



Bundesamt  
für Strahlenschutz

**Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz**

**Weiterentwicklung des atmosphärischen  
Ausbreitungsmodells ARTM bezüglich  
weiterer Anwendungsbereiche, Windfeld-  
und Grenzschichtmodell, Dokumentation**

**Vorhaben 3616S72575**

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)  
gGmbH

C. Richter  
H. Thielen  
K. Spieker

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz,  
nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und im Auftrag des Bundesamtes  
für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUV (Ressortforschungsplan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

## **Impressum**

Bundesamt für Strahlenschutz  
Postfach 10 01 49  
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de)

De-Mail: [epost@bfs.de-mail.de](mailto:epost@bfs.de-mail.de)

[www.bfs.de](http://www.bfs.de)

BfS-RESFOR-210/23

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2023032236885

Salzgitter, Februar 2023

Weiterentwicklung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM bezüglich weiterer Anwendungsbereiche, Windfeld- und Grenzschichtmodell, Dokumentation

Abschlussbericht zum Vorhaben 3616S72575

C. Richter  
H. Thielen  
K. Spieker

Oktober 2020  
3616S72575

**Anmerkung:**

Dieser Bericht wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit im Rahmen des Vorhabens 3616S72575 erstellt.

Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

## **Deskriptoren**

ARTM, Ausbreitungsmodell, Grenzschichtmodell, Windfeldmodelle, GO-ARTM

## **Kurzfassung**

Dieser Bericht enthält die Ergebnisse des Vorhabens 3616S72575 "Weiterentwicklung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM bezüglich weiterer Anwendungsbereiche, Windfeld- und Grenzschichtmodell, Dokumentation".

Im Vorhaben wurde zunächst der Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich der atmosphärischen Ausbreitungsrechnung von Radionukliden zusammengetragen und dokumentiert. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde ARTM angepasst und weiterentwickelt.

Die in diesem Vorhaben erstellte ARTM Version 3.0.0 repräsentiert damit wieder den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik und schreibt diesen Stand fort.



## **Abstract**

This report contains the results of the project 3616S72575 "Further Development of the atmospheric Dispersion Model ARTM concerning added fields of application, wind field model, boundary layer model, documentation".

In the project the state of the art of science and technology regarding the atmospheric dispersion calculation of radionuclides was compiled and documented. ARTM was adapted and further developed based on the knowledge gained.

The ARTM version 3.0.0 created in this project represents again the current state of science and technology and updates this state.



# Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzfassung .....</b>	<b>I</b>
	<b>Abstract.....</b>	<b>III</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>AP 1: Aufarbeitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>5</b>
2.1	Einleitung .....	5
2.2	Grenzschichtmodell.....	7
2.2.1	Änderungen in der TA-Luft.....	7
2.2.2	Washoutkoeffizienten und sonstige Parameter für Stäube .....	10
2.2.3	Zuordnung der Landnutzungsklassen zu Rauigkeitslängen .....	11
2.2.4	Gebietsgröße um die Quelle zur Ermittlung der Rauigkeitslänge .....	14
2.2.5	Zuordnung von Obukhov-Längen zu Klug/Manier-Klassen.....	15
2.2.6	Wind- und Turbulenzprofile nach neuer VDI 3783 Blatt 8 .....	17
2.3	Windfeldmodelle.....	17
2.4	HARMO18 und HARMO19 .....	20
2.4.1	HARMO18 .....	20
2.4.2	HARMO19 .....	23
2.5	Zusammenfassung.....	26
<b>3</b>	<b>AP 2: Einbindung eines prognostischen Windfeld- und Turbulenzfeldmodells in ARTM und Konzepte zur Reduzierung von Programmabbrüchen bei TALdia .....</b>	<b>27</b>
3.1	Einleitung .....	27
3.2	Identifikation und Bewertung von prognostischen Windfeld- und Turbulenzfeldmodellen.....	28
3.2.1	Motivation .....	28
3.2.2	Bewertungs- und Entscheidungskriterien.....	30
3.2.3	Betrachtung und Bewertung der Windfeldmodelle .....	33
3.2.4	Begründung für die Auswahl von MISKAM .....	40

3.3	Implementierung einer Schnittstelle zu MISKAM .....	41
3.3.1	Erstellung von MISKAM-Eingabedateien .....	43
3.3.2	Bereitstellung der von MISKAM erzeugten Strömungs- und Turbulenzfelder für Ausbreitungsrechnungen mit ARTM .....	48
3.3.3	Anpassungen an ARTM zur Verwendung der sequenziellen Felder.....	50
3.3.4	Testrechnungen .....	52
3.4	Zusammenfassung.....	56
<b>4</b>	<b>AP 3: Grenzschichtmodell.....</b>	<b>57</b>
4.1	Einleitung .....	57
4.2	Implementierung der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 .....	57
4.2.1	Ansteuerung des neuen Grenzschichtmodells.....	58
4.2.2	Implementierung im Quellcode .....	58
4.2.3	Verifikation der Implementierung und Vergleich mit dem bisherigen Standard-Grenzschichtmodell .....	60
4.3	Implementierung der Änderungen der TA Luft.....	66
4.3.1	Automatische Bestimmung von Rauigkeitslängen aus Geodaten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie .....	66
4.3.2	Mittelungsverfahren für die Rauigkeitslänge .....	70
4.3.3	Zuordnung von Obukhov-Längen zu Klug/Manier-Klassen.....	71
4.3.4	Washoutkoeffizienten für Stäube .....	71
4.4	Realisierung GPZD .....	72
4.4.1	Notwendige Grenzschichtparameter .....	72
4.4.2	Erstellung der GPZD und Implementierung im Quellcode .....	73
4.4.3	Validierung der Ergebnisse .....	74
4.4.4	Behandlung von Datenlücken .....	74
4.5	Zusammenfassung.....	76
<b>5</b>	<b>AP 4: Weltweite Nutzung von ARTM .....</b>	<b>77</b>
5.1	Einleitung .....	77
5.2	Export/Importschnittstelle für die meteorologischen Zeitreihen.....	79
5.2.1	Export von AKterm-Dateien .....	80
5.2.2	Export von Zeitreihen (dmna).....	80

5.2.3	Import von AKterm-Dateien.....	80
5.2.4	Import von Zeitreihen (dmna).....	80
5.3	Automatische Erzeugung und Rechnung der Vegetationsperioden .....	81
5.3.1	Voraussetzungen für die Jahresrechnung .....	81
5.3.2	Eingabeparameter.....	81
5.3.3	Bestimmung der Niederschlagssummen für die Vegetationsperiode.....	82
5.3.4	Ausgabedateien .....	82
5.3.5	Anpassungen im ARTM-Quellcode .....	83
5.4	Zusammenfassung.....	84
<b>6</b>	<b>AP 5: Technische Programmverbesserungen, Robustheit.....</b>	<b>85</b>
6.1	Einleitung .....	85
6.2	Verbesserungen bei den Fehlerangaben .....	85
6.2.1	Prüfung der <code>ARTM.txt</code> .....	86
6.2.2	Prüfung der Ausbreitungsklassenzeitreihe (AKTerm) .....	89
6.2.3	Prüfung der Ausbreitungsklassenstatistik AKS .....	90
6.2.4	Prüfung der Datei <code>artm.settings</code> .....	90
6.2.5	Prüfung der Datei <code>zeitreihe.dmna</code> .....	91
6.2.6	Prüfung der Datei <code>gpzd.dmna</code> .....	92
6.3	Verbesserungen zur Eingabe und Programmperformance.....	92
6.3.1	Zeitreihen .....	93
6.3.2	Beobachtungspunkte .....	96
6.3.3	Vorgabe einer Mischungsschichthöhe .....	99
6.3.4	Ensemblerechnungen .....	100
6.3.5	Parallelisierung des Programms TALdia / ARTM.....	102
6.3.6	Ablösung des ARR-Formats für temporäre Dateien.....	110
6.3.7	64Bit-Version.....	111
6.3.8	Verbesserungen zum Programmoutput .....	111
6.3.9	Verbesserungen zur Dokumentierung und technischen Umsetzung .....	114
<b>7</b>	<b>AP 6: Workshops .....</b>	<b>117</b>
7.1	Schulung .....	117

7.2	Workshop .....	117
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>121</b>
8.1	Ausblick .....	121
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>123</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>133</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>135</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>139</b>
<b>A</b>	<b>Das GPZD Format .....</b>	<b>141</b>

# 1 Einleitung

Die neue EU BSS (Richtlinie 2013/59/EURATOM /EUR 14/) fordert in Kapitel VIII „Exposition der Bevölkerung“, Abschnitt 1 „Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung und langfristiger Gesundheitsschutz unter normalen Bedingungen“, Artikel 66 „Schätzung der Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung“ unter Absatz (2): „Die Mitgliedstaaten bestimmen die Tätigkeiten, für die eine realistische Ermittlung“ (der Dosen für Einzelpersonen) „durchgeführt werden muss, und die Tätigkeiten, für die eine Untersuchung zum Nachweis der Einhaltung von Grenzwerten ausreichend ist.“ Bereits in Artikel 65 „Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung“ wird in Absatz (2) zu Ableitungsgenehmigungen klargestellt: „Darüber hinaus tragen diese Ableitungsgenehmigungen gegebenenfalls den Ergebnissen einer allgemeinen Untersuchung auf der Grundlage international anerkannter wissenschaftlicher Empfehlungen Rechnung...“.

Für eine Ermittlung der Dosen für Einzelpersonen und/oder allgemeinen Untersuchungen zum Nachweis der Grenzwerteinhaltung sind Ausbreitungsrechnungen nötig, da die Radionuklidkonzentrationen in der Luft oder am Boden in der Umgebung von Anlagen, die eine Ableitungsgenehmigung haben, meist unter den Nachweisgrenzen von entsprechenden Messgeräten liegen bzw. im Rahmen von Genehmigungsverfahren noch gar keine Ableitungen stattfinden. Um eine, wie in den EU BSS geforderte, realistische Ermittlung der Dosen zu gewährleisten, sollte also auch die Ausbreitungsrechnung möglichst realitätsnah sein. Auch wenn es keine international harmonisierte (wissenschaftlich/technische) Empfehlung für die Ausbreitungsrechnung im Rahmen von behördlichen Aufsichts- und Genehmigungsaufgaben gibt /ROC 20/, sollte zumindest national ein einheitlicher Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) angestrebt werden /RIC 16/.

Bei der Ausbreitungsrechnung für konventionelle Luftschadstoffe wie z. B. Stickoxide, Schwefeldioxid oder Feinstaub schreibt die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) /TAL 02/ schon seit 2002 die Verwendung eines Lagrange'schen Partikelmodells nach VDI Richtlinie 3945 Blatt 3 /VDI 00/ vor, das nach wie vor dem gegenwärtigen Stand von W&T entspricht. Bei der atmosphärischen Ausbreitung von Radionukliden ist erst seit Juni 2020 durch die Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten) /AVV 20/ die Verwendung eines Lagrange'schen Partikelmodells vorgeschrieben. In der bis dahin gültigen Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (AVV) /BMU 12/ kam noch das

Gauß-Fahnenmodell Anwendung. Einzig die Störfallberechnungsgrundlagen (SBG) /SSK 04/ erlauben die Verwendung des Gauß-Fahnenmodells noch.

Im Rahmen von bisher drei Eigenforschungsvorhaben /GRS 07/, /GRS 12/, /GRS 15a/ wurde auf Basis des Referenzprogramms für die Ausbreitungsrechnung nach TA Luft (AUSTAL2000, /JAN 03/, /UBA 20/) das atmosphärische Radionuklid-Transport-Modell ARTM entwickelt, weiterentwickelt und in zahlreichen Aspekten verifiziert und validiert. Seit der ersten Implementierung von ARTM bzw. AUSTAL2000 hat sich der Stand von W&T weiterentwickelt. Die TA Luft wird derzeit überarbeitet und es liegt seit 2018 ein Referentenentwurf vor /BMU 18/. Zudem wurde die VDI Richtlinie 3783 Blatt 8 /VDI 02/ überarbeitet, auf deren Vorgaben die Berechnung der Wind- und Turbulenzprofile von ARTM basiert (neben Vorgaben durch die noch gültige TA Luft). Die neue Version wurde im April 2017 veröffentlicht /VDI 17a/.

Um weiterhin zu ermöglichen, dass die Ausbreitungsrechnung für Radionuklide dem Stand von W&T entsprechend durchgeführt werden kann, war daher eine Aktualisierung von ARTM unabdingbar. Diese wurde in dem in diesem Bericht vorgestellten Vorhaben umgesetzt. Dabei handelt es sich bei dem hier vorliegenden Abschlussbericht um eine Kompilierung der einzelnen Teil-Abschlussberichte, die im Laufe des Vorhabens bereits für die einzelnen Arbeitspakete erstellt und mit dem Auftraggeber abgestimmt wurden und hier inhaltlich unverändert übernommen wurden, wobei die jeweiligen Kurzfassungen und Abstracts der Teil-Abschlussberichte und die Anhänge des Teil-Abschlussberichtes zu AP 5 und 6 mit den Vortragsfolien der Schulung und des Workshops hier nicht wiedergegeben wurden.

Im hier vorgestellten Vorhaben wurde zunächst der Stand von W&T im Rahmen des Arbeitspaktes (AP) 1 eingehend recherchiert. Die Ergebnisse des AP 1 sind in Kapitel 2 dieses Berichtes dokumentiert. Der entsprechende Teil-Abschlussbericht dieses Vorhabens wurde bereits im September 2019 abgestimmt und fertig gestellt. Zu diesem Zeitpunkt war insbesondere die AVV Tätigkeiten noch nicht veröffentlicht und wird nur als Entwurfssfassung geführt.

Neben den, durch die Überarbeitung der Vorschriften und Richtlinien notwendigen Anpassungen des Programms, ergaben sich auch aus den Ergebnissen des Vorläufervorhabens /GRS 15a/ weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

So unterliegt das in ARTM (und AUSTAL2000) standardmäßig verwendete diagnostische Windfeldmodell TALdia /JAN 04/ diversen Beschränkungen, wodurch ARTM in seiner Anwendbarkeit deutlich eingeschränkt wird /THI 16/. Im Rahmen des AP 2 wurde daher eine Schnittstelle zu einem prognostischen Windfeldmodell geschaffen. Die Auswahl des prognostischen Windfeldmodells sowie die Implementierung der Schnittstelle werden in Kapitel 3 vorgestellt.

Durch die Validierungsbestrebungen des Vorgängervorhabens wurde deutlich, dass der in ARTM (und AUSTAL2000) bisher ausschließlich praktizierte Modellierungsansatz für die Grenzschicht über standardisierte Wind- und Turbulenzprofile für die Betrachtung kürzerer Zeiträume als Jahresmittelwerte zu wenig realitätsnahen Ausbreitungsrandbedingungen führen kann. Daher wurde neben der Aktualisierung des Grenzschichtmodells auf die neue VDI Richtlinie 3783 Blatt 8 auch die Möglichkeit geschaffen, dem Ausbreitungsmodell komplette Grenzschichtprofile zeitabhängig vorzugeben. Die Arbeiten zum Grenzschichtmodell wurden innerhalb des AP 3 verwirklicht und werden in Kapitel 4 dieses Berichtes beschrieben. Diese Anpassungen sind insbesondere für eine Anwendung von ARTM für Standorte außerhalb Mitteleuropas relevant, die durch die bisher verwendeten Standardprofile der Grenzschicht schlecht repräsentiert werden. Weitere Anpassungen, welche die Anwendung außerhalb Mitteleuropas erleichtern, waren Teil des AP 4 und werden in Kapitel 5 erläutert.

Zahlreiche weitere technische Programmverbesserungen im Sinne der Anwenderfreundlichkeit, der Programmperformance und sowie weitere Analysemöglichkeiten der Simulationsergebnisse durch erweiterte Ergebnisdateien, wurden im Rahmen des AP 5 durchgeführt und finden sich in Kapitel 6.

Zum intensiven (Erfahrungs-)Austausch mit Fachkollegen und Anwendern wurde im Rahmen des AP 6 dieses Vorhabens eine Schulung und ein Workshop durchgeführt. Erläuterungen dazu werden in Kapitel 7 gegeben.



## **2 AP 1: Aufarbeitung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik**

### **2.1 Einleitung**

Die neue EU BSS (Richtlinie 2013/59/EURATOM /EUR 14/) fordert in Kapitel VIII „Exposition der Bevölkerung“, Abschnitt 1 „Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung und langfristiger Gesundheitsschutz unter normalen Bedingungen“, Artikel 66 „Schätzung der Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung“ unter Absatz (2): „Die Mitgliedstaaten bestimmen die Tätigkeiten, für die eine realistische Ermittlung“ (der Dosen für Einzelpersonen) „durchgeführt werden muss, und die Tätigkeiten, für die eine Untersuchung zum Nachweis der Einhaltung von Grenzwerten ausreichend ist.“ Bereits in Artikel 65 „Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung“ wird in Absatz (2) zu Ableitungsgenehmigungen klargelegt: „Darüber hinaus tragen diese Ableitungsgenehmigungen gegebenenfalls den Ergebnissen einer allgemeinen Untersuchung auf der Grundlage international anerkannter wissenschaftlicher Empfehlungen Rechnung...“.

Für eine Ermittlung der Dosen für Einzelpersonen und/oder allgemeinen Untersuchungen zum Nachweis der Grenzwerteinhaltung sind Ausbreitungsrechnungen nötig, da die Radionuklidkonzentrationen in der Luft oder am Boden in der Umgebung von Anlagen, die eine Ableitungsgenehmigung haben, meist unter den Nachweisgrenzen von entsprechenden Messgeräten liegen bzw. im Rahmen von Genehmigungsverfahren noch gar keine Ableitungen stattfinden. Um eine, wie in den EU BSS geforderte, realistische Ermittlung der Dosen zu gewährleisten, sollte also auch die Ausbreitungsrechnung möglichst realitätsnah sein.

Bei der Ausbreitungsrechnung für konventionelle Luftschadstoffe wie z.B. Stickoxide, Schwefeldioxid oder Feinstaub schreibt die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) /TAL 02/ schon seit 2002 die Verwendung eines Lagrange'schen Partikelmodells nach VDI Richtlinie 3945 Blatt 3 /VDI 00/ vor, das dem gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) entspricht.

Durch die Umsetzung der EU BSS wurde während dieses Vorhabens in den AVV-Tätigkeiten /AVV 20/ das Gauß-Fahnenmodell durch ein Lagrange'sches Partikelmodell auch auf Verordnungsebene ersetzt.

Im Rahmen von bisher drei Eigenforschungsvorhaben /GRS 07/, /GRS 12/, /GRS 15a/ wurde auf Basis des Referenzprogramms für die Ausbreitungsrechnung nach TA Luft (AUSTAL2000, /JAN 03/, /GRS 01/, /UBA 20/) das Lagrange'sche Partikelmodell zur atmosphärischen Ausbreitungsrechnung von Radionukliden ARTM (atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell) entwickelt, weiterentwickelt und in zahlreichen Aspekten verifiziert und validiert.

Seit der ersten Implementierung von ARTM bzw. AUSTAL2000 hat sich der Stand von W&T weiterentwickelt. Beispielsweise findet derzeit eine Überarbeitung der TA Luft statt (UBA-Forschungsvorhaben FKZ 3714 43 204 0). Zudem wurde die VDI Richtlinie 3783 Blatt 8 /VDI 02/ überarbeitet, auf deren Vorgaben die Berechnung der Wind- und Turbulenzprofile von ARTM basiert (neben Vorgaben durch die TA Luft).

Diese Überarbeitung der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 stellt zusammen mit den Änderungen in der TA-Luft den aktuellen Stand von W&T bezüglich der Modellierung der atmosphärischen Grenzschicht dar. Im folgenden Kapitel 2.2 werden diese Änderungen an der Windprofil- und Turbulenzprofil-Modellierung beschrieben und die nötigen Programmänderungen dargelegt. Details zu der Implementierung der neuen VDI 3783, Blatt 8 enthält auch der Kapitel 4 zu AP 3 (Grenzschichtmodelle).

Um eine Ausbreitungsrechnung durchführen zu können, müssen an jeder Stelle des Simulationsgebietes die meteorologischen Randbedingungen Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Turbulenz (bzw. die Windgeschwindigkeitsfluktuationen) und Regenrate bekannt sein. Bei ebenem Gelände und ohne Gebäudeeinfluss auf das Strömungsfeld reicht, wenn man eine einheitliche Regenrate im gesamten Simulationsgebiet voraussetzt, das Grenzschichtmodell, um an jedem Ort die benötigten meteorologischen Bedingungen zu simulieren, die dann lediglich von der Höhe über Grund und nicht der horizontalen Lage abhängt.

Bei für die Ausbreitungsrechnung „nicht vernachlässigbaren“ Geländeunebenheiten<sup>1</sup> oder relevantem Gebäudeeinfluss<sup>2</sup> reicht eine reines Grenzschichtmodell für die Simulation des Strömungsfeldes nicht mehr aus. Gelände und/oder Gebäude beeinflussen dann das Strömungs- und Turbulenzfeld, so dass es horizontal nicht mehr homogen ist. In solchen Fällen wird ein Modell zur Simulation des Wind- und Turbulenzfeldes benötigt, um an jedem Ort im Simulationsgebiet die meteorologischen Randbedingungen für die Ausbreitungsrechnung bereitzustellen. Kapitel 2.3 gibt einen Überblick zu aktuellen Entwicklungen auf diesem Gebiet.

In Kapitel 2.4 werden schließlich die für das Vorhaben relevanten Erkenntnisse zu Stand von W&T, die während der Teilnahme des Forschungsnehmers bei den internationalen Konferenzen zur „Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes“ (HARMO) 18 und 19 gewonnen wurden, zusammenfassend dargestellt.

## **2.2 Grenzschichtmodell**

Im Folgenden werden die Änderungen des Standes von W&T zusammenfassend dargestellt und auf ihre Relevanz für ARTM geprüft. Auf die gegebenenfalls notwendige konkrete Implementierung der Änderungen wird im Kapitel 4 zu AP 3 explizit eingegangen.

### **2.2.1 Änderungen in der TA-Luft**

Die Technische Anleitung zu Reinhaltung der Luft (TA-Luft) wird aktuell an den Stand von Wissenschaft und Technik angepasst. Im Anhang 2 (Ausbreitungsrechnung) des Referentenentwurfs der TA-Luft vom 16.7.2018 /BMU 18/ sind umfangreiche Änderungen bei der Durchführung der Ausbreitungsrechnung enthalten. Im begleitenden Forschungsvorhaben des Ingenieurbüros Janicke FKZ 3714 43 204 00 /JAN 17/ wurden

---

<sup>1</sup> In der TA Luft wird dies folgendermaßen definiert: „Unebenheiten des Geländes sind in der Regel nur zu berücksichtigen, falls innerhalb des Rechengebietes Höhendifferenzen zum Emissionsort von mehr als dem 0,7-fachen der Schornsteinbauhöhe und Steigungen von mehr als 1:20 auftreten. Die Steigung ist dabei aus der Höhendifferenz über eine Strecke zu bestimmen, die dem 2-fachen der Schornsteinbauhöhe entspricht.“

<sup>2</sup> Eine explizite Berücksichtigung von Bebauung wird in der TA Luft für Gebäude gefordert, deren Entfernung vom Quellort (Schornstein) kleiner als das 6-fache ihrer Höhe oder kleiner als die 6-fache Schornsteinhöhe ist und die Quellhöhe niedriger als das 1,7fache der Gebäudehöhe ist.

diese Änderungen beschrieben und dokumentiert. Neben den mehr redaktionellen Änderungen betreffen die Überarbeitungen im Wesentlichen

- die Geruchsausbreitung,
- die erforderliche Bauhöhe von Schornsteinen,
- die nasse Deposition mit geänderten Parametern,
- die Deposition von Stickstoff,
- den Übergang von CORINE Land Cover (CLC) Daten zum Landbedeckungsmodell Deutschland (LBM-DE) und damit einhergehend
  - teilweise Änderungen bei der Zuordnung von Landnutzungsklassen zu Bodenrauigkeiten und
  - die Bestimmung des Mittelwertes der Rauigkeitslänge im Umkreis um den Quellort (oder die Quellorte) mit dem Radius der 15- statt vorher 10-fachen der Freisetzungshöhe(n),
- Vertikalprofile nach VDI 3783, Blatt 8 (aktualisierte Version April 2017),
- die Änderung bei der Klassierung der Obukhov-Länge in Abhängigkeit von der Stabilitätsklasse nach Klug/Manier und der Rauigkeitslänge und
- Abstandskurven für Ammoniak.

Da die Überarbeitung VDI 3782, Blatt 3 und VDI 3784, Blatt 2 noch nicht abgeschlossen ist, erfolgt kein Eingang der neuen Verfahren zur Ermittlung der Abgasfahnenüberhöhung in die TA-Luft.

Die in diesem Referentenentwurf zitierten VDI-Richtlinien sind in Tab. 2.1 wiedergegeben. Neben den VDI Nummer und den Titeln sind in der Tabelle die Veröffentlichungsdaten angegeben und in der letzten Spalte wird spezifiziert, in wieweit die jeweilige Richtlinie programmtechnisch in ARTM umgesetzt werden muss bzw. umgesetzt ist oder ob die Anwenderinnen und Anwender die Richtlinie bei der Durchführung einer TA Luft konformen Ausbreitungsrechnung für Radionuklide beachten müssen.

**Tab. 2.1** Im Referentenentwurf zu TA-Luft verwendete VDI-Richtlinien und deren Relevanz für ARTM Ausbreitungsrechnungen

<b>Richtlinie</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Datum</b>	<b>betrifft</b>
VDI 3781, Blatt 4	Umweltmeteorologie – Ableitbedingungen für Abgase – Kleine und mittlere Feuerungsanlagen sowie andere als Feuerungsanlagen	2017-07	Benutzer
VDI 3782, Blatt 1	Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Gaußsches Fahnenmodell zur Bestimmung von Immissionskenngrößen	2016-01	unrelevant
VDI 3782, Blatt 5	Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Depositionsparameter	2006-04	umgesetzt
VDI 3782, Blatt 6	Umweltmeteorologie – Atmosphärische Ausbreitungsmodelle – Bestimmung der Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier	2017-04	Benutzer
VDI 3783, Blatt 7	Umweltmeteorologie - Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder	2017-05	Benutzer
VDI 3783, Blatt 8	Umweltmeteorologie – Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle	2017-04	umgesetzt
VDI 3783, Blatt 9	Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung	2017-05	Benutzer
VDI 3783, Blatt 16	Umweltmeteorologie - Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Verfahren zur Anwendung in Genehmigungsverfahren nach TA Luft	2015-06	Benutzer
VDI 3783, Blatt 19	Umweltmeteorologie - Reaktionsmechanismus zur Bestimmung der Stickstoffdioxid-Konzentration	2017-04	unrelevant
VDI 3783, Blatt 20	Umweltmeteorologie – Übertragbarkeitsprüfung meteorologischer Daten zur Anwendung im Rahmen der TA Luft	2017-03	Benutzer
VDI 3783, Blatt 21	Umweltmeteorologie - Qualitätssicherung meteorologischer Daten für die Ausbreitungsrechnung nach TA Luft und GIRL	2017-03	Benutzer
VDI 3945, Blatt 3	Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Partikelmodell	2000-09	beachtet

Neben den zu beachtenden VDI Richtlinien sind folgende Änderungen an der TA-Luft für ARTM relevant:

- Washoutkoeffizienten für Stäube, siehe Abschnitt 2.2.2,
- Zuordnung der Landnutzungsklassen zu Rauigkeitslängen (Landbedeckungsmodell Deutschland, LBM-DE), siehe Abschnitt 2.2.3,
- 15- statt 10-fache Schornsteinhöhe als Radius um den Schornstein für Mittelung der Rauigkeitslänge, siehe Abschnitt 2.2.4,
- Zuordnung von Obukhov-Längen zu Klug/Manier-Klassen, siehe Abschnitt 2.2.5,
- Wind- und Turbulenzprofile nach neuer VDI 3783 Blatt 8, siehe Abschnitt 2.2.6 und
- Textänderungen zu Einschränkungen für die Verwendung eines diagnostischen Windfeldmodells<sup>3</sup>.

## 2.2.2 Washoutkoeffizienten und sonstige Parameter für Stäube

Im Gegensatz zum aktuellen Referenzmodell der TA-Luft /TAL 02/ AUSTAL2000 war bereits in der ersten Version von ARTM ein Verfahren zur Berechnung der nassen Deposition der betrachteten Luftschadstoffe (im Fall von ARTM also der Radionuklide) integriert.

Die in ARTM bisher verwendeten Parameter für die Washoutkoeffizienten sind in der folgenden Tab. 2.2 angegeben. Das Symbol  $d_a$  steht dabei für den sogenannten aerodynamischen Äquivalentdurchmesser, einem Maß für die Größe eines Partikels in Bezug auf sei Verhalten innerhalb einer Luftströmung.

Die in der neuen AVV Tätigkeiten /AVV 20/ verwendeten (und im Referentenentwurf zu TA-Luft enthaltenen) Washoutkoeffizienten für Stäube weichen gegenüber den in ARTM Version 2.8.0 verwendeten Werten ab. Diese Washoutkoeffizienten sind in Tab. 2.3 dargestellt und werden ab Version 3.0.0 von ARTM in der zugehörigen artm.settings-Datei übernommen. Die ebenfalls angegebenen Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeiten sind bei ARTM und dem Referentenentwurf zu TA-Luft identisch und entsprechen die Vorschriften von der neue AVV /AVV 20/.

---

<sup>3</sup> Im Referentenentwurf findet zudem eine Festlegung auf das diagnostische Windfeldmodell TALdia /JAN 04/ statt, dass auch in ARTM verwendet wird. Sollte der Referentenentwurf so umgesetzt werden, dann scheinen andere diagnostische Windfeldmodelle nicht mehr TA Luft konform anwendbar zu sein.

**Tab. 2.2** Bisher in ARTM verwendete Washoutkoeffizienten für die verschiedenen Größenklassen von Stäuben

Klasse	$d_a$ in $\mu\text{m}$	Washoutkoeffizient $\Lambda_0$ in 1/s für Niederschlagsintensität $I_0=1\text{mm/h}$
1	kleiner 2,5	$1 \cdot 10^{-4}$
2	2,5 bis 10	$2 \cdot 10^{-4}$
3	10 bis 50	$3 \cdot 10^{-4}$
4	größer 50	$4 \cdot 10^{-4}$
u	größer 10	$3 \cdot 10^{-4}$

**Tab. 2.3** Washoutkoeffizienten nach AVV Tätigkeiten /AVV 20/

Klasse	$d_a$ in $\mu\text{m}$	Washoutkoeffizient $\Lambda_0$ in 1/s für Niederschlagsintensität $I_0=1\text{mm/h}$
1	kleiner 2,5	$0,3 \cdot 10^{-4}$
2	2,5 bis 10	$1,5 \cdot 10^{-4}$
3	10 bis 50	$4,4 \cdot 10^{-4}$
4	größer 50	$4,4 \cdot 10^{-4}$

### 2.2.3 Zuordnung der Landnutzungsklassen zu Rauigkeitslängen

Die Zuordnung der Landnutzungsklassen zu Rauigkeitslängen  $z_0$  nach /BMU 18/ sind in Tab. 2.4 zusammengestellt. Zum Vergleich sind die bisherigen Zuordnungen von Landnutzungsklassen in Tab. 2.5 wiedergegeben und in Tab. 2.4 sind zusätzlich die Verschiebungen markiert. Generell lässt sich dabei feststellen, dass ausschließlich Verschiebungen hin zu größeren Rauigkeitslängen festgelegt wurden. Die größte Änderung betrifft die Landnutzungsklasse natürliches Grünland (321), dem bisher eine Rauigkeitslänge von 2 cm zugeordnet war und nun ein um eine Größenordnung höherer Wert von 20 cm.

**Tab. 2.4** Zuordnungen von Landnutzungsklassen zu Rauigkeitslängen nach /BMU 18/

<b>z<sub>0</sub> in m</b>	<b>Klasse (LBM-DE)</b>
0,01	Strände, Dünen und Sandflächen (331); Wasserflächen (512)
0,02	Flächen mit spärlicher Vegetation (333); Salzwiesen (421); in der Gezeitenzone liegende Flächen (423); Gewässerläufe (511); Mündungsgebiete (522)
0,05	Abbauflächen (131); Deponien und Abraumhalden (132) <sup>a</sup> ; Sport- und Freizeitanlagen (142); Gletscher und Dauerschneegebiete (335); Lagunen (521)
0,10	Flughäfen (124); nicht bewässertes Ackerland (211) <sup>b</sup> ; Wiesen und Weiden (231) <sup>a</sup> ; Brandflächen (334) <sup>e</sup> ; Sümpfe (411); Torfmoore (412); Meere und Ozeane (523)
0,20	Straßen, Eisenbahn (122); städtische Grünflächen (141); Weinbauflächen (221); komplexe Parzellenstrukturen (242), Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung (243), natürliches Grünland (321) <sup>a</sup> ; Heiden und Moorheiden (322); Felsflächen ohne Vegetation (332)
0,50	Hafengebiete (123); Obst- und Beerenobstbestände (222); Wald-Strauch-Übergangsstadien (324)
1,00	Nicht durchgängig städtische Prägung (112); Industrie- und Gewerbeflächen (121); Baustellen (133)
1,50	Nadelwälder (312) <sup>c</sup> ; Mischwälder (313)
2,00	Durchgängig städtische Prägung (111); Laubwälder (311) <sup>d</sup> ;
	<sup>a</sup> in der früheren Version in der 0,02 m Klasse <sup>b</sup> in der früheren Version in der 0,05 m Klasse <sup>c</sup> in der früheren Version in der 1,00 m Klasse <sup>d</sup> in der früheren Version in der 1,50 m Klasse <sup>e</sup> in der früheren Version nicht vorhandene Klasse

**Tab. 2.5** Bisher in ARTM für die Bestimmung der Rauigkeitslänge verwendete Zuordnung zu Landbenutzungsklassen

$z_0$ in m	CORINE-Klasse
0,01	Strände, Dünen und Sandflächen (331); Wasserflächen (512)
0,02	Deponien und Abraumhalden (132); Wiesen und Weiden (231); Natürliches Grünland (321); Flächen mit spärlicher Vegetation (333); Salzwiesen (421); In der Gezeitenzone liegende Flächen (423); Gewässerläufe (511); Mündungsgebiete (522)
0,05	Abbauflächen (131); Sport- und Freizeitanlagen (142); Nicht bewässertes Ackerland (211); Gletscher und Dauerschneegebiete (335); Lagunen (521)
0,10	Flughäfen (124); Sümpfe (411); Torfmoore (412); Meere und Ozeane (523)
0,20	Straßen, Eisenbahn (122); Städtische Grünflächen (141); Weinbauflächen (221); Komplexe Parzellenstrukturen (242); Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung (243); Heiden und Moorheiden (322); Felsflächen ohne Vegetation (332)
0,50	Hafengebiete (123); Obst- und Beerenobstbestände (222); Wald-Strauch-Übergangsstadien; (324)
1,00	Nicht durchgängig städtische Prägung (112); Industrie- und Gewerbeflächen (121); Baustellen (133); Nadelwälder (312)
1,50	Laubwälder (311); Mischwälder (313)
2,00	Durchgängig städtische Prägung (111)

Die Änderungen der Zuordnung werden in /JAN 17/ wie folgt erläutert: „

- 311 (Laubwälder), 312 (Nadelwälder)  
*Nach Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes zur vertikalen Verdrängung  $d_0 = 6z_0$  des Windprofils durch Waldbestand werden die Messwerte besser wiedergegeben, wenn die Klasse 311 der Rauigkeitslänge 2,0 m statt 1,5 m und die Klasse 312 der Rauigkeitslänge 1.5m statt 1.0m zugeordnet werden.*
- 242 (komplexe Parzellenstrukturen), 243 (Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung)

*Diese Klassen werden im LBM-DE überhaupt nicht verwendet und können daher aus der Tabelle gestrichen werden. Diese „heterogenen“ Klassen entstehen erst bei der Generalisierung zu größeren Kartiereinheiten durch Zusammenfassung anderer landwirtschaftlicher und gegebenenfalls naturnaher Flächen. Eine Analyse zeigt, dass sich hinter diesen Klassen vor allem die Klassen 211 (Nicht bewässertes Ackerland) und 231 (Wiesen und Weiden) verbergen.*

- *211 (Nicht bewässertes Ackerland), 231 (Wiesen und Weiden)*

*Die in der TA Luft (2002) zugewiesene Rauigkeit von 0,05 m bzw. 0,02 m erscheint zu niedrig, da in der Praxis auf den Teilflächen meist immer auch größere Strukturen vorhanden sind (zum Beispiel Ställe, Sträucher, Knicks), die jedoch in der Klassierung nicht berücksichtigt sind. Vor diesem Hintergrund scheint ein Wert von 0,1 m angemessener zu sein. Dieser Wert passt auch besser zu der Klug/Manier-Klassierung nach Richtlinie VDI 3782 Blatt 6 (2017), die von einer Rauigkeitslänge von ebenfalls 0,1 m ausgeht; die zugrunde liegenden Messungen hatten vermutlich auf Flughafen-Wiesen stattgefunden.*

- *321 (Natürliches Grünland)*

*Mit Blick auf die Klassen 141 (Städtische Grünflächen) und 322 (Heiden und Moorheiden) wird diese Klasse derselben Rauigkeitslänge (0,2 m statt 0,02 m) zugewiesen.*

- *132 (Deponien und Abraumhalden)*

*Analog zur Begründung für die Klassen 211 und 231 wird auch diese Klasse einer etwas größeren Rauigkeitslänge zugeordnet (0,05 m statt 0,02 m).*

- *334 (Brandflächen)*

*Diese Klasse kommt mit dem LBM-DE neu hinzu (mit minimalem Vorkommen innerhalb Deutschlands) und wird derselben Rauigkeitslänge zugeordnet wie die Klasse 211 und 231.“*

#### **2.2.4 Gebietsgröße um die Quelle zur Ermittlung der Rauigkeitslänge**

Der Radius einer Kreisfläche um eine Quelle in der Höhe  $h$ , der zur Bestimmung der für die Ausbreitungsrechnung maßgeblichen Rauigkeitslänge herangezogen wird, wird im Referentenentwurf der TA Luft von einer bisher 10-fachen auf die 15-fache Quellschornsteinhöhe  $h$  heraufgesetzt, wobei der minimale Radius 150 m beträgt. Zur Begründung wird in /JAN 17/, Kapitel 3.2.6.2 die Konsistenz mit Kapitel 5.5 des TA Luft Referentenentwurfes herangeführt, in dem die Ableitung über Schornsteine und die Bestimmung der Schornsteinbauhöhe thematisiert wird. Die dortige Wahl der 15-fachen Schornsteinhöhe bzw.

mindestens 150 m als Radius des zu betrachtenden Gebietes, wird in Kapitel 2.8.1 von /JAN 17/ mit der Entfernung, ab der Störeinflüsse das Anström-Windprofil einer Quelle beeinflussen würden und der Entfernung von der Quelle, in der die Abluffahne „in etwa“ den Boden erreicht, begründet.

Für die Mittelung der Rauigkeitslängen innerhalb der Kreisfläche wird das arithmetische, flächenbezogene Mittel gebildet.

## 2.2.5 Zuordnung von Obukhov-Längen zu Klug/Manier-Klassen

In ARTM wird anhand der Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier und der Rauigkeitslänge  $z_0$  ein Wert für die Obukhov-Länge  $L$  bestimmt. Basis dafür sind die dort integrierten Werte in Tab. 2.6.

**Tab. 2.6** Bisher von ARTM verwendete Obukhov-Längen in Abhängigkeit von Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier und der Rauigkeitslänge  $z_0$ .

Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier bzw. Diffusionskategorie		Rauigkeitslänge $z_0$ in m								
		0,01	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50	1,00	1,50	2,00
I	F (sehr stabil)	7	9	13	17	24	40	65	90	118
II	E (stabil)	25	31	44	60	83	139	223	310	406
III/1	D (indifferent)	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999	99999
III/2	C (indifferent)	-25	-32	-45	-60	-81	-130	-196	-260	-326
IV	B (labil)	-10	-13	-19	-25	-34	-55	-83	-110	-137
V	A (sehr labil)	-4	-5	-7	-10	-14	-22	-34	-45	-56

Die Tabelle wurde im Rahmen des Vorhabens FKZ 3714 43 204 00 /JAN 17/ erstellt. Darin wird erläutert, dass die bisherige Zuordnung Tab. 2.6 unter der Randbedingung eines „soweit möglich glatten Übergangs“ der alten, auf dem Gaußfahnen-Modell basierenden TA-Luft /TAL 86/, und der neuen Version mit dem Lagrange'schen Modell neu berechnet wurden. Die nun in der AVV Tätigkeiten /AVV 20/ vorgeschriebene und im TA

Luft Referentenentwurf vorgeschlagenen neuen Werte sind in Tab. 2.7 zusammengestellt. In der Neufassung werden jeweils kleinere Werte verwendet. Insbesondere bei der Ausbreitungsklasse III/2 bzw. Diffusionskategorie D wurden die Werte stark abgewandelt, von vorher 99999 unabhängig von der Rauigkeitslänge auf einen Wert von 350. In /JAN 17/ werden diese neuen Werte hauptsächlich mit dem Übergang auf die neuen Wind- und Turbulenzprofile der aktualisierten VDI Richtlinie VDI 3783 Blatt 8. Darin dient die Obukhov-Länge auch als Parameter für die Modellierung eines Temperatur-Profiles. Für realitätsnahe Temperaturgradienten werden daher insbesondere die Anpassungen bei der Ausbreitungsklasse III/2 hin zu kleineren Werten vorgeschlagen. Die in der VDI Richtlinie 3783 Blatt 8 /VDI 17b/ tabellierten Werte weichen davon teils leicht ab. Diese abweichenden Werte sind gegebenenfalls ebenfalls in Tab. 2.7 als zweite, kursive Zahl dokumentiert.

**Tab. 2.7** In der AVV Tätigkeiten /AVV 20/ enthaltene Werte für die Obukhov-Längen in Abhängigkeit von Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier und der Rauigkeitslänge  $z_0$ , gegebenenfalls abweichende Werte nach /VDI 17b/ sind kursiv als zweite Zahl angegeben

Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier bzw. Diffusionskategorie		Rauigkeitslänge $z_0$ in m								
		0,01	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50	1,00	1,50	2,00
I	F (sehr stabil)	5	7	9	13	17	28	44	60	77
II	E (stabil)	25	31	44	59	81	133	207	280	358
III/1	D (indifferent/stabil)	350	450	630	840	1160	1890	2950	4000	5110
		<i>354</i>	<i>448</i>	<i>631</i>	<i>842</i>		<i>1893</i>	<i>2951</i>		<i>5107</i>
III/2	C (indifferent/labil)	-37	-47	-66	-88	-122	-199	-310	-420	-536
IV	B (labil)	-15	-19	-27	-36	-49	-80	-125	-170	-217
V	A (sehr labil)	-6	-8	-11	-15	-20	-33	-52	-70	-89

## 2.2.6 Wind- und Turbulenzprofile nach neuer VDI 3783 Blatt 8

Die TA-Luft verweist zur Turbulenzparametrisierung auf die VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8. Parallel zur Novellierung der TA-Luft wurde diese alte VDI-Richtlinie /VDI 02/ überarbeitet und in Bezug auf moderne Messsysteme sowie den aktuellen Erkenntnissen bei der Strömungs- und Ausbreitungsrechnung an den Stand von Wissenschaft und Technik angepasst.

Die neue VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 /VDI 17a/ enthält nun ein eindimensionales Grenzschichtmodell, das unterschiedliche Messdaten verwenden kann, um die atmosphärische Grenzschicht zu beschreiben und die entsprechenden Grenzschichtkenngößen abzuleiten. Die in dieser Richtlinie angegebenen Profilkfunktionen für Wind und Turbulenz wurden aus theoretischen Annahmen und Messungen in der bodennahen Grenzschicht ermittelt.

Einen guten Überblick zu den Änderungen enthält /MAß 17/. Darin heißt es zusammenfassend: *„Aktuell bietet die Richtlinie neben der Ableitung von Turbulenzparametern erstmals eine konsistente Beschreibung der Vertikalprofile sowohl von Windgeschwindigkeit als auch Windrichtung, eine Vorgabe des Temperaturprofils (benötigt zum Beispiel von Modellen zur Bestimmung der Abgasfahnenüberhöhung), eine Reihe neuer Berechnungsmöglichkeiten (zum Beispiel Jahresgang der Mischungsschichthöhe bei labiler Schichtung, Berücksichtigung der Mittelungszeit der Messdaten, Übertragung von Windprofilen und Obukhov-Längen auf andere Werte der Rauigkeitslänge) sowie konkrete Handlungsanweisungen für die Praxis.“*

Neu sind also insbesondere Vorgaben für die Mischungsschichthöhe und die Windrichtung, für die bisher die noch gültige TA Luft /TAL 02/ herangezogen werden musste. Standardisierte mittlere Temperaturprofile wurden bisher weder in der VDI-Richtlinie noch in der TA Luft vorgegeben. Für Ausbreitungsrechnungen, bei denen Temperaturdifferenzen zwischen Abgas und Atmosphäre aufgrund der thermischen Überhöhung der Freisetzung eine Rolle spielen, verbessert die Neufassung der VDI Richtlinie also die Nachvollziehbarkeit und erleichtert die Überprüfung.

## 2.3 Windfeldmodelle

Das Themengebiet der Windfeldmodelle stellt ein weites Forschungs- und Entwicklungsgebiet dar. Je nach betrachteter Fragestellung, räumlicher und zeitlicher Größenskala,

Anwendungsgebiet, Ansprüchen an die Nachvollziehbarkeit, verfügbarer Rechnerinfrastruktur etc. werden Wind- und Turbulenzfelder mit unterschiedlichem Fokus, Komplexität oder Vereinfachung entwickelt. Im Rahmen dieses Vorhabens einen umfassenden Überblick über sämtliche, internationale Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Windfeldmodellen zu erlangen, war daher nicht der Anspruch dieses Teilaspektes des AP 1. Eine Idee zur Weite dieses Forschungs- und Entwicklungsfeldes vermittelt ein Blick auf das im Rahmen des COST<sup>4</sup> Vorhabens 728 /SOK 09/ und 732 /SCH 09/ zusammengestellten Model-Inventars /UNI 05/. Bereits von 10 Jahren bestand dieses Inventar, das nicht den Anspruch der Vollständigkeit erhebt und hauptsächlich europäische Entwicklungen abdeckt, über 100 Windfeld-, Strömungs- und Ausbreitungsmodelle. Wie einleitend erwähnt, ist dabei bei den Ausbreitungsmodellen davon auszugehen, dass die Ausbreitungsmodelle für die meteorologischen Randbedingungen immer auch ein passendes Windfeldmodell beinhalten.

Da es sich bei ARTM hauptsächlich um ein Ausbreitungsprogramm handelt, das im behördlichen Kontext Verwendung findet, also innerhalb von Genehmigungsverfahren und im Rahmen der Aufsicht, hat es nicht den Anspruch, die neuesten wissenschaftlichen Entwicklungen im Programm nachzuverfolgen und abzudecken. Ein großes Augenmerk liegt vielmehr in einer einfachen Bedienung und Anwendung des Programms, nicht zu hohen Anforderungen an die Computer-Infrastruktur, klaren Regeln für die Anwendung und damit die Überprüfungsmöglichkeit und Nachvollziehbarkeit der Simulationsergebnisse. Diese Punkte sind somit auch für ein in ARTM verwendetes Windfeldmodell wichtig.

Die einfachste Möglichkeit, in ARTM verwendete Methode, ein Windfeld in der atmosphärischen Grenzschicht zu berechnen, stellt die Verwendung des Grenzschichtmodells der TA Luft nach VDI 3783 Blatt 8 dar, deren Aktualisierungen bereits in Kapitel 2.2 erörtert wurde.

Die nächste Stufe der Komplexität stellt ein sogenanntes diagnostisches Wind- und Turbulenzmodell dar. Diese Art von Windfeldmodell dient dazu, ein Wind- und Turbulenzfeld

---

<sup>4</sup> Bei COST – *European Cooperation in Science and Technology* handelt es sich um eine Europäische Wissenschaftsstiftung zur Förderung von Forschungsnetzwerken hauptsächlich innerhalb Europas aber auch darüber hinaus. Siehe auch <https://www.cost.eu/>.

näherungsweise mit Hilfe von Beobachtungswerten (Diagnosen) und empirischen Formeln zu modellieren. Die physikalischen Bilanz- und Erhaltungsgleichungen werden bei Modellen dieses Typs also nicht explizit gelöst. Lediglich die Massenerhaltung wird gewährleistet. In der noch gültigen TA Luft /TAL 02/ wird die Verwendung eines solchen diagnostischen Modells für eine Ausbreitungsrechnung daher stark eingeschränkt. Dort heißt es in Kapitel 11 von Anhang 3: *„Geländeunebenheiten können in der Regel mit Hilfe eines mesoskaligen diagnostischen Windfeldmodells berücksichtigt werden, wenn die Steigung des Geländes den Wert 1:5 nicht überschreitet und wesentliche Einflüsse von lokalen Windsystemen oder anderen meteorologischen Besonderheiten ausgeschlossen werden können. Bis zur Einführung einer geeigneten VDI-Richtlinie sind Windfeldmodelle zu verwenden, deren Eignung der zuständigen obersten Landesbehörde nachgewiesen wurde.“* Die in der aktuell noch gültigen TA Luft aus dem Jahr 2002 erwartete VDI Richtlinie zu einem mesoskaligen diagnostischen Windfeldmodell scheint bisher allerdings nicht erstellt worden zu sein. Weiter heißt es in Kapitel 10 der TA Luft aus 2002 zur Berücksichtigung von Bebauung: *„Beträgt die Schornsteinbauhöhe weniger als das 1,7fache der Gebäudehöhen und ist eine freie Abströmung gewährleistet, können die Einflüsse mit Hilfe eines diagnostischen Windfeldmodells für Gebäudeumströmung berücksichtigt werden. Bis zur Einführung einer geeigneten VDI-Richtlinie sind Windfeldmodelle zu verwenden, deren Eignung der zuständigen obersten Landesbehörde nachgewiesen wurde.“* Für die Gebäudeumströmung wurde im Jahr 2010 eine entsprechende VDI Richtlinie zu diagnostischen, mikroskaligen Windfeldmodellen veröffentlicht /VDI 10/.

Im aktuellen Referentenentwurf zur Neufassung der TA Luft /BMU 18/ wird bezüglich der diagnostischen Windfeldmodelle zur Berücksichtigung von Geländeunebenheiten oder Gebäuden nicht mehr auf (kommende) VDI Richtlinien verwiesen. Einzig das diagnostische Windfeldmodell TALdia /JAN 04/, das auch von ARTM verwendet wird, ist noch als diagnostisches Windfeldmodell erlaubt. Die Entwicklung weiterer diagnostischer Windfeld-Modelle wurde daher im Rahmen dieses Vorhabens nicht weiter recherchiert, zumal der erlaubte Anwendungsbereich ohnehin sehr beschränkt ist (nur mäßig steiles Gelände sowie eine Quellhöhe zwischen dem 1,2 und 1,7-fachen der umliegenden Hindernishöhen).

Die nächste Komplexitätsstufe der Windfeldmodelle stellen sogenannte prognostische Windfeldmodelle dar. Zu diesen wurde im Rahmen des AP 2 dieses Vorhabens eine umfangreiche Recherche durchgeführt. Siehe hierzu Kapitel 3.

Noch mehr Möglichkeiten der Strömungssimulation bieten Computational Fluid Dynamics Codes (CFD). Für komplexe, spezielle Fragestellungen scheint die Entwicklung in der atmosphärischen Ausbreitungsrechnung in die Anwendung von CFD-Codes zu gehen. Um hier die aktuellen Entwicklungen zu verfolgen, dienten die im folgenden Kapitel 2.4 beschriebenen Konferenzbesuche. Die dort vorgestellten Anwendungsbeispiele behandelten dabei eher wissenschaftliche Fragestellungen (für die Bedienung eines solchen Modells sind aufgrund der vielen Einstellmöglichkeiten und Parameter Spezialkenntnisse nötig) und repräsentierten keinen breiten Anwendungsbereich. Auch wenn die eingangs dieses Kapitels erwähnten Punkte für eine Ausbreitungsrechnung im behördlichen Kontext (Nachvollziehbarkeit etc.) auf kurze Sicht bei der Anwendung von CFD Modellen nicht realisierbar erscheint, sollte die Entwicklung auf diesem Gebiet weiter verfolgt werden, um das Anwendungsspektrum für die atmosphärische Ausbreitungsrechnung von Radionukliden bei Bedarf erweitern zu können.

## **2.4 HARMO18 und HARMO19**

Im Rahmen der Arbeiten zum AP 1 wurden die europäische “International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes” HARMO18 und HARMO19 besucht.

Die HARMO-Konferenzen richten sich an Modellentwickler, Modellbenutzer und Umweltschutzbehörden und Umweltrechtsexperten. Die Konferenzreihe bietet ein wissenschaftliches Forum, in dem Modellierungsfragen, Tools und Vorgehensweisen bei langzeitgemittelten und kurzzeitigen Freisetzungen einem breiteren Publikum zugänglich gemacht und diskutiert werden. Die Teilnehmer an dieser Konferenz aus etwa 30 Ländern bilden die wissenschaftliche Gemeinschaft in Fragen der atmosphärischen Ausbreitung und prägen den Stand von Wissenschaft und Technik.

### **2.4.1 HARMO18**

Die Konferenz HARMO18 fand vom 9.-12. Oktober 2017 in der CNR Research Area in Bologna/Italien statt /HAR 17/.

In insgesamt 11 Themengebieten fanden 117 Vorträge statt (aufgrund von parallelen Veranstaltungen konnten davon 69 besucht werden). Daneben wurden 88 Poster präsentiert, die während der Pausenzeiten mit den Autoren diskutiert werden konnten.

Themengebiete:

- Modellbewertung und Qualitätssicherung - Modellvalidierung, Modellvergleiche, Modellunsicherheiten und Modellsensitivitäten
- Umweltverträglichkeitsprüfung: Luftreinhaltepläne und Entscheidungshilfesysteme
- Modellierung zur Unterstützung der EU-Luftqualitätsrichtlinien, einschließlich FAIRMODE-Aktivitäten
- Parametrisierung physikalischer Prozesse in der Mesoskalen-Meteorologie, die für die Luftqualitätsmodellierung relevant sind
- Modellierung von städtischen Gebieten und Straßenschluchten: Meteorologie und Luftqualität
- Verwendung der Modellierung bei Gesundheits- und Expositionsbeurteilungen
- Inverse Dispersionsmodellierung und Quellenidentifikation
- Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung und Exposition bei Störfällen
- Modellierung passiver Steuerungssysteme (PCS)
- Mathematische Probleme bei der Luftqualitätsmodellierung
- Höhepunkte vergangener Arbeiten. Sitzung über Rezensionen und prominente Wissenschaftler und „golden papers“ der Vergangenheit, die immer noch relevant sind und nicht vergessen werden sollten

Für das Vorhaben möglicherweise relevante Informationen sind:

- Viele Datensätze zur weiteren Validierung von ARTM sind vorhanden (z.B. Fahnenüberhöhung, Turbulenzmodellierung, SF6-Immissionsmessungen, washout, snow-out).
- Auch international werden Lagrange-Modelle mittlerweile gegenüber Gauß-Puff-Modellen favorisiert. Bei früheren Veranstaltungen standen Lagrange-Modelle eher im Abseits.
- Der Trend geht zur Anwendung von Computational Fluid Dynamics (CFD) Codes. Dabei wurden die Navier-Stokes Gleichungen der Strömungsmechanik in den meisten Fällen für die betrachteten turbulenten Strömungen durch die Reynolds-gemittel-

ten Navier-Stokes Gleichungen (RANS, Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations) angenähert und eine K- $\epsilon$  Turbulenzschließung verwendet. Aufgrund der langen Laufzeit solcher CFD-Modelle wurden aber immer nur Studien über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum präsentiert.

- Der Open Source CFD-Code OpenFOAM /OPE 19/ wurde oft genannt.
- In einem Vortrag wurde der deutliche Zeitvorteil (Faktor 100) bei der Verwendung der Graphics Processing Unit (GPU) gegenüber der sonst üblichen CPU, (Haupt-) Prozessor, eines Computers herausgestellt.

In den folgenden Abschnitten werden ausgewählte Vorträge kurz vorgestellt.

#### **2.4.1.1 Silvana Di Sabatino: Mixing and Transport Characteristics Within Real Street Intersections: The Case of Marylebone Road, London (UK)**

In den letzten Jahren wurden die Luftströmungsdynamik und die Schadstoffdispersion in Straßenschluchten und Anordnungen von Gebäuden sowohl in idealisierten Geometrien als auch in realen Fällen intensiv untersucht. Es fehlt ein umfassendes Verständnis dafür, wie turbulente Vermischung und Advektion die Dispersion von Schadstoffen in Straßenschluchten beeinflussen. In diesem Beitrag wurde ein CFD-Ansatz zur Untersuchung der Luftströmungen und Partikeldispersion in einem realen Straßennetz, d. h. In der Umgebung von Marylebone Road (London, UK), für die umfangreiche Daten verfügbar sind, beschrieben. Die Partikeldispersion innerhalb einzelner Straßenschluchten wurde mittels des öffentlich zugänglichen CFD-Codes OpenFOAM untersucht. Dabei wurde ein LES-Ansatz zur Modellierung von Turbulenz innerhalb des Canyons und eine Euler-Methode zur Modellierung der Partikeldispersion verwendet. Die Durchmischung und der Transport in langen Straßen wie der Marylebone Road, Straßenkreuzungen und dem Straßennetz, das durch diese Kreuzung verbunden ist, wurde modelliert.

#### **2.4.1.2 Paul E. Bieringer: Large Eddy Simulation (LES) Based System for Producing Coupled Urban and Indoor Airborne Contaminant Transport and Dispersion Solutions**

In diesem Vortrag wurde ein atmosphärisches und gekoppeltes urbanes LES-Ausbreitungsmodell beschrieben, das auf einem GPU-Computer (Graphics Processing Unit) implementiert ist. Dabei wurde eine Kopplung mit einem Gebäudemodell realisiert. Dieses System hat den Namen Joint Outdoor-Indoor Urban LES-System (JOULES). Es

wurde entwickelt, um Simulationen von Schadstoffkonzentrationen innerhalb und außerhalb von Gebäuden in einem Notfall durchzuführen.

Ein Schlüsselement von JOULES ist das recheneffiziente GPU-basierte LES, das die Entwicklung von Lösungsensembles ermöglicht, mit denen komplexen Interaktionen zwischen Innen- und Außenraum gelöst werden können. Aufgrund der sehr hohen Rechengeschwindigkeit wird eine hohe zeitliche / räumliche Auflösung erreicht.

#### **2.4.1.3 Helen N. Webster: A Particle Size Dependent Wet Deposition Scheme for the Lagrangian Dispersion Model, NAME**

In diesem Vortrag wurde ein partikelgrößen-abhängiges Schema für die nasse Deposition beschrieben und in das Lagrange-Dispersionsmodell NAME implementiert. Das Schema berechnet einen Auswasch-Koeffizienten, der vom Teilchendurchmesser und der Löslichkeit abhängig ist. Zudem werden Variationen in der Wirkung unterschiedlich großer Partikel als Wolkenkondensations- (oder Eis-) Kerne in Wolken oder von Niederschlag unter Wolken berücksichtigt. Für eine Reihe von Aerosolen werden Vergleiche zwischen den so modellierten Nassablagerungs- und Luftkonzentrationsfeldern, die unter Verwendung des partikelgrößen-abhängigen Ablagerungsschemas erhalten wurden, durchgeführt. Das Schema wurde in NAME als Standardparametrisierung für die nasse Abscheidung implementiert.

#### **2.4.2 HARMO19**

Die Konferenz HARMO19 fand vom 3.-6. Juni 2019 im Old St. John Konferenzgebäude in Brügge/Belgien statt /HAR 19/.

In insgesamt 11 Themengebieten fanden 111 Vorträge statt (aufgrund von parallelen Veranstaltungen konnten davon 65 besucht werden). Daneben wurden diverse Poster präsentiert, die während der Pausenzeiten mit den Autoren diskutiert werden konnten.

Themengebiete:

- Modellbewertung und Qualitätssicherung
- Umweltverträglichkeitsprüfung
- Modellierung zur Unterstützung der EU-Luftqualitätsrichtlinien

- Parametrisierung physikalischer Prozesse in der Mesoskalen-Meteorologie
- Modellierung von städtischen Gebieten und Straßenschluchten
- Verwendung der Modellierung bei Gesundheits- und Expositionsbeurteilungen
- Inverse Dispersionsmodellierung
- Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung und Exposition bei Störfällen
- Höhepunkte vergangener Arbeiten
- Reduzierung von Unsicherheiten bei Störfällen
- Jack Rabbit II

Für das Vorhaben möglicherweise relevante Informationen sind:

- Zwei weitere Validierungsrechnungen von ARTM einschließlich einer Sensitivitätsanalyse wurden durch das BfS präsentiert.
- Der Trend zur Verwendung von Lagrange-Modellen setzt sich ungemindert fort.
- Neue Ansätze zu Validierung von atmosphärischen Ausbreitungsmodellen ergeben sich möglicherweise aus Messungen von Tracer-Konzentrationsverteilungen durch SO<sub>2</sub>-sensitive Kameras.

In den folgenden Abschnitten werden einige ausgewählte Vorträge kurz vorgestellt.

#### **2.4.2.1 Helmut Lorentz: Ultrafine Particle Dispersion Modelling at and around Frankfurt Airport (Fra), Germany**

In dieser Studie wurden die Emissionen und die Ausbreitung von ultrafeinen Partikeln (UFP) am Frankfurter Flughafen untersucht. Die Emissionen wurden zum einen durch Messungen der Hintergrundkonzentration und des Straßenverkehrs aber auch durch Modellierung des Bodenverkehrs und des Luftbetriebes mit dem Modell LASPORT ermittelt. Die Emissionen des Flughafens wurden dabei anhand nationaler und internationaler Standardinventare angepasst. Die Ausbreitungsrechnungen auf der lokalen Skala wurden mit dem Lagrange-Modell LASAT, angetrieben vom überregionalen Chemietransportmodell EURAD, durchgeführt. Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass sich der Flughafenbetrieb auf den Jahresdurchschnitt der Gesamtkonzentration auswirkt und die Hauptemission aus Flugzeugtriebwerken stammt. Die Konzentration

ultrafeiner Partikel nimmt mit zunehmender Entfernung vom Flughafen erheblich ab und ist abhängig von der Hauptwindrichtung. Die Modellierung ergab, dass rund 1 km nördlich des Flughafens, etwa 25% der Gesamtkonzentration von Emissionen des Flughafens stammt.

#### **2.4.2.2 Thomas Hamburger: Assessment of Source Regions and Source Terms Based on the Ru-106 Measurements in Air in Europe in September and October 2017**

In diesem Vortrag ging es um Rückrechnungen von im September und Oktober 2017 in mehreren europäischen Ländern gemessenen Spuren von Ru-106 in der Luft. Es wurde ein Überblick über die Methoden, die beim BfS angewendet werden, gegeben. Das Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT) der NOAA wurde dafür verwendet, Emissionen an hypothetischen Freisetzungsorten bis zu den Positionen der Messorte zu modellieren und so eine räumliche Wahrscheinlichkeit für mögliche Freisetzungsorte zu identifizieren. Die Abschätzung der Quellregion und des Quellterms basiert auf statistischen und probabilistischen Methoden.

#### **2.4.2.3 Anna Solvejg Dinger: Turbulent Dispersion Observed During the COMTESSA Artificial Release Experiments**

Bei der Entwicklung und Validierung von atmosphärischen Ausbreitungsmodellen werden experimentelle Daten zur Parametrisierung der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse benötigt. Dabei ist es im Allgemeinen aufgrund der großen Bandbreite an Zeit- und Längenskalen schwierig, eine direkte Messung durchzuführen. Das COMTESSA - Projekt (Camera Observation and Modelling of 4D Tracer Dispersion in the Atmosphere) ist der erste Versuch, Ultraviolett-Strahlung (UV) zu verwenden, um durch Kamerabeobachtungen die dreidimensionalen Tracer-Konzentrationsverteilungen in der atmosphärischen Grenzschicht um eine Punktquelle zu ermitteln. Während zweier Ausbreitungsexperimente in Norwegen im Juli 2017 und im Juli 2018 wurde Schwefeldioxid kontinuierlich oder in einzelnen Puffs von einem Turm in 9 m und 60 m Höhe freigesetzt. Mit bis zu sechs UV-SO<sub>2</sub>-Kameras wurden säulenintegrierte SO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit Abtastraten von mehreren Hertz und einer räumlichen Auflösung von wenigen Zentimetern beobachtet. Die atmosphärische Strömung wurde charakterisiert durch Messungen der Turbulenzparameter am Auslösemast und an bis zu zwei zusätzlichen Türmen. Durch gleichzeitiges Messen mit mehreren Kameras, die in einem Halbkreis um den

Auslösepunkt positioniert sind, konnte ein Datensatz mit räumlich und zeitlich aufgelösten Tracersäulendichten aus bis zu sechs verschiedenen Richtungen ermittelt werden und ermöglichte so eine Rekonstruktion des Konzentrationsfeldes.

## **2.5 Zusammenfassung**

Dieses Kapitel enthält die Ergebnisse des „AP1: Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik“ des Vorhabens 3616S72575“ Weiterentwicklung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM bezüglich weiterer Anwendungsbereiche, Windfeld- und Grenzschichtmodell, Dokumentation“.

Die relevanten Änderungen an der TA-Luft (Washoutkoeffizienten für Stäube, Zuordnung der Landnutzungsklassen zu Rauigkeitslängen, Mittelungsverfahren für die Rauigkeitslänge, Zuordnung von Obukhov-Längen zu Klug/Manier-Klassen und Wind- und Turbulenzprofile nach neuer VDI 3783 Blatt 8) werden beschrieben.

Darüber hinaus werden die besuchten Konferenzen HARMO18 und HARMO19 erwähnt und die für das Vorhaben relevanten Ergebnisse dieser Konferenzen auch anhand von ausgewählten Vorträgen dokumentiert.

### **3 AP 2: Einbindung eines prognostischen Windfeld- und Turbulenzfeldmodells in ARTM und Konzepte zur Reduzierung von Programmabbrüchen bei TALdia**

#### **3.1 Einleitung**

Das Ziel des Arbeitspaketes (AP) 2 war die Auswahl und die programmtechnische Einbindung eines prognostischen Windfeld- und Turbulenzfeldmodells in das Ausbreitungsmodell ARTM. Durch die jetzt verfügbare Schnittstelle wird eine realitätsnähere Simulation des Windfeldes und der Turbulenz bei Gebäudeeinfluss auf die Strömungsverhältnisse im Vergleich zum bis dahin ausschließlich verwendbaren diagnostischen Modell TALdia ermöglicht. Kapitel 3 beschreibt die dazu nötigen, durchgeführten Arbeitsschritte.

Zunächst widmet sich Kapitel 3.2 ausgiebig der Auswahl eines für die Verwendung mit ARTM geeigneten Windfeldmodells (Teil A des AP 2). Die Motivation für dieses Arbeitspaket wird in Unterkapitel 3.2.1 eingehend beschrieben. Es folgt die Vorstellung der Bewertungs- und Entscheidungskriterien für die Auswahl eines prognostischen Windfeldmodells in Unterkapitel 3.2.2. Eine Beschreibung und Prüfung von vier in Abstimmung mit dem Auftraggeber vorausgewählten prognostischen Windfeldmodellen folgt in Unterkapitel 3.2.3. Die Auswahl des prognostischen Windfeldmodells MISKAM wird abschließend zu diesem Teil A des AP 2 in Unterkapitel 3.2.4 begründet.

In Kapitel 3.3 folgt die Beschreibung der programmtechnischen Umsetzung der Schnittstelle (Teil B des AP 2). Dies beinhaltet insgesamt drei Aspekte. Zum einen müssen aus den ARTM Eingabedateien für MISKAM passende Eingabedateien erzeugt und das Programm damit gestartet werden. Die dafür nötigen Arbeiten sind in Unterkapitel 3.3.1 beschrieben. Nach einer erfolgreichen Wind- und Turbulenzfeld-Berechnung durch MISKAM müssen dessen Ausgabedateien in einem für ARTM passenden Format zur Verfügung gestellt werden. Dieser Postprozessing Schritt für die MISKAM Ausgabedateien wird in Unterkapitel 3.3.2 thematisiert. In Unterkapitel 3.3.3 schließlich werden die zum Einlesen und zur Verarbeitung der prognostischen Wind- und Turbulenzfelder innerhalb von ARTM nötigen Programmerweiterungen, also die Implementierung der Schnittstelle in ARTM, beschrieben. Die Ergebnisse der Testrechnung werden in Unterkapitel 3.3.4 präsentiert. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 3.4.

## **3.2 Identifikation und Bewertung von prognostischen Windfeld- und Turbulenzfeldmodellen**

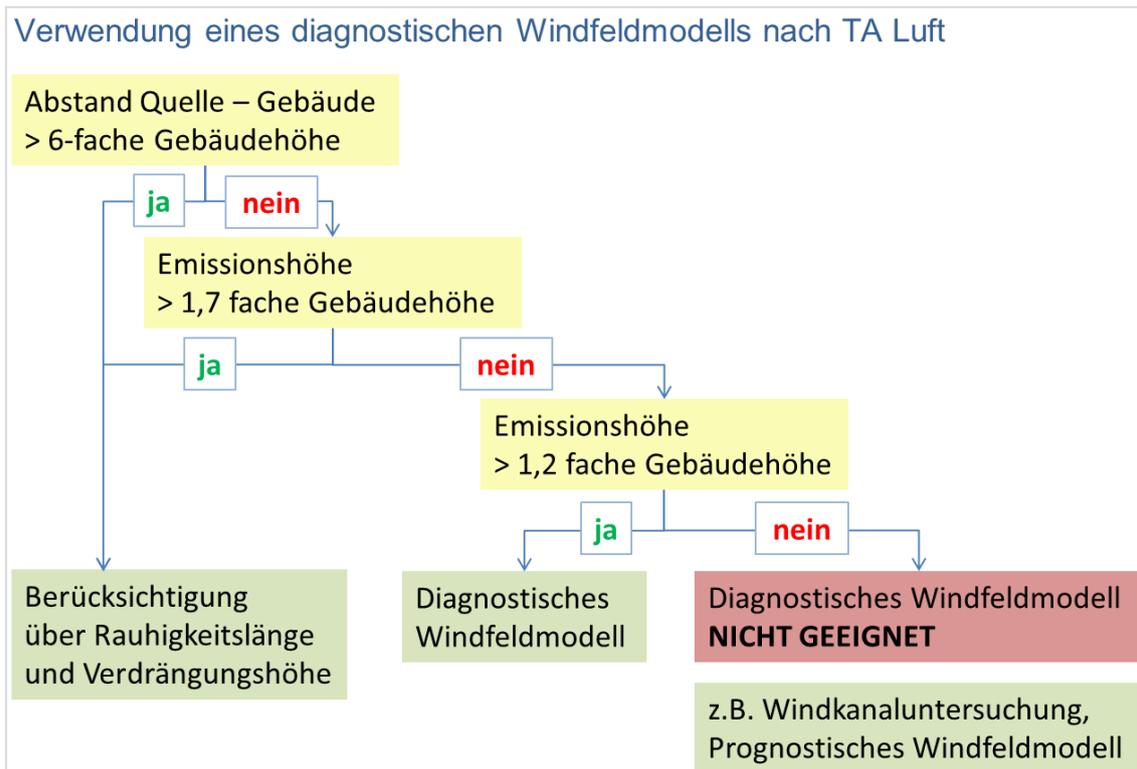
### **3.2.1 Motivation**

Die Verwendung eines Lagrangeschen Partikelmodells wie im atmosphärischen Radionuklid Transportmodell ARTM /RIC 15/, /GRS 15b/, /GRS 15a/ setzt voraus, dass dem Ausbreitungsmodell ein dreidimensionales Windfeld der mittleren Windrichtungen und -geschwindigkeiten und die dazu passenden dreidimensionalen Turbulenzparameter vorliegen.

Das Wind- und Turbulenzfeld, das als Input für ARTM dient, wird bei homogenen räumlichen Randbedingungen (nur vernachlässigbare Geländeunebenheiten und nur niedrige Gebäude im Vergleich zur Quellhöhe, die sich mittels einer Rauigkeitslänge der unteren Modellgrenze parametrisieren lassen, siehe auch Abb. 3.1) mit einem Grenzschichtmodell entsprechend VDI Richtlinie 3783 Blatt 8 berechnet (bisher /VDI 02/; im Rahmen dieses Vorhabens fand die Anpassung an die aktualisierte Version /VDI 17a/ statt, siehe Kapitel 4). Bei diesem Ansatz wird lediglich ein standardisiertes Wind- und Turbulenzprofil berechnet, welches dann im gesamten, horizontal homogenen Simulationsgebiet angewendet wird. Dabei wird das zur Rauigkeitslänge, Verdrängungshöhe und vorliegender Diffusionskategorie passende Standardprofil an eine Punktmessung der Windgeschwindigkeit und -richtung skaliert.

Ist der orographische Einfluss auf das Windfeld nicht vernachlässigbar oder sind in der Nähe der Quelle Gebäude, die den Abtransport der Luftschadstoffe bzw. Radionuklide wesentlich beeinflussen, dann verwendet ARTM das diagnostische Windfeldmodell TALdia /JAN 04/, welches eine Näherungslösung für das Wind- und Turbulenzfeld, das durch Gebäude oder Geländeunebenheiten beeinflusst ist, erstellt. Bei diesem Modelltyp wird nicht nach einer Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen gesucht, sondern es werden lediglich anhand von Analogieschlüssen die beobachtbaren Phänomene, wie z.B. Wirbel und erhöhte Turbulenz im Lee eines Gebäudes, nachgebildet. Aufgrund des einfachen Modellierungsansatzes sind der Anwendung diagnostischer Windfeldmodelle bei Untersuchungen im Rahmen der konventionellen Luftreinhaltung in der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft /BMU 18/ enge Grenzen gesetzt. Dadurch soll sichergestellt werden, dass mit diesen Näherungslösungen des Windfeldes keine Ausbreitungssituationen simuliert werden, in denen Gebäude einen entscheidenden Einfluss auf die

Ergebnisse einer Ausbreitungsrechnung haben (z.B. einer Quellposition innerhalb von verwinkelten Straßenschluchten). Schematisch sind die Einschränkungen für die Verwendung eines diagnostischen Windfeldmodells als Entscheidungsbaum in Abb. 3.1 dargestellt. Wie darin verdeutlicht, wird für den Fall, dass Bodenunebenheiten weder über die Rauigkeitslänge parametrisiert noch mittels eines diagnostischen Windfeldmodells berücksichtigt werden sollten, die Verwendung eines prognostischen Windfeldmodells oder von Windkanaluntersuchungen verlangt.



**Abb. 3.1** Schematische Darstellung der Festlegungen der TA Luft zur Verwendung eines diagnostischen Windfeldmodells in Abhängigkeit von Quell- und Gebäudehöhe und Abstand zwischen Quelle und Gebäuden

Neben den regulatorischen Einschränkungen für die Verwendung eines diagnostischen Windfeldmodells ist die Anwendbarkeit durch die einfachen, auf empirischen Erkenntnissen und Analogieschlüssen basierenden Lösungsansätze beschränkt. Unter bestimmten Randbedingungen, bei TALdia insbesondere bei zu steilen Geländeverläufen, kann es aus verschiedenen Gründen zu Programmabbrüchen kommen (siehe auch Untersuchungen dazu in /THI 16/). Lediglich bis zu einer Geländesteigung von 5 % auf Basis der horizontalen Maschenweite des Rechengitters ist gewährleistet, dass TALdia verwendbare Windfelder erzeugt.

Um den Anwendungsbereich von ARTM zu erweitern, sollte im Rahmen des AP 2 des Vorhabens 3616S72575 daher die Möglichkeit geschaffen werden, als vorgelagertes Windfeldmodell nicht ausschließlich TALdia, sondern auch ein prognostisches Windfeldmodell verwenden zu können. Bei einem solchen prognostischen Windfeldmodell werden physikalische Erhaltungsgleichungen der Strömung der Luft (ein System von partiellen Differentialgleichungen zweiter Ordnung) numerisch gelöst. Welche physikalischen Erhaltungsgleichungen konkret berücksichtigt werden, hängt von der Komplexität des Modells ab. Die Impuls- und Massenerhaltung wird dabei auf jeden Fall berücksichtigt. Prognostische Modelle erzeugen somit physikalisch sinnvolle Strömungs- und Turbulenzfelder und bilden nicht nur die beobachtbaren Effekte näherungsweise nach, wie das bei diagnostischen Windfeldmodellen praktiziert wird. Die größere Realitätsnähe der prognostisch im Vergleich zu den diagnostisch berechneten Windfeldern wird durch einen höheren Rechenaufwand (längere Rechendauer, höhere Anforderungen an die Hardware, insbesondere die Größe des Arbeitsspeichers) und höhere Ansprüche an das Fachwissen der Anwender\*innen sowie einen höheren Zeitaufwand beim Aufsetzen der Simulation erkauft. Mehr Fachwissen und der höhere Zeitaufwand sind vor allen Dingen nötig, da bei einem prognostischen Windfeldmodell mehr Parameter und Randbedingungen sinnvoll ausgewählt und eingegeben werden müssen.

Um ein prognostisches Windfeldmodell für den Antrieb von ARTM verwenden zu können, müssen gewisse Grundvoraussetzungen für die geplante Art der Schnittstelle erfüllt sein. Diese Grundvoraussetzungen sowie weitere Bewertungskriterien werden im Folgenden Kapitel 3.2.2 dargelegt. In Kapitel 3.2.3 werden die betrachteten Windfeldmodelle vorgestellt und anhand der Kriterien aus Kapitel 3.2.2 bewertet. Abschließend wird die finale Auswahl eines Modells in Kapitel 3.2.4 begründet.

### **3.2.2 Bewertungs- und Entscheidungskriterien**

Der bisherige Programmablauf einer Ausbreitungsrechnung mit ARTM, wenn ein nicht vernachlässigbarer Gelände- oder Gebäudeeinfluss auf die Ausbreitungsverhältnisse vorliegt, sieht folgendermaßen aus:

1. Start von ARTM
2. ARTM stellt fest, dass ein Gelände- oder Gebäudeeinfluss berücksichtigt werden muss und daher TALdia benötigt wird.

- a. TALdia wird mit denselben Eingabeparametern (Rauigkeitslänge, Gebäude, Gelände, Rechengitter, Anemometerposition, geographische Breite) wie ARTM gestartet
  - b. Für jede in der meteorologischen Zeitreihe bzw. Statistik vorliegende Diffusionskategorie werden bei reinem Geländeeinfluss zwei (bei ungestörtem Windfeld mit einer im 90 °Winkel zueinander liegenden Anströmgeschwindigkeit), bei alleinigem oder zusätzlichem Gebäudeeinfluss 36 (in 10 °Winkelabständen) Wind- und Turbulenzfelder vorberechnet und in einer Windfeldbibliothek ausgeschrieben.
  - c. TALdia wird beendet
3. ARTM sucht sich für jede Ausbreitungssituation (der Ausbreitungsstatistik bzw. entsprechend den aktuellen meteorologischen Bedingungen der Zeitreihe) aus Diffusionskategorie sowie Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der Anemometerposition zwei Windfelder aus Windfeldbibliothek aus, deren Windfelder an der Anemometerposition die nächste Windrichtung zur gemessenen Windrichtung haben.
  4. Aus den beiden Windfeldern wird eine Linearkombination gebildet, deren Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der Anemometerposition mit der aktuell betrachteten Ausbreitungssituation übereinstimmt.
  5. Mit diese Linearkombination und der entsprechenden Linearkombination der vorberechneten Turbulenzfelder wird die Ausbreitungsrechnung durchgeführt.
  6. Gegebenenfalls werden Zwischenergebnisse ausgeschrieben.
  7. Die Punkt 3 bis 6 werden für alle weiteren Ausbreitungssituationen wiederholt.
  8. ARTM führt abschließende Bearbeitungs- und Auswerteschritte mit den Zwischenergebnissen durch und schreibt die Endergebnisse aus.

Für die zukünftige Verwendung eines prognostischen Windfeldmodells soll der Umweg über eine vorberechnete Windfeldbibliothek und der nicht immer physikalisch sinnvollen Linearkombination von Einzelfeldern umgangen werden. Der geplante Programmablauf sieht folgendermaßen aus:

- i. Start von ARTM
- ii. Das Programm stellt fest, dass ein Gelände- oder Gebäudeeinfluss berücksichtigt werden muss und daher das Windfeld mit einem prognostischen Windfeldmodell berechnet werden soll.

- iii. Die ARTM Eingabeparameter werden in eine Eingabedatei des prognostischen Windfeldmodells umgesetzt.
- iv. Für jeden Zeitschritt der meteorologischen Zeitreihe wird das prognostische Windfeldmodell mit den meteorologischen Eingabeparametern und der Eingabedatei gestartet.
- v. Das prognostische Windfeldmodell simuliert Wind- und Turbulenzfelder, schreibt die Ergebnisfelder aus.
- vi. ARTM checkt, ob Wind- und Turbulenzfelder erfolgreich berechnet wurden und liest diese gegebenenfalls ein.
- vii. Die Ausbreitung wird mit den eingelesen Wind- und Turbulenzfeldern durch bzw. fortgeführt.
- viii. Die Punkte iv bis vii werden für jeden meteorologischen Eingabezeitschritt wiederholt.
- ix. ARTM führt abschließende Bearbeitungs- und Auswerteschritte mit den Zwischenergebnissen durch und schreibt die Endergebnisse aus.

Um einen solchen Programmablauf in ARTM ermöglichen zu können, muss das Windfeldmodell diverse Voraussetzungen erfüllen. So setzt der Aufruf und Start des Programms aus ARTM heraus voraus, dass das Windfeldmodell ohne eine graphische Benutzeroberfläche gesteuert werden kann. Die Simulationsgitter von ARTM und dem Windfeldmodell sollten möglichst kompatibel sein, da es im Rahmen dieses Projektes nicht geleistet werden konnte, eine umfassende Software-Bibliothek zur Interpolation verschiedenster gitterbasierter Skalare oder Vektorgrößen zwischen unterschiedlichen Simulationsgittern zu erstellen. Das Windfeldmodell muss zudem mit meteorologischen Eingangsgrößen, die an einer Stelle im Simulationsgebiet, der Anemometer-Position vorgegeben werden, zurechtkommen. Schließlich muss das Windfeldmodell nicht nur die dreidimensionalen Wind-, sondern auch die dazu passenden Turbulenzfelder ausschreiben. Zudem sollte das Windfeldmodell definierte Rückgabewerte verwenden, anhand derer das aufrufende Programm ARTM feststellen kann, ob das Programm erwartungsgemäß die Wind- und Turbulenzfelder berechnen und ausschreiben konnte und ob diese Windfelder den internen Qualitätsansprüchen des prognostischen Modells entsprechen.

Neben diesen „Schnittstellen-Anforderungen“ an das Windfeldmodell sind die weiteren Bewertungskriterien:

- Verfügbarkeit
  - Kosten für die Anschaffung
  - Anforderungen an Betriebssystem (ARTM ist nur als Windows-Version verfügbar) und Hardware
  - Langfristige Verfügbarkeit (Größe des Entwicklerteams, Größe des Anwenderkreises, Ansprechpartner)
- Validierung, Verifizierung und Dokumentation
  - Der Stand der in der Literatur dokumentierten Validierung- und Verifizierung (unter Berücksichtigung der VDI Richtlinien /VDI 17c/, /VDI 17b/) wird in die Bewertung einbezogen.
  - Die Dokumentation des Modellansatzes, der Bedienung des Programms und der Ein- und Ausgabeformate
- Anwendbarkeit auf der Mikroskala
 

Es wird überprüft, ob der dokumentierte Anwendungsbereich der Modelle einen Einsatz auf der Mikroskala erlaubt.
- Berücksichtigung von Orografie- und Gebäudeeinfluss
 

Es wird überprüft, ob das Modell gleichzeitig Orografie- und Gebäudeeinfluss handhaben kann und ob dieses konform ist mit den in ARTM verfügbaren Informationen zu Kataster und Gebäuden.

### **3.2.3 Betrachtung und Bewertung der Windfeldmodelle**

Vertraglich vereinbart wurden die Modelle MISKAM /EIC 13/, der „Fire dynamic simulator“ (FDS) /MCG 16a/, /MCG 16b/, /MCG 16c/, /MCG 16d/, /MCG 16e/, das „Weather Prediction & Forcast Model“ (WRF) /NCAR 16/ sowie das mikrodimensionale urbane Klimamodell, 3-dimensionale Version (MUKLIMO\_3) /SIE 12/, /SIE 16/ betrachtet. Da sich bei den Modellen WRF (nur als Linux Version und nicht für Windows verfügbar) und MUKLIMO\_3 (keine Bedienung ohne Graphische Benutzeroberfläche möglich) schnell herausstellte, dass keine sinnvolle Schnittstelle zu ARTM entsprechend des in Kapitel 3.2.2 beschriebenen geplanten Programmablaufes möglich ist, wurde im Projektgespräch vom 15.12.2017 vereinbart, zusätzlich das Lagrangesche Partikelmodell GRAL /ÖTT 18a/ zusammen mit dem prognostischen Mesoskala Model GRAMM /ÖTT 17a/ in die Betrachtungen mit einzubeziehen. Im Folgenden werden demnach die drei Modelle

MISKAM (Kapitel 3.2.3.1), FDS (Kapitel 3.2.3.2) und GRAMM / GRAL (Kapitel 3.2.3.3) kurz vorgestellt, wobei insbesondere die für die abschließende Bewertung jeweils wesentlichen Aspekte erläutert werden.

### **3.2.3.1 MISKAM**

Laut Beschreibung in /EIC 13/ handelt es sich bei MISKAM (Mikroskaliges Klima- und Ausbreitungsmodell) um „ein dreidimensionales nicht-hydrostatisches numerisches Strömungs- und Ausbreitungsmodell zur kleinsträumigen Prognose von Windverteilungen und Immissionskonzentrationen in Straßen bis hin zu Stadtteilen. Es wurde ursprünglich zur Behandlung von mikroklimatischen Problemen konzipiert“ /EIC 89/: „MISKAM ermöglicht die explizite Behandlung von Gebäuden in Form von rechtwinkligen Blockstrukturen, so dass die Besonderheiten des Strömungsgeschehens in der Umgebung von Gebäuden realistisch modelliert werden können.“ Es handelt sich um ein Modell mit hohem physikalischem Anspruch. Auf empirisch-diagnostische Beziehungen wird weitestgehend verzichtet. Als physikalische Grundlage werden die vollständigen dreidimensionalen Bewegungsgleichungen zur Simulation der Strömung verwendet.

Entwickelt wurde das Programm ursprünglich an der Universität Mainz, Institut für Physik der Atmosphäre. Vertrieben wird es inzwischen durch giese-eichhorn, Wackernheim. Es ist Teil der Software WinMISKAM des Ingenieurbüros Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe sowie des SoundPLAN Programms der SoundPLAN GmbH, Backnang.

MISKAM wurde nach /VDI 05/ validiert /EIC 07/. Zahlreiche weitere Vergleichsrechnungen und Tests wurden mit dem Programm durchgeführt und die Ergebnisse veröffentlicht, beispielsweise /DON 09/, /EIC 10/, /GOR 08/, /OLE 09/, /RAK 10/.

MISKAM wurde schon erfolgreich für Ausbreitungsrechnungen mit dem Referenzmodell der TA Luft für konventionelle Luftschadstoffe AUSTAL2000 /UBA 20/, aus dem ARTM hervorgegangen ist und dessen Standard-Windfeldmodell ebenfalls TALdia ist, verwendet /LET 12/. Dabei wurde allerdings eine Wind- und Turbulenzfeld-Bibliothek vorberechnet und damit die bereits vorhandene Schnittstelle sowie der Lösungsansatz mit Linearkombinationen der vorberechneten Felder verfolgt.

Die meteorologischen Randbedingungen können als Punktmessungen an einer Anemometerposition vorgegeben werden.

Der Einfluss von Orographischen Strukturen wird in MISKAM nicht berücksichtigt. Es wird vielmehr von Bebauungsstrukturen in ebenem Gelände ausgegangen.

Die Anschaffungskosten für die Basisversion belaufen sich auf rund 500 €. Zusammen mit der Bedienoberfläche WinMISKAM liegt der Preis deutlich höher, bei einem Minimum von 7900 € (Stand März 2018).

### **3.2.3.2 FDS**

Der Fire Dynamics Simulator (FDS) ist eine Entwicklung des National Institute of Standards and Technology (NIST) des U.S. amerikanischen Wirtschaftsministeriums sowie des finnischen technischen Forschungszentrums VTT. Wie bereits in /GRS 12/ dargelegt, handelt es sich um einen frei verfügbaren Computational Fluid Dynamics (CFD) Code, der auf die Simulation von Brandereignissen (insbesondere thermodynamisch angetriebene Strömungssimulation, Verbrennung, Wärmestrahlung) sowie die Rauchausbreitung spezialisiert ist. Es wurde umfangreich verifiziert /MCG 16c/ und validiert /MCG 16d/. Sämtliche Handbücher und Modellbeschreibungen sind in englischer Sprache verfasst.

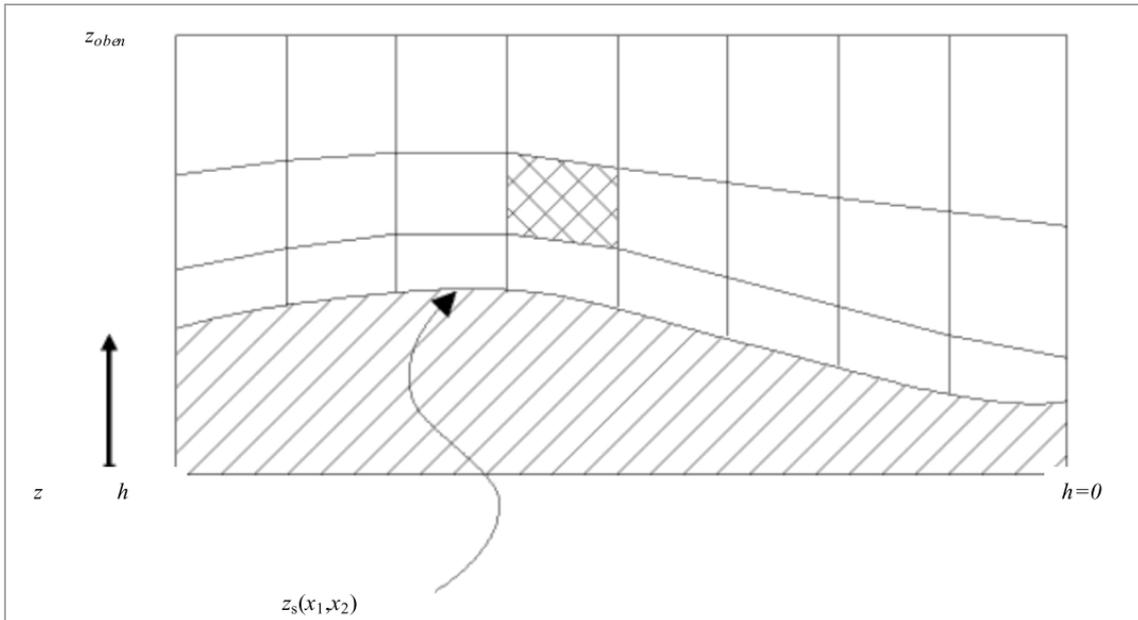
Atmosphärische Strömungen (Gebäudeumströmungen) wurden mit FDS bereits simuliert, beispielsweise in /CHA 03/. Wie ebenfalls bereits in /GRS 12/ erläutert, waren für eine gute Übereinstimmung der Ausbreitungsberechnungen mit Windkanaluntersuchungen teils ungewöhnliche Einstellungen bei den Simulationsrandbedingungen nötig. Es erscheint fraglich, ob diese Randbedingungen auch ohne den Vergleich mit den Windkanaluntersuchungen in dieser Weise gewählt worden wären. Hohe Anwenderkenntnisse müssen aber mindestens vorausgesetzt werden, um zu der in /CHA 03/ präsentierten guten Übereinstimmung zwischen Simulation und Windkanalexperiment zu gelangen. Evaluierungen entsprechend /VDI 15a/ bzw. /VDI 15b/ wurden mit FDS nicht durchgeführt. Der weitaus überwiegende Teil der in /MCG 16d/ präsentierten Validierungen bezieht sich auf Experimente mit Brandereignissen.

Das in ARTM verfolgte Konzept, die Strömungsbedingungen an einem einzigen Punkt im Simulationsgebiet vorzugeben, ist in FDS nicht vorgesehen.

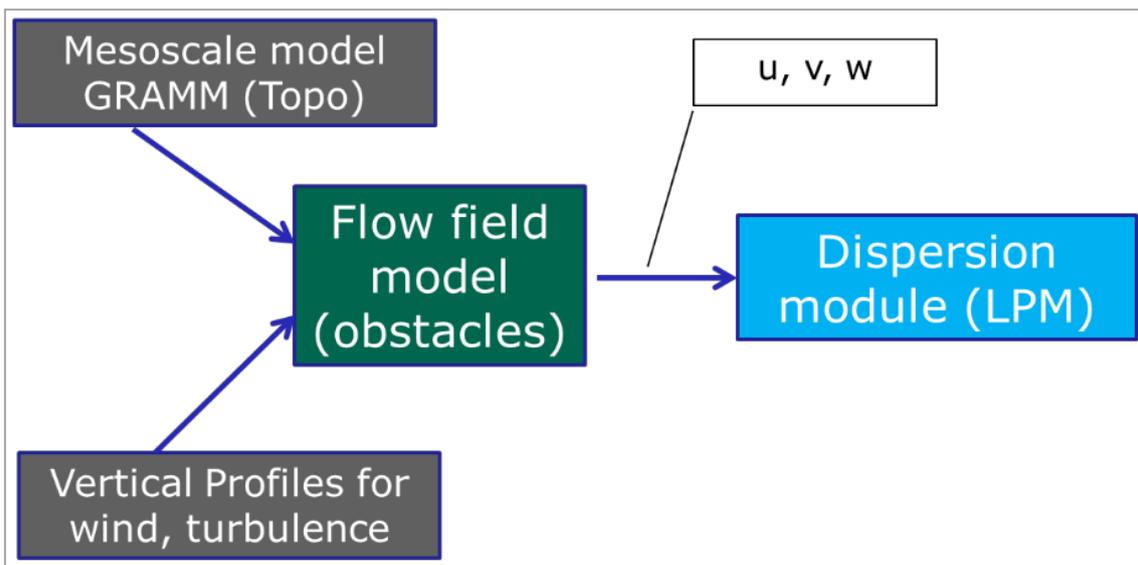
### 3.2.3.3 GRAL/GRAMM

Bei GRAL/GRAMM handelt es sich um das Grazer Lagrangian Model /ÖTT 18a/, /ÖTT 18b/ sowie das Graz Mesoscale Model /ÖTT 17a/, das zum freien Download zur Verfügung steht /INS 18/.

Bei GRAMM handelt es sich um ein prognostisches Windfeldmodell für die Mesoskala, also für den Bereich von rund 10 km bis in den Bereich von ca. 250 km. Typische horizontale Gitterauflösungen liegen zwischen 50 m und 1 km. Das Rechengitter ist vertikal an das Gelände angepasst und wird mit unterschiedlichen Streckungs-Faktoren bis zur oberen Modellgrenze auf eine Höhe angeglichen. Beispielhaft ist das in Abb. 3.2 (entspricht Figure 5 aus /ÖTT 17a/) dargestellt. Darin ist  $h$  die Höhe über der Referenzhöhe des Rechengitters,  $z_s$  ist die Geländehöhe (vorliegend als digitales Geländemodell) und  $z_{oben}$  ist der obere Rand des Simulationsgebietes. In steilem Gelände beschränken sich die Gitterzellen nicht auf quaderförmige Strukturen, sondern es werden komplexe tetraedrische Gitterzellen verwendet /ÖTT 18a/. Hauptanwendungsgebiet für GRAMM ist die Simulation von quasi-stationären Strömungsfeldern in komplexem Gelände für vorgegebene (kategorisierte) meteorologische Situationen. Mit anderen Worten: es wird eine Windfeldbibliothek erstellt. Effekte wie lokale Kaltluftabflüsse oder Rezirkulationen können simuliert werden. Die GRAMM-Windfelder dienen dann als Randbedingungen für Ausbreitungsrechnungen mit GRAL. Schematisch ist das Kopplungsschema zwischen GRAMM und GRAL in Abb. 3.3 (entspricht Fig. 1 aus /ÖTT 17a/) dargestellt. Die Abkürzung LPM steht dabei für das „Lagrangian Particle Model GRAL“.



**Abb. 3.2** Geländefolgendes Gitter in GRAMM (Fig. 5 aus /ÖTT 17a/)



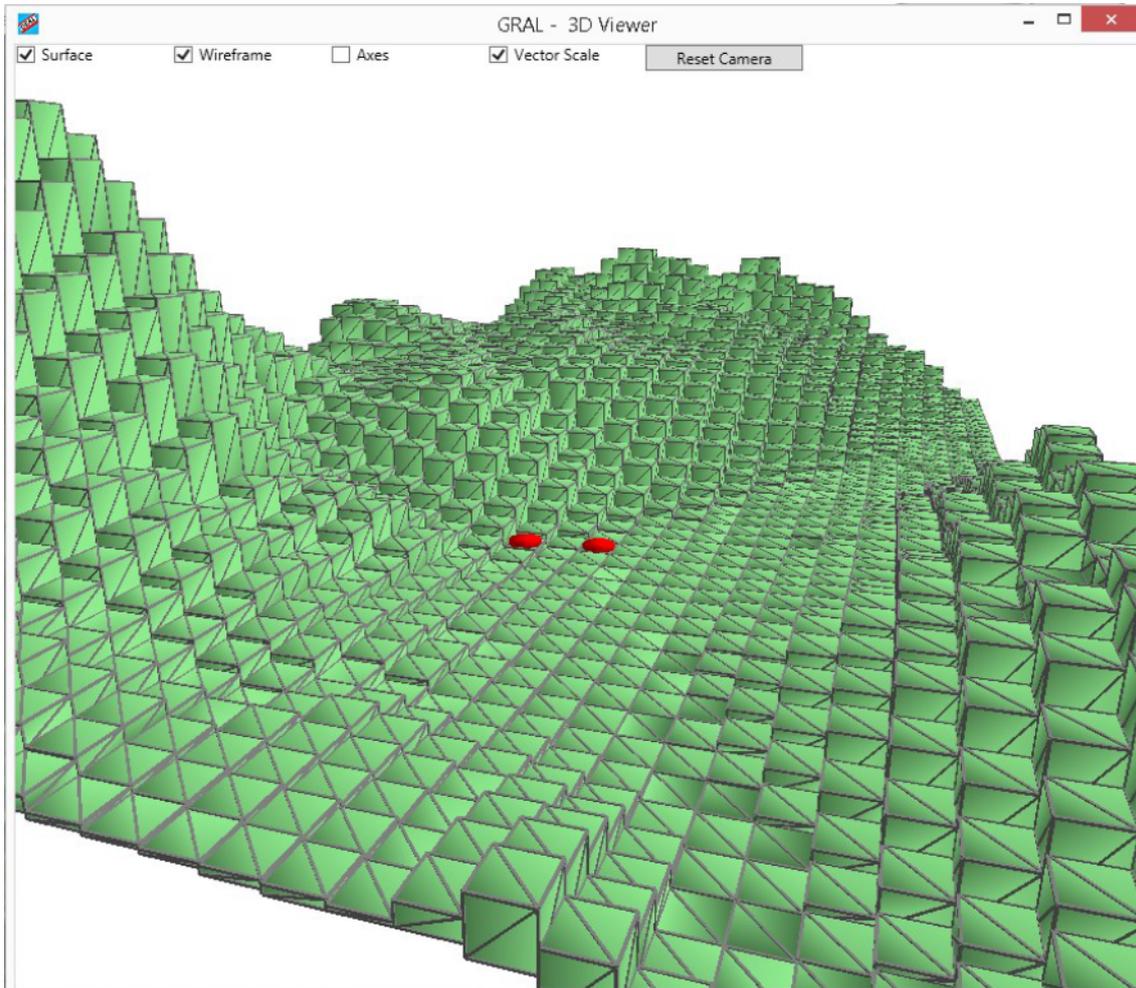
**Abb. 3.3** Kopplungsschema zwischen GRAMM und GRAL (Fig. 1 aus /ÖTT 17a/)

Viel Entwicklungsarbeit von GRAMM steckt in der Optimierung der Anpassungsalgorithmen, bei denen das simulierte Windfeld möglichst an die Windmessungen verschiedener Stationen im Simulationsgebiet angepasst wird. Insgesamt ist die Windfeldberechnung mit GRAMM damit sehr rechenintensiv. Daher verfolgt man in der Steiermark das Konzept, Windfeldbibliotheken für das Bundesland zentral vorzuberechnen und diese den Anwendern für darauf aufsetzende Ausbreitungsrechnungen mittels GRAL zur Verfügung zu stellen /ÖTT 17b/.

Bei GRAL handelt es sich, um ein Lagrangesches Partikelmodell mit einem internen prognostischen Windfeldmodell. Haupt-Anwendungsgebiet sind Ausbreitungsrechnungen in orographisch gegliedertem Gelände auch bei niedrigen Windgeschwindigkeiten. Im Gegensatz zu GRAMM wird in GRAL eine rein orthogonale Gitterstruktur verwendet. Hierbei wird zwischen dem Gitter für die Partikel- bzw. Luftschadstoff-Konzentrationen bzw. dem Gitter für die Windfeldberechnung unterschieden. Typischerweise sind die horizontale Auflösung der Gitter für die Konzentrations- sowie für die Windfeld-Simulation bei der Berücksichtigung von Gebäuden identisch und liegen im Bereich von wenigen Metern. In der Vertikalen darf das Konzentrationsgitter maximal aus 10 Ebenen bestehen. Vertikale Ausdehnungen einer Ebene von einem bis zu 5 Metern werden als typisch angegeben /ÖTT 18b/. Für das Windfeld-Gitter wird die vertikale Auflösung mit der Dicke der untersten Schicht sowie einem Streckungsfaktor für die darüber liegenden Ebenen angegeben. Die Anzahl der vertikalen Schichten wird dann automatisch festgelegt und garantiert, dass das Modellgebiet mindestens zu 90 % für Luftströmungen zur Verfügung steht und nicht durch Hindernisse (Gebäude, Orographie) belegt ist. Im Gegensatz zu GRAMM wird die Orographie in GRAL nicht als die das Gitter bestimmende untere Randfläche des Strömungsgitters vorgegeben, sondern vielmehr wird das Gelände über für die Strömung undurchdringliche Gitterzellen im streng orthogonalen Simulationsgitter dargestellt. Dadurch gibt es keine schrägen Geländeoberflächen, sondern lediglich ein im Gitter „aufgerastertes“ Gelände aus quaderförmigen Säulen. Beispielhaft ist dies in Abb. 3.4 (aus /KUN 16/) illustriert.

In GRAL dienen spezielle, interne Interpolationsroutinen dazu, die Windfelder des unstrukturierten GRAMM-Gitters auf das GRAL-Gitter als Randbedingungen zu übertragen. Angetrieben durch diesen „übergeordneten“ Wind, simuliert dann das prognostische Windfeldmodell innerhalb GRALs die Gebäudeumströmungen und sonstige kleinskalige Effekte, die im größeren GRAMM Gitter nicht aufgelöst werden. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, die meteorologischen Ausbreitungsbedingungen einer konkreten Situation vorzugeben, unter anderem auch als einfache Zeitreihe einer Punktmessung im Simulationsgebiet ähnlich wie bei ARTM, anhand derer dann die passenden GRAMM Felder für den äußeren Antrieb herausgesucht und passend kombiniert werden. Mit dem GRAL internen Windfeldmodell werden Wind- und Turbulenzfelder für die anschließende Ausbreitungsrechnung mit dem Lagrangeschen Partikelmodell erzeugt. Für Kontrollzwecke und für die Visualisierung besteht die Möglichkeit, die erzeugten

Windfelder auszuschreiben. Für die Turbulenzfelder ist eine derartige Ausgabemöglichkeit nicht vorgesehen. Eine Windfeldberechnung ist in GRAL immer mit einer Ausbreitungsrechnung verknüpft und kann nicht separat durchgeführt werden.



**Abb. 3.4** Visualisierung einer Geländeoberfläche, wie sie in GRAL abgebildet wird (Abbildung aus /KUN 16/, Folie 20)

GRAL wurde umfangreich validiert, unter anderem wurden dabei auch die Vorgaben der VDI Richtlinie 3783 Blatt 9 /VDI 17b/ berücksichtigt. Bei der Bewertung wird festgestellt, dass einige formale Kriterien der VDI Richtlinie zwar nicht erfüllt werden, sämtliche Performance Tests aber mit dem „non-diffusion“ bzw. dem „mixing-length“ Ansatz erfüllt werden /ÖTT 18a/.

### 3.2.4 Begründung für die Auswahl von MISKAM

In einem Projektgespräch am 21.02.2018 per Videokonferenz zwischen dem Auftragnehmer und dem Fachbetreuer des Projektes BfS, wurde nach eingehender Diskussion festgelegt, dass in ARTM eine Schnittstelle zu dem prognostischen Windfeldmodell MISKAM implementiert werden soll. Ausschlaggebend dafür war die Tatsache, dass sowohl die Rechengitter beider Modelle miteinander kompatibel sind, sowohl Wind- als auch Turbulenzfelder von MISKAM ausgeschrieben werden und dass die meteorologischen Randbedingungen wie in ARTM als eine Punktmessung im Simulationsgebiet vorgegeben werden können. Evaluierungen gemäß der einschlägigen VDI Richtlinien wurden zudem mit diesem Modell durchgeführt. Handbücher und Bedienungsanleitungen liegen in deutscher Sprache vor. Als Bestandteil mehrerer Softwareumgebungen hat es einen etablierten Anwenderkreis. Die Anschaffung der Software ist mit moderaten Kosten verbunden. Die auch für ARTM angemessene Rechnerausstattung (handelsüblicher PC oder Laptop) reicht für die Bearbeitung nicht zu komplexer Fragestellungen in einem überschaubaren Zeitraum aus.

Gegen FDS sprach die Tatsache, dass hierin das Anemometer-Konzept nicht vorkommt und dieses Programm hauptsächlich für Brandereignisse entwickelt wurde. Validierungsuntersuchungen beziehen sich daher hauptsächlich auf Brandereignisse, Wärmeübergangsbetrachtungen und thermodynamisch bedingte Strömungen. VDI Richtlinien wurden bei den Evaluierungen nicht herangezogen. Validierungsuntersuchungen zu atmosphärischen Ausbreitungssituationen konnten nur bei hohem Anwenderwissen überzeugend durchgeführt werden.

Wegen der unterschiedlichen Gitterstruktur von GRAMM im Vergleich zu ARTM wurde GRAMM nicht ausgewählt. Der Aufwand, den die Implementierung von Routinen bedeuten würde, um die Werte der Windgeschwindigkeitskomponenten und Turbulenzparameter physikalisch sinnvoll von einem auf das andere Gitter zu übertragen, würde den geplanten Zeit- und Kostenrahmen des Projektes übersteigen. Zudem erscheint GRAMM als sehr komplexes Modell mit hohen Ansprüchen sowohl an das Anwenderwissen also auch an die eingehenden meteorologischen Messdaten (von mehreren Stationen gleichzeitig).

Auch von einer Verwendung von GRAL (ohne GRAMM) wurde abgesehen, da in GRAL keine Möglichkeit vorgesehen ist, das interne Windfeldmodell ohne anschließende Aus-

breitungsrechnung zu betreiben sowie die in ARTM benötigten Turbulenzfelder auszu-schreiben. Es wäre zwar möglich, mittels Postprozessing diagnostische Näherungen der jeweiligen Turbulenzfelder zu jedem Windfeld zu erzeugen, dies erscheint aber zum einen aufwändig und zum anderen als nicht erstrebenswerte Behelfslösung. Die durch ein prognostisches Modell möglichen Verbesserungen würden durch diese teils diagnosti-sche Lösung verwässert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass MISKAM eine gute Wahl für ein prognos-tisches Windfeldmodell darstellt. Abstriche müssen lediglich bei der Berücksichtigung der Orographie gemacht werden.

### **3.3 Implementierung einer Schnittstelle zu MISKAM**

Damit ARTM auch für Fälle, bei denen die Kriterien der TA Luft zur Anwendbarkeit eines diagnostischen Windfeldmodells nicht erfüllt sind (Abb. 3.1), eine Ausbreitungsrechnung durchgeführt gerechnet werden kann, wurden im Teil B des AP 2 eine Schnittstelle zum prognostischen Windfeld- und Turbulenzfeld-Modell MISKAM realisiert. Die dazu nötigen Arbeiten werden in diesem Kapitel 3.3 beschrieben.

Insgesamt setzt sich die Umsetzung der Schnittstelle aus mehreren Teilaspekten zu-sammen. Zunächst müssen aus den ARTM-Eingabeparametern, vorgegeben in der Da-tei ARTM.txt und den darin angegebenen zusätzlichen Input-Dateien, passende Ein-gabe- und Steuerdateien für das prognostische Windfeldmodell MISKAM erstellt werden. Die Umsetzung dieses Präprozessing-Schrittes für MISKAM und der Start der Strö-mungssimulation wird in Kapitel 3.3.1 erläutert.

Nach erfolgreicher Strömungs- und Turbulenzsimulation durch MISKAM werden die von MISKAM erzeugten Ausgabedateien in einem Postprozessing-Schritt in das für ARTM lesbare DMNA-Format umformatiert. Dabei wurde bewusst diese Postprozessing-Vari-ante gewählt und nicht innerhalb von ARTM eine MISKAM-Format-Einleseroutine er-stellt. Dies gewährleistet, dass gegebenenfalls von Anwender\*innen auch andere prog-nostische Windfeldmodelle verwendet werden können, wenn sie die passenden DMNA-Dateien zur Verfügung stellen. Der MISKAM-Postprozessing-Schritt wird in Kapitel 3.3.2 vorgestellt.

Schließlich wurde in ARTM eine Schnittstelle zum Einlesen der im DMNA-Format vorliegenden Wind- und Turbulenzfelder erstellt. Diese weicht von der bisherigen Einleseroutine für die durch TALdia erzeugten Wind- und Turbulenzfelder ab. Da sich bei prognostischen Modellen in der Regel die Strömungsfelder nicht durch Superposition von zwei „benachbarten“ Windfeldern zusammengesetzt werden, sondern die gesuchte Ausbreitungssituation direkt simuliert wird, müssen direkt die passenden Einzelfelder für jede Ausbreitungssituation eingelesen werden. Die dafür nötigen Anpassungen im ARTM-Quellcode werden in Kapitel 3.3.3 vorgestellt.

Insgesamt ist anzumerken, dass entgegen der ursprünglichen Planung (vergleiche Kapitel 3.2.2) die MISKAM Strömungssimulationen nicht direkt von ARTM aus angestoßen wird, sondern die graphische Benutzeroberfläche die Steuerung von MISKAM übernimmt. Damit GO-ARTM weiß, wo sich MISKAM in der Ordner-Struktur des Rechners befindet, wird beim ersten Aufruf der MISKAM-Option in GO-ARTM der Pfad zu und der Dateiname des Executables von MISKAM abgefragt. Die Steuerung der MISKAM-Simulationen beinhaltet, dass die Vorberechnung der Wind- und Turbulenzfelder für jeden Zeitschritt der meteorologischen Zeitreihe mit den jeweiligen Anströmbedingungen dieser Situation angestoßen und schließlich die MISKAM Ergebnisdateien in das DMNA-Format umgeschrieben werden. Die durch das prognostische Windfeldmodell berechneten Wind- und Turbulenzfelder werden dabei nicht nach Ausbreitungs-kategorie oder Windrichtung kategorisiert, wie es beim Bibliotheks-Konzept von TALdia der Fall ist, sondern ausschließlich ihrem Zeitschritt zugeordnet. Unter Umständen kann es so zu einer Doppelberechnung einer Ausbreitungssituation kommen, wenn zu verschiedenen Zeitpunkten die gleichen meteorologischen Bedingungen vorliegen.

Zur Kennzeichnung des ARTM-Projektes, dass von MISKAM erzeugte Strömungs- und Turbulenzfelder verwendet werden sollen, wurde die NOSTANDARD-Option PWF<sub>M</sub> (prognostisches Windfeldmodell) eingeführt. Ist diese Option in der Datei ARTM.txt gesetzt, so wird in der Benutzeroberfläche GO-ARTM unter „Start“ die Ansteuerung von MISKAM angeboten. Damit können dann vor dem Start von ARTM die Strömungs- und Turbulenzfelder mit MISKAM vorberechnet werden.

Eine Testrechnung mit einem Vergleich zwischen den Ergebnissen einer Ausbreitungsrechnung unter Verwendung von mit TALdia berechneten Wind- und Turbulenzfeldern und unter Verwendung der entsprechenden MISKAM-Felder wird in Kapitel 3.3.4 vorgestellt.

### 3.3.1 Erstellung von MISKAM-Eingabedateien

Aus den Definitionen des ARTM-Projektes in der Datei ARTM.TXT und geeigneter Wahl von Parameterwerten werden im ersten Schritt die Eingabedateien für MISKAM erstellt.

Zu Beginn der Transferierung werden im Projektverzeichnis die beiden Unterverzeichnisse \Miskam\EIN und \Miskam\AUS angelegt.

#### 3.3.1.1 KONFIG.INP

Nach den Angaben im MISKAM-Handbuch /EIC 13/ erfolgen die grundsätzlichen Angaben zum Projekt in einer Datei mit Erweiterung \*.INP. Die von der Schnittstelle verwendete Datei hat den Namen KONFIG.INP und wird im Unterverzeichnis \Miskam\EIN erstellt (s. Abb. 3.5).

- a) Die erste Zeile der KONFIG.INP enthält die Anzahl der Gitterboxen in jeder der drei Raumrichtungen (nx, ny, nz). Die vierte Zahl in dieser ersten Zeile gibt einen Winkel (in °) zwischen der x-Achse des Modellgebietes und der Nordrichtung an.
- b) In der zweiten, dritten und vierten Zeile sind die Grenzen der Gitterboxen in x, y, bzw. z-Richtung angegeben. Die Anzahl dieser Grenzen ist also jeweils um 1 größer als die Anzahl der Zellen in der jeweiligen Richtung.
- c) In den nächsten Zeilen (Anzahl ny) wird die Anordnung und die Höhe der Gebäude definiert. In Form einer Draufsicht auf das Modellgebiet wird für jede horizontale Gitterzelle (ny Zeilen, nx Spalten) die Höhe des Gebäudes als Nummer der Gitterfläche angegeben. Eine 0 steht für kein Gebäude; der Wert 6 würde in dem aufgeführten Beispiel für eine Gebäudehöhe von 10 m über Grund stehen.
- d) Das ,j' in der drauffolgenden Zeile gibt an, dass eine einheitliche Rauigkeitslänge verwendet wurde. Die nächste Zeile enthält dann die Rauigkeitslängen (in cm) für den Erdboden, sowie für die Gebäudeflächen. Andernfalls (,n') folgt erst die Zuweisung der Rauigkeitslängen zu den Gebäudeflächen, gefolgt von einem zweidimensionalen Feld von Bodentypen, die dann jeweils in eine Rauigkeitslänge umgerechnet werden.
- e) Da MISKAM nicht nur zur Berechnung der Strömungs- und Turbulenzfelder dient, sondern auch zur Ausbreitungsrechnung verwendet werden kann, erfolgt in den nächsten Zeilen die Angaben zu einer oder mehreren Quellen von Schadstoffen.



Zusätzliche Konfigurationsdateien (z.B. zur Beschreibung von Durchströmungen) sind bei MISKAM möglich, werden aber hier nicht beschrieben, da sie für die Schnittstelle irrelevant sind.

Im Folgenden wird beschrieben, wie die Umsetzung der ARTM-Projektdateien in das MISKAM-Format erfolgt:

Zu a) Die Werte für  $n_x$  und  $n_y$  werden aus der Definition des Rechengitters in ARTM übernommen. Die Definition der vertikalen Schichten folgt dem von MISKAM erwarteten Muster:

0 m, 1 m, 2 m standardmäßig, dann in 2 m Schritten bis zur max. Gebäudehöhe, dann in 4 m Schritten bis zum 2 fachen der max. Gebäudehöhe, dann in 8 m Schritten zum 5 fachen der max. Gebäudehöhe. Aus der Anzahl der sich dabei ergebenden Schichten wird  $n_z$  bestimmt.

Ein sich an die Strömungsberechnung mit MISKAM anschließende Ausbreitungsrechnung mit ARTM muss dieselbe Definition der vertikalen Schichten haben (Parameter  $h_h$ ).

Zu b) Die Grenzen der Gitterboxen in x, y, bzw. z-Richtung werden aus der Definition der horizontalen Definition des Rechengitters und aus der vertikalen Verteilung der Schichthöhen (analog zu a)) abgeleitet.

Zu c) Die max. Gebäudeschichten ergeben sich aus den in ARTM definierten und auf die Gitterboxen projizierten Gebäuden. Wenn das Zentrum der Gitterbox im jeweiligen Gebäude liegt, wird dort die Anzahl Schichten gesetzt, die unterhalb der Gebäudehöhe liegt. Es wird jeweils die höchste Schicht angenommen (falls der Punkt in mehreren Gebäuden liegt).

Zu d) Es wird der in ARTM festgelegte Wert für eine einheitliche Rauiglänge des Bodens verwendet (in cm umgerechnet). Für Gebäudedächer und Hauswände wird eine Rauiglänge von 1 cm angenommen.

Zu e) Da mit MISKAM nur die Strömungsberechnung durchgeführt wird (und nicht die Ausbreitungsrechnung), erfolgt als Definition einer Quelle nur ein Dummywert (Punkquelle in der Gitterbox des Ortes der ersten Quelle ( $x_q, y_q, x_h$ )).

Bei der Definition des Projektes in ARTM ist zu beachten, dass

- nur die Parameter des ersten Rechengitters umgesetzt werden und
- kein Gelände definiert sein darf.

### 3.3.1.2 STROEM1.INI

Für jeden in der Meteorologiedatei (AKTerm oder zeitreihe.dmna, falls vorhanden) erhaltenen Datensatz wird mit MISKAM eine Strömungs- und Turbulenzberechnung durchgeführt. Dazu benötigt MISKAM eine Datei mit programmtechnischen und meteorologischen Steuerparametern und der Dateierweiterung \*.INI. Die von der Schnittstelle verwendete Datei hat den Namen STROEM1.INI und wird ebenso im Unterverzeichnis \Miskam\EIN erstellt (siehe Abb. 3.6).

```

VOREINSTELLUNGEN FUER STROEMUNGSRECHNUNGEN      N E U S T A R T
-----
Steuerparameter (s: Stroemungsmodell, a: Ausbreitungsmodell) ..... s
Konfigurationsdatei (prefix) ..... konfig
istart (1: Neustart, 0: Folgelauf) ..... 1
isteps (Anzahl Zeitschritte bis Zwischenspeicherung) ..... 9999
z0ein (Rauhigkeitslaenge fuer 1d-Initialisierung in cm) ..... 50.
zanem (Anemometerhoehe in m) ..... 20.
uv0 (Windgeschwindigkeit in m/s in Anemometerhoehe) ..... 2.3
winku (Windrichtung in Grad gegen N in Anemometerhoehe) ..... 117.0
dtdz (Schichtung in K/100m, 0: neutral, >0: stabil, <0: labil) ..... 0.
eeps (Schliessung, e: E-eps-Modell, k: K-Modell) ..... e
abbr (Abbruchkriterium, s fuer Stationaritaet oder Sekundenzahl) ... s
Ausgabedateien (prefix) ..... stroem1

Bei Aenderung der Voreinstellungen darauf achten,
dass die einzelnen Werte immer in der 70. Spalte beginnen!      ^

```

**Abb. 3.6** Beispiel für die Datei STROEM1.INI

Die darin enthaltenen Parameter sind:

- Steuerparameter (a/s) für Strömungs- oder Ausbreitungsrechnung  
Es wird der Wert „s“ gesetzt.
- Prefix der Konfigurationsdatei  
Da die Datei mit den grundsätzlichen Angaben zum Projekt den Namen KONFIG.INP hat, wird die Zeichenkette „konfig“ angegeben.
- Modus des Laufes **istart** (0/1)  
Da jede meteorologische Situation durch einen Neustart von MISKAM realisiert wird, ergibt sich ein Wert „1“.

- d) Anzahl Zeitschritte bis Zwischenspeicherung **isteps**  
Durch den Wert „9999“ wird erwirkt, dass keine Zwischenspeicherung erfolgt.
- e) Die Rauigkeitslänge für 1d-Initialisierung wird auf den in ARTM definierten Wert (in cm) gesetzt.
- f) Die Anemometerhöhe wird auf den in ARTM definierten Wert gesetzt.
- g) Die Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe wird auf den jeweiligen Wert gesetzt, der in der Meteorologiedatei (AKTerm oder zeitreihe.dmna, falls vorhanden) steht.
- h) Die Windrichtung in Anemometerhöhe wird auf den jeweiligen Wert gesetzt, der in der Meteorologiedatei (AKTerm oder zeitreihe.dmna, falls vorhanden) steht.
- i) Der Wert für die Schichtung  $\alpha dz$  in K/100 m, (0: neutral, >0: stabil, <0: labil) wird auf den Wert „0“ für neutrale Schichtung gesetzt. Nach dem MISKAM-Handbuch /EIC 13/ ist die Angabe einer stabilen Schichtung nur mit Vorsicht zu verwenden und ein negativer Wert nicht mit dem Stationaritätskriterium vereinbar.
- j) Turbulenzschließung (e/k)  
Es wird das vom MISKAM-Entwickler empfohlene Turbulenzmodell mit der modifizierten Kato-Launder-Schließung nach Lopez et al. /LOP 05/ durch Angabe des Wertes „e“ verwendet.
- k) Abbruchkriterium (s für Stationarität oder Sekundenzahl)  
Die Rechnungen sollen das Stationaritätskriterium erfüllen (Wert „s“).
- l) Präfix der Ausgabedateien  
Alle von MISKAM erzeugten Ausgabedateien sollen mit „stroem1“ beginnen.

Nach dem Umkopieren der Datei KOFIG.INP und STROEM1.INI in die entsprechenden Pfade von MISKAM wird der in der Datei MISKAM.DIR (im Projektordner) abgelegte Aufruf von MISKAM gestartet und die Strömungs- und Turbulenzmodellierung durchgeführt.

### 3.3.2 Bereitstellung der von MISKAM erzeugten Strömungs- und Turbulenzfelder für Ausbreitungsrechnungen mit ARTM

Die Ergebnisse der MISKAM-Rechnungen stehen in den im Folgenden aufgeführten Dateien:

STROEM1.PRS	Protokolldatei der Strömungsrechnung
STROEM1.UVW	Windkomponenten (u, v, w in mm/s), absolute Windgeschwindigkeit, Druckstörungen
STROEM1.TUR	Turbulenzvariablen ( $u_*$ : Schubspannungsgeschwindigkeit am Boden / auf Dächern in mm/s, $K_{h,v}$ : Austauschkoefizient ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) * $1\text{E}+02$ , $\epsilon$ : Turbulenzenergie ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) * $1\text{E}+03$ , $\epsilon$ : Dissipation ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ ) * $1\text{E}+04$ )

Diese werden in den Unterordner \MISKAM\AUS des ARTM-Projektordners kopiert und eingelesen.

Aus diesen Daten und den sonstigen Projektinformationen werden dann für jede Ausbreitungssituation die von ARTM benötigten Dateien erstellt. Dies sind:

WJ J J J M M T T H H N N . D M N A	Headerdatei für WJ J J J M M T T H H N N . D M N B (J J J J = Jahr, M M = Monat, T T = Tag, H H = Stunde, N N = Minute)
WJ J J J M M T T H H N N . D M N B	Binärdatei mit den Werten: Höhe über Grund in m, $v_x$ , $v_y$ und $v_s$ in m/s
VJ J J J M M T T H H N N . D M N A	Headerdatei für VJ J J J M M T T H H N N . D M N B
VJ J J J M M T T H H N N . D M N B	Binärdatei mit den Werten: $\sigma_u$ , $\sigma_v$ und $\sigma_w$ (in m/s) und potentielle Temperatur $\theta$ in °
KJ J J J M M T T H H N N . D M N A	Headerdatei für KJ J J J M M T T H H N N . D M N B
KJ J J J M M T T H H N N . D M N B	Binärdatei mit den Werten: $K_h$ und $K_v$ in $\text{m}^2/\text{s}$

Die folgenden Parameter in den Headerdateien (DMNA) werden dabei sinnvoll belegt:

PGM: Erzeugendes Programm  
artp: Inhalt der Datei DMNB  
vldf: Mittelungsart  
aver: Gelände Mittelung  
xmin: minimaler X-Wert  
ymin: minimaler Y-Wert  
delta: Gitterweite  
zsc1: Skalierungsfaktor 1 Rechennetze  
zsc2: Skalierungsfaktor 2 Rechennetze  
sk: vertikales Raster  
form: Format der Zahlen  
mode: Abspeicherungsart  
refx: Referenzwert x  
refy: Referenzwert y  
axes: Achsenformat  
dmkp: unbekannt  
locl: Dezimaldarstellung  
sequ: Indexfolge  
dims: Dimensionen  
size: Datensatzgröße in Bytes  
lowb: Startindizes  
hghb: Endindizes

Für die binären DMNB Dateien gelten die folgenden Festlegungen.

**WJJJJMMTTHHNN .DMNB** : Die Höhe über Grund wird dem Aufbau der vertikalen Schichten entnommen. Die Windgeschwindigkeitskomponenten,  $v_x$  und  $v_y$  wird mit u bzw. v belegt. Die vertikale Komponente  $v_s$  (geländefolgendes Koordinatensystem von ARTM) wird mit w aus den MISKAM-Rechnungen gleichgesetzt. Da in MISKAM kein Gelände definiert ist, ist diese Gleichsetzung richtig. Der Wert für die Komponente  $v_s$  wird auf den Wert -99 gesetzt, falls die Zelle in einem Gebäude liegt.

**VJJJJMMTTHHNN .DMNB** : ARTM nimmt isotrope Turbulenz an. Deshalb gilt:

$$\sigma_{u,v,w} = \sigma_u = \sigma_v = \sigma_w$$

Da die Turbulenzenergie  $e$  definiert ist als

$$e = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) = \frac{3}{2}\sigma_{u,v,w}^2$$

gilt

$$\sigma_{u,v,w} = \sqrt{\frac{2}{3}e}$$

**KJJJJMMTTHHNN.DMNB**: Da ARTM isotrope Turbulenz annimmt, gilt:

$$K_h = K_v = K_{h,v}$$

Neben den Dateien zu Wind- und Turbulenzfeldern werden die Dateien `zg00.dmna`, `zp00.dmna` und `volout.dmna` geschrieben.

### 3.3.3 Anpassungen an ARTM zur Verwendung der sequenziellen Felder

Damit ARTM das prognostische Windfeld auswählen kann, wurden entsprechende Schnittstellen in ARTM eingefügt. Wie zuvor in der Einleitung des Kapitels 3.3 erwähnt, wurde eine NOSTANDARD-Option `PWFM` erstellt, welche in der `ARTM.txt` Eingabedatei unter dem Punkt `os` hinzugefügt werden kann. Entsprechende Anpassungen wurden dazu unter anderem in `TALInp.c` vorgenommen. Des Weiteren wurden neue Datenstrukturen und Datentypen in `TalNms.c` definiert, welche es ermöglichen, Server-Routinen<sup>5</sup> durchzuführen und die Daten sinnvoll zwischenspeichern zu können.

Für das Einlesen, die Speicherung und die Weiterverarbeitung der prognostischen Windfelder wurde zunächst die Implementierung der `TALdia` Windfelder in der Quelldatei

---

<sup>5</sup> Server-Routinen ermöglichen es mit wenig Aufwand auf Funktionen und die dazugehörigen Strukturen und Informationen im jeweiligen Modul zuzugreifen.

`TalPrf.c` und Headerdatei `TalPrf.h` genauestens analysiert und relevante Funktionen erneut getestet. Dabei war das Ziel, eine ähnliche Implementierung für die prognostischen Windfelder wie für die TALdia Windfelder zu erzielen. Dieses Vorgehen ist durch die Tatsache motiviert, dass die durch TALdia erzeugten Windfelder schon lange Bestandteil von ARTM sind und somit sehr gut getestet sind.

Analog zum Modul `TalPrf.c` und seiner Header-Datei `TalPrf.h` wurde dann das Modul `TalPWFM.c` und eine passende Header-Datei `TalPWFM.h` erstellt. Die darin definierte Funktion `PwfmTabServer` liest den Ordner ein, indem die Windfelddateien liegen und erstellt eine Liste mit allen relevanten Dateien. Sie orientiert sich an der Funktion `LibTabServer` aus `TalPrf.c` für die TALdia Windfelder. Unter anderem mussten Anpassungen in der Erkennung der Listenstruktur durchgeführt werden, da die Namensgebung der Windfelddateien verschieden sind. Die Namen der von TALdia erzeugten Dateien der Windfelddatenbibliothek setzen sich aus Informationen der berechneten Anströmrichtung und Stabilitätsklasse zusammen, die Namen der Dateien bei Verwendung des prognostischen Modells beinhalten stattdessen Informationen zum Zeitpunkt der betrachteten Ausbreitungssituation.

Da die erzeugten Windfelddateien für das prognostische Windfeldmodell durch GO-ARTM in einem für ARTM kompatiblen `dmna`-Format umformatiert werden, kann die Liste der Windfelddateien mit schon vorhandenen Funktionen (u. a. `DmnRead` aus `IBJdmn.c`) eingelesen werden und in die neu erzeugten Datenstrukturen in der Funktion `PwfmWndServer.C` gespeichert werden. Dabei wurde jeder einzelne Schritt des Einlesens und der Abspeicherung genauestens im Quellcode verfolgt und überprüft, ob ein identisches Vorgehen zu einer Verarbeitung eines TALdia Windfeldes vorliegt.

Zuletzt wurden alle Informationen zur Weiterverwendung an diejenigen Strukturen weitergegeben, die für die eigentliche Ausbreitungsrechnung relevant sind. Dies umfasste die Struktur `WNDREC` für die Windgeschwindigkeiten, die Struktur `TRBREC` für die Geschwindigkeitsfluktuationen, und die Struktur `DFREC` für die Diffusionskoeffizienten.

Da die Ausbreitungsrechnungen unter Verwendung einer durch TALdia erzeugten Windfelddatenbibliothek mit denselben Strukturen arbeitet und zuvor in jedem Schritt ein identisches Vorgehen umgesetzt und geprüft wurde, kann die Simulation von dieser Stelle des Quellcodes an identisch durchgelaufen werden.

### 3.3.4 Testrechnungen

Zum Testen der Schnittstelle in ARTM bzw. GO-ARTM wurde der folgende Testfall betrachtet.

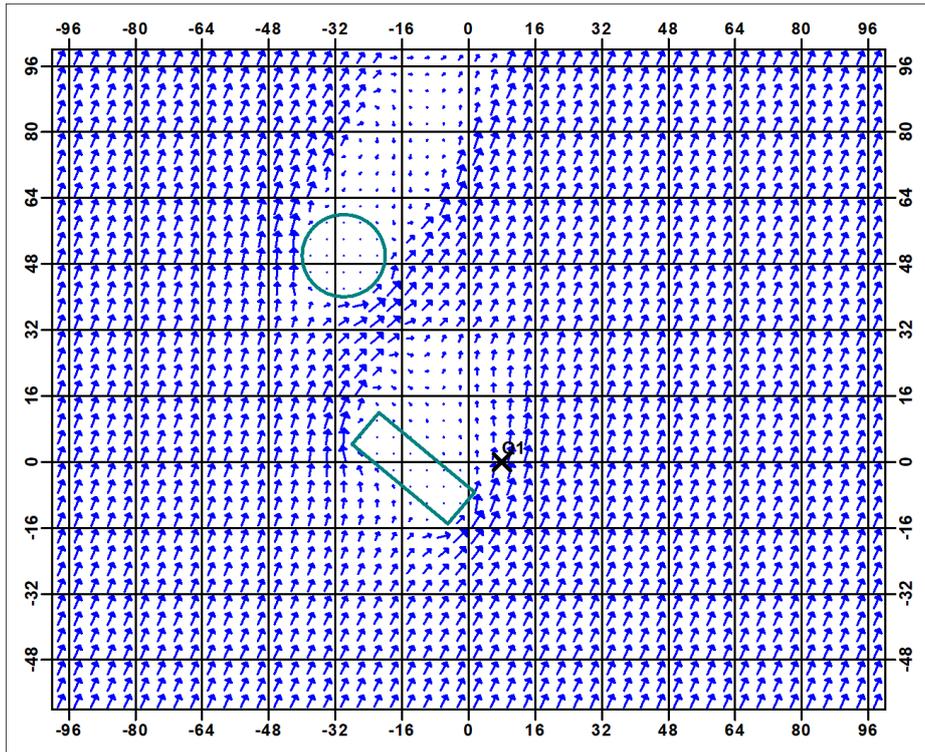
- 50 x 40 Gitterzellen bei einer horizontalen Auflösung von 5 m von  $x_{\min} = -100$  m,  $x_{\max} = +100$  m,  $y_{\min} = -60$  m und  $y_{\max} = +100$  m
- Gebäude 1 (Quader) [m]:  $x_b = -5$ ,  $y_b = -15$ ,  $a_b = 10$ ,  $b_b = 30$ ,  $c_b = 20$ ,  $w_b = 50$
- Gebäude 2 (Zylinder) [m]:  $x_b = -30$ ,  $y_b = 50$ ,  $a_b = 0$ ,  $b_b = -20$ ,  $c_b = 30$ ,  $w_b = 0$
- Punktquelle bei  $x = 8$  m,  $y = 0$  m in 5 m Höhe über Grund, Quellstärke 5 Bq/s Cs-137, Klasse 1
- Anemometerposition bei  $X = 70$  m,  $Y = 70$  m in 20 m über Störniveau

Die Meteorologiedatei besteht aus den fünf, in Tab. 3.1 wiedergegebenen, meteorologischen Situationen, aus denen eine zeitreihe.dmna gebildet wurde.

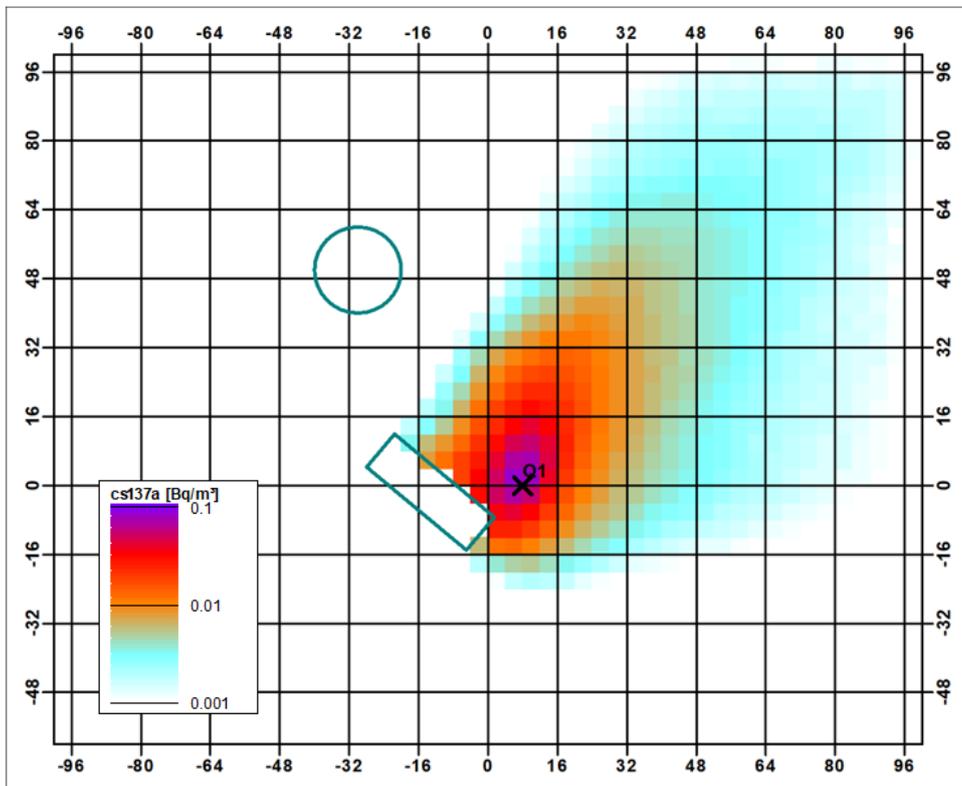
**Tab. 3.1** Meteorologische Situationen für die Testrechnungen

Nr.	Windrichtung	Windgeschwindigkeit	Ausbreitungs- klasse	Regenrate
1	280°	1,2 m/s	III/1 (neutral)	0 mm/h
2	230°	1,4 m/s	III/1 (neutral)	0 mm/h
3	240°	1,5 m/s	III/1 (neutral)	0,5 mm/h
4	250°	1,1 m/s	III/1 (neutral)	0,3 mm/h
5	210°	2,3 m/s	III/1 (neutral)	0 mm/h

Für diese meteorologischen Zeitreihe wurde zunächst mit ARTM und dem massenkonsistenten Modell TALdia eine normale Strömungs- und Ausbreitungsrechnung durchgeführt. In den Abb. 3.7 sieht man das resultierende Windfeld in 7 m über Grund für die meteorologischen Parameter in Ausbreitungssituation 5. In Abb. 3.8 ist das bodennahe Konzentrationsfeld (unterste Schicht von 0-3 m) für Cs-137 über die komplette Zeitreihe, also alle 5 Ausbreitungssituationen gezeigt.



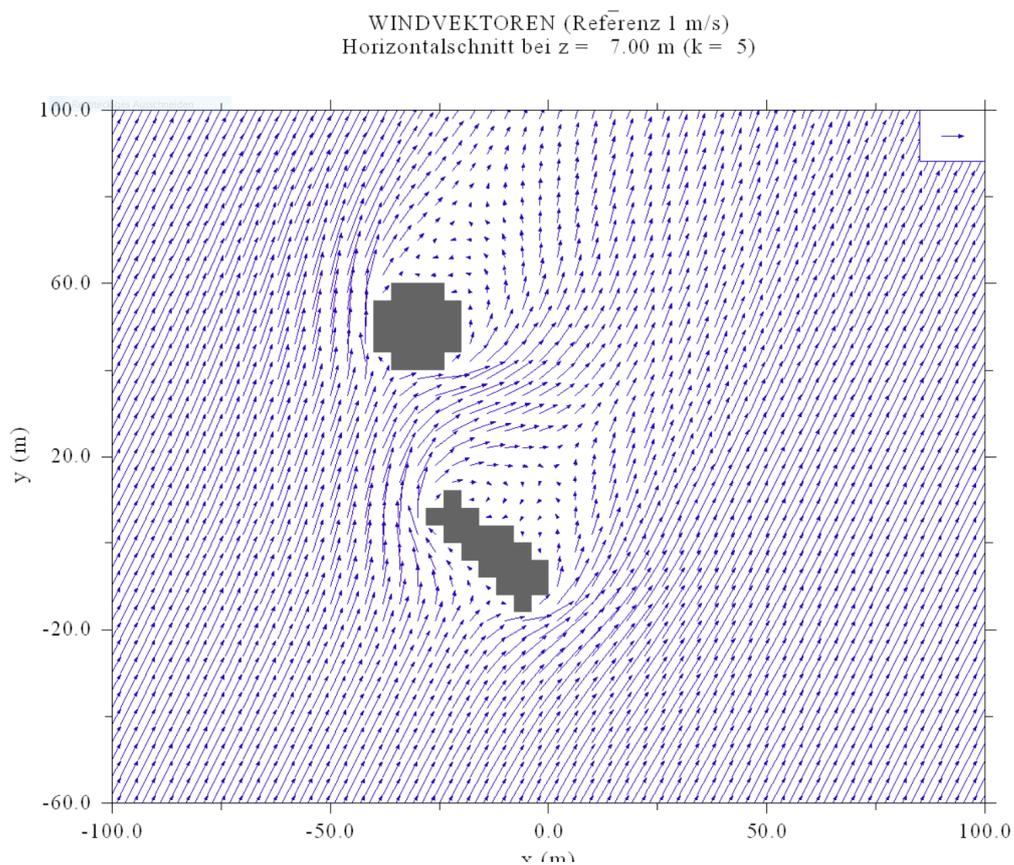
**Abb. 3.7** Strömungsfeld von TALdia in 7 m Höhe ü. G. (Ausbreitungssituation 5)



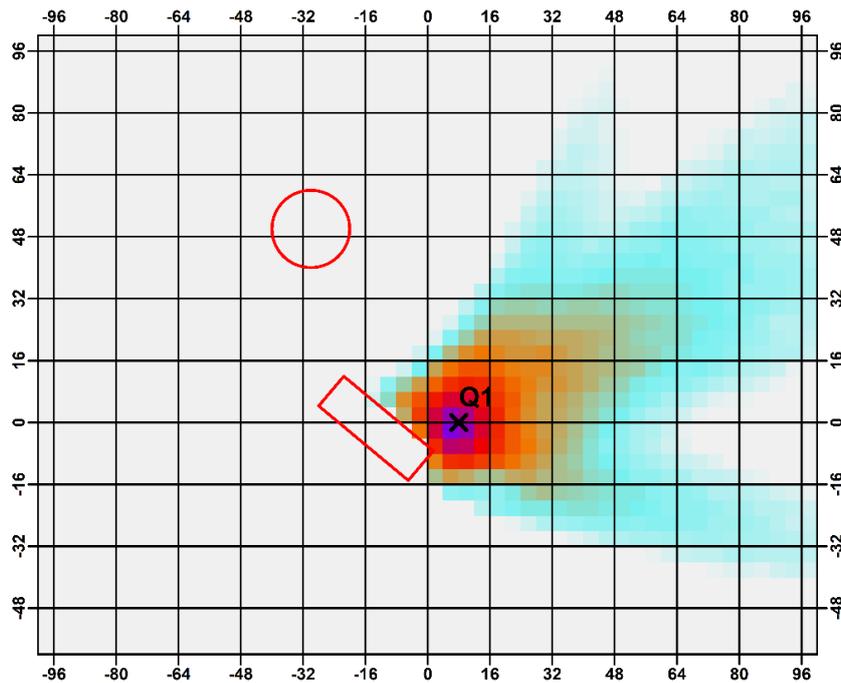
**Abb. 3.8** Bodennahes Konzentrationsfeld für Cs-137 auf Basis der Strömungsrechnungen mit TALdia für alle 5 Ausbreitungssituation

Im nächsten Schritt wurde der NOSTANDARD Parameter PWFM gesetzt und die Berechnung des Strömungs- und Turbulenzfeldes mit der in den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 beschriebenen Schnittstelle zum Modell MISKAM durchgeführt.

In der Abb. 3.9 ist das mit MISKAM für dieselbe Ausbreitungssituation 5 berechnete Windfeld in 7 m ü. G. dargestellt. Es sind große Übereinstimmungen aber auch Unterschiede in den Nachlaufwirbeln zu den Gebäuden feststellbar. Abb. 3.10 zeigt wieder das bodennahe Konzentrationsfeld von Cs-137 für die 5 Ausbreitungssituationen unter Verwendung der MISKAM Wind- und Turbulenzfelder.



**Abb. 3.9** Strömungsfeld von MISKAM in 7 m Höhe ü. G. (Ausbreitungssituation 5)



**Abb. 3.10** Bodennahes Konzentrationsfeld für Cs-137 auf Basis der Strömungsrechnungen mit MISKAM für alle 5 Ausbreitungssituationen

Zwischen Abb. 3.4 und Abb. 3.6 sind klare Unterschiede erkennbar. Insbesondere der Anteil der Ausbreitungssituation 1 mit einer Windrichtung von  $280^\circ$  ist deutlich im unteren rechten Eck in Abb. 3.6 an der zusätzlichen Ausbreitungsfahne zu erkennen. Dies ist auf die von dem Zylinder ausgehenden unterschiedlichen Nachlaufwirbel zurückzuführen. Auch minimale Abweichungen für die Ausbreitungssituation 5 sind sichtbar. Während für die Konzentrationsfelder mit dem prognostischen Windfeld noch eine separate Fahne erkennbar ist, ist sie für das diagnostische Windfeld mit den anderen Ausbreitungsrichtungen verwischt. Die deutlichen Ausbreitungsfahnen für das prognostische Windfeldmodell für die unterschiedlichen Windrichtungen ist darauf zurückzuführen, dass keine Windrichtungsinformationen verloren gehen. Für das diagnostische Windfeld hingegen wird eine Superposition von zwei „benachbarten“ Windfeldern mit einem Winkelabstand von  $10^\circ$  genutzt, sodass die vorgegebene Windrichtung nur approximiert werden kann und somit Ausbreitungssituationen mit ähnlichen Windrichtungen sich verschmieren. Außerdem wird beim diagnostischen Windfeldmodell vorausgesetzt, dass die Anströmwindgeschwindigkeit lediglich einen Einfluss auf die Windgeschwindigkeit, aber nicht auf die Windrichtung hat.

### 3.4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens 3616S72575, Arbeitspaket 2, wurde in das atmosphärische Radionuklid-Transportmodell ARTM und der graphischen Oberfläche GO-ARTM eine Schnittstelle zur Verwendung eines prognostischen Windfeldmodells implementiert. Das bisher standardmäßig in ARTM genutzte diagnostische Windfeldmodell TALdia ist in seinem Anwendungsbereich stark eingeschränkt. Das prognostische Windfeldmodell kann deshalb optional für den meteorologischen Antrieb des Lagrange'schen Ausbreitungsmodells ARTM verwendet werden und erweitert somit die Anwendungsmöglichkeiten von ARTM.

In einem ersten Bearbeitungsschritt wurden verschiedene Windfeldmodelle auf ihre Eignung zur Verwendung in ARTM hin untersucht. Die Entscheidungskriterien für die Bewertung der betrachteten Windfeldmodelle und schließlich die Auswahl eines Modells wurden in diesem Kapitel 3 dargelegt. Die Entscheidung für das prognostische Windfeldmodell MISKAM wurde begründet.

Zur Implementierung einer Schnittstelle zu MISKAM wurde in GO-ARTM eine Routine zur Steuerung der MISKAM Läufe entwickelt. Hier werden zunächst generelle Informationen zum Kataster und zu den Gebäuden in eine von MISKAM erwartete Datei geschrieben. Anschließend wird für jede meteorologische Situation die Steuerdatei zur Strömungsberechnung geschrieben und MISKAM gestartet. Zum Schluss werden die erzeugten Strömungs- und Turbulenzfelder in das von ARTM benutzte DMNA/DMNB-Format umgerechnet. Diese können durch eine neu implementierte Schnittstelle von ARTM einzeln für jede Ausbreitungssituation eingelesen und verarbeitet werden. Eine lineare Interpolation zwischen den zwei der aktuellen Ausbreitungssituation am nächsten kommenden vorberechneten Ausbreitungssituationen, wie das bei der Verwendung von TALdia erforderlich war, entfällt.

Für einen einfachen Testfall wurde das Verfahren erfolgreich angewendet und dokumentiert.

## **4 AP 3: Grenzschichtmodell**

### **4.1 Einleitung**

Die VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 /VDI 02/, /VDI 17a/ und die TA Luft /BMU 18/ wurden überarbeitet und weiterentwickelt (siehe Kapitel 2). Diese Änderungen in TA Luft und der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 erforderten Anpassungen in ARTM, um weiterhin zu ermöglichen, dass Ausbreitungsrechnungen für Radionuklide dem Stand von W&T entsprechend durchgeführt werden können. Die Änderungen wurden analysiert und in dem das Grenzschichtprofil definierenden Teil des Quellcodes von ARTM und TALdia umgesetzt. Die neue Parametrisierung kann über eine NOSTANDARD-Option bewirkt werden (siehe Kapitel 4.2 bzw. 4.3).

Zudem zeigte sich im Vorläufervorhabens /RIC 15d/, dass die Verwendung von standardisierten Grenzschichtprofilen bei Einzelfallbetrachtungen zu großen Abweichungen der Grenzschichtparameter von gemessenen Profilen kommen kann. Daher wurde in ARTM eine Schnittstelle für die Verwendung von Wind- und Turbulenzprofilen geschaffen, um vorhandene (z. B. gemessene oder mit Hilfe anderer Grenzschichtmodelle simulierte) Informationen zum Grenzschichtprofil für die Ausbreitungsrechnung verfügbar zu machen. Durch diese Erweiterung muss das Modell nicht mehr ausschließlich auf die Standardprofile der (aktualisierten) VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 zurückgreifen, die bei Einzelfallbetrachtungen oder an Standorten außerhalb Mitteleuropas unter Umständen eine schlechte Näherung der realen Bedingungen darstellen (siehe Kapitel 4.4).

### **4.2 Implementierung der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8**

Die TA Luft verweist zur Turbulenzparametrisierung auf die VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8. Parallel zur Novellierung der TA Luft wurde diese alte VDI-Richtlinie /VDI 02/ überarbeitet und in Bezug auf moderne Messsysteme sowie den aktuellen Erkenntnissen bei der Strömungs- und Ausbreitungsrechnung an den Stand von Wissenschaft und Technik angepasst.

Die neue VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 /VDI 17a/ enthält nun ein eindimensionales Grenzschichtmodell, das unterschiedliche Messdaten verwenden kann, um die atmosphärische Grenzschicht zu beschreiben und die entsprechenden Grenzschichtkenngößen abzuleiten. Die in dieser Richtlinie angegebenen Profildfunktionen für Wind und Turbulenz

wurden aus theoretischen Annahmen und Messungen in der bodennahen Grenzschicht ermittelt.

Einen Überblick zu den Änderungen zwischen der Vorgängerversion /VDI 02/ und der Aktualisierung /VDI 17a/ enthält /MAß 17/.

#### 4.2.1 Ansteuerung des neuen Grenzschichtmodells

In der ARTM Programmversion 2.8.0 /GRS 15b/ ist unter anderem ein vom Ingenieurbüro Janicke vorgeschlagenes meteorologisches Grenzschichtprofil implementiert /JAN 00/. In der Programmsteuerung ist dies dadurch realisiert, dass mit der os-Option `NOSTANDARD` innerhalb der Textdatei `ARTM.txt` die Option `BLMBZU2` angegeben wird. Durch weitere Anpassungen im Quellcode kann zwischen dem Standardprofil gemäß der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2002) /VDI 02/ und dem neuem Profil /JAN 00/ auf einfachem Weg gewechselt werden. Analog zu diesem Vorgehen wurde jetzt für die neue VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 (2017) /VDI 17a/ eine weitere Option `BLMVDI17` erstellt. Entsprechende Anpassungen innerhalb des Quellcodes (siehe folgender Abschnitt 4.2.2) wurden implementiert und dokumentiert. Neben dem in ARTM standardmäßig vorgesehenen Grenzschichtprofil nach der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (2002) /VDI 02/ kann somit innerhalb der Textdatei `ARTM.txt` nun auch das aktualisierte Grenzschichtmodell nach /VDI 17a/ ausgewählt werden.

#### 4.2.2 Implementierung im Quellcode

Die Implementierung des aktualisierten Grenzschichtprofils erfolgte hauptsächlich im Modul `TalBlm.c` und der dazugehörigen Header-Datei `TalBlm.h`. Zunächst wurde die Datenstruktur angepasst, sodass die neuen notwendigen Parameter an jeder Stelle innerhalb des Programmablaufes zugänglich sind, an denen sie benötigt werden. So wurde zum Beispiel die Struktur `BLMPARM`, welche die Parameter für das Grenzschichtmodell beschreibt, in der Headerdatei `TalBlm.h` um die Parameter `month` und `h1` erweitert.

Die mittlere Mischungsschichthöhe  $h_m$  weist bei labiler Schichtung in Mitteleuropa eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Jahreszeit auf. Der entsprechende Parameter `month` dient deshalb dazu, eine von der Jahreszeit abhängige Mischungsschichthöhe bestimmen zu können (vgl. Gleichung (67) in /VDI 17a/). Da TALdia nur zeitlich unabhängige

Windprofile zur Verfügung stellt, kann eine monatlich ändernde Mischungsschichthöhe nicht bestimmt werden. In diesem Fall wird eine über das Jahr gemittelte Mischungsschichthöhe angenommen.

Des Weiteren wurde innerhalb der aktualisierten VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 (2017) ein analytischer Ansatz für das Windprofil vorgestellt (vgl. Anhang A2 in /VDI 17a/). Dieser basiert auf einem Zweischichten-Ansatz und benötigt dafür den oben erwähnten Parameter  $h_1$ . Die Größe  $h_1$  ist dabei definiert als die halbe Höhe, in der der vertikale Diffusionskoeffizient  $K_m$  sein Maximum erreicht und wird analytisch gegeben durch eine Abhängigkeit von der Mischungsschichthöhe  $h_m$  und der Obukhov-Länge  $L$ . Die Mischungsschichthöhe selbst ist abhängig von der Ausbreitungsklasse und der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$ . Diese ist vorzugsweise direkt aus Messungen zu bestimmen oder aus einem bodennahen, gemessenen Wert der vertikalen Geschwindigkeitsfluktuation  $\sigma_w$ . Ist keiner dieser Messungen vorhanden, muss die Schubspannungsgeschwindigkeit durch den Vergleich einer Messung der Windgeschwindigkeit  $U_a$  in der Höhe  $h_a$  mit der theoretischen Windprofilgeschwindigkeit  $U$  in derselben Höhe abgeschätzt werden. Da das Windfeldprofil der alten VDI-Richtlinie nur ein Ein-Schichtenansatz ist, liegt in diesem Fall eine direkte Proportionalität zwischen der theoretisch bestimmten Windgeschwindigkeit  $U$  und der Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  vor. Dadurch ist es unmittelbar möglich aus einer gemessenen Windgeschwindigkeit  $U_a$  in der Höhe  $h_a$  die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  zu bestimmen. Für den neu implementierten Zwei-Schichten-Ansatz ist dies nur für die untere Schicht möglich, welche unterhalb der Höhe  $h_1$  liegt. Für gemessene Werte (Windgeschwindigkeit und Windrichtung) in der Höhe  $h_a$  größer als die Höhe  $h_1$  wurde ein iteratives Verfahren im Quellcode implementiert. Dieses stellt sicher, dass das theoretische Windfeldprofil in der Höhe  $h_a$  die gemessenen Werte in iterativen Schritten annimmt. Dabei war es wichtig darauf zu achten, dass alle Größen, die eine Abhängigkeit von der iterativ bestimmten Schubspannungsgeschwindigkeit aufweisen, ebenfalls erneut berechnet wurden. Dies beinhaltet unter anderem die erneute Berechnung der Mischungsschichthöhe  $h_m$  für stabile und indifferente Schichtungen gemäß Gleichung (66) der aktualisierten VDI-Richtlinie /VDI 17a/, als auch die davon abhängige und wichtige Größe  $h_1$ .

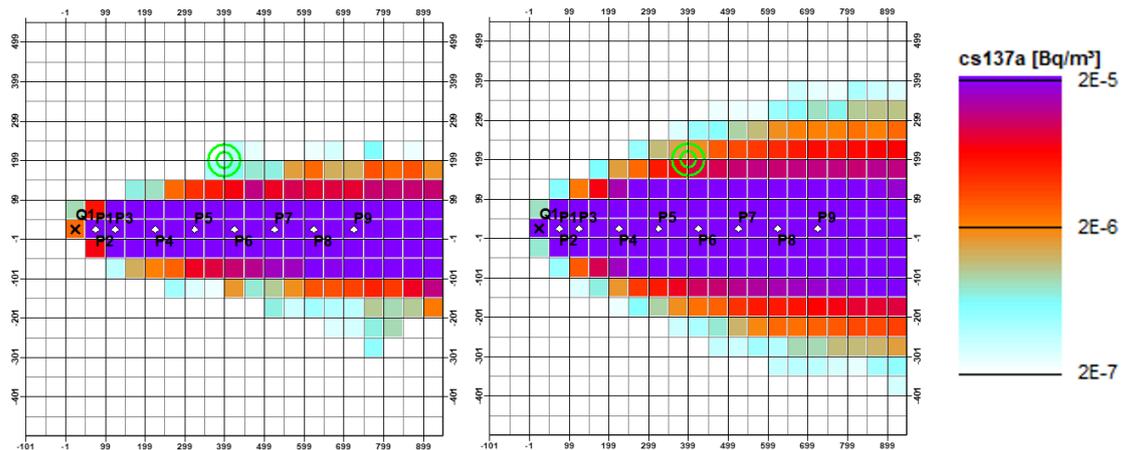
Die notwendigen Funktionen zur Berechnung des Grenzschichtprofils gemäß der aktualisierten VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 /VDI 17a/ wurden innerhalb des Quellcodes an den

entsprechenden Schnittstellen implementiert und kommentiert. Außerdem wurden Kontrollabfragen eingefügt, sodass eine sichere und korrekte Berechnung gewährleistet ist.

#### **4.2.3 Verifikation der Implementierung und Vergleich mit dem bisherigen Standard-Grenzschichtmodell**

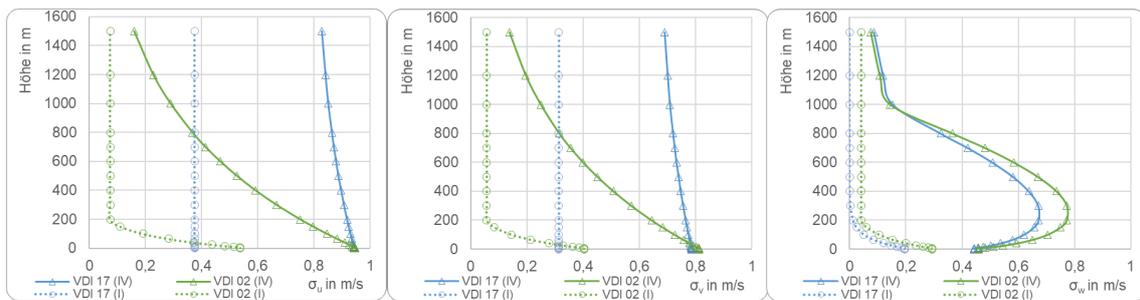
Um die Implementierung zu verifizieren, wurden unterschiedliche Projektbeispiele aus der ARTM Programmbeschreibung /GRS 15b/ mit dem Grenzschichtmodell der alten und dem der aktualisierten VDI-Richtlinie durchgeführt und deren Ergebnisse verglichen. Einige Ergebnisse werden im Folgenden exemplarisch präsentiert.

Das erste Projektbeispiel ist eine 24-stündige AKTERM-Zeitreihe mit einer konstanten Windgeschwindigkeit von 2 m/s aus Westrichtung und einer Niederschlagsintensität von 2 mm/h (Beispielprojekt D2m(24)2mmAKT der bisherigen GO-ARTM Distribution). Dieses Projekt enthält kein vorgegebenes Geländekataster und keine Gebäude. Da keine Windfeldbibliothek erzeugt werden muss, ist es somit ein optimaler Test, der unabhängig von TALdia ist und damit nur die implementierten Profile vergleicht. Abb. 4.1 zeigt beispielhaft den Vergleich der Mittelwerte für die Konzentration des Aerosol Cs137 in vier Meter Höhe unterhalb der Quellhöhe von 20 m. Wie erwartet, produziert die alte VDI-Richtlinie für gezielte Ausbreitungssituationen sehr schmale Fahnen /GRS 15b/, während das aktualisierte Profil breitere und realitätsnähere erzeugt. Der Maximalwert der mittleren Gammasubmersion oberhalb von 1 MeV liegt für die alte Richtlinie bei 0,01865 Bq/m<sup>2</sup> und für die aktualisierte bei 0,01574 Bq/m<sup>2</sup>. Dies entspricht einer Übereinstimmung von 84 %. Der kleinere Wert für die aktualisierte Richtlinie ist auf die breitere Fahne zurückzuführen und entspricht somit den Erwartungen.



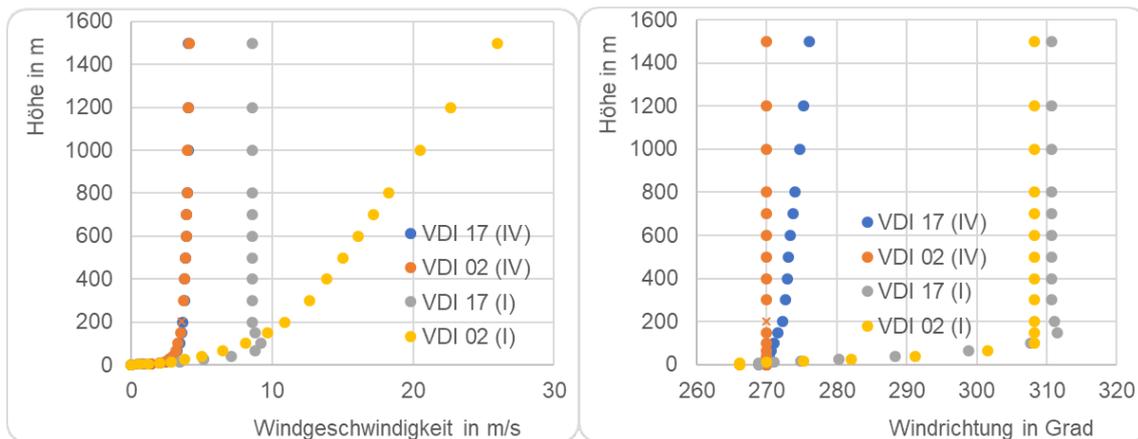
**Abb. 4.1** Vergleich der Mittelwerte für die Konzentration des Aerosol Cs137 in vier Meter Höhe unterhalb der Quellhöhe von 20 m: Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für die alte VDI-Richtlinie /VDI 02/ und in der Mitte für die aktualisierte /VDI 17a/. Auf der rechten Seite befindet sich die Farblegende.

Abb. 4.2 zeigt für dasselbe Beispiel die Standardabweichungen der Windgeschwindigkeiten als Funktion der Höhe für beide Versionen der VDI-Richtlinie und für zwei unterschiedliche Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier. Es ist deutlich zu erkennen, dass die horizontalen Standardabweichungen  $\sigma_u$  und  $\sigma_v$  für die aktualisierte Richtlinie mit steigender Höhe größere Werte als die alte Richtlinie annimmt und somit breitere Ausbreitungsfahnen verursacht.



**Abb. 4.2** Standardabweichungen  $\sigma_u$  (links),  $\sigma_v$  (Mitte) und  $\sigma_w$  (rechts) der Windgeschwindigkeit für beide VDI-Richtlinien für zwei Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier: Die entsprechenden Klassen sind in Klammern hinter den jeweiligen Richtlinien in der Legende angegeben.

Abb. 4.3 zeigt für dasselbe Beispiel die Windgeschwindigkeit und Windrichtung als Funktion der Höhe für beide VDI-Richtlinien und für zwei unterschiedliche Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier.



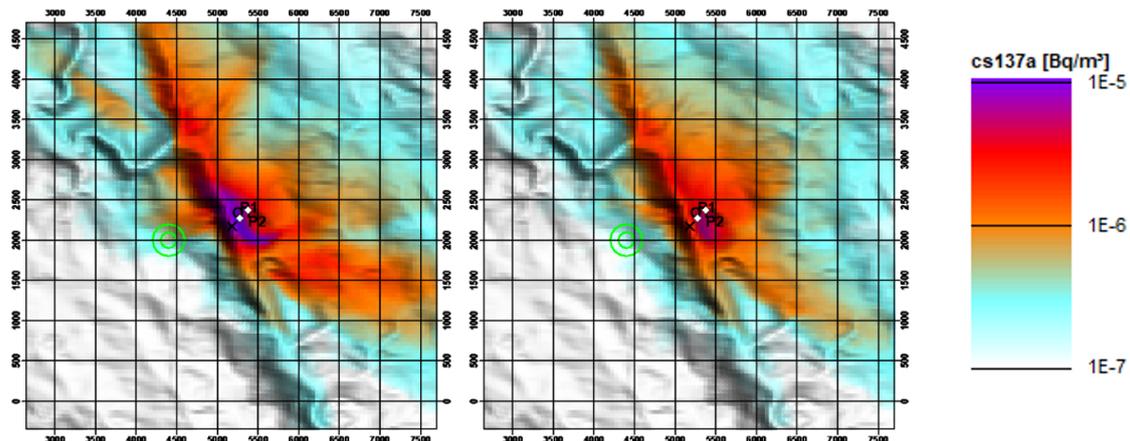
**Abb. 4.3** Windgeschwindigkeit und Windrichtung für beide VDI-Richtlinien für zwei Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier: Die entsprechenden Klassen sind in Klammern hinter den jeweiligen Richtlinien in der Legende angegeben.

Für labile Schichtungen (Klug/Manier Klasse IV) besteht für die Windgeschwindigkeiten kaum ein Unterschied zwischen den beiden Richtlinien. Für stabile Schichtungen (Klug/Manier Klasse I) hingegen entsteht durch den neu eingeführten Zwei-Schichten-Ansatz zwischen der bodennahen Schicht und der Ekman-Lösung für die Schicht darüber ein deutlicher Unterschied. Im Gegensatz zu dem einfachen Ansatz gemäß der alten VDI-Richtlinie nimmt die Geschwindigkeit in größeren Höhen nicht weiter zu, sondern nähert sich der geostrophischen Windgeschwindigkeit.

In der alten VDI-Richtlinie in Verbindung mit der TA Luft 2002 /TAL 02/ wurde für spezielle Bedingungen ( $h_m/L < -10$ ) eine konstante Windrichtung angenommen. Messungen haben jedoch gezeigt, dass in den unteren hundert Metern der Atmosphäre die größte Änderung der Windrichtung auftritt. Entsprechende Anpassungen wurden in der neuen Richtlinie vorgenommen, welche in Abb. 4.3 auf der rechten Seite insbesondere für die labilen Schichtungen gut zu sehen sind.

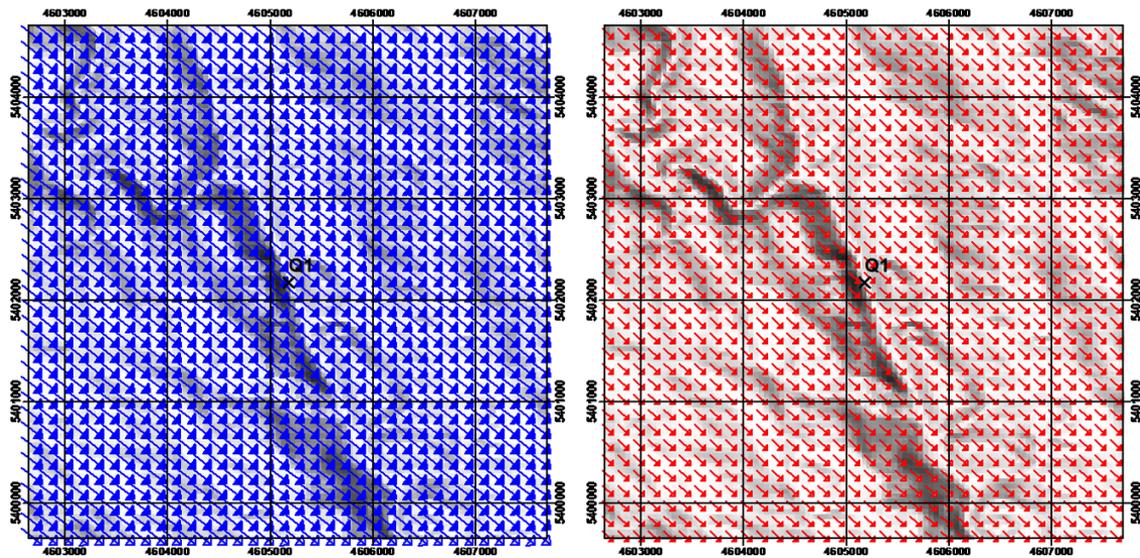
Um den Einfluss des neuen Grenzschichtmodells auf die von TALdia berechneten Wind- und Turbulenzfelder und die Ergebnisse einer Langzeitausbreitungsrechnung zu testen, wurde eine Jahresrechnung mit einer AKTERM-Datei und einem vorgegebenen Gelände (Projektbeispiel: `Langzeit_m_Gelaende`) durchgeführt. Abb. 4.4 zeigt beispielhaft für die Langzeitrechnung den Vergleich der Mittelwerte für die Konzentration des Aerosol Cs137 in der bodennahen Schicht. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass bei der Rechnung mit der alten VDI-Richtlinie besonders im nordwestlichen Bereich noch eine erhöhte Konzentration zu sehen ist. Schaut man sich die Statistik der Windrichtungen an

und extrahiert dafür die Ausbreitungsklassen, so ist diese Windrichtung dominiert von der Ausbreitungsklasse I. Die erhöhte Konzentration bei der Rechnung mit der alten VDI-Richtlinie im Vergleich zur aktualisierten ist somit zurückzuführen auf die schmalere Ausbreitungsfahnen und deutlich höheren Windgeschwindigkeiten bei dieser Ausbreitungsklasse. Dasselbe Argument gilt für die Form der Ausbreitung in der Nähe der Quelle selbst.



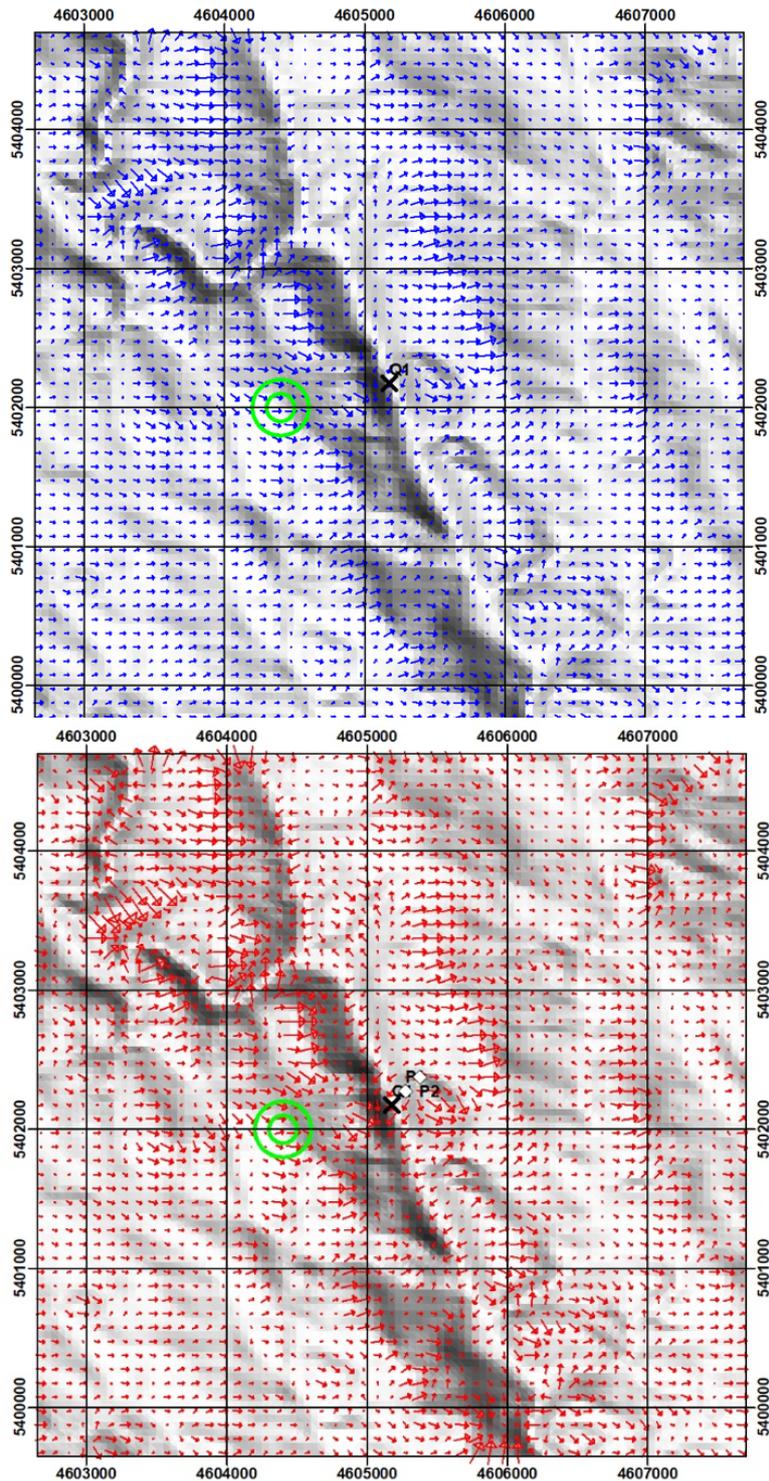
**Abb. 4.4** Vergleich der Mittelwerte für die Konzentration des Aerosol Cs137 in der bodennahen Schicht: Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für die alte VDI-Richtlinie /VDI 02/ und in der Mitte für die aktualisierte /VDI 17a/. Auf der rechten Seite befindet sich die Farblegende.

Wie durch die Langzeitausbreitungsrechnung mit Gelände bereits gezeigt, wurde das neue Grenzschichtmodell auch in TALdia erfolgreich implementiert. Die Windfeldbibliothek wurde ohne Fehler erstellt. Abb. 4.5 und Abb. 4.6 zeigen die erstellten Windfelder für zwei Höhenlevel für die Ausbreitungsklasse I und für beide Versionen der VDI-Richtlinie. In einer Höhe von 250 m ist der Effekt der bodennahen Schicht vernachlässigbar und die Windgeschwindigkeit und -richtung sollte durch den geostrophischen Windvektor gegeben sein. Wie schon zuvor erwähnt, steigt die Geschwindigkeit jedoch für die alte VDI-Richtlinie immer weiter an. Dies erklärt auch den Unterschied, den man zwischen den beiden Windfeldern in der oberen Hälfte der Abb. 4.5 sieht. Die blauen Pfeile entsprechen der alten VDI-Richtlinie, während die roten zu der aktualisierten gehören. Die Länge der Pfeile gibt den Wert der Windgeschwindigkeit wieder. Da die blauen Pfeile länger sind als die roten, spiegelt sich das Ergebnis aus Abb. 4.3 auch in den Windfeldern wider.



**Abb. 4.5** Erzeugte Windfeldbibliothek mit TALdia für beide VDI-Richtlinien: Die beiden Windfelder gelten für die Ausbreitungsklasse I in einer Höhe von 250 m. Die blauen Pfeile entsprechen dabei der alten VDI-Richtlinie, während die roten der aktualisierten. Die Länge der Pfeile bzw. die Dicke der Pfeilspitze gibt die Windgeschwindigkeit wieder. Je länger oder größer dieser ist, desto höher ist die Geschwindigkeit.

In der Abb. 4.6 sind die Windfelder in einer Höhe von 1,5 m präsentiert. Hier sind nur minimale Unterschiede zu sehen, was sich auch mit dem Ergebnis aus Abb. 4.3 deckt.



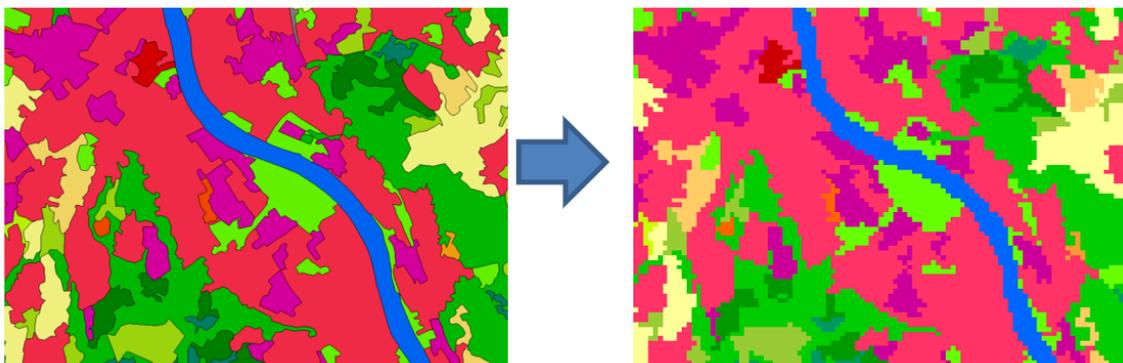
**Abb. 4.6** Erzeugte Windfeldbibliothek mit TALdia für beide VDI-Richtlinien: Die beiden Windfelder gelten für die Ausbreitungsklasse I in einer Höhe von 1,5 m. Die blauen Pfeile entsprechen dabei der alten VDI-Richtlinie, während die roten der aktualisierten. Die Länge der Pfeile bzw. die Dicke der Pfeilspitze gibt die Windgeschwindigkeit wieder. Je länger oder größer dieser ist, desto höher ist die Geschwindigkeit.

### 4.3 Implementierung der Änderungen der TA Luft

#### 4.3.1 Automatische Bestimmung von Rauigkeitslängen aus Geodaten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie

Die neue Version des „Landbedeckungsmodell für Deutschland (LBM-DE)“ des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie wurde aufbereitet und in ARTM integriert. Da kein Raster-Datensatz vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie mehr zur Verfügung gestellt wird, wurde zunächst unter [http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz\\_rahmen.gdz\\_div?gdz\\_spr=deu&gdz\\_akt\\_zeile=5&gdz\\_anz\\_zeile=1&gdz\\_unt\\_zeile=22&gdz\\_user\\_id=0](http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=5&gdz_anz_zeile=1&gdz_unt_zeile=22&gdz_user_id=0) der Ordner mit dem AcrInfo-SHAPE file (clc10.gk3.shape.zip, Basis 10 ha) heruntergeladen. Die darin enthaltenen Dateien CLC10.shp und CLC10.dbf wurden ausgelesen und analysiert.

Auf der Basis der in CLC10.shp enthaltenen Polygone (343.530 Stk) und der Zuweisung der Flächen zu Landnutzungsklassen in CLC10.dbf wurde im ersten Schritt eine Bitmap (Corine2012.BMP) in 100 m Raster mit einer 256 Farben-Palette erstellt. Anschließend wurde das Format dem der Datei mit den Rohdaten CLC2006 angeglichen (8910x6780) und die Ränder aufgefüllt sowie die Farbpalette der CLC2006 auf das neu erstellte Bitmap übertragen. Siehe Beispielvisualisierung in Abb. 4.7 der Rastererstellung. Abb. 4.8 zeigt dieselbe Region auf Basis von CLC2006.



**Abb. 4.7** Beispiel für die Umrechnung der Vektordaten des CLC2012 (links) zu Rasterdaten in 100 m Auflösung (rechts)



**Abb. 4.8** Ausschnitt aus dem alten Corinekataster CLC2006

Alle 39 möglichen Feldwerte wurden anhand von einzelnen Beispielen auf Plausibilität getestet. Die Anzahl und die Definition der CLC-Klassen sind gegenüber der CLC2006 unverändert geblieben. Es kommt in der CLC2012 sowohl zu Umdefinition von größeren Flächen in eine andere (aber ähnliche) Flächennutzungsklasse als auch zu Veränderungen in der Nutzungsart einzelner Zellen.

Auf der Basis dieser neuen Daten wurde mit den bestehenden Tools eine neue Datei (`r1.dat`) mit der Festlegung der Rauigkeitslängen auf einem 100 m Raster erstellt. Dabei wurden Änderungen im Referentenentwurf zu TA-Luft /BMU 18/ bei der Zuordnung von Landnutzungsklassen zu Bodenrauigkeiten berücksichtigt (s. Tab. 4.1).

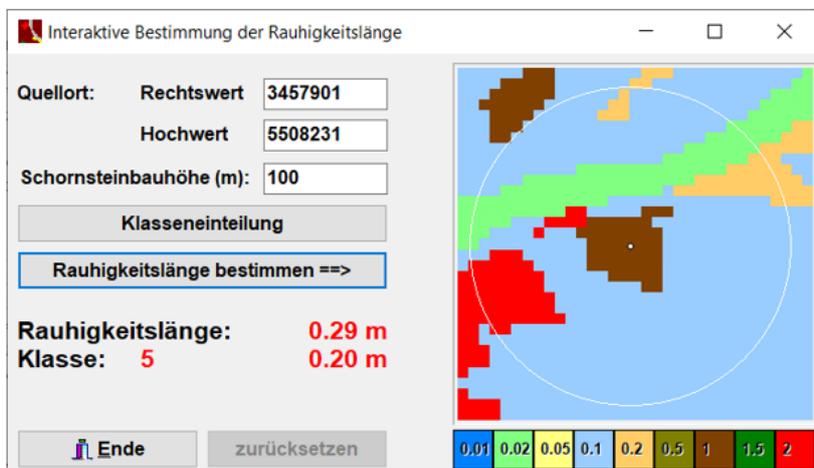
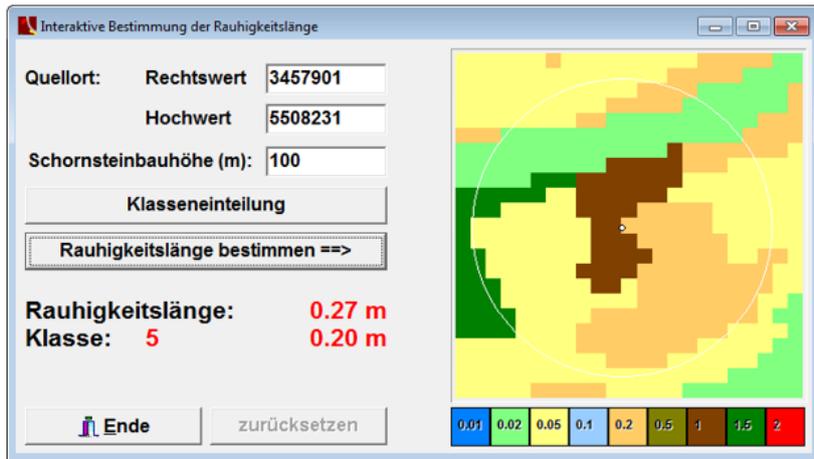
**Tab. 4.1** Mittlere Rauigkeitslänge  $z_0$  in Abhängigkeit der Landnutzungsklassen des LBM-DE-Katasters (Zahlen in Klammern) nach /BMU 18/

$z_0$ in m	Klasse (LBM-DE)
0,01	Strände, Dünen und Sandflächen (331); Wasserflächen (512)
0,02	Flächen mit spärlicher Vegetation (333); Salzwiesen (421); in der Gezeitenzone liegende Flächen (423); Gewässerläufe (511); Mündungsgebiete (522)
0,05	Abbauflächen (131); Deponien und Abraumhalden (132) <sup>a</sup> ; Sport- und Freizeitanlagen (142); Gletscher und Dauerschneegebiete (335); Lagunen (521)
0,10	Flughäfen (124); nicht bewässertes Ackerland (211) <sup>b</sup> ; Wiesen und Weiden (231) <sup>a</sup> ; Brandflächen (334) <sup>b</sup> ; Sümpfe (411); Torfmoore (412); Meere und Ozeane (523)

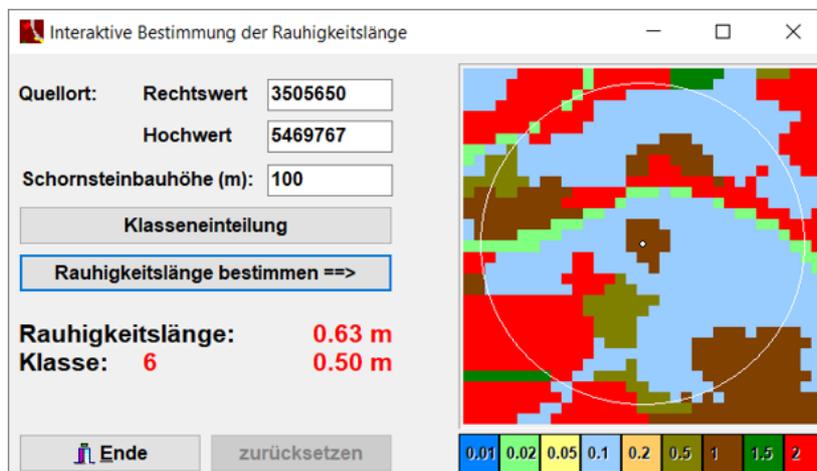
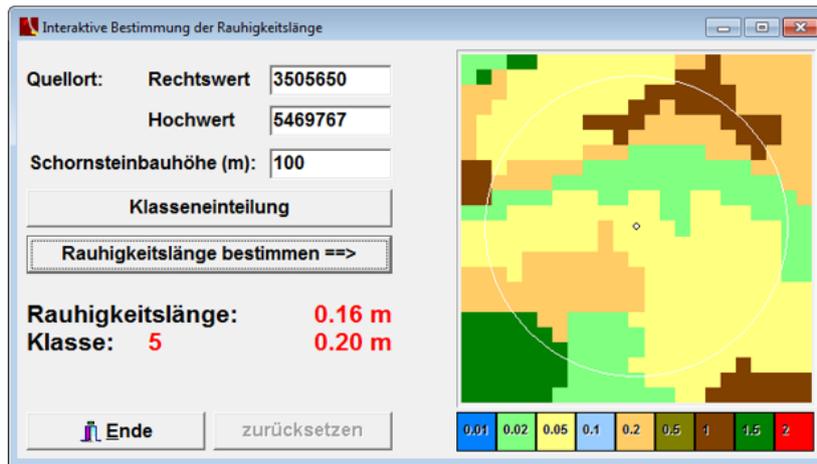
<b>z<sub>0</sub> in m</b>	<b>Klasse (LBM-DE)</b>
0,20	Straßen, Eisenbahn (122); städtische Grünflächen (141); Weinbauflächen (221); komplexe Parzellenstrukturen (242), Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung (243), natürliches Grünland (321) <sup>a</sup> ; Heiden und Moorheiden (322); Felsflächen ohne Vegetation (332)
0,50	Hafengebiete (123); Obst- und Beerenobstbestände (222); Wald-Strauch-Übergangsstadien (324)
1,00	Nicht durchgängig städtische Prägung (112); Industrie- und Gewerbeflächen (121); Baustellen (133)
1,50	Nadelwälder (312) <sup>c</sup> ; Mischwälder (313)
2,00	Durchgängig städtische Prägung (111); Laubwälder (311) <sup>d</sup> ;
	<sup>a</sup> in der früheren Version in der 0,02 m Klasse <sup>b</sup> in der früheren Version in der 0,05 m Klasse <sup>c</sup> in der früheren Version in der 1,00 m Klasse <sup>d</sup> in der früheren Version in der 1,50 m Klasse

Das Programm `rl_inter.exe` wurde zudem an das nun nach /BMU 18/ aktuelle Verfahren unter Benutzung des 15-fachen der Schornsteinhöhe als Radius für das Mittelungsverfahren angepasst.

In der Regel ergeben sich sehr ähnliche Ergebnisse bei der Ermittlung der Rauigkeitslänge. Bei 27 getesteten Standorten kerntechnischer Anlagen in Deutschland beträgt der Mittelwert der Abweichungen etwa 15%. Bei einigen wenigen Standorten ergeben sich größere Änderungen in der Rauigkeitslänge. (Siehe Beispiele in Abb. 4.9 bzw. Abb. 4.10.)



**Abb. 4.9** Beispiel für geringe Änderungen in der Rauigkeitslänge beim Übergang vom CLC2006 (oben) zum CLC2012 (unten): Standort KWB



**Abb. 4.10** Beispiel für größere Änderungen in der Rauigkeitslänge beim Übergang vom CLC2006 (oben) zum CLC2012 (unten): Standort KWO

Die neu berechnete Datei `RL_2019.dat` ist Bestandteil einer neuen zukünftigen Version von GO-ARTM. Wenn die TA-Luft in der neuen Version veröffentlicht ist, ist diese mit der alten `RL.dat` auszutauschen.

#### 4.3.2 Mittelungsverfahren für die Rauigkeitslänge

Das Programm `RL_Inter.exe` und das entsprechende Verfahren in ARTM wurde an das nun aktuelle Verfahren unter Benutzung des 15-fachen der Schornsteinhöhe als Radius für das Mittelungsverfahren angepasst. Mindestradius 150 m.

### 4.3.3 Zuordnung von Obukhov-Längen zu Klug/Manier-Klassen

Die Änderungen in den entsprechen Programmteilen von ARTM wurden vollzogen. Dabei wurde insbesondere die bisherige Doppel-Implementierung sowohl im Modul `TalBlm.c` als auch in `TalInp.c` beseitigt und die tabellierten Werte jetzt nur noch im Modul `TalInp.c` definiert.

### 4.3.4 Washoutkoeffizienten für Stäube

Die in ARTM bisher verwendeten Parameter für die Washoutkoeffizienten sind in der folgenden Tab. 4.2 angegeben.

**Tab. 4.2** Bisher in ARTM verwendete Washoutkoeffizienten für die verschiedenen Größenklassen Stäuben

Klasse	$d_a$ in $\mu\text{m}$	Washoutkoeffizient $\Lambda_0$ in 1/s für Niederschlagsintensität $I_0=1\text{mm/h}$
1	kleiner 2,5	$1 \cdot 10^{-4}$
2	2,5 bis 10	$2 \cdot 10^{-4}$
3	10 bis 50	$3 \cdot 10^{-4}$
4	größer 50	$4 \cdot 10^{-4}$
u	größer 10	$3 \cdot 10^{-4}$

Die in der neue AVV Tätigkeiten /AVV 20/ und auch im Referentenentwurf zu TA Luft enthaltenen Washoutkoeffizienten für Stäube weichen gegenüber der in ARTM bisher verwendeten Werte ab. Diese Washoutkoeffizienten sind in Tab. 4.3 dargestellt.

**Tab. 4.3** Washoutkoeffizienten der AVV Tätigkeiten /AVV 20/

Klasse	$d_a$ in $\mu\text{m}$	Washoutkoeffizient $\Lambda_0$ in 1/s für Niederschlagsintensität $I_0=1\text{mm/h}$
1	kleiner 2,5	$0,3 \cdot 10^{-4}$
2	2,5 bis 10	$1,5 \cdot 10^{-4}$
3	10 bis 50	$4,4 \cdot 10^{-4}$
4	größer 50	$4,4 \cdot 10^{-4}$

Washoutkoeffizienten für Stäube liest ARTM standardmäßig aus der Datei `artm.settings` ein. Der neuen Version 3.0 von ARTM wird eine alternative settings-Datei `ARTM_2019.settings` beigelegt, in der die Washout-Koeffizienten entsprechend des Referentenentwurfes der TA Luft hinterlegt sind. Für Staub mit einem aerodynamischen Durchmesser größer als  $10\ \mu\text{m}$  aber ansonsten unbekannter Größenverteilung (Klasse „u“) wird dort ein Wert von  $4,4 \cdot 10^{-4}\ \text{1/s}$  verwendet. Sobald der Referentenentwurf verabschiedet ist und das anzuwendende Regelwerk darstellt, sollte dann diese settings-Datei verwendet werden (durch Umbenennung in `artm.settings`).

#### **4.4 Realisierung GPZD**

##### **4.4.1 Notwendige Grenzschichtparameter**

Zur Realisierung einer *Grenzschichtprofil-Zeitreihen-Datei* (kurz GPZD) war der erste Schritt herauszufinden, welche Grenzschichtparameter notwendig sind, damit eine Ausbreitungsrechnung unter der Verwendung des Lagrange'schen Partikelmodells nach der VDI-Richtlinie 3945 Blatt 3 /VDI 00/ möglich ist. Laut dieser Richtlinie muss die mittlere Windgeschwindigkeit  $u$  und dessen Windrichtung  $r$  bekannt sein. Des Weiteren sind die Standardabweichung der Windgeschwindigkeitskomponenten  $\sigma_{u,v,w}$ , die Lagrange-Korrelationszeiten  $T_{u,v,w}$  und die Niederschlagsintensität notwendig. Basierend auf diesen Informationen und den schon bestehenden Modellansätzen, wurde innerhalb des Quellcodes geprüft, ob diese Grenzschichtparameter die einzigen relevanten sind, die an das Lagrange'sche Partikelmodell und somit zur Ausbreitungsrechnung weitergegeben werden. Dies bestätigte sich, sodass eine Standard-Übergabeliste durch die obigen Parameter gegeben ist.

Von der Verwendung abweichender Grenzschichtparameter mittels einer GPZD wurde abgesehen. Um andere Grenzschichtparameter in die modellintern benötigten Parameter umzurechnen, sind Modellannahmen zum Grenzschichtprofil nötig. Derartige Modellannahmen bzw. Eigenschaften gemittelter Standardprofile sollten durch den GPZD-Ansatz aber gerade aus dem Ausbreitungsmodell ausgelagert und dem (weltweiten) Anwender überlassen werden.

#### 4.4.2 Erstellung der GPZD und Implementierung im Quellcode

Es wurde ein Eingabe-Datenformat entwickelt, das sich an dem dmna Format orientiert. Dieses Format wird schon seit längerer Zeit erfolgreich innerhalb von ARTM verwendet. Um die spätere Implementierung validieren zu können, wurde das Programmteil `TalBlm.c`<sup>6</sup> so erweitert, dass die notwendigen Parameter eines mit einem in ARTM implementierten Standardgrenzschichtmodell berechneten Profils in das gewünschte GPZD-Format gespeichert werden können. Im Verlauf der Implementierung diente es somit als Testdatei. Das Format der GPZD wird anhand einer Beispieldatei in Anhang A erläutert. Dabei werden die in der GPZD mittels des Parameters `hh` angegebenen Höhenlevel<sup>7</sup> für das Rechengitter der ARTM-Simulation übernommen. Sollten auch in der `ARTM.txt`-Datei Höhenlevel definiert sein, werden die Level der GPZD verwendet und ein Warnhinweis ausgegeben, dass die Höhenlevel aus `ARTM.txt` ignoriert werden.

Die Einlese-Routine, die Parameter-Speicherung, die Weiterverarbeitung, sowie z.B. geeignete Interpolations- und Extrapolationsmethoden für alle im Modell benötigten Höhenlevel basiert auf dem AKTerm-Format<sup>8</sup> der meteorologischen Zeitreihe. Sie wurden in einer neu erstellten Quellcodedatei `TalGPZD.c` und der entsprechenden Headerdatei `TalGPZD.h` eingebaut und an den angepassten Schnittstellen (z.B. in `TalInp.c`) innerhalb von ARTM implementiert. Dabei wurde insbesondere darauf geachtet, dass genügend Kontrollabfragen im Quellcode vorhanden sind, um mögliche Eingabefehler abzufangen. Außerdem wird der Anwender informiert, falls die angegebene GPZD fehlerhaft ist, und entsprechende Anweisungen zur Behebung der Fehler werden ausgegeben. Siehe hierzu auch Abschnitt 4.4.4.

Die Einlese-Routine für die ARTM-Eingabedatei wurde dahingehend erweitert, dass eine Option `gpzd` hinzugefügt wurde. In Verbindung mit einer vorhandenen GPZD wird dann keine meteorologische Zeitreihe im AKTerm- oder `zeitreihe.dmna`-Format oder meteorologische Ausbreitungsklassenstatistik AKS mehr vom Programm als Eingabe erwartet.

---

<sup>6</sup> In dem Programmteil `TalBlm.c` wird die Berechnung des Grenzschichtprofils durchgeführt.

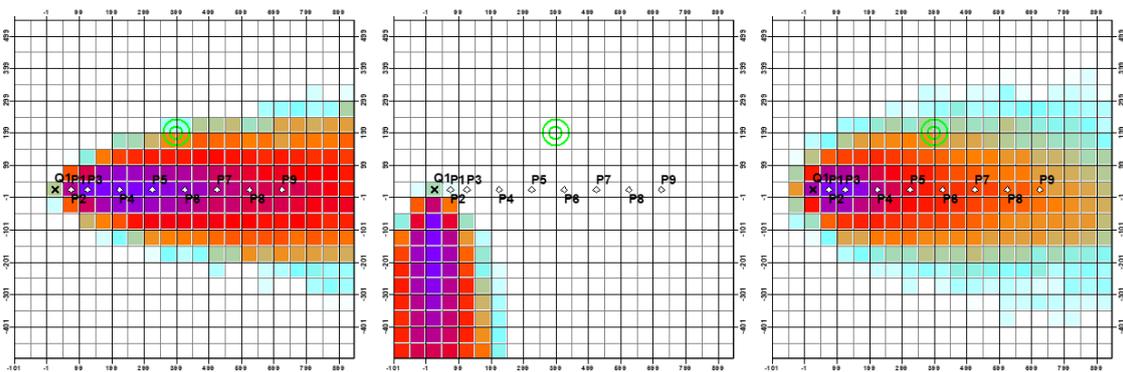
<sup>7</sup> Dabei handelt es sich die horizontalen Grenzen der jeweiligen Simulationsschichten. Programmintern werden die angegebenen Parameter dann, wie für die weitere Simulation benötigt, auf das Arakawa-C-Netz interpoliert.

<sup>8</sup> Implementiert in der Quellcodedatei `TalAKT.c` und dessen Headerdatei `TalAKT.h`.

Falls diese jedoch trotzdem angegeben werden, werden diese durch die neu eingebaute Implementierung ignoriert.

#### 4.4.3 Validierung der Ergebnisse

Die fertige Implementierung wurde mit der Testversion der GPZD durchgeführt und im Detail mit der Ausbreitungsrechnung verglichen, die diese Datei erstellt hatte. Beide Ergebnisse stimmten exakt überein, so dass eine richtige Implementierung der GPZD gewährleistet ist. Um zu testen, ob die Testdatei unabhängig von dem implementierten Profil korrekte Ergebnisse erstellt, wurden zwei weitere Szenarien getestet. Zunächst wurde innerhalb der GPZD die Windrichtung um 90° gedreht (siehe Abb. 4.11 in der Mitte). Danach wurden die Werte für die Standardabweichung der Windgeschwindigkeitskomponenten verdoppelt (siehe Abb. 4.11 rechts). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ausbreitungsrechnungen die gewünschten Änderungen in der GPZD ausführen. Da diese Änderungen nur in der GPZD durchgeführt wurden, ist somit sichergestellt, dass kein implementiertes Standardprofil von ARTM verwendet wurde.



**Abb. 4.11** Mittelwerte der Konzentrationswerte für Cs137 für unterschiedliche Bedingungen: Zunächst wurde die Windrichtung in der GPZD um 90° gedreht. Das Ergebnis befindet sich in der Mitte. Des Weiteren wurden die Werte für die Standardabweichung der Windgeschwindigkeitskomponenten in der rechten Abbildung verdoppelt.

#### 4.4.4 Behandlung von Datenlücken

Die GPZD stellt erhöhte Ansprüche an die Datenverfügbarkeit. Der Anwender muss für jeden Zeitpunkt und jedes Höhenlevel die vom Ausbreitungsmodell benötigten Daten zur Verfügung stellen.

Ursprünglich war im Rahmen dieses Arbeitspaktes geplant, dass Datenlücken durch fehlende bzw. nicht mit dem Rechengitter übereinstimmende Höhenlevel oder Zeitpunkte automatisch in gewissen Grenzen durch sinnvolle Interpolationen oder auch Extrapolationen geschlossen werden. Wie bereits bei der Fragestellung zur Verwendung anderer Grenzschnittparameter unter 4.4.1, stellte sich bei der Recherche nach sinnvollen Interpolationsroutinen allerdings heraus, dass diese nur dann gegeben sind, wenn man ein Grenzschnittmodell mit seinen Profil-Annahmen zugrunde legt. Dies widerspricht allerdings der Intention der GPZD Schnittstelle, die dem Anwender ermöglichen soll, unabhängig von hinterlegten Standardprofilen ein an die lokalen Gegebenheiten optimal angepasstes Grenzschnittprofil vorzugeben. Statt programmintern Datenlücken automatisch schließen zu lassen, wurde daher entschieden, dem Anwender vor dem eigentlichen Simulationsstart gegebenenfalls über alle Datenlücken einer ausgewählten GPZD zu informieren. ARTM gibt in diesem Fall eine umfassende Fehlerliste in der Log-Datei aus und bricht ab.

Die im Folgenden aufgelisteten Prüfungen der GPZD werden innerhalb von ARTM vorgenommen. Es werden dabei nicht nur Datenlücken frühzeitig erkannt, sondern auch weitere Format-, und Kompatibilitätsüberprüfungen vorgenommen. Eine weitere Möglichkeit zur Prüfung der GPZD stellt auch das innerhalb des AP 5 entwickelte Hilfsprogramm PR-Check.exe dar (siehe Kapitel 6).

- Das Vorhandensein und die sinnvolle Setzung der Parameter `form`, `locl`, `dims`, `lowb`, `hg hb` und `hh`
- Die richtige Anzahl und Abfolge der Zeitintervalle, definiert durch die Parameter `lowb` and `hg hb`
- Für den Fall, dass weniger als 24 Stunden angegeben sind, ob die NOSTANDARD Option `NODAY` gesetzt wurde
- Die richtige Anzahl an Höhenleveln für jedes Zeitintervall, definiert durch die Parameter `lowb` and `hg hb`
- Die Richtigkeit der Formate der in der `gpzd.dma` enthaltenen Größen,
- Die Anzahl und die Korrektheit der zeitabhängigen Größen und des Formates und
- Die korrekte Definition des Dateibereiches.

## 4.5 Zusammenfassung

Die VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 /VDI 02/, /VDI 17a/ und die TA-Luft /TAL 18/ wurden überarbeitet und weiterentwickelt (siehe Kapitel 2). Diese Änderungen in TA Luft und der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 8 erforderten Anpassungen in ARTM, um weiterhin zu ermöglichen, dass Ausbreitungsrechnungen für Radionuklide dem Stand von W&T entsprechend durchgeführt werden können. Die Änderungen wurden analysiert und in dem das Grenzschichtprofil definierenden Teil des Quellcodes von ARTM und TALdia umgesetzt. Die alte Parametrisierung kann über eine NOSTANDARD-Option bewirkt werden.

Die neue Version des „Landbedeckungsmodell für Deutschland (LBM-DE)“ des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie wurde aufbereitet und in ARTM integriert. Die Änderungen der TA-Luft bezüglich der Zuordnung von CORINE-Landnutzungsklassen zu Rauigkeitslängen und der Vergrößerung des Gebietes um den Emittenten für die Bestimmung der mittleren Rauigkeitslänge des Simulationsgebietes wurden nachvollzogen und in das Programm `RL_INTER.exe` implementiert.

Eine Grenzschichtprofil-Zeitreihen-Datei (GPZD) wurde basierend auf den notwendigen Grenzschichtparametern konzipiert und analysiert. Die notwendigen Erstimplementierungen und Anpassungen wurden in den entsprechenden Teilen des Quellcodes umgesetzt und validiert. Es ist nun möglich unabhängig von den eingebauten Grenzschichtmodellen in ARTM und TALdia eine Ausbreitungsrechnung mit Hilfe einer selbst vorgegebenen GPZD durchzuführen.

## 5 AP 4: Weltweite Nutzung von ARTM

### 5.1 Einleitung

Die neue EU BSS (Richtlinie 2013/59/EURATOM /EUR 14/) fordert in Kapitel VIII „Exposition der Bevölkerung“, Abschnitt 1 „Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung und langfristiger Gesundheitsschutz unter normalen Bedingungen“, Artikel 66 „Schätzung der Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung“ unter Absatz (2): „Die Mitgliedstaaten bestimmen die Tätigkeiten, für die eine realistische Ermittlung“ (der Dosen für Einzelpersonen) „durchgeführt werden muss, und die Tätigkeiten, für die eine Untersuchung zum Nachweis der Einhaltung von Grenzwerten ausreichend ist.“ Bereits in Artikel 65 „Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung“ wird in Absatz (2) zu Ableitungsgenehmigungen klargestellt: „Darüber hinaus tragen diese Ableitungsgenehmigungen gegebenenfalls den Ergebnissen einer allgemeinen Untersuchung auf der Grundlage international anerkannter wissenschaftlicher Empfehlungen Rechnung...“.

Für eine Ermittlung der Dosen für Einzelpersonen und/oder allgemeinen Untersuchungen zum Nachweis der Grenzwerteinhaltung sind Ausbreitungsrechnungen nötig, da die Radionuklidkonzentrationen in der Luft oder am Boden in der Umgebung von Anlagen, die eine Ableitungsgenehmigung haben, meist unter den Nachweisgrenzen von entsprechenden Messgeräten liegen bzw. im Rahmen von Genehmigungsverfahren noch gar keine Ableitungen stattfinden. Um eine, wie in den EU BSS geforderte, realistische Ermittlung der Dosen zu gewährleisten, sollte also auch die Ausbreitungsrechnung möglichst realitätsnah sein.

Bei der Ausbreitungsrechnung für konventionelle Luftschadstoffe wie z.B. Stickoxide, Schwefeldioxid oder Feinstaub schreibt die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) /TAL 02/ schon seit 2002 die Verwendung eines Lagrange'schen Partikelmodells nach VDI Richtlinie 3945 Blatt 3 /VDI 00/ vor, das dem gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) entspricht.

Durch die Umsetzung der EU BSS wird aktuell in den AVV-Tätigkeiten /BFS 19/ das Gauß-Fahnenmodell durch ein Lagrange'sches Partikelmodell auch auf Verordnungsebene ersetzt.

Im Rahmen von bisher drei Eigenforschungsvorhaben /GRS 07/, /GRS 12/, /GRS 15a/ wurde auf Basis des Referenzprogramms für die Ausbreitungsrechnung nach TA Luft (AUSTAL2000, /JAN 03/, /GRS 01/, /UBA 20/) das Lagrange'sche Partikelmodell zur atmosphärischen Ausbreitungsrechnung von Radionukliden ARTM (atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell) entwickelt, weiterentwickelt und in zahlreichen Aspekten verifiziert und validiert.

Das Vorhaben „Weiterentwicklung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM bezüglich weiterer Anwendungsbereiche, Wind- und Grenzschichtmodell, Dokumentation“ diente dazu, das Ausbreitungsmodell an den sich fortentwickelnden Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen, die Programmpformance und die Anwenderfreundlichkeit zu verbessern. Das Vorhaben gliederte sich in sechs verschiedene Arbeitspakete (AP). In Kapitel 5 werden die Ergebnisse des AP 4 „Weltweite Nutzung von ARTM“ des genannten Vorhabens vorgestellt.

Ziel des AP 4 war es, ARTM dahingehend zu ertüchtigen, dass die Strahlenexposition im direkten Umfeld von kerntechnischen Anlagen auch außerhalb von Deutschland möglichst realitätsnah berechnet werden kann. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist die ortsspezifische Anpassung des verwendeten Grenzschichtmodells. Dafür wird die unter AP 3 „Grenzschichtmodell“ implementierte Eingabemöglichkeit einer Grenzschicht-Profil-Zeitreihe-Datei (GPZD) verwendet und es sei an dieser Stelle auf Kapitel 4 verwiesen, in dem diese Eingabemöglichkeit von zeitabhängigen Profilen des Wind- und Turbulenzfeldes und Programmerweiterung ausführlich dokumentiert wird.

Unterschiedliche Zeitzonen und die Verwendung der lokalen Zeit können teils die Vergleichbarkeit bzw. Synchronisation von Simulationsergebnissen erschweren. Mit Hilfe des im Rahmen des AP 4 entwickelten Hilfsprogramms METIMEX.exe lassen sich Lokalzeitangaben anwenderfreundlich an die Anforderungen der Nutzer anpassen. Das Hilfsprogramm wird in Kapitel 5.2 beschrieben.

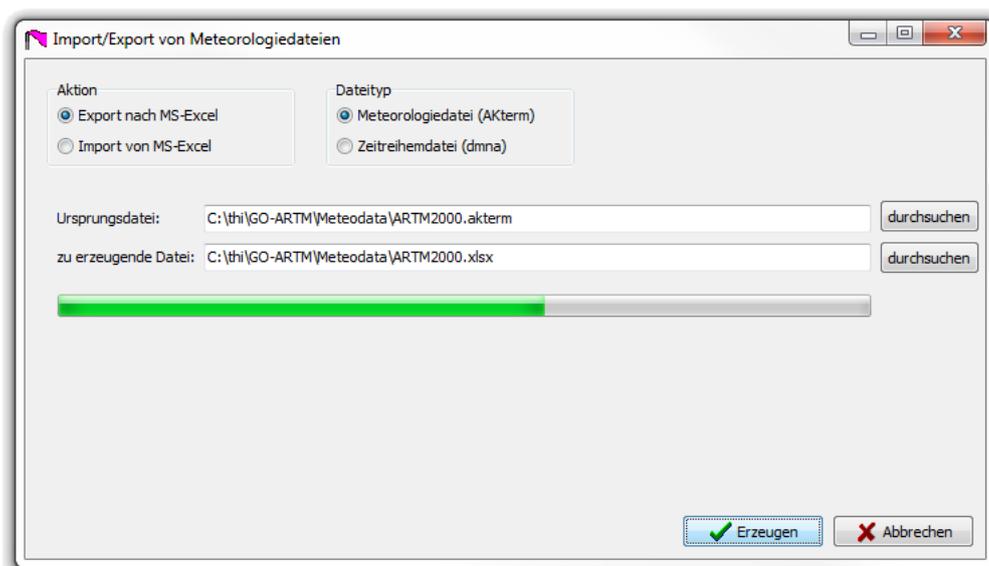
Schließlich ist für die Dosisberechnung aus den Ergebnissen eine Ausbreitungsrechnung von Radionukliden die Vegetationsperiode von besonderer Bedeutung, da diese Radionuklide dann unter Umständen in den Nahrungskreislauf geraten können. Bis zu Version 2.8.0 von ARTM waren daher zwei ARTM Simulationläufe nötig, wenn mittels des Dosismoduls DARTM /BFS 15/ eine Dosisberechnung nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen) /BMU 12/

durchgeführt werden sollte. Eine Langzeitausbreitungsrechnung deckte das komplette zu betrachtende Jahr ab, die zweite Langzeitausbreitungsrechnung die angenommene Vegetationsperiode, festgelegt auf den an deutsche Verhältnisse angepassten Zeitraum 01. Mai bis 31. Oktober des betrachteten Jahres. Dieser Zeitraum musste also doppelt simuliert werden, da ARTM jeweils nur die Ausgabe der Konzentrations- bzw. Depositionsmittelwerte über den gesamten Simulationszeitraum vorsah.

Wie in Kapitel 5.3 eingehender beschrieben, wurde im Rahmen dieses Vorhabens nun die Möglichkeit geschaffen, mittels zweier Zeitangaben innerhalb der Eingabedatei *artm.txt* den Start- und Endzeitpunkt der Vegetationsperiode festzulegen. Diese Zeitpunkte können beliebig, und damit insbesondere an die örtlichen Begebenheiten angepasst, gewählt werden. Zusätzlich zu den Jahresmittelwerten werden dann die Mittelwerte über den angegebenen Zeitraum ausgeschrieben und in der von DARTM vorausgesetzten Ordner- und Dateinomenklatur und -struktur abgelegt.

## 5.2 Export/Importschnittstelle für die meteorologischen Zeitreihen

Zur besseren Bearbeitung der Zeitreihen mit meteorologischen Daten (AKterm und Zeitreihe.dmna) wurde das Programm *METIMEX.EXE* auf Embarcadero® Delphi® 2010 Basis zum Export/Import in das universell verwendbare Format der MS-Excel©-Dateien erstellt (siehe Abb. 5.1).



**Abb. 5.1** Programm zum Export und Import von ARTM-Meteorologiedateien

### **5.2.1 Export von AKterm-Dateien**

Nach der Anwahl der Aktion „Export nach MS-Excel“ und des Dateitypes „Meteorologie-datei (AKterm)“ legt man die zu exportierende AKterm-Datei als Ursprungsdatei fest. Dieses kann entweder durch die direkte Eingabe des Pfades und des Dateinamens oder durch <durchsuchen> der Laufwerke erfolgen. Danach wird die zu erzeugende MS-Excel®-Datei festgelegt. Durch das Starten des Exportvorgangs mit <erzeugen> wird die Datei exportiert und der Fortschritt angezeigt. Nach fehlerfreier Durchführung wird der Vorgang abschließend in einem Meldungsfenster angezeigt.

In der erzeugten MS-Excel®-Datei sind alle Daten der AKterm enthalten. Zur besseren Lesbarkeit wird nach den Kommentarzeilen und einer eventuellen Zeile mit der Definition der Anemometerhöhen eine Überschriftenzeile eingefügt. Sollte die Datei später wieder in eine AKterm Datei überführt und ARTM importiert werden, so muss diese Zeile bestehen bleiben.

### **5.2.2 Export von Zeitreihen (dmna)**

Der Vorgang ist analog zum Export von AKterm-Dateien. Zum Unterschied wählt man den Dateityp „Zeitreihen (dmna)“ und gibt als Ursprungsdatei die entsprechende Datei Zeitreihe.dmna des Projektes an. In der erzeugten MS-Excel®-Datei sind alle Daten der Zeitreihe.dmna enthalten. Zur besseren Lesbarkeit wird nach dem Dateiheder eine Überschriftenzeile eingefügt. Sollte die Datei später wieder in ARTM importiert werden, so muss diese Zeile bestehen bleiben. Falls sich in der Datei ein Wert für die Mischungsschichthöhe findet, so wird dieser mitübertragen.

### **5.2.3 Import von AKterm-Dateien**

Nach der Anwahl der Aktion „Import von MS-Excel“ und des Dateitypes „Meteorologie-datei (AKterm)“ legt man die zu importierende MS-Excel®-Datei als Ursprungsdatei und die AKterm-Datei als zu erzeugende Datei fest. Das Starten des Importvorgangs erfolgt wieder mit <erzeugen>.

### **5.2.4 Import von Zeitreihen (dmna)**

Der Vorgang ist analog zum Import von AKterm-Dateien. Zum Unterschied wählt man den Dateityp „Zeitreihen (dmna)“ und gibt als Ursprungsdatei die entsprechende Datei

MS-Excel©-Datei mit den Zeitreihen und als zu erzeugende die Zeitreihe.dmna des entsprechenden Projektes an.

### **5.3 Automatische Erzeugung und Rechnung der Vegetationsperioden**

Wie bereits in der Einleitung erläutert, war bis zur Version 2.8.0 von ARTM ein separater Simulationslauf für die Vegetationsperiode nötig, um die für das Dosismodul DARTM benötigten simulierten Konzentrations- und Depositionsfelder der Radionuklide zu erzeugen. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde das Ausbreitungsprogramm ARTM dahingehend ertüchtigt, diese Felder aus den Zwischenergebnissen einer Jahresrechnung automatisch zu erstellen. Die dafür notwendigen Programmänderungen werden im Folgenden beschrieben.

#### **5.3.1 Voraussetzungen für die Jahresrechnung**

Grundvoraussetzung für die Nutzung der automatischen Simulation der Vegetationsperiode aus einer Jahresrechnung ist, dass die Jahresrechnung mit einer meteorologischen Zeitreihe (AKTerm bzw. zeitreihe.dmna) und nicht mit einer Ausbreitungsklassenstatistik (AKS) durchgeführt wird. Die Zeitreihe muss ein gesamtes Jahr umfassen (365 bzw. 366 Tage), die aber nicht zwangsläufig am 1. Januar eines Jahres starten muss, sondern an einem beliebigen Tag starten kann. Durch die Wahl des Startzeitpunktes der Jahreszeitreihe hat die Anwenderin oder der Anwender zu gewährleisten, dass die Vegetationsperiode einen zusammenhängenden Zeitraum umfasst.

Sollte die meteorologische Zeitreihe nicht den Zeitraum eines Jahres umfassen, wird dies in der artm.log Datei vermerkt. Die Ausbreitungsrechnung wird auch dann ausgeführt und die definierte Vegetationsperiode separat ausgeschrieben und ausgewertet.

#### **5.3.2 Eingabeparameter**

Der Start und das Ende der Vegetationsperiode wird innerhalb der ARTM Eingabedatei artm.txt vorgenommen. Dafür wurden die neuen Parameter vstart und vend eingeführt. Mit vstart wird der Startzeitpunkt der Vegetationsperiode als Datumsangabe in Form des DMNA-Formates „jjjj-mm-dd“ angegeben. Dabei steht jjjj für das Jahr, mm für den Monat und dd für den Tag. Der Startzeitpunkt ist 00:00 Uhr dieses Tages. Das Ende der Vegetationsperiode wird über den Parameter vend ebenfalls durch eine Datumsangabe der

Form „jjjj-mm-dd“ angegeben. Die Vegetationsperiode endet um 23:59:59 Uhr dieses Tages.

Sobald die beiden neuen Parameter vstart und vend angegeben werden, geht das Ausbreitungsprogramm ARTM davon aus, dass zusätzlich zum Mittelwert über die gesamte vorgegebene Zeitreihe auch Mittelwerte der Konzentration sowie der nassen und trockenen Deposition für den vorgegebenen Zeitraum erstellt werden sollen. Es muss also keine weitere Option gesetzt werden.

### **5.3.3 Bestimmung der Niederschlagssummen für die Vegetationsperiode**

Ein Eingabeparameter für das Dosisprogramm DARTM ist die Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode. Um diese zu bestimmen, wird empfohlen, das in Kapitel 5.2 vorgestellte Hilfsprogramm METIMEX.exe zu verwenden. Nach Einlesen einer zeitreihe.dmna (AKTerm-Dateien lassen sich mittels des Programmaufrufes von artm.exe mit der Aufrufoption -z in eine zeitreihe.dmna überführen) in das Hilfsprogramm lässt sich die Niederschlagssumme mit Hilfe der in MS-Excel® verfügbaren Summenfunktion durch Auswahl der Niederschlagsdaten im gewünschten Zeitraum bestimmen.

### **5.3.4 Ausgabedateien**

In dem gestarteten Projekt werden wie gewohnt die im Programmhandbuch, Kapitel 5, aufgeführten Ausgabe-Dateien der emittierten Radionuklide erstellt. Dies beinhalten die Werte der Konzentration in der Luft und der nassen und trockenen Deposition sowie der Standardabweichung zu diesen Werten. Zusätzlich werden noch jeweils zwei Dateien der zeitlich gemittelten Gammasubmersion und gegebenenfalls Zeitreihen an den Monitorpunkten ausgegeben.

Zur Speicherung der zusätzlichen Ergebnisddateien für die Vegetationsperiode wird ein neuer Projektordner angelegt. Dieser hat den gleichen Namen wie das Hauptprojekt erweitert um die Kennzeichnung „-V“ im Verzeichnisnamen. In diesen werden die Ausgabedateien mit den Mittelwerten der Konzentration, der nassen und trockenen Deposition sowie die dazugehörigen Standardabweichungen über die Vegetationsperiode geschrieben. Zeitreihen an den Monitorpunkten oder Ausgaben der Gammasubmersion werden für die Vegetationsperiode nicht erzeugt, da diese für die Dosisberechnung nicht benötigt werden.

Im Unterordner der Vegetationsperiode wird keine artm.log Datei angelegt. Etwaige Ausgaben aus dem Programmablauf sowie die Kurzauswertung der Ergebnisse für die Vegetationsperiode werden ausschließlich in der artm.log Datei der Jahresrechnung vermerkt.

### **5.3.5 Anpassungen im ARTM-Quellcode**

Die Anpassungen im ARTM-Quellcode für das automatische Ausschreiben der Vegetationsperiode betreffen vier Quelltext-Dateien.

In der Header-Datei Tallnp.h wurde die TIPDAT Struktur um die Elemente vstart, vend, vpath und PlusVeg erweitert. Die ersten beiden Elemente vom Typ double dienen der Speicherung des Start- und Endzeitpunktes der Vegetationsperiode. Das Element vpath vom Typ char[256] dient der Speicherung des Pfades zur Speicherung der Konzentrations- und Depositionsdateien der Vegetationsperiode und PlusVeg vom Typ int dient der Markierung, ob eine Vegetationsperiode vorgegeben wurde und somit ausgeschrieben werden soll.

Im Quellcode von Tallnp.c wurde die Initialisierung der TIPDAT Struktur an die neuen Elemente angepasst (Funktion TipInitialize(void)). Die Funktion zur Bearbeitung der einzelnen Zeilen der Eingabedatei artm.txt (Funktion \*analyse(TIPREC t)) wurde dahingehend erweitert, die neuen Parameter vstart und vend einzulesen und in der TIPDAT Struktur nach vorheriger Umrechnung des als Zeichenkette vorgegebenen Datums in eine Gleitkommazahl, zu speichern. Um sicherzustellen, dass die Datumsangabe in artm.txt den Formatvorgaben entspricht, wurde die Funktion checkvdate(char \*ss) neu erstellt. Die Funktion TipCheck(char \*path, int write\_z) wurde erweitert, um zu überprüfen, dass ein sinnvolles Start- und Enddatum für die Vegetationsperiode vorgegeben wurde. Überprüft wird dabei, dass beide Daten und nicht nur ein Datum vorgegeben wurden, dass beide Daten innerhalb des durch die meteorologische Zeitreihe vorgegebenen Zeitfensters liegen und dass der Endzeitpunkt nach dem Startzeitpunkt liegt. Für jeden der durchgeführten Tests in charvdate bzw. TipCheck wurden passende Fehlerausgaben für den Fall erstellt, dass ein Fehler vorliegt. Eingabefehler führen dabei zu einem sofortigen Programmabbruch.

Bei einer erfolgreichen Überprüfung wird die TIPDAT Variable PlusVeg von 0 auf 1 gesetzt, der Name des Vegetationsperiode-Projektpfades erzeugt und das entsprechende

Verzeichnis wird angelegt. Sollte das Verzeichnis bereits existieren, so wird dessen Inhalt gelöscht. Sollte die vorgegebene meteorologische Zeitreihe kürzer als ein Jahr sein, wird dies in artm.log vermerkt.

Schließlich wurde das Modul TalMtm.c dahingehend erweitert, zusätzlich zu den zeitlichen Mittelwerten für den gesamten Simulationszeitraum auch die zeitlichen Mittelwerte der Vegetationsperiode aus den Zwischenergebnissen (die im Unterverzeichnis work des Projektordners für jeden Simulationstag abgelegt werden) zu erstellen. Dafür wurden zahlreiche neue modulweite Variablen vom Typ ARYDSC definiert und die Funktion CompareArray(void) umfangreich angepasst. Zum Ausschreiben der Mittelwerte in DMNA Dateien wurde die Funktion WriteResult(void) umfangreich erweitert.

Im Quellcode des Hauptprogramms artm.c schließlich wurde eine zusätzliche Kurzauswertung für die Konzentrations- und Depositionsfelder der Vegetationsperiode implementiert. Diese Auswertung wird in die artm.log-Datei des Projektes der Jahresrechnung ausgeschrieben.

#### **5.4 Zusammenfassung**

In Kapitel 5 wurden die Ergebnisse des AP 4 „Weltweite Nutzung von ARTM“ des Projektes „Weiterentwicklung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM bezüglich weiterer Anwendungsbereiche, Windfeld- und Grenzschichtmodell, Dokumentation“ beschrieben.

Das Hilfsprogramm METIMEX.exe wurde vorgestellt, welches die Bearbeitung von Zeitreihen der meteorologischen Randbedingungen für ARTM erleichtert und damit die Anpassung solcher Zeitreihen an die jeweiligen örtlichen Bedingungen. Zudem wurden die Anpassungen in ARTM für die automatische Ausgabe der Simulationsergebnisse der Vegetationsperiode aus einer Jahresrechnung vorgestellt. Durch diese Neuerung wird die eigenständige Simulation der Vegetationsperiode überflüssig. Bei einer Vegetationsperiode von Anfang Mai bis Ende Oktober wird durch die neu geschaffene automatische Extraktion der gewünschten Daten aus der Jahresrechnung die Rechenzeit für die Ausbreitungsrechnung um rund einen Faktor 1,5 verkürzt (gegenüber einer Jahresrechnung und einer zusätzlichen Simulation der Vegetationsperiode).

## 6 AP 5: Technische Programmverbesserungen, Robustheit

### 6.1 Einleitung

Dieses Kapitel enthält die Ergebnisse des Arbeitspaketes (AP) 5: „Technische Programmverbesserungen, Robustheit“. In diesem AP wurde eine Reihe von Arbeiten zusammengefasst, die der Anwenderfreundlichkeit, der Fehlerbehandlung, der programm-internen Datenverwaltung und der Erweiterung der Funktionalitäten diente. Sämtliche Implementierungen wurden verifiziert und dokumentiert. Neben diesem Bericht, Kapitel 6.2 und 6.3, wurden die in AP 5 durchgeführten Programmentwicklungen im ARTM-Handbuch dokumentiert, das aus den Vorgängerdokumenten ARTM Programmbeschreibung /GRS 15b/ und ARTM Modellbeschreibung /RIC 15/ ebenfalls im Rahmen des AP 5 neu erstellt wurde.

### 6.2 Verbesserungen bei den Fehlerangaben

Zur Vermeidung von Fehlermeldungen zur Laufzeit von ARTM und dem damit verbundenen Abbruch beim ersten Auftreten eines Fehlers in den Steuerdateien `ARTM.txt`, `artm.settings` sowie der Meteorologie-Dateien (`AKTerm`, `AKS`, `zeitreihe.dmna` sowie der unter AP 3 neu ermöglichten `gpzd.dmna`) wurde das im Folgenden beschriebene Programm `PR-Check.exe` auf der Basis von Embarcadero® Delphi® 2010 entwickelt (siehe Abb. 6.1). Nach Angabe des zu überprüfenden Projektes werden die relevanten Dateien identifiziert und zur Prüfung vorgeschlagen. Nach Aktivierung oder Deaktivierung dieser Dateien kann dann die Prüfung gestartet werden. Zunächst wird überprüft, ob die Dateien vorhanden und lesbar sind und anschließend wird der Inhalt der Dateien überprüft. Die Ergebnisse werden im darunter liegenden Textfeld angezeigt.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Fehlerbehandlungen von `PR-Check.exe` beschrieben. In der ursprünglichen Planung des Arbeitspaketes fällt die Entwicklung unter den Abschnitt „Bereitstellung von Zusatzprogrammen“.

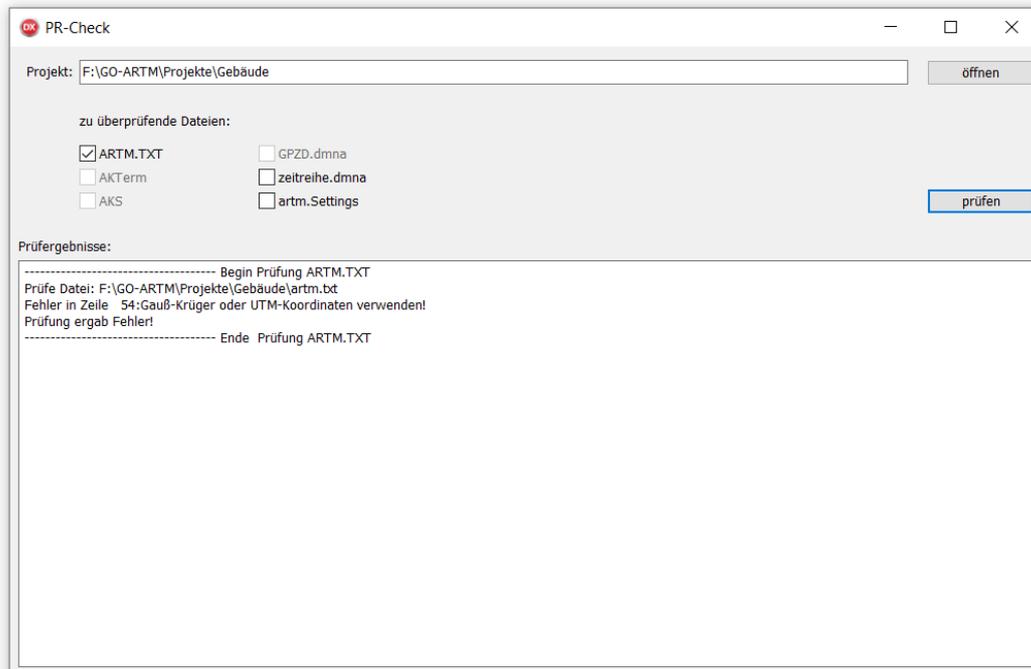
Wenn keine Vorabprüfung der Eingabedateien vorgenommen wird und fehlerhafte Eingabedateien verwendet werden, geben die Programme `ARTM.exe` bzw. `TALdia.exe` entsprechende (im Laufe dieses Vorhabens verbesserte) Fehlerangaben im Ausgabefenster und der Datei `artm.log` aus. Rund 300 Fehlerausgaben innerhalb von `ARTM.exe` wurden überarbeitet bzw. ergänzt.

## 6.2.1 Prüfung der ARTM.txt

Die Hauptsteuerdatei `ARTM.txt` wird hinsichtlich der konsistenten und korrekten Auswahl aller 53 Steuerparameter (im Vergleich zu ARTM Version 2.8.0 sind die Parameter `vstart`, `vend` und `np` in der Version 3.0.0 hinzugekommen) zuzüglich der vorhandenen Emissionsparameter überprüft. Dabei werden unter anderem

- das Vorhandensein externer Dateien und Verzeichnisse wie Geländemodell, Rasterdatei, AKTerm, AKS, `zeitreihe.dmna`, Windfeldbibliothek oder Zeitreihen,
- die Auswahl der Überhöhungsparameter,
- die Lage der Rechengebiete zueinander.
- die Parameter des Rechengebietes und
- die Umschließung von Gebäuden, Quelle, Beobachtungspunkten und des Anemometers durch das Rechengebiet.

Des Weiteren werden zahlreiche Querprüfungen (erlaubte Kombinationen mehrerer Parameter und der jeweils zugegebenen Werte) durchgeführt und ggf. eine Fehlangebe ausgewiesen. Insgesamt wird dabei zwischen 75 Fehlermöglichkeiten unterschieden.



**Abb. 6.1** Programm `PR-Check.exe` zur Vorabprüfung der Eingabedateien `ARTM.txt`, `artm.settings` `AKTerm`, `AKS`, `zeitreihe.dmna` und `gpzd.dmna`

Die Tab. 6.1 zeigt die möglichen Fehlermeldungen bei der Überprüfung der Datei `ARTM.txt`. Zu jeder Fehlermeldung wird die Zeilennummer angegeben (siehe Abb. 6.1).

**Tab. 6.1** Mögliche Fehlermeldungen des Programmes `PR-Check.exe` bei der Untersuchung der Datei `ARTM.txt`. `<id>` steht dabei für einen in `artm.txt` verwendeten Parameter

Nr.	Fehlermeldung
1	ungültiges Zeichen in Zeile ??
2	ID oder Radionuklid <code>&lt;id&gt;</code> nicht gefunden bzw. nicht in <code>artm.settings</code> definiert!
3	Parameter <code>&lt;id&gt;</code> wurde zeitabhängig vorgegeben, obwohl dies nicht zulässig ist!
4	Lesefehler bei <code>&lt;id&gt;</code>
5	Angegebene Anzahl Emissionen stimmt nicht mit der Anzahl definierter Quellen bei <code>&lt;nuklid&gt;</code> überein!
6	Projekttitel nicht korrekt definiert! (Fehlende Hochkommata)
7	AKS nicht als String angegeben! (Fehlende Hochkommata)
8	AKS <code>&lt;Name der Datei&gt;</code> nicht vorhanden!
9	nur AKTerm oder AKS angeben!
10	AKTerm nicht als String angegeben! (Fehlende Hochkommata)
11	AKTerm <code>&lt;Name der Datei&gt;</code> nicht vorhanden!
12	Geländemodell nicht als String angegeben! (Fehlende Hochkommata)
13	Geländemodell <code>&lt;Name der Datei&gt;</code> nicht vorhanden!
14	Qualitätsstufe im falschen Format!
15	Qualitätsstufe außerhalb des Intervalls <code>[-4..4]</code> !
16	NOSTANDARD-Optionen müssen mit "NOSTANDARD" beginnen!
17	kein gültiger Wert für die Emissionszeit erkannt!
18	Emissionszeit nicht im Bereich <code>[0.1 .. 1.0]</code> !
19	NOSTANDARD-Optionen nicht vorhanden!
20	Windfeldbibliothek nicht als String angegeben! (Fehlende Hochkommata)'
21	Verzeichnis mit Windfeldbibliothek <code>&lt;Pfadangabe&gt;</code> nicht vorhanden!
22	Zufallszahl im falschen Format!
23	<code>gx</code> konnte nicht gelesen werden!
24	<code>gx</code> außerhalb des gültigen Bereichs!
25	<code>gy</code> konnte nicht gelesen werden!
26	<code>gy</code> außerhalb des gültigen Bereichs!
27	<code>ux</code> konnte nicht gelesen werden!
28	<code>uy</code> konnte nicht gelesen werden!
29	<code>uzone</code> falsch definiert!
30	unbekannte UTM-Zone!
31	Lesefehler bei <code>x0</code> !
32	falsche Anzahl Werte für <code>x0</code> !
33	Lesefehler bei <code>y0</code> !
34	falsche Anzahl Werte für <code>y0</code> !
35	Lesefehler bei <code>dd</code> !

<b>Nr.</b>	<b>Fehlermeldung</b>
36	falsche Anzahl Werte für dd!
37	Lesefehler bei nx!
38	falsche Anzahl Werte für nx!
39	Lesefehler bei ny!
40	falsche Anzahl Werte für ny!
41	z0 konnte nicht gelesen werden!
42	d0 konnte nicht gelesen werden!
43	hh konnte nicht gelesen werden!
44	Werte für hh nicht monoton ansteigend!
45	Anzahl Schichten in Parameter hh entspricht nicht der Definition in nz!
46	falsche Anzahl Werte bei Quellen!
47	Qualitätsstufe für Gebäude im falschen Format!
48	Qualitätsstufe für Gebäude außerhalb des Intervalls [-3..1]
49	Gebäuderasterdatei nicht als String angegeben! (Fehlende Hochkommata)
50	Gebäuderasterdatei <Name der Datei> nicht vorhanden!
51	falsche Anzahl Werte bei Gebäuden!
52	falsche Anzahl Werte bei Beobachtungspunkten!
53	Lesefehler bei Namen der Beobachtungspunkte!
54	ha konnte nicht gelesen werden!
55	xa konnte nicht gelesen werden!
56	ya konnte nicht gelesen werden!
57	Beginn der Vegetationsperiode konnte nicht gelesen werden!
58	ungültiges Datum oder falsches Format im Beginn der Vegetationsperiode!
59	Ende der Vegetationsperiode konnte nicht gelesen werden!
60	ungültiges Datum oder falsches Format im Ende der Vegetationsperiode!
61	nz konnte nicht gelesen werden!
62	nz entspricht nicht der Anzahl Schichten in Parameter hh!
63	Anzahl Rechengebiete = 0!
64	Anzahl horizontaler Gitterzellen im Rechengebiet = 0!
65	Anzahl vertikaler Gitterzellen im Rechengebiet = 0!
66	Gitterzellengröße im Rechengebiet = 0!
67	Gitterzellengröße steigt nicht um den Faktor 2 im Rechengebiet!
68	Grenzen eines Rechengebietes fallen nicht mit Zellgrenzen des ihm übergeordneten Rechengebietes zusammen (x Richtung)!
69	Grenzen eines Rechengebietes fallen nicht mit den Zellgrenzen des ihm übergeordneten Rechengebietes zusammen (y Richtung)!
70	Rechengebiet zu klein für Quelle!
71	Anemometerposition nicht im (größten) Rechengebiet!
72	Beobachtungspunkt nicht im (größten) Rechengebiet!
73	Parameter mehrfach gesetzt!
74	Datei "zeitreihe.dmna" nicht vorhanden, obwohl zeitabhängige Parameter vorgegeben sind!
75	Gauß-Krüger oder UTM-Koordinaten verwenden!

## 6.2.2 Prüfung der Ausbreitungsklassenzeitreihe (AKTerm)

Nach der Identifizierung der im Projekt benutzten und zu überprüfenden AKTerm-Datei werden im Textfeld die Ergebnisse angezeigt. Die Prüfungen beziehen sich auf folgende Fragestellungen:

- kann auf die Datei zugegriffen werden?,
- enthält die erste Zeile im Header die Zeichenkette "Niederschlag"?,
- beginnen alle Zeilen im Header mit "\*" oder "+"?,
- gibt es mehr als 5 Kommentarzeilen im Header?,
- ist die Definition der Anemometerhöhen im Header korrekt (falls '+'-Zeile vorhanden)?,
- sind Anemometerhöhen im Header mehrfach definiert?,
- beginnen die Datenzeilen mit "AK"?,
- ist ein fehlerhafter Termin für einen Datensatz angegeben?,
- sind die Leerzeichen zwischen den Parametern korrekt und ist die Zeilenlänge 56 Zeichen?,
- liegen die Parameter QDD, QFF, DD, FF, QB, KM, QC, HM, QD, RR und QN im gültigen Wertebereich?,
- ist in den Fällen, in denen die Windgeschwindigkeit Null ist, eine Windrichtung ungleich Null angegeben?, und
- gibt es Abweichungen in den Zeitabständen zum vorhergehenden Wert bei den Datensätzen (falls Sommer- oder Winterzeitumstellung betroffen sind, erfolgt ein separater Hinweis)?

Nach erfolgter Prüfung wird der Prozentsatz gültiger Datensätze angegeben. Dabei ist zu beachten, dass bei einer Zeitreihenrechnung für ein Jahr analog zur TA Luft, Anhang 3, Abschnitt 8.1 die Anzahl der gültigen Stundenmittel in der meteorologischen Zeitreihe mindestens 90% der Jahresstunden (8760) betragen muss. Da mit ARTM aber nicht nur Simulationszeiträume von einem Jahr betrachtet werden und die Simulationen unterschiedlichen Zwecken dienen können, wird an dieser Stelle lediglich die Information zu den gültigen Datensätzen ausgewiesen und dies auch bei Unterschreitung der 90% nicht als Fehler sondern nur als Hinweis ausgegeben.

### 6.2.3 Prüfung der Ausbreitungsklassenstatistik AKS

Für manche Fälle reicht es aus, ARTM nur mit einer Ausbreitungsklassenstatistik (AKS) zu betreiben. In den AKS Dateien sind die meteorologischen Bedingungen für die Ausbreitungsrechnung als Häufigkeitsverteilungen aufbereitet. Für ARTM-Rechnungen werden sogenannte 4-dimensionale AKS benötigt. Ist nur eine AKS als meteorologische Information angegeben, so kann mit `PR-Check.exe` eine Überprüfung dieser Datei durchgeführt werden.

Diese Überprüfung erstreckt sich auf:

- Richtige Datumsangaben,
- korrekte Definition der Niederschlagsklassen und Vorhandensein der Niederschlagssumme,
- richtiges Format und Vollständigkeit bei der Angabe der Häufigkeitsverteilungen,
- plausible Verteilungen
  - des Niederschlags,
  - der Ausbreitungskategorien und der Windgeschwindigkeiten.

### 6.2.4 Prüfung der Datei `artm.settings`

Im Unterordner `\ARTM` des GO-ARTM-Hauptverzeichnisses befindet sich die Datei `artm.settings`. Hier werden Radionuklide und mit ihren spezifischen Daten und Parametern (Formelzeichen, Typ, Zerfallskonstante, Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeit, Washout-Koeffizienten und den Washout-Exponenten) definiert. Außerdem befinden sich dort die Koeffizienten der Gammasubmersion, die Aerosolparameter und die Niederschlagsklassen.

Da diese Datei mit dem Nuklideditor oder einem normalen Texteditor geändert werden kann, um z. B. Nuklide hinzuzufügen oder einzelne Parameter abzuwandeln, bietet `PR-Check.exe` eine Überprüfung der `artm.settings` an.

Bei der Prüfung werden folgende Schritte durchgeführt:

- Vollständigkeit, richtige Definition und Wahl der allgemeinen Parameter `vdvec`, `vsvec`, `wfvec`, `wevec`, `hmmean`, `rainmean`, `grps`, `unit`, `vd`, `wf`, `we`, `de`, `fr`, `fc`, `uc`, `fn`, `un`, `ry`, `dy`, `nd`, `rd`, `dd`, `nh`, `rh`, `dh`, `rn`, `dn`, `gmunit`, `gmref`, `gmfd`, `gmfe`, `gmfr`, `gmmu10`, `gmmu01`, `gmda10`, `gmda01`, `gmbk10(0)`, `gmbk10(1)`, `gmbk10(2)`, `gmbk10(3)`, `gmbk01(0)`, `gmbk01(1)`, `gmbk01(2)` und `gmbk01(3)`.
- Vorhandensein der Abschnitte `[.system]`, `[.artm]` und der nuklidspezifischen Definitionen.
- Sinnvolle Wahl der nuklidspezifischen Parameter.

### 6.2.5 Prüfung der Datei `zeitreihe.dmna`

Beim Vorhandensein von zeitabhängigen Parametern wird im Projektordner die Datei `zeitreihe.dmna` erstellt und kann dann extern (z. B. mit einer vorher erzeugten Exportdatei und dem anschließenden Import, siehe Abschnitt 5.2) geändert und bearbeitet werden. Mit `PR-Check.exe` kann vor einem ARTM-Lauf eine Überprüfung der `zeitreihe.dmna` erfolgen.

Überprüft wird

- das Vorhandensein und die sinnvolle Setzung der Parameter `form`, `locl`, `mode`, `ha`, `z0`, `d0`, `sequ`, `dims`, `size`, `lowb`, `hghb'`,
- die Auflistung aller in der `artm.txt` als zeitabhängig definierten Parameter und Überprüfung des jeweiligen Formats,
- die Zuweisungen von `z0` und `d0` aus `artm.txt`,
- die Anemometerhöhen im Vergleich zu den in der AKTerm angegebenen Werten,
- die Anzahl der Datensätze mit den meteorologischen Informationen im Vergleich zu den in der AKTerm vorhandenen Datensätzen,
- die Richtigkeit der Formate der in der `zeitreihe.dmna` enthaltenen Größen,
- die richtige Abfolge der Termine,
- die Anzahl und die Korrektheit der zeitabhängigen Größen und der Formate
- und die korrekte Definition des Dateibereiches.

### 6.2.6 Prüfung der Datei `gpzd.dmna`

Das „AP 3: Grenzschichtmodell“ umfasste die Implementierung einer Schnittstelle für die Verwendung von Wind- und Turbulenzprofilen mit vorhandene (z. B. gemessene oder mit Hilfe anderer Grenzschichtmodelle simulierte) Informationen zum Grenzschichtprofil. Hierzu wurde die Grenzschichtprofilzeitreihendatei `gpzd.dmna` entwickelt. Mit `PR-Check.exe` kann nun vor einem ARTM-Lauf eine Überprüfung der `gpzd.dmna` erfolgen.

Überprüft wird

- das Vorhandensein und die sinnvolle Setzung der Parameter `form`, `locl`, `dims`, `lowb`, `hghb` und `hh`,
- die richtige Anzahl und Abfolge der Zeitintervalle, definiert durch die Parameter `lowb` und `hghb`
- für den Fall, dass weniger als 24 Stunden angegeben sind, ob die NOSTANDARD Option `NODAY` gesetzt wurde
- die richtige Anzahl an Höhenleveln für jedes Zeitintervall, definiert durch die Parameter `lowb` und `hghb`
- die Richtigkeit der Formate der in der `gpzd.dmna` enthaltenen Größen,
- die Anzahl und die Korrektheit der zeitabhängigen Größen und der Formate und
- die korrekte Definition des Dateibereiches.

### 6.3 Verbesserungen zur Eingabe und Programmperformance

In diesem Kapitel werden eine Reihe von Arbeiten subsumiert, die die Verbesserungen in der Dokumentation und Programmperformance betreffen.

- Bessere Bearbeitung, Prüfung und Dokumentation von Emissionszeitreihen bzw. meteorologischen Datensätzen
- Erweiterungen bei Beobachtungspunkten
- Ensemblerechnungen
- Parallelisierung des Programms TALdia/ARTM
- Zusammenführen von Programm- und Modellbeschreibung in einem Programmhandbuch und Erweiterung um die Arbeiten in diesem Vorhaben

## 6.3.1 Zeitreihen

### 6.3.1.1 Bearbeitung von Emissionszeitreihen

Die im AP 4 (siehe Abschnitt 5.2) entwickelte Export/Importschnittstelle für die meteorologische Zeitreihe (AKTerm) und für die ggf. vorhandene Datei `zeitreihe.dmna` mit weiteren zeitabhängigen Parametern nach MS-Excel© -Dateien gibt dem Nutzer eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten, die dann mit einfachen Mitteln zu realisieren sind. So können damit

- ausgewählte Tage aus einer Zeitreihe selektiert werden oder
- Emissionszeitreihen in der Datei `zeitreihe.dmna` einfach erzeugt werden.

### 6.3.1.2 Bessere Dokumentation der `zeitreihe.dmna`

Statt der AKTerm kann auch direkt eine `zeitreihe.dmna` zur Vorgabe die meteorologischen Informationen verwendet werden. Wenn ARTM im Projektordner eine Datei mit dem Namen `zeitreihe.dmna` vorfindet, wird diese eingelesen und als umgesetzte AKTerm interpretiert. Eine Angabe von `as` (AKS) oder `az` (AKTerm) in der Eingabedatei wird dann ignoriert.

Ist in der Eingabedatei `ARTM.txt` eine Grenzschichtprofil-Zeitreihe-Datei (GPZD, Parameter `gpzd`) vorgegeben, dann wird diese für die meteorologischen Parameter verwendet. Aus einer zusätzlich vorhandenen `zeitreihe.dmna`, die den gleichen Zeitraum abdecken muss, werden dann gegebenenfalls nur die zeitabhängigen Quellparameter eingelesen, meteorologische Angaben in der `zeitreihe.dmna` werden bei Verwendung einer GPZD dann ignoriert.

Die Zeitreihe muss mit der ersten Stunde eines Tages beginnen und sollte mindestens den Zeitraum eines Tages bis maximal ein Jahr umfassen (es sei denn, die `NOSTANDARD` Option `NODAY` ist gesetzt, dann sind auch kürzere Zeiträume als ein Tag möglich). Obligatorisch sind die Angaben zu Datum/Uhrzeit, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Obukhov-Länge und Regenrate. Als zusätzlicher meteorologischer Parameter ist seit der ARTM-Version 3.0 die Vorgabe einer Mischungsschichthöhe möglich.

Die Datei `zeitreihe.dmna` beginnt mit einem Dateihheader, der mit der Zeile `"*` abgeschlossen wird. Dieser Dateihheader besteht aus den folgenden Parametern:

`form` Hier wird (jeweils durch ein Tabulator getrennt und in Anführungszeichen) angegeben, welche Daten in welchem Format die Datei enthält.

Fest vorgegeben sind hier die Parameter:

<code>te%20lt</code>	Datum und Uhrzeit im Format JJJJ-MM-TT.HH:NN:SS insgesamt 20 Zeichen mit führendem Tabulator
<code>ra%5.0f</code>	Windrichtung in °, 5 Stellen ohne Nachkommastelle
<code>ua%5.1f</code>	Windgeschwindigkeit in m/s, 5 Stellen mit einer Nachkommastelle
<code>lm%7.1f</code>	Obukhov-Länge in m, 7 Stellen mit einer Nachkommastelle
<code>ri%5.1f</code>	Regenraten in mm/h, 5 Stellen mit einer Nachkommastelle
<code>hm%5.1f</code>	Mischungsschichthöhe (optional), 5 Stellen mit einer Nachkommastelle

In weiteren Spalten können dann zeitabhängige Emissionsparameter aufgeführt werden. Quellstärken und die Parameter `vq`, `qq`, `sq`, `tq`, `rq` und `lq` dürfen zeitabhängig sein. Die Zeitabhängigkeit wird dem Programm dadurch mitgeteilt, dass in der Eingabedatei statt eines Zahlenwertes ein Fragezeichen steht. Die Zeitreihe muss dann für jeden zeitabhängigen Parameter eine Spalte mit der Bezeichnung `Quelle.Parameter%10.3e` enthalten. Quelle ist die Nummer der Quelle, für die dieser Wert gilt (zweistellig mit führender Null und beginnend mit 01). Die Angabe `10.3e` steht für eine Zahl aus 10 Zeichen in Exponentialschreibweise bei 3 Nachkommastellen.

`loc1` "C": Durch C (dies ist der Standard) wird angezeigt, dass ein Dezimal-Punkt verwendet wird.

`mode` "text": Dadurch wird mitgeteilt, dass es sich um eine ASCII-Datei handelt

`ha` Anemometerhöhen in m für die neun Rauigkeitslängen `z0` von 0,01 m bis 2 m, siehe AKTerm-Format

`z0` Rauigkeitslänge des Rechengebiets

`d0` Verdrängungshöhe

`sequ "i"`: Sequenzielle Reihenfolge, ersten Datensatz zuerst

`dims 1`: Eindimensionale Datei

`size` Größe bei binärer Speicherung in Bytes:  
Anzahl Parameter (ohne Datum und Uhrzeit) x 4 Bytes

`lowb` Niedrigster Indexwert

`hghb` höchster Indexwert

Danach kommen die eigentlichen `hghb-lowb+1` Datenzeilen in dem im Header angegebenen Format. Abgeschlossen wird die Datei `zeitreihe.dmna` mit einer Leerzeile und ein Zeile, die „\*\*\*“ enthält.

Um die Erstellung einer Zeitreihe mit zeitabhängigen Quellparametern zu erleichtern, wird von ARTM, wenn es mit der Option `-z` aufgerufen wird und eine AKTerm-Datei vorgegeben ist, in der dann ausgeschriebenen `zeitreihe.dmna` bereits für jeden Parameter, der zeitabhängig definiert ist, eine Spalte mit den Zahlenwerten 0 eingefügt. Diese Nullwerte brauchen dann nur noch durch die richtigen Werte ersetzt zu werden.

Ein Beispiel für eine Zeitreihe bei einer Anlage, die im 2-Schichtenbetrieb arbeitet und nur zwischen 6 Uhr und 22 Uhr Cs-137 aus der als Erstes definierten Quelle emittiert, ist in Abb. 6.2 wiedergegeben.

Bei Verwendung eine Zeitreihendatei (`zeitreihe.dmna`) wird in der Bildschirmausgabe wie auch in der Datei `ARTM.log` der folgende Hinweis angezeigt:

```
Die Zeitreihen-Datei:  
.../zeitreihe.dmna wird verwendet.  
Die Angabe "az ...akterm" wird ignoriert.
```

Diese erweiterte Beschreibung der Zeitreihendatei `zeitreihe.dmna` wurde in das Programmhandbuch zu ARTM aufgenommen.

```

form "te%20lt" "ra%5.0f" "ua%5.1f" "lm%7.1f" "ri%5.1f" "hm%5.1f" "01.cs137a%10.3e"
mode "text"
sequ "i"
dims 1
size 28
lowb 1
hghb 8760
*
1995-01-01.01:00:00 209 5.7 99999.0 0.0 -999.0 0.000e+000
1995-01-01.02:00:00 217 5.8 99999.0 0.0 -999.0 0.000e+000
1995-01-01.03:00:00 259 6.3 99999.0 0.0 -999.0 0.000e+000
1995-01-01.04:00:00 267 6.7 99999.0 0.0 -999.0 0.000e+000
1995-01-01.05:00:00 253 6.1 99999.0 0.0 -999.0 0.000e+000
1995-01-01.06:00:00 248 6.0 99999.0 0.0 -999.0 0.000e+000
1995-01-01.07:00:00 253 7.1 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.08:00:00 247 6.0 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.09:00:00 260 6.7 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.10:00:00 261 7.0 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.11:00:00 263 7.0 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.12:00:00 256 8.2 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.13:00:00 267 8.6 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.14:00:00 273 8.5 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.15:00:00 260 9.0 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.16:00:00 254 8.5 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.17:00:00 251 9.1 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.18:00:00 259 8.4 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.19:00:00 247 7.6 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.20:00:00 250 7.7 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.21:00:00 242 6.4 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.22:00:00 243 7.1 99999.0 0.0 -999.0 1.168e+001
1995-01-01.23:00:00 253 7.0 99999.0 0.0 -999.0 0.000e+000
1995-01-02.00:00:00 237 6.8 99999.0 0.0 -999.0 0.000e+000
. . . ...

```

**Abb. 6.2** Beispiel für eine `zeitreihe.dмна` mit zeitabhängiger Quelle

### 6.3.2 Beobachtungspunkte

#### 6.3.2.1 Ortsbezeichnung der Beobachtungspunkte

Zur genaueren Bezeichnung eines Beobachtungspunktes wurde der Parameter `np` in der Steuerdatei `ARTM.TXT` hinzugefügt und entsprechende Änderungen an `ARTM` wurden in der Einleseroutine und der Ausgabe durchgeführt. Ist der Parameter `np` gesetzt, so erwartet `ARTM` für jeden Beobachtungspunkt in Anführungszeichen einen Text mit einem Namen für den Beobachtungspunkt. Ein Beispiel für 4 Beobachtungspunkte ist in `Abb. 6.3` gezeigt.

```

np "Monitor A" "Monitor B" "Monitor C" "Monitor D"
xp -326 190 770 1248
yp -982 -500 -254 65
hp 1.5 1.5 1.5 1.5

```

**Abb. 6.3** Beispiel für die Angabe von Beobachtungspunkten in `ARTM.txt`

Der Parameter  $n_p$  ist optional. Wird der Parameter nicht angegeben, dann werden die Beurteilungspunkte in der angegebenen Reihenfolge durchnummeriert und erhalten diese Nummer als Bezeichnung. Die Bezeichnung des Beobachtungspunktes findet sich auch in den entsprechenden Ergebnisdateien der Beobachtungspunkte (Zeitreihen) wieder.

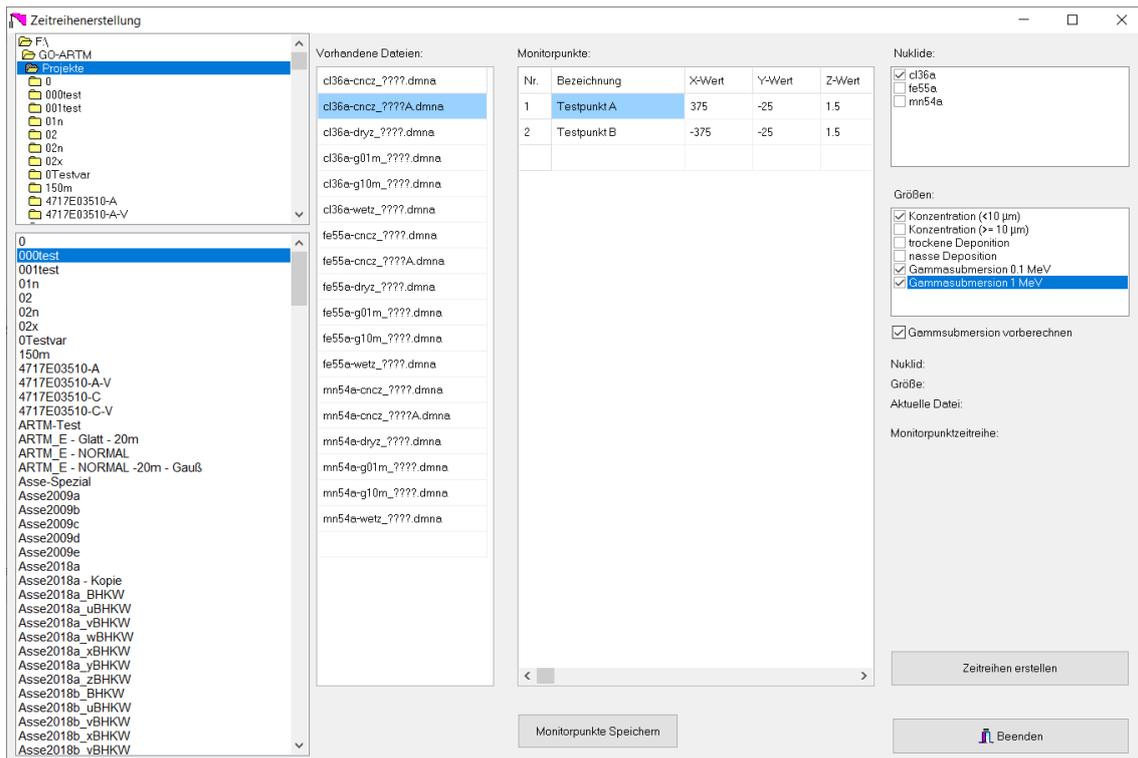
### 6.3.2.2 Nachträgliche Berechnung von Zeitreihen

Zur nachträglichen Berechnung von Zeitreihen an bestimmten Beobachtungspunkten wurde das Postprocessing-Programm `ARTM-Monitor.exe` entwickelt. Damit ist es möglich

- das Projekt anzuwählen,
- Beobachtungspunkte unabhängig von den Vorgaben der `ARTM.TXT` einzugeben,
- eine Auswahl der Nuklide und der relevanten Größen zu treffen und
- nach diesen Vorgaben eine entsprechende Zeitreihe im ARTM-Format zu erstellen.

Voraussetzung ist die vorherige Berechnung der Ausbreitung mit ARTM und der Benutzung der Option `ETS`, sodass für jeden Zeitschritt die Ergebnisdateien ausgeschrieben werden (siehe Abschnitt 6.3.8.1). Aufgrund der dabei erstellten großen Datenmenge ist diese Option nur bei Rechnungen über einen relativ kleinen Zeitraum (wenige Wochen) anzuwenden.

Abb. 6.4 zeigt das Formular des Programmes zur nachträglichen Erstellung von Zeitreihen.



**Abb. 6.4** Programm zur nachträglichen Erstellung von Zeitreihen an den Beobachtungspunkten aus ARTM-Ergebnisfeldern

Auf der linken Seite erfolgt zunächst die Auswahl des Projektes. Danach wird nach eventuell vorhandenen Dateien zur nachträglichen Erstellung von Zeitreihen gesucht und diese angezeigt. „????“ steht hier für eine ganze Serie von Dateien, die von 1 bis zur Anzahl der in der Meteorologiedatei vorhandenen meteorologischen Situationen reicht.

In der Tabelle „Monitorpunkte“ können dann die einzelnen Parameter Bezeichnung, X-Wert, Y-Wert und Z-Wert eingegeben werden. Falls eine Datei mit dem Namen MONITOR.TXT im angewählten Projektverzeichnis gefunden wird, werden diese Punkte geladen und als Vorschlag angezeigt. Zur späteren Verwendung können diese Punkte mit <Monitorpunkte Speichern> abgelegt werden. Es wird dann die Datei MONITOR.TXT erzeugt.

Auf der rechten Seite des Formulars kann nun ausgewählt werden, für welche Nuklide Zeitreihen welcher Ergebnisgrößen berechnet werden sollen.

Der Button <Zeitreihe erstellen> startet dann den Vorgang:

Zunächst wird für jeden Beobachtungspunkt das entsprechende Gitter mit der maximalen Auflösung festgelegt, in welchem dieser Punkt enthalten ist. Dann wird die Gitterzelle ermittelt, in der der Beobachtungspunkt liegt. Bei den beiden Auswahlmöglichkeiten „Konzentration (<10 µm)“ und „Konzentration (>= 10 µm)“ wird dabei auch die Höhe des Beobachtungspunktes berücksichtigt. Bei den anderen Größen wird nur der Wert in Bodennähe verwendet.

Falls die Zeitreihen der Gammasubmersion (0,1 MeV oder 1 MeV) berechnet werden sollen und <Gammasubmersion vorberechnen> aktiviert ist, wird vor der Erstellung der entsprechenden Zeitreihen das Programm `GAMMASUB.EXE` aufgerufen. Hier werden aus den Konzentrationsfeldern für den jeweiligen Zeitschritt die 2D-Felder der Gammasubmersion berechnet und als DMNA-Datei im Projektordner abgelegt.

Das Programm `GAMMASUB.EXE` setzt dabei auf die ihm vorgegebenen dreidimensionalen Konzentrationsdateien `*cncz_*.dmna` oder `*cnczA_*.dmna` auf. Es wird bei Aerosolen nicht überprüft, ob sowohl lungengängige als auch nicht lungengängige Konzentrations-Dateien vorliegen. Eine interne Aufsummierung der Gammasubmersion durch große und kleine Aerosole findet also nicht statt. Für die Gammasubmersion durch lungengängige Nuklide wird der Name der Outputdatei mit `*-g01mL*` bzw. `*-g10mL*` gekennzeichnet (L für Lunge), für nicht lungengängige Nuklide, also große Aerosole wie bei den Konzentrationsfeldern mit einem zusätzlichen großen A: `*-g01mA*` bzw. `*-g10mA*`. Wenn sowohl große als auch kleine Aerosole vorliegen, dann werden für die Gesamt-Gammasubmersion die jeweiligen Werte aus den L- und A-Dateien aufsummiert.

Anschließend werden die ausgewählten Zeitreihen berechnet und als Beobachtungspunktzeitreihe (`-zbp.dmna`) abgespeichert.

### **6.3.3 Vorgabe einer Mischungsschichthöhe**

Die Mischungsschichthöhe ist in der AKTerm als Wert vorhanden. Dieser wurde aber von ARTM bislang nicht ausgelesen oder verwendet, sondern ein Wert für die Mischungsschichthöhe von TALdia bzw. ARTM auf der Basis des angewählten Grenzschichtmodells ermittelt.

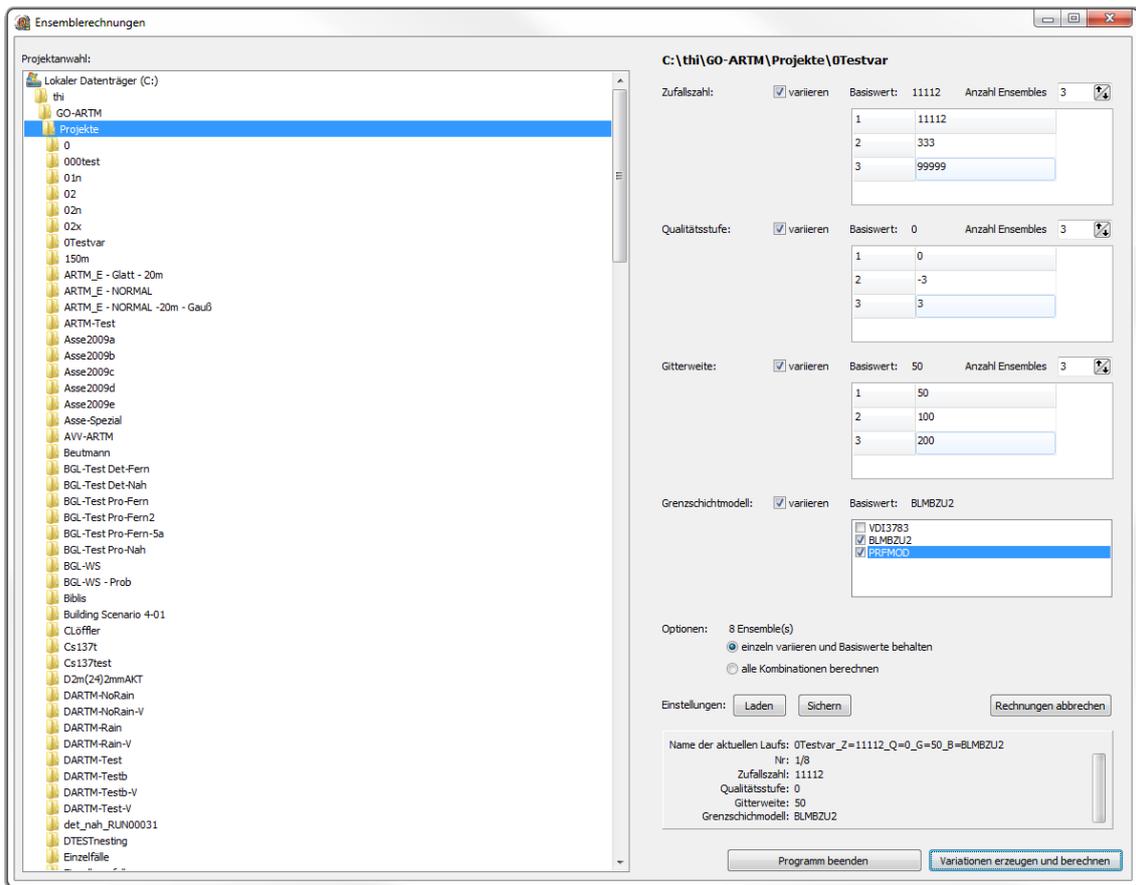
TALdia und ARTM wurden an das Einlesen der Mischungsschichthöhe angepasst. Falls nun in der AKTerm für das entsprechende Qualitätsbyte (QD) ein Wert von 1 eingetragen ist, wird der Wert der Mischungsschichthöhe eingelesen und in den Routinen statt der sonst modellierten Mischungsschichthöhe verwendet. Es erfolgt nun eine Ausgabe dieses Wertes in der `zeitreihe.dmn` sowie die Verwendung in den auf Zeitreihen basierenden Routinen.

Die nötigen Änderungen bei der Berechnung des Grenzschichtprofils wurden im Rahmen des AP 3 dieses Vorhaben berücksichtigt.

#### **6.3.4      Ensemblerechnungen**

Um einen besseren Eindruck zu bekommen inwieweit bestimmte Parameter das Ergebnis der Modellierung mit ARTM beeinflussen, ist es sinnvoll für diese Parameter sogenannte Ensemblesimulationen durchzuführen.

Zur automatischen Steuerung von Ensemblesimulationen für die Parameter Zufallszahl, Qualitätsstufe, Gitterweite und Grenzschichtmodell wurde das Hilfsprogramm `VARTM.EXE` entwickelt und dokumentiert. Dieses Werkzeug gestattet, für einen festgelegten Parameter auf der Basis eines bestehenden Projektes mehrere variierende Projekte anzulegen und auszuführen. Die Grenzen und die Anzahl der Variationen können in dem Tool im Vorfeld festgelegt werden.



**Abb. 6.5** Programm VARTM.EXE zur Erzeugung und automatischen Berechnung von Ensemblesimulationen

In Abb. 6.5 ist ein Screenshot des Programmes VARTM.EXE dargestellt. Zuerst muss auf der linken Seite die Auswahl des Basisprojektes durch einen Doppelklick erfolgen. Die projektspezifischen Informationen einschließlich der Basiswerte für die zu variierenden Parameter werden geladen und der Name des Projektes auf der rechten Seite als Überschrift angezeigt. Des Weiteren werden die in dem Projekt festgelegten Basiswerte der einzelnen Parameter angezeigt.

Die Auswahl der zu variierenden Parameter legt man durch aktivieren oder deaktivieren der entsprechenden Checkbox nach jeweiligem Parameter (Zufallszahl, Qualitätsstufe, Gitterweite und Grenzsichtmodell) fest. Bei Zufallszahl, Qualitätsstufe oder Gitterweite kann dann die Anzahl der Ensembles festgelegt werden. Anschließend können die Werte der Parameter in der vorgesehenen Tabelle eingetragen werden.

Für den Parameter „Grenzschichtmodell“ werden alle in ARTM als Option wählbaren Grenzschichtmodelle angezeigt. Durch aktivieren oder deaktivieren der entsprechenden Checkbox kann das Grenzschichtmodell variiert werden.

Ein solcher Parametersatz kann durch Betätigen des Schalters <Sichern> abgelegt werden und zu einem späteren Zeitpunkt mit <Laden> wieder hervorgeholt werden.

Die berechnete Anzahl der Ensemblerechnungen wird unter „Optionen“ angezeigt. Hier erfolgt auch die Festlegung, ob die Parameter einzeln variiert werden sollen (unter Beibehaltung des Basiswertes der anderen Parameter) oder ob für alle möglichen Kombinationen ARTM-Rechnungen durchgeführt werden sollen.

Mit Betätigen des Schalters <Variationen erzeugen und berechnen> werden zunächst die eingestellten Werte überprüft und ggf. Fehlermeldungen ausgegeben. Sind die Eingabewerte fehlerfrei, werden anschließend für das ausgewählte Projekt entsprechend den Einstellungen der Variationen Unterverzeichnisse für ARTM-Rechnungen angelegt. Diese werden dann der Reihe nach gestartet und die eingestellten Parameter auf der Fläche rechts unten angezeigt. Diese Berechnung aller möglichen Ensembles kann je nach Einstellungen sehr lange dauern. Falls man versehentlich diese Berechnung gestartet hat, kann man die Rechnungen mit <Rechnungen abbrechen> jederzeit beenden.

Mit <Programm beenden> kann das Programm verlassen werden.

### **6.3.5 Parallelisierung des Programms TALdia / ARTM**

Das Programmsystem TALdia / ARTM hat - besonders bei hoher Geländeauflösung und bei der Berücksichtigung von Gebäuden - lange Rechenzeiten. Um diese zu reduzieren ist es sinnvoll, mehrere Prozessorkerne bei der Modellierung der voneinander unabhängigen Wind- und Turbulenzfelder zu nutzen.

#### **6.3.5.1 Untersuchungen mit OpenMP**

Eine gängige Methode zur plattformunabhängigen Parallelisierung von in C/C++ oder FORTRAN implementierter Software stellt die Verwendung des OpenMP Application Programming Interface /OPE 16/ dar. Mit Hilfe dieses Interfaces werden bisher seriell ablaufende Prozesse auf verschiedene Prozessoren verteilt. Gemeinsamer Dateizugriff zum Lesen oder Schreiben wird durch OpenMP nicht unterstützt.

Für das Programm TALdia wurden Analysen und Untersuchungen mit OpenMP durchgeführt. Prinzipiell erschien im Vorfeld eine Parallelisierung von TALdia mittels OpenMP möglich und sinnvoll, da TALdia nacheinander verschiedene Anströmrichtungen der in den meteorologischen Eingabedaten vorhandenen atmosphärischen Stabilitätsklassen betrachtet und voneinander unabhängige Wind- und Turbulenzfelder berechnet und aus-schreibt. Bei der Analyse des Programms zeigte sich allerdings, dass die Implementie-rung von TALdia allerdings viele Elemente, die eine Parallelisierung mittels OpenMP drastisch erschweren. Insbesondere handelt es sich dabei um die Verwendung von `goto` Anweisungen<sup>9</sup>, die zusammen mit OpenMP nicht verwendet werden dürfen. Zu-sätzlich werden globale und modulweite Variablen sehr häufig verwendet, bei denen im Zuge einer Parallelisierung eine Zuordnung sowohl zu einem (parallelen) Thread als auch zum Master nötig wäre. Bei OpenMP müssen globale Variablen allerdings eindeu-tig einem Thread oder dem Master zugeordnet werden. Die betroffenen Module hätten daher komplett umgeschrieben werden müssen.

Von einer Parallelisierung mittels OpenMP wurde daher abgesehen und der im folgen- den Abschnitt beschriebene Ansatz verteilter Rechnungen umgesetzt.

### **6.3.5.2 Verteilte Rechnungen - Grundlagen**

Während einer normalen Strömungs- und Ausbreitungsrechnung mit einer Instanz von ARTM werden alle Prozessorkerne gleichmäßig aber nur gering belegt. Werden mehrere Instanzen von ARTM aufgerufen und auf zwei Prozessorkerne verteilt, so verlängert sich die Gesamtzeit nur unwesentlich, d.h. in fast derselben Zeit werden zwei Rechenläufe durchgeführt. Ruft man mehr Instanzen von ARTM auf, so ergibt sich eine weitere Be-schleunigung.

Um nun ein bestehendes Projekt zu beschleunigen, ist es sinnvoll, es in mehrere Instan-zen aufzuteilen.

---

<sup>9</sup> Die gesamte Fehlerbehandlung und Ausgabe von Fehlermeldungen wurde bei der damaligen Entwick- lung des Programms TALdia durch das Ingenieurbüro Janicke mittels `goto` Anweisungen implementiert. Innerhalb von TALdia sind das rund 1700 dieser Sprunganweisungen.

## **Wind- und Turbulenzfelder**

Bei Vorliegen eines Topografiedatensatzes oder der Definition von Gebäuden werden die Wind- und Turbulenzfelder mit TALdia für jede Ausbreitungsklasse vorberechnet. Dabei werden bei Verwendung nur einer Topographie zwei Windfelder mit zueinander senkrechten Anströmsituationen berechnet und bei Ablauf der Ausbreitungsrechnung daraus für die jeweils aktuelle meteorologische Situation eine Linearkombination berechnet. Falls Gebäude vorhanden sind, wird die Anzahl der vorzurechnenden Situationen auf 36 (alle 10°) erhöht.

Die Erstellung einer Windfeldbibliothek erfolgt für jede Ausbreitungsklasse unabhängig aber in ARTM sequentiell (nicht berechnet werden die Ausbreitungsklassen, die im meteorologischen Datensatz nicht vorkommen). Eine Aufteilung dieser Rechnungen in Rechnungen verschiedener Ausbreitungsklassen erscheint also sinnvoll.

ARTM muss dafür eine „künstliche“ Datei mit meteorologischen Daten übergeben werden, die nur die jeweilige Ausbreitungsklasse enthält. Diese parallel berechneten Wind- und Turbulenzfelder müssen dann im Ordner mit der Windfeldbibliothek (\lib) des Projektes versammelt werden.

Damit nur die Windfelder berechnet werden, muss ARTM mit der Option -1 aufgerufen werden. Die Berechnung dieser Windfelder muss zudem komplett abgeschlossen sein, bevor die Ausbreitungsrechnung beginnt.

## **Konzentrations-/Depositionsfelder und Felder der statistischen Unsicherheit**

Bei der Berechnung der reinen Ausbreitung sind die einzelnen Ausbreitungssituationen je nach Ausbreitungssituation und Größe des Rechengebietes nicht unabhängig voneinander (die bei der letzten Rechnung emittierten Partikel befinden sich ggf. noch im Rechengebiet und werden mitgezählt). Wenn man aber die Sequenz der getrennt berechneten meteorologischen Situationen größer werden lässt (Tage, Wochen oder Monate), so werden die Abweichungen immer geringer und werden kleiner als die modellbedingten und statistischen Fehler.

Beginnend mit dem ersten Datensatz der Meteorologiedatei (AKTerm oder einer entsprechenden Zeitreihe) wird von ARTM die Ausbreitung bis zum letzten Datensatz sequentiell berechnet und abschließend in die Ergebnisdateien geschrieben.

Bevor eine Aufteilung in separat zu berechnenden Sequenzen erfolgt, sollte also eine Analyse dieses meteorologischen Datensatzes durchgeführt werden. Erstreckt sich der gesamte Zeitraum beispielsweise über ein ganzes Jahr, dann ist eine Aufteilung auf Monate sinnvoll. Ist dieser Zeitraum kürzer, so sind hier eher Wochen oder gar Tage zielführend. In jedem Fall sollte diese Aufteilung so grob wie möglich erfolgen – die Anzahl der beteiligten Prozessorkerne sollte aber größer als die Anzahl dieser Aufteilung sein.

Sind die Zeitintervalle festgelegt, erfolgt die Erstellung einer Meteorologiedatei für einen parallel zu berechnenden Prozess nur über den entsprechenden Zeitraum. Anschließend kann dann der Aufruf von ARTM dieses Teilprojektes erfolgen, mit Angabe der zuvor berechneten Windfeldbibliothek.

Nach dem Ablauf aller parallelen Prozesse muss eine Zusammenführung der Ergebnisse durchgeführt werden. Dabei ist die Addition der Werte mit Gewichtung der Dauer des Einzelintervalls vorzunehmen und die so konsolidierte Datei in das Projektverzeichnis zu schreiben.

### **6.3.5.3 Verteilte Rechnungen - Anwendungsbeispiel**

Die Grundlagen für verteilte Rechnungen aus Abschnitt 6.3.5.2 wurden in GO-ARTM testweise<sup>10</sup> implementiert. Diese Version lässt sich in GO-ARTM mit <Shift + Mausklick mit rechter Maustaste auf den Startbutton<sup>11</sup>> aufrufen. Das dadurch aufrufbare, erstellte Formular ist in Abb. 6.6 wiedergegeben.

---

<sup>10</sup> Die Anpassung der graphische Benutzeroberfläche GO-ARTM an die in diesem Vorhaben umgesetzten Weiterentwicklungen waren nicht Teil dieses Vorhabens. GO-ARTM wird derzeit im Rahmen des Vorhabens „Anpassungen und Weiterentwicklung GO-ARTM“ (BfS Bestellnummer 1066/19) überarbeitet. Bei der im Rahmen dieses Vorhabens mitgelieferten GO-ARTM Version handelt es sich daher lediglich um eine Zwischenversion für den Auftraggeber zur Durchführung des verteilten Rechnens. Aufgrund der fehlenden sonstigen Anpassungen an die ARTM-Weiterentwicklungen ist diese Version nicht für die Weitergabe an Dritte gedacht. Eine solche Version kann erst mit Abschluss des genannten laufenden Vorhabens „Anpassung und Weiterentwicklung GO-ARTM“ vom Auftragnehmer zur Verfügung gestellt werden.

<sup>11</sup> Mit „Startbutton“ ist hier die Schaltfläche <Start> in dem Fenster gemeint, das über die GO-ARTM Menüfolge *Start->ARTM* aufgerufen wird.

Rechenläufe verteilen

Meteorologiedatei: F:\GO-ARTM\Projekte\Konrad2006\_WKA\_verzeitreihe.dmna

Anzahl Datensätze: 360  Rechnungen mit Windfeldern

Anzahl Tage: 15 Maximale Anzahl CPU-Kerne: 8

Anzahl Wochen: 3 Anzahl CPU-Kerne für die Rechenläufe: 7

Anzahl Monate: 1

Aufteilung  
 Tage  Wochen  Monate

Tag	Status	Pfad	CPU
0	Windfelder	AK 1	
0	Windfelder	AK 2	
0	Windfelder	AK 3	
0	Windfelder	AK 4	
0	Windfelder	AK 5	
0	Windfelder	AK 6	
0	warten		
1	noch nicht angelegt	Anzahl Stunden: 24	
2	noch nicht angelegt	Anzahl Stunden: 24	
3	noch nicht angelegt	Anzahl Stunden: 24	
4	noch nicht angelegt	Anzahl Stunden: 24	
5	noch nicht angelegt	Anzahl Stunden: 24	
6	noch nicht angelegt	Anzahl Stunden: 24	
7	noch nicht angelegt	Anzahl Stunden: 24	
8	noch nicht angelegt	Anzahl Stunden: 24	
9	noch nicht angelegt	Anzahl Stunden: 24	
10	noch nicht angelegt	Anzahl Stunden: 24	

Abbrechen Läufe anlegen Läufe starten

**Abb. 6.6** Formular zur Steuerung verteilter Rechnungen (Einstiegsbild)

Für die Anwendung müssen folgenden Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Projektanwahl mit GO-ARTM ist erfolgt.
- Zumindest eine Variable muss zeitabhängig sein (kann aber den Wert Null erhalten).
- Der meteorologische Input muss als `zeitreihe.dmna` vorhanden sein.

Zunächst erfolgt eine Analyse des Projektes:

- a) Der Name der zu verwendenden Meteorologiedatei wird angezeigt (im Formular oben).
- b) Die Anzahl Stundendatensätze (umgerechnet in Tage, Wochen und Monate) wird ermittelt und darunter angegeben.
- c) Falls Windfelder benötigt werden, wird eine Checkbox zur Auswahl der Rechnungen mit oder ohne Windfeld ermöglicht.

d) Die Anzahl CPU-Kerne wird ermittelt.

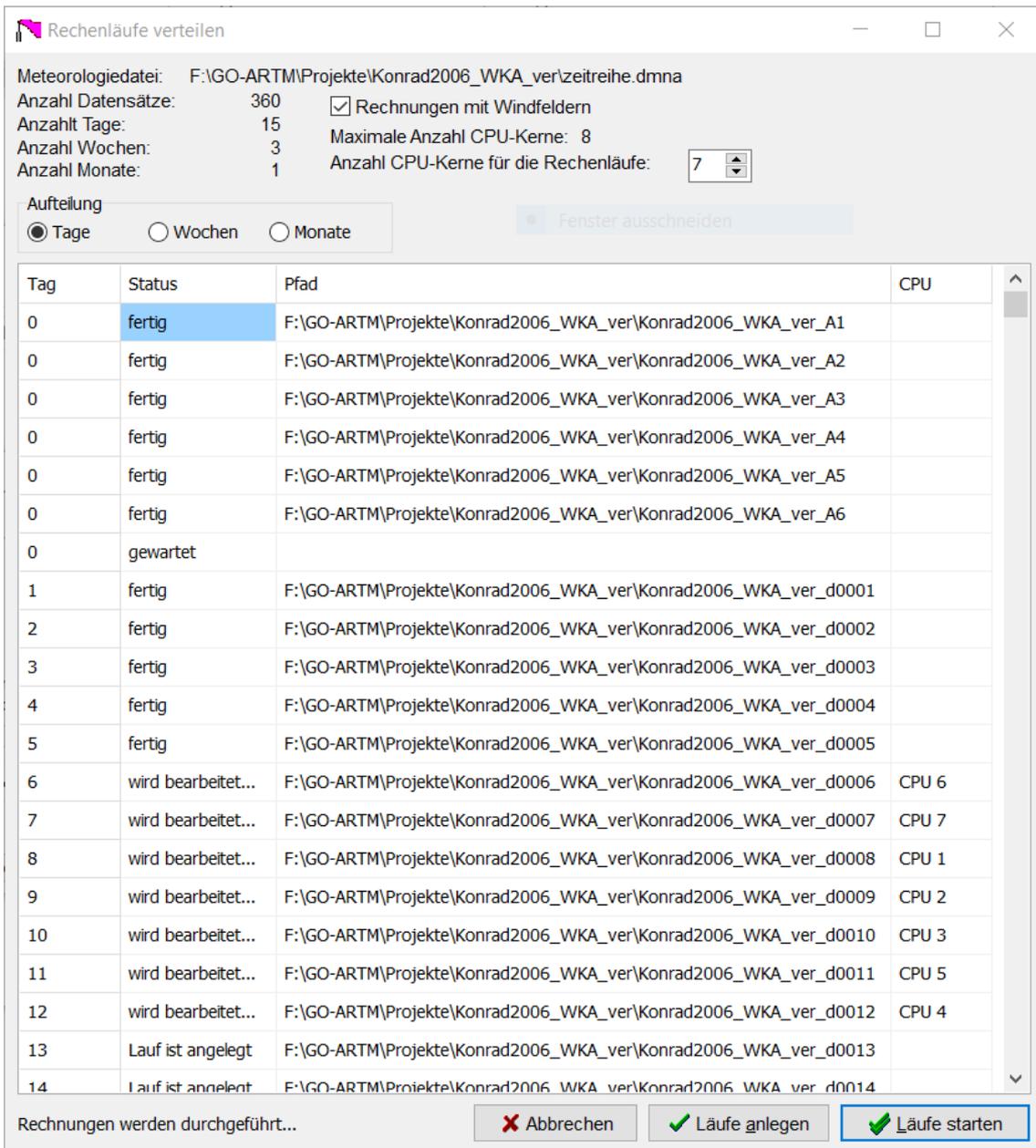
Zunächst erfolgt die Angabe der Anzahl der bei den Rechnungen zu verwendenden CPU-Kerne. Aus Gründen der Praktikabilität (ein Kern sollte frei bleiben, um die sonstigen Aufgaben des Betriebssystems zu erledigen) sollten möglichst viele aber nicht alle Kerne beteiligt werden.

Dann muss die Aufteilung in Zeitintervalle durch den Benutzer getroffen werden. Die Tabelle mit den Aufgabenpaketen ändert sich entsprechend dieser Angaben. Die Aufgabe „warten“ hat dabei den Sinn, dass bis zum Erledigen aller oben aufgeführten Aufgaben gewartet wird bevor ein neuer Prozess zugewiesen werden kann. Stehen die Aufgabenpakete fest, können die Unterprojekte durch Betätigen des Buttons „Läufe anlegen“ erstellt werden.

Dabei werden die nötigen Unterprojekte in Form von Unterordnern des Hauptprojektes angelegt, die nötigen Dateien hereinkopiert bzw. erstellt und durch einen kurzen Aufruf von ARTM entsprechende Zeitreihen produziert. Nach der Erstellung der Unterprojekte enthält die Tabelle des Formulars entsprechende Statusmeldungen und die Pfadnamen der Unterprojekte, also die späteren Einzelprozesse.

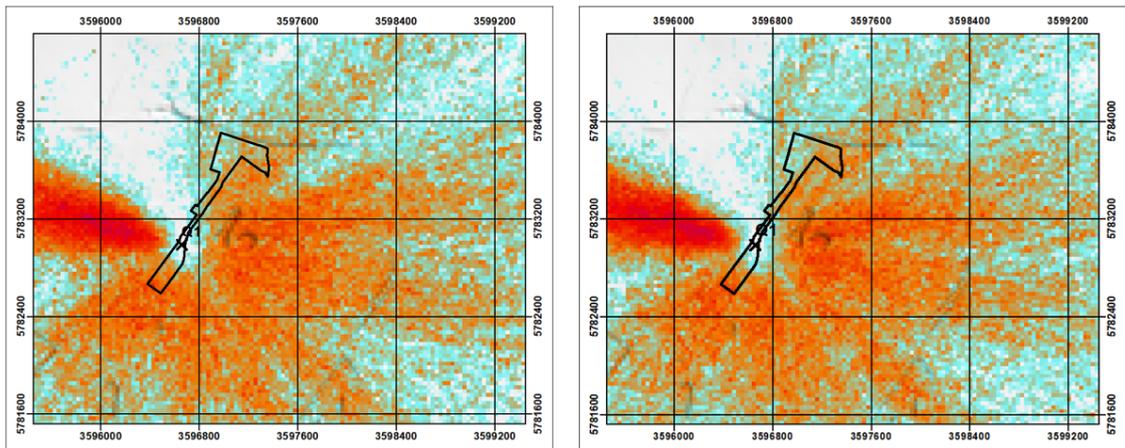
Nach Betätigen des Buttons „Läufe starten“ erfolgt die Zuweisung der einzelnen Unterprojekte zu einem der CPU-Kerne und die Einzelprozesse (ARTM bzw. TALdia Läufe) werden gestartet. Bei Rechnungen mit Windfeldern werden zunächst die Strömungsrechnungen für jede Ausbreitungsklasse gestartet. Danach erfolgen die Berechnungen der Ausbreitung für die einzelnen Zeitintervalle. Sobald dabei ein Prozessor seine Aufgabe erledigt hat, wird diesem automatisch eine neue Aufgabe zugeteilt. Nach der Beendigung des letzten Prozesses werden die Ergebnisse der Einzelläufe zusammengeführt und im Projektordner abgelegt.

Die Abb. 6.7 zeigt das Formular beim Ausführen der Rechenläufe. Am Status erkennt man, ob die jeweilige Aufgabe angelegt ist, bearbeitet wird oder bereits fertig ist. In der Spalte CPU ist der CPU-Kern angegeben, der die Aufgabe zurzeit ausführt.



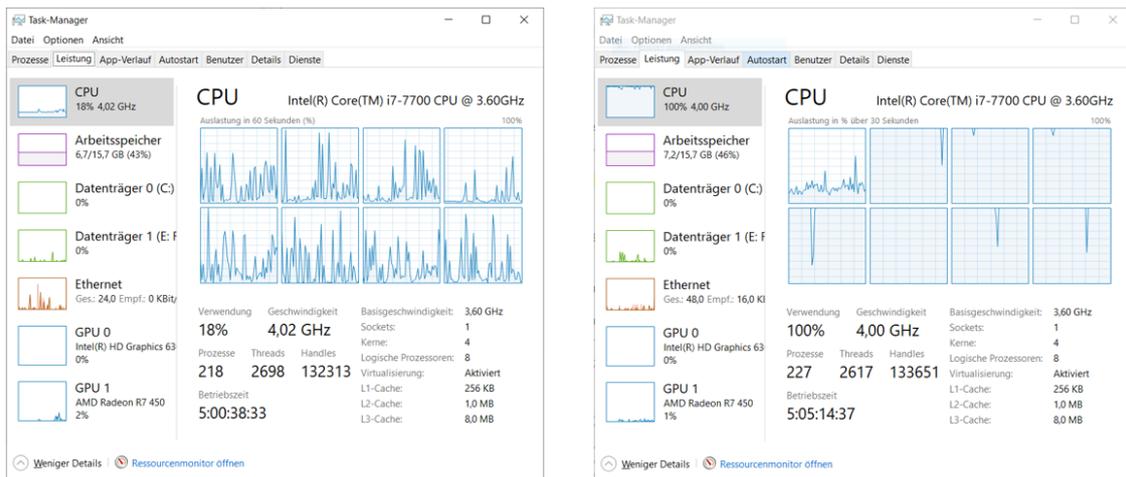
**Abb. 6.7** Formular zur Steuerung verteilter Rechnungen (Berechnung der Läufe)

In der Abb. 6.8 sind die ARTM Rechenergebnisse eines Rechenlaufs über 15 Tage für bodennahe Konzentrationen dargestellt (Links: Einzellauf, Rechts: verteilte Läufe). Da die Rechnungen mit unterschiedlichem Einfluss des Zufallsgenerators erzeugt wurden, sieht man im Detail leichte Unterschiede. Die Ausbreitungssituation wird aber in beiden Fällen generell gleich getroffen.



**Abb. 6.8** ARTM Rechenergebnisse eines Rechenlaufs über 15 Tage für bodennahe Konzentrationen (Links: Einzellauf, Rechts: verteilte Läufe)

Die Abb. 6.9 zeigt die CPU-Auslastung während der beiden Rechnungen. Auf der linken Seite ist zu erkennen, dass mit 18 % die CPU-Auslastung bei der Durchführung eines Einzellaufs relativ gering ist. Bei verteilten Läufen können bis zu 100 % Auslastung erreicht werden und die Rechnungen somit deutlich schneller durchgeführt werden. Bei den Testrechnungen mit einem Prozessor mit acht Kernen ergab sich ein Faktor von ca. 4. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Faktor bei der Verwendung von Prozessoren mit mehr Kernen noch deutlich steigern wird.



**Abb. 6.9** Auslastung der CPU während der Durchführung von ARTM-Läufen (Links: Einzellauf, Rechts: verteilte Läufe)

### 6.3.6 Ablösung des ARR-Formats für temporäre Dateien

Die temporären Dateien mit Zwischenergebnissen von ARTM wurden bislang im Unterordner `work` in binären Dateien im sogenannten ARR-Format ausgeschrieben. Dieses Dateiformat, das seinerzeit von der AUSTAL2000-Implementierung übernommen wurde, ist nicht dokumentiert und somit nicht ohne weiteren Aufwand lesbar. Die temporären Dateien, z. B. `d0001a00.arr` für das dreidimensionale Konzentrationsfeld, werden bei einem normalen Aufruf von ARTM nach der Auswertung und dem Ausschreiben der Dmna-Ergebnisdateien gelöscht. Bei Ausführung von ARTM mit der Option `-x1` wird verhindert, dass diese Zwischenergebnis-Dateien gelöscht werden und sie verbleiben im Unterordner `work`. Damit erfahrenen Nutzern von ARTM ein Auslesen dieser temporären Dateien möglich ist, wurde das ARR-Format durch das mittels eines einfachen Text-Editors lesbare Dmna-Format ersetzt. Eine entsprechende Umstellung des ARR-Formats auf das Dmna-Format wurde in AUSTAL2000 in der Version 2.5.0 /IBJ 14/ umgesetzt. Die Umsetzung in dieser AUSTAL2000 Version (verfügbar auf den Seiten Internet-Seite des Umweltbundesamtes<sup>12</sup>) wurde als Grundlage für die Umstellung in ARTM herangezogen.

Innerhalb von ARTM wurden alle relevanten Schnittstellen lokalisiert, in denen entweder die ARR-Format Dateien ausgeschrieben werden, wie z.B. durch die Funktionen `ArrWrite` und `DmnArrHeader` innerhalb der Funktion `DmnWrite` in `IBJdmn.c`, oder eingelesen werden, beispielsweise durch die Funktionen `ArrRead` und `DmnCnvHeader` innerhalb der Funktion `DmnRead` in `IBJdmn.c`. Desweiteren mussten Änderungen im Nameserver Modul `TalNms.c` vorgenommen werden, in dem unter anderem festgelegt ist, welche Datentypen in welchen Dateiformaten ein- oder ausgeschrieben werden und die Namensgebung von Dateien gesteuert wird. Zusätzlich mussten Änderungen innerhalb der Einlese- und Ausgaberroutine von Dmna-Dateien durchgeführt werden. Eine Änderung war die Neustrukturierung der Einträge des Headers innerhalb der Dmna-Dateien. Dazu wurden alle Headerfunktionen in denen vormals ARR-Dateien beteiligt waren, angepasst. Dies betraf insbesondere die Funktion `WrkHeader` in `TalWrk.c`.

Die Ergebnisse der ehemaligen ARR-Formate wurden mit Umstellung auf das DMNA-Format in ein leserliches Format umgestellt. Beispielsweise wird das dreidimensionale

---

<sup>12</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/regelungen-strategien/ausbreitungsmodelle-fuer-anlagen-bezogene/download>

Konzentrationsfeld in der Datei `d0001a00.dmna` so abgespeichert, dass für jedes Höhenlevel und jede intern verwendete Partikelgruppe die 2-dimensionalen Werte so angeordnet werden, wie es der Lage der Punkte auf der Landkarte entspricht.

Jeder einzelne Implementierungsschritt wurde genauestens analysiert, damit sichergestellt ist, dass die Umstellung von dem veralteten ARR-Format auf das Dmna-Format die Ergebnisse nicht beeinflusst. Dafür wurden mit der angepassten ARTM-Version Rechnungen für zahlreiche Testfälle durchgeführt und mit den Ergebnissen der Simulationen verglichen, die mit einer das ARR-Format verwendenden ARTM-Version berechnet wurden. Dies umfasste auch Simulationen mit den im Rahmen dieses Vorhabens umgesetzten Erweiterungen und Weiterentwicklungen. Unter anderem wurden also Testfälle mit prognostischen Windfeldern und einer vorgegebenen Grenzschichtprofilzeitreihen-Datei (GPZD) betrachtet. Die Ergebnisse mit und ohne ARR-Format wurden verglichen und es wurden keine Abweichungen festgestellt.

### **6.3.7 64Bit-Version**

Bisherige ARTM und TALdia Versionen wurden lediglich als 32Bit Versionen zur Verfügung gestellt. In diesem Vorhaben wurden die Programme auch für 64Bit Betriebssysteme optimiert erstellt. Dabei mussten insbesondere Anpassungen bei der Array-Verwaltung vorgenommen werden, da die Lese- und Schreibprozeduren in den Programmen mit Pointer Variablen arbeiten, bei denen gewährleistet sein muss, dass sie jeweils um die richtige Speicherplatz-Länge in- bzw. dekrementiert werden.

### **6.3.8 Verbesserungen zum Programmoutput**

#### **6.3.8.1 Zeitabhängige Ausgabe von Konzentrationsfeldern**

Die zeitabhängige Ausgabe von zwei- bzw. dreidimensionalen Ergebnisfeldern von ARTM wurde in der aktuellen Version implementiert. Zur Ansteuerung dieser zeitabhängigen Ausgabe der Ergebnisfelder dient die neu eingeführte NOSTANDARD Option `ETS` (`each time step`) in der Eingabedatei `ARTM.txt`. Aus den zeitabhängigen Ergebnisfeldern können dann beispielsweise nachträglich Zeitreihen an frei definierbaren Beobachtungspunkten (siehe Abschnitt 6.3.2.2) extrahiert werden.

Die Namen der Ausgabedateien für die zeitabhängigen Ergebnisfelder orientieren sich an den gewohnten Namen der Dateien für die Mittelwerte über den Simulationszeitraum.

Er setzt sich demnach aus dem Nuklid, einem Kürzel zur Kennzeichnung der physikalisch/chemischen Form des Nuklides und einer Kennzeichnung für die ausgeschriebene Ergebnisvariable (`cnzc` für Konzentrationen der lungengängigen Nuklide in der Luft, `cnzCA` für die Konzentration großer Aerosole (AED > 10 µm) eines Nuklides in der Luft, `dryz` für die trockene Deposition, `wetz` für die nasse Deposition) zusammen. Zusätzlich wird dieser Dateibezeichnung die laufende Nummer des Zeitschritts angehängt. Diese laufende Nummer ist 4stellig, gegebenenfalls mit führenden Nullen. Werden mehrere Gitter verwendet, so wird zusätzlich noch die Gitternummer (als zweistellige Zahl, gegebenenfalls mit einer führenden Null) an den Dateinamen hinter der laufenden Nummer für den Zeitschritt und vor die Dateierweiterung `.dmna` angehängt. Beispiele:

```
cl36a-wetz_0003.dmna
```

Nasse Deposition des Nuklids Cl-36 als Aerosol für den 3. Zeitschritt bei nur einem einzigen verwendeten Simulationsgitter

```
fe55a-cnczA_004803.dmna
```

Konzentrationen großer Aerosole mit AED > 10 µm des Nuklids Fe-55 für den 48ten Zeitschritt auf dem Gitter Nr. 3

Bei der Umsetzung im Source Code wurde zunächst die NOSTANDARD Option `ETS` in `TalInp.c` eingeführt. Anpassungen waren zudem bei der Ausgabe der Definitionsdateien `param.def` und `wetter.def` innerhalb des Moduls `TalDef.c` hinsichtlich der Anzahl an Zeitschritten, über die gemittelt werden sollen, nötig. Der Parameter `MI.average` in `artm.c` in der Funktion `TalInit(...)` übernimmt die Änderungen aus diesen Definitionsdateien und bewirkt dadurch, dass die Zwischenergebnis-Dateien der Konzentrations- und Depositionswerte für jeden einzelnen Zeitschritt durch den Aufruf der Funktion `TmnStoreAll(...)` innerhalb der Funktion `TalServer(...)` ausgeschrieben werden.

Eine weitere Anpassung der Anzahl der Zeitschritte in der Datei `artm.c` ermöglicht, dass jeder einzelne Zeitschritt an die Funktion `TmtMain(...)` übergeben werden kann. Die Funktion `CompareArray` in der Datei `TalTmt.c` wurde so angepasst, dass für jeden einzelnen Zeitschritt Array-Strukturen erzeugt werden, die mit den Informationen

aus den Zwischenergebnis-Dateien gefüllt werden<sup>13</sup>. Zuletzt wurde eine zusätzliche Funktion `WriteETSResult()` implementiert, die daraufhin die einzelnen Arrays in die gewünschten DMNA Ausgabedateien schreibt. Ein Vorteil dieser Implementierung ist, dass die Array-Strukturen der aufsummierten Dosiswerte ebenfalls erzeugt werden und durch die Funktion `WriteResult()` abgespeichert werden. So hat man nicht nur die Ergebnisse für jeden einzelnen Zeitschritt, sondern auch, wie bei einem Aufruf ohne die `NOSTANDARD` Option `ETS`, die gewohnten gemittelten Ergebnisdateien.

Zeitabhängige zweidimensionale Felder der Gammasubmersion werden durch ARTM nicht erzeugt, da diese Felder auch nicht als zeitlich aufgelöste Zwischenergebnisse vorliegen. Standardmäßig wird nur für den Mittelwert der Konzentration die Gammasubmersion berechnet.

### 6.3.8.2 Ausgabestatistik

Da es in manchen Fällen sinnvoll ist, die Modellstatistiken in Form von Standardabweichung zu kennen, wurden die Zeitreihenausgaben um jeweils eine entsprechende Datei mit der zusätzlichen Endung `_s` erweitert, in der die Standardabweichungen des jeweiligen Zeitreihenwertes abgespeichert werden, z.B.:

```
cs137a-zbpz.dmna
```

Diese Datei beinhaltet die Zeitreihen der Konzentrationen lungengängiger Aerosole an den Beobachtungspunkten für das Nuklid Cs137.

```
cs137a-zbpzs.dmna
```

Diese Datei beinhaltet die entsprechenden statistischen Unsicherheiten zu den Konzentrationswerten aus der Datei `cs137a-zbpz.dmna`.

Für die Implementierung mussten zunächst Änderungen in den Zwischenergebnis-Dateien vorgenommen werden. In der Funktion `DtbMntStore(...)` in der Datei `TalDtb.c` wurde die dazu notwendige Größe der Arrays um die Unsicherheit erweitert und mit dem entsprechenden ohnehin bereits simulierten Werten gefüllt. Außerdem wurden die Header der auszuscreibenden Zwischenergebnis-Dateien so angepasst, dass die Funktion

---

<sup>13</sup> Für die gemittelte Zeitreihenrechnung wird nur eine einzelne Array-Struktur erstellt, die die Informationen aus den Zwischendateien aufsummiert.

`DmnWrite (...)` zusätzlich zu den Konzentrationswerten die dazugehörige Unsicherheit in einer weiteren Spalte abspeichert.

Im nächsten Schritt wurden die Einlese- und Ausgabefunktionen im Modul `TalMon.c` angepasst, innerhalb dessen aus den Zwischenergebnis-Dateien die finalen Beobachtungspunkt-Zeitreihen im DMNA-Format erstellt werden. Dazu wurden die Einlese-Funktionen (z.B. `ReadMntValues(int i)`) an die neue Form der Zwischenergebnis-Dateien angepasst.

Als nächstes, analog wie für die Zwischenergebnis-Dateien, wurde die Größe der Arrays, die zum Ausschreiben der Ergebnisse genutzt werden, um die Unsicherheit erweitert und mit den benötigten Werten gefüllt. Dies geschieht innerhalb der Funktion `AddValues(int n)`, welche für jeden Beobachtungspunkt `n` die entsprechenden Zwischenergebnisse der einzelnen Zeitschritte in das auszuschreibende Array für lungengängigen Anteile der Größenklasse 1 und 2 der Aerosole aufsummiert. Im letzten Schritt werden die gefüllten Arrays durch die Funktion `WriteSpcValues(...)` ausgeschrieben.

### **6.3.9 Verbesserungen zur Dokumentierung und technischen Umsetzung**

#### **6.3.9.1 Erweiterung der Programmbeschreibung**

Das Programm-Handbuch, welches die vorherigen beiden Dokumente Programmbeschreibung und Modellbeschreibung ersetzt (siehe folgenden Abschnitt 6.3.9.2), wurde um einige Punkte erweitert. Neben der Beschreibung und Dokumentation der in diesem Vorhaben neu implementierten Funktionalitäten waren dies ergänzende Angaben zur Mischungsschichthöhe. Zudem wurden Erläuterungen zur modellintern verwendete Partikelanzahl eingefügt. Die in einer `AKTerm` Datei bzw. `zeitreihe.dmna` unterschiedliche Bedeutung der Zeitvariable (Beginn bzw. Ende des simulierten Zeitintervalls) wurde im Programm-Handbuch deutlicher hervorgehoben und die Beschreibung weiterer Eingangsparameter verbessert. Die History-Datei, in der die Änderungen zwischen Programmversion 2.8.0 und Version 3.0.0 stichpunktartig aufgelistet sind, wurde dem Handbuch als Anhang beigefügt.

### **6.3.9.2 Zusammenführen von Programm- und Modellbeschreibung in einem Programmhandbuch**

Die früheren Dokumente Programm- und Modellbeschreibung wurden in einem neuen Programmhandbuch vereint. Zusätzlich wurden die relevanten Änderungen in diesem Vorhaben eingepflegt und das Handbuch zudem redaktionell überarbeitet.



## **7 AP 6: Workshops**

Ursprünglich war vorgesehen, zwei eintägige Workshops zum Austausch und Information zu aktuellen Weiterentwicklungen zwischen externen Anwendern, BfS-Mitarbeitern und Entwicklern durchzuführen. Diese sollten ein Jahr nach Vorhabensbeginn und drei Monate vor der Beendigung stattfinden. Aufgrund von entstehendem Schulungsbedarf und geänderten Randbedingungen während des Projektverlaufes wurde zusammen mit der Fachbetreuung in BfS entschieden, statt der zwei eintägigen Workshops einen anderthalbtägigen Workshop und ergänzend eine eintägige Schulungsveranstaltung durchzuführen.

Diese Veranstaltungen fanden am 21.11.2018 (Schulung) und am 22./23.11.2018 (Workshop) am BfS-Standort in Neuherberg statt.

### **7.1 Schulung**

Die Schulung richtete sich an Neueinsteiger in der Ausbreitungsmodellierung mit ARTM. Neben den konkreten Anwendungsbeispielen mit ARTM und der graphischen Oberfläche GO-ARTM wurden den etwa 25 Teilnehmer\*innen der Schulung das für den Einstieg in die Ausbreitungsmodellierung mit ARTM notwendige Basiswissen vermittelt. Der offizielle Zeitplan und die Ankündigung der behandelten Themen sind in Abb. 7.1 wiedergegeben.

### **7.2 Workshop**

Das Programm des Workshops ist in Abb. 7.2 wiedergegeben. Von den insgesamt 15 Vorträgen bei dieser Veranstaltung wurden sechs von der GRS beigetragen.

Den etwa 30 Teilnehmer\*innen wurden zunächst die aktuellen Entwicklungen und Arbeiten an ARTM im Rahmen dieses Vorhabens vorgestellt. Danach folgten Beiträge des BfS zu Dosisberechnung und Modellanalyse. Der zweite Tag war dann für Anwendungsbeispiele reserviert. Neben erfolgreichen Forschungsvorhaben der GRS für das Umweltministerium Baden-Württemberg (UMBW) und im Rahmen des OECD/NEA BSAF Projektes zu Fukushima wurden auch ARTM-Anwendungen externer Anwender vorgestellt.

# ARTM Schulung

Wann: Am Mittwoch, den 21.11.2018

Wo: Bundesamt für Strahlenschutz, Neuherberg, IMIS-Schulungszentrum (E 905/906)

## Zeitplan

09:30	09:45	<b>Ankommen, Anmeldung</b>
09:45	09:55	<b>Begrüßung, Vorwort, Allgemeines</b>
09:55	17:30	<b>Themen der ARTM Schulung:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– Einführung in die Ausbreitungsmodellierung</li><li>– Regelwerk und ein wenig Historie zu ARTM</li><li>– Input und Arbeitsweise mit ARTM</li><li>– Grenzschichtmeteorologie: Grenzschichtmodell / Turbulenzparametrisierung, neue VDI Richtlinie 3783 Blatt 8</li><li>– TALdia : diagnostisches Windfeldmodell, Arbeitsweise, Einschränkungen bei der Anwendung</li><li>– Output von ARTM, Interpretation der Ergebnisse</li><li>– Praktische Anwendung von ARTM</li><li>– Arbeiten mit Dosismodul DARTM</li></ul>
17:30		<b>Ende der Schulung</b>

Vortragende:

Dr. Cornelia Richter (GRS)

Dr. Margit Pattantyús-Ábrahám (BfS)

**Abb. 7.1** Zeitplan und Themen der ARTM-Schulung

## ARTM Workshop

22.11.-23.11.2018 Bundesamt für Strahlenschutz, Neuherberg, Raum 128-129

Themen	Vortragende/r
09:00 09:10 Begrüßung, Vorwort, Allgemeines (Do 9:00-9:10)	
<b>Weiterentwicklung von ARTM (Do 9:10-10:30; 10:50-12:00)</b>	
09:10 09:35 Gesamtüberblick	Cornelia Richter
09:35 10:05 Parallelisierung von ARTM Aufrufen - ein externer Ansatz	Ralf Kunz
10:05 10:30 Parallelisierung TALdia	Cornelia Richter
10:50 11:25 Einbau eines Prognostischen Windfeldes	Cornelia Richter
11:25 11:45 Zeitreihen der Gammasubmersion	Cornelia Richter
11:45 12:05 <i>Diskussion</i>	
<b>Dosisberechnung (Do 13:00-14:25)</b>	
13:00 13:40 Vergleich von berechneten Strahlenexpositionswerten mit Gauß- und Lagrangeausbreitungsmodell	Margit Pattantyús-Ábrahám
13:40 14:10 Die neue AVV zu StrSchV §47	Alexander Diener
14:10 14:25 <i>Diskussion</i>	
<b>Modellanalyse (Do 14:25-15:05; 15:30-17:15)</b>	
14:25 15:05 NERIS ADM Vergleichskampagne: Ergebnisse von ARTM	Margit Pattantyús-Ábrahám
15:30 16:00 Sensitivitätsanalyse von ARTM	Robert Hanfland
16:00 16:40 ARTM mit verschiedenen Gelände- und Bebauungsstrukturen: Vergleich mit Gauß Ausbreitungsrechnung	Margit Pattantyús-Ábrahám
16:40 17:00 <i>Diskussion</i>	
<b>Anwendungsbeispiele (Fr 9:00-10:30, 10:50-12:10)</b>	
09:00 09:30 Einfluss von Radon-Emissionen auf ODL Messungen am KKW Standort Neckarwestheim (Auftrag des UMBW)	Cornelia Richter
09:30 10:00 Anwendung der SEWD-Berechnungsgrundlagen für geplante Zwischenlager für schwach- und mittelaktive Abfälle	Ralf Kunz
10:00 10:30 Einführung des Lagrange-Partikel-Modells für die Ausbreitungsrechnung am Forschungsstandort Rossendorf	Marcus Walter
10:50 11:20 Vorgehensweise zur Ermittlung eines repräsentativen Jahres für die Anwendung mit ARTM	Olaf Nitzsche
11:20 11:50 Quelltermrückrechnung zu Fukushima mit Hilfe von ARTM (im Rahmen des Vorhabens RS1534 - Unfallablauf- und Quelltermanalysen: Untersuchungen zu den Ereignissen in Fukushima im Rahmen des OECD/ NEA BSAF Projektes, Phase II)	Cornelia Richter
11:50 12:10 <i>Diskussion</i>	
<b>Offene Fragen und Themen (12:10-13:00)</b>	
12:10 13:00 <i>Diskussion</i>	

**Abb. 7.2** Programm des ARTM-Workshops



## **8 Zusammenfassung**

Um weiterhin zu ermöglichen, dass die Ausbreitungsrechnung für Radionuklide dem Stand von W&T entsprechend durchgeführt werden kann, war eine Aktualisierung von ARTM unabdingbar. Diese wurde in dem in diesem Bericht vorgestellten Vorhaben umgesetzt. Dafür wurde zunächst der Stand von W&T im Rahmen des AP 1 eingehend recherchiert. Das AP 2 widmete sich der Möglichkeit, ARTM alternativ zum diagnostischen Wind- und Turbulenzfeldmodell TALdia auch ein prognostisches Wind- und Turbulenzfeldmodell als Input für die Ausbreitungsrechnung mit ARTM verwenden zu können. Zunächst wurde dazu in Abstimmung mit dem Auftraggeber ein prognostisches Windfeldmodell ausgewählt und anschließend wurde in ARTM eine Schnittstelle zu diesem Windfeldmodell geschaffen. Pre- und Postprozessingschritte zum Betrieb des prognostischen Windfeldmodells mit dem für ARTM vorgegebenen Eingabedaten wurden dabei über die Benutzeroberfläche GO\_ARTM.exe realisiert. Die Möglichkeit, neben dem bisherigen Standardgrenzschichtprofil auch das Grenzschichtmodell der aktualisierten VDI Richtlinie 3783 Blatt 8 zu verwenden, wurde neben der Möglichkeit, komplette Grenzschichtprofile unabhängig von den programminternen implementierten Profilen als Zeitreihe vorzugeben, im Rahmen des AP 3 geschaffen. Weitere Anpassungen, welche die Anwendung außerhalb Mitteleuropas erleichtern, waren Teil des AP 4. Zahlreiche weitere technische Programmverbesserungen im Sinne der Anwenderfreundlichkeit, der Programmperformance und sowie weitere Analysemöglichkeiten der Simulationsergebnisse durch erweiterte Ergebnisdateien, wurden im Rahmen des AP 5 durchgeführt. Schließlich wurde zum intensiven (Erfahrungs-)Austausch mit Fachkollegen und Anwendern im Rahmen des AP 6 dieses Vorhabens eine Schulung und ein Workshop durchgeführt.

### **8.1 Ausblick**

Mit Abschluss dieses Vorhabens repräsentiert ARTM wieder den Stand von W&T der atmosphärischen Ausbreitungsrechnung von Radionukliden. Dies war insbesondere durch die Veröffentlichung der AVV Tätigkeiten im Juni 2020 geboten, da in dieser Verwaltungsvorschrift die Anwendung eines Lagrange'schen Partikelmodells wie ARTM verlangt. Es ist daher davon auszugehen, dass sich der Anwenderkreis von ARTM jetzt wesentlich erweitert. Dadurch wird Bedarf an ARTM-Schulungen und Anwender-Support entstehen. Zudem wird durch das erweiterte Anwendungsspektrum die Weiterentwicklung und Ertüchtigung von ARTM und seiner Benutzeroberfläche vorantreiben.

Für noch realitätsnähere Ausbreitungsrechnungen sind dabei insbesondere Weiterentwicklungen hin zu räumlich besser aufgelösten Randbedingungen denkbar. Beispielsweise wird bisher im gesamten Simulationsgebiet pro Zeitschritt jeweils die gleiche Niederschlagsintensität angenommen und mit einer einheitlichen Rauigkeitslänge gerechnet, was eine sehr grobe, wenig realitätsnahe Vereinfachung der realen Verhältnisse bedeuten kann.

Mit der Verwendung eines prognostischen Windfeldmodells durch ARTM sind zudem einige Fragenstellungen verknüpft, die weiterer Untersuchungen bedürfen. So bieten prognostische Windfeldmodelle mehr Möglichkeiten zur Beschreibung der Simulationsrandbedingungen, wie zum Beispiel die Oberflächenrauigkeit von Gebäuden und Dächern. Die Standardeinstellung dieser in ARTM bisher nicht definierbaren Randbedingungen muss daher sinnvoll gewählt werden, um für die jeweilige Fragestellung konservative Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung zu gewährleisten.

Auch zukünftig wird sich der Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich der atmosphärischen Ausbreitungsrechnung von Radionukliden weiterentwickeln und sollte verfolgt werden, um die daraus resultierenden, erforderlichen Anpassungen von ARTM zeitnah umsetzen zu können.

## Literaturverzeichnis

- /AVV 20/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten, (AVV Tätigkeiten). BAnz AT 16.06.2020 B3, 8. Juni 2020.
- /BFS 15/ Wildermuth, H., Kainz, M.: Anleitung Dosisberechnung Programm DARTM Version 1\_07. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), August 2015.
- /BFS 19/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Referentenentwurf: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten [AVV Tätigkeiten]. 9. Mai 2019.
- /BMU 12/ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen) in der Fassung vom 28. August 2012 (Bundesanzeiger), zuletzt geändert 1. Dezember 2012 (BAnz. 2012, Nr. BAnz AT 05.09.2012 B1, S. 1–74).
- /BMU 18/ Entwurf zur Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (TA Luft) in der Fassung von 2018, zuletzt geändert 16. Juli 2018.
- /CHA 03/ Chang, C.-H., Meroney, R. N.: Concentration and flow distributions in urban street canyons, Wind tunnel and computational data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Bd. 91, Nr. 9, S. 1141–1154, 2003.
- /DON 09/ Donnelly, R. P., Lyons, T. J., Flassak, T.: Evaluation of results of a numerical simulation of dispersion in an idealised urban area for emergency response modelling. *Atmospheric Environment*, Bd. 43, Nr. 29, S. 4416–4423, DOI 10.1016/j.atmosenv.2009.05.038, 2009.
- /EIC 89/ Eichhorn, J.: Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima-Modells, Dissertation zur Erlangung des Grades "Doktor

der Naturwissenschaften" am Fachbereich Physik der Johannes Gutenberg - Universität Main. 151 S.: Mainz, 1989.

- /EIC 07/ Eichhorn, J.: MISKAM Version 5.02 (April 2007) Evaluierung nach VDI-RL 3783/9. Hrsg.: giese-eichhorn software: Wackernheim, April 2007.
- /EIC 10/ Eichhorn, J., Kniffka, A.: The numerical flow model MISKAM: State of development and evaluation of the basic version. Meteorologische Zeitschrift, Bd. 19, Nr. 1, S. 81–90, DOI 10.1127/0941-2948/2010/0425, 2010.
- /EIC 13/ Eichhorn, J.: MISKAM, Handbuch zu Version 6. 2013.
- /EUR 14/ Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom (Richtlinie 2013/59/Euratom) in der Fassung vom 5. Dezember 2013 (Amtsblatt der Europäischen Union), zuletzt geändert 6. Februar 2014 (Amtsblatt der Europäischen Union 2014, Nr. L 13, S. 1–73).
- /GOR 08/ Goricsán, I., Balczó, M., Czáder, K., Rákai, A., Tonkó, C.: Simulation of Flows in an Idealised City Using Various CFD Codes. In: Cambridge Environmental Research Consultants (CERC): Proceedings of the 11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. Cambridge, 2. - 5. Juli 2007, S. 415–419, Juli 2007.
- /GRS 01/ Thielen, H., Martens, R.: Arbeiten der GRS im Rahmen der Workshops zur Neuformulierung des Anhangs 3 der neuen TA-Luft. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, September 2001.
- /GRS 07/ Martens, R., Janicke, L., Thielen, H.: Entwicklung, Validierung und Bereitstellung eines atmosphärischen Ausbreitungsmodells für luftgetragene radioaktive Stoffe auf der Basis des Ausbreitungsmodells AUSTAL2000 der neuen TA Luft, StSch 4443. Hrsg.: GRS, GRS, Ingenieurbüro Janicke, GRS-A-3386: Köln, September 2007.

- /GRS 12/ Martens, R., Brücher, W., Richter, C., Sentuc, F., Sogalla, M., Thielen, H.: Erweiterung und Validierung von ARTM für den Einsatz als Ausbreitungsmodell in AVV und SBG. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3637: Köln, Februar 2012.
- /GRS 15a/ Richter, C., Thielen, H., Sogalla, M.: Ergänzende Untersuchungen zur Validierung des Atmosphärischen Radionuklid-Transport-Modells (ARTM). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-394, 384 S., ISBN 978-3-944161-75-4: Köln, 2015.
- /GRS 15b/ Richter, C., Sogalla, M., Thielen, H., Martens, R.: ARTM Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell mit der graphischen Benutzeroberfläche GO-ARTM, Programmbeschreibung zu Version 2.8.0 (GO-ARTM Version 2.0), Stand 2015-09-15. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 15. September 2015.
- /HAR 17/ Di Sabatino, S., Trini Castelli, S., Brattich, E.: Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 18th International Conference, Proceedings. Hrsg.: HARMO 18th Local Organizing Committee: Bologna, Italy, 9. Oktober 2017.
- /HAR 19/ Clemens Mensink: Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 19th International Conference, Proceedings. Hrsg.: HARMO 19th Local Organizing Committee: Bugge, Belgium, 3. Juni 2019.
- /IBJ 14/ Ingenieurbüro Janicke (Hrsg.): AUSTAL2000, Programmbeschreibung zu Version 2.6. Februar / 2014.
- /INS 18/ Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, TU Graz: GRAL - Graz Lagrangian Model. Erreichbar unter <https://lampx.tugraz.at/~gral/>, abgerufen am 7. März 2018.
- /JAN 00/ Janicke, L.: Vorschlag eines meteorologischen Grenzschichtmodells für Lagrangesche Ausbreitungsmodelle. Hrsg.: Ingenieurbüro Janicke, Berichte zur Umweltphysik, Nr. 2, Oktober 2000.

- /JAN 03/ Janicke, L., Janicke, U.: Entwicklung eines modellgestützten Beurteilungssystems für den anlagenbezogenen Immissionsschutz, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Anlagenbezogener Immissionsschutz, Förderkennzeichen (UFOPLAN) 200 43 256, Im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin. Ingenieurbüro Janicke, Februar / 2003.
- /JAN 04/ Janicke, U., Janicke, L.: Weiterentwicklung eines diagnostischen Windfeldmodells für den anlagenbezogenen Immissionsschutz (TA Luft), Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Anlagenbezogener Immissionsschutz, Förderkennzeichen (UFOPLAN) 203 43 256, Im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin. Hrsg.: Ingenieurbüro Janicke: Dunum, Deutschland, Oktober 2004.
- /JAN 17/ Janicke, U., Janicke, L., Bächlin, W., Flassak, T., Theurer, W., Trunkenmüller, A.: Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft. Hrsg.: Ingenieurbüro Janicke, Berichte zur Umweltphysik, Nr. 9, 218 S.: Überlingen, April 2017.
- /KUN 16/ Kuntner, M.: GUI V16.1 Updates, Graz Lagrangian Model. Präsentation, Amt der Tiroler Landesregierung, 2nd GRALWorkshop, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 15 - Energie, Wohnbau, Technik: Graz, Austria, 6. Juli 2016.
- /LET 12/ Letzel, M. O., Flassak, T., Angel, D.: Verbesserung der AUSTAL2000-Ergebnisse durch Strömungs- und Turbulenzübernahme aus MISCAM. Umweltmeteorologie, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, Nr. 72, S. 329–334, 2012.
- /LOP 05/ López, S. D., Lüpkes, C., Schlünzen, H.: The effects of different k-e-closures on the results of a micro-scale model for the flow in the obstacle layer. Meteorologische Zeitschrift, Nr. 14, S. 839–848, 2005.
- /MAß 17/ Maßmeyer, K., Martens, R.: Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle, Novellierung der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8. Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, Nr. 77 Nr. 7/8, S. 294–297, 2017.

/MCG 16a/ McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K.: Fire Dynamics Simulator, User's Guide. National Institute of Standards and Technology (NIST), NIST Special Publication, Nr. 1019, 316 S., DOI 10.6028/NIST.SP.1019, National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, August 2016.

/MCG 16b/ McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K.: Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model. National Institute of Standards and Technology (NIST), NIST Special Publication, 1018-1, 175 S., National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, August 2016.

/MCG 16c/ McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K.: Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide Volume 2: Verification. National Institute of Standards and Technology (NIST), NIST Special Publication, 1018-2, 222 S., National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, August 2016.

/MCG 16d/ McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K.: Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide Volume 3: Validation. National Institute of Standards and Technology (NIST), NIST Special Publication, 1018-3, 714 S., National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, August 2016.

/MCG 16e/ McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K.: Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide Volume 4: Configuration Management. National Institute of Standards and Technology (NIST), NIST Special Publication, 1018-4, 34 S., National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, August 2016.

/NCAR 16/ National Center for Atmospheric Research (NCAR): The Weather Research & Forecasting Model. Erreichbar unter <http://www.wrf-model.org/index.php>, Stand von 2016.

/OLE 09/ Olesen, H. R., Berkowicz, R., Ketzler, M., Løfstrøm, P.: Validation of OML, AERMOD/PRIME and MISKAM Using the Thompson Wind-Tunnel Dataset

for Simple Stack-Building Configurations. *Boundary-Layer Meteorology*, Bd. 131, Nr. 1, S. 73–83, DOI 10.1007/s10546-009-9355-9, 2009.

- /OPE 16/ OpenMP Architecture Review Board: The OpenMP API Specification for parallel programming, <http://openmp.org>. Erreichbar unter , Stand von 2016.
- /OPE 19/ OpenCFD Ltd (ESI Group): OpenFOAM, The open source CFD toolbox. Erreichbar unter <https://openfoam.com/>, abgerufen 30.09.2019.
- /ÖTT 17a/ Öttl, D.: Documentation of the prognostic mesoscale model GRAMM (Graz Mesoscale Model) Vs. 17.1. Hrsg.: Amt der steiermärkischen Landesregierung, Energie, Wohnbau, Technik, Lu-02-2017, 122 S.: Graz, Austria, Januar 2017.
- /ÖTT 17b/ Öttl, D., Podesse, A., Kurz, C.: Windfeldbibliothek Steiermark, Bezugsjahr 2015. Hrsg.: Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 15 - Energie, Wohnbau, Technik, Lu-08-2017, 89 S.: Graz, Austria, Oktober 2017.
- /ÖTT 18a/ Öttl, D.: Documentation of the Lagrangian Particle Model GRAL (Graz Lagrangian Model) Vs. 18.1. Hrsg.: Amt der steiermärkischen Landesregierung, Energie, Wohnbau, Technik, Lu-01-2018, 195 S.: Graz, Austria, Januar 2018.
- /ÖTT 18b/ Öttl, D., Kuntner, M.: GRAL Manual, GRAL Graphical User Interface 18.01. Hrsg.: Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 15 - Energie, Wohnbau, Technik, 147 S.: Graz, Austria, Januar 2018.
- /RAK 10/ Rakai, A., Kristóf, G.: CFD Simulation of Flow over a Mock Urban Setting. In: Chalmers University of Technology: 5th OpenFOAM Workshop, Chalmers, Gothenburg, Sweden, June 21-24. 2010.
- /RIC 15/ Richter, C., Sogalla, M., Thielen, H., Martens, R.: ARTM Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell mit Radon Postprozessor und SBG-Modul, Modellbeschreibung zu Version 2.8.0, Stand 2015-09-15. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 15. September 2015.

- /RIC 16/ Richter, C.: State of the art atmospheric dispersion modelling: should the Gaussian plume model still be used? *Kerntechnik*, Bd. 81, Nr. 5, S. 559–564, November 2016.
- /ROC 20/ Roccato, F.: Initiative on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. Stand vom October 2020, erreichbar unter <http://www.harmo.org/>, abgerufen am 22. Oktober 2020.
- /SCH 09/ Schatzmann, M., Britter, R., Leitl, B., Blaauboer, D., Baumann-Stanzer, K., Piringer, M., van Beeck, J., Dimitrova, R., Batchvarova, E., Papadakis, M., Papachristodoulou, C., Janour, Z., Baklanov, A., Ketzel, M., et al.: COST Action 732, Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models, Final Evaluation Report. European Cooperation in Science and Technology (COST), 20 S., 2009.
- /SIE 12/ Sievers, U.: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO 3. Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung, Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. Deutscher Wetterdienst (DWD), Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Bd. 240, 142 S., ISBN 9783-88148-465-7, Selbstverl. des Dt. Wetterdienstes: Offenbach am Main, 2012.
- /SIE 16/ Sievers, U.: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO 3., Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Bd. 248, 155 S., ISBN 978-3-88148-490-9, Selbstverl. des Dt. Wetterdienstes: Offenbach am Main, Offenbach am Main, 2016.
- /SOK 09/ Sokhi, R., Baklanov, A., Ulevicius, V., Pechinger, U., Schayes, G., De Ridder, K., Ganev, K., Batchvarova, E., Tymvios, F., Theophilou, K., Gryning, S.-E., Mannik, A., Kaasik, M., Kesanurm, K., et al.: COST Action 728, Enhancing Meso-Scale Meteorological Modelling Capabilities for Air Pollution and Dispersion Applications, Final Evaluation Report. European Cooperation in Science and Technology (COST), 38 S., 2009.
- /SSK 04/ Strahlenschutzkommission (SSK) (Hrsg.): Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV, Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenex-

position, Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 44: München, 2004.

- /TAL 86/ Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) (TA Luft) in der Fassung von 1986, zuletzt geändert 27. Februar 1986.
- /TAL 02/ Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) (TA Luft) in der Fassung von 2002, zuletzt geändert 24. Juli 2002 (Gemeinsames Ministerialblatt vom 30. Juli 2002 2002, Nr. 25, S. 511–605).
- /THI 16/ Thielen, H., Richter, C.: Erweiterung des Strömungsmodells in ARTM (Atmosphärisches-Radionuklid-Transport-Modell) zur Bearbeitung komplexer Standortbedingungen, Fachlicher Abschlussbericht zum Vorhaben 3615S52507. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Juli 2016.
- /UBA 20/ Umweltbundesamt (UBA): Ausbreitungsmodelle für anlagenbezogene Immissionsprognosen, AUSTAL2000. Erreichbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/regelungen-strategien/ausbreitungsmodelle-fuer-anlagenbezogene>, abgerufen am 22. Oktober 2020.
- /UNI 05/ Universität Hamburg: Cost Model Inventory, COST action 728 on "Enhancing Meso-scale Meteorological Modelling Capabilities for Air Pollution and Dispersion Applications". Erreichbar unter <https://www.mi.uni-hamburg.de/costmodin>, abgerufen am 30. September 2019.
- /VDI 00/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Umweltmeteorologie, Atmosphärische Ausbreitungsmodelle. Partikelmodell. VDI-Richtlinien VDI 3945, Blatt 3:2000-12: Düsseldorf, 2000.
- /VDI 02/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Umweltmeteorologie. Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle. VDI-Richtlinien VDI 3783, Blatt 8:2002-12: Düsseldorf, 2002.

- /VDI 05/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL (KRdL): Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung. VDI-Richtlinien VDI 3783, Blatt 9:2005-11: Düsseldorf, 2005.
- /VDI 10/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Umweltmeteorologie. Diagnostische mikroskalige Windfeldmodelle. VDI-Richtlinien VDI 3783, Blatt 10:2010-03: Düsseldorf, 2010.
- /VDI 15a/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Umweltmeteorologie - Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder. VDI-Richtlinien VDI 3783, Blatt 7 Gründruck:2015-12: Düsseldorf, 2015.
- /VDI 15b/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL (KRdL): Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung. VDI-Richtlinien VDI 3783, Blatt 9 Gründruck:2015-12: Düsseldorf, 2015.
- /VDI 17a/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Umweltmeteorologie. Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle. VDI-Richtlinien VDI 3783, Blatt 8:2017-04: Düsseldorf, 2017.
- /VDI 17b/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL (KRdL): Umweltmeteorologie - Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung. VDI-Richtlinien VDI 3783, Blatt 9:2017-05: Düsseldorf, 2017.
- /VDI 17c/ Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL (KRdL): Umweltmeteorologie - Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder. VDI-Richtlinien VDI 3783, Blatt 7:2017-05: Düsseldorf, 2017.



## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AED	Aerodynamischer Äquivalentdurchmesser
AKTerm	Ausbreitungsklassenzeitreihe (Format des Deutschen Wetterdienstes)
AKS	Ausbreitungsklassenstatistik (Format des Deutschen Wetterdienstes)
AP	Arbeitspaket
ARTM	Atmosphärisches Radionuklid Transport Modell
AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLC	Corine Land Cover
CNR	National Research Council of Italy
COMTESSA	Camera Observation and Modelling of 4D Tracer Dispersion in the Atmosphere
CORINE	Coordination of Information on the Environment
COST	European Cooperation in Science and Technology
CPU	Central Processing Unit
DWD	Deutscher Wetterdienst
EU BSS	Basic Safety Standard Directive der Europäischen Union
EURAD	EUROpean Air Pollution Dispersion
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft
FAIMODE	Forum for AIR quality MODelling in Europe
FDS	Fire dynamic simulator
FKZ	Forschungskennzeichen
FOOT3DK	Flow Over Orographically structured Terrain 3- Dimensional (Köln)
GIRL	Geruchsimmissions-Richtlinie
GO-ARTM	Graphische Oberfläche für ARTM
GPZD	Grenzschichtprofil-Zeitreihe-Datei
GPU	Graphic Processing Unit
GRAL	Graz Lagrangian Model
GRAMM	Graz Mesoscale Model
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
HARMO	Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes
HYSPLIT	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model

JOULES	Joint Outdoor-Indoor Urban LES-System
LASAT	Lagrange Simulation von Aerosol-Transport
LBM-DE	Landbedeckungsmodell Deutschland
LES	Large Eddy Simulation
MISKAM	Mikroskaliges Klima- und Ausbreitungsmodell
MS-Excel©	Microsoft Tabellenkalkulationsprogramm Excel
MUKLIMO	Mikroskaliges Urbanes Klima Modell
NAME	Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment
NCAR	National Center for Atmospheric Research (USA)
NIST	National Institute of Standards and Technology (USA)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OpenFOAM	Open Source Field Operation and Manipulation (CFD)
OpenMP	Open Multi-Processing (Programmierschnittstelle für Shared-Memory-Programmierung)
PCS	Passive Steuerungssysteme
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations
Tab.	Tabelle
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TALdia	diagnostisches Strömungsmodell der TA-Luft
UV	Ultraviolettes Licht
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VTT	Technisches Forschungszentrum Finnland
WRF	Weather Prediction & Forecasting Model des NCAR

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Schematische Darstellung der Festlegungen der TA Luft zur Verwendung eines diagnostischen Windfeldmodells in Abhängigkeit von Quell- und Gebäudehöhe und Abstand zwischen Quelle und Gebäuden .....	29
Abb. 3.2	Geländefolgendes Gitter in GRAMM (Fig. 5 aus /ÖTT 17a/) .....	37
Abb. 3.3	Kopplungsschema zwischen GRAMM und GRAL (Fig. 1 aus /ÖTT 17a/).....	37
Abb. 3.4	Visualisierung einer Geländeoberfläche, wie sie in GRAL abgebildet wird (Abbildung aus /KUN 16/, Folie 20) .....	39
Abb. 3.5	Beispiel für die Datei KONFIG.INP .....	44
Abb. 3.6	Beispiel für die Datei STROEM1.INI .....	46
Abb. 3.7	Strömungsfeld von TALdia in 7 m Höhe ü. G. (Ausbreitungssituation 5) .....	53
Abb. 3.8	Bodennahes Konzentrationsfeld für Cs-137 auf Basis der Strömungsberechnungen mit TALdia für alle 5 Ausbreitungssituation .....	53
Abb. 3.9	Strömungsfeld von MISKAM in 7 m Höhe ü. G. (Ausbreitungssituation 5) .....	54
Abb. 3.10	Bodennahes Konzentrationsfeld für Cs-137 auf Basis der Strömungsberechnungen mit MISKAM für alle 5 Ausbreitungssituationen .....	55
Abb. 4.1	Vergleich der Mittelwerte für die Konzentration des Aerosol Cs137 in vier Meter Höhe unterhalb der Quellhöhe von 20 m: Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für die alte VDI-Richtlinie /VDI 02/ und in der Mitte für die aktualisierte /VDI 17a/. Auf der rechten Seite befindet sich die Farblegende. ....	61
Abb. 4.2	Standardabweichungen $\sigma_u$ (links), $\sigma_v$ (Mitte) und $\sigma_w$ (rechts) der Windgeschwindigkeit für beide VDI-Richtlinien für zwei Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier: Die entsprechenden Klassen sind in Klammern hinter den jeweiligen Richtlinien in der Legende angegeben. ....	61

Abb. 4.3	Windgeschwindigkeit und Windrichtung für beide VDI-Richtlinien für zwei Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier: Die entsprechenden Klassen sind in Klammern hinter den jeweiligen Richtlinien in der Legende angegeben. ....	62
Abb. 4.4	Vergleich der Mittelwerte für die Konzentration des Aerosol Cs137 in der bodennahen Schicht: Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für die alte VDI-Richtlinie /VDI 02/ und in der Mitte für die aktualisierte /VDI 17a/. Auf der rechten Seite befindet sich die Farblegende. ....	63
Abb. 4.5	Erzeugte Windfeldbibliothek mit TALdia für beide VDI-Richtlinien: Die beiden Windfelder gelten für die Ausbreitungsklasse I in einer Höhe von 250 m. Die blauen Pfeile entsprechen dabei der alten VDI-Richtlinie, während die roten der aktualisierten. Die Länge der Pfeile bzw. die Dicke der Pfeilspitze gibt die Windgeschwindigkeit wieder. Je länger oder größer dieser ist, desto höher ist die Geschwindigkeit. ....	64
Abb. 4.6	Erzeugte Windfeldbibliothek mit TALdia für beide VDI-Richtlinien: Die beiden Windfelder gelten für die Ausbreitungsklasse I in einer Höhe von 1,5 m. Die blauen Pfeile entsprechen dabei der alten VDI-Richtlinie, während die roten der aktualisierten. Die Länge der Pfeile bzw. die Dicke der Pfeilspitze gibt die Windgeschwindigkeit wieder. Je länger oder größer dieser ist, desto höher ist die Geschwindigkeit. ....	65
Abb. 4.7	Beispiel für die Umrechnung der Vektordaten des CLC2012 (links) zu Rasterdaten in 100 m Auflösung (rechts).....	66
Abb. 4.8	Ausschnitt aus dem alten Corinekataster CLC2006.....	67
Abb. 4.9	Beispiel für geringe Änderungen in der Rauigkeitslänge beim Übergang vom CLC2006 (oben) zum CLC2012 (unten): Standort KWB .....	69
Abb. 4.10	Beispiel für größere Änderungen in der Rauigkeitslänge beim Übergang vom CLC2006 (oben) zum CLC2012 (unten): Standort KWO.....	70
Abb. 4.11	Mittelwerte der Konzentrationswerte für Cs137 für unterschiedliche Bedingungen: Zunächst wurde die Windrichtung in der GPZD um 90° gedreht. Das Ergebnis befindet sich in der Mitte. Des Weiteren wurden die Werte für die Standardabweichung der Windgeschwindigkeitskomponenten in der rechten Abbildung verdoppelt. ....	74

Abb. 5.1	Programm zum Export und Import von ARTM-Meteorologiedateien .....	79
Abb. 6.1	Programm <code>PR-Check.exe</code> zur Vorabprüfung der Eingabedateien <code>ARTM.txt</code> , <code>artm.settings</code> <code>AKTerm</code> , <code>AKS</code> , <code>zeitreihe.dmna</code> und <code>gpzd.dmna</code> .....	86
Abb. 6.2	Beispiel für eine <code>zeitreihe.dmna</code> mit zeitabhängiger Quelle.....	96
Abb. 6.3	Beispiel für die Angabe von Beobachtungspunkten in <code>ARTM.txt</code> .....	96
Abb. 6.4	Programm zur nachträglichen Erstellung von Zeitreihen an den Beobachtungspunkten aus ARTM-Ergebnisfeldern .....	98
Abb. 6.5	Programm <code>VARTM.EXE</code> zur Erzeugung und automatischen Berechnung von Ensemblesimulationen.....	101
Abb. 6.6	Formular zur Steuerung verteilter Rechnungen (Einstiegsbild).....	106
Abb. 6.7	Formular zur Steuerung verteilter Rechnungen (Berechnung der Läufe) .....	108
Abb. 6.8	ARTM Rechenergebnisse eines Rechenlaufs über 15 Tage für bodennahe Konzentrationen (Links: Einzellauf, Rechts: verteilte Läufe) .....	109
Abb. 6.9	Auslastung der CPU während der Durchführung von ARTM-Läufen (Links: Einzellauf, Rechts: verteilte Läufe) .....	109
Abb. 7.1	Zeitplan und Themen der ARTM-Schulung.....	118
Abb. 7.2	Programm des ARTM-Workshops .....	119
Abb. A.8.1	Beispiel für eine GPZD (erste 2 Stunden).....	142



## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Im Referentenentwurf zu TA-Luft verwendete VDI-Richtlinien und deren Relevanz für ARTM Ausbreitungsrechnungen.....	9
Tab. 2.2	Bisher in ARTM verwendete Washoutkoeffizienten für die verschiedenen Größenklassen von Stäuben .....	11
Tab. 2.3	Washoutkoeffizienten nach AVV Tätigkeiten /AVV 20/ .....	11
Tab. 2.4	Zuordnungen von Landnutzungsklassen zu Rauigkeitslängen nach /BMU 18/ .....	12
Tab. 2.5	Bisher in ARTM für die Bestimmung der Rauigkeitslänge verwendete Zuordnung zu Landbenutzungsklassen .....	13
Tab. 2.6	Bisher von ARTM verwendete Obukhov-Längen in Abhängigkeit von Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier und der Rauigkeitslänge $z_0$ .....	15
Tab. 2.7	In der AVV Tätigkeiten /AVV 20/ enthaltene Werte für die Obukhov-Längen in Abhängigkeit von Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier und der Rauigkeitslänge $z_0$ , gegebenenfalls abweichende Werte nach /VDI 17b/ sind kursiv als zweite Zahl angegeben.....	16
Tab. 3.1	Meteorologische Situationen für die Testrechnungen .....	52
Tab. 4.1	Mittlere Rauigkeitslänge $z_0$ in Abhängigkeit der Landnutzungsklassen des LBM-DE-Katasters (Zahlen in Klammern) nach /BMU 18/ .....	67
Tab. 4.2	Bisher in ARTM verwendete Washoutkoeffizienten für die verschiedenen Größenklassen Stäuben .....	71
Tab. 4.3	Washoutkoeffizienten der AVV Tätigkeiten /AVV 20/.....	71
Tab. 6.1	Mögliche Fehlermeldungen des Programmes PR-Check.exe bei der Untersuchung der Datei ARTM.txt. <id> steht dabei für einen in artm.txt verwendeten Parameter.....	87



## A Das GPZD Format

Das Format der GPZD orientiert sich stark an dem dmna-Format /GRS 15b/. Der Header ist von den entscheidenden Grenzschichtparametern (Zeitintervall  $t_e$ , Windgeschwindigkeit  $u$ , Windrichtung  $d$ , Niederschlagsintensität  $r_i$ , Standardabweichungen der Windgeschwindigkeit  $s_u$ ,  $s_v$ ,  $s_w$  und den Lagrange-Korrelationszeiten  $t_u$ ,  $t_v$ ,  $t_w$ ) durch ein \* getrennt. Die Benennung der Spalten und die Art ihrer Darstellung ist durch den Parameter `form` festgelegt. Durch die Option `locl „C“` wird ein Dezimal-Punkt verwendet, bei `locl „german“` wird ein Dezimal-Komma verwendet. Die GPZD hängt von den betrachteten Höhen  $h_h$  und den Zeitschritten ab und ist somit zweidimensional (`dims 2`). `Highb` gibt die Anzahl der betrachteten Zeitschritte und Höhen an. Im folgenden Fall handelt es sich um eine 24-stündige Zeitreihenmessung mit einem Zeitintervall von einer Stunde mit 19 Höhenintervallen. Die Höhenintervalle müssen einheitlich für alle Zeitschritte unter dem Punkt  $h_h$  definiert werden. Die Einlese der Grenzschichtparameter beginnt unterhalb des \* mit dem ersten Zeitintervall und der ersten Höhe. Jede kommende Zeile entspricht der nächsten Höhenbetrachtung für dasselbe Zeitintervall. Eine leere Zeile signalisiert dem Programm, dass das nächste Zeitintervall beginnt. Ein Beispiel für die ersten 2 Stunden einer GPZD ist in Abb. A.8.1 gezeigt.

```

form "te%20lt" "u%8.4f" "d%8.4f" "ri%8.4f" "su%9.4e" "sv%9.4e" "sw%9.4e" "tu%9.4e" "tv%9.4e" "tw%9.4e"
locl "c"
dims 2
lowb 1 1
highb 24 19
hh 0.00 3.00 6.00 10.00 16.00 25.00 40.00 65.00 100.00 150.00 200.00 300.00 400.00 500.00 600.00 700.00
800.00 1000.00 1200.00 1500.00
*
2000-01-07.00:00:00 0.0000 269.9534 2.0000 9.4247e-01 7.8539e-01 4.4174e-01 1.5112e+00 1.5112e+00 2.5276e+00
2000-01-07.00:00:00 0.7003 269.9534 2.0000 9.4247e-01 7.8539e-01 4.4174e-01 1.6983e+01 2.0380e+01 2.5276e+00
2000-01-07.00:00:00 1.4007 269.9534 2.0000 9.4247e-01 7.8539e-01 4.4174e-01 3.3967e+01 4.0760e+01 2.5276e+00
2000-01-07.00:00:00 2.0000 270.0000 2.0000 9.4193e-01 7.8494e-01 4.5606e-01 4.8528e+01 5.8234e+01 6.6784e+00
2000-01-07.00:00:00 2.3960 270.0699 2.0000 9.4113e-01 7.8427e-01 4.7541e-01 5.8187e+01 6.9825e+01 1.3754e+01
2000-01-07.00:00:00 2.7005 270.1748 2.0000 9.3992e-01 7.8327e-01 5.0063e-01 6.5665e+01 7.8798e+01 2.5185e+01
2000-01-07.00:00:00 2.9714 270.3496 2.0000 9.3794e-01 7.8161e-01 5.3516e-01 7.2406e+01 8.6887e+01 4.4794e+01
2000-01-07.00:00:00 3.2117 270.6411 2.0000 9.3468e-01 7.7890e-01 5.7853e-01 7.8534e+01 9.4241e+01 7.7058e+01
2000-01-07.00:00:00 3.3982 271.0490 2.0000 9.3022e-01 7.7518e-01 6.2024e-01 8.3493e+01 1.0019e+02 1.2033e+02
2000-01-07.00:00:00 3.5546 271.6317 2.0000 9.2407e-01 7.7006e-01 6.5587e-01 8.7918e+01 1.0550e+02 1.7869e+02
2000-01-07.00:00:00 3.6558 272.2145 2.0000 9.1816e-01 7.6513e-01 6.7307e-01 9.1001e+01 1.0920e+02 2.3392e+02
2000-01-07.00:00:00 3.7495 272.7227 2.0000 9.0704e-01 7.5587e-01 6.7172e-01 9.4478e+01 1.1337e+02 3.3755e+02
2000-01-07.00:00:00 3.8043 272.9102 2.0000 8.9682e-01 7.4735e-01 6.3805e-01 9.6950e+01 1.1634e+02 4.3428e+02
2000-01-07.00:00:00 3.8524 273.1490 2.0000 8.8744e-01 7.3953e-01 5.8162e-01 9.9215e+01 1.1906e+02 5.2513e+02
2000-01-07.00:00:00 3.8943 273.4235 2.0000 8.7883e-01 7.3236e-01 5.0787e-01 1.0128e+02 1.2153e+02 6.0957e+02
2000-01-07.00:00:00 3.9303 273.7213 2.0000 8.7095e-01 7.2579e-01 4.2062e-01 1.0314e+02 1.2376e+02 6.8437e+02
2000-01-07.00:00:00 3.9609 274.0323 2.0000 8.6375e-01 7.1979e-01 3.2373e-01 1.0481e+02 1.2577e+02 7.3825e+02
2000-01-07.00:00:00 4.0078 274.6627 2.0000 8.5118e-01 7.0932e-01 1.5260e-01 1.0761e+02 1.2914e+02 6.9831e+02
2000-01-07.00:00:00 4.0385 275.2669 2.0000 8.4076e-01 7.0063e-01 1.1932e-01 1.0978e+02 1.3174e+02 1.8000e+03
2000-01-07.00:00:00 4.0615 276.0643 2.0000 8.2844e-01 6.9037e-01 8.6530e-02 1.1205e+02 1.3446e+02 1.8000e+03

2000-01-07.01:00:00 0.0000 268.8197 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 1.9492e-01 3.1943e+00 3.1943e+00 3.1943e+00
2000-01-07.01:00:00 0.4669 268.8197 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 1.9492e-01 4.4884e+00 5.3861e+00 3.1943e+00
2000-01-07.01:00:00 0.9339 268.8197 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 1.9492e-01 8.9768e+00 1.0772e+01 3.1943e+00
2000-01-07.01:00:00 2.0000 271.0863 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 1.8407e-01 1.9225e+01 2.3070e+01 4.7043e+00
2000-01-07.01:00:00 3.4023 274.8513 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 1.6890e-01 3.2705e+01 3.9246e+01 5.9183e+00
2000-01-07.01:00:00 5.1136 280.2708 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 1.4846e-01 4.9155e+01 5.8986e+01 6.7496e+00
2000-01-07.01:00:00 7.1088 288.3177 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 1.1975e-01 6.8334e+01 8.2001e+01 7.3546e+00
2000-01-07.01:00:00 8.7541 298.8192 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 8.3692e-02 8.4150e+01 1.0098e+02 7.7663e+00
2000-01-07.01:00:00 9.1752 307.6740 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 5.0683e-02 8.8198e+01 1.0584e+02 8.0055e+00
2000-01-07.01:00:00 8.7756 311.4562 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 2.4757e-02 8.4356e+01 1.0123e+02 8.1570e+00
2000-01-07.01:00:00 8.5775 311.1295 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 1.2093e-02 8.2452e+01 9.8943e+01 8.2336e+00
2000-01-07.01:00:00 8.5890 310.6989 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 2.8852e-03 8.2563e+01 9.9076e+01 8.3110e+00
2000-01-07.01:00:00 8.5914 310.7310 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 6.8839e-04 8.2586e+01 9.9103e+01 8.3499e+00
2000-01-07.01:00:00 8.5910 310.7296 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 1.6425e-04 8.2582e+01 9.9099e+01 8.3733e+00
2000-01-07.01:00:00 8.5911 310.7296 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 3.9188e-05 8.2582e+01 9.9099e+01 8.3889e+00
2000-01-07.01:00:00 8.5911 310.7296 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 9.3500e-06 8.2582e+01 9.9099e+01 8.4001e+00
2000-01-07.01:00:00 8.5911 310.7296 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 2.2308e-06 8.2582e+01 9.9099e+01 8.4085e+00
2000-01-07.01:00:00 8.5911 310.7296 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 1.2699e-07 8.2582e+01 9.9099e+01 8.4202e+00
2000-01-07.01:00:00 8.5911 310.7296 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 7.2293e-09 8.2582e+01 9.9099e+01 8.4280e+00
2000-01-07.01:00:00 8.5911 310.7296 2.0000 3.7567e-01 3.1306e-01 9.8191e-11 8.2582e+01 9.9099e+01 8.4358e+00
...

```

Abb. A.8.1 Beispiel für eine GPZD (erste 2 Stunden)

## Verteiler 3616S72575

Weiterentwicklung des atmosphärischen Ausbreitungsmodells ARTM bezüglich weiterer Anwendungsbereiche, Windfeld- und Grenzschichtmodell, Dokumentation

### Druckexemplare:

#### **Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)**

Fachgebiet UR 3, Dr. Margit Pattantyús-Ábrahám 5 x

#### **Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH**

Bibliothek 1 x

Autoren (RIH, THI, SPK) 3 x

---

**Gesamt 9 x**

### PDF-Version:

#### **Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)**

Fachgebiet UR 3, mpattantyus@bfs.de 1 x

#### **Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)**

Z4, Z4@bfs.de 1 x

#### **Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH**

Geschäftsführer (STJ, SUW) 2 x

Bereichsleiter (THI, KSE) 2 x

Abteilungsleiter (THI) 1 x

Autoren (RIH, THI, SPK) 3 x

Projektcontrolling (VLA) 1 x

TECDO (NIT) 1x

---

**Gesamt 12 x**