumiges Wetter“), der regionalen Skala (z. B. Überströmung von Gebirgsketten, große Berg- Talwindssysteme, Land-Seewind Zirkulationen) und der lokalen Skala (Leiteffekte, Hangwinde) in die Modellierung einfließen zu lassen.

Im einfachsten Fall, bei einem relativ kleinen Modellgebiet mit einfacher Geometrie (z. B. ein relativ homogener Talabschnitt) können mit einer repräsentativen Messung, die vor Ort die wichtigen Windsysteme und auch Stabilitätseffekte erfasst gute Ergebnisse in der Windfeldmodellierung erzielt werden.

Bei größeren oder komplexeren Modellgebieten (z. B. Seitentäler) ist es wünschenswert, Modelle mit mehreren Messungen, die die Besonderheiten der lokalen Strömungsstrukturen wiedergeben, zu initialisieren oder Daten assimilieren.

Derzeit werden Windfelder für komplexes Gelände üblicherweise in folgender Weise erstellt:

1. Initialisierung mit einer repräsentativen Messung, Nachteil: Einschränkung der Gültigkeit des Modellierungsergebnisses auf einfache Geländeformen und sehr lokale Skala
2. Erstellung von Windfeldbibliotheken beispielsweise durch Berechnung eines Ensembles von Windfeldern für alle erwartbaren Anströmrichtungen (z. B. für 36 Sektoren in 10° Schritten), für alle Windgeschwindigkeitsklassen und Stabilitätsklassen; im Post-processing wird anhand des statistischen Vergleichs mit einer oder mehreren Messzeitreihen an verschiedenen Orten im Untersuchungsgebiet für jeden Zeitpunkt der Jahreszeitreihe das am besten passende Windfeld zugewiesen (z. B. Berchet et al., 2017)
3. Alternativ wird in manchen Fällen eine schrittweise Modellierung des Windfeldes in den verschiedenen Skalen (global, regional, lokal) mit sogenannten „Nesting“-Verfahren durchgeführt.

Zu 2. ist anzumerken, dass es sich um eine sehr anwendungsorientierte Vorgehensweise handelt, jedoch in der Praxis das sogenannte „Match-to-Observation“ nur für Teilgebiete angewendet werden kann, und nicht immer zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Ein Problem stellen die homogenen Initialisierungs- und Randbedingungswerte hinsichtlich Windrichtung, -geschwindigkeit und Stabilität für die einzelnen Windfelder dar. Für diese werden oft lediglich sehr einfache homogene Windprofile verwendet. Öttl und Reifeltshammer (2023) wählen eine Mischform, zur Erstellung einer Windfeldbibliothek d.h. Initialisierung eines regionalen/lokalen Windfeldmodelles mit ECMWF ERA5-LAND Re-Analysen, die die übergeordneten, großräumigen Windbedingungen repräsentieren und Berechnung eines sehr großen Ensembles an Windfeldern, auf welche der sogenannte „Match-to-Observation“ Algorithmus auf Teilgebiete angewandt wird um die Güte der Windfelder zu verbessern.

Zu 3. Ist anzumerken, dass meteorologische Messungen in der Regel nur auf der globalen Skala über etablierte 4D-Variationelle Datenassimilationsverfahren in die Modellkette einfließen (z. B. ECMWF ERA5-LAND Auflösung 9 km x 9 km). Messungen aus dem Alpenraum werden über das Kriterium $| \text{Höhe Orographie im Modell} - \text{Höhe über NN Messort} | < 100 \text{ m}$ eliminiert. Derzeit steckt die Datenassimilation für Regionale Modelle in der Entwicklung (z. B. Demortier et al., 2024). Insofern ist die Initialisierung von lokalen Modellen (Windfeldmodellen) bei der Modellkaskade global – regional – lokal äußerst schwierig, da thermische Zirkulationen, Inversionsbildungen und andere kleinskalige Prozesse auflösungsbedingt „durch die Maschen“ gehen. Bei hochaufgelöste Windfeldbibliotheken ist es daher sinnvoll, für genestete Teilgebiete viele Wind-, Temperatur und Feuchte Messungen zur Initialisierung des Windfeldes heranzuziehen, sofern diese von den Regionalmodell interpolierten Werten signifikant abweichen (z. B. Uhrner et al. 2019, Uhrner & Jost, 2024). In diesem Fall ist der Rechenaufwand im Vergleich zu Windfeldbibliotheken (Punkt 2) um ein vielfaches höher.

Unabhängig vom eingesetzten Modelltyp und der verwendeten Methodik ist die Plausibilität der berechneten meteorologischer Felder, insbesondere der Windfelder zu prüfen und die grundsätzliche Eignung des eingesetzten Modells entsprechend ÖN M9440 darzulegen (siehe Kap. 3.2).

2.3.2 Mikroskalige Windfeldmodellierung

Ist zu erwarten, dass Hindernisse wie Gebäude oder Waldflächen einen Einfluss auf die Ausbreitung von Luftverunreinigungen haben, sind sogenannte mikroskalige Windfeldmodelle einzusetzen. Auch hier werden in der aktuellen gutachterlichen Praxis sowohl diagnostische als auch prognostische Modelle verwendet.

Ein diagnostisches Windfeldmodell kann verwendet werden, wenn die relevanten Immissionspunkte außerhalb des unmittelbaren Einflussbereiches der quellnahen Gebäude (beispielsweise außerhalb der Rezirkulationszonen) liegen. In allen anderen Fällen ist ein prognostisches mikroskaliges Windfeldmodell zu verwenden. Im gebäudenahen Gebiet darf die horizontale Gitterweite keinesfalls mehr als 10 m betragen. In der Nähe des interessierenden Gitterpunkts sind Gebäude mit mindestens drei Gitterpunkten aufzulösen, ebenso sind in vertikaler Richtung mindestens zwei Gitterpunkte zwischen unterem Modellrand und interessierenden Gitterpunkt vorzusehen. Relevante Strömungsphänomene, wie z. B. Leewirbel, sind mit mindestens fünf Gitterpunkten aufzulösen.

Mikroskalige Modelle werden häufig mit Beobachtungsdaten initialisiert. Hierbei ist zu beachten, dass lokale Windmessungen möglichst unbeeinflusst von Bebauung und Bewuchs sind. Messungen sollten daher wenigstens mehrere Meter über dem Dachniveau stattfinden bzw. einen Mindestabstand zu Gebäude, welche die Anemometerhöhe überragen, aufweisen. Üblicherweise kann davon ausgegangen werden, dass bei größeren Abständen als die fünffache Gebäudehöhe keine Rezirkulationen mehr auftreten.

2.4 Datenquellen

Im Folgenden sind Quellen für meteorologische Datengrundlagen für Österreich gelistet (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

data.hub.geosphere.at

Meteorologische Messungen und Gitterdaten der GeoSphere Austria

Land Niederösterreich:
www.numbis.at bzw.
www.noel.gv.at/luft

Die Daten des niederösterreichischen Luftgütemessnetzes stehen online unter www.numbis.at oder www.noel.gv.at/luft kostenfrei für Externe zur Verfügung. Neben einer Kartenansicht und vorgefertigten Luftgüteberichten, gibt es im Bereich „Diagramme“ auch die Möglichkeit, sich selbst Auswertungen zusammenzustellen und diese runterzuladen. GRAMM-Windfelder werden aufgrund nicht vollständig abgeschlossener Qualitätssicherung aktuell nicht an Externe weitergegeben.

Land Salzburg:

Neben den IGL-Messstellen betreibt das Land ein umfangreiches meteorologisches Stationsnetz (inkl. mehrerer Höhenprofile). Diese Daten werden unentgeltlich auf Anfrage zur Verfügung gestellt. Stationsbeschreibungen sind großteils vorhanden. Neben den HMW Daten sind für diese Stationen Datenblätter verfügbar. GRAMM-Windfelder werden nicht weitergegeben.

Land Steiermark:

www.umwelt.steiermark.at/cms/ziel/2063751/DE/

data.steiermark.at/cms/beitrag/11822084/97108894/?AppInt_OGD_ID=1720

Neben den IGL Messstellen betreibt das Land auch noch ein meteorologisches Stationsnetz (inkl. eines Höhenprofils im Raum Graz). Diese Daten werden unentgeltlich für den Download zur Verfügung gestellt. GRAMM-SCI Windfelder werden kostenlos weitergegeben.

3 Plausibilität der meteorologischen Eingangsdaten

3.1 Plausibilitätsprüfung Windmessung

Auf Grundlage einer Beschreibung des Messstandortes (Fotodokumentation betreffend Aufstellung und Hindernissituation in Umgebung der Station, Standortverortung in Karte) und einer Dokumentation der verwendeten Sensorik ist die Eignung des Standortes und des Messsystems zu prüfen. Im nächsten Schritt ist zu kontrollieren, ob eine hinreichende Datenverfügbarkeit zur Erstellung meteorologischer Eingangsdaten, sowohl für Windrichtung und Windgeschwindigkeit als auch in Form von Turbulenzdaten oder anderen Parametern, welche zur Bestimmung von Ausbreitungsklassen geeignet sind (Strahlungsbilanz, Bewölkungsdaten beziehungsweise Globalstrahlung und bodennaher Temperaturgradient; für nähere Angaben siehe ÖNORM M 9440) gegeben ist.

Darstellungen der Windrichtungsverteilung sowie Häufigkeitsverteilungen für Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklassen beziehungsweise andere Stabilitätsparameter sind im Weiteren unter Berücksichtigung der regionalen Lage (Klimatologie) sowie der lokalen Topografie und Landnutzung einer fachlichen Prüfung zu unterziehen.

3.2 Plausibilitätsprüfung Windfeldmodellierung

Die Qualitätskontrolle von Windfeldmodellen erfordert, dass die Modellergebnisse zumindest innerhalb des für die Immissionsbegutachtung verwendeten Prognosegebiets auf Plausibilität hin überprüft werden.

Dies bedingt in der Praxis beispielsweise einen notwendigen Vergleich zwischen dem zu prüfenden Modellergebnis und einer eventuell vorhandenen Messung bzw. einem anderen Modellergebnis. Der Vergleich muss qualitativ und sofern möglich, auch quantitativ erfolgen.

3.2.1 Erwartungswerte

Ein erster Schritt ist es, das Ergebnis einer Windfeldmodellierung mit Erwartungswerten zu vergleichen. Dies beinhaltet vorweg die Kontrolle auf augenscheinliche Fehler, wie beispielsweise Einzelwerte außerhalb plausibler Wertebereiche.

Des Weiteren können (in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3783 Blatt 20) Erwartungswerte aus der Windklimatologie unter Berücksichtigung der lokalen und regionalen Topografie, sowie aus großflächigen Modellrechnungen oder orientierenden Messungen im Untersuchungsgebiet abgeleitet werden. Als Beispiel kann hier der Windverlauf entlang eines Tales oder die Übereinstimmung mit der bekannten Hauptwindrichtung in einer Region kontrolliert werden.

Wird für die Beurteilung ein Vergleichsdatensatz ausgewählt, dann muss dieser eine zeitlich repräsentative Messung im Untersuchungsgebiet oder ein anderes Modellergebnis sein, welches eine räumliche und zeitliche Repräsentativität aufweist (z. B. ein modelliertes Windfeld, welches mit einer repräsentativen Ausbreitungsklassenzeitreihe kalibriert wurde).

3.2.2 Qualitative Beurteilung

Die qualitative Beurteilung erfolgt typischerweise auf Basis eines grafischen Vergleichs von zwei (oder mehr) Windverteilungen. Hier sollten die Hauptmaxima und Nebenmaxima der Windverteilung aus dem Modell und dem jeweiligen Vergleichsdatensatz gegenübergestellt werden. Es kann ein Vergleich für die Verteilung der Windrichtungen sowie für die Verteilung der Windgeschwindigkeiten angestellt

werden.

Eine erweiterte grafische Beurteilung kann durch den Vergleich von Tagesgängen oder Ausbreitungsklassenverteilungen erfolgen. In Gebieten, wo lokale Windsysteme zu erwarten sind (z. B. Berg- und Talwind-Zirkulation, Land-See-Windsystem, ...) empfiehlt sich auch ein Vergleich der Tag- und Nachtsituation.

3.2.3 Quantitative Beurteilung

Bei einer quantitativen Beurteilung werden die vorliegenden Daten statistischen Bewertungen unterzogen, welche die Abweichungen der untersuchten Parameter zwischen dem Modellergebnis und dem Vergleichsdatensatz quantifizieren. Es handelt sich dabei typischerweise um einen Vergleich von Mittelwerten der Windrichtung und -geschwindigkeit über die gesamte Windverteilung oder innerhalb der einzelnen Sektoren. Darüber hinaus können beispielsweise auch Vergleiche von Perzentilen angestellt werden.

Mögliche Verfahren zu einer umfangreichen statistischen Beurteilung sind in der VDI 3783 Blatt 20, Anhang A beschrieben.

4 Repräsentativität der meteorologischen Eingangsdaten

Unabhängig von der gewählten Datengrundlage und Methodik sind die räumliche und zeitliche Repräsentativität der meteorologischen Eingangsdaten in Hinblick auf die Fragestellung und die Besonderheiten des Untersuchungsgebiets zu prüfen und im Immissionsgutachten zu begründen.

4.1 Prüfung der räumlichen Repräsentativität

Die Windverhältnisse in 10 m über Grund an einem Standort werden einerseits durch die großräumigen und regionalen Strömungen beeinflusst, andererseits häufig durch sehr kleinräumige, lokale Einflüsse infolge der Oberflächenbeschaffenheit und des Geländes geprägt (weitere Hinweise hierzu sind in Kapitel 5 zu finden). Folglich ist die Aussagekraft der gewählten Windinformation für das Berechnungsgebiet der Ausbreitungsrechnung in Hinblick auf die Fragestellung des Immissionsgutachtens, auf besonders sensible Bereiche und den Einfluss lokaler meteorologische Phänomene zu überprüfen und dies entsprechend im Immissionsgutachten zu begründen.

4.1.1 Räumliche Übertragbarkeit von Messdaten

Für Ausbreitungsrechnungen sind meteorologische Daten im Projektgebiet, insbesondere Windgeschwindigkeit und -richtung, sowie Parameter zur Beschreibung des Turbulenz- bzw. Schichtungszustandes der Atmosphäre, notwendig. Diese können, wenn nötig, von bestehenden Standorten mit entsprechenden meteorologischen Messungen die für das Projektgebiet repräsentativ sind, gewonnen werden. Eine räumliche Übertragbarkeit der Daten muss dabei gegeben und begründet sein.

Die Auswahl der meteorologischen Bezugsstation(en) erfolgt mittels Analyse der Standorte und der vorherrschenden Bedingungen. Folgende Faktoren müssen dabei berücksichtigt und ggf. verglichen werden:

- Stationseigenschaften: Stationshöhe, Verortung der Station, Höhe der Sensoren
- Topografie und Oberflächenbeschaffenheit: Einfluss von komplexer Topographie auf Strömungsverhältnisse, Bebauung, Landnutzung, Rauigkeitslänge
- klimatischen Bedingungen: regionale Besonderheiten, wie Tal-, Hang-, und Seewindsysteme, katabatische Winde, Kalmen und Häufigkeit von Böen sowie Häufigkeit von Inversionswetterlagen
- Abstand zwischen den Standorten

Für die Überprüfung der räumlichen Übertragbarkeit kann die nachfolgende Checkliste herangezogen werden (in Anlehnung an VDI 3780).

Für die Darstellung der Prüfung im Fachgutachten ist eine textliche Erörterung der Entscheidungsgrundlage zur Übertragung der meteorologischen Daten (falls nicht im Projektgebiet vorhanden) und deren räumlicher Repräsentativität ausreichend.

Überprüfung der räumlichen Übertragbarkeit	Vorhanden	Entfällt	Allf. Ergänzungen
1. Allgemeine Angaben zur Anlage für die eine Ausbreitungsrechnung durchgeführt wird			
Art der Anlage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Lage der Anlage inkl. kartografischer Darstellung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Höhe der Quelle(n) über Grund	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Angaben zu meteorologischen Messstandorten verschiedener Messnetzbetreiber im Anlagenbereich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Besonderheiten in Bezug auf die Vorgehensweise bei Ausbreitungsrechnungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2. Angaben zu meteorologischen Bezugsstation(en)			
Dokumentation zur Auswahl der meteorologischen Bezugsstation(en)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Eigenschaften der Bezugsstation(en):			
- Koordinaten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
- Höhe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
- Höhe Windgeber	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
- Rauigkeitslänge	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Qualitätssicherung der Daten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Lokale Besonderheiten der Bezugsstation(en)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3. Prüfung der Übertragbarkeit			
Erwartungsbereiche im Zielbereich bestimmt und begründet:			
- Für Windrichtung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
- Für Windgeschwindigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
- Für Stabilitätsklassen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Messwerte der Datenbasis auf einheitlicher Rauigkeitslänge	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Abweichungen zwischen Erwartungswert und Messwerten an Bezugsstation(en):			
- Abweichung zwischen Erwartungswert und gemessenem vieljährigen Windrichtungsverteilung ermittelt und $< 30^\circ$ (Richtungsmaximum)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
- Abweichung zwischen Erwartungswert und gemessenem vieljährigen Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit ermittelt und $< 1,0$ m/s	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4. Bei Anpassung gemessener meteorologischer Daten an Bezugsstation(en)			
Vorgehensweise und Modellansätze begründet und dokumentiert	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Nachweis der räumlichen Repräsentativität der angepassten Daten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5. Erstellung des Zieldatensatzes			
Anemometerhöhe(n) in Abhängigkeit von den Rauigkeitsklassen nach TA Luft (2021) in den Zieldatensatz integriert	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Bei Übertragung von Stabilitätsinformationen die nicht an Bezugsstation(en) gewonnen wurden: Herkunft der Informationen dokumentiert und Eignung begründet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

4.1.2 Räumliche Repräsentativität von synthetischen Winddaten

Durch Zusammenführung von topographischen und meteorologisch-statistischen Informationen und Ergebnissen von meteorologischen Modellrechnungen können Zeitreihen oder Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung für einen Ort künstlich („synthetisch“) ohne Nutzung einer meteorologischen Messung hergestellt werden.

Ein Beispiel für synthetische Winddaten stellen die INCA-Daten dar, die über den Data Hub der GeoSphere Austria abrufbar sind. Das Analyse- und Kurzfristvorhersagesystem INCA verwendet alle für Österreich verfügbaren meteorologischen Datenquellen, Stationsbeobachtungen, Fernerkundungsdaten, Ergebnisse eines numerischen Wettervorhersagemodells und ein hochaufgelöstes Geländemodell, um eine möglichst gute Analyse des aktuellen Zustands der (bodennahen) Atmosphäre zu erstellen. Die in diesem Datensatz enthaltenen Analysen haben eine räumliche Auflösung von 1 km x 1 km und eine zeitliche Auflösung von 1 Stunde.

Zur Beurteilung der räumlichen Repräsentativität synthetischer Winddaten für ein konkretes Untersuchungsgebiet ist die Abwägung der lokal für die Immissionsverteilung relevanten Phänomene wesentlich. Topografisch bedingte Strömungsmuster können beispielsweise nur dann in dem Datensatz korrekt wiedergegeben werden, wenn die relevanten Geländestrukturen in der räumlichen Rasterauflösung des zugrundeliegenden Modells beziehungsweise Gitterdatensatzes hinreichend aufgelöst werden. Eine Überprüfung kann in diesem Fall durch visuellen Vergleich der Windrichtungsverteilung (Windrose) mit einer Kartendarstellung des Geländes erfolgen.

4.1.3 Räumliche Repräsentativität einer Windfeldmodellierung

Grundlegende Fragestellungen zu Beginn der Modellierungsarbeiten und beim Erstellen der Modellierungsstrategie sind:

- Größe des Untersuchungsgebietes vs. adäquate Repräsentation des Windes im Untersuchungsgebiet?
- Gibt es geeignete Windfeldbibliotheken mit plausibler Windfeldmodellierung in den sensitiven Bereichen?
- Oder alternativ, gibt es geeignete, repräsentative Messungen die für eine adäquate Windfeldmodellierung verwendet werden können?

Windfelder für größere Untersuchungsgebiete oder -räume sind meist schwieriger mit einer einzelnen Messung anzutreiben, vor allem bei stark gegliedertem Gelände. Sofern das Gelände einen ausgeprägten Leiteffekt ausübt und Hangwinde in Tallagen keine dominierende Rolle spielen, können durchaus gute Ergebnisse erzielt werden. Für größere Gebiete vorberechnete Windfeldbibliotheken müssen jedenfalls in Hinblick auf die in Bezug auf die Fragestellung des Immissionsgutachtens sensiblen Bereiche auf Plausibilität geprüft werden.

Bei Beschränkung auf kleine Gebiete (größenordnungsmäßig etwa bis 2 km x 2 km) die wenig räumliche Variabilität hinsichtlich Orographie und Landnutzung aufweisen und einer im Rechengebiet liegenden Messstation können durchaus qualitativ hochwertige Windfeldsimulationen mit geringem Aufwand erstellt werden. Wichtig ist, dass die Messung nicht durch Hindernisse wie Äste, Bäume, Gebäude, Geländekanten oder Hügel beeinflusst ist/war.

Bei der Erstellung von Windfeldbibliotheken basierend auf synthetischen Randbedingungen und Post-Processing des Ensembles an vorberechneten Strömungsfeldern mit Messungen haben sich insbesondere Messungen in Tallagen und Gipfellagen zur Repräsentation von lokalen geländebeeinflussten sowie übergeordneter synoptischer Strömung als geeignet erwiesen. Aufgrund

der häufig in Modellen verwendeten Approximation eines Divergenz-freien Windfeldes kann die Verwendung von mehreren Windmess-Stationen bei Post-Processing der Zuordnung geeigneter Strömungsfelder an Messdaten insbesondere zu den Übergangszeiten zwischen Berg- und Talwind Probleme bereiten. Ebenso erweist sich die Verwendung von benachbarten Stationen mit geringer Distanz (< 2 km) oftmals als schwierig, wenn diese Messungen häufig hinsichtlich Windrichtung und -geschwindigkeit divergieren.

4.2 Prüfung zeitliche Repräsentativität

4.2.1 Bewertung anhand eines mehrjährigen Messzeitraums

Liegen für das Untersuchungsgebiet räumlich repräsentative Messdaten aus einer mehrjährigen Messreihe vor, dann ist anhand objektiver Kriterien jenes Jahr zu ermitteln, das hinsichtlich der Windverteilung (eventuell auch zusätzlich in Hinblick auf die Turbulenzverhältnisse) für den gewählten Zeitraum am repräsentativsten ist. Wird aufgrund anderer Überlegungen ein bestimmtes Jahr gewählt, beispielsweise aufgrund nur in diesem Jahr vorliegenden Immissionsmessungen, so ist die zeitliche Repräsentativität der meteorologischen Eingangsdaten dieses Jahres anhand des mehrjährigen Vergleichs zu bewerten. Wenn vorhanden, sollte hierfür ein zumindest fünfjähriger Messzeitraum herangezogen werden.

Zwei mögliche statistische Verfahren hierfür sind in VDI 3783, Blatt 20 und 21 (2017) beschrieben.

4.2.2 Bewertung einer einjährigen Messreihe

Liegen im Untersuchungsgebiet räumlich repräsentative Messungen nur über den Zeitraum eines Jahres vor, kann zur Einordnung des Messzeitraums die in Kapitel 4.2.1 erläuterte Methode durch Heranziehen eines mehrjährigen Datensatzes der nächsten meteorologischen Station verwendet werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht durch Analogieschluss eine Aussage darüber, ob der betreffende Messzeitraum in ein hinsichtlich des Jahresmittelwerts der Windgeschwindigkeit und der Kalmenhäufigkeit typisches Jahr fällt oder es sich um einen tendenziell windreicheren oder windärmeren Zeitraum handelt.

4.2.3 Verwendung einer untereinjährigen Messreihe

Grundsätzlich sieht die ÖNORM M9440 die Verwendung meteorologischer Daten über den Zeitraum (mindestens) eines Jahres als Eingangsdaten für die Ausbreitungsrechnung vor. Liegen im Untersuchungsgebiet räumlich repräsentative Messungen über einen Zeitraum von weniger als 12 Monaten vor, ist abzuwägen, in welcher Form diese Information im Rahmen der Immissionsbegutachtung genutzt werden kann. Hierbei ist einerseits das Ausmaß der zu erwartenden Auswirkungen relevant (siehe Kapitel 2.1) andererseits die saisonale Variation der gegenständlichen Freisetzung. Wenn die zu beurteilende Emissionsquelle beispielsweise nur auf eine Jahreszeit (z. B. die Heizperiode) beschränkt ist, ist eine unterjährige Messreihe, die diesen Zeitraum abdeckt, ausreichend.

Messungen über einen Zeitraum unter 6 Monaten können zur Plausibilitätsprüfung der anhand anderer meteorologischer Datengrundlagen erstellten Eingangsdaten verwendet werden. Eine mehr als 6-monatigen Messreihe kann in Beurteilungsfällen, die keine wesentlichen Auswirkungen durch Luftschadstofffreisetzungen erwarten lassen, durch Kombination mit einer vollständigen Messreihe an einer nächsten meteorologischen Station (Referenzstation) ergänzt werden.

Im ersten Schritt ist in einem solchen Fall zu beurteilen, ob die unterejährigen Daten in Hinblick auf die Variabilität der erfassten Witterungsbedingungen hinreichend aussagekräftig sind. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Bedingung als erfüllt angenommen werden kann, wenn der Messzeitraum jedenfalls eine Übergangsjahreszeit (Frühling oder Herbst) umfasst. Ist diese Bedingung erfüllt, ist eine mögliche Herangehensweise, einen linearen Zusammenhang zwischen den gemessenen u- und v-Komponenten der beiden Messreihen im Überlappungszeitraum zu berechnen. Ist in diesem Zeitraum eine hinreichend gute Korrelation zwischen den beiden Messreihen gegeben, kann der lineare Zusammenhang verwendet werden, um auf Basis der Referenzdaten die Windkomponenten für den fehlenden Zeitraum abzuleiten. Die für die Ergänzung der Datenreihe genutzte Methodik ist im Immissionsgutachten unter Ausweisung der Korrelation zwischen der unterjährigen Reihe und der Referenzdaten zu erläutern.

Die Prüfung der zeitlichen Repräsentativität kann in diesem Fall, wenn vorhanden, anhand mehrjähriger Daten an der Referenzstation erfolgen.

5 Behandlung kleinräumiger meteorologischer Phänomene

Es ist zu prüfen, ob im Untersuchungsgebiet wesentliche Einflüsse von lokalen Windsystemen oder anderen meteorologischen Besonderheiten auf die Ausbreitung der Luftschadstoffe zu erwarten sind. Im nächsten Schritt ist abzuwägen, wie relevant das betreffende Phänomen für die gegenständliche Fragestellung ist.

5.1 Kaltluftabflüsse

Ein Kaltluftabfluss entsteht in windschwachen, klaren Nächten, wenn kalte Luft hangabwärts strömt. Diese kalte Luft sammelt sich am Erdboden, da sie schwerer ist als die wärmere Luft in ihrer Umgebung. Die Geschwindigkeit des Luftstroms hängt von der Hangneigung, der Bodenbeschaffenheit und der Größe des Einzugsgebiets ab, in dem die Kaltluft produziert wird. Nicht bewaldete oder große Grünlandflächen an Hängen begünstigen diesen Effekt.

Zur Bestimmung von Kaltluftabflüssen empfiehlt es sich, die Verteilung der Windrichtungen (Häufigkeit in Prozent) an der jeweiligen Messstation nach Tag (7 bis 19 Uhr) und Nacht (19 bis 7 Uhr) aufzuschlüsseln oder einen mittleren Tagesverlauf der Windrichtungen zu erstellen. Unterschiede in den Windrichtungsverteilungen zwischen Tag und Nacht können auf Kaltluftabflüsse hinweisen, insbesondere wenn die topografischen Gegebenheiten und die Landnutzung um die Messstation diese Vermutung stützen.

In Tälern kann die Analyse schwieriger sein, da übergeordnete Windströmungen ähnliche Windrichtungsverteilungen wie Kaltluftabflüsse aufweisen können. In solchen Fällen bietet es sich an, die Windverhältnisse während wolkenloser und windschwacher Nächte zu untersuchen.

Sind vor Ort keine entsprechenden meteorologischen Messungen verfügbar, können Messungen in vergleichbarer Lage zur Ableitung von Analogieschlüssen herangezogen werden.

Eine weitere Methode zur Bestimmung von Kaltluftabflüssen ist der Einsatz spezieller Modelle, wie zum Beispiel das KLAM21-Modell. KLAM21, entwickelt vom Deutschen Wetterdienst (Sievers, 2005), ist ein zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftströmen in orographisch gegliedertem Gelände. Dabei ist darauf zu achten, dass große Einzugsgebiete modelliert werden und Ergebnisse aus den Randbereichen des Modellgebiets nicht zur Bestimmung herangezogen werden sollten. Ergebnisse der Kaltluftmodellierung mit KLAM21 können, selektiv für jene Zeiträume, in welchen dieses kleinräumige Phänomen vorrangig das Windfeld bestimmt, zur Untersuchung des Einflusses der Kaltluftbildung im konkreten Fall verwendet werden.

Anmerkung: Für Oberösterreich konnte mithilfe des Kaltluftmodells KLAM21 eine Berechnung der Kaltluftabflüsse für das gesamte Bundesland mit einer Auflösung von 50 x 50 Metern erstellt werden. Die Ergebnisse sind im Climate-Air-Information-System für Oberösterreich (CLAIRISA) einsehbar.

Das Modell Palm4U (PARallel Large-Eddy-Simulation Model for Urban Applications) ermöglicht die realitätsnahe Simulation von Kaltluftabflüssen sowie Ausbreitungsrechnung mit hoher räumlicher Auflösung. Die Anforderungen des Modells in Hinblick auf Eingangsdaten sowie die Rechenleistung limitieren derzeit jedoch die praktische Anwendbarkeit im behördlichen Kontext noch entscheidend.

Da mesoskalige prognostische Windfeldmodelle neben den Erhaltungsgleichungen für Energie, Impuls und Masse in der Regel auch die Bodenenergiebilanz simulieren, sind diese Modelle grundsätzlich geeignet, um Kaltluftabflüsse aber auch deren Wechselwirkung mit übergeordneten Lokalwindzirkulationen und/oder der großräumigen Strömung abzubilden (z. B. Gaspard et al., 2023; Oettl, 2021). Da eine horizontale Auflösung von 100 m die typische untere Anwendungsgrenze

bezüglich des Rechengitters darstellt, können sehr kleinräumige und seichte Kaltluftströmungen unter Umständen nicht simuliert werden.

Falls aufgrund der topografischen Lage des Projekts die Beeinflussung der Immissionssituation durch die Bildung von Kaltluftabfluss zu erwarten ist, die aber weder anhand von Messungen noch Modellierung dargestellt werden kann, kann in der Immissionsbetrachtung als „worst case“-Abschätzung eine andauernde, direkte windschwache Anströmung der (hangabwärts) nächstgelegenen Nachbarn bei sehr stabiler Schichtung angesetzt werden.

5.2 Inversionen

Eine Inversion in der Atmosphäre ist ein meteorologisches Phänomen, bei dem innerhalb einer mehr oder weniger mächtigen Luftschicht die Temperatur mit der Höhe nicht gemäß dem üblichen vertikalen Temperaturgradienten abnimmt. Die oberen Luftschichten sind wärmer als die unteren, das bedeutet, das Temperaturverhalten ist invers zum Normalfall. In der praktischen Anwendung können Zusammenhänge zwischen den Ausbreitungsklassen und den charakteristischen Merkmalen bestimmter Wetterlagen, wie beispielsweise Inversionen, abgeleitet werden. Inversionen treten häufig in klaren, windstillen Nächten oder bei Hochdruckwetterlagen auf, wenn Luftmassen absinken und sich erwärmen.

Inversionen fungieren als Sperrschicht für den vertikalen Luftaustausch und begrenzen die Höhe der Mischungsschicht. Entsprechend dieser Tatsache wirken Inversionen als Barriere für die Ausbreitung von Luftschadstoffen und haben somit eine wichtige lufthygienische Bedeutung. Inversionen treten unter verschiedenen meteorologischen Bedingungen auf, infolge unterscheidet man nach ihrer physikalischen Entstehung zwischen Strahlungsinversionen, Absink- und Aufgleitinversionen sowie Turbulenzinversionen. Nach der Art der Schichtung spricht man von Bodeninversionen und abgehobenen Inversionen. Die Stärke der Inversionsschicht kann stark variieren und ist von mehreren Faktoren wie Bewölkungsgrad, Bodenbedeckung, Luftfeuchtigkeit, Strahlungsintensität, Windgeschwindigkeit abhängig.

Für die Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre ist neben der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit vor allem auch das vertikale Durchmischungspotential der Atmosphäre (Turbulenz) von Bedeutung. Die Begriffe Stabilität und Labilität geben Auskunft über die Temperaturschichtung der Atmosphäre. Inversionen repräsentieren (im Bereich der Inversionsschicht) stabile Schichtungen und wirken hemmend auf Vertikalbewegungen. Bodeninversionen werden in der Regel bei der Bestimmung von Ausbreitungsklassen den stabilen Klassen zugeordnet. Bei abgehobenen Inversionen ist in Bodennähe typischerweise neutrale Schichtung vorherrschend.

5.3 Schwachwindlagen

Eine möglichst korrekte Simulation der Windrichtung ist für die Ausbreitungsberechnungen von großer Bedeutung. Große räumliche Variationen in der Windrichtung sind insbesondere bei Schwachwindwetterlagen - also Wetterlagen mit geringen großskaligen Druckdifferenzen – zu erwarten. Verschiedene atmosphärische Phänomene, wie z.Bsp. Mikrofronten (Marth, 2019), Schwerewellen oder horizontales Mäandrieren (Anfossi et al., 2005) kommen als Ursache in Frage. Besonders ausgeprägt sind diese Phänomene bei stabil geschichteter Atmosphäre. Entsprechend Marth (2019) können Phänomene wie das horizontale Mäandrieren einer Strömung bei niedrigen Windgeschwindigkeiten mit Windfeldmodellen aufgrund der zu groben räumlichen Auflösung des Modells, aufgrund fehlender Modellphysik bzw. aufgrund der numerischen Diffusion nicht simuliert werden. Eine korrekte Berechnung der Windrichtung in derartigen Situationen ist folgerichtig selbst

von prognostischen Windfeldmodellen nicht zu erwarten (z. Bsp. Oettl und Verratti, 2021). Eine Methode zur Berücksichtigung von mäandrierenden Strömungen bei Schwachwindlagen in Ausbreitungsrechnungen ist beispielsweise in Oettl et al. (2005) beschrieben.

Die **Kalmenhäufigkeit** (gemäß ÖNORM M 9440 Windgeschwindigkeit unter 0,5 m/s) ist jedenfalls zu quantifizieren. Für die Erfassung der Windgeschwindigkeit kommen in Österreich überwiegend Schalenkreuzanemometer und Ultraschallanemometer zum Einsatz. Ultraschallanemometer messen Windgeschwindigkeiten mit hoher Präzision und Auflösung. Sie sind sehr empfindlich gegenüber kleinen Änderungen in der Windgeschwindigkeit und reagieren fast ohne Verzögerung. Schalenkreuzanemometer benötigen aufgrund ihrer Trägheit eine gewisse Zeit, um auf plötzliche Windänderungen zu reagieren. Die Trägheit der Schalenkreuzanemometer sollte bei Auswertungen über die Kalmenhäufigkeit berücksichtigt werden, vor allem dann, wenn während des Messzeitraums ein Wechsel der beiden Messinstrumente stattgefunden hat.

6 Berücksichtigung des Klimawandels

Wenn die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung als Prognosen der Immissionsbelastung für weiter in der Zukunft liegende Zeiträume getroffen werden, erhebt sich die Frage, ob durch den Klimawandel bedingte Veränderungen der meteorologischen Parameter relevant sein könnten.

Moemken et al. (2018) diskutieren die Modellergebnisse aktueller Klimaszenarien für Europa (EURO-CORDEX) in Hinblick auf Aussagen über die Änderungen der Windgeschwindigkeit mit besonderem Fokus auf die Relevanz für die Windenergie. In den Sommermonaten zeigen die Klimamodelle insbesondere in Mitteleuropa einen allgemeinen Rückgang der mittleren Windgeschwindigkeit. Im Winter zeigen die Klimamodelle in West- und Mitteleuropa einen tendenziellen Anstieg, in Südeuropa einen Rückgang der mittleren Windgeschwindigkeit. Die Übereinstimmung zwischen den Modellen ist für die Sommermonate besser. Die Klimaänderungssignale sind daher für die Sommermonate für fast ganz Europa robust, für die Wintermonate mit einer höheren Unsicherheit behaftet.

Beim Jahresniederschlag zeigen die aktuellen Klimaprognosen für den Alpenraum nur eine geringe Änderung, jedoch eine weitere Verschiebung hin zu hohen Niederschlagsintensitäten auf Kosten der Ereignisse mit geringen Intensitäten (Kotlarski et al., 2023). Tendenzuell ist in Österreich etwas mehr Niederschlag im Winter, aber weniger in Form von Schnee und etwas weniger Niederschlag im Sommer zu erwarten.

Hiebl & Schöner (2018) haben sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf bodennahe Temperaturinversionen befasst und Messdaten in Österreich aus dem Zeitraum 1961 bis 2017 ausgewertet. Diese Studie hat ergeben, dass die Ausbildung von bodennahe Inversionen im Laufe der Zeit weniger häufig geworden sind und die Inversionsschichten weniger stark ausgeprägt sind. Statistisch signifikant sind die Veränderungen im Süden und in der Mitte Österreichs. Die durchschnittlichen Schichtdicken der Inversionen blieb jedoch weitgehend unverändert. Diese Ergebnisse lassen tendenziell eine Abnahme der Häufigkeit stabiler Ausbreitungsbedingungen zu Gunsten neutraler Ausbreitungsbedingungen erwarten.

7 Literatur

- Anfossi, D., Oettl, D., Degrazia, G. & Goulart, A. (2005): An Analysis of Sonic Anemometer Observations in Low Wind Speed Conditions. – *Boundary-Layer Meteorology*, **114**, 179–203.
- Berchet, A., Zink, K., Müller, C., Oettl, D., Brunner, J., Emmenegger, L. & Brunner, D. (2017): A cost-effective method for simulation city-wide air flow and pollutant dispersion at building resolving scale. – *Atmospheric Environment*, **158**, 181–196.
- Demortier, A., Mandement, M., Pourret, V. & Caumont, O. (2024): Assimilation of surface pressure observations from personal weather stations in AROME-France. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **24**, 907–927. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-907-2024>.
- Gaspard, S., Oettl, D. & Lehner, M. (2023): The performance of GRAMM-SCI and WRF in simulating the surface-energy budget and thermally driven winds in an Alpine valley. – *Boundary-Layer Meteorology*, **189**, 251–280. <https://doi.org/10.1007/s10546-023-00835-9>
- Haiden, T., Kann, A., Wittmann, C., Pistotnik, G., Bica, B. & Gruber, C. (2011): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) system and its validation over the eastern alpine region. – *Weather and Forecasting*, **26**, 166–183. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222451.1>
- Hiebl, J. & Schöner, W. (2018): Temperature inversions in Austria in a warming climate – changes in space and time. – *Meteorologische Zeitschrift*, **27/4**, 309–323.
- Kotlarski, S., Gobiet, A., Morin, S., Olefs, M., Rajczak, J. & Samacoïts, R. (2023): 21st Century alpine climate change. – *Climate Dynamics*, **60**, 65–86. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06303-3>
- Mahrt, L. (2019): Microfronts in the nocturnal boundary layer. – *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **145/719**, 546–562.
- Moemken, J., Reyers, M., Feldmann, H. & Pinto, J. G. (2018): Future changes of wind speed and wind energy potentials in EURO-CORDEX ensemble simulations. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**, 6373–6389. <https://doi.org/10.1029/2018JD028473>
- Oettl, D. (2021): Development of the mesoscale model GRAMM-SCI: Evaluation of simulated highly-resolved flow fields in an Alpine and Pre-Alpine region. – *Atmosphere*, **12**, 298. <https://doi.org/10.3390/atmos12030298>
- Oettl, D. & Veratti, G. (2021): A comparative study of mesoscale flow-field modelling in an Eastern Alpine region using WRF and GRAMM-SCI. – *Atmospheric Research*, **249**, 105288. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105288>
- Oettl, D. & Reifelshammer, R. (2023): Recent developments in high-resolution wind field modelling in complex terrain for dispersion simulations using GRAMM-SCI. – *Air Quality, Atmosphere & Health*, **16**, 2209–2223. <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01403-3>
- Oettl, D., Goulart, A., Degrazia, G. & Anfossi, D. (2005): A new hypothesis on meandering atmospheric flows in low wind speed conditions. – *Atmospheric Environment*, **39**, 1739–1748.
- ÖNORM M 9440 (2019): Ausbreitung von luftverunreinigenden Stoffen in der Atmosphäre – Berechnung von Immissionskonzentrationen. Austrian Standards, Komitee 139, Ausgabe 1.10.2019
- ÖNORM M 9490 (2025-04-01 - Entwurf): Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung.

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

Uhrner, U. & Jost, S., (2024): Hochaufgelöste GRAMM Windfeldsimulationen im Rahmen des Forschungsprojektes Klima-Informations-System Graz. – Bericht Nr. I-20/24/UUh V&U Inst-21/013/630.

Uhrner, U., Werhahn, J., Reifeltshammer, R. & Forkel, R. (2019): Development and Application of a mult-scale flow field analysis system for complex terrain, International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Abstract, 5 S., Brügge.

VDI 3783, Blatt 7 (2017): Umweltmeteorologie - Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder. Herausgeber: VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss.

VDI 3783, Blatt 9 (2017): Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung. Herausgeber: VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss.

VDI 3783, Blatt 20 (2017): Umweltmeteorologie Übertragbarkeitsprüfung meteorologischer Daten zur Anwendung im Rahmen der TA Luft. Herausgeber: VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss.

VDI 3783, Blatt 21 (2017): Umweltmeteorologie Qualitätssicherung meteorologischer Daten für die Ausbreitungsrechnung nach TA Luft und GIRL. Herausgeber: VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Geologischen Bundesanstalt](#)

Jahr/Year: 2025

Band/Volume: [154](#)

Autor(en)/Author(s): Baumann-Stanzer Kathrin

Artikel/Article: [Leitfaden Qualitätssicherung meteorologischer Eingangsdaten in die Ausbreitungsmodellierung Anleitung für die gutachterliche Praxis in Österreich 1-24](#)