



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

# ENTWICKLUNG, VALIDIERUNG UND BEREITSTELLUNG EINES ATMOSPHERISCHEN AUSBREITUNGSMODELLS FÜR LUFTGETRAGENE RADIOAKTIVE STOFFE DER BASIS DES AUSBREITUNGSMODELLS AUSTAL 2000 DER NEUEN TA LUFT

BMU - 2007 - 710



**BMU – 2007-710**

**„Entwicklung, Validierung und Bereitstellung eines  
atmosphärischen Ausbreitungsmodells für luftgetragene  
radioaktive Stoffe der Basis des Ausbreitungsmodells AUSTAL  
2000 der neuen TA Luft“**

**GRS mbH  
Köln**

## **IMPRESSUM**

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

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

### **Herausgeber:**

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS I 2

Postfach 12 06 29

53048 Bonn

ISSN 1612-6386

Erscheinungsjahr: 2007

## Kurzfassung

Im Rahmen einer fachlichen Überarbeitung und der Aktualisierung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV (AVV) und der Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV (SBG) gibt es Überlegungen, das derzeit eingesetzte Gauß-Fahnenmodell durch das im Rahmen der neuen Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) vom 24. Juli 2002 eingesetzte fortschrittliche Lagrangesche Partikelmodell zu ersetzen. Hierzu wurde das für die Ausbreitung konventioneller Luftbeimengungen konzipierte Programmpaket AUSTAL2000 für die Ausbreitung luftgetragener radioaktiver Stoffe angepasst und weiterentwickelt (ARTM, Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell): In ARTM wurden u. a. Algorithmen zur Berücksichtigung der Gammawolkenstrahlung (Gammastrahlung) sowie der nassen Deposition entwickelt und in den bestehenden Quellcode der aktuellen Version von AUSTAL2000 implementiert. Des Weiteren wurden Schnittstellen zu den bestehenden Berechnungsgrundlagen SBG und AVV realisiert, d. h. Dosisberechnungen wurden nicht einbezogen; vielmehr endet die Ausbreitungsrechnung mit der Schnittstelle zum Dosisanteil der Berechnungsgrundlagen. Dies ermöglicht auch die Dosisberechnung nach anderen Dosismodellen außerhalb der Berechnungsgrundlagen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgte die Festlegung von Modellannahmen, technischen Randbedingungen und Modellparametern, die Umsetzung in das Computerprogramm ARTM, die Verifizierung und Validierung sowie eine umfangreiche Testphase mit Beteiligung vieler Anwender aus verschiedenen Institutionen. Zur Unterstützung der Modellanwender während der Testphase stand die anwenderfreundliche grafische Benutzeroberfläche GO-ARTM zur Verfügung.

Das auf der TA Luft und dem Programmpaket AUSTAL2000 aufbauende Programmsystem ARTM zur Berechnung der Ausbreitung und der Deposition freigesetzter luftgetragener radioaktiver Stoffe repräsentiert den Stand von Wissenschaft und Technik. Eine einheitliche Vorgehensweise bei konventionellen (AUSTAL2000) und radiologischen (ARTM) Anwendungen bietet eine hohe Rechtssicherheit für den Anwender. Die Simulation der atmosphärischen Ausbreitung und Deposition mit einem fortschrittlichen Lagrangeschen Partikelmodell (in Kombination mit einem Strömungsmodell und einer Turbulenzparameterisierung) für genehmigungsrechtliche Anwendungen gewährleistet gegenüber dem bisher verwendeten klassischen Gauß-Fahnenmodell eine flexiblere und realitätsnähere Modellierung.

## **Abstract**

It has been considered within the framework of the technical revision und updating of the General Administrative Provision (AVV) relating to Section 47 of the Radiation Protection Ordinance (StrlSchV) and the Incident Calculation Bases (SGB) relating to Section 49 StrlSchV whether the currently employed Gaussian Plume Model should be replaced by the advanced Lagrange Particle Dispersion Model used in connection with the new Technical Instruction on Air Quality Control (TA Luft) of 24 July 2002. For this purpose, the AUSTAL2000 code package devised for modelling the dispersion of conventional air pollutants was adapted and further developed to consider the dispersion of airborne radioactive materials (ARTM, Atmospheric Radionuclide Transport Model): In ARTM, algorithms i. a. for the consideration of gamma cloudshine as well as of wet deposition were developed and implemented in the existing source code of the latest version of AUSTAL2000. Furthermore, interfaces with the existing calculation bases SBG and AVV were established, i.e. dose calculations were not included; the dispersion calculation ends rather more with the interface to the dose part of the calculation bases. This also allows the calculation of the dose according to other dose models not contained in the calculation bases.

The research project included the specification of model assumptions, technical boundary conditions and model parameters, the implementation in the ARTM computer code, verification and validation, and a comprehensive test phase with the involvement of many users from different institutions. The user-friendly graphic user interface GO-ARTM was available to the model users over the entire test phase.

The ARTM code system (which is based on the "TA Luft" and the AUSTAL2000 code package) for the calculation of the dispersion and deposition of released airborne radioactive materials represents the state of the art in science and technology. A standardised procedure for conventional (AUSTAL2000) and radiological (ARTM) applications will provide a high level of legal certainty for the user. Compared with the classic Gaussian Plume Model applied so far, the simulation of atmospheric dispersion and deposition with an advanced Lagrange Particle Dispersion Model (in combination with a flow model and turbulence parameterisation) for licensing-related applications ensures more flexible and realistic modelling.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Kurzbeschreibung des Modells AUSTAL2000</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Modifikationen und Erweiterungen am Programmpaket AUSTAL2000</b> .....	<b>5</b>
3.1	Erweiterungen der Schadstoffeigenschaften .....	6
3.2	Erweiterungen der Modellphysik .....	8
3.2.1	Radioaktiver Zerfall .....	9
3.2.2	Berechnung der nassen Deposition .....	9
3.2.3	Berechnung der Gammasubmersion .....	10
3.2.3.1	Rechenverfahren.....	10
3.2.3.2	Koeffizienten für die Berechnung der Gammasubmersion.....	15
3.2.3.3	Dosisaufbaufaktor für Gammasubmersion.....	15
3.2.3.4	Korrekturfaktor für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion.....	16
3.2.4	Berücksichtigung der Vegetationsperiode (Sommerhalbjahr) .....	17
3.2.5	Berücksichtigung komplexer Gebäudestrukturen.....	17
3.3	Einrichtung einer Schnittstelle zu den Dosisberechnungsmodulen der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV .....	18
<b>4</b>	<b>Implementierung der Verfahren</b> .....	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>Validierung und Verifikationsrechnungen</b> .....	<b>21</b>
5.1	Testbeispiele im Anwendungsbereich des Gauß-Fahnenmodells .....	21
5.1.1	Einzelsituationen mit Freisetzungen aus hohen Quellen .....	22
5.1.2	Radioaktiver Zerfall .....	30
5.1.3	Langzeitmittelwerte bei Freisetzungen aus hohen Quellen.....	32
5.1.4	Langzeitausbreitungsfaktoren für Gammasubmersion.....	36
5.2	Testbeispiele außerhalb des Anwendungsbereichs des Gauß-Fahnenmodells.....	38

5.2.1	Einfluss der Bodenrauigkeit .....	38
5.2.2	Bodennahe Freisetzungen .....	40
5.2.3	Einfluss von Gebäuden .....	42
5.2.4	Einfluss der Topografie .....	45
<b>6</b>	<b>Testphase und Dokumentation.....</b>	<b>49</b>
6.1	Testphase .....	49
6.2	Dokumentation .....	53
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>Danksagung.....</b>	<b>57</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>59</b>
<b>A 1.</b>	<b>ARTM (Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell)</b>	
	<b>Modellbeschreibung Stand 21.09.2007 .....</b>	<b>61</b>
<b>A 2.</b>	<b>ARTM (Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell)</b>	
	<b>Programmbeschreibung zu Version 2.5.8 Stand 21.09.2007.....</b>	<b>63</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 5-1	Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0= 1,5$ m, $u= 2$ m/s, $h= 150$ m, sehr labile Schichtung, DK = A, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM) ..... 24
Abb. 5-2	Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0= 1,5$ m, $u= 2$ m/s, $h=150$ m, labile Schichtung, DK = B, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)..... 25
Abb. 5-3	Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0= 1,5$ m, $u= 2$ m/s, $h= 150$ m, leicht labile Schichtung, DK = C, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM) ..... 26
Abb. 5-4	Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0= 1,5$ m, $u= 2$ m/s, $h= 150$ m, neutrale Schichtung, DK = D, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM) ..... 27
Abb. 5-5	Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0= 1,5$ m, $u= 2$ m/s, $h= 150$ m, stabile Schichtung, DK = E, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)..... 28
Abb. 5-6	Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0= 1,5$ m, $u= 2$ m/s, $h= 150$ m, sehr stabile Schichtung, DK = F, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM) .... 29
Abb. 5-7	Testrechnung Radioaktiver Zerfall ..... 31
Abb. 5-8	Vergleichsrechnung Langzeitausbreitungsfaktor ( $z_0=1,5$ m, $u=2$ m/s, $h=150$ m, ARTM2000.AKTERM, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)..... 33
Abb. 5-9	Vergleichsrechnung Langzeit-Falloutfaktor ( $z_0=1,5$ m, $u=2$ m/s, $h=150$ m, ARTM2000.AKTERM, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)..... 34
Abb. 5-10	Vergleichsrechnung Langzeit-Washoutfaktor ( $z_0=1,5$ m, $u=2$ m/s, $h=150$ m, ARTM2000.AKTERM, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)..... 35
Abb. 5-11	Vergleichsrechnung des Langzeitausbreitungsfaktors für Gamma-submersion ( $z_0=1,5$ m, $u= 2$ m/s, $h= 150$ m, ARTM2000.AKTERM) ..... 36
Abb. 5-12	Flächenhafte Verteilung des Langzeitausbreitungsfaktors für Gamma-submersion (ARTM, $z_0=1,5$ m, $u=2$ m/s, $h=150$ m, ARTM2000.AKTERM) ..... 37
Abb. 5-13	Langzeitausbreitungsfaktoren bei verschiedenen Bodenrauigkeiten (Oben: $z_0=0,5$ m, Unten $z_0=0,02$ m) ..... 39
Abb. 5-14	Langzeitausbreitungsfaktoren bei geringen Freisetzungshöhen (Oben: $h= 10$ m, Unten: bodennahe Flächenquelle) ..... 41
Abb. 5-15	Langzeitausbreitungsfaktoren ohne Gebäudeeinfluss ( $h = 12$ m)..... 42
Abb. 5-16	Langzeitausbreitungsfaktoren bei Gebäudeeinfluss ( $h = 12$ m, Gebäude $20$ m x $60$ m x $10$ m)..... 43



Abb. 5-17	Langzeitausbreitungsfaktoren bei Gebäudeeinfluss (h = 130 m, ohne Kühltürme) .....	44
Abb. 5-18	Langzeitausbreitungsfaktoren bei Gebäudeeinfluss (h = 130 m, Kühltürme 60 m × 100 m) .....	45
Abb. 5-19	Langzeitausbreitungsfaktor ohne Geländeeinfluss und mit Geländeeinfluss .....	46
Abb. 5-20	Langzeitausbreitungsfaktor mit Geländeeinfluss und Schummerung .....	47

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1	Liste der in ARTM berücksichtigten Radionuklide und der verwendeten Parameter .....	6
Tab. 3-2	Depositionsgeschwindigkeit, Sedimentationsgeschwindigkeit und Washout - Koeffizient für die verschiedenen Partikelgrößenklassen .....	10
Tab. 3-3	Koeffizienten $b_{1\text{MeV};m}$ zur Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 1 MeV.....	16
Tab. 3-4	Koeffizienten $b_{0,1\text{MeV};m}$ zur Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 0,1 MeV .....	16
Tab. 3-5	Koeffizienten $a_{k,m}$ zur Berechnung des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 0,1 MeV.....	17
Tab. 3-6	Koeffizienten $a_{k,m}$ zur Berechnung des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 1,0 MeV.....	17
Tab. 6-1	Rückmeldungen aus der ARTM-Testphase .....	51

## Abkürzungsverzeichnis

ARTM	Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell
AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
DK	Diffusionskategorie
GO-ARTM	grafische Benutzeroberfläche für ARTM
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
IBJ	Ingenieurbüro Janicke, Gesellschaft für Umweltphysik, Dunum
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
LASAT	Lagrange-Simulation von Aerosol-Transport
SBG	Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV, Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TALdia	diagnostisches mesoskaliges Windfeldmodell
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

## 1 Einleitung

Bisher wurden die im Rahmen von Genehmigungsverfahren zur Ermittlung der Strahlenexposition erforderlichen Ausbreitungsrechnungen zur Berechnung der bodennahen Konzentration sowie der trockenen und nassen Deposition zumeist mit dem Gauß-Fahnenmodell durchgeführt. Die entsprechenden Rechenverfahren, Parameter und Randbedingungen sind im Falle luftgetragener betrieblicher radioaktiver Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen und anderen Einrichtungen in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV (AVV), Kapitel 4 „Berechnung der Strahlenexposition“ /AVV 05/ festgelegt. Das dort zur Ermittlung der Strahlenexposition für Genehmigungszwecke integrierte Gauß'sche Ausbreitungsmodell entspricht nicht mehr dem Stand von Wissenschaft und Technik und berücksichtigt nicht alle Aspekte von möglichen Ableitungsszenarien bei kerntechnischen Einrichtungen (z. B. bodennahe oder instationäre Ableitungen). Weiter können topographische Standortbedingungen, wie orographisch strukturiertes Gelände und komplexe Gebäudestrukturen nicht realitätsnah berücksichtigt werden. Das Gauß-Fahnenmodell kann die Deposition von Luftschadstoffen nur approximativ und die Sedimentation von Aerosolpartikeln gar nicht explizit behandeln.

Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) schreibt bereits den Einsatz eines fortschrittlichen Lagrangeschen Partikelmodells (AUSTAL2000), das im Vergleich zum klassischen Gauß-Fahnenmodell weitaus höheren Anforderungen an die Ausbreitungsmodellierung genügt. Im aktuellen Vorhaben StSch 4443 wurde deshalb auf der Basis des Modells AUSTAL2000 das Modellsystem ARTM (**A**tmosphärisches **R**adionuklid-**T**ransport-**M**odell) zur Berechnung der Ausbreitung luftgetragener radioaktiver Stoffe entwickelt. Hierfür mussten zusätzlich Algorithmen zur Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls, der Gammawolkenstrahlung (Gammawolkenstrahlung) sowie der nassen Deposition abgeleitet und in den bestehenden Quellcode der aktuellen Version von AUSTAL2000 implementiert werden. Des Weiteren wurden Schnittstellen zu den bestehenden Berechnungsgrundlagen realisiert.

Neben der Anwendung in Genehmigungsverfahren wird das neue Ausbreitungsmodell auch für retrospektive Berechnungen im Rahmen der Überprüfung der Einhaltung von Dosisgrenzwerten, der routinemäßigen Berichterstattung über kerntechnische Anlagen und für eine realistischere Berechnung der Strahlenexposition geeignet sein.



## 2 Kurzbeschreibung des Modells AUSTAL2000

Die in der TA Luft /TAL 02a/ und dem Programmpaket AUSTAL2000 /TAL 02b/ zur Durchführung des Rechenverfahrens nach Anhang 3 „Ausbreitungsrechnung“ der TA Luft beschriebene Vorgehensweise stellt den Stand von Wissenschaft und Technik dar. Sie ist ausführlich dokumentiert, transparent, nachvollziehbar, verifiziert und weitgehend validiert. Eine einheitliche Vorgehensweise bei konventionellen und radiologischen Anwendungen bietet eine hohe Rechtssicherheit für den Anwender.

Das Programmpaket AUSTAL2000 zur Durchführung des Rechenverfahrens nach Anhang 3 der TA Luft weist u. a. folgende wesentliche Merkmale auf:

- Berechnung der atmosphärischen Ausbreitung und der trockenen Deposition mit Lagrangeschem Partikelmodell nach Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 /VDI 00/ unter Berücksichtigung von Mehrfachquellen, unterschiedlichen Quellgeometrien, instationären Emissionscharakteristiken.
- Modellierung der atmosphärischen Turbulenz entsprechend Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 /VDI 02/, wobei die den Turbulenzzustand in der Atmosphäre beschreibenden meteorologischen Eingabedaten auf der Grundlage eines Präprozessors aus standardisierten meteorologischen Messdaten abgeleitet werden. Dies können entweder Zeitreihen oder mittlere jährliche Häufigkeitsverteilungen der meteorologischen Parameter sein (dreidimensionale Ausbreitungsstatistiken).
- Berechnung des Transportes der freigesetzten luftgetragenen Schadstoffe mit dem mittleren Wind unter Berücksichtigung strukturierten Geländes (Geländehöhe und Bodennutzung) auf der Basis eines diagnostischen Strömungsmodells.
- Bei Verwendung dreidimensionaler Häufigkeitsverteilungen oder Zeitreihen meteorologischer Daten können flächendeckend Jahresmittelwerte ermittelt werden. Die Verwendung von meteorologischen Zeitreihen erlaubt zusätzlich die flächendeckende Bestimmung von Maximalwerten auf Stunden- oder Tagesbasis.

Die Strahlenexposition in Folge Gammawolkenstrahlung der in die Atmosphäre freigesetzten Radionuklide wird in AUSTAL2000 nicht als möglicher Expositionspfad betrachtet, weil  $\gamma$ -Strahlen emittierende Luftschadstoffe nicht Gegenstand der TA Luft sind. Die VDI-Richtlinie 3945, Blatt 3 /VDI 00/ enthält den Vorschlag für einen Algorithmus zur Berechnung der Gammawolkenstrahlung in Anlehnung an die Formulierungen in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrISchV: Ermittlung der Strahlenex-

position durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen (AVV) /AVV 05/ sowie in den Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV, Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition (SBG) /SBG 94/ und /SSK 04/. Entsprechende Implementierungen wurden bisher in dem vom Ingenieurbüro Janicke (IBJ), Gesellschaft für Umweltphysik, entwickelten und vertriebenen Lagrangeschen Partikelmodell LASAT sowie in der GRS-Version LASAT-GRS vorgenommen.

### **3 Modifikationen und Erweiterungen am Programmpaket AUSTAL2000**

Die bereits im bestehenden und für die Ausbreitung konventioneller Luftbeimengungen konzipierten Programmpaket AUSTAL2000 implementierten Programmteile wurden auf alle gängigen Radionuklide, die bei betrieblichen und störfallbedingten Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen in die Atmosphäre auftreten können, erweitert. Darüber hinaus wurden spezielle chemisch-physikalische Formen dieser Radionuklide berücksichtigt, sofern diese Eigenschaften auf Ausbreitung oder Deposition Einfluss haben. Eine Liste gängiger Radionuklide findet sich in KTA 1503.1 /KTA 02/. Ergänzt wurde diese Liste durch die chemisch-physikalischen Formen von Tritium, sofern sie unterschiedliches Depositionsverhalten zeigen. Weiter besteht die Möglichkeit, vom Anwender weitere Radionuklide nachträglich aufzunehmen, z. B. über externe Parameterdateien.

Basis für die Änderungen an AUSTAL2000 war die Version 2.2.11. Aus dieser Version wurde das Modellsystem ARTM (**A**tmosphärisches **R**adionuklid-**T**ransport-**M**odell) durch die folgenden Modifikationen und Erweiterungen erzeugt:

- Erweiterungen der Schadstoffeigenschaften
  - radioaktiver Zerfall während der Ausbreitung
  - Berücksichtigung der chemisch-physikalischen Form der Radionuklide
  - Berücksichtigung des unterschiedlichen Depositionsverhaltens von nicht als Schwebstoff auftretenden Radionukliden
- Erweiterungen der Modellphysik
  - Berechnung der nassen Deposition
  - Berechnung der Gammasubmersion
  - Berücksichtigung der Vegetationsperiode (Sommerhalbjahr, 01. Mai bis 31. Oktober)
  - Berücksichtigung komplexer Gebäudestrukturen
- Einrichtung einer Schnittstelle zu den Dosisberechnungsmodulen der AVV



### 3.1 Erweiterungen der Schadstoffeigenschaften

Die für die Anwendung des Modell AUSTAL2000 fest vorgegebenen Luftschadstoffe Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid, Stickstoffoxid, Benzol, Tetrachlorethen, Fluorwasserstoff, Ammoniak, Quecksilber gasförmig, inerte Gase und Gerüche sowie Stäube in fünf Größenklassen von Arsen, Blei, Cadmium, Nickel, Quecksilber, und Tellur wurden deaktiviert und die in der Tab. 3-1 angegebenen Radionuklide in Anlehnung an die Vorgaben der KTA 1503.1 /KTA 02/ in eine offene Stoffliste übernommen. Diese Stoffliste liegt als ASCII-Datei vor und kann im Bedarfsfall um Radionuklide erweitert werden; es ist auch eine gezielte Änderung von Stoffeigenschaften möglich. Die neu hinzu gekommenen Parameter dienen der Beschreibung der nassen und der trockenen Deposition (über den Washoutkoeffizienten und die Depositionsgeschwindigkeit) sowie der Berechnung des radioaktiven Zerfalls während der Ausbreitung (Zerfallskonstante) und der Gammawolkenstrahlung (Anteil > 0,2 MeV), s. Abschnitt 3.2.

Tab. 3-1 Liste der in ARTM berücksichtigten Radionuklide und der verwendeten Parameter

Nuklid	Name	Form <sup>*)</sup>	Washout-Koeffizient <sup>**)</sup> in 1/s	Depositionsgeschwindigkeit in m/s	Zerfallskonstante in 1/s	Anteil > 0,2 MeV
H - 3	Tritium	W	0	0,00E+00	$1,78 \cdot 10^{-9}$	0,00
H - 3	Tritium	A	Siehe Tab. 3-2		$1,78 \cdot 10^{-9}$	0,00
C - 14	Kohlenstoff-14	A	Siehe Tab. 3-2		$3,84 \cdot 10^{-12}$	0,00
C - 14	Kohlenstoff-14	GB	0	0	$3,84 \cdot 10^{-12}$	0,00
C - 14	Kohlenstoff-14	R	0	0	$3,84 \cdot 10^{-12}$	0,00
S - 35	Schwefel	A	Siehe Tab. 3-2		$9,18 \cdot 10^{-8}$	0,00
Ar - 41	Argon-41	E	0	0	$1,05 \cdot 10^{-4}$	1,00
Ca - 41	Calcium-41	A	Siehe Tab. 3-2		$1,57 \cdot 10^{-13}$	0,00
Ca - 45	Calcium-45	A	Siehe Tab. 3-2		$4,92 \cdot 10^{-8}$	0,00
Cr - 51	Calcium-51	A	Siehe Tab. 3-2		$2,90 \cdot 10^{-7}$	0,97
Mn - 54	Mangan-54	A	Siehe Tab. 3-2		$2,57 \cdot 10^{-8}$	1,00
Fe - 55	Eisen-55	A	Siehe Tab. 3-2		$8,14 \cdot 10^{-9}$	0,00
Fe - 59	Eisen-59	A	Siehe Tab. 3-2		$1,80 \cdot 10^{-7}$	0,99
Co - 57	Kobalt-57	A	Siehe Tab. 3-2		$2,97 \cdot 10^{-8}$	0,01
Co - 58	Kobalt-58	A	Siehe Tab. 3-2		$1,13 \cdot 10^{-7}$	1,00
Co - 60	Kobalt-60	A	Siehe Tab. 3-2		$4,18 \cdot 10^{-9}$	1,00
Ni - 59	Nickel-59	A	Siehe Tab. 3-2		$2,93 \cdot 10^{-13}$	0,00

Nuklid	Name	Form <sup>*)</sup>	Washout-Koeffizient <sup>**)</sup> in 1/s	Depositionsgeschwindigkeit in m/s	Zerfallskonstante in 1/s	An- teil > 0,2 MeV
Ni - 63	Nickel-63	A	Siehe Tab. 3-2		$2,29 \cdot 10^{-10}$	0,00
Zn - 65	Zink-65	A	Siehe Tab. 3-2		$3,29 \cdot 10^{-8}$	1,00
Kr - 85m	Krypton-85m	E	0	0	$4,30 \cdot 10^{-5}$	0,27
Kr - 85	Krypton-85	E	0	0	$2,05 \cdot 10^{-9}$	0,81
Kr - 87	Krypton-87	E	0	0	$1,52 \cdot 10^{-4}$	0,99
Kr - 88	Krypton-88	E	0	0	$6,78 \cdot 10^{-5}$	0,97
Kr - 89	Krypton-89	E	0	0	$3,61 \cdot 10^{-3}$	1,00
Rb - 88	Rubidium-88	A	Siehe Tab. 3-2		$6,49 \cdot 10^{-4}$	0,99
Sr - 89	Strontium-89	A	Siehe Tab. 3-2		$1,59 \cdot 10^{-7}$	1,00
Sr - 90	Strontium-90	A	Siehe Tab. 3-2		$7,55 \cdot 10^{-10}$	0,00
Y - 90	Yttrium-90	A	Siehe Tab. 3-2		$3,00 \cdot 10^{-6}$	0,00
Zr - 93	Zirkonium-93	A	Siehe Tab. 3-2		$1,44 \cdot 10^{-14}$	0,00
Zr - 95	Zirkonium-95	A	Siehe Tab. 3-2		$1,25 \cdot 10^{-7}$	1,00
Nb - 95	Niob-95	A	Siehe Tab. 3-2		$2,28 \cdot 10^{-7}$	1,00
Tc - 99m	Technetium-99m	A	Siehe Tab. 3-2		$3,21 \cdot 10^{-5}$	0,00
Tc - 99	Technetium-99	A	Siehe Tab. 3-2		$1,03 \cdot 10^{-13}$	0,00
Ru - 103	Ruthenium-103	A	Siehe Tab. 3-2		$2,04 \cdot 10^{-7}$	1,00
Ru - 106	Ruthenium-106	A	Siehe Tab. 3-2		$2,19 \cdot 10^{-8}$	0,00
Ag - 110m	Silber-110m	A	Siehe Tab. 3-2		$3,21 \cdot 10^{-8}$	1,00
Te - 123m	Tellur-123m	A	Siehe Tab. 3-2		$1,34 \cdot 10^{-7}$	1,00
Sb - 124	Antimon-124	A	Siehe Tab. 3-2		$7,93 \cdot 10^{-9}$	0,94
Sb - 125	Antimon-125	A	Siehe Tab. 3-2		$6,70 \cdot 10^{-8}$	0,00
I - 131	Jod-131	L	$7 \cdot 10^{-5}$	0,01	$9,98 \cdot 10^{-7}$	0,99
I - 131	Jod-131	R	$7 \cdot 10^{-7}$	0,0001	$9,98 \cdot 10^{-7}$	0,99
I - 131	Jod-131	A	Siehe Tab. 3-2		$9,98 \cdot 10^{-7}$	0,99
I - 133	Jod-133	L	$7 \cdot 10^{-5}$	0,01	$9,26 \cdot 10^{-6}$	1,00
I - 133	Jod-133	R	$7 \cdot 10^{-7}$	0,0001	$9,26 \cdot 10^{-6}$	1,00
I - 133	Jod-133	A	Siehe Tab. 3-2		$9,26 \cdot 10^{-6}$	1,00
Xe - 131m	Xenon-131m	E	0	0	$6,74 \cdot 10^{-7}$	0,00
Xe - 133m	Xenon-133m	E	0	0	$3,55 \cdot 10^{-6}$	0,57
Xe - 133	Xenon-133	E	0	0	$1,53 \cdot 10^{-6}$	0,00
Xe - 135m	Xenon-135m	E	0	0	$7,56 \cdot 10^{-4}$	0,99
Xe - 135	Xenon-135	E	0	0	$2,12 \cdot 10^{-5}$	0,99
Xe - 137	Xenon-137	E	0	0	$2,96 \cdot 10^{-3}$	1,00

Nuklid	Name	Form <sup>*)</sup>	Washout-Koeffizient <sup>**)</sup> in 1/s	Depositionsgeschwindigkeit in m/s	Zerfallskonstante in 1/s	Anteil > 0,2 MeV
Xe - 138	Xenon-138	E	0	0	$8,15 \cdot 10^{-4}$	0,99
Cs - 134	Caesium-134	A	Siehe Tab. 3-2		$1,07 \cdot 10^{-8}$	1,00
Cs - 137	Caesium-137	A	Siehe Tab. 3-2		$7,32 \cdot 10^{-10}$	0,00
Ba - 140	Barium-140	A	Siehe Tab. 3-2		$6,30 \cdot 10^{-7}$	0,92
La - 140	Lanthan-140	A	Siehe Tab. 3-2		$4,79 \cdot 10^{-6}$	1,00
Ce - 141	Cer-141	A	Siehe Tab. 3-2		$2,48 \cdot 10^{-7}$	0,00
Ce - 144	Cer-144	A	Siehe Tab. 3-2		$2,82 \cdot 10^{-8}$	0,00
Hg - 197	Quecksilber	A	Siehe Tab. 3-2		$1,72 \cdot 10^{-7}$	0,96
Hg - 197	Quecksilber	L	$7 \cdot 10^{-5}$	0,01	$1,72 \cdot 10^{-7}$	0,96
Hg - 197	Quecksilber	R	$7 \cdot 10^{-7}$	0,0001	$1,72 \cdot 10^{-7}$	0,96
U - 234	Uran-234	A	Siehe Tab. 3-2		$8,99 \cdot 10^{-14}$	0,00
U - 235	Uran-235	A	Siehe Tab. 3-2		$2,98 \cdot 10^{-17}$	0,08
U - 238	Uran-238	A	Siehe Tab. 3-2		$4,92 \cdot 10^{-18}$	0,00
Pu - 238	Plutonium-238	A	Siehe Tab. 3-2		$2,51 \cdot 10^{-10}$	0,00
Pu - 239	Plutonium-239	A	Siehe Tab. 3-2		$9,13 \cdot 10^{-13}$	0,03
Pu - 240	Plutonium-240	A	Siehe Tab. 3-2		$3,36 \cdot 10^{-12}$	0,00
Am - 241	Americium-241	A	Siehe Tab. 3-2		$5,09 \cdot 10^{-11}$	0,00
Cm - 242	Curium-242	A	Siehe Tab. 3-2		$4,93 \cdot 10^{-8}$	0,00
Cm - 244	Curium-244	A	Siehe Tab. 3-2		$1,42 \cdot 10^{-9}$	0,00

*)	Form:	Bedeutung:
	A	Schwebstoff (früher Aerosol)
	E	Edelgas
	G	gasförmig
	GB	gasförmig als CO <sub>2</sub>
	L	elementare Form
	R	organisch
	W	Wasser

\*\*) stoffspezifischer Washout-Koeffizient  $\Lambda_0$  für die Niederschlagsintensität  $I_0 = 1 \text{ mm/h}$

### 3.2 Erweiterungen der Modellphysik

Bei der Berechnung der radiologischen Konsequenzen einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen müssen zum Teil andere Prozesse als die bereits in AUSTAL2000 imple-

mentierten berücksichtigt werden. Dieses betrifft die Modellierung des radioaktiven Zerfalls, der nassen Deposition und der Gammawolkenstrahlung.

### 3.2.1 Radioaktiver Zerfall

Durch die Aufnahme der radioaktiven Zerfallskonstante in die Liste von stoffspezifisch zu berücksichtigenden Parametern und der speziellen Modellphysik des Lagrange-schen Partikelmodells gestaltet sich die Modellierung des radioaktiven Zerfalls sehr einfach: Im Partikelmodell wird das Schicksal einzelner Partikel verfolgt, d.h. man kennt von jeder für eine bestimmte Anzahl von Atomen repräsentativen Untermenge jeweils ihren Ort und die seit der Freisetzung verstrichene Zeit. Daraus und mit der nuklidspezifischen Zerfallskonstante kann zu jedem Zeitpunkt eine Wahrscheinlichkeit für den Zerfall eines jeden Partikels angegeben werden und damit der Zerfall per Zufallsgenerator gesteuert werden.

Der Aufbau von Tochternukliden wird in ARTM nicht berücksichtigt.

### 3.2.2 Berechnung der nassen Deposition

Die Berechnung der nassen Deposition erfolgt in ARTM analog dem Verfahren in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV /AVV 05/. Demnach ist die Bodenkontaminationsrate durch Niederschlag (in Bq/m<sup>2</sup>·s proportional der über die z-Koordinate integrierten Konzentrationsverteilung. Der Proportionalitätsfaktor ist der Washout-Koeffizient  $\Lambda$  in s<sup>-1</sup>.

Es ist  $\Lambda = \Lambda_0 \cdot (I/I_0)^\kappa$

mit  $\kappa$ : stoffspezifischer Exponent

$\kappa = 0,8$  für Schwebstoffe und Jod

$\kappa = 1,0$  für tritiiertes Wasser

$\Lambda_0$ : stoffspezifischer Washout-Koeffizient für die Niederschlagsintensität  $I_0$

$I$ : Niederschlagsintensität in mm/h

$I_0$ : Niederschlagsintensität 1 mm/h

Für die einzelnen Radionuklide sind die stoffspezifischen Washoutkoeffizienten in der Tab. 3-1 angegeben. Tab. 3-2 enthält die verwendeten Werte für die vier Partikelgrö-

ßenklassen von ARTM zusammen mit den Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeiten.

Tab. 3-2 Depositionsgeschwindigkeit, Sedimentationsgeschwindigkeit und Washout-Koeffizient für die verschiedenen Partikelgrößenklassen

Klasse	$d_a$ in $\mu\text{m}$	TA – Luft, Anhang 3, Nr.4		Washout-Koeffizient $\Lambda_0$ in 1/s für Niederschlagsintensität $I_0=1\text{mm/h}$
		Depositionsgeschwindigkeit $v_d$ in m/s	Sedimentationsgeschwindigkeit $v_s$ in m/s	
1	kleiner 2,5	0,001	0,00	$1 \cdot 10^{-4}$
2	2,5 bis 10	0,01	0,00	$2 \cdot 10^{-4}$
3	10 bis 50	0,05	0,04	$3 \cdot 10^{-4}$
4	größer 50	0,20	0,15	$4 \cdot 10^{-4}$

### 3.2.3 Berechnung der Gammasubmersion

#### 3.2.3.1 Rechenverfahren

Auf Grund der zu erwartenden Quellterme muss die Strahlenexposition in Folge Gammasubmersion (Gammawolkenstrahlung) als möglicher Expositionspfad betrachtet werden. Aus diesem Grunde wurde das Model ARTM für entsprechende Dosisberechnungen erweitert. Die VDI-Richtlinie 3945, Blatt 3 /VDI 00/ enthält den Vorschlag für einen Algorithmus zur Berechnung der Gammasubmersion, dessen Implementierung in ARTM realisiert wurde.

Bei radioaktiven Stoffen, die Gammastrahlen aussenden, sind zur Berechnung der Gammawolkenstrahlung an einem Aufpunkt  $x$  die Beiträge von allen Punkten  $x'$  der Schadstoffwolke aufzuintegrieren. In der Regel wird die Gammasubmersion  $G(x)$  nur für Aufpunkte am Erdboden ( $z = 0$ ) berechnet. Gibt man die Quellstärke in Bq/s an, dann erhält man  $G(x, y)$  aus der Konzentrationsverteilung  $c(x)$  gemäß der AVV zu § 47 StrlSchV in der Einheit  $\text{Bq m}^{-2}$  nach folgender Gleichung

$$G(x, y) = \int c(x') \cdot \frac{B(\mu R) \cdot \tilde{K}(\mu z', \mu S) \cdot \exp(-\mu R)}{4\pi R^2} d^3 x'$$

mit  $S = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$  in m

und  $R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z'^2}$  in m.

Der Gesamtschwächungskoeffizient  $\mu$ , der Dosisaufbaufaktor  $B(\mu R)$  und der Korrekturfaktor für den Einfluss des Bodens  $\tilde{K}(\mu z', \mu S)$  hängen von der Energie der Gammastrahlen ab (siehe Kapitel 3.2.3.3 und 3.2.3.4). Die Gammasubmersionsdosis erhält man aus  $G(x, y)$  durch Multiplikation mit dem nuklidspezifischen Dosisleistungsfaktor in Sv·m<sup>2</sup>/(Bq·s) und Integration über die Expositionszeit.

Mit dem Partikelmodell wird die dreidimensionale Konzentrationsverteilung  $c(\mathbf{x})$  in Form von Mittelwerten  $\bar{c}_{ijk}$  in Bq/m<sup>3</sup> über die Volumenelemente  $\tilde{\Delta}_{ijk}$  des räumlichen Auszählgitters berechnet. Die Gammasubmersion wird für Mittelpunkte  $(x_{lm}, y_{lm}, 0)$  der Maschen auf dem Erdboden berechnet:

$$G(x_{lm}, y_{lm}) = \sum_{i,j,k} \bar{c}_{ijk} E_{ijklm}$$

mit der Einflussmatrix  $E_{ijklm}$  in m

$$E_{ijklm} = \int_{\tilde{\Delta}_{ijk}} \frac{B(\mu R_{lm}) \cdot K(\mu z', \mu S_{lm}) \cdot \exp(-\mu R_{lm})}{4\pi R_{lm}^2} d^3 x'$$

$$S_{lm} = \sqrt{(x_{lm} - x')^2 + (y_{lm} - y')^2} \text{ in m}$$

horizontaler Abstand zwischen den Mittelpunkten der Gittermaschen

$$R_{lm} = \sqrt{(x_{lm} - x')^2 + (y_{lm} - y')^2 + z'^2} \text{ in m}$$

Abstand zwischen Mittelpunkt der bodennahen Masche mit Koordinaten  $(x_{lm}, y_{lm}, 0)$  und Mittelpunkt der Masche mit Koordinaten  $(x', y', z')$ .

In ebenem Gelände ist die Einflussmatrix  $E_{ijklm}$  nur eine Funktion von  $|i-l|$ ,  $|j-m|$  und  $k$ . Sie hängt nicht von der aktuellen Konzentrationsverteilung ab, sondern vom räumlichen Gitter. Solange man mit demselben Auszählgitter rechnet, braucht man die Einflussmatrix  $E_{ijklm}$  nur einmal auszurechnen und kann dann mit der Gleichung zur Berechnung von  $G(x_{lm}, y_{lm})$  für jede Verteilung  $\bar{c}_{ijk}$  die Gammasubmersion berechnen.

Die Hauptaufgabe besteht also in der Bestimmung der Elemente der Einflussmatrix  $E_{ijklm}$ . Hier wird nur die Anwendung auf ebenes Gelände diskutiert, so dass sich die Einflussmatrix reduziert auf

$$E_{ijk} \equiv E_{ijk11}$$

Bei dem Element  $E_{111}$  liegt der Aufpunkt im Mittelpunkt der Bodenfläche, der Integrand wird also singular. Alle anderen Elemente sind unkritisch, für sie ist immer  $R > 0$ .

Zur Durchführung der Rechnung ist es zweckmäßig, das Koordinatensystem so zu wählen, dass sein Nullpunkt mit dem Aufpunkt  $(\hat{x}_1, \hat{y}_1)$  zusammenfällt und die Koordinaten auf  $1/\mu$  zu normieren:

$$\xi = \mu x$$

$$\eta = \mu y$$

$$\zeta = \mu z$$

$$E_{ijk} = \frac{\varepsilon_{ijk}}{4\pi\mu}$$

$$\varepsilon_{ijk} = \int_{V_{ijk}} B(r)K(\zeta, s)\exp(-r)r^{-2}d\xi d\eta d\zeta$$

mit  $r = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}$

$$s = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$$

Für alle Elemente außer  $\varepsilon_{111}$  kann die Integration als Gauß-Quadratur durchgeführt werden. Sind  $a_n$  die Abszissen und  $g_n$  die Gewichte für eine Gauß-Quadratur mit  $N$  Punkten ( $n = 1 \dots N$ ) über das Intervall von 0 bis 1, dann ist

$$\varepsilon_{ijk} = I_Q(\xi_{i-1}, \xi_i - \xi_{i-1}, \eta_{j-1}, \eta_j - \eta_{j-1}, \zeta_{k-1}, \zeta_k - \zeta_{k-1})$$

$$I_Q(\xi, \delta_\xi, \eta, \delta_\eta, \zeta, \delta_\zeta) = \sum_{i'=1}^N g_{i'} \sum_{j'=1}^N g_{j'} \sum_{k'=1}^N g_{k'} B(r')K(\zeta', s')\exp(-r')r'^{-2}$$

mit  $r' = \sqrt{\xi'^2 + \eta'^2 + \zeta'^2}$

$$s' = \sqrt{\xi'^2 + \eta'^2}$$

$$\xi' = \xi + a_{i'}\delta_\xi$$

$$\eta' = \eta + a_{j'}\delta_\eta$$

$$\zeta' = \zeta + a_{k'}\delta_\zeta$$

Wenn das Volumen  $V_{ijk}$  sehr groß ist oder nahe am Nullpunkt liegt, kann es zur Erhöhung der numerischen Genauigkeit angebracht sein, das Integrationsvolumen zu unterteilen und die Gauß-Quadratur über jedes Teilvolumen separat durchzuführen.

Das Element  $\varepsilon_{111}$  kann nicht durch eine Gauß-Quadratur berechnet werden, da der Integrand singularär ist. Die Singularität kann man durch Übergang zu räumlichen Polarkoordinaten  $(r, \vartheta, \varphi)$  beseitigen:

$$\begin{aligned}\xi &= r\sin(\vartheta)\cos(\varphi) \\ \eta &= r\sin(\vartheta)\sin(\varphi) \\ \zeta &= r\cos(\vartheta) \\ d\xi d\eta d\zeta &= r^2 \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi\end{aligned}$$

Mit der Substitution

$$\begin{aligned}\gamma &= \cos(\vartheta) \\ d\gamma &= -\sin(\vartheta) d\vartheta\end{aligned}$$

erhält man

$$\varepsilon_{111} = \int_{V_{111}} B(r)K(\zeta, s)\exp(-r)drd\gamma d\varphi$$

mit  $\zeta = \gamma r$

$$s = \gamma' r$$

$$\gamma' = \sqrt{1-\gamma^2} = \sin(\vartheta)$$

Bei quadratischen Maschen in  $\xi$  und  $\eta$  kann man sich zur Berechnung von  $\varepsilon_{111}$  aus Symmetriegründen auf den Sektor  $0 \leq \varphi \leq \pi/4$  (Volumen  $V_S$ ) beschränken,

$$V_S = \{ (\xi, \eta, \zeta) \mid 0 \leq \xi \leq \xi_1, 0 \leq \eta \leq \xi, 0 \leq \zeta \leq \zeta_1 \}$$

$$\varepsilon_{111} = 8I_S(\xi_1, \zeta_1)$$

$$I_S(\xi_1, \zeta_1) = \int_0^{\pi/4} d\varphi \int_0^1 d\gamma \int_0^{\tilde{r}(\gamma, \varphi)} dr B(r)K(\gamma r, \gamma' r)\exp(-r)$$

Hierbei ist  $\tilde{r}(\gamma, \varphi)$  die Länge des Vektors  $r$ , der vom Nullpunkt in Richtung  $(\vartheta, \varphi)$  bis zum Rand des Sektors  $V_S$  verläuft. Das Integral über  $r$  kann unter Verwendung der Definition von  $B$  und  $K$  in folgender Form geschrieben werden:

$$\begin{aligned}\tilde{I}(\gamma, \hat{r}, \xi_1, \zeta_1) &= \int_0^{\tilde{r}(\gamma, \varphi)} B(r)K(\gamma r, \gamma' r)\exp(-r)dr \\ &= \sum_i \sum_k \sum_m B_i K_{km} \gamma^k \int_0^{\tilde{r}(\gamma, \varphi)} r^{i+k} \exp\left[-\left(\frac{1}{2}m\gamma' + 1\right)r\right] dr\end{aligned}$$

Fasst man gleiche Potenzen von  $r$  zusammen und führt  $\rho = \left(\frac{1}{2}m\gamma' + 1\right)r$  als neue Integrationsvariable ein, dann ist

$$\tilde{I}(\gamma, \hat{r}, \xi_1, \zeta_1) = \sum_n \sum_m P_{mn} E_n(\hat{\rho}_m)$$



$$P_{mn} = \sum_i \sum_k B_i K_{km} \gamma^k \left(\frac{1}{2} m \gamma' + 1\right)^{-(n+1)} \delta_{i+k,n}$$

$$E_n(\hat{\rho}_m) = \int_0^{\hat{\rho}_m} \rho^n \exp(-\rho) d\rho$$

$$\hat{\rho}_m(\gamma, \varphi) = \left(\frac{1}{2} m \gamma' + 1\right) \hat{r}(\gamma, \varphi)$$

Das Integral  $E_n$  kann analytisch (rekursiv) berechnet werden:

$$E_n(\rho) = n E_{n-1}(\rho) - \rho^n \exp(-\rho)$$

$$E_0(\rho) = 1 - \exp(-\rho)$$

Es bleibt nur noch die Bestimmung der Funktion  $\hat{r}(\gamma, \varphi)$ .

Hierbei ist zwischen zwei Fällen zu unterscheiden:

- Der Vektor  $r$  endet in der senkrechten Randfläche  $\xi = \xi_1$ . Er durchläuft also das Volumen einer Pyramide mit der Grundfläche  $\xi = \xi_1, 0 \leq \eta \leq \eta_1, 0 \leq \zeta \leq \zeta_1$  und der Spitze im Nullpunkt.
- Der Vektor  $r$  endet in der horizontalen Deckfläche  $\zeta = \zeta_1$ . Er durchläuft dabei das Volumen eines Tetraeders mit den Eckpunkten  $(0,0,0)$ ,  $(\xi_1, 0, \zeta_1)$ ,  $(\xi_1, \eta_1, \zeta_1)$  und  $(0, 0, \zeta_1)$ .

Die Grenzfläche zwischen diesen beiden Gebieten ist gegeben durch

$$\gamma = \gamma_1(\varphi) = \frac{\xi_1 \cos(\varphi)}{\sqrt{\xi_1^2 + \zeta_1^2 \cos^2(\varphi)}}$$

Mit dieser Fallunterscheidung erhält man:

$$\hat{r}(\gamma, \varphi) = \begin{cases} \frac{\xi_1}{\gamma \cos(\varphi)} & \text{für } \gamma \leq \gamma_1(\varphi) \\ \frac{\xi_1}{\gamma} & \text{für } \gamma \geq \gamma_1(\varphi) \end{cases}$$

Das Integral  $I_S$  über den Sektor  $V_S$  ist also die Summe aus dem Integral  $I_P$  über die Pyramide und dem Integral  $I_T$  über das Tetraeder,

$$I_S = I_P + I_T$$

$$I_P(\xi_1, \zeta_1) = \int_0^{\pi^4} d\varphi \int_0^{\gamma_1(\varphi)} d\gamma \tilde{I}(\gamma, \hat{r}, \xi_1, \zeta_1)$$

$$I_T(\xi_1, \zeta_1) = \int_0^{\pi^4} d\varphi \int_{\gamma_1(\varphi)}^1 d\gamma \tilde{I}(\gamma, \hat{r}, \xi_1, \zeta_1)$$

Das verbleibende Doppelintegral kann wieder problemlos durch Gauß-Quadratur bestimmt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das numerische Ergebnis für  $I_T$  umso schlechter wird, je flacher das Volumenelement  $V_{111}$  ist. Für  $\xi_1 \ll \zeta_1$  ist es daher zweckmäßig, das Volumenelement noch einmal zu unterteilen:

$$2I_S(\xi_1, \zeta_1) = 2I_S(\xi_{I'}, \zeta_1) + 2I_Q(\xi_{I'}, \xi_1 - \xi_{I'}, 0, \eta_{I'}, 0, \zeta_1) + I_Q(\xi_{I'}, \xi_1 - \xi_{I'}, \eta_{I'}, \eta_1 - \eta_{I'}, 0, \zeta_1)$$

mit  $\xi_{I'} = f_F \zeta_1 < \xi_1$

$$\eta_{I'} = \xi_{I'}$$

### 3.2.3.2 Koeffizienten für die Berechnung der Gammasubmersion

Im Folgenden sind die zur Berechnung der Gammasubmersion erforderlichen Formeln und Koeffizienten zusammengestellt. Dabei orientiert sich die Nomenklatur weitgehend an den Ausführungen in Anhang 7 der AVV zu § 47 StrlSchV /AVV 05/. Die Koeffizienten für die Gammaenergie 1 MeV wurden direkt aus der AVV übernommen. Die für die Gammaenergie 0,1 MeV angegebenen Parameter wurden aus der Fachliteratur bezogen, weil die AVV hierfür keine Werte angibt.

#### 3.2.3.3 Dosisaufbaufaktor für Gammasubmersion

Für den Dosisaufbaufaktor in Luft ohne Einfluss des Bodens für die Energie 1 MeV bzw. 0,1 MeV ist folgende Näherungsformel anzuwenden:

$$B_{1MeV}(\mu_{1MeV} \cdot R) = 1 + \sum_{m=1}^5 b_{1MeV;m} \cdot (\mu_{1MeV} \cdot R)^m$$

bzw.  $B_{0,1MeV}(\mu_{0,1MeV} \cdot R) = 1 + \sum_{m=1}^5 b_{0,1MeV;m} \cdot (\mu_{0,1MeV} \cdot R)^m$

mit den Gesamtschwächungskoeffizienten für  $\gamma$ -Strahlung der Energien 1 MeV bzw. 0,1 MeV

$$\mu_{1MeV} = 7,78 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ bzw. } \mu_{0,1MeV} = 1,82 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$$

Die Koeffizienten  $b_{1\text{MeV};m}$  bzw.  $b_{0,1\text{MeV};m}$  sind für die Gammaenergien 1 MeV in der Tab. 3-3 und für 0,1 MeV in der Tab. 3-4 angegeben.

Tab. 3-3 Koeffizienten  $b_{1\text{MeV};m}$  zur Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 1 MeV aus /AVV 05/

$B_{1\text{MeV};m}$				
$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
$7,7 \cdot 10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^{-1}$	$-4,0 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$-8,2 \cdot 10^{-5}$

Diese Koeffizienten gelten für den Bereich  $\mu_{1\text{MeV}} \cdot R < 15$ , für größere  $\mu_{1\text{MeV}} \cdot R$  kann  $B_{1\text{MeV}} = B_{1\text{MeV}}(15)$  gesetzt werden.

Tab. 3-4 Koeffizienten  $b_{0,1\text{MeV};m}$  zur Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 0,1 MeV abgeleitet aus /JAC 84/

$B_{0,1\text{MeV};m}$				
$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
1,9	1,7	$-3,4 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$-2,1 \cdot 10^{-3}$

### 3.2.3.4 Korrekturfaktor für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion

Der Korrekturfaktor für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion ist nach folgender Näherungsformel zu berechnen:

$$K_{1\text{MeV}}(\mu_{1\text{MeV}} \cdot z', \mu_{1\text{MeV}} \cdot s) \approx \sum_{k=0}^3 \sum_{m=0}^3 a_{k,m} (\mu_{1\text{MeV}} \cdot z')^k \cdot \exp\left(-\frac{m}{2} \cdot \mu_{1\text{MeV}} \cdot s\right) \quad \text{für 1 MeV}$$

bzw.

$$K_{0,1\text{MeV}}(\mu_{0,1\text{MeV}} \cdot z', \mu_{0,1\text{MeV}} \cdot s) \approx \sum_{k=0}^3 \sum_{m=0}^3 a_{k,m} (\mu_{0,1\text{MeV}} \cdot z')^k \cdot \exp\left(-\frac{m}{2} \cdot \mu_{0,1\text{MeV}} \cdot s\right) \quad \text{für 0,1 MeV}$$

Die in Tab. 3-5 angegebenen Koeffizienten  $a_{k,m}$  für die Energien 1 MeV wurden der AVV zu § 47 StrlSchV /AVV 05/ entnommen und entsprechen den in einer Arbeit von Jacob et al. /JAC 85/ angegebenen Werten. Aus dieser Arbeit wurden auch die in Tab. 3-6 angegebenen Bodenkorrekturfaktoren für 0,1 MeV entnommen.

Tab. 3-5 Koeffizienten  $a_{k,m}$  zur Berechnung des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 0,1 MeV

$E_\gamma = 1 \text{ MeV}$	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$
$k = 0$	0,485	0,064	1,705	-1,179
1	0,137	1,878	-4,817	2,883
2	-0,0035	-0,8569	2,0527	-1,2552
3	-0,0018	0,0997	-0,2392	0,1503

Tab. 3-6 Koeffizienten  $a_{k,m}$  zur Berechnung des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 1,0 MeV

$E_\gamma = 0,1 \text{ MeV}$	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$
$k = 0$	0,279	0,595	-0,205	0,622
1	0,135	0,866	-0,716	-0,578
2	-0,0131	-0,324	0,1103	0,2892
3	0,0003	0,0313	-0,0017	-0,0337

### 3.2.4 Berücksichtigung der Vegetationsperiode (Sommerhalbjahr)

Die Berücksichtigung der Vegetationsperiode in ARTM erfolgt durch die Auswahl der meteorologischen Eingangsdaten. Diese können entweder aus Zeitreihen der Messgrößen Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Ausbreitungsklasse und Regenrate oder aus entsprechenden aufbereiteten 4-parametrischen Statistiken bestehen. Soll für die Vegetationsperiode (Sommerhalbjahr, d. h. vom 01. Mai bis zum 31. Oktober) gerechnet werden, so sind ARTM als meteorologische Eingangsdaten nur die für das Sommerhalbjahr gültigen Zeitreihen bzw. Statistiken vorzugeben.

### 3.2.5 Berücksichtigung komplexer Gebäudestrukturen

Basis für die Erstellung des Modellsystems ARTM war die Version 2.2.11 von AUSTAL2000. In dieser Version war bereits ein Modell zur expliziten Berechnung des

Gebäudeeinflusses integriert. ARTM hat somit auch diese Funktionalität von AUSTAL2000 übernommen.

### **3.3 Einrichtung einer Schnittstelle zu den Dosisberechnungsmodulen der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV**

Das Modell ARTM berechnet die atmosphärische Ausbreitung und Ablagerung von freigesetzten Radionukliden. Dabei liefert es alle Grundlagen für eine nachgeschaltete Expositionsrechnung durch Inhalation, Bodenstrahlung, Ingestion und Gammawolkenstrahlung. Die Ausgabedateien von ARTM orientieren sich dabei weitgehend an dem Format von AUSTAL2000. In diesen Dateien sind die flächenhaften Verteilungen von langzeitgemittelten Werten für die trockene und nasse Deposition, die Konzentration in der Luft sowie der Ausbreitungsfaktor für die Gammawolkenstrahlung im ASCII-Format gespeichert.

## **4 Implementierung der Verfahren**

Das Forschungsvorhaben wurde in Kooperation mit dem Ingenieurbüro Janicke (IBJ) als Unterauftragnehmer durchgeführt.

In Absprache zwischen GRS und IBJ wurden Rahmenbedingungen und Einsatzbereich des Programms ARTM festgelegt, also z. B. Anzahl und Typ der Quellen, Emissionsbedingungen, Stoffdatenbank für Radionuklide mit physikalischen Eigenschaften, Größe und Aufrasterung des Rechengebietes, Entfernungsbereiche. Ferner wurden Formate der Ein- und Ausgabedateien und Namensgebungen, die Schnittstelle zum Dosis-Programm, Testfälle sowie Verifizierungsrechnungen festgelegt.

IBJ hat die zur Erstellung von ARTM erforderlichen Programmänderungen an AUSTAL2000 vorgenommen. Statt der von der TA Luft fest vorgegebenen Stoffliste wird eine externe Liste von Radionukliden verwendet, die neben den Nuklidbezeichnungen auch alle für die Ausbreitung wichtigen nuklidspezifischen Parameter enthält. Die Formate der Ein- und Ausgabedateien wurden angepasst. Es wurde als zusätzlicher Eingabeparameter die Niederschlagsintensität hinzugenommen. Die zur Verarbeitung dieses Parameters notwendigen Programmänderungen wurden durchgeführt. Das Programm wurde so erweitert, dass es die nasse Deposition berechnet und in separaten Dateien ausgibt. Die Programmerweiterungen umfassen außerdem die Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls kurzlebiger Nuklide während der Ausbreitung sowie, ausgehend von der momentanen Konzentrationsverteilung, die Berechnung der Gammawolkenstrahlung.



## **5 Validierung und Verifikationsrechnungen**

Für ausgewählte Beispiele wurden Vergleichsrechnungen mit dem Gauß-Fahnenmodell und den Ausbreitungsparametern von AVV /AVV 05/ und SBG /SSK 04/ durchgeführt. Hierbei wurden Emissionssituationen betrachtet, die einerseits in den klassischen Anwendungsbereich des Gauß-Fahnenmodells von AVV und SBG fallen, z. B. Emissionen mit abgehobenen Quellen in nahezu homogenem Terrain. Andererseits werden auch Fälle untersucht, die durch eine bodennahe Freisetzung und/oder orographisch strukturiertes Gelände gekennzeichnet sind.

Mit dem Modell ARTM wurden im Rahmen des Vorhabens Verifikationsrechnungen durchgeführt. Die dabei behandelten Fälle betreffen zum einen die klassischen Anwendungen des Gauß-Fahnenmodells mit Freisetzungen aus größeren Freisetzungshöhen und bei großer Bodenrauigkeit. Es wurden sowohl Einzelfälle mit konstanten meteorologischen Verhältnissen (im Sinne eines Kurzzeit-Ausbreitungsfaktors) als auch Jahresmittelwerte (Langzeitausbreitungsfaktoren) berechnet.

Die zweite Serie von Anwendungsfällen betrifft Modellierungen für Situationen, für die das Gauß-Fahnenmodell der AVV oder der SBG nur bedingt geeignet ist.

Für die Dokumentation der umfangreichen Validierung des Basismodells AUSTAL2000 wird auf /JAN 03/ verwiesen.

### **5.1 Testbeispiele im Anwendungsbereich des Gauß-Fahnenmodells**

Das Gauß-Fahnenmodell der AVV und der SBG ist – streng genommen – auf die Verhältnisse limitiert, die für die in den Rechenvorschriften integrierten und aus Ausbreitungsexperimenten in Karlsruhe und Jülich abgeleiteten Ausbreitungsparameter gelten. Diese Limitierungen betreffen:

- Freisetzung aus Quellen mit einer Emissionshöhe von mindestens 50 m,
- Standorte mit einer hohen Bodenrauigkeit,
- kontinuierliche Freisetzungen,



- quasistationäre meteorologische Verhältnisse in nahezu ebenem Gelände.

### 5.1.1 Einzelsituationen mit Freisetzungen aus hohen Quellen

In der ersten Serie von Vergleichsrechnungen mit dem Gauß-Fahnenmodell der AVV und den SBG werden Einzelsituationen mit Freisetzungen aus hohen Quellen betrachtet. Die Rechnungen wurden für eine hohe Bodenrauigkeit von  $z_0 = 1,5$  m (vergleichbar mit den Verhältnissen an den Forschungszentren in Jülich und Karlsruhe), einer geringen Windgeschwindigkeit von 2 m/s in 10 m Höhe über Grund ohne Niederschlag für alle Diffusionskategorien (DK) von A  $\leftrightarrow$  V (sehr labile atmosphärische Schichtung) bis F  $\leftrightarrow$  I (sehr stabile Schichtung) durchgeführt. Als Zielgröße dient der Kurzzeitausbreitungsfaktor  $\chi$ . Da das Modell ARTM grundsätzlich nicht für die Berechnung von Einzelsituationen ausgelegt ist, wurde eine solche Einzelsituation durch die Vorgabe einer 24-stündigen Zeitreihe mit konstanten meteorologischen Bedingungen simuliert. Einflüsse durch Gebäude, Orographie oder Fahnenüberhöhung wurden nicht unterstellt.

Die Abb. 5-1 bis Abb. 5-6 zeigen die Ergebnisse der Rechnungen. Die Ergebnisdateien des Gauß-Fahnenmodells der AVV Rechnungen wurden in das Ausgabeformat von ARTM umgesetzt und ebenfalls mit der graphischen Oberfläche GO-ARTM dargestellt. Damit lassen sich die Ergebnisse gut vergleichen. Das Rechengebiet hat die Abmessung von 20 km  $\times$  20 km. Die Quelle befindet sich jeweils im linken Teil des Rechengebietes. Die Anströmrichtung war mit 270° vorgegeben. Die gezeigten bodennahen Felder des Kurzzeitausbreitungsfaktors zeigen abhängig von der meteorologischen Situation Abweichungen in der Form der Verteilung und den jeweiligen Maximalwerten:

- Besonders für labile atmosphärische Schichtungen (d. h. bei den Diffusionskategorien A und B) sind die Verteilungen des Gauß-Fahnenmodells deutlich breiter.
- Die Maximalwerte des Kurzzeitausbreitungsfaktors unter der Fahnenachse sind beim Gauß-Fahnenmodell mit Ausnahme der labilen Diffusionskategorie B geringer.
- Die Abweichungen in den Maximalwerten reichen von 2 % (bei Diffusionskategorie B) bis 50 % (bei Diffusionskategorie E).

- Die Summe über alle bodennahen Werte des Ausbreitungsfaktors die ein Maß für die luftgetragene bodennahe Schadstoffmenge ist, unterliegt Abweichungen in derselben Größenordnung.
- Bei den Diffusionskategorien C bis F erkennt man die Drehung der Fahne nach rechts. Dieser Effekt ist bedingt durch die in ARTM integrierte Drehung des Windprofils mit der Höhe (Ekman-Spirale).

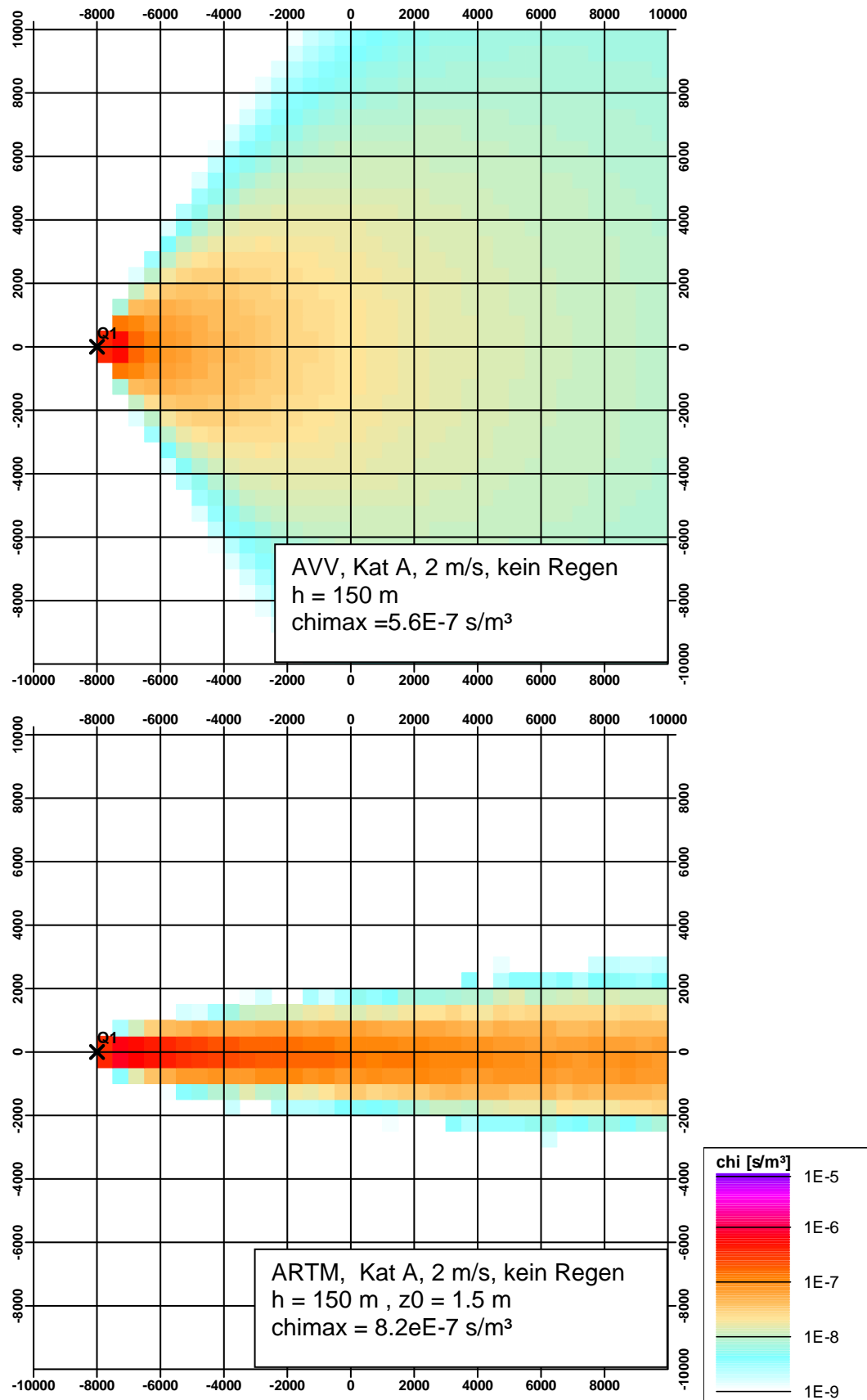


Abb. 5-1 Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0 = 1,5$  m,  $u = 2$  m/s,  $h = 150$  m, sehr labile Schichtung, DK = A, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)

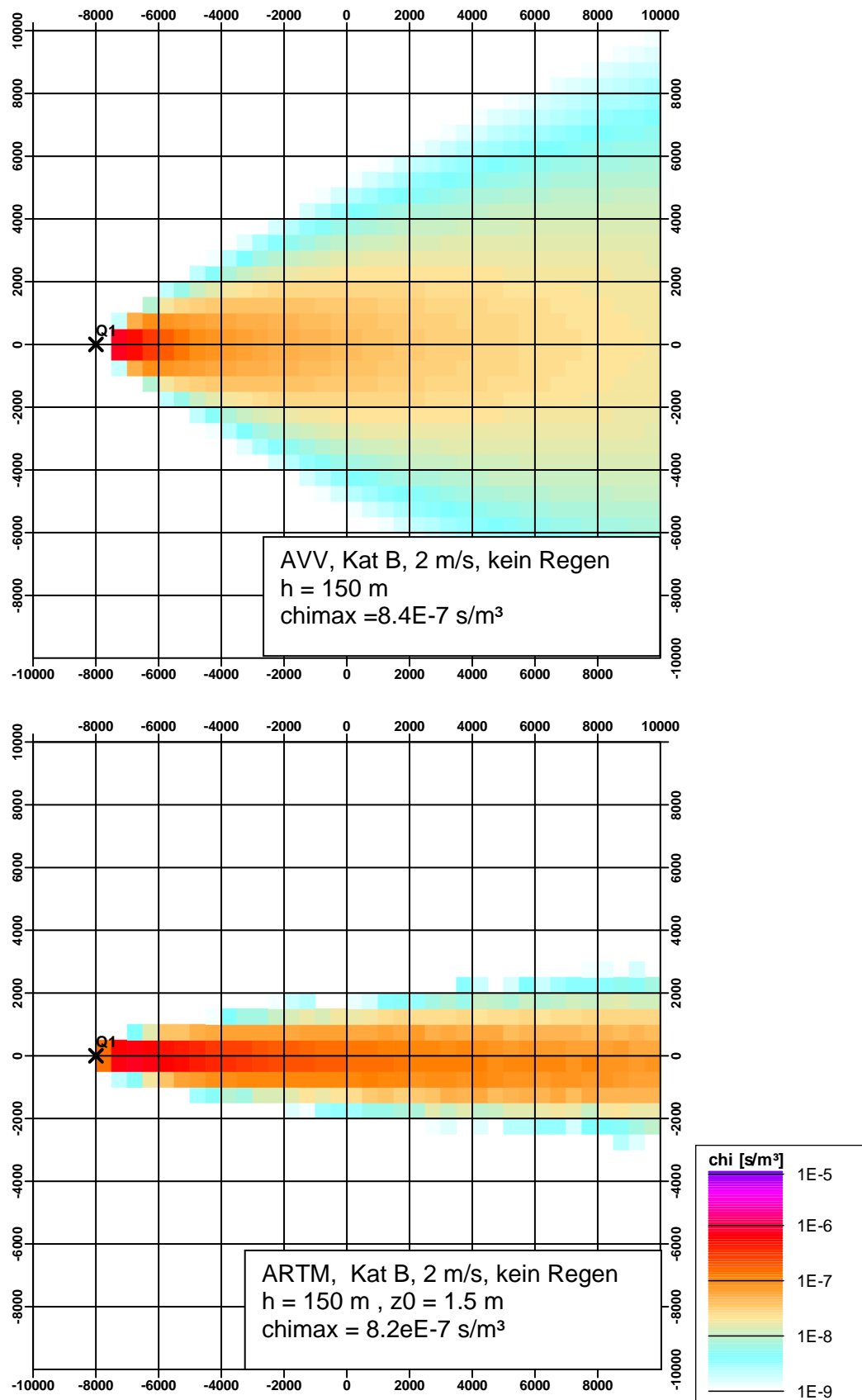


Abb. 5-2 Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0 = 1,5 \text{ m}$ ,  $u = 2 \text{ m/s}$ ,  $h = 150 \text{ m}$ , labile Schichtung, DK = B, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)

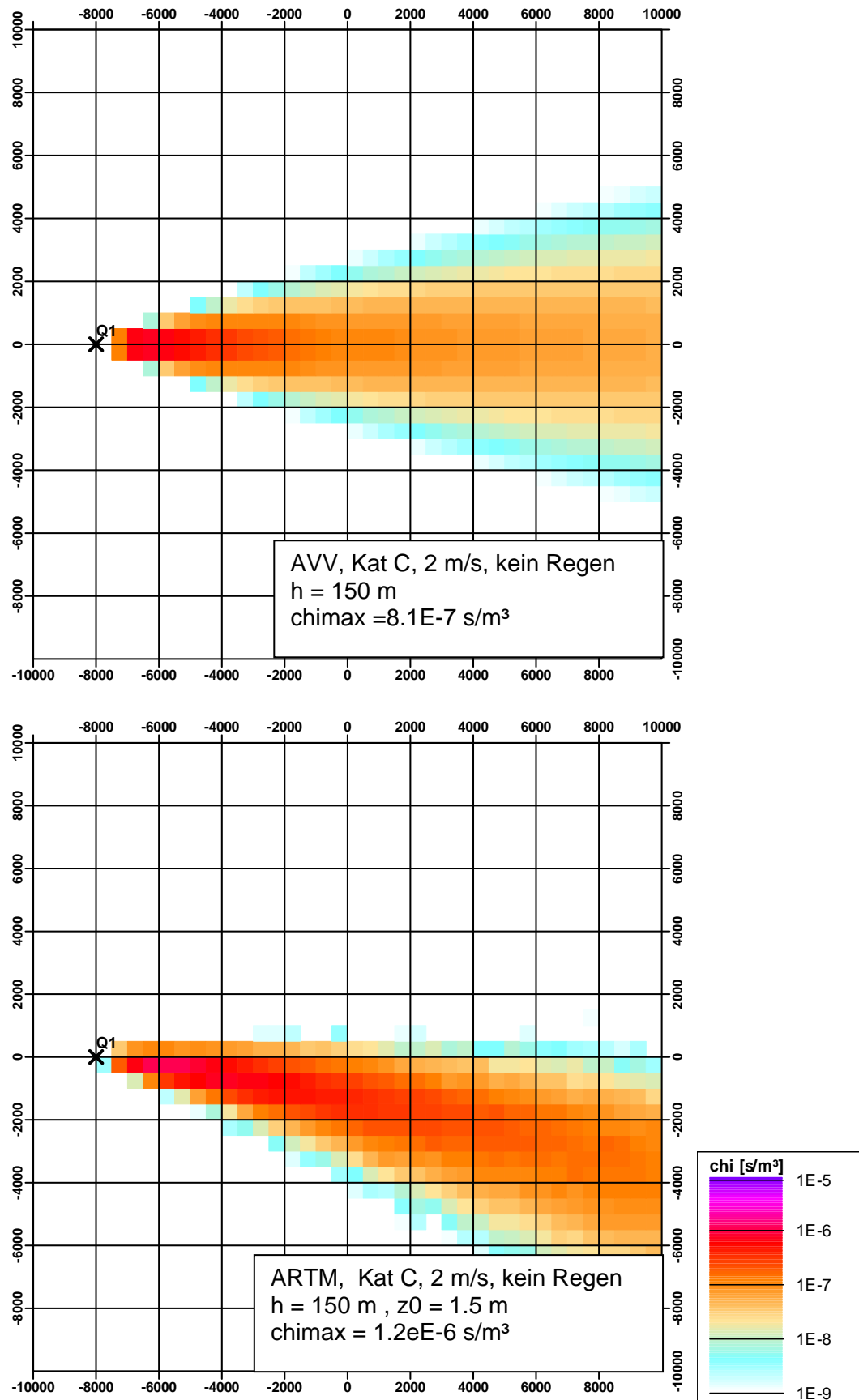


Abb. 5-3 Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0 = 1,5 \text{ m}$ ,  $u = 2 \text{ m/s}$ ,  $h = 150 \text{ m}$ , leicht labile Schichtung, DK = C, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)

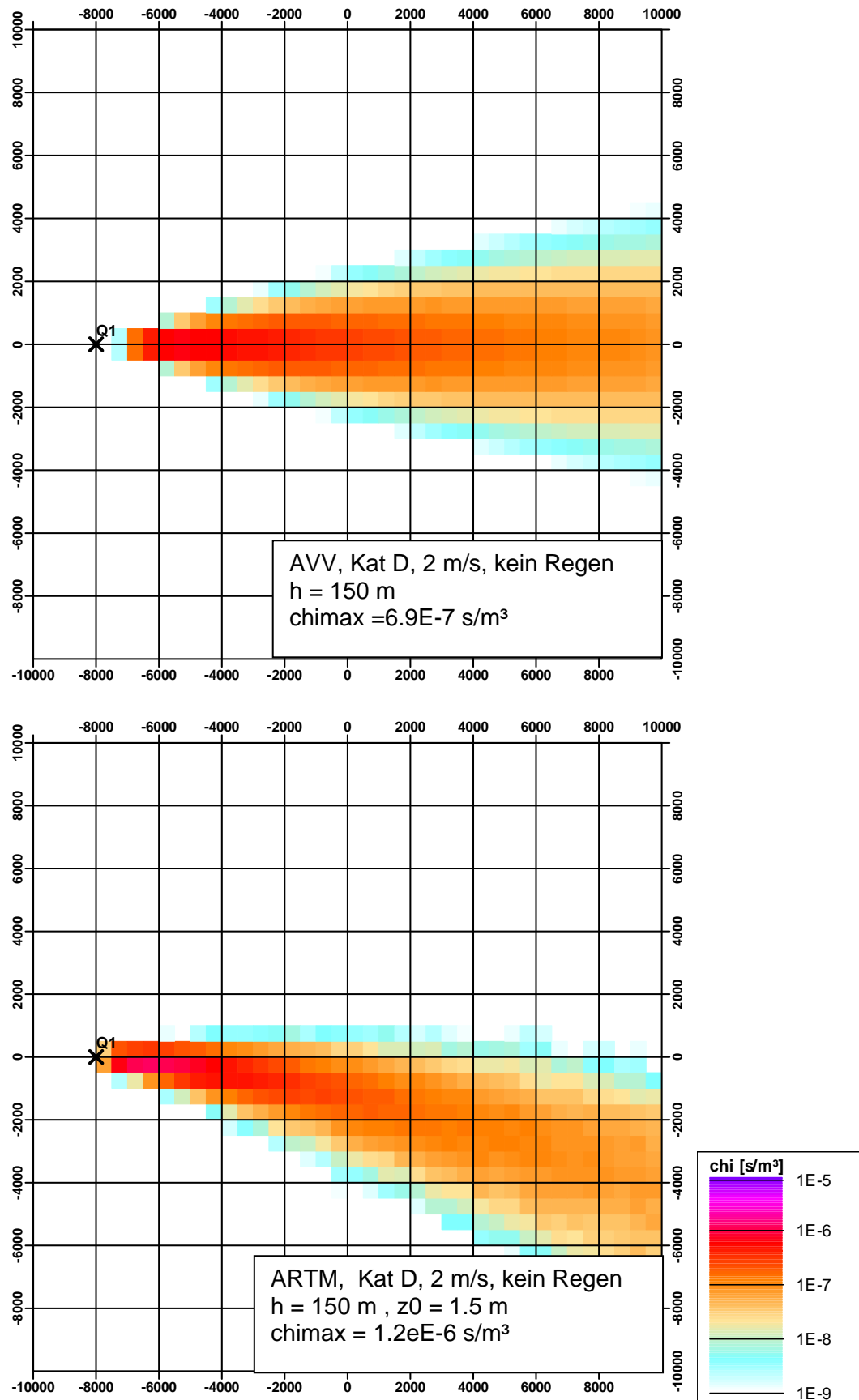


Abb. 5-4 Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0 = 1,5 \text{ m}$ ,  $u = 2 \text{ m/s}$ ,  $h = 150 \text{ m}$ , neutrale Schichtung,  $DK = D$ , oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)

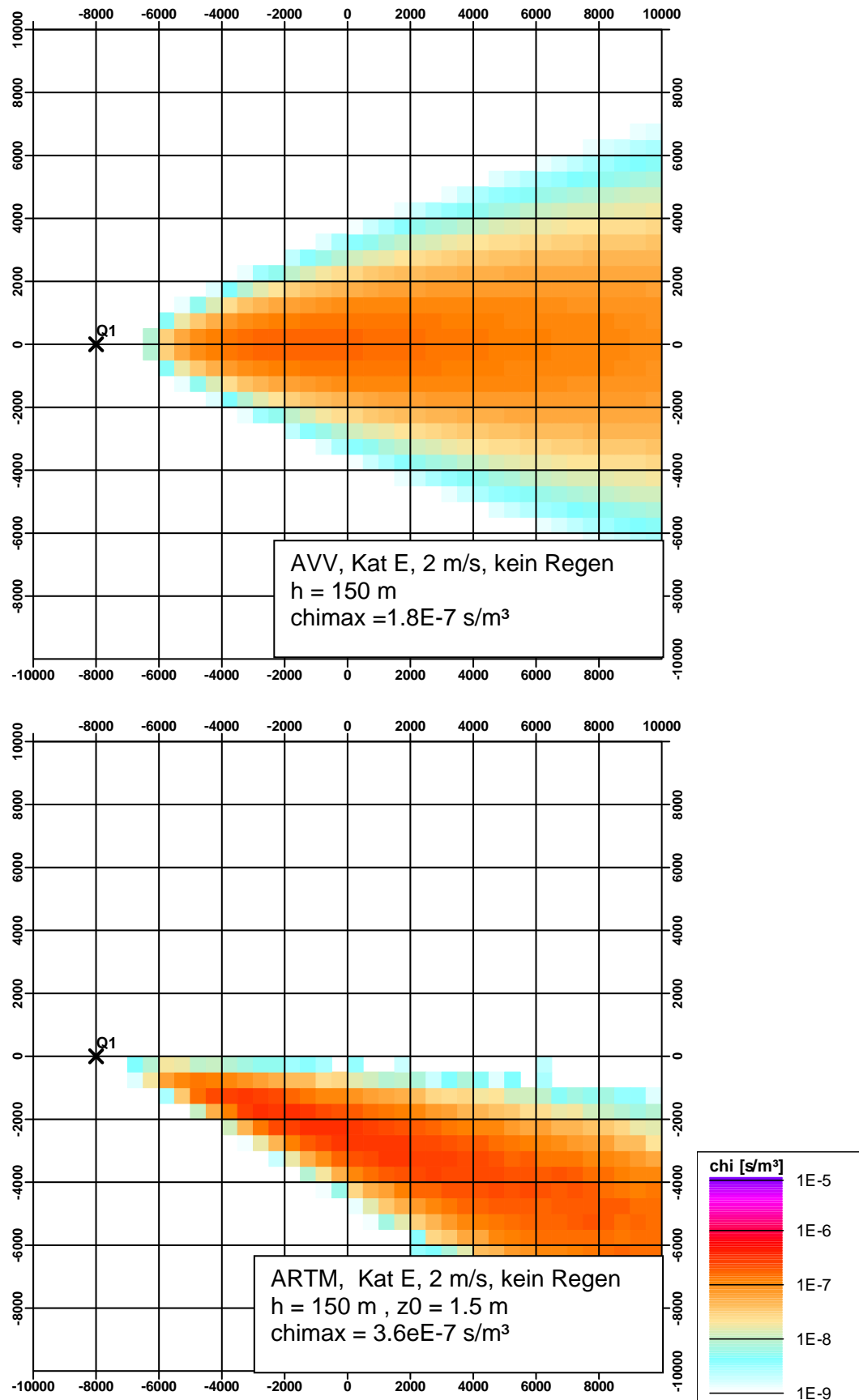


Abb. 5-5 Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0 = 1,5 \text{ m}$ ,  $u = 2 \text{ m/s}$ ,  $h = 150 \text{ m}$ , stabile Schichtung, DK = E, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)

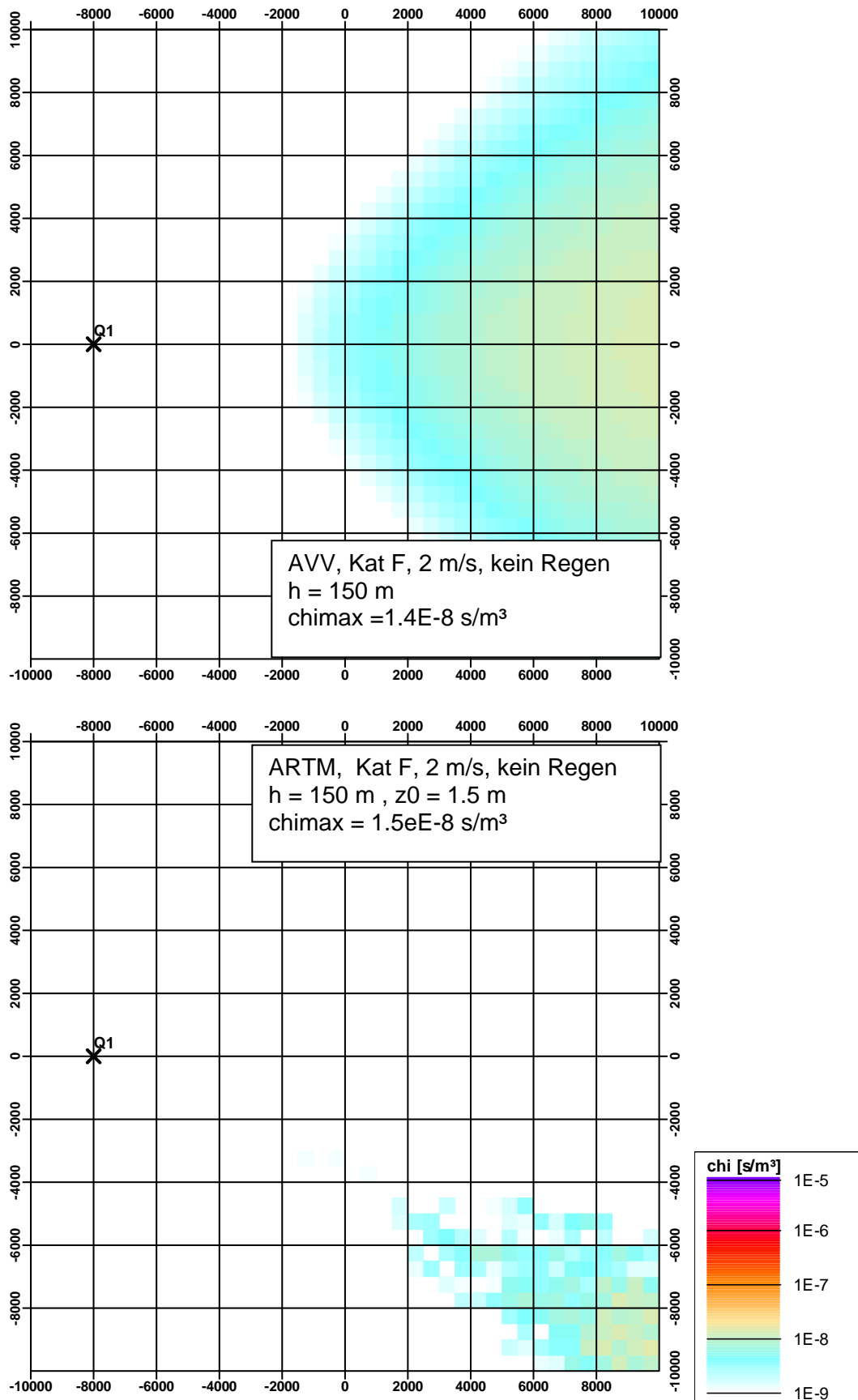


Abb. 5-6 Vergleichsrechnung Einzelsituation ( $z_0 = 1,5$  m,  $u = 2$  m/s,  $h = 150$  m, sehr stabile Schichtung, DK = F, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)



### 5.1.2 Radioaktiver Zerfall

Zur Überprüfung der neu in ARTM integrierten Routine zur Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls wurden Testrechnungen durchgeführt. Dazu wurden Ausbreitungsberechnungen bei einer Quellhöhe von 10 m in einem 5 km x 5 km großen ebenen Rechengebiet zum einen mit dem Element Kr-85 (Halbwertszeit 10,8 a) und zum anderen mit Kr-89 (Halbwertszeit 3,2 min) bei neutralen Stabilitätsverhältnissen und einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s in 10 m über Grund durchgeführt. Krypton ist ein Edelgas, das keinen Depositionsprozessen unterworfen ist.

Anschließend wurden die Ausbreitungsfaktoren unter der Fahnenachse ausgewertet und in Abb. 5-7 als Funktion der Entfernung zur Quelle dargestellt. Aufgrund der langen Halbwertszeit von Kr-85 ist der Abfall der Konzentration fast allein auf die Diffusionsprozesse zurückzuführen. Beim Kr-89 hingegen sind während der Transportzeit von 2250 s bis zum Rand des Rechengebietes schon mehr als 10 Halbwertszeiten vergangen. Mit der gestrichelten Linie ist der Quotient der Ausbreitungsfaktoren von Kr-89 zu Kr-85 angegeben und sollte annähernd dem normierten entfernungsabhängigen Verlauf des Zerfalls des Kr-89 entsprechen. Zusätzlich ist in der Abbildung der für eine Geschwindigkeit von 2 m/s in Entfernungsabhängigkeit umgerechnete Zeitverlauf des Zerfalls von Kr-89 (Boxmodell) angegeben. Die durchgezogene Gerade und die gestrichelte Linie zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Abweichungen erklären sich auf Grund der Tatsache, dass das Boxmodell mit einer homogenen Geschwindigkeit von 2 m/s unterstellt, während ARTM mit einem realistischen Windprofil arbeitet (mit sehr kleinen Windgeschwindigkeiten in Bodennähe, 2 m/s in 10 m Höhe und höheren Geschwindigkeiten in größeren Höhen).

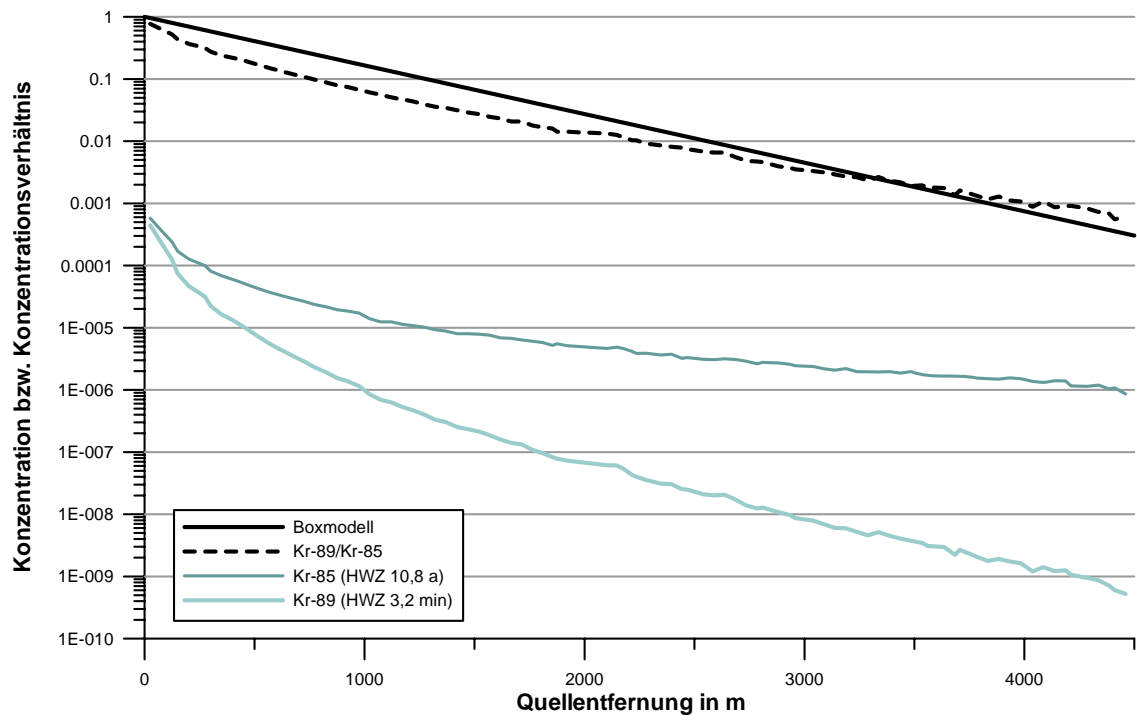


Abb. 5-7 Testrechnung Radioaktiver Zerfall

### 5.1.3 Langzeitmittelwerte bei Freisetzungen aus hohen Quellen

Der Vergleich der mit dem Gauß-Fahnenmodell einerseits und ARTM andererseits berechneten Langzeitmittelwerte erfolgte ebenfalls für eine Emissionshöhe von 150 m. Das Rechengebiet hatte eine Größe von 20 km × 20 km bei einer räumlichen Auflösung von 500 m. Basis für die Berechnungen war die einjährige Zeitreihe von meteorologischen Daten (ARTM2000.AKTERM), die der Testversion von ARTM beiliegt. Es wurden wiederum keine anderen Einflüsse auf die Ausbreitung unterstellt. Gerechnet wurde das Radionuklid Cs-137 in Form eines Schwebstoffs der Größenklasse 1 (entsprechend einem AED kleiner 2,5 µm).

Die folgenden Abbildungen Abb. 5-8 bis Abb. 5-10 zeigen die Ergebnisse der Rechnungen in Form von bodennahen Verteilungen der Größen Langzeitausbreitungsfaktor ( $\chi$ ), Langzeit-Falloutfaktor (F, trockene Deposition) und Langzeit-Washoutfaktor (W, nasse Deposition).

Die mit ARTM und AVV berechneten räumlichen Verteilungen von  $\chi$ , F und W sind einander sehr ähnlich. Die Abweichungen im Maximalwert betragen beim Langzeitausbreitungsfaktor etwa 50 %. Geringere Abweichungen ergeben sich bei der trockenen Ablagerung (8,7 %) und der nassen Ablagerung (13 %).

Die sternförmige Verteilung des Langzeit-Washoutfaktors wird durch extrem schmale laterale Fahnenbreiten (besonders bei neutraler bis stabiler thermischer Schichtung) in Kombination mit hoher Niederschlagsintensität verursacht.

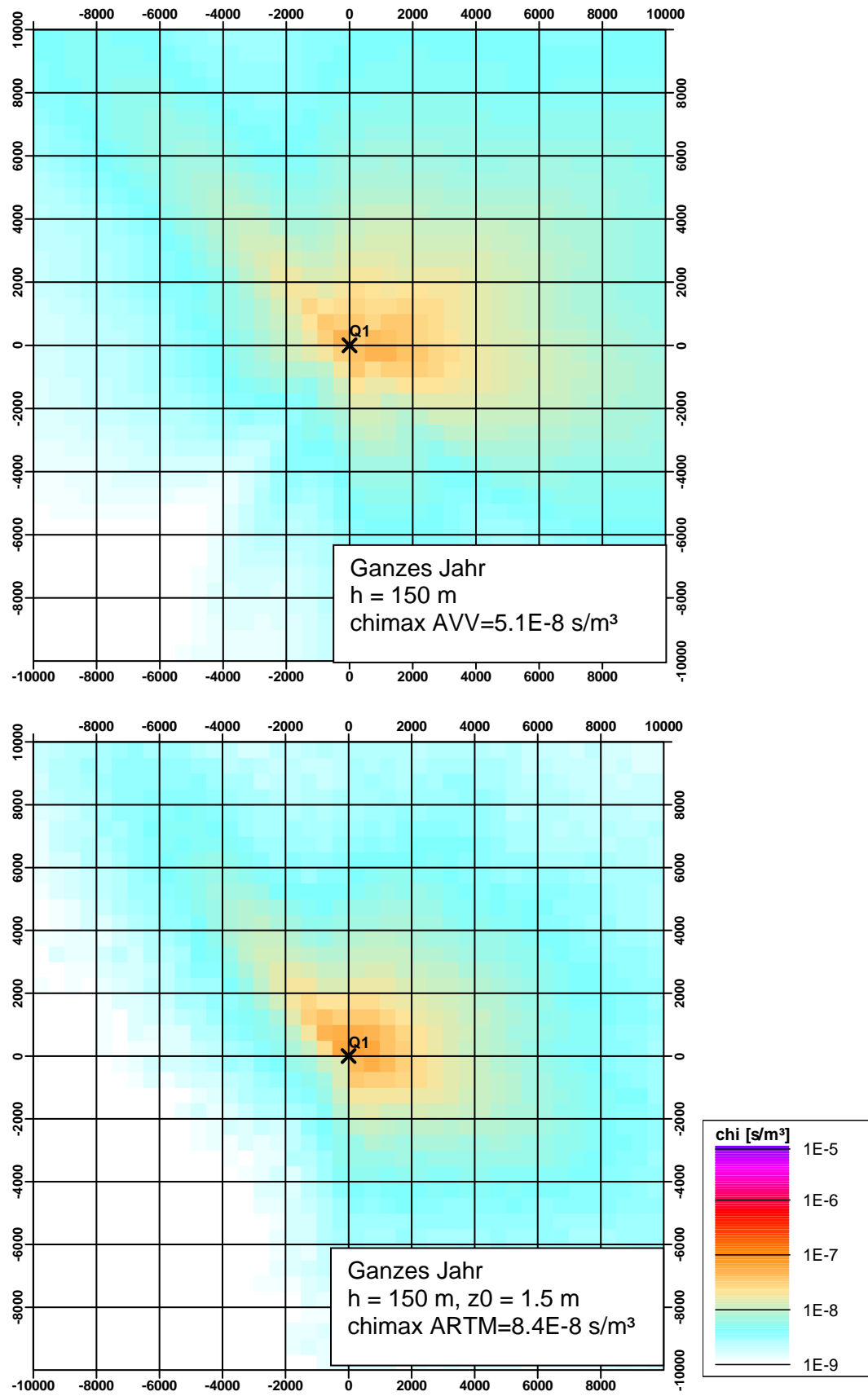


Abb. 5-8 Vergleichsrechnung Langzeitausbreitungsfaktor ( $z_0=1,5\text{m}$ ,  $u=2\text{m/s}$ ,  $h=150\text{m}$ , ARTM2000.AKTERM, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)

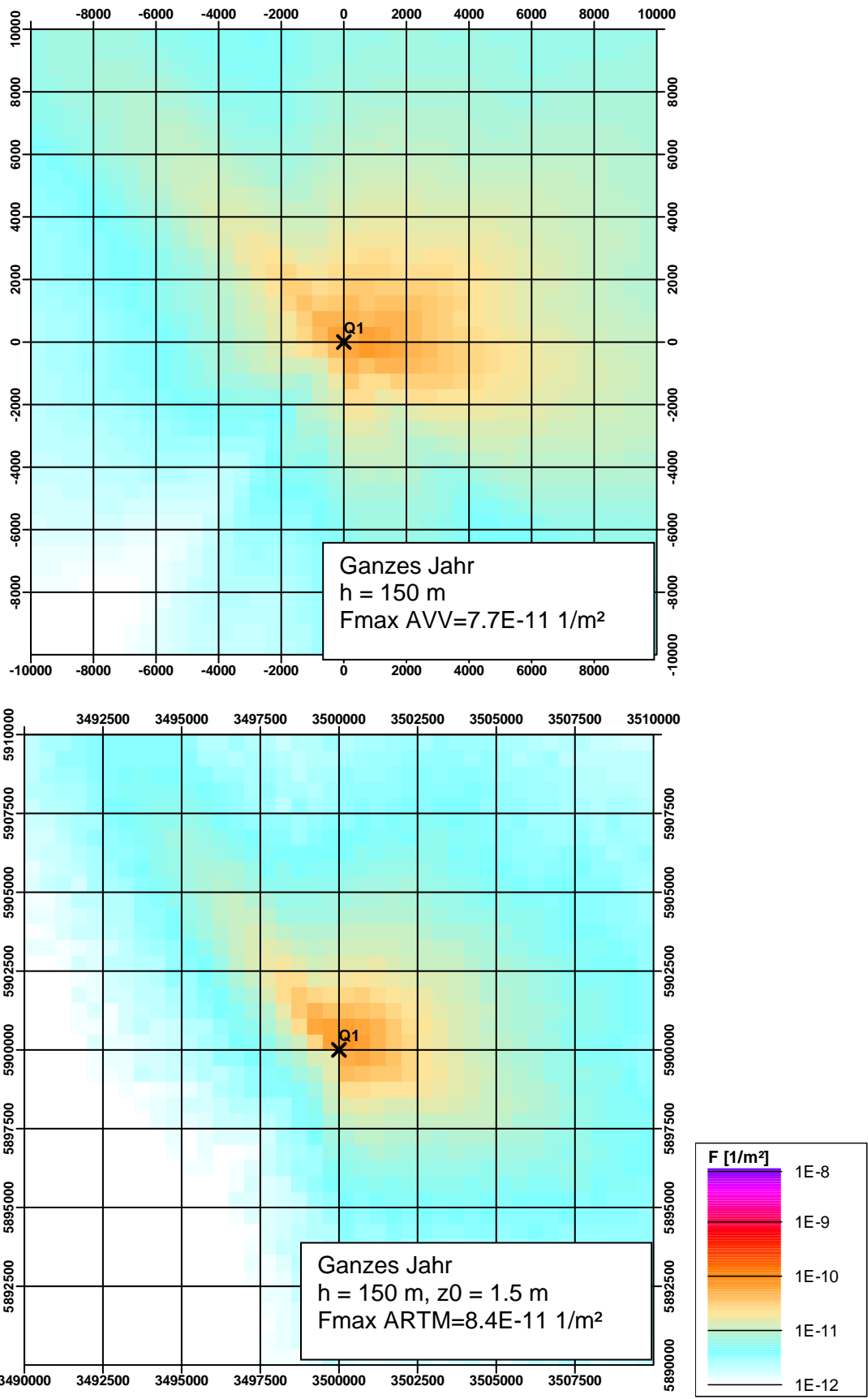


Abb. 5-9 Vergleichsrechnung Langzeit-Falloutfaktor ( $z_0=1,5\text{m}$ ,  $u=2\text{m/s}$ ,  $h=150\text{m}$ , ARTM2000.AKTERM, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)

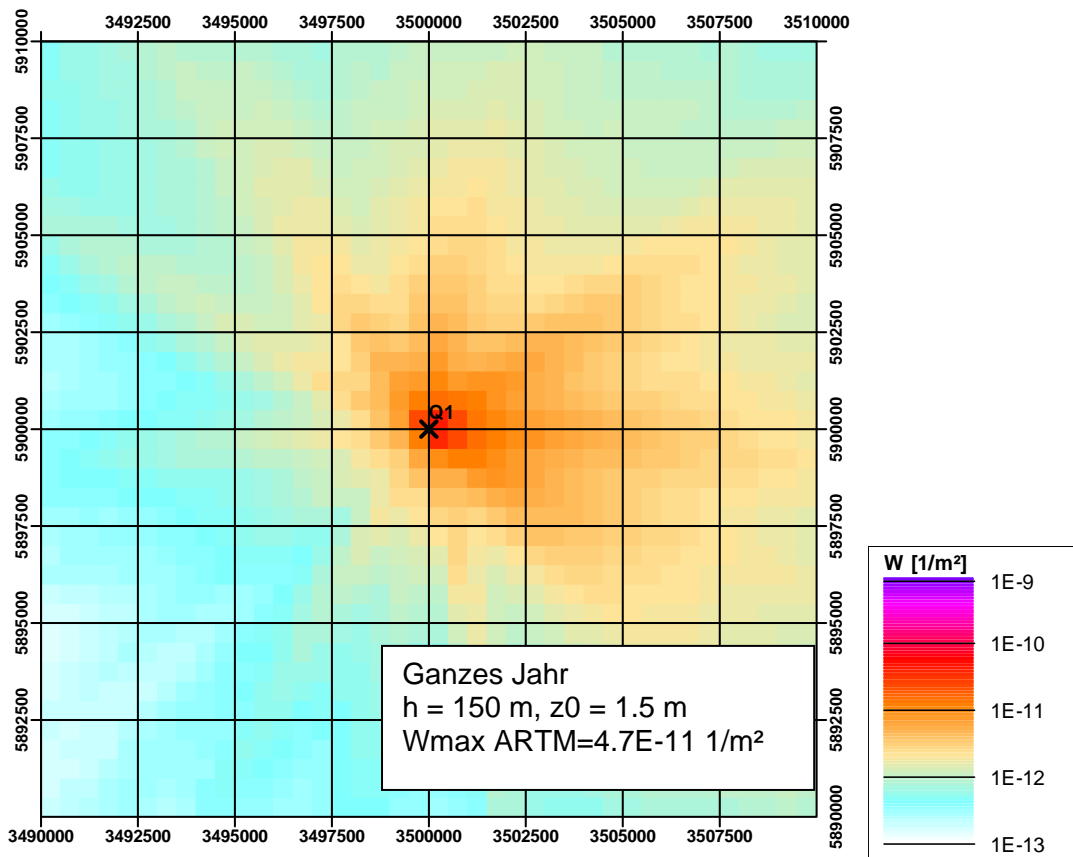
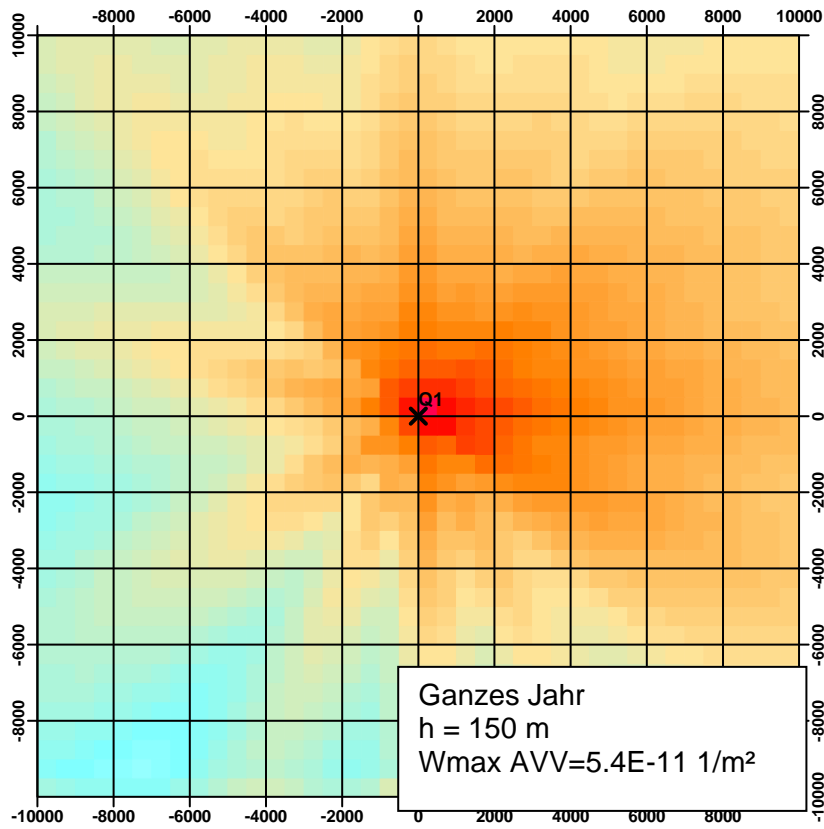


Abb. 5-10 Vergleichsrechnung Langzeit-Washoutfaktor ( $z_0=1,5\text{m}$ ,  $u=2\text{m/s}$ ,  $h=150\text{m}$ , ARTM2000.AKTERM, oben Gauß-Fahnenmodell, unten ARTM)

### 5.1.4 Langzeitausbreitungsfaktoren für Gammasubmersion

Für Vergleichsrechnungen der flächenhaften Verteilung des Langzeitausbreitungsfaktors für Gammasubmersion stand kein geeignetes Tool nach AVV zur Verfügung. Der Vergleich zwischen ARTM und AVV erfolgte deshalb auf der Basis des in Anhang 10 der AVV /AVV 05/ angegebenen Diagramms zur vereinfachten Ermittlung des Langzeitausbreitungsfaktors für Gammasubmersion in Hauptwindrichtung (s. Abb. 5-11). In diesem Diagramm sind zusätzlich die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung mit ARTM (Parameter siehe Kap. 5.1.3) für zwei verschiedenen Richtungen (s. Abb. 5-12) eingezeichnet. Die Rote Linie kennzeichnet den nach AVV maximalen Verlauf des Gamma-submersionsfaktors in Hauptausbreitungsrichtung für eine Emissionshöhe von 150 m.

Es ist zu erkennen, dass die Kurven in den beiden gewählten Richtungen bis zur minimal zu bestimmenden Entfernung unterhalb der Kurve nach Anhang 10 der AVV liegen.

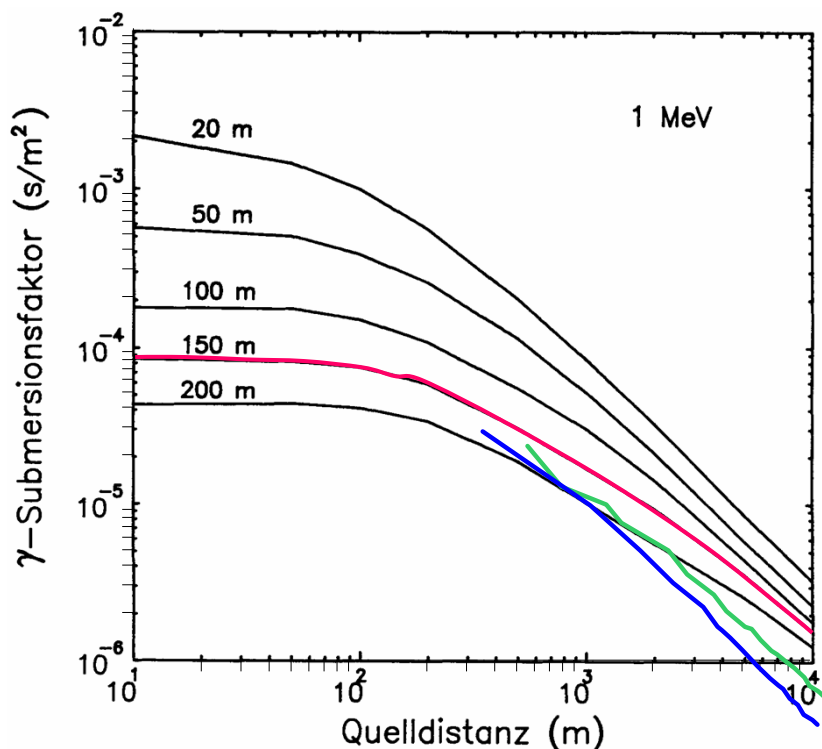


Abb. 5-11 Vergleichsrechnung des Langzeitausbreitungsfaktors für Gammasubmersion ( $z_0=1,5$  m,  $u=2$  m/s,  $h=150$  m, ARTM2000.AKTERM, rot Anhang 10 der AVV, blau und grün ARTM für zwei Ausbreitungsrichtungen, siehe Abb. 5-12)

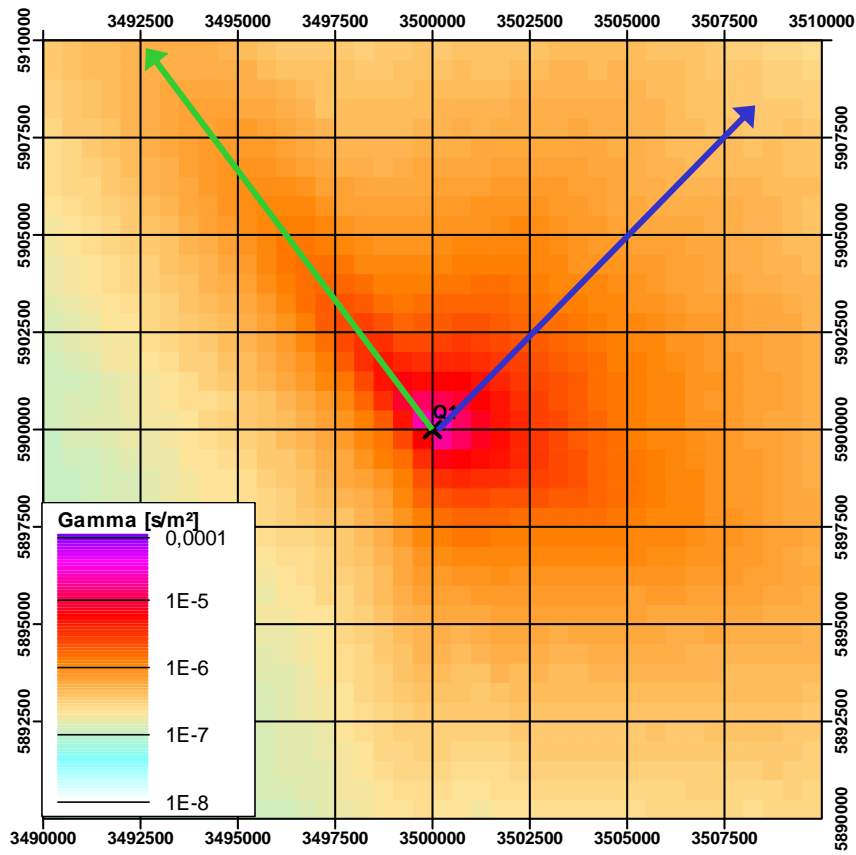


Abb. 5-12 Flächenhafte Verteilung des Langzeitausbreitungsfaktors für Gamma-submersion (ARTM,  $z_0=1,5$  m,  $u=2$  m/s,  $h=150$  m, ARTM2000.AKTERM)



## 5.2 Testbeispiele außerhalb des Anwendungsbereichs des Gauß-Fahnenmodells

Im zweiten Teil der Testrechnungen wurde ARTM für Anwendungen eingesetzt, für die das Gauß-Fahnenmodell der AVV grundsätzlich nicht geeignet ist. Dies betrifft Ausbreitungssituationen bei niedrigerer Bodenrauigkeit und geringen Freisetzungshöhen sowie die Beeinflussung des Strömungsfeldes durch Gebäude und die Geländeform (orographische Strukturen).

### 5.2.1 Einfluss der Bodenrauigkeit

Zur Ermittlung des Einflusses der Bodenrauigkeit auf die Ausbreitungsrechnungen mit ARTM wurden zusätzlich zu der bereits in Abb. 5-8 dargestellten Rechnung mit der großen Rauigkeitslänge von 1,5 m zwei weitere Rechenläufe mit kleineren Rauigkeitslängen ( $z_0 = 0,5 \text{ m}$  und  $0,02 \text{ m}$ ) durchgeführt. Im Gegensatz zu der großen Rauigkeitslänge, die für Gelände mit Baumbestand und stark wechselnder Bebauung repräsentativ ist, sind die beiden kleineren  $z_0$ -Werte typischerweise für vorstädtische Bebauung und Weideland anwendbar.

Abb. 5-13 zeigt die Ergebnisse der Rechnungen. Man erkennt, dass die Werte für den bodennahen Ausbreitungsfaktor im Vergleich zu Abb. 5-8 (unten) mit geringer werdender Bodenrauigkeit zunehmen. Die Ursache hierfür liegt an den durch den Parameter  $z_0$  beeinflussten vertikalen Windgeschwindigkeitsprofilen des Strömungsmodells von ARTM: Basierend auf der Windgeschwindigkeit in der Anemometerhöhe von 10 m wird bei einer kleiner angenommenen Bodenrauigkeit für die Emissionshöhe von 150 ein geringerer Wert für die Windgeschwindigkeit ermittelt. Dieses führt letztlich zu höheren Werten für den Ausbreitungsfaktor.

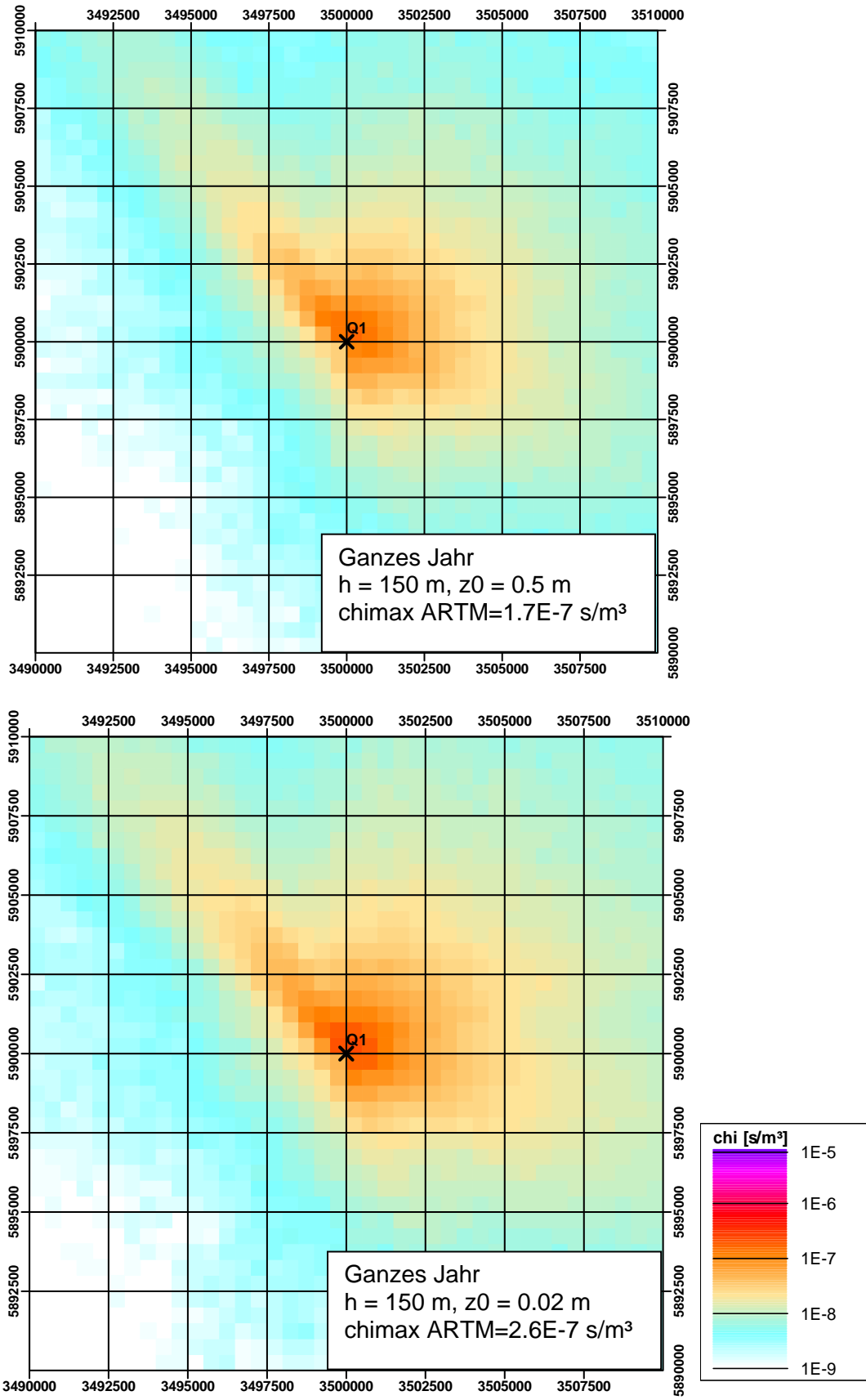


Abb. 5-13 Langzeitausbreitungsfaktoren bei verschiedenen Bodenrauigkeiten (oben  $z_0=0,5$  m, unten  $z_0=0,02$  m)

### 5.2.2 Bodennahe Freisetzungen

Die in /AVV 05/ und /SSK 04/ vorgeschriebenen Ausbreitungsparameter für das Gauß-Fahnenmodell wurden in den 70-er Jahren aus Tracer-Experimenten in der Umgebung der Forschungszentren Karlsruhe und Jülich für Emissionshöhen zwischen 60 und 195 m ( $z_0 \approx 1,5$  m) abgeleitet /GEI 81, THO 81, THO 84/. In vielen Anwendungsfällen ist die Freisetzungshöhe allerdings geringer und man kann deshalb die Ausbreitungsparameter der AVV und der SBG nur unter Vorbehalten verwenden. Das Lagrange-sche Partikelmodell in ARTM unterliegt diesen Beschränkungen hinsichtlich der Emissionshöhe nicht, weil es eine höhenabhängige Parametrisierung der Turbulenzparameter verwendet, die auf der Theorie der planetarischen Grenzschicht aufbaut /VDI 02/.

Zur Demonstration der Vielseitigkeit von ARTM wurden Rechnungen mit einer geringen Quellhöhe von 10 m (s. Abb. 5-14 oben) und zusätzlich mit einer bodennahen Flächenquelle durchgeführt, wie sie zum Beispiel bei den Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus auftreten (s. Abb. 5-14 unten).

Die Maximalwerte des Langzeitausbreitungsfaktors sind deutlich ausgeprägter und liegen, wie zu erwarten in unmittelbarer Nähe der Quelle. Bei der Flächenquelle werden unmittelbar über der Quelle die höchsten Werte erreicht.

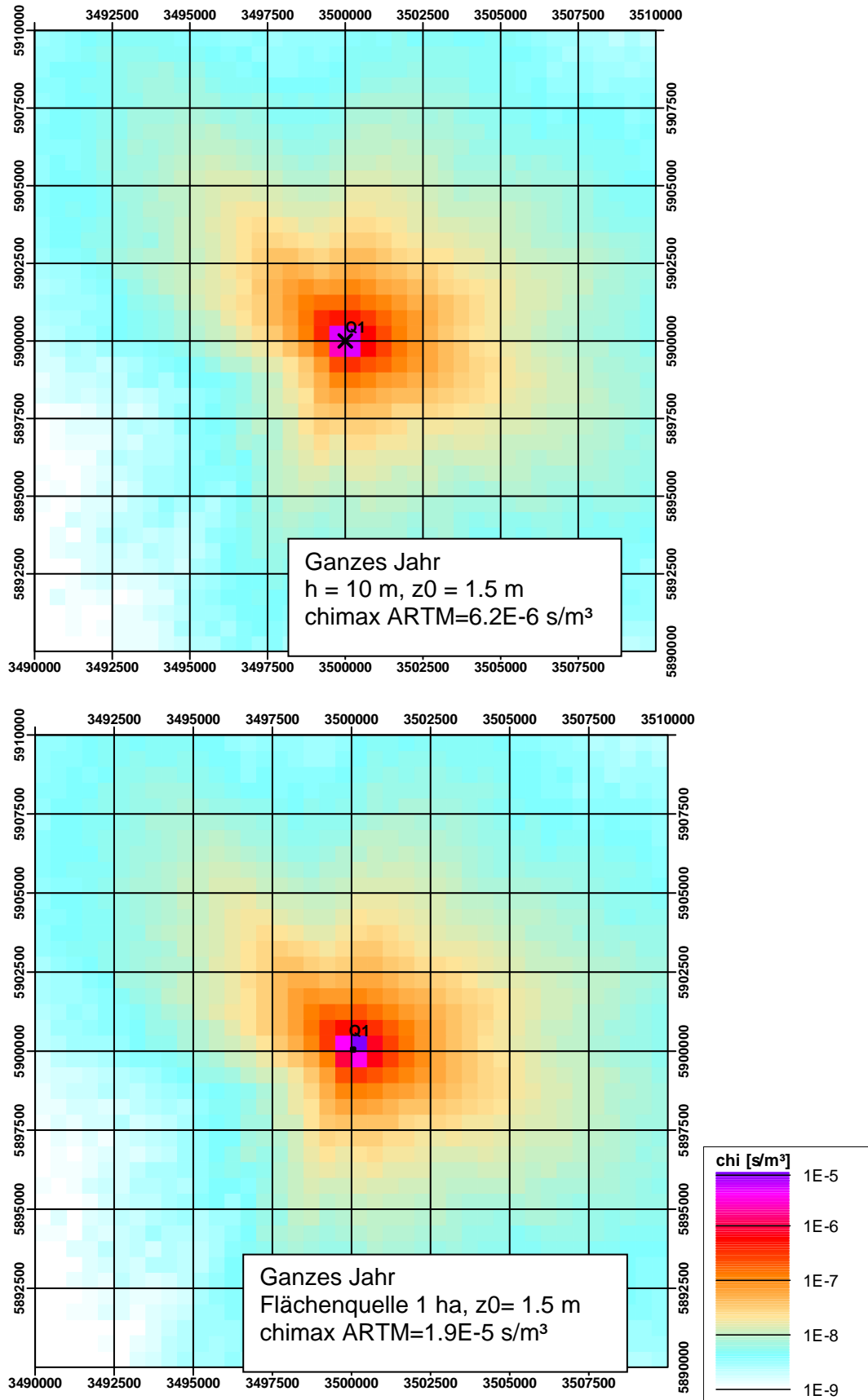


Abb. 5-14 Langzeitausbreitungsfaktoren bei geringen Freisetzungshöhen (oben  $h = 10 \text{ m}$ , unten bodennahe Flächenquelle)

### 5.2.3 Einfluss von Gebäuden

In ARTM ist das massenkonsistente Strömungsmodell TALdia der AUSTAL2000 integriert, welches direkt den Einfluss von Gebäuden auf das Strömungsfeld bestimmt.

Zur Verdeutlichung des Einflusses von Gebäuden auf die resultierende Konzentrationsverteilung, wurde für zwei verschiedene Einzelsituationen bei neutraler Schichtung mit und ohne Gebäudeeinfluss gerechnet.

- Im ersten Fall (Abb. 5-15 und Abb. 5-16) wurde nur ein relativ kleines Gebäude mit den Abmessungen 20 m x 60 m x 10 m (Länge x Breite x Höhe) und einer Quelle unmittelbar über Dachniveau ( $h = 12$  m) betrachtet. Direkt hinter dem Gebäude sind die Werte des bodennahen Kurzzeitausbreitungsfaktors etwas höher als im ungestörten Fall ohne Gebäude. Je größer die Entfernung von der Quelle ist, desto geringer ist der Einfluss. Ab einer Distanz von etwa 500 m ist praktisch kein Unterschied mehr feststellbar.

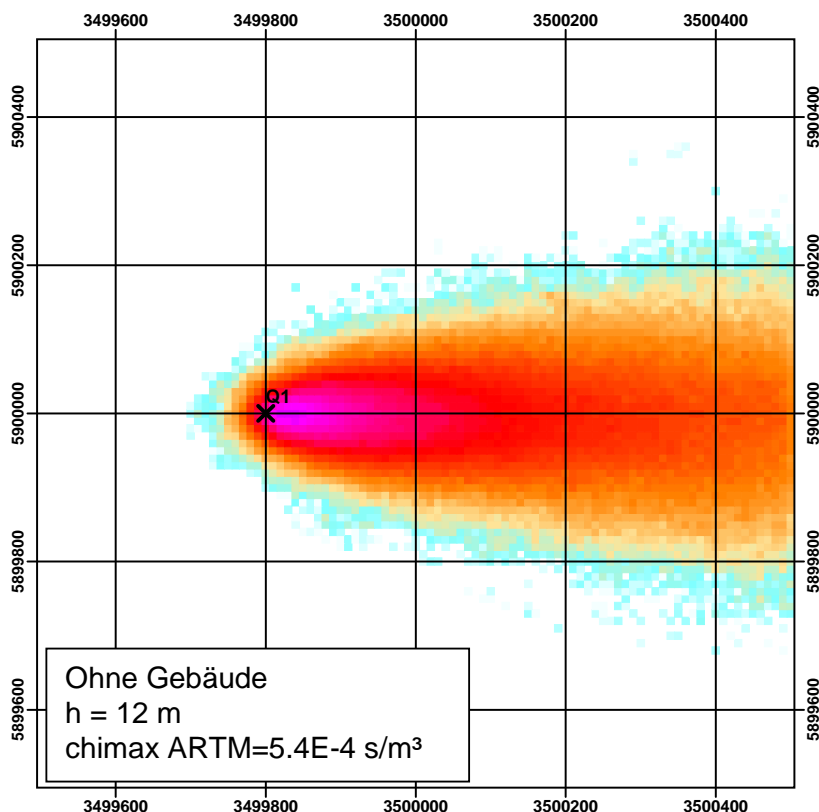


Abb. 5-15 Langzeitausbreitungsfaktoren ohne Gebäudeeinfluss ( $h = 12$  m)

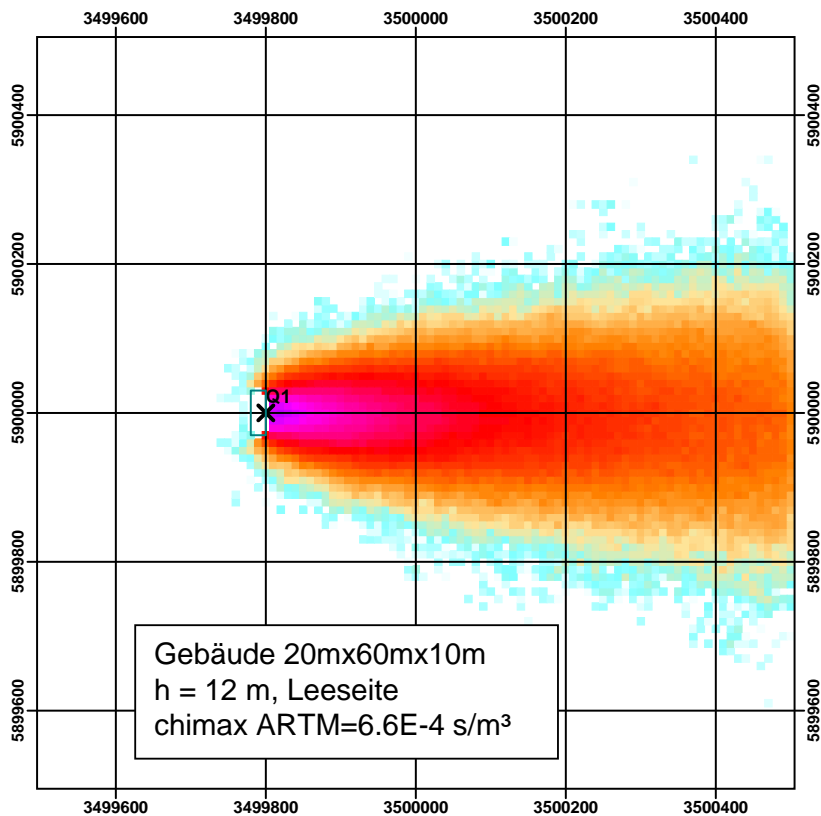


Abb. 5-16 Langzeitausbreitungsfaktoren bei Gebäudeeinfluss  
(h = 12 m, Gebäude 20 m × 60 m × 10 m)

- Der zweite Fall beschreibt eine Emission aus einer 130 m hohen Quelle, in deren Nähe zwei 100 m hohe zylindrische Kühltürme mit 60 m Durchmesser stehen. Ohne Kühltürme (Abb. 5-17) erreicht die Fahne erst etwa 200 m hinter der Quelle den Boden. Der Maximalwert des Kurzzeitausbreitungsfaktors innerhalb des Rechengebietes liegt bei  $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ s/m}^3$ . Bei Berücksichtigung der Kühltürme (Abb. 5-18) erreicht die Fahne durch die zusätzlich induzierte Turbulenz deutlich eher den Boden. Die Maximalwerte innerhalb des Rechengebietes sind um etwas weniger als einen Faktor drei höher. Der Einfluss der Kühltürme reicht deutlich weiter als bei dem kleinen Gebäude in Fall 1.

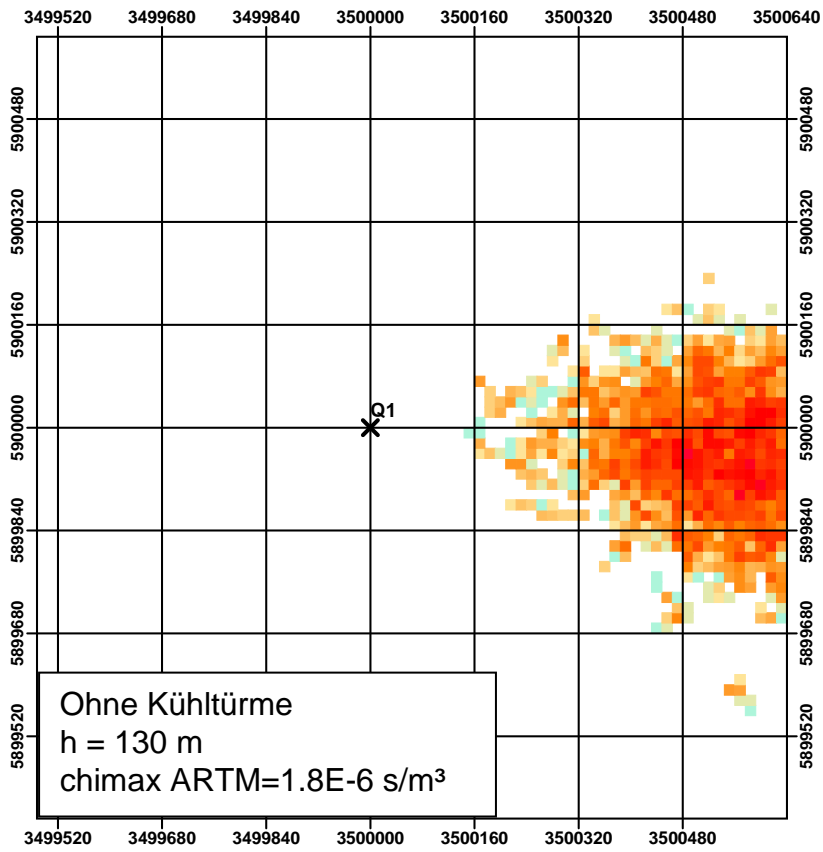


Abb. 5-17 Langzeitausbreitungsfaktoren bei Gebäudeeinfluss  
 ( $h = 130 \text{ m}$ , ohne Kühltürme)

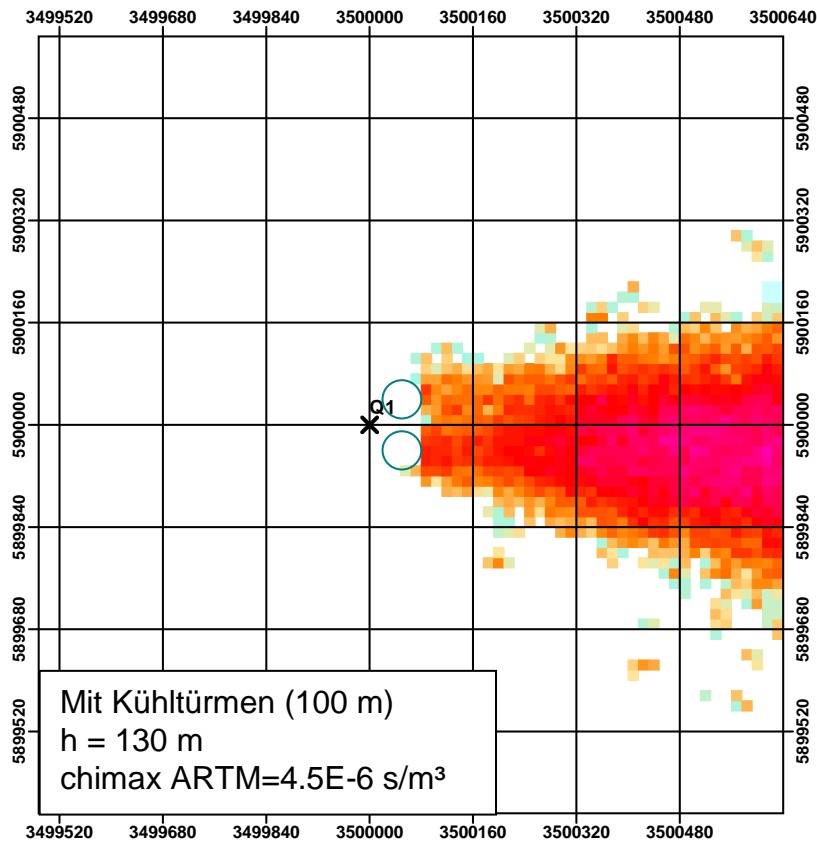


Abb. 5-18 Langzeitausbreitungsfaktoren bei Gebäudeeinfluss  
( $h = 130$  m, Kühltürme  $60$  m  $\times$   $100$  m)

### 5.2.4 Einfluss der Topografie

Das massenkonsistente Strömungsmodell TALdia in ARTM ist ebenfalls in der Lage ein, an die topografischen Verhältnisse angepasstes Strömungsfeld zu berechnen und so den Einfluss strukturierten Geländes auf die atmosphärische Ausbreitung abzubilden.

Zur Verdeutlichung des Effektes wurden mit ARTM zwei verschiedene Rechenläufe - mit und ohne Geländeberücksichtigung - durchgeführt. Als Geländedatei wurde die ARTM beiliegende Version von `tittling.grid` verwendet. Um den Geländeeinfluss deutlicher herauszuarbeiten wurde mit einer fiktiven Emissionshöhe von  $50$  m gerechnet. Die horizontale Auflösung betrug  $50$  m in einem  $5$  km  $\times$   $5$  km großen Rechengebiet. - Die Abb. 5-19 zeigt die Ergebnisse der Rechnungen. Oben ist der Langzeitausbreitungsfaktor ohne Geländeeinfluss und unten mit Berücksichtigung der Katasterdatei dargestellt. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 5-20 zusätzlich noch der Geländeverlauf als Schummerung unterlegt.



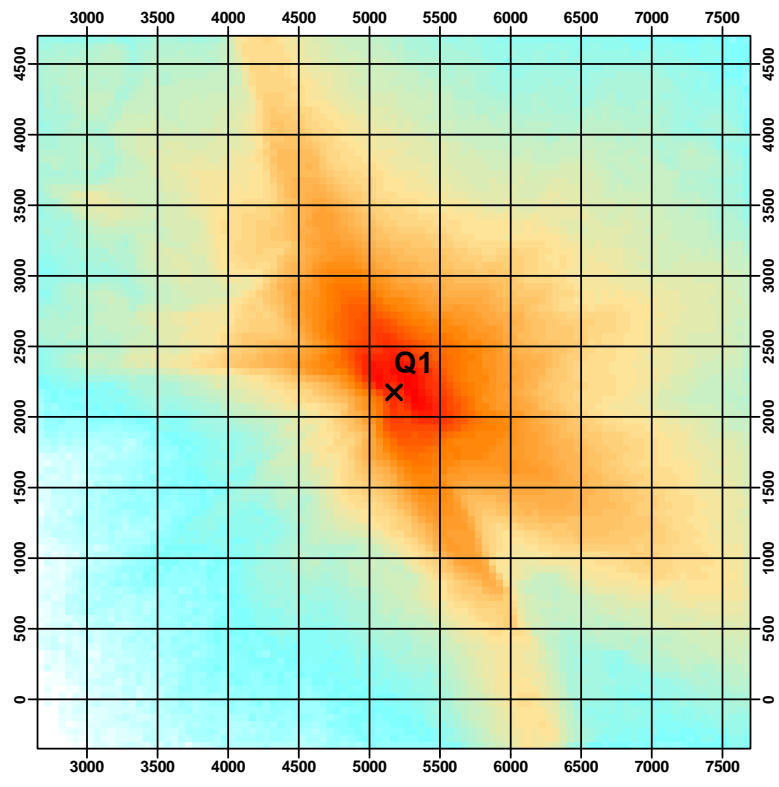
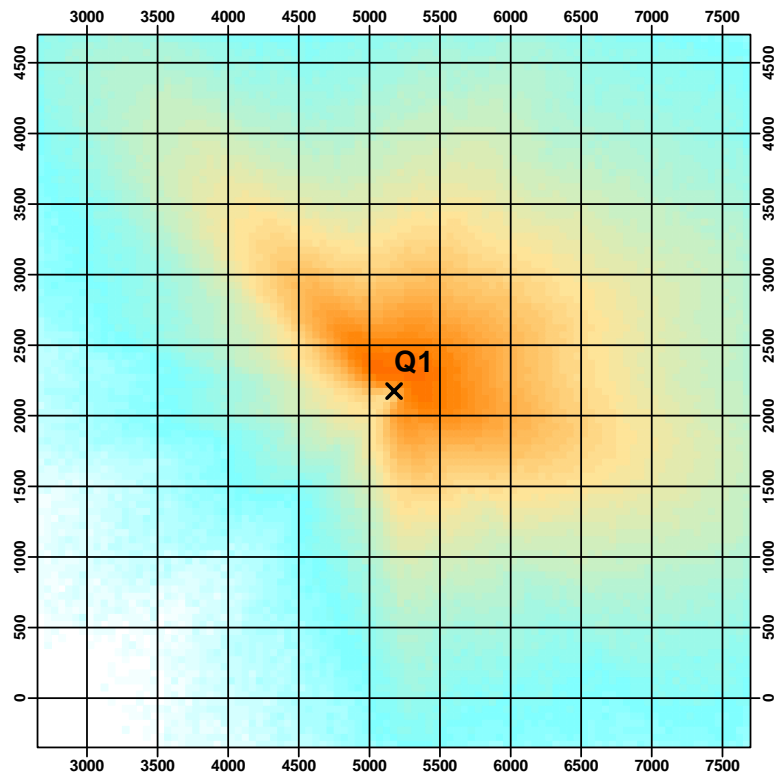


Abb. 5-19 Langzeitausbreitungsfaktor ohne Geländeeinfluss (oben) und mit Geländeeinfluss (unten)

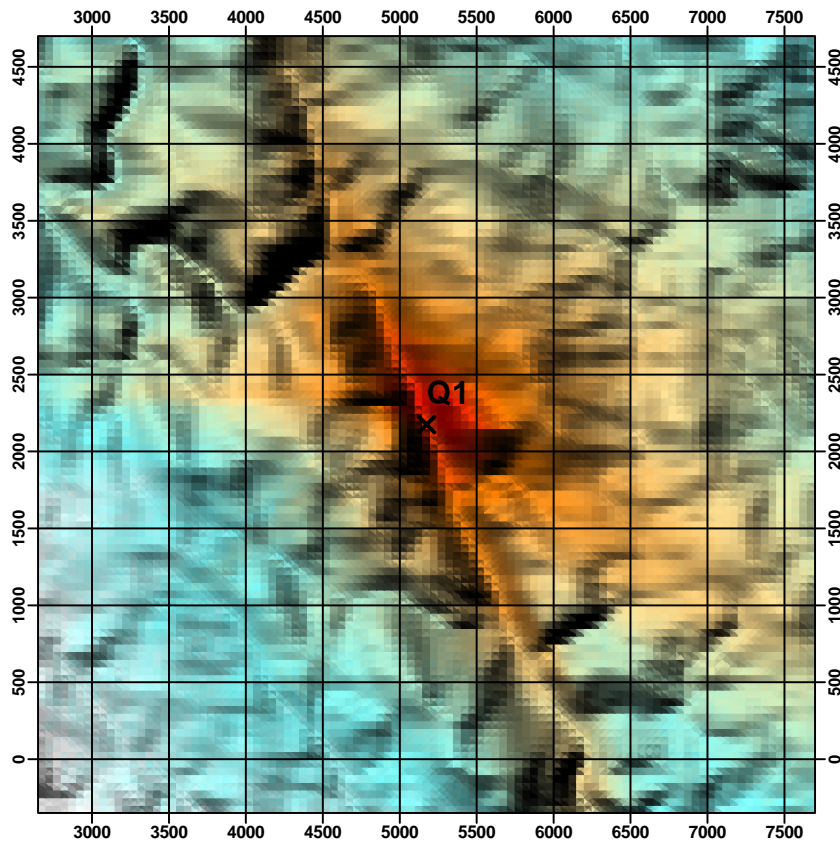


Abb. 5-20 Langzeitausbreitungsfaktor mit Geländeeinfluss und Schummerung

Man erkennt den deutlichen Einfluss der Topografie. In den Tallagen sind die Konzentrationen höher und folgen dem Talverlauf. Auch am Hang östlich des Quellortes sind die Werte aufgrund des Auflaufens der Fahne erhöht.



## 6 Testphase und Dokumentation

### 6.1 Testphase

Zur Einleitung der Testphase wurde das Modell ARTM am 29.11.2006 auf einem Workshop beim BfS in Neuherberg möglichen potenziellen Anwendern vorgestellt. An der Veranstaltung nahmen etwa 30 Vertreter aus folgenden Institutionen und Organisationen teil: BMU, BfS, Landesbehörden aus Niedersachsen, Hessen, Bayern und Sachsen, Forschungszentrum Karlsruhe, Forschungszentrum Jülich, VKTA Rossendorf, TÜV-Süd, TÜV-Rheinland, TÜV-Nord, Fachhochschule Lippe und Höxter, KE-Technologie GmbH, Brenk-Systemplanung, METCON Umweltmeteorologische Beratung, Ingenieurbüro Rau, AREVA NP GmbH, Steag Kernenergie GmbH, Siemens AG, EnergieSystemeNord GmbH. Die GRS stellte auf diesem Workshop zunächst die Inhalte des Forschungsvorhabens StSch 4443 vor. Neben den in AUSTAL2000 zusätzlich implementierten Funktionalitäten wurden auch Ergebnisse der mit ARTM durchgeführten Test- und Vergleichsrechnungen vorgestellt und mit den Teilnehmern diskutiert.

Im Anschluss daran wurde eine Einführung in die von der GRS zur einfacheren Anwendung von ARTM entwickelte Benutzeroberfläche GO-ARTM gegeben. Zum Ende der Veranstaltung wurden die Teilnehmer aufgefordert, sich an der Testphase von ARTM zu beteiligen und das Modell in Bezug auf die jeweilig erforderlichen Anwendungsfälle zu erproben. Denjenigen, die sich dazu bereit erklärten, wurden eine CD ausgehändigt, auf der sich

- das ARTM-Handbuch,
- die Modellbeschreibung von AUSTAL2000,
- der Anhang 3 der TA Luft,
- das ARTM-Modell (Version 2.5.2),
- die graphische Oberfläche GO-ARTM und

- Beispielprojekte

befanden.

Um einen möglichst großen Rückfluss von den Testern zu erhalten, wurde vereinbart, die ursprünglich auf 60 Tage befristete Testphase bis zum 31.05.2007 auszudehnen.

Während der Testphase gab es eine Reihe von überwiegend positiven Rückmeldungen und auch hilfreiche Testergebnisse, Testberichte und Anregungen, die sich zum Teil in aktualisierten Versionen von ARTM und GO-ARTM niederschlugen. Die eingegangenen Anregungen und Fehlerberichte sind in der folgenden Tab. 6-1 angegeben. Doppelt auftretende Fragen und Anregungen sind jeweils nur einmal aufgeführt. Die Relevanz von Anregungen und Fehlermeldungen im Zusammenhang mit der Benutzeroberfläche GO-ARTM wurden aufgrund der Zielstellung der Testphase (Test von ARTM) als „gering“ eingeschätzt.

Die Rückmeldungen der Anwender während der Testphase betrafen sowohl Fragen zur generellen Vorgehensweise oder zu einzelnen Parametern von ARTM als auch konkrete Fehlermeldungen bei ARTM und GO-ARTM. Bei relevanten Fehlermeldungen von ARTM wurde vom Ingenieurbüro Janicke zeitnah eine aktualisierte Version von ARTM.EXE erzeugt und von der GRS auf dem GRS-FTP-Server den Modellanwendern zum Download zur Verfügung gestellt.

Die aktuellen dort eingestellten Versionen sind ARTM 2.5.8. bzw. GO-ARTM 1.04.

Tab. 6-1 Rückmeldungen aus der ARTM-Testphase

Datum	Tester	Organisation	Inhalt	Status	Relevanz
05.12.2006	Wicke	FZK	Wunsch einer erweiterten Nuklidliste	nicht erledigt	hoch
07.12.2006	Thielen	GRS	Fehler bei Emissionszeitreihen	erledigt (ARTM 2.5.3)	hoch
14.12.2006	Wildermuth	BfS	Fragen zur Gamma-submersion	beantwortet	gering
14.12.2006	Löffler	TÜV-Nord	Fehler in GO-ARTM (unbekannte Korngrößenverteilung)	erledigt	gering
<b>15.12.2006</b>	<b>neue Version</b>	<b>GRS</b>	<b>ARTM 2.5.3 GO-ARTM 1.02</b>		
11.01.2007	Löffler	TÜV-Nord	Fragen zu Parametern	beantwortet	
			Programmabbruch	erledigt	hoch
			Ausgabe Deposition auch bei NULL-Werten	diskussionswürdig	gering
15.01.2007	Löffler	TÜV-Nord	Verwendung von met. Statistiken in KTA-Klassierung	beantwortet (nicht praktikabel)	mittel
26.01.2007	Wildermuth	BfS	Fehler im Washoutkoeffizienten bei Schwebstoffen	erledigt	hoch
<b>29.01.2007</b>	<b>Wildermuth</b>	<b>BfS</b>	<b>Statusabfrage bei Testern</b>		
29.01.2007	Möllmann-Coers	FZJ	Anfrage zu Stabilitätsabh. Anemometerhöhen	beantwortet	mittel
			Wunsch nach erweiterter Nuklidliste	nicht erledigt	hoch
07.02.2007	Möllmann-Coers	FZJ	Fehlermeldung bei Zeitreihe mit mehreren Nukliden	erledigt (ARTM 2.5.4)	Hoch
			Fehlender Konsistenzcheck in Emissionszeitreihen	offen	mittel
			Projektbrowser zum Import von nicht GO-ARTM-Projekten	offen	gering
08.02.2007	Wildermuth	BfS	unplausible radiale Linien im Washout	offen (Unplausibilitäten in VDI 3783, Blatt 8)	hoch
			Zuordnung DK in Zeitreihendatei	erledigt (Erklärung im ARTM-Handbuch)	hoch
12.02.2007	Lettmann	HLUG (Hessen)	Anmerkungen zur Bedienung von GO-ARTM	z.T. behoben	gering

Datum	Tester	Organisation	Inhalt	Status	Relevanz
28.02.2007	Nitzsche	Brenk Sys- templanung	Frage zu Herkunft von $\Lambda_0$	Beantwortet, aber Diskussionsbedarf	mittel
			fehlende Ausgabe der Luftkonzentr. bei Partikeln mit > 10 $\mu\text{m}$	Diskussionsbedarf	hoch
			repräsentative Werte für die Nieder- schlagsmengen zu hoch (Tab. 10 in Modellbeschreibung)	Diskussionsbedarf	hoch
			Frage nach Berück- sichtigung der Abreicherung	beantwortet	mittel
13.03.2007	Jung	Siemens	Einheit Deposition	bearbeitet	gering
			Projekthandling GO- ARTM	offen	gering
<b>25.04.2007</b>	<b>neue Version</b>	<b>GRS</b>	<b>ARTM 2.5.4 GO-ARTM 1.03</b>		
26.04.2007	Möllmann- Coers	FZJ	Fehler bei Gamma- submersion mit mehreren Quellen und Nukliden	behoben (ARTM 2.5.8)	hoch
08.05.2007	Wildermuth	BfS	Frage nach $z_0$ -abh. Anemometerhöhe	beantwortet	mittel
15.05.2007	Wildermuth	BfS	redaktionelle An- merkungen zum Handbuch	erledigt	mittel
30.05.2007	Beutmann	VKTA Rossendorf	Fehler in ARTM.exe	behoben	hoch
			Abbruch bei vielen Quellen und Nukli- den	behoben	hoch
			Fehlendes Dosis- modell	offen	hoch
31.05.2007	Esch	BfS	Anmerkungen zu GO-ARTM	offen	gering
31.05.2007	Löffler	TÜV-Nord	Abbruch bei kom- plexen Situationen	behoben	hoch
05.07.2007	Möllmann- Coers	FZJ	lange Rechenzeiten	offen	mittel
<b>10.08.2007</b>	<b>neue Version</b>	<b>GRS</b>	<b>ARTM 2.5.8 GO-ARTM 1.04</b>		

Im Rahmen des Vorhabens konnten nicht alle Anregungen und Rückmeldungen aus der Testphase aufgegriffen werden. Die aus Sicht der GRS wesentlichsten Anregungen, die noch keinen oder nur unvollständigen Eingang in das Modell ARTM und die Benutzeroberfläche GO-ARTM gefunden haben, sind:

- Erweiterte Standardnuklidliste,
- Ergänzung um ein nachgeschaltetes Dosismodell,

- Diskussion der Turbulenzparametrisierung in der Richtlinie VDI 3783, Blatt 8 /VDI 02/, die in der aktuellen Version unter bestimmten Bedingungen zu einer sternförmigen Verteilung des Langzeit-Washoutfaktors führen kann,
- Ausgabe der Luftkonzentration bei Partikeln  $> 10 \mu\text{m}$  zur Berechnung der Beta-submersion auch durch große Partikel,
- Klärung der Repräsentativität der in ARTM verwendeten Werte für die Niederschlagsmengen bei Rechnungen auf der Basis von Ausbreitungsklassenstatistiken.

## 6.2 Dokumentation

Die Dokumentation des Programmpakets ARTM umfasst

- Modellbeschreibung, die sich an dem Anhang 3 „Ausbreitungsrechnung der TA Luft“ orientiert und ergänzt wurde um die Beschreibung der vorgenommenen Modelländerungen (Anhang A dieses Berichtes),
- Programmbeschreibung (Anwenderhandbuch) für den praktischen Umgang mit ARTM. Die Programmbeschreibung enthält im Anhang eine Erläuterung der theoretischen Grundlagen für die vorgenommenen Modelländerungen (Anhang B dieses Berichtes).





## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen einer fachlichen Überarbeitung und der Aktualisierung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV (AVV) und der Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV (SBG) gibt es Überlegungen, das derzeit eingesetzte Gauß-Fahnenmodell durch das im Rahmen der neuen Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) vom 24. Juli 2002 eingesetzte fortschrittliche Lagrangesche Partikelmodell zu ersetzen. Hierzu wurde das für die Ausbreitung konventioneller Luftbeimengungen konzipierte Programmpaket AUSTAL2000 für die Ausbreitung luftgetragener radioaktiver Stoffe angepasst und weiterentwickelt (ARTM, Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell): In ARTM wurden u. a. Algorithmen zur Berücksichtigung der Gammawolkenstrahlung (Gamma-submersion) sowie der nassen Deposition entwickelt und in den bestehenden Quellcode der aktuellen Version von AUSTAL2000 implementiert. Des Weiteren wurden Schnittstellen zu den bestehenden Berechnungsgrundlagen SBG und AVV realisiert, d. h. Dosisberechnungen wurden nicht einbezogen; vielmehr endet die Ausbreitungsrechnung mit der Schnittstelle zum Dosisanteil der Berechnungsgrundlagen. Dies ermöglicht auch die Dosisberechnung nach anderen Dosismodellen außerhalb der Berechnungsgrundlagen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgte die Festlegung von Modellannahmen, technischen Randbedingungen und Modellparametern, die Umsetzung in das Computerprogramm ARTM, die Verifizierung und Validierung sowie eine umfangreiche Testphase mit Beteiligung vieler Anwender aus verschiedenen Institutionen. Zur Unterstützung der Modellanwender während der Testphase stand die anwenderfreundliche graphische Benutzeroberfläche GO-ARTM zur Verfügung.

Während der Bearbeitung des Vorhabens und besonders im Rahmen der Anregungen und Rückmeldungen von Modellanwendern während der Testphase ergaben sich folgende offene Fragestellungen und Vorstellungen zu Ergänzungen und Verbesserungen von ARTM:

- Erweiterung der Standardnuklidliste,
- Ausgabe der Luftkonzentration bei Partikeln  $> 10 \mu\text{m}$  zur Berechnung der Beta-submersion auch durch große Partikel,

- Diskussion der Turbulenzparametrisierung in der Richtlinie VDI 3783, Blatt 8 /VDI 02/, die mit ARTM unter bestimmten Bedingungen zu einer sternförmigen Verteilung des Langzeit-Washoutfaktors führen kann (Siehe Abb. 5-10),
- Klärung der Repräsentativität der in ARTM verwendeten Werte für die Niederschlagsmengen bei Rechnungen auf der Basis von Ausbreitungsklassenstatistiken (Siehe Tab. 10 „Klassierung der Niederschlagsraten“ in Modellbeschreibung, Anhang A dieses Berichtes).
- Entwicklung eines ARTM nachgeschalteten Dosismoduls zur flexiblen flächendeckenden Bestimmung der Strahlenexposition durch Inhalation, Gammabodenstrahlung, Gamma- und Betasubmersion sowie der Ingestion für relevante Personengruppen.

Das im Rahmen des Forschungsvorhabens StSch 4443 entwickelte und implementierte Programmsystem ARTM zur Berechnung der Ausbreitung und Deposition freigesetzter luftgetragener radioaktiver Stoffe baut auf den Vorgaben der TA Luft zur Ausbreitungsmodellierung und dem Programmpaket AUSTAL2000 auf und repräsentiert den Stand von Wissenschaft und Technik. Eine einheitliche Vorgehensweise bei konventionellen (AUSTAL2000) und radiologischen (ARTM) Anwendungen bietet eine hohe Rechtssicherheit für den Anwender. Die Simulation der atmosphärischen Ausbreitung und Deposition mit einem fortschrittlichen Lagrangeschen Partikelmodell (in Kombination mit einem Strömungsmodell und einer Turbulenzparameterisierung) für genehmigungsrechtliche Anwendungen gewährleistet gegenüber dem bisher verwendeten klassischen Gauß-Fahnenmodell eine flexiblere und realitätsnähere Modellierung.

## **8 Danksagung**

Die GRS dankt an dieser Stelle allen Teilnehmern der ARTM-Testphase aus den folgenden Institutionen und Organisationen: BMU, BfS, Landesbehörden Niedersachsen, Hessen, Bayern und Sachsen, Forschungszentrum Karlsruhe, Forschungszentrum Jülich, VKTA Rossendorf, TÜV-Süd, TÜV-Rheinland, TÜV-Nord, Fachhochschule Lippe und Höxter, KE-Technologie GmbH, Brenk-Systemplanung, METCON Umweltmeteorologische Beratung, Ingenieurbüro Rau, AREVA NP GmbH, Steag Kernenergie GmbH, Siemens AG, EnergieSystemeNord GmbH. Alle Modellanwender haben mit Ihrer Teilnahme an der Testphase und ihren kompetenten Rückmeldungen wesentlich zur Weiterentwicklung und Verbesserung von ARTM beigetragen.



## 9 Literaturverzeichnis

- /AVV 05/ Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen (Entwurf der AVV zu § 47 StrlSchV vom 13.05.2005)
- /GEI 81/ Geiß, H., Nester, K., Polster, G., Vogt, K.J., *In der Bundesrepublik Deutschland experimentell ermittelte Ausbreitungsparameter für 100 m Emissionshöhe*, Jül-Bericht 1707, KfK-Bericht 3085, 1981
- /JAC 84/ Jacob, P., Paretzke, H., Wölfel, J. *Monte Carlo Calculation an Analytical Approximation of Gamma-Ray Buildup Factors in Air*, Nuclear Science and Engineering, Vol. 87, pp. 113 – 122 (1984)  
mit ERRATUM (TABLE III: Recommended Coefficients  $a_{mn}$  of the Approximation Polynomial)
- /JAC 85/ Jacob, P., Paretzke, H. *Air-Ground Interface Correction Factors for  $\gamma$  Emitters in Air*, Health Physics, Vol. 48, pp. 183 – 191 (1985)
- /JAN 03/ Janicke, L., Janicke, U. *Entwicklung eines modellgestützten Beurteilungssystems für den anlagenbezogenen Immissionsschutz*, Abschlussbericht des UFOPLAN-Forschungsvorhabens 200 43 256, im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin, Ingenieurbüro Janicke, Dunum, Februar 2003  
herunterladbar unter:  
<http://www.austal2000.de/data/2003-07-14/a2k-1.0.6-bericht.zip>
- /KTA 02/ Sicherheitstechnische Regel des KTA, *KTA 1503.1 – Überwachung der Ableitung gasförmiger und an Schwebstoffen gebundener radioaktiver Stoffe, Teil 1: Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Kaminfortluft bei bestimmungsgemäßem Betrieb*, Fassung 6/02, Bundesanzeiger Nr. 172 a, vom 13.09.2002
- /SBG 94/ Bekanntmachung einer Empfehlung der Strahlenschutzkommission: Neufassung des Kapitels 4 "Berechnung der Strahlenexposition" der Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien<sup>1</sup> zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR gemäß § 28, Abs. 3 StrlSchV. Bundesanzeiger Nr. 222a vom 26.11.1994
- /SSK 04/ Empfehlung der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV, Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition. Berichte der SSK, Heft 44 (2004).

---

<sup>1</sup> Störfall-Leitlinien vom 18.10.1983, Bundesanzeiger Nr. 245a vom 31.12.1983

- /TAL 02a/ Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002. Gemeinsames Ministerialblatt vom 30. Juli 2002 (GMBI. 2002, Heft 25 – 29, S. 511 – 605),  
<http://www.bmu.de/download/dateien/taluft.pdf>
- /TAL 02b/ AUSTAL2000, Ausbreitungsprogramm zum Anhang 3 „Ausbreitungsrechnung“ der neuen Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft.  
<http://www.austal2000.de/austal2000.htm>,  
[http://www.grs.de/top\\_themen/go\\_austal.html](http://www.grs.de/top_themen/go_austal.html)
- /THO 81/ Thomas, P.; Nester, K., *Experimental Determination of the Atmospheric Dispersion Parameters at the Karlsruhe Nuclear Research Center for 60 m and 100 m Emission Heights, Part 2: Evaluation of Measurements*, KfK-Bericht 3091, 1981
- /THO 84/ Thomas, P., Nester, K., *Experimental Determination of the Atmospheric Dispersion Parameters at the Karlsruhe Research Center for 160 m and 195 m Emission Heights, Part II: Evaluation of the Measurements*, KfK-Bericht 3457, 1984
- /VDI 00/ Verein Deutscher Ingenieure, *Umweltmeteorologie, Partikelmodell*, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, VDI 3945, Blatt 3, September 2000, Beuth-Verlag, 2000
- /VDI 02/ Verein Deutscher Ingenieure, *Umweltmeteorologie, Messwertgestützte Turbulenzparameterisierung für Ausbreitungsmodelle*, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, VDI 3783, Blatt 8, Dezember 2002, Beuth-Verlag, 2002

**A 1. ARTM (Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell)  
Modellbeschreibung - Stand 21.09.2007**





# ARTM

(Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell)

Modellbeschreibung

Stand 2007-09-21

Ingenieurbüro Janicke, Dunum  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln

im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz



## Inhaltsverzeichnis

1	<b>Allgemeines .....</b>	<b>1</b>
2	<b>Festlegung der Emissionen .....</b>	<b>2</b>
3	<b>Radioaktiver Zerfall.....</b>	<b>5</b>
4	<b>Ausbreitungsrechnung für radioaktive Gase .....</b>	<b>5</b>
5	<b>Ausbreitungsrechnung für radioaktive Stäube .....</b>	<b>5</b>
6	<b>Bestimmung der Gammawolkenstrahlung (Gammasubmersion) .....</b>	<b>6</b>
7	<b>Bodenrauigkeit .....</b>	<b>7</b>
8	<b>Effektive Quellhöhe.....</b>	<b>9</b>
9	<b>Rechengebiet und Aufpunkte .....</b>	<b>9</b>
10	<b>Meteorologische Daten.....</b>	<b>10</b>
10.1	Allgemeines.....	10
10.2	Windrichtung .....	10
10.3	Windgeschwindigkeit.....	11
10.4	Niederschlag .....	12
10.5	Monin–Obukhov–Länge .....	12
10.6	Mischungsschichthöhe.....	12
10.7	Verdrängungshöhe.....	13
11	<b>Berücksichtigung der statistischen Unsicherheit.....</b>	<b>13</b>
12	<b>Berücksichtigung von Bebauung .....</b>	<b>14</b>
13	<b>Berücksichtigung von Geländeunebenheiten .....</b>	<b>14</b>
14	<b>Verwendung einer Häufigkeitsverteilung der stündlichen Ausbreitungssituationen .....</b>	<b>15</b>



## 1 Allgemeines

Die Ausbreitungsrechnung für radioaktive Gase und Stäube ist als Zeitreihenrechnung über jeweils ein Jahr bzw. für die Vegetationsperiode (Sommerhalbjahr vom 1. Mai bis zum 31. Oktober) oder auf der Basis einer mehrjährigen Häufigkeitsverteilung von Ausbreitungssituationen (Ganzjahr bzw. Sommerhalbjahr) nach dem hier beschriebenen Verfahren unter Verwendung des Partikelmodells der Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (Ausgabe September 2000) und unter Berücksichtigung weiterer im folgenden aufgeführter Richtlinien durchzuführen.

Das Ausbreitungsmodell liefert bei Verwendung einer Zeitreihenrechnung bzw. einer Häufigkeitsverteilung gemäß Kapitel 14 dieser Modellbeschreibung auf dem vorgegebenen Rechenraster die entsprechenden Jahres- bzw. Halbjahresmittelwerte der Aktivitätskonzentration eines Radionuklids (als Aktivität/Volumen), der Deposition (als Aktivität/(Fläche · Zeit)) sowie das aus Emissionsmassenstrom (als Aktivität/Zeit) und Kurzzeitausbreitungsfaktor für Gammasubmersion (als Zeit/Fläche) gebildete Produkt (als Aktivität/Fläche).

Zusätzlich liefert das Ausbreitungsmodell bei einer Zeitreihenrechnung für jede Stunde des Jahres an vorgegebenen Beurteilungspunkten die Aktivitätskonzentration eines Radionuklids (als Aktivität/Volumen).

Die Ergebnisse einer Rechnung auf dem vorgegebenen Rechenraster dienen der Bestimmung der ungünstigsten Einwirkungsstelle im Hinblick auf die zu betrachtenden Expositionspfade:

- a) Betastrahlung innerhalb der Abluffahne (Betasubmersion)
- b) Exposition durch Gammastrahlung aus der Abluffahne (Gammasubmersion)
- c) Exposition durch Gammastrahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe (Bodenstrahlung)
- d) Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation)
- e) Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung (Ingestion)

Die Ergebnisse an den Beurteilungspunkten sind die Grundlage für die Bestimmung der zusätzlichen Strahlenexposition und dienen, gegebenenfalls zusammen mit der Zeitreihe der gemessenen Vorbelastungswerte, der Bestimmung der Gesamtexposition an der ungünstigsten Einwirkungsstelle.

## 2 Festlegung der Emissionen

Emissionsquellen sind die festzulegenden Stellen des Übertritts von radioaktiven Luftverunreinigungen aus der Anlage in die Atmosphäre. Die standardmäßig zu berücksichtigenden Radionuklide finden sich für die wichtigsten chemisch-physikalischen Formen zusammen mit den zur Berechnung der Aktivitätskonzentration, der trockenen und nassen Deposition sowie der Gammasubmersion erforderlichen Parameter in Tabelle 1.

Tabelle 1 Liste der berücksichtigten Radionuklide und der verwendeten Parameter

Nuklid	Name	Form*)	Washout- koeffizient**) in 1/s	Depositions- geschwindigkeit in m/s	Zerfalls- konstante in 1/s	Anteil > 0,2 MeV
H - 3	Tritium	W	0	0,00E+00	$1,78 \cdot 10^{-9}$	0,00
H - 3	Tritium	A	Siehe Tabelle 2		$1,78 \cdot 10^{-9}$	0,00
C - 14	Kohlenstoff-14	A	Siehe Tabelle 2		$3,84 \cdot 10^{-12}$	0,00
C - 14	Kohlenstoff-14	GB	0	0	$3,84 \cdot 10^{-12}$	0,00
C - 14	Kohlenstoff-14	R	0	0	$3,84 \cdot 10^{-12}$	0,00
S - 35	Schwefel	A	Siehe Tabelle 2		$9,18 \cdot 10^{-8}$	0,00
Ar - 41	Argon-41	E	0	0	$1,05 \cdot 10^{-4}$	1,00
Ca - 41	Calcium-41	A	Siehe Tabelle 2		$1,57 \cdot 10^{-13}$	0,00
Ca - 45	Calcium-45	A	Siehe Tabelle 2		$4,92 \cdot 10^{-8}$	0,00
Cr - 51	Calcium-51	A	Siehe Tabelle 2		$2,90 \cdot 10^{-7}$	0,97
Mn - 54	Mangan-54	A	Siehe Tabelle 2		$2,57 \cdot 10^{-8}$	1,00
Fe - 55	Eisen-55	A	Siehe Tabelle 2		$8,14 \cdot 10^{-9}$	0,00
Fe - 59	Eisen-59	A	Siehe Tabelle 2		$1,80 \cdot 10^{-7}$	0,99
Co - 57	Kobalt-57	A	Siehe Tabelle 2		$2,97 \cdot 10^{-8}$	0,01
Co - 58	Kobalt-58	A	Siehe Tabelle 2		$1,13 \cdot 10^{-7}$	1,00
Co - 60	Kobalt-60	A	Siehe Tabelle 2		$4,18 \cdot 10^{-9}$	1,00
Ni - 59	Nickel-59	A	Siehe Tabelle 2		$2,93 \cdot 10^{-13}$	0,00

Nuklid	Name	Form*)	Washout- koeffizient**) in 1/s	Depositions- geschwindigkeit in m/s	Zerfalls- konstan- te in 1/s	Anteil > 0,2 MeV
Ni - 63	Nickel-63	A	Siehe Tabelle 2		$2,29 \cdot 10^{-10}$	0,00
Zn - 65	Zink-65	A	Siehe Tabelle 2		$3,29 \cdot 10^{-8}$	1,00
Kr - 85m	Krypton-85m	E	0	0	$4,30 \cdot 10^{-5}$	0,27
Kr - 85	Krypton-85	E	0	0	$2,05 \cdot 10^{-9}$	0,81
Kr - 87	Krypton-87	E	0	0	$1,52 \cdot 10^{-4}$	0,99
Kr - 88	Krypton-88	E	0	0	$6,78 \cdot 10^{-5}$	0,97
Kr - 89	Krypton-89	E	0	0	$3,61 \cdot 10^{-3}$	1,00
Rb - 88	Rubidium-88	A	Siehe Tabelle 2		$6,49 \cdot 10^{-4}$	0,99
Sr - 89	Strontium-89	A	Siehe Tabelle 2		$1,59 \cdot 10^{-7}$	1,00
Sr - 90	Strontium-90	A	Siehe Tabelle 2		$7,55 \cdot 10^{-10}$	0,00
Y - 90	Yttrium-90	A	Siehe Tabelle 2		$3,00 \cdot 10^{-6}$	0,00
Zr - 93	Zirconium-93	A	Siehe Tabelle 2		$1,44 \cdot 10^{-14}$	0,00
Zr - 95	Zirconium-95	A	Siehe Tabelle 2		$1,25 \cdot 10^{-7}$	1,00
Nb - 95	Niob-95	A	Siehe Tabelle 2		$2,28 \cdot 10^{-7}$	1,00
Tc - 99m	Technetium-99m	A	Siehe Tabelle 2		$3,21 \cdot 10^{-5}$	0,00
Tc - 99	Technetium-99	A	Siehe Tabelle 2		$1,03 \cdot 10^{-13}$	0,00
Ru - 103	Ruthenium-103	A	Siehe Tabelle 2		$2,04 \cdot 10^{-7}$	1,00
Ru - 106	Ruthenium-106	A	Siehe Tabelle 2		$2,19 \cdot 10^{-8}$	0,00
Ag - 110m	Silber-110m	A	Siehe Tabelle 2		$3,21 \cdot 10^{-8}$	1,00
Te - 123m	Tellur-123m	A	Siehe Tabelle 2		$1,34 \cdot 10^{-7}$	1,00
Sb - 124	Antimon-124	A	Siehe Tabelle 2		$7,93 \cdot 10^{-9}$	0,94
Sb - 125	Antimon-125	A	Siehe Tabelle 2		$6,70 \cdot 10^{-8}$	0,00
I - 131	Jod-131	L	$7 \cdot 10^{-5}$	0,01	$9,98 \cdot 10^{-7}$	0,99
I - 131	Jod-131	R	$7 \cdot 10^{-7}$	0,0001	$9,98 \cdot 10^{-7}$	0,99
I - 131	Jod-131	A	Siehe Tabelle 2		$9,98 \cdot 10^{-7}$	0,99
I - 133	Jod-133	L	$7 \cdot 10^{-5}$	0,01	$9,26 \cdot 10^{-6}$	1,00
I - 133	Jod-133	R	$7 \cdot 10^{-7}$	0,0001	$9,26 \cdot 10^{-6}$	1,00
I - 133	Jod-133	A	Siehe Tabelle 2		$9,26 \cdot 10^{-6}$	1,00
Xe - 131m	Xenon-131m	E	0	0	$6,74 \cdot 10^{-7}$	0,00
Xe - 133m	Xenon-133m	E	0	0	$3,55 \cdot 10^{-6}$	0,57
Xe - 133	Xenon-133	E	0	0	$1,53 \cdot 10^{-6}$	0,00
Xe - 135m	Xenon-135m	E	0	0	$7,56 \cdot 10^{-4}$	0,99
Xe - 135	Xenon-135	E	0	0	$2,12 \cdot 10^{-5}$	0,99
Xe - 137	Xenon-137	E	0	0	$2,96 \cdot 10^{-3}$	1,00
Xe - 138	Xenon-138	E	0	0	$8,15 \cdot 10^{-4}$	0,99



Nuklid	Name	Form <sup>*)</sup>	Washout- koeffizient <sup>**)</sup> in 1/s	Depositions- geschwindigkeit in m/s	Zerfalls- konstan- te in 1/s	Anteil > 0,2 MeV
Cs - 134	Caesium-134	A	Siehe Tabelle 2		$1,07 \cdot 10^{-8}$	1,00
Cs - 137	Caesium-137	A	Siehe Tabelle 2		$7,32 \cdot 10^{-10}$	0,00
Ba - 140	Barium-140	A	Siehe Tabelle 2		$6,30 \cdot 10^{-7}$	0,92
La - 140	Lanthan-140	A	Siehe Tabelle 2		$4,79 \cdot 10^{-6}$	1,00
Ce - 141	Cer-141	A	Siehe Tabelle 2		$2,48 \cdot 10^{-7}$	0,00
Ce - 144	Cer-144	A	Siehe Tabelle 2		$2,82 \cdot 10^{-8}$	0,00
Hg - 197	Quecksilber	A	Siehe Tabelle 2		$1,72 \cdot 10^{-7}$	0,96
Hg - 197	Quecksilber	L	$7 \cdot 10^{-5}$	0,01	$1,72 \cdot 10^{-7}$	0,96
Hg - 197	Quecksilber	R	$7 \cdot 10^{-7}$	0,0001	$1,72 \cdot 10^{-7}$	0,96
U - 234	Uran-234	A	Siehe Tabelle 2		$8,99 \cdot 10^{-14}$	0,00
U - 235	Uran-235	A	Siehe Tabelle 2		$2,98 \cdot 10^{-17}$	0,08
U - 238	Uran-238	A	Siehe Tabelle 2		$4,92 \cdot 10^{-18}$	0,00
Pu - 238	Plutonium-238	A	Siehe Tabelle 2		$2,51 \cdot 10^{-10}$	0,00
Pu - 239	Plutonium-239	A	Siehe Tabelle 2		$9,13 \cdot 10^{-13}$	0,03
Pu - 240	Plutonium-240	A	Siehe Tabelle 2		$3,36 \cdot 10^{-12}$	0,00
Am - 241	Americium-241	A	Siehe Tabelle 2		$5,09 \cdot 10^{-11}$	0,00
Cm - 242	Curium-242	A	Siehe Tabelle 2		$4,93 \cdot 10^{-8}$	0,00
Cm - 244	Curium-244	A	Siehe Tabelle 2		$1,42 \cdot 10^{-9}$	0,00

*)	Form:	Bedeutung:
	A	Schwebstoff (früher Aerosol)
	E	Edelgas
	G	gasförmig
	GB	gasförmig als CO <sub>2</sub>
	L	elementare Form
	R	organisch
	W	Wasser

\*\*) stoffspezifischer Washoutkoeffizient  $\Lambda_0$  für die Niederschlagsintensität  $I_0 = 1 \text{ mm/h}$

Die bei der Ableitung der Emissionen vorliegenden Freisetzungsbedingungen sind zu berücksichtigen.

Die Emissionsparameter der Emissionsquelle (Emissionsmassenstrom, Abgastemperatur, Abgasvolumenstrom) sind als Stundenmittelwerte anzugeben. Bei zeitlichen Schwankungen der Emissionsparameter, z.B. bei Chargenbetrieb, sind diese als Zeit-

reihe anzugeben. Ist eine solche Zeitreihe nicht verfügbar oder verwendbar, sind die beim bestimmungsgemäßen Betrieb für die Luftreinhaltung ungünstigsten Betriebsbedingungen einzusetzen. Hängt die Quellstärke von der Windgeschwindigkeit ab (windinduzierte Quellen), so ist dies entsprechend zu berücksichtigen.

### 3 Radioaktiver Zerfall

Der während des Ausbreitungsprozesses wirkende radioaktive Zerfall der Radionuklide wird über die aus Tabelle 1 zu entnehmenden Zerfallskonstanten berücksichtigt. Der Aufbau von radioaktiven Tochternukliden wird bei der Ausbreitungsrechnung nicht berücksichtigt. Die Berücksichtigung der Tochternuklide bei der Berechnung der Strahlenexposition erfolgt nach Maßgabe der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV<sup>1)</sup>.

### 4 Ausbreitungsrechnung für radioaktive Gase

Bei nicht deponierenden Gasen ist die Ausbreitungsrechnung ohne Berücksichtigung von Deposition durchzuführen. Bei Gasen, die trocken oder nass deponieren können, sind die in Tabelle 1 angegebenen Werte für die Depositionsgeschwindigkeit <sup>2)</sup>  $v_d$  sowie für die Washoutkoeffizienten  $\Lambda_0$  zu verwenden.

### 5 Ausbreitungsrechnung für radioaktive Stäube

Bei der Ausbreitungsrechnung für radioaktive (Schwebstoffe) Stäube sind trockene und nasse Deposition sowie Sedimentation für die in Tabelle 1 den Schwebstoffen zugeordneten Radionuklide zu berücksichtigen. Die dabei zu verwendenden Depositions-

---

<sup>1)</sup> Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen (Entwurf der AVV zu § 47 StrlSchV vom 13.05.2005)

<sup>2)</sup> In der TA Luft bezeichnet  $v_d$  Depositionsgeschwindigkeit. Dagegen verwendet der Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung für die Depositionsgeschwindigkeit die Bezeichnung  $v_g$ .

und Sedimentationsgeschwindigkeiten und Washoutkoeffizienten finden sich in Tabelle 1 und Tabelle 2. Die Ausbreitungsrechnung ist für folgende Größenklassen der Korngrößenverteilung, angegeben als aerodynamischer Durchmesser  $d_a$ , des Emissionsmassenstromes durchzuführen, wobei jeweils die angegebenen Werte von Depositionsgeschwindigkeit  $v_d$  und Sedimentationsgeschwindigkeit  $v_s$  zu verwenden sind:

Tabelle 2: Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeiten sowie stoffspezifischer Washoutkoeffizient für die Niederschlagsintensität  $I_0 = 1 \text{ mm/h}$  für Stäube

Klasse	$d_a$ in $\mu\text{m}$	Depositionsgeschwindigkeit $v_d$ in m/s	Sedimentationsgeschwindigkeit $v_s$ in m/s	Washoutkoeffizient $\Lambda_0$ in 1/s für Niederschlagsintensität $I_0=1\text{mm/h}$
1	kleiner 2,5	0,001	0,00	$1 \cdot 10^{-4}$
2	2,5 bis 10	0,01	0,00	$2 \cdot 10^{-4}$
3	10 bis 50	0,05	0,04	$3 \cdot 10^{-4}$
4	größer 50	0,20	0,15	$4 \cdot 10^{-4}$

Die Ausbreitungsrechnung für eine Korngrößenklasse ist mit dem Emissionsmassenstrom der betreffenden Korngrößenklasse durchzuführen. Für die Berechnung der Deposition des gesamten Staubes sind die Depositionswerte der Korngrößenklassen zu addieren. Die Einzelwerte der Konzentration für PM-10 (aerodynamischer Durchmesser kleiner als  $10 \mu\text{m}$ ) bestehen aus der Summe der Einzelwerte der Konzentration der Korngrößenklassen 1 und 2.

Ist die Korngrößenverteilung nicht im Einzelnen bekannt, dann ist PM-10 wie Staub der Klasse 2 zu behandeln. Für Staub mit einem aerodynamischen Durchmesser größer als  $10 \mu\text{m}$  ist für  $v_d$  der Wert  $0,07 \text{ m/s}$  und für  $v_s$  der Wert  $0,06 \text{ m/s}$  zu verwenden.

## 6 Bestimmung der Gammawolkenstrahlung (Gamma-Submersion)

Die Gammawolkenstrahlung ist gemäß Richtlinie VDI 3945, Blatt 3 (Ausgabe September 2000) zu bestimmen. Die dazu für die Energiegruppe 1 (Gamma-Energien von  $1 \text{ MeV}$ ) erforderlichen Koeffizienten zur Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft  $B_{1\text{MeV};m}$  sowie des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens  $a_{k,m}$  bei Gamma-Submersion sind für die Gammaenergie  $1 \text{ MeV}$  der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu

§ 47 StrlSchV <sup>1)</sup> zu entnehmen. Die entsprechenden Koeffizienten für die Energiegruppe 2 mit Gamma-Energien von 0,1 MeV finden sich in Tabelle 3 und Tabelle 4.

Tabelle 3 Koeffizienten  $b_{0,1\text{MeV};m}$  zur Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 0,1 MeV

$B_{0,1\text{MeV};m}$				
$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
1,9	1,7	$-3,4 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$-2,1 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 4 Koeffizienten  $a_{k,m}$  zur Berechnung des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 0,1 MeV

$E_\gamma = 0,1 \text{ MeV}$	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$
$k = 0$	0,279	0,595	-0,205	0,622
$k = 1$	0,135	0,866	-0,716	-0,578
$k = 2$	-0,0131	-0,324	0,1103	0,2892
$k = 3$	0,0003	0,0313	-0,0017	-0,0337

## 7 Bodenrauigkeit

Die Bodenrauigkeit des Geländes wird durch eine mittlere Rauigkeitslänge  $z_0$  beschrieben. Sie ist nach Tabelle 5 aus den Landnutzungsklassen des CORINE-Katasters <sup>3</sup> zu bestimmen (die angegebenen Nummern sind die Kennzahlen des CORINE-Katasters).

<sup>3</sup> „Daten zur Bodenbedeckung der Bundesrepublik Deutschland“ des Statistischen Bundesamtes, Wiesbaden

Tabelle 5: Mittlere Rauigkeitslänge in Abhängigkeit von den Landnutzungsklassen des CORINE-Katasters

$z_0$ 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 Rauigkeitslänge ist für ein kreisförmiges Gebiet um den Emissionsort festzulegen, dessen Radius das 10fache der Emissionshöhe beträgt. Setzt sich dieses Gebiet aus Flächenstücken mit unterschiedlicher Bodenrauigkeit zusammen, so ist eine mittlere Rauigkeitslänge durch arithmetische Mittelung mit Wichtung entsprechend dem jeweiligen Flächenanteil zu bestimmen und anschließend auf den nächstgelegenen Tabellenwert zu runden. Es ist zu prüfen, ob sich die Landnutzung seit Erhebung des Katasters wesentlich geändert hat oder eine für die Immissionsprognose wesentliche Änderung zu erwarten ist.

Variiert die Bodenrauigkeit innerhalb des zu betrachtenden Gebietes sehr stark, ist der Einfluss des verwendeten Wertes der Rauigkeitslänge auf die berechneten Immissionsbeiträge zu prüfen.

## 8 Effektive Quellhöhe

Die effektive Quellhöhe ist gemäß Richtlinie VDI 3782 Blatt 3 (Ausgabe Juni 1985) zu bestimmen. Der emittierte Wärmestrom  $M$  in MW wird nach folgender Formel berechnet:

$$M = 1,36 \cdot 10^{-3} \cdot R' \cdot (T - 283,15 \text{ K}) \quad (1)$$

Hierbei ist  $M$  der Wärmestrom in MW,  $R'$  der Volumenstrom des Abgases ( $f$ ) im Normzustand in  $\text{m}^3/\text{s}$  und  $T$  die Abgastemperatur in K.

Bei der Ableitung der Abgase über Kühltürme ist nach Richtlinie VDI 3784 Blatt 2 (Ausgabe März 1990) entsprechend zu verfahren.

## 9 Rechengebiet und Aufpunkte

Das Rechengebiet für eine einzelne Emissionsquelle ist das Innere eines Kreises um den Ort der Quelle, dessen Radius das 50fache der Emissionshöhe ist. Tragen mehrere Quellen zur zusätzlichen Strahlenexposition bei, dann besteht das Rechengebiet aus der Vereinigung der Rechengebiete der einzelnen Quellen. Bei besonderen Geländebedingungen kann es erforderlich sein, das Rechengebiet größer zu wählen.

Das Raster zur Berechnung von Aktivitätskonzentration, Deposition und dem Produkt aus Emissionsmassenstrom und Kurzzeitausbreitungsfaktor für Gammasubmersion ist so zu wählen, dass Ort und Betrag der Immissionsmaxima mit hinreichender Sicherheit bestimmt werden können. Dies ist in der Regel der Fall, wenn die horizontale Maschenweite die Emissionshöhe nicht überschreitet. In Quellentfernungen größer als das 10fache der Emissionshöhe kann die horizontale Maschenweite proportional größer gewählt werden.

Die Aktivitätskonzentration an den Aufpunkten ist als Mittelwert über ein vertikales Intervall vom Erdboden bis 3 m Höhe über dem Erdboden zu berechnen und ist damit repräsentativ für eine Aufpunkthöhe von 1,5 m über Flur. Die so für ein Volumen oder eine Fläche des Rechengitters berechneten Mittelwerte gelten als Punktwerte für die darin enthaltenen Aufpunkte.

## 10 Meteorologische Daten

### 10.1 Allgemeines

Meteorologische Daten sind als Stundenmittel anzugeben, wobei die Windgeschwindigkeit vektoriell zu mitteln ist. Die verwendeten Werte sollen für den Standort der Anlage charakteristisch sein. Liegen keine Messungen am Standort der Anlage vor, sind Daten einer geeigneten Station des Deutschen Wetterdienstes oder einer anderen entsprechend ausgerüsteten Station zu verwenden. Die Übertragbarkeit dieser Daten auf den Standort der Anlage ist zu prüfen; dies kann z.B. durch Vergleich mit Daten durchgeführt werden, die im Rahmen eines Standortgutachtens ermittelt werden. Messlücken, die nicht mehr als 2 Stundenwerte umfassen, können durch Interpolation geschlossen werden. Die Verfügbarkeit der Daten soll mindestens 90 vom Hundert der Jahresstunden betragen.

Die vom Partikelmodell benötigten meteorologischen Grenzschichtprofile sind gemäß Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 zu bestimmen. Hierzu werden folgende Größen benötigt:

Tabelle 6: Größen für meteorologische Grenzschichtprofile

$r_a$	Windrichtung in Anemometerhöhe $h_a$
$u_a$	Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe $h_a$
$L_M$	Monin–Obukhov–Länge
$h_m$	Mischungsschichthöhe
$Z_0$	Rauhigkeitslänge
$D_0$	Verdrängungshöhe

### 10.2 Windrichtung

Die Windrichtung ist die Richtung, aus der der Wind weht, und ist in Anemometerhöhe als Winkel gegen die Nordrichtung im Uhrzeigersinn gradgenau anzugeben. Enthält die für die Ausbreitungsrechnung verwendete meteorologische Zeitreihe nur gerundete Werte der Windrichtung (Sektorangaben), dann ist hilfsweise in der Ausbreitungsrechnung eine gleichverteilt zufällige Windrichtung aus dem betreffenden Sektor zu verwenden.

Bei umlaufenden Winden ist eine gleichverteilt zufällige Windrichtung aus dem Bereich  $1^\circ$  bis  $360^\circ$  zu wählen. Für Intervalle mit Windstille bis zu 2 Stunden Dauer ist die Windrichtung durch lineare Interpolation zwischen dem letzten Wert vor Beginn der Windstille und dem ersten Wert nach Ende der Windstille zu bestimmen. Für Intervalle größer als zwei Stunden ist die Windrichtung entsprechend der Windrichtungsverteilung für Windgeschwindigkeiten bis zu 1,2 m/s zufällig zu wählen.

Es ist eine Drehung  $D$  der Windrichtung  $r$  in der Mischungsschicht in Abhängigkeit von der Höhe  $z$  über dem Erdboden gemäß der Formeln 2 und 3 zu berücksichtigen:

$$r(z) = r_a + D(z) - D(h_a) \quad (2)$$

$$D(z) = 1,23 D_h [1 - \exp(-1,75 z/h_m)] \quad (3)$$

Der Wert von  $D_h$  ist in Abhängigkeit von der Monin–Obukhov–Länge  $L_M$  (Kapitel 10.5) und der Mischungsschichthöhe  $h_m$  (Kapitel 10.6) der Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Bestimmung von  $D_h$

$D_h$ in Grad	Stabilitätsbereich
0	$h_m/L_M < -10$
$45 + 4,5 h_m/L_M$	$-10 \leq h_m/L_M < 0$
45	$L_M > 0$

Für Höhen oberhalb der Mischungsschichthöhe ist die Windrichtung in Mischungsschichthöhe zu verwenden.

### 10.3 Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe ist in m/s mit einer Nachkommastelle anzugeben. Ist in der meteorologischen Zeitreihe die Windgeschwindigkeit in Stufen größer als 0,1 m/s angegeben, dann ist hilfsweise für die Ausbreitungsrechnung eine gleichverteilt zufällige Geschwindigkeit aus dem Stufenbereich auszuwählen.

Bei Windstille und bei Windgeschwindigkeiten unter 0,8 m/s in Anemometerhöhe ist für die Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe ein rechnerischer Wert von 0,7 m/s zu verwenden.



## 10.4 Niederschlag

Zeitreihen der Regenniederschlagsmengen in mm werden mit einem 3-stelligen Code nach dem Synop-Schlüssel des DWD angegeben (Siehe Kapitel 6 der ARTM-Programmbeschreibung).

## 10.5 Monin–Obukhov–Länge

Die Stabilität der atmosphärischen Schichtung wird durch Angabe der Monin–Obukhov–Länge  $L_M$  festgelegt. Ist der Wert der Monin–Obukhov–Länge nicht bekannt, dann ist eine Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier nach Richtlinie VDI 3782 Blatt 1 (Ausgabe Dezember 2001) zu bestimmen und die Monin–Obukhov–Länge in Meter ist gemäß Tabelle 8 zu setzen. Dabei wird die in Tabelle 8 dargestellte Zuordnung zwischen Ausbreitungsklassen und Diffusionskategorien getroffen.

Tabelle 8: Bestimmung der Monin–Obukhov–Länge  $L_M$

Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier bzw. Diffusionskategorie	Rauhigkeitslänge $z_0$ 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

Der Wert der Monin–Obukhov–Länge an der Grenze zwischen zwei Ausbreitungsklassen ist das harmonische Mittel der Werte in den benachbarten Ausbreitungsklassen, d.h. der reziproke Wert wird durch arithmetische Mittelung der reziproken Werte bestimmt. Diese Klassengrenzen sind zu verwenden, wenn auf Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier explizit Bezug genommen wird.

## 10.6 Mischungsschichthöhe

Ist die Mischungsschichthöhe nicht bekannt, ist sie nach folgendem Verfahren festzulegen. Für Werte der Monin–Obukhov–Länge aus dem Bereich der Ausbreitungsklas-

sen IV und V ist mit einem Wert der Mischungsschichthöhe  $h_m$  von 1 100 m zu rechnen. Sonst ist mit einem Wert von 800 m zu rechnen, es sei denn, Formel 4 ergibt einen kleineren Wert:

$$h_m = \begin{cases} \alpha \frac{u_*}{f_c} & \text{für } L_M \geq \frac{u_*}{f_c} \\ \alpha \frac{u_*}{f_c} \left( \frac{f_c L_M}{u_*} \right)^{1/2} & \text{für } 0 < L_M < \frac{u_*}{f_c} \end{cases} \quad (4)$$

Hierbei ist  $\alpha$  gleich 0,3 und der Coriolis-Parameter  $f_c$  gleich  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  ist aus dem Windprofil des meteorologischen Grenzschichtmodells zu bestimmen.

## 10.7 Verdrängungshöhe

Die Verdrängungshöhe  $d_0$  gibt an, wie weit die theoretischen meteorologischen Profile aufgrund von Bewuchs oder Bebauung in der Vertikalen zu verschieben sind. Die Verdrängungshöhe ist als das 6fache der Rauigkeitslänge  $z_0$  (Kapitel 7) anzusetzen, bei dichter Bebauung als das 0,8fache der mittleren Bebauungshöhe. Unterhalb der Höhe  $6 \cdot z_0 + d_0$  ist die Windgeschwindigkeit bis zum Wert Null bei  $z$  gleich Null linear zu interpolieren; alle anderen meteorologischen Parameter sind konstant zu halten.

## 11 Berücksichtigung der statistischen Unsicherheit

Die mit dem hier beschriebenen Verfahren berechneten Jahres- und Halbjahresmittelwerte für die Aktivitätskonzentration, die Deposition und das Produkt aus Emissionsmassenstrom und Kurzzeitausbreitungsfaktor für die Gammasubmersion besitzen aufgrund der statistischen Natur des in der Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (Ausgabe September 2000) angegebenen Verfahrens eine statistische Unsicherheit. Es ist darauf zu achten, dass die modellbedingte statistische Unsicherheit, berechnet als statistische Streuung des berechneten Wertes, bei den Jahres-Immissionskennwerten (Jahresmittelwerte) 3 vom Hundert des Jahres-Immissionswertes nicht überschreitet. Die gleiche Genauigkeit ist bei der Bestimmung der Immissionskennwerte für das Sommerhalbjahr

(Vegetationsperiode) einzuhalten. Gegebenenfalls ist die statistische Unsicherheit durch eine Erhöhung der Partikelzahl zu reduzieren.

## 12 Berücksichtigung von Bebauung

Einflüsse von Bebauung auf die Immission im Rechengebiet sind zu berücksichtigen. Beträgt die Emissionshöhe mehr als das 1,2fache der Gebäudehöhen oder haben Gebäude, für die diese Bedingung nicht erfüllt ist, einen Abstand von mehr als dem 6fachen ihrer Höhe von der Emissionsquelle, kann in der Regel folgendermaßen verfahren werden:

- a) Beträgt die Emissionshöhe mehr als das 1,7fache der Gebäudehöhen, ist die Berücksichtigung der Bebauung durch Rauigkeitslänge (Kapitel 7) und Verdrängungshöhe (Kapitel 10.7 dieses Anhangs) ausreichend.
- b) Beträgt die Emissionshöhe 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.

Maßgeblich für die Beurteilung der Gebäudehöhen nach Buchstabe a) oder b) sind alle Gebäude, deren Abstand von der Emissionsquelle geringer ist als das 6fache der Schornsteinbauhöhe.

## 13 Berücksichtigung von Geländeunebenheiten

Unebenheiten des Geländes sind in der Regel nur zu berücksichtigen, falls innerhalb des Rechengebietes Höhendifferenzen zum Emissionsort von mehr als dem 0,7fachen der Emissionshöhe und Steigungen von mehr als 1:20 auftreten. Die Steigung ist dabei aus der Höhendifferenz über eine Strecke zu bestimmen, die dem 2fachen der Emissionshöhe entspricht.

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.

## 14 Verwendung einer Häufigkeitsverteilung der stündlichen Ausbreitungssituationen

Eine Häufigkeitsverteilung der stündlichen Ausbreitungssituationen kann verwendet werden, sofern mittlere Windgeschwindigkeiten von weniger als 1 m/s im Stundenmittel am Standort der Anlage in weniger als 20 vom Hundert der Jahresstunden auftreten. Eine Ausbreitungssituation ist durch Windgeschwindigkeitsklasse, Windrichtungssektor, Niederschlags- und Ausbreitungsklasse bestimmt.

Die Windgeschwindigkeiten  $u_a$  in Anemometerhöhe  $h_a$  sind wie folgt zu klassieren:

Tabelle 9: Klassierung der Windgeschwindigkeiten

Windgeschwindigkeitsklasse	Windgeschwindigkeit $u_a$ in $\text{ms}^{-1}$	Rechenwert $u_R$ in $\text{ms}^{-1}$
1	< 1,4	1
2	1,4 bis 1,8	1,5
3	1,9 bis 2,3	2
4	2,4 bis 3,8	3
5	3,9 bis 5,4	4,5
6	5,5 bis 6,9	6
7	7,0 bis 8,4	7,5
8	8,5 bis 10,0	9
9	> 10,0	12

Die Windrichtung ist in 36 Sektoren zu je  $10^\circ$  zu klassieren. Der erste Sektor umfasst die Windrichtungen  $6^\circ$  bis  $15^\circ$ , die weiteren Sektoren folgen im Uhrzeigersinn. Bei der Windgeschwindigkeitsklasse 1 ist die Verteilung auf die Windrichtungssektoren wie bei der Windgeschwindigkeitsklasse 2 maßgebend.

Die Fälle mit umlaufenden Winden werden der entsprechenden Ausbreitungs- und Windgeschwindigkeitsklasse zugeordnet; die Verteilung auf die Windrichtungssektoren ist entsprechend der Windrichtungsverteilung in der jeweiligen Windgeschwindigkeitsklasse vorzunehmen.

Die Ausbreitungsklasse ist gemäß Richtlinie VDI 3782 Blatt 1 Anhang A (Ausgabe Dezember 2001) zu bestimmen.

Die Regenniederschlagsraten sind wie folgt zu klassieren:

Tabelle 10: Klassierung der Niederschlagsraten

Niederschlagsklasse	Niederschlagsrate in mm/h	
	Bereich	repräs. Wert $I_R$
1	0,00 - 0,01	0,0
2	0,01 - 0,50	0,2
3	0,50 - 3,00	1,8
4	> 3,00	20

Für jede in der Häufigkeitsverteilung mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit größer Null aufgeführte Ausbreitungssituation ist nach dem für die Zeitreihenrechnung angegebenen Verfahren eine zeitunabhängige Ausbreitungsrechnung durchzuführen. Dabei sind als Windgeschwindigkeit  $u_a$  der Rechenwert  $u_R$  und als Regenrate der repräsentative Wert  $I_R$  zu verwenden. Die Ausbreitungsrechnung für einen Windrichtungssektor von  $10^\circ$  ist in Form von Rechnungen über 5 Windrichtungen im Abstand von jeweils  $2^\circ$  durchzuführen mit arithmetischer Mittelung der Ergebnisse. Für den ersten Sektor sind dies die Windrichtungen  $6^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $14^\circ$  und entsprechend bei den folgenden Sektoren.

Die Langzeitmittelwerte, d.h. der Jahresmittelwert bzw. der übers Sommerhalbjahr gebildete Mittelwert von Aktivitätskonzentration, Deposition und dem Produkt aus Emissionsmassenstrom und Kurzeitenausbreitungsfaktor für Gammasubmersion sind die Mittelwerte der mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten gewichteten Aktivitätskonzentrations- bzw. Depositionswerte sowie der Werte des Kurzeitenausbreitungsfaktors für Gamma-submersion, die für die einzelnen Ausbreitungssituationen berechnet werden.

**A 2. ARTM (Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell)  
Programmbeschreibung zu Version 2.5.8 - Stand 21.09.2007**



# ARTM

(Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell)

Programmbeschreibung zu Version 2.5.8

Stand 2007-09-21

Ingenieurbüro Janicke, Dunum  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln

im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz





## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Übersicht.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Installation .....</b>	<b>3</b>
2.1	Windows.....	4
2.2	Linux.....	4
<b>3</b>	<b>Arbeitsweise .....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Eingabedaten für die Ausbreitungsrechnung .....</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung.....</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Rechnen mit Zeitreihen .....</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>Rechnen mit situationsabhängigen Parametern.....</b>	<b>29</b>
<b>8</b>	<b>Ausbreitungsrechnung für komplexes Gelände .....</b>	<b>31</b>
8.1	Festlegung des Geländeprofils .....	31
8.2	Festlegung der Gebäude .....	33
8.3	Berechnung des Windfeldes .....	34
8.4	Praktische Durchführung.....	36
<b>9</b>	<b>Verwendung extern erzeugter meteorologischer Felder.....</b>	<b>38</b>
<b>10</b>	<b>Festlegung der Rechennetze .....</b>	<b>41</b>
<b>11</b>	<b>Ableitung von Abgasen über Schornsteine und Kühltürme .....</b>	<b>45</b>
<b>12</b>	<b>Beispiele .....</b>	<b>48</b>

**Anhang**

<b>A</b>	<b>Modellbeschreibung des Programmpakets ARTM .....</b>	<b>49</b>
A.1	Erweiterung der Luftschadstoffeigenschaften .....	50
A.2	Erweiterungen der Modellphysik .....	53
A.2.1	Radioaktiver Zerfall .....	53
A.2.2	Berechnung der nassen Deposition .....	54
A.2.3	Berechnung der Gammasubmersion .....	54
A.2.4	Berücksichtigung der Vegetationsperiode (Sommerhalbjahr) .....	61

## 1 Übersicht

Das Programmsystem ARTM berechnet die Ausbreitung von radioaktiven Schadstoffen in der Atmosphäre. Es wurde auf der Basis des Ausbreitungsmodells AUSTAL2000 zur Berechnung der atmosphärischen Ausbreitung konventioneller Schadstoffe entwickelt. AUSTAL2000 ist eine Umsetzung von Anhang 3 der TA Luft von 2002-07-24.<sup>1</sup> Das dem Programm zu Grunde liegende Modell ist in der Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 beschrieben.

Diese Dokumentation beschreibt die Version 2.5.8 des Programmsystems. Es stehen aktuell ausführbare Programme für Windows (NT/2000/XP) und – in der Endversion – für Linux einschließlich der Quelltexte zur Verfügung.

Die Programme sind unter Windows XP entwickelt und auch unter Windows NT, Windows 2000 und Linux (SuSE 9.2) getestet worden. Es sind keine Tests unter Windows 95/98/ME durchgeführt worden.

Im Programmsystem ARTM sind folgende Aspekte realisiert:

- Zeitreihenrechnung
- Statistikrechnung
- Alle Radionuklide der KTA 1503.1
- Punkt-, Linien-, Flächen- und Volumenquellen
- Beliebig viele Quellen
- Abgasfahnenüberhöhung (nach VDI 3782 Blatt 3, VDI 3784 Blatt 2 oder explizit vorgegeben)
- trockene und nasse Deposition
- Gammawolkenstrahlung
- Sedimentierende Stäube
- Zeitabhängige Emissionsparameter

---

<sup>1</sup> siehe <http://www.bmu.de/files/taluft.pdf>

- Situationsabhängige Emissionsparameter
- Schätzung der statistischen Unsicherheit
- Automatische Festlegung des Rechenetzes
- Automatische Berechnung von  $z_0$
- Meteorologische Zeitreihen
- Rechnung für ein Raster von Aufpunkten
- Berechnung der Zeitreihe für Beurteilungspunkte
- Gegliedertes Gelände
- Gebäudeumströmung
- Verifikation nach VDI 3945 Blatt 3

Für die Behandlung der Gebäudeumströmung wurden folgende Erweiterungen vorgenommen:

- Erweiterung des diagnostischen mesoskaligen Windfeldmodells *TALdiames* auf Gebäudeumströmung (*TALdia*).
- Vorgabe von Gebäuden als Quader, Zylinder oder in Form einer Rasterdatei.
- Automatische Festlegung von geschachtelten Netzen zur Berücksichtigung der Quell- und Gebäudekonfiguration.

Die Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung nach der Richtlinie VDI 3784 Blatt 2 *Ausbreitungsrechnung bei Ableitung von Abgasen über Kühltürme* erfordert das Programm *VDISP*. Die Windows-Version kann vom VDI kostenlos bezogen werden<sup>2</sup>, sie wird aber auch unter [www.austal2000.de](http://www.austal2000.de) wie auch eine Linux-Version zur Verfügung gestellt.

---

<sup>2</sup> siehe [www.vdi.de/vdisp](http://www.vdi.de/vdisp)

## 2 Installation

Anmerkung: Die Testversion von ARTM wird zusammen mit der Oberfläche GO-ARTM verteilt. Das Installationsprogramm `GO_ARTM_Setup.exe` enthält sowohl die GO-ARTM als auch alle weiteren zum Betrieb von ARTM notwendigen Programme und Dateien. Zur Installation starten Sie bitte das `GO_ARTM_Setup.exe` im Ordner `\Installation` der Test-CD und folgen den Anweisungen des Installationsassistenten. Die in den folgenden Abschnitten des Kapitels 2 beschriebenen Installationsverfahren beziehen sich auf die Endversion von ARTM ohne GO-ARTM.

Es wird eine Reihe von Archiven benötigt, die kostenlos von der Homepage des Bundesamtes für Strahlenschutz [www.bfs.de](http://www.bfs.de) heruntergeladen werden können. Dort werden zur Verfügung gestellt:

<code>artm-vers-programme-sys.zip</code>	Programme ARTM, TALdia, VDISP und Batch-Dateien für das System <code>sys</code>
<code>artm-vers-anleitung.zip</code>	Modellbeschreibung und Programmbeschreibung (Handbuch) zu ARTM
<code>artm-vers-rauhigkeit.zip</code>	Kataster der Rauheitslängen (Datei <code>r1.dat</code> )
<code>artm-vers-quelltexte.zip</code>	Quelltexte der Programme
<code>artm-vers-beispiele.zip</code>	Beispielrechnungen mit Ergebnissen

Die aktuelle Versionsnummer `vers` mit Stand vom 2007-08-10 ist 2.5.8. Sie benötigen mindestens die ersten 3 Archive. Zur Zeit werden Programme für folgende Systeme bereitgestellt:

<code>sys</code>	System	<i>K</i>
Linux	Linux, übersetzt mit GNU-C-Compiler 3.3.3	L2
Windows-msc	Windows NT/2000/XP, übersetzt mit Microsoft C-Compiler 13.10	M2P

Der GNU-C-Compiler für Linux ist in der Regel bereits Bestandteil der jeweiligen Distribution, die Windows-Version ist kostenlos unter [www.mingw.org](http://www.mingw.org) zu erhalten.

Die Ergebnisse von Programmen, die mit verschiedenen Compilern übersetzt wurden, können sich im Rahmen der statistischen Unsicherheit des Verfahrens in seltenen Fällen unterscheiden. In den Protokolldateien ist neben der Versionsnummer des Programms auch das Kürzel *K* angegeben, aus dem der verwendete Compiler zu ersehen ist.

## 2.1 Windows

1. Legen Sie zunächst einen Ordner an, in dem ARTM installiert werden soll. Er kann einen beliebigen Namen haben, im Folgenden wird er mit *ARTM* bezeichnet.
2. Kopieren Sie in den Ordner *ARTM* die gewünschten Archive.
3. Entpacken Sie die Archive in den Ordner *ARTM* unter Beibehaltung der in den Archiven vorgesehenen Pfade. Wählen Sie zum Entpacken der Programme das Archiv mit der gewünschten Compiler-Version. Die Programme *ARTM*, *TALdia* und *VDISP* werden beim Entpacken direkt in das Verzeichnis *ARTM* kopiert.

Damit ist die Installation abgeschlossen. Es werden keine Änderungen am System oder Eintragungen in die *Registry* vorgenommen. Sie können anschließend die Archive wieder löschen. Zum Deinstallieren löschen Sie einfach den gesamten Ordner *ARTM*.

## 2.2 Linux

1. Legen Sie zunächst ein Verzeichnis an, in dem ARTM installiert werden soll. Es kann einen beliebigen Namen haben, im Folgenden wird es mit *ARTM* bezeichnet.
2. Kopieren Sie in das Verzeichnis *ARTM* die gewünschten Archive.
3. Entpacken Sie jedes der Archive, also beispielsweise

```
lj@linde:~/ARTM > unzip artm-2.5.8-programme-linux
```

Wählen Sie zum Entpacken der Programme das Archiv mit der gewünschten Compiler-Version. Die Programme *ARTM*, *TALdia* und *VDISP* werden beim Entpacken direkt in das Verzeichnis *ARTM* kopiert.

Damit ist die Installation abgeschlossen. Sie können anschließend die Archive wieder löschen. Zum Deinstallieren löschen Sie einfach das gesamte Verzeichnis *ARTM*.

### 3 Arbeitsweise

Die Darstellung der Arbeitsweise bezieht sich auf ein Windows-System. Die Unterschiede bei einem Linux-System sind so geringfügig, dass auf sie nicht besonders hingewiesen wird.

Das Programm *ARTM* arbeitet nicht interaktiv. Vor Beginn der Ausbreitungsrechnung für ein Projekt sind alle erforderlichen Eingabedaten in einem Projektordner zusammenzustellen (siehe Abschnitt 4). Dann wird das Programm gestartet, die Ausbreitungsrechnung ohne weitere Interaktion mit dem Anwender durchgeführt und das Ergebnis der Rechnung im Projektordner abgespeichert (siehe Abschnitt 5). Die Rechnung wird in einer Protokolldatei protokolliert.

Das Programm wird in der Regel aus einem DOS-Fenster heraus gestartet. Sie erhalten ein DOS-Fenster über die Menu-Folge Start/Programme/Zubehör/Eingabeaufforderung. Machen Sie den Ordner *ARTM* zum aktuellen Ordner des DOS-Fensters. Anschließend können Sie das Programm durch Eingabe von

```
ARTM [ -D ] Projekt [ Option]
```

starten, wobei *Projekt* durch den Namen des von Ihnen angelegten Projektordners zu ersetzen ist. Bei dieser Pfadangabe kann unter Windows wahlweise der Vorwärtsschrägstrich ( / ) oder der Rückwärts-Schrägstrich ( \ ) verwendet werden.

Ist keine Option angegeben, dann wird vom Programm eine Ausbreitungsrechnung durchgeführt. Sonst wird, je nach dem Wert von *Option*, eine der folgenden Aktionen ausgeführt:

- a : Die Auswertung der Rechenergebnisse aus einer zuvor durchgeführten Ausbreitungsrechnung, insbesondere der Zeitreihen für Beurteilungspunkte, wird noch einmal durchgeführt (siehe Abschnitt 6).
- l : Es wird eine Windfeldbibliothek erzeugt (siehe Abschnitt 8), sofern komplexes Gelände vorliegt oder Gebäude definiert sind, und es wird keine Ausbreitungsrechnung durchgeführt. Eine eventuell schon vorhandene Windfeldbibliothek wird nach Bestätigung durch den Benutzer gelöscht.
- z : Ist eine Zeitreihenrechnung mit einer AKTerm vorgesehen, dann wird mit dieser Option nur die Umwandlung der AKTerm in eine Zeitreihendatei `zeitreihe.dmn` bewirkt. Diese Datei kann dann für die Ausbreitungsrechnung ergänzt werden (siehe Abschnitt 6).



Wird beim Programmaufruf als erstes Argument `-D` angegeben, dann wird eine bereits vorhandene Protokolldatei zu Anfang gelöscht. Sonst wird das neue Protokoll an das alte angehängt.

Mit der Option `-Agerman` kann das Programm angewiesen werden, in den Ausgabe-dateien bei der Darstellung von Gleitkommazahlen ein Dezimal-Komma zu verwenden (Standard ist ein Dezimal-Punkt). Dies betrifft auch die Ergebnisse in der Protokollda-tei. Diese Option betrifft nicht die Eingabedateien. Dort sind beide Schreibweisen zu-lässig, wobei in DMNA-Dateien im Dateikopf explizit angegeben werden muss, welche Schreibweise verwendet wird (siehe Anhang B des AUSTAL2000 Handbuches).

Sie können das Programm auch durch einen Doppelklick auf den Programmnamen im Explorer starten. Dann wird automatisch ein DOS-Fenster geöffnet und Sie werden nach dem Namen des Projektordners gefragt. Optionen können durch Leerzeichen ge-trennt dahinter angegeben werden. Ist die Rechnung fertig, dann müssen Sie noch einmal die Return-Taste drücken, damit das Fenster wieder verschwindet.

#### 4 Eingabedaten für die Ausbreitungsrechnung

Die Rechnung wird in einem kartesischen Koordinatensystem durchgeführt, dessen  $x$ -Achse von West nach Ost und dessen  $y$ -Achse von Süd nach Nord verläuft. Alle Län-gen- und Koordinatenangaben erfolgen in Meter und beziehen sich auf dieses Koordi-natensystem. Die absolute Lage des Nullpunktes des Koordinatensystems wird vom Anwender für jedes Projekt in Gauß-Krüger-Koordinaten festgelegt. Praktischerweise wählt man den Nullpunkt so, dass er in der Nähe des Emissionsschwerpunktes liegt.

**Die Parameter  $g_x$  und  $g_y$  sind die einzigen Parameter, bei denen Koordinatenan-gaben in Gauß-Krüger-Darstellung zulässig sind. Alle anderen Koordinatenanga-ben dürfen betragsmäßig nicht größer als 200 000 sein.**

Es wird ein rechteckiges Rechennetz verwendet, das horizontal äquidistant unterteilt ist und vertikal ( $z$ -Achse) mit der Höhe zunehmende Maschenweiten besitzt. Es können auch mehrere Rechennetze gleichzeitig verwendet werden, die vertikal gleich gerastert sind, sich aber horizontal durch Ausdehnung und Maschenweite unterscheiden (siehe Abschnitt 10).

Folgende Dateien werden benötigt:

1. Die Textdatei `ARTM.txt` mit den wichtigsten Eingabeparametern wie z.B. Rechengebiet, Emissionsquellen, Quellstärken (im Projektordner).
2. Eine meteorologische Zeitreihe oder eine Häufigkeitsstatistik von Ausbreitungssituationen (Pfadangabe in `ARTM.txt`).
3. Bei zeitabhängigen Emissionsparametern: Die Zeitreihe der Parameterwerte in der Datei `zeitreihe.dmna` (im Projektordner).
4. Bei situationsabhängigen Parametern (Statistikrechnung): Für jeden situationsabhängigen Parameter eine DMNA-Datei mit den Werten (im Projektordner).
5. Bei automatischer Bestimmung von  $z_0$ : Das Rauigkeitskataster von Deutschland in der Datei `r1.dat` (im Ordner `ARTM`).
6. Bei komplexem Gelände: Das Geländeprofil für das gewählte Rechengebiet in der Datei `zg00.dmna` (im Projektordner). Es kann automatisch aus einem digitalen Geländemodell erzeugt werden (Pfadangabe mit dem Parameter `gh` in `ARTM.txt`).

Die Eingabe für `ARTM` besteht mindestens aus der Textdatei `ARTM.txt` und entweder einer meteorologischen Zeitreihe (AKTerm) oder einer Häufigkeitsstatistik von Ausbreitungssituationen (AKS). Für Testzwecke liegt dem Programm `ARTM` eine 5 Jahreszeitreihe (`ARTM96-00.AKTERM`), eine Einjahreszeitreihe (`ARTM2000.AKTERM`), eine Sommerperiode (`ARTM2000_sommer.AKTERM`) und die entsprechende AKS über ein ganzes Jahr (`ARTM2000.AKS`) bei.

Statt einer AKTerm können Sie auch direkt die Zeitreihe `zeitreihe.dmna` der meteorologischen Parameter und eventueller zeitabhängiger Emissionsparameter vorgeben. Näheres hierzu ist im Abschnitt 6 beschrieben.

Bei Rechnungen für komplexes Gelände wird zusätzlich die Datei `zg00.dmna` mit dem Geländeprofil benötigt. Sie enthält für die Gitterpunkte des Rechengitters die Geländehöhen (siehe Abschnitt 8, beachten Sie auch Abschnitt 10).

Die Textdatei `ARTM.txt` enthält die Angaben zu dem zu bearbeitenden Projekt. Sie kann mit einem einfachen Editor, z.B. *Notepad*, erreichbar über die Menu-Folge Start/Programme/Zubehör/Editor, erstellt werden. Bei Verwendung eines anderen Edi-

tors ist es wichtig, darauf zu achten, dass die Datei als einfache Textdatei und nicht als RTF-Datei oder als Word-Dokument gespeichert wird.

Die Eingabedatei besteht aus Kommentarzeilen und aus Datenzeilen.<sup>3</sup> Kommentarzeilen beginnen mit einem Minuszeichen und können beliebig eingestreut sein. Datenzeilen beginnen mit dem Namen eines Parameters und enthalten anschließend durch Leerzeichen oder Tabulatoren getrennt einen oder mehrere Werte, die diesem Parameter zugeordnet sind. Als Werte können Zahlen oder Zeichenketten auftreten. Zahlen können wahlweise mit einem Dezimal-Punkt oder einem Dezimal-Komma geschrieben werden (Tausender-Trennzeichen sind nicht zulässig), Zeichenketten sind in der Regel in Doppelhochkomma eingeschlossen. An Datenzeilen können, durch ein einfaches Hochkomma<sup>4</sup> getrennt, Kommentare angefügt werden.

Zahlenwerte werden in den Einheiten Gramm, Meter und Sekunde angegeben, der Wärmestrom in MW, die Temperatur in Grad Celsius. Dies bedeutet beispielsweise auch, dass Windgeschwindigkeiten in m/s und Quellstärken in Bq/s anzugeben sind. Für Parameter, die nicht angegeben sind, werden Standardwerte angenommen. Zeitangaben haben das Format

*Jahr- Monat- Tag. Stunde: Minute: Sekunde.*

Die Eingabe ist beendet, wenn entweder die Eingabedatei zu Ende ist oder eine Zeile mit einem Stern in der ersten Spalte angetroffen wird. Eine einfache Eingabedatei könnte beispielsweise folgendermaßen aussehen:

```
-- Beispiel einer einfachen Eingabedatei
-----
ti "demo-1" ' Kennzeichnung des Projektes
az "../artm2000.akterm" ' zu verwendende AKTerm
gx 3500000 ' Rechtswert des neuen Nullpunktes
gy 5500000 ' Hochwert des neuen Nullpunktes
hq 50 ' Quellhöhe (m)
-----
cs137A-1 1 ' entspricht 1 Bq/s
```

---

<sup>3</sup> Eine Zeile darf höchstens 31996 Zeichen lang sein.

<sup>4</sup> auf der deutschen Tastatur über dem Zeichen #.

In diesem Beispiel befindet sich die Quelle in der Mitte des Rechengebiets, das vom Programm festgelegt wird, und  $z_0$  wird vom Programm unter Rückgriff auf das Rauigkeits-Kataster berechnet.

Die folgende Auflistung enthält die zur Zeit angebbaren Parameter (ohne die Definition der Quellstärken) und ihre Standardwerte. Sie sind hier in alphabetischer Folge aufgeführt, können aber in beliebiger Reihenfolge stehen. In runden Klammern ist jeweils die Anzahl der erforderlichen Werte angegeben, wobei  $n_q$  die Anzahl der Quellen,  $n_b$  die Anzahl der Gebäude,  $n_n$  die Anzahl der Rechnernetze,  $n_p$  die Anzahl der Beurteilungspunkte (maximal 10) und  $n_z$  die Anzahl der Schichten in der Vertikalen bezeichnet.

Für Parameter, deren Wert eine Zeichenkette ist (z.B.  $t_i$ ), darf diese maximal 255 Zeichen lang sein. Enthält die Zeichenkette Leerzeichen, muss sie in Doppelhochkomma eingeschlossen sein.

$a_b$  ( $n_b$ ) Ausdehnung der Gebäude in  $x$ -Richtung, wenn keine Drehung vorliegt (Standardwert 0). Ein Gebäude wird als Quader definiert, der um die vertikale Achse gedreht sein kann. Ohne Drehung bezeichnen  $x_b$  und  $y_b$  in der Aufsicht die linke untere Ecke des Quaders und  $c_b$  ist seine vertikale Ausdehnung (der Quader liegt immer am Erdboden auf). Die Parameter  $a_b$  und  $b_b$  sind seine Ausdehnungen in  $x$ - und  $y$ -Richtung. Der Winkel  $w_b$  bezeichnet eine Drehung um die linke untere Ecke gegen den Uhrzeigersinn (in Grad).

Zylinderförmige Gebäude (z.B. Kühltürme) können über einen negativen Wert von  $b_b$  definiert werden, sein Betrag bezeichnet dann den Durchmesser des Zylinders. In diesem Fall muss der Parameter  $a_b$  den Wert 0 haben,  $x_b$  und  $y_b$  bezeichnen den Mittelpunkt der Zylindergrundfläche und  $w_b$  wird ignoriert.

$a_q$  ( $n_q$ ) Ausdehnung der Quelle in  $x$ -Richtung, wenn keine Drehung vorliegt (Standardwert 0). Eine Quelle wird als Quader definiert, der um die vertikale Achse gedreht sein kann. Ohne Drehung bezeichnen  $x_q$  und  $y_q$  in der Aufsicht die linke untere Ecke des Quaders und  $h_q$  ist sein Abstand vom Erdboden. Die Parameter  $a_q$ ,  $b_q$  und  $c_q$  sind seine Ausdehnungen in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung. Der Winkel  $w_q$  bezeichnet eine Drehung um die linke untere Ecke gegen den Uhrzeigersinn (in Grad).

as (1) Name der Häufigkeitsstatistik von Ausbreitungssituationen (AKS). Steht die AKS nicht im Projektordner, dann ist der Pfad relativ zum Projektordner oder absolut anzugeben. Beispiele:

```
as artm2000.aks      ' Datei steht im Projektordner
as ../artm2000.aks  ' Datei steht im übergeordneten Ordner
as f:/aks/artm2000.aks ' Datei steht auf einer anderen Platte
```

Wenn im Projekt-Ordner keine Zeitreihe `zeitreihe.dmna` steht (siehe Abschnitt 6), dann muss für eine Rechnung entweder mit `as` eine Statistik oder mit `az` eine AKTerm angegeben sein.

- az (1) Name der meteorologischen Zeitreihe (AKTerm) (vgl. `as`).
- bb ( $n_b$ ) Ausdehnung des Gebäudes in  $y$ -Richtung, wenn keine Drehung vorliegt (Standardwert 0), vgl. `ab`.
- bq ( $n_q$ ) Ausdehnung der Quelle in  $y$ -Richtung, wenn keine Drehung vorliegt (Standardwert 0), vgl. `aq`.
- cb ( $n_q$ ) Vertikale Ausdehnung des Gebäudes (Standardwert 0), vgl. `ab`.
- cq ( $n_q$ ) Vertikale Ausdehnung der Quelle (Standardwert 0), vgl. `aq`.
- d0 (1) Verdrängungshöhe  $d_0$  der meteorologischen Profile (Standardwert  $6 z_0$ ).
- dd ( $n_n$ ) Horizontale Maschenweite des Rechengitters (Standardwert bei Rechnungen ohne Gebäude ist die kleinste angegebene mittlere Quellhöhe  $h_{q+0} \cdot 5 \cdot c_q$ , mindestens aber 15 m). Das Rechengitter besteht in  $x$ -Richtung aus  $n_x$  Gittermaschen beginnend bei  $x_0$ , entsprechend in  $y$ -Richtung.
- Ist die Lage und die Ausdehnung des Rechengebietes nicht angegeben, dann wird es bei Rechnungen ohne Gebäude so gewählt, dass für jede Quelle ein Kreis mit dem 50-fachen der mittleren Quellhöhe im Inneren des Rechengebietes liegt. Bei Rechnungen mit Gebäuden wird standardmäßig mit geschachtelten Netzen gerechnet, wobei sich Lage und Ausdehnung der Netze an der Quell- und Gebäudekonfiguration orientieren (siehe Abschnitt 10).
- dq ( $n_q$ ) Durchmesser der Quelle (Standardwert 0). Dieser Parameter wird nur zur Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung verwendet, vgl. `qq`.
- gh (1) Name der Datei mit dem digitalen Geländemodell (im Format Arcinfo-

GRIDASCII), sofern das Geländeprofil `zg00.dma` noch nicht vorliegt. Andernfalls wird dieser Parameter nur verwendet um anzuzeigen, dass für komplexes Gelände gerechnet werden soll. In diesem Fall reicht als Parameterwert ein Stern (siehe Abschnitt 8). Die maximale Steilheit des Geländes wird in der Protokolldatei vermerkt.

`gx` (1) Rechtswert des Koordinaten-Nullpunktes in Gauß-Krüger-Koordinaten. Die angegebenen Koordinaten werden bei Bedarf, z.B. zur Berechnung von  $z_0$ , auf den dritten Streifen umgerechnet (wird in der Protokoll-Datei vermerkt). Zulässiger Wertebereich bei Darstellung im dritten Streifen:

$$3279000 \leq gx \leq 3957000.$$

`gy` (1) Hochwert des Koordinaten-Nullpunktes in Gauß-Krüger-Koordinaten (vgl. `gx`). Zulässiger Wertebereich bei Darstellung im dritten Streifen:

$$5229000 \leq gy \leq 6120000.$$

`ha` (1) Anemometerhöhe  $h_a$  über Grund (Standardwert  $10 \text{ m} + d_0$ ). Wird eine AK-Term verwendet, die Angaben zur Anemometerhöhe für alle Rauigkeitsklassen enthält, dann wird standardmäßig hieraus der zum verwendeten  $z_0$  gehörige Wert genommen.<sup>5</sup>

`hh` ( $n_z+1$ ) Vertikales Raster, angegeben durch die  $z$ -Koordinaten der Randpunkte der Schichten als Höhe über Grund. Die Standardsetzung bei Rechnungen ohne Gebäude ist

`hh 0 3 6 10 16 25 40 65 100 150 200 300 400 500 600 700 800 1000 1200 1500.`

Bei Rechnungen mit Gebäuden siehe `qb`. Ein Setzen dieses Parameters ist nur wirksam, wenn gleichzeitig die Option `NOSTANDARD` angegeben ist (siehe Parameter `os`).

`hp` ( $n_p$ ) Höhe des Monitorpunktes (Beurteilungspunkt) über Grund (Standardwert 1,5).

---

<sup>5</sup> Zur Klarstellung:

Die Windgeschwindigkeit  $u$  wird bei neutraler Schichtung gemäß TA Luft und VDI 3783 Blatt 8 nach folgender Gleichung bestimmt:

$$u(z) = u_a \ln\left(\frac{z - d_0}{z_0}\right) / \ln\left(\frac{h_a - d_0}{z_0}\right) \quad \text{für } z \geq d_0 + 6z_0 \quad (1)$$

Hier ist  $u_a$  die Windgeschwindigkeit am Ort des Anemometers (aus AKTerm, AKS oder selbst definierter Zeitreihe),  $z$  die Höhe über dem Erdboden und für  $h_a$  wird der Zahlenwert eingesetzt, der als Parameter `ha` angegeben ist.

- `hq` ( $n_q$ ) Höhe der Quelle (Unterkante) über dem Erdboden (Standardwert nicht vorhanden, dieser Parameter muss gesetzt werden), vgl. `aq`.
- `lq` ( $n_q$ ) Flüssigwassergehalt der Abgasfahne in kg/kg bei Ableitung der Abgase über einen Kühlturm (Standardwert 0). Ist dieser Parameter mit einem Wert größer 0 angegeben, dann wird für die betreffende Quelle die Abgasfahnenüberhöhung gemäß VDI 3784 Blatt 2 berechnet. `lq` kann zeitabhängig vorgegeben werden.
- `nx` ( $n_n$ ) Anzahl der Gittermaschen in  $x$ -Richtung, vgl. `dd`.
- `ny` ( $n_n$ ) Anzahl der Gittermaschen in  $y$ -Richtung, vgl. `dd`.
- `nz` ( $n_n$ ) Anzahl der Gittermaschen in  $z$ -Richtung. Dieser Parameter braucht nicht vorgegeben zu werden, er wird vom Programm automatisch gesetzt. Das Programm setzt die Anzahl immer auf den durch `hh` festgelegten Maximalwert  $n_z$ , nur bei Netzschachtelung mit Gebäuden wird die Anzahl für das feinste Netz so gewählt, dass es sich bis zur doppelten Höhe des höchsten Gebäudes erstreckt.<sup>6</sup>
- `os` (1) Zeichenkette zur Festlegung von Optionen. Werden mehrere Optionen angegeben, dann sind die Schlüsselworte bzw. Zuweisungsteile unmittelbar hintereinander durch ein Semikolon getrennt zu schreiben.

Bei Standardrechnungen sind folgende Optionen möglich:

`NESTING` Statt eines einzigen Netzes mit einheitlicher Maschenweite werden geschachtelte Netze mit unterschiedlicher Maschenweite generiert (siehe Abschnitt 10).

`-NESTING` Bei Rechnungen mit Gebäuden wird keine Netzschachtelung generiert.

`SCINOTAT` Alle berechneten Konzentrations- oder Depositionswerte werden in wissenschaftlicher Schreibweise (Exponential-Darstellung mit 4 signifikanten Stellen) dargestellt.

Abweichungen vom Standard-Verhalten werden durch die Option `NOSTANDARD`

---

<sup>6</sup> Eine Vorgabe wird nur bei Gebäuden mit Netzschachtelung ausgewertet. Hierbei muss beachtet werden, dass Partikel, die ein Netz verlassen, in das nächst gröbere Netz übernommen und Partikel, die das größte Netz verlassen, aussortiert werden; insbesondere der Wert für das größte Netz sollte also immer auf den Maximalwert  $n_z$  gesetzt sein.

ermöglicht. So wird mit dieser Option die Vorgabe des Parameters  $hh$  aktiviert (siehe  $hh$ ). Es sind u. a. folgende Angaben in Kombination mit der Option `NOSTANDARD` möglich (siehe auch Anhang A des AUSTAL2000 Handbuchs)

`SORRELAX` Bei der Berechnung der Gebäudeströmung mit dem Modellansatz DMK werden für das dort verwendete SOR-Verfahren (successive over-relaxation) weniger stringente Abbruchkriterien verwendet. Ein Abbruch der Windfeldberechnung aufgrund beispielsweise eines ungünstig gewählten Vertikalrasters kann mit dieser Option unter Umständen umgangen werden.

`SPECTRUM` Bei sedimentierendem Staub wird die Masse innerhalb einer Korngrößenklasse gleichmäßig über den gesamten Korngrößenbereich verteilt und die Sedimentationsgeschwindigkeit wird für jedes Partikel entsprechend seinem aerodynamischen Durchmesser berechnet, siehe Anhang E des AUSTAL2000 Handbuchs.

`SPREAD` Der Minimalwert des horizontalen Diffusionskoeffizienten und damit die minimale horizontale Fahnenbreite wird heraufgesetzt, um künstliche Sternstrukturen in der Immissionsverteilung zu vermeiden (siehe Anhang F des AUSTAL2000 Handbuchs).

Bei Verwendung der Option `NOSTANDARD` wird die Rauigkeitslänge nicht automatisch auf einen der 9 Standardwerte nach TA Luft gerundet.

Die `NOSTANDARD`-Option sollte nur wenn wirklich benötigt eingesetzt werden.

- $qb$  (1) Qualitätsstufe für die automatische Festlegung der Rechennetze und des Vertikalrasters bei Rechnungen mit Gebäuden (Standardwert 0). Das unterste Vertikalintervall hat immer die Ausdehnung von 0 bis 3 m. Darüber hat das Vertikalraster bis zum Überschreiten der doppelten Höhe des höchsten Gebäudes die Maschenweite  $\Delta z$ . Die Maschenweite nimmt dann bis zum nächstfolgenden Wert des Standardrasters (siehe  $hh$ ) pro Intervall um 50% in ganzzahligen Werten zu, darüber werden die Stützpunkte des Standardrasters verwendet.<sup>7</sup> Das feinste Netz hat die horizontale Maschenweite  $\Delta x$ . Die Werte von  $\Delta x$  und  $\Delta z$

---

<sup>7</sup> Für  $qb$  gleich 0 und ein 20 m hohes Gebäude beispielsweise ist das automatisch generierte Vertikalraster 0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42 46 52 65 100 150 200 300 400 500 600 700 800 1000 1200 1500.



sind wie folgt festgelegt:

qb	-3	-2	-1	0	1
Δx	32	16	8	4	2
Δz	6	4	3	3	2

qq ( $n_q$ ) Wärmestrom  $M_q$  des Abgases in MW (Standardwert 0) zur Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung nach VDI 3782 Blatt 3. Er ist aus der Abgastemperatur  $T_q$  (in ° Celsius) und dem Volumenstrom des Abgases ( $f$ ) im Normzustand  $R^8$  (in  $m^3/s$ ) gemäß  $M_q = 1,36 \cdot 10^{-3} \cdot (T_q - T_0) \cdot R$  zu berechnen mit  $T_0 = 10^\circ$  Celsius. Wird nur der Parameter qq aber nicht vq angegeben, dann wird die Abgasfahnenüberhöhung nach VDI 3782 Blatt 3 nur mit dem thermischen Anteil (wie in der alten TA Luft) berechnet. Der Impulsanteil kann nur wirksam werden, wenn sowohl vq wie dq größer 0 sind. qq kann zeitabhängig vorgegeben werden.

Wird der Parameter qq verwendet, dann sollte der Parameter tq nicht angegeben werden oder den Wert 0 besitzen.

qs (1) Qualitätsstufe zur Festlegung der Freisetzungsrates von Partikeln (Standardwert 0). Eine Erhöhung um 1 bewirkt jeweils eine Verdoppelung der Partikelzahl und damit eine Verringerung der statistischen Unsicherheit (Streuung) um den Faktor  $1/\sqrt{2}$ . Allerdings verdoppelt sich damit auch die Rechenzeit. Entsprechendes gilt für eine Verringerung des Wertes. Standardmäßig wird eine AKS mit mindestens 43 000 000 Partikeln gerechnet, eine AKTerm mit mindestens 63 000 000 Partikeln.

rb (1) Name der Datei mit den aufgerasterten Gebäudeumrissen (DMNA-Format). Sie kann alternativ zur expliziten Vorgabe von Gebäuden (vgl. ab) verwendet werden. Der Datenteil ist zwei-dimensional und enthält für jede Zelle des Rasters als Integer-Wert die Anzahl der Vertikalintervalle mit der Ausdehnung dz zur Festlegung der Gebäudehöhe. Die Intervallbreite dz, der linke Rand x0, der untere Rand y0 und die Maschenweite dd des Rasters müssen im Dateikopf vermerkt sein. Das Raster muss nicht mit dem verwendeten Rechengitter übereinstimmen, seine Zellen werden vor der Rechnung analog zu explizit vorgegebenen Gebäuden automatisch auf dem Rechengitter aufgerastert.

---

<sup>8</sup> Umrechnungsformel  $R = 0.25 * 3.1415926 * dq * dq * vq * 273.15 / (273.15 + tq)$

- $r_q$  ( $n_q$ ) Relative Feuchte der Abgasfahne in Prozent bei Ableitung der Abgase über einen Kühlturm (Standardwert 0). Ist dieser Parameter mit einem Wert größer 0 angegeben, dann wird für die betreffende Quelle die Abgasfahnenüberhöhung gemäß VDI 3784 Blatt 2 berechnet.  $r_q$  kann zeitabhängig vorgegeben werden.
- $sd$  (1) Anfangszahl des Zufallszahlengenerators (Standardwert 11111). Durch Wahl einer anderen Zahl wird eine andere Folge von Zufallszahlen generiert, so dass in den Ergebnissen eine andere Stichprobe vorliegt.
- $s_q$  ( $n_q$ ) Zeitskala  $T_v$  (siehe VDI 3945 Blatt 3 Abschnitt D5) zur Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung. Wird dieser Parameter angegeben, dann wird die Abgasfahnenüberhöhung nach dem in VDI 3945 Blatt 3 Abschnitt D5 angegebenen Verfahren berechnet, wobei der Parameter  $v_q$  als Zusatzgeschwindigkeit  $U$  interpretiert wird.  $s_q$  kann zeitabhängig vorgegeben werden.
- $ti$  (1) Zeichenkette zur Kennzeichnung des Projektes. Diese Kennzeichnung wird in alle bei der Rechnung erzeugten Dateien übernommen.
- $t_q$  ( $n_q$ ) Abgastemperatur in Grad Celsius (Standardwert 0) zur Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung.  $t_q$  kann zeitabhängig vorgegeben werden.
- Wird der Parameter  $t_q$  verwendet, dann sollte der Parameter  $q_q$  nicht angegeben werden oder den Wert 0 besitzen.
- $v_q$  ( $n_q$ ) Ausströmgeschwindigkeit des Abgases (Standardwert 0), vgl.  $q_q$ . Dieser Parameter ist nur wirksam, wenn der Parameter  $d_q$  auf einen Wert größer Null gesetzt ist.  $v_q$  kann zeitabhängig vorgegeben werden.
- $w_b$  ( $n_b$ ) Drehwinkel des Gebäudes um eine vertikale Achse durch die linke untere Ecke (Standardwert 0), vgl.  $a_b$ .
- $w_q$  ( $n_q$ ) Drehwinkel der Quelle um eine vertikale Achse durch die linke untere Ecke (Standardwert 0), vgl.  $a_q$ .
- $x_0$  ( $n_n$ ) Linker (westlicher) Rand des Rechengebietes, vgl.  $dd$ .
- $x_a$  (1)  $x$ -Koordinate der Anemometerposition (Standardwert 0). Die Position des Anemometers muss innerhalb des Rechengebietes liegen.
- $x_b$  ( $n_b$ )  $x$ -Koordinate des Gebäudes (Standardwert 0), vgl.  $a_b$ .
- $x_p$  ( $n_p$ )  $x$ -Koordinate des Monitorpunktes (Beurteilungspunkt).
- $x_q$  ( $n_q$ )  $x$ -Koordinate der Quelle (Standardwert 0), vgl.  $a_q$ .

- $y_0$  ( $n_n$ ) Unterer (südlicher) Rand des Rechengebietes, vgl. dd.
- $y_a$  (1)  $y$ -Koordinate der Anemometerposition (Standardwert 0), vgl. xa.
- $y_b$  ( $n_b$ )  $y$ -Koordinate des Gebäudes (Standardwert 0), vgl. ab.
- $y_P$  ( $n_P$ )  $y$ -Koordinate des Monitorpunktes (Beurteilungspunkt).
- $y_Q$  ( $n_Q$ )  $y$ -Koordinate der Quelle (Standardwert 0), vgl. aq.
- $z_0$  (1) Rauigkeitslänge  $z_0$ . Ist dieser Parameter nicht angegeben, dann wird er automatisch mit Hilfe des Rauigkeits-Katasters berechnet (erfordert  $g_x$  und  $g_y$ ) und auf einen der in der TA Luft vorgegebenen Werte gerundet. Sind mehrere Quellen definiert, wird bei der Berechnung zunächst für jede Quelle ein eigener Wert von  $z_0$  berechnet und anschließend ein mittleres  $z_0$ , wobei die Einzelwerte mit dem Quadrat der Quellhöhe gewichtet werden. Der berechnete Wert wird in der Protokolldatei vermerkt.

Die Quellstärken bzgl. der verschiedenen Radionuklide werden so angegeben wie die anderen Quellparameter auch. Der Parametername bezeichnet die Stoffkomponente und als Werte sind die Quellstärken der einzelnen Quellen bezüglich dieser Komponente aufzuführen (in Bq/s).

Folgende Radionuklide können angegeben werden:

H3W	Tritium	Fe55A	Eisen-55
H3A	Tritium	Fe59A	Eisen-59
C14A	Kohlenstoff-14	Co57A	Kobalt-57
C14GB	Kohlenstoff-14	Co58A	Kobalt-58
C14R	Kohlenstoff-14	Co60A	Kobalt-60
S35A	Schwefel-35	Ni59A	Nickel-59
Ar41E	Argon-41	Ni63A	Nickel-63
Ca41A	Calcium-41	Zn65A	Zink-65
Ca45A	Calcium-45	Kr85mE	Krypton-85m
Cr51A	Calcium-51	Kr85E	Krypton-85
Mn54A	Mangan-54	Kr87E	Krypton-87

Kr88E	Krypton-88	Xe133mE	Xenon-133m
Kr89E	Krypton-89	Xe133E	Xenon-133
Rb88A	Rubidium-88	Xe135mE	Xenon-135m
Sr89A	Strontium-89	Xe135E	Xenon-135
Sr90A	Strontium-90	Xe137E	Xenon-137 +D36
Y90A	Yttrium-90	Xe138E	Xenon-138
Zr93A	Zirconium-93	Cs134A	Caesium-134
Zr95A	Zirconium-95	Cs137A	Caesium-137
Nb95A	Niob-95	Ba140A	Barium-140
Tc99mA	Technetium-99m	La140A	Lanthan-140
Tc99A	Technetium-99	Ce141A	Cer-141
Ru103A	Ruthenium-103	Ce144A	Cer-144
Ru106A	Ruthenium-106	Hg203L	Quecksilber-203
Ag110mA	Silber-110m	Hg203R	Quecksilber-203
Sb124A	Antimon-124	Hg203A	Quecksilber-203
Sb125A	Antimon-125	U234A	Uran-234
Te123mA	Tellur-123m	U235A	Uran-235
I131L	Jod-131	U238A	Uran-238
I131R	Jod-131	Pu238A	Plutonium-238
I131A	Jod-131	Pu239A	Plutonium-239
I133L	Jod-133	Pu240A	Plutonium-240
I133R	Jod-133	Am241A	Americium-241
I133A	Jod-133	Cm242A	Curium-242
Xe131mE	Xenon-131m	Cm244A	Curium-244

Der letzte Buchstabe im Stoffparametername bezeichnet die physikalische Form:

- ‚A‘ steht für Schwebstoffe (Stäube). Es sind fünf verschiedene Korngrößenklassen (1 bis 4 und *unbekannt*) zu unterscheiden. Der Parametername be-

steht aus dem Stoffnamen, einem Minuszeichen und der Nummer der Korngrößenklasse. Staub mit einem aerodynamischen Korngrößendurchmesser größer als 10 µm hat, wenn seine Aufteilung auf Klasse 3 und 4 nicht bekannt ist, die Klassenbezeichnung u.

- ‚L‘ bezeichnet die Elementarform,
- ‚R‘ ist die organische Verbindung,
- ‚E‘ sind Edelgase.
- Bei Tritium gibt es zusätzlich die wässrige Form ‚w‘ und
- beim Isotop C-14 die Gasform als CO<sub>2</sub> ‚GB‘.

## 5 Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung

Das Programm legt zunächst im Projektordner eine Protokolldatei (Textdatei) mit dem Namen `ARTM.log` an, in der es u. a. den Zeitpunkt der Rechnung, die Programmversion und den Namen des Projektordners vermerkt. Ist eine solche Datei bereits vorhanden, wird sie nicht neu beschrieben sondern das neue Protokoll wird an das alte angehängt.<sup>9</sup> Anschließend werden die aus der Eingabedatei `ARTM.txt` gelesenen Parameter aufgelistet. Nach einigen Informationen zum Rechenlauf folgt eine Kurzauswertung der Ergebnisse.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung werden für die verschiedenen Stoffe jeweils in separaten Dateien abgelegt. Die Dateinamen haben die Form

*Stoff-TypParameterNetz*

und die Namensweiterung `.dmna`. Der Aufbau dieser Dateien ist im Anhang B des AUSTAL2000 Handbuchs beschrieben. Die Daten werden schichtweise ausgeschrieben, wobei so viele Schichten ausgegeben werden, dass alle Aufpunkthöhen erfasst werden. Haben alle Aufpunkte die Standardhöhe von 1,5 m, dann wird nur die bodennächste Schicht ausgegeben. Die Höhenwerte der Begrenzungsflächen dieser Schichten stehen im Kopf der Datei als Parameter `SK` (siehe Eingabeparameter `hh`).

---

<sup>9</sup> Wenn beim Testen häufig derselbe Projektordner verwendet wird, sollte man die Projektdatei vor jedem Lauf per Hand löschen, damit man leichter die aktuellen Ergebnisse findet, oder die Option `-D` beim Programmaufruf verwenden.

Es existieren dabei die folgenden Dateitypen:

<i>Typ</i>	Bezeichnung
cncz	Jahresmittelwert der Konzentration
cncs	Statistik des Jahresmittelwertes der Konzentration
dryz	Jahresmittelwert der trockenen Deposition
drys	Statistik des Jahresmittelwertes der trockenen Deposition
wetz	Jahresmittelwert der nassen Deposition
wets	Statistik des Jahresmittelwertes der nassen Deposition
g01m	Jahresmittelwert des Gammawolkenstrahlung 0.1 MeV
g10m	Jahresmittelwert des Gammawolkenstrahlung 1.0 MeV

Die berechneten Konzentrationswerte werden in der Maßeinheit  $\text{Bq/m}^3$  angegeben. Trockene und nasse Deposition in  $\text{Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  und die Gammawolkenstrahlung in  $\text{Bq}/\text{m}^2$ . Die Werte in den Statistikdateien sind in Prozent angegeben.

Bei einer Zeitreihenrechnung muss analog zur TA Luft, Anhang 3, Abschnitt 8.1 die Anzahl der gültigen Stundenmittel in der meteorologischen Zeitreihe mindestens 90% der Jahresstunden (8760) betragen. Ist das nicht der Fall, wird für die Auswertung die Anzahl der zulässigen Überschreitungen automatisch proportional heruntersetzt und diese Änderung in der Protokolldatei `ARTM.log` vermerkt, der Dateiname der Ausgabedatei bleibt aber unverändert. Die tatsächlich in der Auswertung verwendete Zahl von Überschreitungen wird auch unter dem Parameter `exceed` im Dateikopf der DMNA-Datei protokolliert.

Konzentrationswerte für Stäube werden nur aus den Korngrößenklassen 1 und 2 berechnet. In den Depositionswerten sind alle Komponenten berücksichtigt.

Die Parameterbezeichnung *Parameter* besteht aus einem Buchstaben. Dabei steht *z* für den Wert der Zusatzbelastung. Kann vom Programm für die betreffende Größe die statistische Unsicherheit geschätzt werden, dann wird sie in einer separaten Datei gespeichert, die die Parameterbezeichnung *s* hat. In dieser Datei steht bei Stoffen, für welche

die Konzentration oder die Deposition berechnet wird, die geschätzte relative statistische Unsicherheit (bezogen auf den berechneten Wert  $\bar{c}$ , also  $\sigma_c/\bar{c}$ ).

Die Netzbezeichnung *Netz* fehlt, wenn nur mit einem einzigen Rechnernetz gearbeitet wird. Werden mehrere, geschachtelte Netze verwendet, dann enthält *Netz* die Nummer des Netzes, dargestellt als zweistellige Zahl mit führender Null, beginnend mit 1.

Zeitreihen an den Beurteilungspunkten (Monitorpunkte) haben die Typbezeichnung *zbpz*. Sie werden ausgeschrieben, wenn mit einer meteorologischen Zeitreihe gerechnet wird, Monitorpunkte definiert sind und für den betreffenden Stoff ein Kurzzeit-Immissionswert existiert.

Ist beispielsweise bei einer Ausbreitungsrechnung ohne Netzschachtelung als emittierter Stoff Cs137A angegeben und sind Monitorpunkte definiert, dann werden folgende Dateien erzeugt:

```
cs137a-cncz.dma  
cs137a-cnccs.dma  
cs137a-depz.dma  
cs137a-deps.dma  
cs137a-wetz.dma  
cs137a-wets.dma  
cs137a-g01m.dma  
cs137a-g10m.dma  
cs137a-depz.dma  
cs137a-deps.dma
```

Bei Zeitreihenrechnung zusätzlich:

```
Cs137a-zbpz.dma
```

Die Konzentrationsfelder werden als 3-dimensionale Tabellen (Indizes *i*, *j* und *k*) gespeichert. Der Index *i* läuft dabei in *x*-Richtung, der Index *j* in *y*-Richtung und der Index *k* in *z*-Richtung. Die Indexzählung beginnt mit dem Wert 1. In der Regel wird nur die Konzentration in der bodennahen Schicht ausgewiesen, so dass der Index *k* nur den Wert 1 annimmt. Sind höher gelegene Aufpunkte definiert, dann enthält die Ausgabe so viele Schichten, dass auch der höchst gelegene Beurteilungspunkt noch erfasst wird. Die Tabelle ist so ausgedruckt, dass die Zahlen innerhalb einer Schicht die gleiche räumliche Anordnung besitzen wie die zugehörigen Maschenmittelpunkte auf der

Landkarte. Die Zahlenwerte sind in der gleichen Einheit angegeben wie der Immissionswert.

Die Depositionsfelder sind 2-dimensionale Tabellen und ansonsten genauso angelegt wie die Konzentrationsfelder.

Die Zeitreihen der stündlichen Konzentrationswerte an den Monitorpunkten sind 2-dimensionale Tabellen. Der Zeilenindex  $i$  läuft über die Stunden des Jahres, der Spaltenindex  $j$  über die Monitorpunkte. Beide Indizes beginnen mit dem Wert 1. Ungültige Werte sind durch einen negativen Wert gekennzeichnet. Die Zahlenwerte sind in der gleichen Einheit angegeben wie der Immissionswert.

Die genaue Struktur der Dateien ist im Anhang B des AUSTAL2000 Handbuches beschrieben.

In der Protokolldatei werden alle erzeugten Dateien aufgelistet. Zusätzlich werden die aus diesen Dateien gewonnenen Immissionskennwerte aufgelistet. Jeder Kennwert steht dabei in einer Zeile mit folgendem Aufbau:

$$\text{Stoff Typ} : \text{Wert (+/- Toleranz\%)} \text{ bei } x = x \text{ m}, y = y \text{ m (Netz : } i, j)$$

Hierbei sind:	<i>Stoff</i>	der betrachtete Schadstoff,
	<i>Typ</i>	Auswertetyp,
	<i>Wert</i>	der berechnete Immissionskennwert,
	<i>Toleranz</i>	seine statistische Unsicherheit,
	$x, y$	die Koordinaten des gefundenen Maximums,
	$i, j$	die Indexwerte der zugehörigen Masche,
	<i>Netz</i>	die Nummer des zugehörigen Netzes (kann fehlen).

Beispiel:

CS134A CNC : 3.475e-004 Bq/m<sup>3</sup> (+/- 1.2%) bei  $x = -75 \text{ m}$ ,  $y = 175 \text{ m}$  (1 : 19, 24)



## 6 Rechnen mit Zeitreihen

Bisher wurde davon ausgegangen, dass in den Eingabedaten eine Zeitreihe nur in Form einer AKTerm (meteorologische Zeitreihe, Eingabeparameter az) auftritt. Eine AKTerm ist eine Textdatei, die fortlaufend für jede Stunde des Jahres eine Zeile mit meteorologischen Parametern enthält:

Die Datei besteht aus einem Dateikopf und einem Datensatz. In dem Dateikopf stehen zu Anfang bis zu 5 Kommentarzeilen, die mit einem Stern (\*) als erstes Zeichen eingeleitet werden. Nach den Kommentarzeilen folgt eine Zeile mit den rechnerischen Anemometerhöhen für verschiedene Rauigkeitslängen.

Sie beginnt mit der Zeichenfolge

```
+ Anemometerhoehen (0.1m):
```

gefolgt von den 9 ganzzahligen Anemometerhöhen in Einheiten von 0,1 m (jeweils 4 Ziffern ohne führende Nullen, getrennt durch ein Leerzeichen) für die Rauigkeitslängen 0,01 m bis 2 m aus dem Anhang 3 der TA Luft.

Der Datensatz enthält Zeilen mit jeweils 18 Einträgen, die durch genau ein Leerzeichen voneinander getrennt sind. Die Bedeutungen der Einträge sind:

Eintrag	Bedeutung	Position	Wertebereich
KENN	Kennung für das Datenkollektiv AK	1 bis 2	AK
STA	Stationsnummer	4 bis 8	00001-99999
JAHR	Jahr	10 bis 13	1800-2...
MON	Monat	15 bis 16	1-12
TAG	Tag	18 bis 19	1-31
STUN	Stunde	21 bis 22	0-23
NULL	numerisches Leerfeld	24 bis 25	0
QDD	Qualitätsbyte (Windrichtung)	27	0,1,2,9
QFF	Qualitätsbyte (Windgeschwindigkeit)	29	0,1,2,3,9
DD	Windrichtung	31 bis 33	0-360,999
FF	Windgeschwindigkeit	35 bis 37	0-999

Eintrag	Bedeutung	Position	Wertebereich
QB	Qualitätsbyte (Wertstatus)	39	0-5,9
KM41	Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier	41	1-7,9
QB	Qualitätsbyte (Wertstatus)	43	0,1,9
HM	Mischungsschichthöhe (m)	45 bis 48	0-9999
QB	Qualitätsbyte (Wertstatus)	50	0-5,9
RR	Niederschlag	52-54	001-999
QB	Qualitätsbyte (Wertstatus)	56	1,9

#### Beispiel:

\* AKTERM-Zeitreihe, Deutscher Wetterdienst, Offenbach (KB1A)

\* Zeitraum 01/1995 bis 12/1995

\* anonymisierte Daten, Stand: 11.04.2002

+ Anemometerhoehen (0.1 m): 32 41 57 74 98 144 200 244 283

AK 10999 1995 01 01 00 00 1 1 210 56 1 3 1 -999 9 990 1

AK 10999 1995 01 01 01 00 1 1 220 64 1 3 1 -999 9 990 1

AK 10999 1995 01 01 02 00 1 1 260 68 1 3 1 -999 9 991 1

AK 10999 1995 01 01 03 00 1 1 270 65 1 3 1 -999 9 992 1

AK 10999 1995 01 01 04 00 1 1 250 64 1 3 1 -999 9 990 1

AK 10999 1995 01 01 05 00 1 1 250 64 1 3 1 -999 9 990 1

. . .

Das Qualitätsbyte für die Windrichtung kann folgende Werte annehmen:

QDD	Bedeutung
0	Windrichtung in Dekagrad
1	Windrichtung in Grad, Original in Dekagrad
2	Windrichtung in Grad, Original in Grad
9	Windrichtung fehlt

Das Qualitätsbyte für die Windgeschwindigkeit kann folgende Werte annehmen:

QFF	Bedeutung
0	Windgeschwindigkeit in Knoten
1	Windgeschwindigkeit in 0,1 m/s, Original in 0,1 m/s
2	Windgeschwindigkeit in 0,1 m/s, Original in Knoten (0,514 m/s)
3	Windgeschwindigkeit in 0,1 m/s, Original in m/s
9	Windgeschwindigkeit fehlt

KM	Bedeutung	Stabilität	Diffusionskategorie
1	Ausbreitungsklasse I	sehr stabil	F
2	Ausbreitungsklasse II	stabil	E
3	Ausbreitungsklasse III/1	neutral	D
4	Ausbreitungsklasse III/2	neutral/leicht labil	C
5	Ausbreitungsklasse IV	labil	B
6	Ausbreitungsklasse V	sehr labil	A
7	nicht bestimmbar		
9	Fehlkennung		

Die Niederschlagsinformation RR wird mit einem 3-stelligen Code nach dem Synop-Schlüssel des DWD angegeben:

RR	Bedeutung
001	1 mm
002	2 mm
...	
988	988 mm
989	989 mm oder mehr
===	=====
990	Spuren von Niederschlag, nicht messbar (< 0,05 mm)

---

991	0,1 mm
992	0,2 mm
.	.
.	.
999	0,9 mm

---

Das einstellige Qualitätsbyte für den Niederschlag kann folgende Werte annehmen:

QB	Bedeutung
1	Niederschlagsinformation vorhanden
9	Niederschlagsinformation unglaubwürdig oder nicht vorhanden

---

Die Uhrzeit ist in UTC (GMT) angegeben. Werden die Daten als repräsentativ für den Zeitraum einer Stunde angesehen, dann ist die angegebene Uhrzeit das Ende dieser Stunde. Für Testzwecke liegt dem Programm *ARTM* eine 5 Jahreszeitreihe (*ARTM96-00.AKTERM*), eine Einjahreszeitreihe (*ARTM2000.AKTERM*), eine Sommerperiode (*ARTM2000\_sommer.AKTERM*) und die entsprechende AKS über ein ganzes Jahr (*ARTM2000.AKS*) bei.

Die AKTerm wird von ARTM zunächst in eine Zeitreihe von Windrichtung  $r_a$ , Windgeschwindigkeit  $u_a$  und Monin-Obukhov-Länge  $L_M$  umgewandelt. Dabei werden die in Anhang 3 der TA Luft angegebenen Vorschriften zur Verarbeitung dieser Werte beachtet (Auffüllen von Lücken, Mindestgeschwindigkeit, Umverteilung der Windrichtung bei sehr geringer Windgeschwindigkeit, Beseitigung von Stufen).

Da der DWD explizit die Umrechnung  $1 \text{ kn} = 0,514 \text{ m/s}$  angibt und bei seinen eigenen Rechnungen auch so verfährt, werden Windgeschwindigkeiten, die in Knoten angegeben sind, nach dieser Formel umgerechnet. Auch Windgeschwindigkeiten, die in Einheiten von  $0,1 \text{ m/s}$  angegeben sind aber im Original auf Knoten beruhen, werden zunächst in (ganzzahlige) Knoten umgerechnet und anschließend wieder in die Einheit  $\text{m/s}$ . Anschließend werden die Werte gleichmäßig auf die vorliegende Wertestufe verteilt. Die Windrichtung wird, auch wenn sie gradgenau angegeben ist, formal über eine Stufe von  $1 \text{ Grad}$  Breite verteilt und später wieder auf ganze Zahlen gerundet, damit die Verteilung auf Sektoren konsistenter berechnet werden kann. Die gesamte Umrechnung erfolgt in folgenden Schritten:

- AKTerm einlesen und Termine mit ungültigen Daten durch die Klug/Manier-Klasse 0 kennzeichnen.
- Windrichtung auf Grad und Windgeschwindigkeit auf m/s umrechnen und die Werte gleichmäßig über die Wertestufe verteilen (auswürfeln).
- Für umlaufende Winde zufällige Windrichtung wählen.
- Windrichtungsverteilung für geringe Windgeschwindigkeiten bestimmen.
- Messlücken von 1 oder 2 Stunden Dauer durch Interpolation schließen.
- Windrichtung bei kurzzeitigen Kalmen durch Interpolation bestimmen.
- Windrichtung bei längeren Kalmen entsprechend der Verteilung für geringe Windgeschwindigkeiten auswürfeln.
- Minimalwerte der Windgeschwindigkeit einsetzen.
- Windgeschwindigkeit auf Vielfaches von 0,1 m/s und Windrichtung auf Vielfaches von 1 Grad runden.
- Mittlere Windgeschwindigkeiten berechnen (für *TALdia*).<sup>10</sup>

Ruft man *ARTM* mit der Option `-z` auf, also beispielsweise

```
ARTM test/h50a95 -z
```

dann wird nur diese Umwandlung ausgeführt und die Zeitreihe wird in dem im Anhang B des AUSTAL2000 Handbuches beschriebenen Format als Textdatei `zeitreihe.dmna` ausgeschrieben. Bei ungültigen (fehlenden) Datensätzen hat die Monin-Obukhov-Länge  $L_M$  den Wert 0.

Die Zeitreihe enthält 4 Spalten. In der ersten steht die Uhrzeit  $t_e$  (=Endzeitpunkt der betrachteten Stunde) in GMT+1 und die folgenden Spalten enthalten  $r_a$ ,  $u_a$  und  $L_M$ . Die Benennung dieser Spalten und die Art ihrer Darstellung ist durch den Parameter `form` im Kopf der Datei festgelegt.

Statt der AKTerm kann auch direkt diese Zeitreihe verwendet werden. Wenn ARTM im Arbeitsordner eine Datei mit dem Namen `zeitreihe.dmna` findet, liest es sie ein und

---

<sup>10</sup> Bei der Erzeugung einer Windfeldbibliothek in Anwesenheit von Gebäuden wird für alle Anströmrichtungen innerhalb einer Stabilitätsklasse die gleiche mittlere Windgeschwindigkeit benutzt.

interpretiert sie als umgesetzte AKTerm. Eine Angabe von  $a_s$  (AKS) oder  $a_z$  (AKTerm) in der Eingabedatei wird dann ignoriert. Auf diese Weise können eigene meteorologische Messungen in der Ausbreitungsrechnung verwendet werden. Die Zeitreihe muss mit der ersten Stunde eines Tages beginnen und sollte den Zeitraum eines Jahres umfassen.

In der Zeitreihe können in weiteren Spalten auch zeitabhängige Emissionsparameter aufgeführt werden. Quellstärken und die Parameter  $v_q$ ,  $q_q$ ,  $s_q$ ,  $t_q$ ,  $r_q$  und  $l_q$  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* enthalten. *Quelle* ist die Nummer der Quelle, für die dieser Wert gilt (zweistellig mit führender Null und beginnend mit 01).

Um die Erstellung einer solchen Zeitreihe zu erleichtern, wird von ARTM, wenn es mit der Option `-z` aufgerufen wird, in der ausgeschriebenen Zeitreihe 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.

Beispielsweise könnte die Zeitreihe bei einer Anlage, die im 2-Schichtenbetrieb arbeitet und nur zwischen 6 Uhr und 22 Uhr Cs-137 emittiert, folgendermaßen beginnen:<sup>11</sup>

```
form "te%20lt" "ra%5.0f" "ua%5.1f" "lm%7.1f" "01.cs137a%10.3e"
mode "text"
sequ "i"
dims 1
size 24
lowb 1
hghb 8760
*
1995-01-01.01:00:00 209 5.7 99999.0 0.000e+000
1995-01-01.02:00:00 217 5.8 99999.0 0.000e+000
1995-01-01.03:00:00 259 6.3 99999.0 0.000e+000
1995-01-01.04:00:00 267 6.7 99999.0 0.000e+000
1995-01-01.05:00:00 253 6.1 99999.0 0.000e+000
1995-01-01.06:00:00 248 6.0 99999.0 0.000e+000
1995-01-01.07:00:00 253 7.1 99999.0 1.168e+001
```

<sup>11</sup> Das Jahr 1995 begann mit einem Sonntag. In einer realen Simulation würde vermutlich am ersten Tage nichts emittiert und der Schichtbetrieb erst am zweiten Tag beginnen.

1995-01-01.08:00:00	247	6.0	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.09:00:00	260	6.7	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.10:00:00	261	7.0	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.11:00:00	263	7.0	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.12:00:00	256	8.2	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.13:00:00	267	8.6	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.14:00:00	273	8.5	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.15:00:00	260	9.0	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.16:00:00	254	8.5	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.17:00:00	251	9.1	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.18:00:00	259	8.4	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.19:00:00	247	7.6	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.20:00:00	250	7.7	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.21:00:00	242	6.4	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.22:00:00	243	7.1	99999.0	1.168e+001
1995-01-01.23:00:00	253	7.0	99999.0	0.000e+000
1995-01-02.00:00:00	237	6.8	99999.0	0.000e+000

...

Als Ergebnis einer Zeitreihenrechnung wird für jeden emittierten Stoff, bei dem ein Kurzzeit-Immissionswert existiert, die Zeitreihe der Konzentration an den Beurteilungspunkten ausgegeben. Jede Spalte enthält die Werte für einen Beurteilungspunkt, die Zeitangabe ist als Kommentar am Ende einer Zeile angehängt. Negative Konzentrationswerte (Zahlenwert -1) bedeuten, dass die Konzentration wegen fehlender Eingabedaten nicht berechnet werden konnte.

Im Folgenden ist eine solche Zeitreihe für einen kurzen Zeitraum beispielhaft aufgelistet.

gakrx4437800

gakry5789700

```

mntn    "01"    "02"
mntx     375.0    600.0
mnty     -25.0    700.0
mntz      1.5     1.5
mnti      58     63
mntj      50     65
mntk       1      1
grdl      0      0
grdi      0      0
undf-1
T1"1995-01-01.00:00:00"
T2"1995-01-02.00:00:00"
interval"01:00:00"

```

refdate"1995-01-01"

```

axes"ti"
name"h3w"
file"h3w-zbpz"
unit"Bq/m³"

```

```

form"con%10.3f"
loc1"C"
refv 1.000e+000

dims2
sequ"i,j"
lowb 1 1
hghb 24 2
*
0.000e+000 0.000e+000 ' 1995-01-01.01:00:00
1.943e-006 6.199e-007 ' 1995-01-01.02:00:00
0.000e+000 8.103e-006 ' 1995-01-01.03:00:00
0.000e+000 0.000e+000 ' 1995-01-01.04:00:00
0.000e+000 2.113e-006 ' 1995-01-01.05:00:00
...

```

Im Kopf der Datei stehen noch einmal die Parameter der Beurteilungspunkte aufgelistet: Name `mntn`,  $x$ -Koordinate `mntx`,  $y$ -Koordinate `mnty` und Höhe über dem Erdboden `mntz` (hier sind nur die wichtigsten Parameter aufgeführt).

Liegen die Vorbelastungswerte ebenfalls als Zeitreihe vor, dann kann *ARTM* auch die Immissionskennwerte der Gesamtbelastung ausrechnen. Hierzu müssen die Vorbelastungswerte in eine Textdatei geschrieben werden, die der aufgelisteten Zeitreihe entspricht, und als Datei `Stoff-zbpv.dma` im Arbeitsordner bereitgestellt werden. In der Protokolldatei `ARTM.log` erscheint dann hinter der Zusatzbelastung an den Beurteilungspunkten auch ein Abschnitt mit Angabe der Gesamtbelastung an den Beurteilungspunkten.

In der Protokolldatei `ARTM.log` erscheint dann hinter der Zusatzbelastung an den Beurteilungspunkten auch ein Abschnitt mit Angabe der Gesamtbelastung an den Beurteilungspunkten.

Diese Auswertung kann auch nachträglich durchgeführt werden. Wird *ARTM* mit der Option `-a` aufgerufen, dann wird keine Ausbreitungsrechnung durchgeführt, sondern es werden nur die bereits berechneten Daten noch einmal hinsichtlich der Immissionskennwerte ausgewertet.

## 7 Rechnen mit situationsabhängigen Parametern

Zeitlich variable Emissionsbedingungen sollten in der Regel in einer Zeitreihenrechnung erfasst werden (siehe Abschnitt 6). Bei Verwendung einer AKS ist eine zeitliche Zuordnung nicht mehr möglich.



In manchen Fällen ist aber die zeitliche Variation allein durch meteorologische Veränderungen bedingt, wie beispielsweise bei windinduzierten Quellen. Hier hängt die Quellstärke von der Windgeschwindigkeit ab (Beispiel: Schwebstaubemissionen von Uranbergbauflächen). Auch bei der Abgasfahnenüberhöhung hängt die Weite und Höhe des Fahnenanstiegs von der Windgeschwindigkeit und der Stabilität der atmosphärischen Schichtung ab, doch braucht sich der Anwender in der Regel darum nicht zu kümmern, da die Überhöhung nach VDI 3782 Blatt 3 bereits programmintern gehandhabt wird.

Obwohl windinduzierte Quellen oder eine andere Modellierung des Fahnenanstiegs (beispielsweise bei Ableitung über einen Kühlturm entsprechend VDI 3784 Blatt 2) in Zeitreihenrechnungen berücksichtigt werden können, wurde den Anhängern der Statistikrechnung mit der Einführung situationsabhängiger Parameter die Möglichkeit gegeben, dies auch bei Verwendung einer AKS zu tun.

Situationsabhängige Parameter sind Parameter, deren Wert von der Windgeschwindigkeit und der Stabilitätsklasse abhängen. Es können die gleichen Parameter situationsabhängig vorgegeben werden, die auch zeitabhängig sein dürfen, also  $v_q$ ,  $q_q$ ,  $s_q$ ,  $t_q$ ,  $r_q$ ,  $l_q$  und die Quellstärken bezüglich der einzelnen Stoffe. Sie sind auch ebenso zu kennzeichnen, also durch Angabe eines Fragezeichens statt eines Zahlenwertes.

Die Werte eines situationsabhängigen Parameters  $v$  sind als 2-dimensionale Tabelle  $v_{i,j}$  in Form einer DMNA-Datei (siehe Abschnitt B) anzugeben, wobei  $i = 1, 2, \dots, 6$  die Stabilitätsklassen und  $j = 1, 2, \dots, 9$  die Windgeschwindigkeitsklassen durchläuft. Der Dateiname hat, entsprechend der Kennzeichnung des Parameters in einer Zeitreihe, die Form *Quelle.Parameter.dmna*, wobei *Quelle* die Nummer der Quelle und *Parameter* der Name des Parameters ist, also beispielsweise *01.cs137a-1.dmna* für die Cs-137-Emission (Größenklasse 1) der ersten Quelle oder *143.vq.dmna* für die Ausströmgeschwindigkeit der 143-ten Quelle.

Die folgende Auflistung (Datei *01.cs137a-1.dmna*) enthält Werte der Quellstärke, die proportional  $\sqrt{u_a}$  und bei  $u_a = 1$  m/s gleich 0.04 Bq/s sind:

```

dims      2
lowb      1   1
hghb      6   9
size      4
form      "%6.3f"
```

```
sequ    "i, j"
mode    "text"
unit    "Bq/s"
fact    25
*
1.000 1.225 1.414 1.732 2.121 2.449 2.739 3.000 3.464
1.000 1.225 1.414 1.732 2.121 2.449 2.739 3.000 3.464
1.000 1.225 1.414 1.732 2.121 2.449 2.739 3.000 3.464
1.000 1.225 1.414 1.732 2.121 2.449 2.739 3.000 3.464
1.000 1.225 1.414 1.732 2.121 2.449 2.739 3.000 3.464
1.000 1.225 1.414 1.732 2.121 2.449 2.739 3.000 3.464
***
```

## 8 Ausbreitungsrechnung für komplexes Gelände

Geländeunebenheiten und Gebäude können mit Hilfe des diagnostischen Windfeldmodells *TALdia* berücksichtigt werden. Dies wird durch Setzen des Parameters *gh* bzw. Vorgabe von Gebäuden in der Eingabedatei *ARTM.txt* ausgelöst. Der Wert des Parameters *gh* ist der Name der Datei mit dem digitalen Geländemodell (DGM), das die Information über die Geländehöhe im Rechengebiet enthält. Gebäude werden über die Parameter *xb*, *yb*, *ab*, *bb*, *cb*, *wb* oder als Rasterdatei über den Parameter *rb* vorgegeben. Geländeunebenheiten und Gebäude können gleichzeitig berücksichtigt werden.

**Warnung:**                **Rechnungen für komplexes Gelände sind erheblich aufwändiger und bergen wesentlich mehr Fehlermöglichkeiten als Rechnungen für ebenes Gelände!**

**Bei Rechnungen mit Gebäuden benötigt die Windfeldbibliothek beträchtlichen freien Festplattenspeicher, der je nach betrachteter Situation einige GB betragen kann!**

### 8.1 Festlegung des Geländeprofils

Das DGM kann von dem jeweiligen Landesvermessungsamt bezogen werden. Länderübergreifende Daten stellt auch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG, siehe [www.ifag.de](http://www.ifag.de)) zur Verfügung. Das Datenformat scheint wenig genormt

zu sein. ARTM erwartet die Daten im Format Arcinfo-GRIDASCII<sup>12</sup>, das folgendermaßen aufgebaut ist:

- Die Datei besteht aus Textzeilen, kann also mit jedem Editor eingesehen oder geändert werden.
- Die Geländehöhen werden auf einem regelmäßigen Gitter angegeben, dessen Maschenweite typischerweise 20, 40, 50 oder 100 m beträgt. Die angegebenen Werte sind dabei als Geländehöhe in der Mitte einer Gitterzelle zu verstehen.
- Die ersten 6 Zeilen enthalten allgemeine Informationen, wobei in jeder Zeile ein Parametername und der zugehörige Wert stehen:

<code>ncols</code>	Anzahl der Spalten des Gitters
<code>nrows</code>	Anzahl der Zeilen des Gitters
<code>xllcorner</code>	Gauß-Krüger-Rechtswert der linken unteren Ecke der linken unteren Gitterzelle
<code>yllcorner</code>	Gauß-Krüger-Hochwert der linken unteren Ecke der linken unteren Gitterzelle
<code>cellsize</code>	Maschenweite (m)
<code>NODATA_value</code>	Höhenwert bei fehlenden Daten

- Anschließend folgen die Höhenwerte als 2-dimensionale Tabelle, wobei die Zahlen so angeordnet sind wie die Gitterzellen auf der Landkarte. Die erste Zahl der ersten Datenzeile ist also die Geländehöhe an dem Punkt mit dem Rechtswert  $xllcorner + 0.5 * cellsize$  und dem Hochwert  $yllcorner + (nrows - 0.5) * cellsize$ .

Beispiel<sup>13</sup> (Ausschnitt):

<code>ncols</code>	261
<code>nrows</code>	241
<code>xllcorner</code>	4597475.0000

<sup>12</sup> Alternativ können die Daten auch als DMNA-Datei bereitgestellt werden oder als Textdatei, die in jeder Zeile die drei Werte  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  enthält ( $X$  und  $Y$  in Gauß-Krüger-Koordinaten, sofern  $gx$  und  $gy$  angegeben sind). Diese Liste muss genau alle Gitterpunkte eines rechteckigen, äquidistanten Rasters enthalten.

<sup>13</sup> Diese Daten (Datei `tittling.grid`) wurden aus den vom Bayerischen Landesvermessungsamt im Internet ([www.bayern.de/vermessung](http://www.bayern.de/vermessung)) zur Verfügung gestellten Testdaten umgewandelt und beschreiben ein Gebiet von  $13 \times 12$  km<sup>2</sup> in der Nähe von Tittling.

```
yllcorner      5396475.0000
cellsize       50.0000
NODATA_value   -9999
542.9 532.4 517.1 503.5 497.3 497.7 501.7
549.5 539.3 526.0 511.8 499.0 491.0 490.1
544.0 536.0 527.3 518.2 507.3 495.9 487.6
532.3 525.2 518.1 512.9 507.5 499.0 488.3
523.5 515.8 509.0 505.0 502.1 497.4 489.4
```

Das Programm erwartet, dass im DGM für alle Gitterpunkte gültige Höhenwerte angegeben sind. Aus dem DGM bestimmt das Programm die Geländehöhen an den Gitterpunkten des Rechenrasters (Geländeprofil) und speichert sie als Datei `zg00.dmna` im Projektordner ab. Die Maschenweite des Rechenrasters braucht dabei nicht mit der Maschenweite des DGM übereinzustimmen, allerdings muss das Rechengebiet vollständig innerhalb des vom DGM abgedeckten Bereiches liegen. Die bei der Festlegung des Rechengebietes verwendeten Gauß-Krüger-Koordinaten müssen aus demselben Meridianstreifen stammen wie die Koordinatenangaben im DGM.

Enthält das Projektverzeichnis bereits die Datei `zg00.dmna` und ist das entsprechende Rechenetz explizit in der Eingabedatei definiert, dann wird der im Parameter `gh` angegebene Dateiname ignoriert und das Geländeprofil wird nicht neu berechnet.

In der Protokolldatei wird zur Information die maximale Steilheit des Geländes vermerkt. Dabei werden die Geländehöhen an benachbarten Gitterpunkten verglichen und es wird der Anstieg in Achsenrichtung beispielsweise in folgender Form ausgeschrieben:

```
Die maximale Steilheit des Geländes ist 0.52 (0.47)
```

Die erste Zahl ist die Steilheit, die beim Vergleich unmittelbar benachbarter Gitterpunkte gefunden wird, die zweite Zahl in Klammern ist der Wert, den man beim Vergleich mit dem jeweils übernächsten Gitterpunkt erhält. Die Punkte haben dann in der Regel einen Abstand von der doppelten Bauhöhe der Quelle. Die Zahl 0,2 bedeutet einen Anstieg 1:5.

## 8.2 Festlegung der Gebäude

Gebäude werden wie Quellen als Quader vorgegeben, allerdings liegt die Unterseite eines Quaders immer auf dem Erdboden auf. Zusätzlich können Gebäude mit kreis-

förmigem Grundriss durch einen negativen Wert für Parameter  $bb$ , dessen Betrag den Kreisdurchmesser angibt, definiert werden<sup>14</sup>. Alternativ können Gebäude in Form einer Rasterdatei über den Parameter  $rb$  vorgegeben werden.

Gebäude werden intern auf dem Rechennetz aufgerastert, d.h. diejenigen Gitterzellen des Rechennetzes werden als Gebäudezellen angesehen, die ganz oder überwiegend von Gebäuden ausgefüllt sind.<sup>15</sup> Dieses Verfahren hat u.a. den Vorteil, dass man sich bei der Festlegung der Gebäudeumrisse nicht um Überschneidungen kümmern muss, da sie bei der Aufrasterung automatisch entfernt werden.

Die aufrasterten Gebäude dürfen nicht mit Quellen überlappen. Damit geringfügige Überlappungen nicht zu einem Programmabbruch führen, versucht ARTM Partikel, die innerhalb einer Gebäudezelle freigesetzt werden, durch Versetzung um maximal eine horizontale Zellweite aus dem Bereich der Gebäudezellen herauszudrängen. Gelingt dies nicht, bricht das Programm mit einer Fehlermeldung ab.

Die Aufrasterung der Gebäude wird am Anfang der Windfeldberechnung in die Datei `volout00.dma` (bei geschachtelten Netzen in die Datei `volout01.dma` und gegebenenfalls `volout02.dma`) im Projektordner ausgeschrieben. Im Datenteil wird für jede Zelle des Rechennetzes ein ganzzahliger Wert vermerkt, der 1 ist, wenn die Zelle einem Gebäude zugerechnet wird, und 0 andernfalls. Es sollte anhand dieser Dateien überprüft werden, ob die Gebäude mit der gewählten Maschenweite hinreichend gut aufgelöst werden.

### 8.3 Berechnung des Windfeldes

Das Windfeld wird mit dem in Anhang D des AUSTAL2000 Handbuches beschriebenen diagnostischen Windfeldmodell *TALdia* berechnet. Ein Windfeld braucht nicht für jede Wettersituation neu berechnet zu werden, denn das Programm macht sich die Tatsache zu Nutze, dass bei gleicher Stabilität eine Linearkombination von zwei Windfeldern (Addition mit unterschiedlichen Faktoren) wieder ein gültiges Windfeld für diese

---

<sup>14</sup> Der kreisförmige Grundriss wird intern als regelmäßiges 36-Eck behandelt.

<sup>15</sup> Für eine quaderförmige Zelle mit Mittelpunkt  $(x_m, y_m, z_m)$ , horizontaler Ausdehnung  $\Delta x$  und vertikaler Ausdehnung  $\Delta z$  wird geprüft, ob der Mittelpunkt und die Punkte  $(x_m \pm \Delta x/4, y_m \pm \Delta y/4, z_m \pm \Delta z/4)$  innerhalb eines Gebäudes oder auf dem Gebäuderand liegen. Ist dies

Stabilität darstellt. Bei Gebäudeeinflüssen ist dieses Verfahren nicht ganz korrekt, es lässt sich aber übernehmen, wenn die zwei verwendeten Windfelder nicht zu unterschiedlich sind.

Das Programm *TALdia* berechnet daher für jede der 6 Stabilitätsklassen im Fall ohne Gebäude nur zwei Windfelder, eins mit Süd-Anströmung und eins mit West-Anströmung, und speichert diese 12 Felder in einer Bibliothek. Mit Gebäuden werden für jede Stabilitätsklasse 36 Windfelder berechnet, die den Anströmrichtungen einer isotropen Windrose in 10-Grad-Schritten entsprechen.

Bei der Ausbreitungsrechnung werden dann für jede Ausbreitungssituation aus den zu der gerade vorliegenden Stabilitätsklasse gehörenden Windfeldern diejenigen zwei ausgewählt, deren Windrichtung am Anemometerort der vorgegebenen Windrichtung am nächsten kommt, und sie werden so kombiniert, dass die am Ort des Anemometers vorgegebene Windgeschwindigkeit und Windrichtung exakt getroffen werden.

Sind Geländeunebenheiten und Gebäude vorgegeben, berechnet das Programm *TALdia* zuerst ein divergenzfreies Windfeld ohne Gebäude.<sup>16</sup> In dieses werden dann die Gebäudeeinflüsse eingearbeitet.<sup>17</sup> Das Ergebnis ist ein divergenzfreies Windfeld mit an Gelände und Gebäude angepassten Randbedingungen. Bei Gebäuden werden neben den Windfeldern auch die Felder der zusätzlichen Geschwindigkeitsfluktuationen und Diffusionskoeffizienten berechnet und ausgeschrieben.

Die Windfelder in der Windfeldbibliothek werden iterativ berechnet. Das Programm startet mit einem nicht divergenzfreien Feld und versucht, dies iterativ divergenzfrei zu machen. Wie weit dies dem Programm gelingt, sollte anhand der Protokolldatei *TALdia.log* überprüft werden. Dort wird als "Divergenz-Fehler" der betragsmäßig größte im Rechennetz gefundene Divergenzwert angegeben, multipliziert mit  $\Delta/u_a$  ( $\Delta$ : horizontale Maschenweite,  $u_a$ : Windgeschwindigkeit am Anemometer). Der angegebene Zahlenwert sollte unter 0.05 liegen.

---

für mindestens 6 Punkte der Fall, wobei der Mittelpunkt doppelt gezählt wird, dann wird die Zelle als Gebäudezelle markiert.

<sup>16</sup> Dieser Teil entspricht dem früher verwendeten diagnostischen mesoskaligen Windfeldmodell *TALdiammes*.

<sup>17</sup> Dieser Teil wird von dem mikroskaligen Windfeldmodell DMK übernommen, das im Abschlussbericht *tal2dmk.pdf* auf [www.austal2000.de](http://www.austal2000.de) beschrieben ist.

Es ist im Prinzip möglich, dass die Iterationen nicht konvergieren. Das Programm meldet dies mit einer Fehlermeldung. Werden aber die in der TA Luft angegebenen Beschränkungen an die zulässige Geländesteilheit beachtet, dann sollte dieser Fall in der Praxis nicht auftreten.

Bei Rechnungen für komplexes Gelände oder bei Verwendung externer Windfelder ist es wichtig, dass das Anemometer möglichst frei angeströmt wird. Liegt es im Einflussbereich von Hindernissen,<sup>18</sup> dann ist es den hier verwendeten meteorologischen Modellen in der Regel nicht möglich, mit hinreichender Genauigkeit auf die Art der Anströmung zurückzuschließen. Um solche unbrauchbaren Anemometerpositionen auszuschließen, sind zwei Prüfungen eingebaut, die gegebenenfalls zum Programmabbruch führen:

1. Für jedes der Windfelder in der Windfeldbibliothek muss die Windgeschwindigkeit am Ort des Anemometers größer als 0.5 m/s sein.
2. Das Windfeld, das in der Ausbreitungsrechnung schließlich verwendet wird, darf an keiner Stelle eine Vertikalkomponente besitzen, die betragsmäßig größer als 25 m/s ist.<sup>19</sup>
3. Die Summe der Quadrate der Überlagerungsfaktoren für zwei Basisfelder muss kleiner als 100 und größer als 1/400 sein.

#### 8.4 Praktische Durchführung

Um Geländeunebenheiten in der Ausbreitungsrechnung zu berücksichtigen, sind nur zwei Schritte erforderlich:

1. Das Digitale Geländemodell wird als Datei im Arcinfo-GRIDASCII-Format bereitgestellt. Es muss das Rechengebiet umfassen.
2. Der Name dieser Datei wird in der Eingabedatei `ARTM.txt` als Parameter `gh` angegeben.

---

<sup>18</sup> In der Regel tritt dieser Fall nur ein, wenn an einem anderen Ort erhobene meteorologische Daten auf das Rechengebiet übertragen werden und die ersatzweise angenommene Anemometerposition nicht sorgfältig genug ausgesucht wird.

<sup>19</sup> Die betrachtete Vertikalkomponente ist die im Gelände-folgenden Koordinatensystem ausgewiesene Komponente, die auch durch die Geländesteilheit und die Horizontalkomponente beeinflusst wird.

Um Gebäude zu berücksichtigen, müssen sie in der Eingabedatei ARTM.txt festgelegt werden.

Das Programm *ARTM* ruft dann von sich aus das Programm *TALdia* auf, welches das Geländeprofil *zg00.dma* im Projektordner und die Windfeldbibliothek im Unterverzeichnis *lib* anlegt. Anschließend führt *ARTM* die Ausbreitungsrechnung unter Verwendung dieser Windfelder durch. Die Turbulenzfelder werden lokal in Abhängigkeit von der Höhe über dem Erdboden wie bei ebenem Gelände berechnet. Die Rechenzeit verlängert sich aus folgenden Gründen:

1. Die Windfelder der Windfeldbibliothek müssen berechnet werden.
2. Für jede Stunde des Jahres (bei einer Zeitreihenrechnung) müssen 3-dimensionale Wind- und Turbulenzfelder berechnet werden.
3. Die Berechnung der Partikelbahnen ist bei 3-dimensionaler Meteorologie aufwendiger als bei 1-dimensionaler.

Insgesamt kann dies dazu führen, dass sich die Rechenzeit um den Faktor 5 bis 10 erhöht. Will man von diesem Standardvorgehen abweichen, ist folgendes zu beachten:

- Existiert im Projektordner bereits eine Datei *zg00.dma*, dann wird diese verwendet, ungeachtet des angegebenen Digitalen Geländemodells.
- Existiert im Projektordner ein Unterverzeichnis *lib*, dann wird davon ausgegangen, dass sich darin die Windfeldbibliothek befindet, und es werden keine Bibliotheksfelder neu angelegt.
- Wird *ARTM* mit der Option *-1* aufgerufen, dann wird nur die Windfeldbibliothek erzeugt und keine Ausbreitungsrechnung durchgeführt. In diesem Fall werden die Windfelder in einer bestehenden Bibliothek nach einer Rückfrage gelöscht und überschrieben.
- Statt *ARTM* mit der Option *-1* aufzurufen, kann das Windfeldmodell auch direkt in der Form

*taldia Projektordner*  
aufgerufen werden.



## 9 Verwendung extern erzeugter meteorologischer Felder

Wie bereits im Abschnitt 8 erwähnt, verwendet *ARTM* bei Rechnungen in komplexem Gelände die Windfelder, die es im Unterverzeichnis *lib* vorfindet. Diese brauchen nicht mit *TALdia* erzeugt worden zu sein sondern können auch von einem anderen meteorologischen Modell stammen, z.B. einem prognostischen Modell. Dabei können außer dem Windvektor auch die Austauschkoefizienten und die turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen vorgegeben werden.

Damit *ARTM* diese Felder erkennt und sie richtig verwendet, sind folgende Bedingungen einzuhalten:

1. Die Dateien müssen die Struktur besitzen, die in Anhang B des AUSTAL2000 Handbuches beschrieben ist. Die Daten sind Gleitkommazahlen und können in Textform oder in Binärform (4 Byte pro Zahl) angegeben sein.
2. Anhand des Dateinamens wird unterschieden, welche Größe in der Datei dargestellt ist. Folgende Namen werden verwendet:

w????a00.dma Windvektor mit den Komponenten  $z_p$  (Höhe über NN),  $v_x$  ( $x$ -Komponente des Windvektors),  $v_y$  ( $y$ -Komponente des Windvektors),  $v_s$  ( $s$ -Komponente des Windvektors, vertikal vgl. Anhang D des AUSTAL2000 Handbuches). *ARTM* verwendet nicht den angegebenen Wert von  $v_s$  sondern berechnet ihn neu aus der Divergenzfreiheit des Windfeldes. Die Zahlenwerte sind in m bzw. in m/s anzugeben.

v????a00.dma Turbulente Geschwindigkeitsfluktuationen (Turbulenzfeld) mit den Komponenten  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$  und  $\vartheta$  (potentielle Temperatur in Grad). Sie ersetzen die Werte aus dem Grenzschichtmodell von *ARTM*. Die Zahlenwerte sind in m/s anzugeben.

v????d00.dma Turbulente Geschwindigkeitsfluktuationen, die zu denen aus dem Grenzschichtmodell von *ARTM* (quadratisch) addiert werden. Die Zahlenwerte sind in m/s anzugeben.

k????a00.dma Austauschkoefizienten (K-Feld) mit den Komponenten  $K_H$  (horizontaler Austauschkoefizient) und  $K_V$  (vertikaler Austausch-

koeffizient). Sie ersetzen die Werte aus dem Grenzschichtmodell von ARTM. Die Zahlenwerte sind in  $\text{m}^2/\text{s}$  anzugeben.

<code>k????d00.dmna</code>	Austauschkoeffizienten, die zu denen aus dem Grenzschichtmodell von ARTM addiert werden. Die Zahlenwerte sind in $\text{m}^2/\text{s}$ anzugeben.
<code>zp00.dmna</code>	$z$ -Koordinaten der Gitterpunkte (in m über NN)
<code>zg00.dmna</code>	Geländeprofil (unterste Schicht von <code>zp00.dmna</code> )

Die durch Fragezeichen symbolisierten 4 Zeichen kennzeichnen die Ausbreitungssituation, beispielsweise könnte 2019 für "stabile Schichtung (II), Windrichtung 190 Grad" stehen. Die Wahl der Zeichen ist beliebig, solange damit ein gültiger Dateiname gebildet wird. Das Windfeld muss für jede der vorkommenden Situationen angegeben sein. Wenn ein Feld vom Typ "v" oder "k" für eine Situation angegeben ist, muss es für alle Situationen angegeben sein.

- Es muss kenntlich gemacht sein, zu welcher Stabilitätsklasse eine Datei gehört. Dies kann entweder über den Parameter `ak1` im Dateikopf geschehen, dem ein Wert zwischen 1 (entspricht I) und 6 (entspricht V) zugeordnet wird, oder über die Art der Kennzeichnung, wobei das erste Zeichen als Nummer der Ausbreitungs-kategorie interpretiert wird (s.o.).
- Die Dateien stellen 3-dimensionale Tabellen dar (mit Ausnahme von `zg00.dmna`), deren Indizes den Wertebereich  $0 \dots n_x$ ,  $0 \dots n_y$ , und  $0 \dots n_z$  durchlaufen.  $n_x$  und  $n_y$  sind die in der Eingabedatei definierten Größen `nx` (Anzahl der Intervalle in  $x$ -Richtung) und `ny` (Anzahl der Intervalle in  $y$ -Richtung). Die Anzahl der Intervalle in  $z$ -Richtung ergibt sich aus dem vertikalen Raster, das mit dem Eingabeparameter `hh` (Höhe über dem Erdboden) explizit festgelegt werden kann. Standardsetzung bei Rechnungen ohne Gebäude ist  

```
hh 0 3 6 10 16 25 40 65 100 150 200 300 400 500 600 700 800 1000 1200 1500
```

also  $n_z = 19$ .
- Die Geschwindigkeitskomponenten sind auf einem Arakawa-C-Netz festgelegt, also beispielsweise  $v_x$  in  $x$ -Richtung auf Gitterpunkten ( $0 \leq i \leq n_x$ ), in  $y$ - und  $z$ -Richtung jeweils auf den Mittelpunkten der Intervalle ( $1 \leq j \leq n_y$ ,  $1 \leq k \leq n_z$ ). Entsprechendes gilt für  $v_y$  und  $v_z$ . Alle anderen Größen sind auf den Gitterpunkten definiert.

Um dies zu kennzeichnen, ist bei den Windfeldern im Dateikopf der Parameter `vldf` anzugeben, der für jede der Komponenten mit einem Buchstaben festhält, wie diese Komponente im Netz definiert ist. Es ist

<code>vldf</code>	<code>PXYS</code>	bei den Windfeldern
<code>vldf</code>	<code>PPPP</code>	bei den turbulenten Geschwindigkeiten
<code>vldf</code>	<code>PP</code>	bei den Turbulenzfeldern
<code>vldf</code>	<code>P</code>	bei den Gitterdefinitionen

Weiterhin müssen im Dateikopf die Netzparameter `dd`, `x0`, `y0` und `hh` angegeben sein und zusätzlich die folgenden Parameter:<sup>20</sup>

<code>axes</code>	<code>xyz</code>
<code>lsbf</code>	<code>1</code>
<code>sscl</code>	<code>0</code>
<code>zscl</code>	<code>0</code>

- Bei Windfeldern, die eine Gebäudeumströmung beschreiben, sind die Gitterzellen ausgespart, die im Inneren von Gebäuden liegen. Um dem Programm kenntlich zu machen, um welche Zellen es sich handelt, ist bei diesen Zellen der Wert von  $v_s$  am Boden der Zelle auf -99 zu setzen. Überhängende Gebäude oder Brückenbauwerke, die dazu führen, dass eine ausgesparte Gitterzelle über einer nicht ausgesparten liegt, sind nicht zulässig.

Findet *ARTM* eine solche Bibliothek (also Unterverzeichnis `lib` im Projektordner), dann werden die darin enthaltenen Felder katalogisiert und auf Vollständigkeit geprüft. Im Unterverzeichnis dürfen keine weiteren Dateien stehen. Sodann wird in dem Katalog eingetragen, zu welcher Stabilitätsklasse die betreffende Situation gehört und welche Windrichtung und Windgeschwindigkeit im Windfeld am Ort des Anemometers auftritt.

Wird später ein Windfeld für eine bestimmte Stabilitätsklasse, Windrichtung und Windgeschwindigkeit benötigt, dann wird zunächst im Katalog nachgesehen, welche beiden Windfelder dieser Stabilitätsklasse eine Windrichtung besitzen, die der vorgegebenen

---

<sup>20</sup> Die Angabe "`lsbf 1`" bedeutet, dass bei binär abgespeicherten Zahlen das niedrigstwertige Byte (*least significant byte*) zuerst abgespeichert ist. Dies ist der Standard bei Intel- und AMD-Prozessoren.

am nächsten kommt.<sup>21</sup> Sodann werden diese beiden Felder linear überlagert, so dass das resultierende Feld am Anemometerort genau die gewünschte Windrichtung und Windgeschwindigkeit besitzt. Mit den gleichen Faktoren werden auch die zugehörigen Turbulenzfelder und K-Felder -- sofern vorhanden -- überlagert.

Bei einer Netzschachtelung (siehe Abschnitt 10) wird genauso verfahren. Die Felder sind für jedes Netz anzugeben. Die Nummer  $n$  des verwendeten Netzes ( $1 \leq n \leq n_n$ ) ist im Namen jeder Datei anzugeben, und zwar ist die Ziffernfolge 00 am Ende des Dateinamens (ohne Namensweiterung) durch  $i1$  zu ersetzen mit  $i = n_n + 1 - n$ . Zum Beispiel haben bei einer Schachtelung mit 3 Netzen die Windfelder des feinsten Netzes die Namen `w????a31.dma`.

Der Windvektor am Anemometerort wird vom Programm aus dem Netz bestimmt, das die kleinste Maschenweite hat, aber den Anemometerort noch enthält. Die daraus berechneten Überlagerungsfaktoren werden dann für alle Netze der jeweiligen Situation verwendet.

Bei einer Netzschachtelung in komplexem Gelände müssen die Geländeprofile aufeinander abgestimmt sein. Dabei müssen in einem feinen Netz in einem Randstreifen von 2 Maschenweiten Breite die Höhenwerte des nächst gröbereren Netzes übernommen werden, gegebenenfalls durch lineare Interpolation. Es ist daher zweckmäßig, zuerst von ARTM bzw. TALdia die Geländeprofile `lib/zg1.dma` ausrechnen zu lassen (Programm starten und kurz darauf abbrechen) und diese dann für die eigene Windfeldberechnung zu verwenden. Die Dateien `zg0i.dma` im Projektverzeichnis sind hierfür nicht geeignet.

## 10 Festlegung der Rechennetze

Ohne Gebäude wird normalerweise mit einem einzigen Rechennetz gearbeitet. Dieses kann entweder vom Programm oder vom Anwender festgelegt werden. Das Programm wählt es so, dass für die niedrigste Quelle die Maschenweite hinreichend fein ist und alle Quellen hinreichend weit umfasst werden. Entsprechend TA Luft bedeutet dies, dass die Maschenweite gleich der Bauhöhe der niedrigsten Quelle gesetzt wird (ohne

---

<sup>21</sup> Das bedeutet auch, dass es zu jeder Stabilitätsklasse mindestens 2 Windfelder geben

Gebäude mindestens aber 16 m beträgt) und für jede Quelle ein Kreis um die Quelle mit einem Radius vom 50-fachen der Bauhöhe darin enthalten ist. Als Bauhöhe wird hierbei die mittlere Bauhöhe eingesetzt, die sich aus der Summe von tatsächlicher Bauhöhe  $h_q$  und der Hälfte der vertikalen Ausdehnung  $c_q$  ergibt.

Wird das Rechennetz in der Eingabedatei explizit festgelegt, müssen alle zu seiner Festlegung notwendigen Parameter angegeben sein, also  $dd$ ,  $x_0$ ,  $n_x$ ,  $y_0$  und  $n_y$ . Die Parameter  $dd$ ,  $x_0$  und  $y_0$  sollten nur ganzzahlige Werte erhalten, da rechnerbedingte Ungenauigkeiten bei der Übernahme von Dezimalbrüchen<sup>22</sup> zu Problemen führen können.

Bei Rechnungen mit Gebäuden oder bei Quellkonfigurationen mit mehreren Quellen, die sich in der Bauhöhe stark unterscheiden, ist dieses Vorgehen unzweckmäßig. Für die Gebäude und die niedrigen Quellen wird ein feinmaschiges Netz benötigt, das aber auch noch in großer Entfernung, wo die Beiträge der hohen Quellen wirksam sind, verwendet wird. Dort erhält man für die berechneten Konzentrationswerte eine hohe statistische Unsicherheit, da die Auszählvolumina unnötig klein sind.

Dies kann vermieden werden, wenn das feinmaschige Netz nur in der Umgebung der Gebäude und der niedrigen Quellen verwendet wird und weiter außen mit einem gröberen Netz gerechnet wird, also mehrere Netze unterschiedlicher Maschenweite ineinander geschachtelt werden. Für eine solche Schachtelung gibt es eine Reihe von Einschränkungen, damit das berechnete Konzentrationsfeld möglichst wenig Artefakte enthält:

- Eine Vergrößerung der Maschenweite muss genau um den Faktor 2 erfolgen.
- Die Ränder eines feinen Netzes müssen auf den Gitterlinien des nächst gröberen Netzes liegen.
- Ein grobes Netz muss mindestens die Ausdehnung des nächst feineren Netzes besitzen.
- Die inneren Netze müssen in jeder Koordinatenrichtung um 2 Zellen größer gewählt werden als nach den Vorgaben der TA Luft erforderlich, da die Werte

---

muss, denn sonst kann nicht interpoliert werden.

<sup>22</sup> Zum Beispiel ist rechnerintern  $3 \cdot 0.1$  nicht unbedingt gleich  $0.3$ .

in den äußersten beiden Spalten bzw. Zeilen an jedem Rand nicht in die Auswertung einbezogen werden.<sup>23</sup>

Bei Rechnungen ohne Gebäude legt das Programm von sich aus ein einzelnes Rechennetz an. Ein System von geschachtelten Netzen wird angelegt, wenn als Option `os` in der Eingabedatei die Zeichenkette `NESTING` angegeben ist. Die Parameter der Netzschachtelung werden in der Protokolldatei vermerkt. Sie können in der angegebenen Form auch direkt in die Eingabedatei kopiert werden. Wird die Art der Netzschachtelung vom Anwender vorgegeben, dann müssen die Parameter der Netze in aufsteigender Folge der Maschenweite angegeben sein.<sup>24</sup> Eine gültige Netzwahl bei einer 50 m hohen Punktquelle im Ursprung des Koordinatensystems wäre also beispielsweise:

<code>dd</code>	50	100	200
<code>x0</code>	-1100	-2200	-2800
<code>nx</code>	44	44	28
<code>y0</code>	-1100	-2200	-2800
<code>ny</code>	44	44	28

Bei Rechnungen mit Gebäuden müssen bei der Festlegung der Rechennetze zusätzliche Besonderheiten beachtet werden:

1. Gebäude werden intern auf dem Rechennetz aufgerastert. Maschenweite und Vertikalintervalle sind daher so zu wählen, dass die Gebäudeumrisse in der Rasterung hinreichend genau abgebildet werden. Die Aufrasterung kann in den vom Windfeldmodell *TALdia* ausgeschriebenene Dateien `volout01.dma` kontrolliert werden.
2. Bei Netzschachtelung werden die Gebäude zur Berechnung des Windfeldes nur in dem feinsten Netz (das mit der kleinsten Maschenweite) berücksichtigt. Der Einfluss eines Gebäudes auf das Windfeld erstreckt sich typischerweise bis zu einer Entfernung von 5 Gebäudehöhen, die Ausdehnung des Netzes (bzw. bei Netzschachtelung des feinsten Netzes) sollte entsprechend groß gewählt werden. In den Randzellen des Netzes dürfen sich keine Gebäude befinden.
3. Damit die iterative Berechnung des Windfeldes im feinsten Netz gut konvergiert, sollten die Vertikalintervalle im feinsten Netz möglichst konstant sein. Dies kann durch geeignete Festlegung der Vertikalintervalle (Parameter `hh`) und der Obergrenze des feinsten Netzes bei Netzschachtelung (Parameter `nz`) erreicht werden.

---

<sup>23</sup> Diese Werte können durch die Abbildung der Netze aufeinander verfälscht sein.

4. Der Einfluss eines Gebäudes auf die Turbulenzeigenschaften der Strömung erstreckt sich typischerweise bis zu einer Entfernung von 10 Gebäudehöhen. Falls bei Netzschachtelung das feinste Netz eine kleinere Ausdehnung hat, werden die entsprechenden Zusatzfelder bei der Erstellung der Windfeldbibliothek auch für das zweitfeinste Netz erzeugt. In diesem Fall sollten die Gebäude auch in diesem Netz bei der Aufrasterung hinreichend gut aufgelöst werden.

Sind keine Rechennetze vom Benutzer vorgegeben, versucht das Programm, diese Aspekte bei der automatischen Festlegung der Rechennetze zu berücksichtigen. Bei Rechnungen mit Gebäuden wird standardmäßig immer ein System von geschachtelten Netzen angelegt. Dies kann unterdrückt werden, wenn als Option `os` in der Eingabedatei die Zeichenkette `-NESTING` angegeben ist. Die vom Programm gewählte Netzschachtelung berücksichtigt sowohl die Gebäude- als auch die Quellkonfiguration. Die maximale Gebäudehöhe und die gewählten Vertikalintervalle und Parameter der Netzschachtelung werden in der Protokolldatei vermerkt.

Das Programm berechnet die Konzentration und die Deposition auf jedem der Netze. Um die Ergebnisse unterscheiden zu können, ist an den eigentlichen Namen der Ergebnisdatei noch die Nummer des zu Grunde liegenden Netzes angehängt (beginnend mit 1 für das feinste Netz). Beispielsweise werden unter Verwendung der oben angegebenen Netzschachtelung statt der Datei `cs137a-cncz.dmna` die Dateien `cs137a-cncz01.dmna` und `cs137a-cncz02.dmna` erzeugt.

Die in der Protokolldatei angegebenen Immissionskennwerte sind die Maxima aus den verwendeten Netzen. Dann wird aus allen Netzen der insgesamt höchste Wert herausgesucht und im Protokoll vermerkt. Aus welchem Netz der Wert stammt, ist ebenfalls angegeben.

Bei Netzschachtelung für gegliedertes Gelände ist darauf zu achten, dass das verwendete digitale Geländemodell auch das größte Netz umfasst. Die aus dem digitalen Geländemodell berechneten Geländeprofile enthalten jetzt in ihrem Namen statt `00` die Nummer des zugehörigen Rechennetzes, also beispielsweise `zg03.dmna`.

---

<sup>24</sup> Die Option `NESTING` kann dann entfallen.

## 11 Ableitung von Abgasen über Schornsteine und Kühltürme

Bei der Ableitung von Abgasen über Schornsteine wird die Abgasfahnenüberhöhung gemäß VDI 3782 Blatt 3 berechnet. Die in der Richtlinie angegebenen Überhöhungsformeln gelten für Windgeschwindigkeiten in Schornsteinhöhe  $u_q > 1$  m/s. Um in der Praxis eine Anwendung auf beliebige AKTerm-Reihen zu ermöglichen, wird für  $u_q < 1$  m/s die Überhöhung ersatzweise mit dem Wert 1 m/s berechnet.

Bei der Ableitung von Abgasen über Kühltürme wird die Abgasfahnenüberhöhung gemäß VDI 3784 Blatt 2 berechnet.<sup>25</sup> Intern wird hierfür das vom VDI zur Verfügung gestellte Programm *VDISP* verwendet. *ARTM* erzeugt die entsprechende Eingabedatei *VDIIN.DAT*, ruft das Programm *vdisp.exe* auf und liest anschließend die Ergebnisse aus der Datei *VDIOUT.DAT* ein. Der von *VDISP* berechnete Anstieg der Fahnenachse wird analysiert und intern werden die Parameter  $v_q$  und  $s_q$  so gesetzt, dass die gleiche Endhöhe (effektive Quellhöhe) erreicht wird und der halbe Wert der Überhöhung in der gleichen Entfernung erzielt wird (siehe Verifikation 51c in Anhang A des AUSTAL2000 Handbuches). Damit geht das Programm noch über die Forderung der VDI 3784 Blatt 2 hinaus, nach der nur die effektive Quellhöhe in das Ausbreitungsmodell übernommen zu werden braucht.

Um nicht für jedes Partikel eine solche Analyse durchführen zu müssen, legt *ARTM* intern eine Tabelle an, in der vermerkt ist, welche Situationen schon mit *VDISP* gerechnet und welche Werte von  $v_q$  und  $s_q$  hierfür erhalten wurden. Wenn für ein Partikel die Überhöhung zu bestimmen ist, wird zuerst diese Tabelle überprüft, ob die zu berechnenden Werte schon bekannt sind. Dabei wird für die Windgeschwindigkeit eine Abweichung von maximal 10 % toleriert.

Falls das Programm *VDISP* ohne Berechnung der Überhöhung abbricht (z.B. wegen einer zu kleinen Froude-Zahl), wird für diese Situation ersatzweise ohne Überhöhung gerechnet und am Ende der Ausbreitungsrechnung wird ein entsprechender Warnhinweis ausgegeben.

Zur Verwendung von *VDISP* im Rahmen der TA Luft macht Prof. Schatzmann, Mitautor von Modell, Richtlinie und Programm *VDISP*, folgende Anmerkungen:

---

<sup>25</sup> Eine Quelle wird als Kühlturm interpretiert, wenn die Parameter  $l_q$  (Flüssigwassergehalt) oder  $r_q$  (Relative Feuchte) Werte größer 0 haben.



Die Ableitung der Rauchgase zusammen mit dem Wasserdampfschwaden über einen Naturzugnasskühlturm ist attraktiv, weil Kühlturmschwaden verglichen mit Schornsteinfahnen einen wesentlich größeren Wärmehalt besitzen. Die das Verhältnis von Impuls- zu Auftriebskräften am Einleitungsort kennzeichnende hydrodynamische Ähnlichkeitskennzahl, die densimetrische Froudezahl, unterscheidet sich bei Schornsteinfahnen und Kühlturmschwaden um etwa eine Größenordnung. Die relative Bedeutung der Auftriebskräfte ist bei Kühlturmschwaden somit etwa 10 mal größer als bei Rauchgasfahnen aus Schornsteinen. Dies führt vor allem bei geringen Windgeschwindigkeiten zu größeren effektiven Quellhöhen. Da sich das zu erwartende Bodenkonzentrationsmaximum in etwa invers proportional zum Quadrat der effektiven Quellhöhe verhält, wird in diesem Geschwindigkeitsbereich der Kühlturm zu geringeren Immissionen führen als der Schornstein.

Bei Starkwind kehren sich die Verhältnisse dagegen um. Kühlturmschwaden treten im Vergleich zu Schornsteinfahnen mit einer viel geringeren Vertikalgeschwindigkeit in die Atmosphäre ein. Bei Starkwind übersteigt in Kühlturmkronehöhe die Windgeschwindigkeit die Schwadenaustrittsgeschwindigkeit, mit der Folge, dass Teile des Schwadens in den Kühlturmnachlauf gezogen und zum Boden gemischt werden. Zusätzliche "down-wash"-Effekte gehen von anderen hohen Bauwerken des Kraftwerks und seiner Umgebung aus. Da hohe Windgeschwindigkeiten seltener vorkommen als geringe, bleibt -- betrachtet über repräsentative Zeiträume -- die Ableitung der Abgase zusammen mit dem Kühlturmschwaden die günstigere Ableitungsvariante. Da die Intensität der "down-wash"-Erscheinungen von der speziellen Geometrie des Kraftwerkskomplexes und seiner Umgebung abhängt, ist allerdings jeweils zu prüfen, ob diese generelle Aussage auch im Einzelfall zutrifft und die in der TA-Luft festgeschriebenen Immissionswerte eingehalten werden.

Die komplexen Schwaden/Bauwerks-Wechselwirkungen lassen sich mit numerischen Modellen derzeit noch nicht simulieren. Deshalb werden üblicherweise in Grenzschicht-Windkanälen Experimente durchgeführt, mit dem Ziel, sogenannte Verstärkungsfaktoren zu bestimmen. Diese Faktoren dienen dazu, Rechenergebnisse zu korrigieren, wie sie mit den im Genehmigungsverfahren üblicherweise verwendeten Standardmodellen für die Bestimmung von Immissionskennwerten nach TA-Luft ermittelt werden. Diese Standardmodelle setzen die freie Abströmung der Abgase in eine ungestörte Windströmung voraus. Bauwerkseinflüsse können sie nicht berücksichtigen.

---

Eine Gegenüberstellung des Fahnenanstiegs, wie er von *VDISP* berechnet und von *ARTM* realisiert wird, ist in der Verifikation 51c in Anhang A des AUSTAL2000 Handbuchs enthalten.

Neben der standardmäßigen Verwendung der Richtlinien VDI 3782 Blatt 3 und VDI 3784 Blatt 2 zur Bestimmung der Abgasfahnenüberhöhung kann die Überhöhung auch explizit über die Parameter  $s_q$  und  $v_q$  (auch als Zeitreihe) vorgegeben werden.

## 12 Beispiele

Der Ordner `test` enthält die in folgender Tabelle aufgeführten Beispielrechnungen:

<b>Nr.</b>	<b>Ordner</b>	<b>Beschreibung</b>
1	<code>langzeit-o-gelände</code>	AKTerm ARTM2000.akterm, Kamin mit $h_q = 50$ m, keine Überhöhung, Cs-137-Schwebstoff in ebenem Gelände
2	<code>langzeit-gelände</code>	AKTerm ARTM2000.akterm, Kamin mit $h_q = 50$ m, keine Überhöhung, Cs-137-Schwebstoff in komplexem Gelände ( <code>tittling.grid</code> )
3	<code>gebaeude</code>	AKS ARTM2000.AKS, Kamin mit $h_q = 130$ m, keine Überhöhung, mit zwei Kühltürmen.

Weitere umfangreiche Beispielrechnungen mit AUSTAL2000 sind zu finden unter:  
[www.austal2000.de](http://www.austal2000.de).

## A Modellbeschreibung des Programmpakets ARTM

Die bereits im bestehenden und für die Ausbreitung konventioneller Luftbeimengungen konzipierten Programmpaket AUSTAL2000 implementierten Programmteile wurden auf alle gängigen Radionuklide, die bei betrieblichen und störfallbedingten Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen in die Atmosphäre auftreten können, erweitert. Darüber hinaus wurden spezielle chemisch-physikalische Formen dieser Radionuklide berücksichtigt, sofern diese Eigenschaften auf die atmosphärische Ausbreitung oder die Deposition Einfluss haben. Eine Liste gängiger Radionuklide findet sich in KTA 1503.1<sup>26</sup>. Ergänzt wurde diese Liste durch die chemisch-physikalischen Formen von Tritium, sofern sie unterschiedliches Depositionsverhalten zeigen. Weiter besteht die Möglichkeit, vom Anwender weitere Radionuklide nachträglich aufzunehmen, z. B. über externe Parameterdateien.

Basis für die Änderungen an AUSTAL2000 war die Version 2.5.1. Aus dieser Version wurde das Modellsystem ARTM durch die folgenden Modifikationen und Erweiterungen erstellt:

- Erweiterungen der Schadstoffeigenschaften
  - radioaktiver Zerfall während der Ausbreitung
  - Berücksichtigung der chemisch-physikalischen Form der Radionuklide
  - die Berücksichtigung des unterschiedlichen Depositionsverhaltens von nicht als Schwebstoff auftretenden Radionukliden
- Erweiterungen der Modellphysik
  - Berechnung der nassen Deposition
  - Berechnung der Gammasubmersion
  - Berücksichtigung der Vegetationsperiode (Sommerhalbjahr, 01. Mai bis 31. Oktober)
  - Berücksichtigung komplexer Gebäudestrukturen

---

<sup>26</sup> KTA-Regel 1503.1: Überwachung der Ableitung gasförmiger und an Schwebstoffen gebundener radioaktiver Stoffe, Teil 1: Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Kaminfortluft bei bestimmungsgemäßem Betrieb; Fassung 06/02, Bundesanzeiger Nr. 172 a, vom 13.09.2002

- Einrichtung einer Schnittstelle zu den Dosisberechnungsmodulen der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung (AVV)<sup>27</sup>

## A.1 Erweiterung der Luftschadstoffeigenschaften

Die für die Anwendung des Modell AUSTAL2000 fest vorgesehenen Schadstoffe wurden durch die in der Tabelle 1 angegebenen Radionuklide in Anlehnung an die Vorgaben der KTA 1503.1 in einer offenen Stoffliste übernommen. Diese Stoffliste liegt als ASCII-Datei vor und kann im Bedarfsfall um Radionuklide erweitert, bzw. dessen Stoffeigenschaften geändert werden. Die neu hinzu gekommenen Parameter dienen der Beschreibung der nassen (Washoutfaktor) und der trockenen Deposition (Depositionsgeschwindigkeit) sowie der Berechnung des radioaktiven Zerfalls während der Ausbreitung (Zerfallskonstante) und der Gammawolkenstrahlung (Anteil > 0,2 MeV), s. Abschnitt A.2.

Tabelle 1 Liste der berücksichtigten Radionuklide und der verwendeten Parameter

Nuklid	Name	Form*)	Washoutkoeffizient**) in 1/s	Depositionsgeschwindigkeit in m/s	Zerfallskonstante in 1/s	Anteil > 0,2 MeV
H - 3	Tritium	W	0	0,00E+00	$1.78 \cdot 10^{-9}$	0.00
H - 3	Tritium	A	Siehe Tabelle 2		$1.78 \cdot 10^{-9}$	0.00
C - 14	Kohlenstoff-14	A	Siehe Tabelle 2		$3.84 \cdot 10^{-12}$	0.00
C - 14	Kohlenstoff-14	GB	0	0	$3.84 \cdot 10^{-12}$	0.00
C - 14	Kohlenstoff-14	R	0	0	$3.84 \cdot 10^{-12}$	0.00
S - 35	Schwefel	A	Siehe Tabelle 2		$9,18 \cdot 10^{-8}$	
Ar - 41	Argon-41	E	0	0	$1.05 \cdot 10^{-4}$	1.00
Ca - 41	Calcium-41	A	Siehe Tabelle 2		$1.57 \cdot 10^{-13}$	0.00
Ca - 45	Calcium-45	A	Siehe Tabelle 2		$4.92 \cdot 10^{-8}$	0.00
Cr - 51	Calcium-51	A	Siehe Tabelle 2		$2.90 \cdot 10^{-7}$	0.97
Mn - 54	Mangan-54	A	Siehe Tabelle 2		$2.57 \cdot 10^{-8}$	1.00
Fe - 55	Eisen-55	A	Siehe Tabelle 2		$8.14 \cdot 10^{-9}$	0.00

<sup>27</sup> Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen (Entwurf der AVV zu § 47 StrlSchV), (aktueller Entwurf vom 13.05.2005)

Nuklid	Name	Form*)	Washout- koeffizient**) in 1/s	Depositions- geschwindigkeit in m/s	Zerfalls- konstan- te in 1/s	Anteil > 0,2 MeV
Fe - 59	Eisen-59	A	Siehe Tabelle 2		$1.80 \cdot 10^{-7}$	0.99
Co - 57	Kobalt-57	A	Siehe Tabelle 2		$2.97 \cdot 10^{-8}$	0.01
Co - 58	Kobalt-58	A	Siehe Tabelle 2		$1.13 \cdot 10^{-7}$	1.00
Co - 60	Kobalt-60	A	Siehe Tabelle 2		$4.18 \cdot 10^{-9}$	1.00
Ni - 59	Nickel-59	A	Siehe Tabelle 2		$2.93 \cdot 10^{-13}$	0.00
Ni - 63	Nickel-63	A	Siehe Tabelle 2		$2.29 \cdot 10^{-10}$	0.00
Zn - 65	Zink-65	A	Siehe Tabelle 2		$3.29 \cdot 10^{-8}$	1.00
Kr - 85m	Krypton-85m	E	0	0	$4.30 \cdot 10^{-5}$	0.27
Kr - 85	Krypton-85	E	0	0	$2.05 \cdot 10^{-9}$	0.81
Kr - 87	Krypton-87	E	0	0	$1.52 \cdot 10^{-4}$	0.99
Kr - 88	Krypton-88	E	0	0	$6.78 \cdot 10^{-5}$	0.97
Kr - 89	Krypton-89	E	0	0	$3.61 \cdot 10^{-3}$	1.00
Rb - 88	Rubidium-88	A	Siehe Tabelle 2		$6.49 \cdot 10^{-4}$	0.99
Sr - 89	Strontium-89	A	Siehe Tabelle 2		$1.59 \cdot 10^{-7}$	1.00
Sr - 90	Strontium-90	A	Siehe Tabelle 2		$7.55 \cdot 10^{-10}$	0.00
Y - 90	Yttrium-90	A	Siehe Tabelle 2		$3.00 \cdot 10^{-6}$	0.00
Zr - 93	Zirkonium-93	A	Siehe Tabelle 2		$1.44 \cdot 10^{-14}$	0.00
Zr - 95	Zirkonium-95	A	Siehe Tabelle 2		$1.25 \cdot 10^{-7}$	1.00
Nb - 95	Niob-95	A	Siehe Tabelle 2		$2.28 \cdot 10^{-7}$	1.00
Tc - 99m	Technetium-99m	A	Siehe Tabelle 2		$3.21 \cdot 10^{-5}$	0.00
Tc - 99	Technetium-99	A	Siehe Tabelle 2		$1.03 \cdot 10^{-13}$	0.00
Ru - 103	Ruthenium-103	A	Siehe Tabelle 2		$2.04 \cdot 10^{-7}$	1.00
Ru - 106	Ruthenium-106	A	Siehe Tabelle 2		$2.19 \cdot 10^{-8}$	0.00
Ag - 110m	Silber-110m	A	Siehe Tabelle 2		$3.21 \cdot 10^{-8}$	1.00
Te - 123m	Tellur-123m	A	Siehe Tabelle 2		$1.34 \cdot 10^{-7}$	1.00
Sb - 124	Antimon-124	A	Siehe Tabelle 2		$7.93 \cdot 10^{-9}$	0.94
Sb - 125	Antimon-125	A	Siehe Tabelle 2		$6.70 \cdot 10^{-8}$	0.00
I - 131	Jod-131	L	$7 \cdot 10^{-5}$	0,01	$9.98 \cdot 10^{-7}$	0.99
I - 131	Jod-131	R	$7 \cdot 10^{-7}$	0,0001	$9.98 \cdot 10^{-7}$	0.99
I - 131	Jod-131	A	Siehe Tabelle 2		$9.98 \cdot 10^{-7}$	0.99
I - 133	Jod-133	L	$7 \cdot 10^{-5}$	0,01	$9.26 \cdot 10^{-6}$	1.00
I - 133	Jod-133	R	$7 \cdot 10^{-7}$	0,0001	$9.26 \cdot 10^{-6}$	1.00
I - 133	Jod-133	A	Siehe Tabelle 2		$9.26 \cdot 10^{-6}$	1.00
Xe - 131m	Xenon-131m	E	0	0	$6.74 \cdot 10^{-7}$	0.00

Nuklid	Name	Form <sup>*)</sup>	Washout- koeffizient <sup>**)</sup> in 1/s	Depositions- geschwindigkeit in m/s	Zerfalls- konstan- te in 1/s	Anteil > 0,2 MeV
Xe - 133m	Xenon-133m	E	0	0	$3.55 \cdot 10^{-6}$	0.57
Xe - 133	Xenon-133	E	0	0	$1.53 \cdot 10^{-6}$	0.00
Xe - 135m	Xenon-135m	E	0	0	$7.56 \cdot 10^{-4}$	0.99
Xe - 135	Xenon-135	E	0	0	$2.12 \cdot 10^{-5}$	0.99
Xe - 137	Xenon-137	E	0	0	$2.96 \cdot 10^{-3}$	1.00
Xe - 138	Xenon-138	E	0	0	$8.15 \cdot 10^{-4}$	0.99
Cs - 134	Caesium-134	A	Siehe Tabelle 2		$1.07 \cdot 10^{-8}$	1.00
Cs - 137	Caesium-137	A	Siehe Tabelle 2		$7.32 \cdot 10^{-10}$	0.00
Ba - 140	Barium-140	A	Siehe Tabelle 2		$6.30 \cdot 10^{-7}$	0.92
La - 140	Lanthan-140	A	Siehe Tabelle 2		$4.79 \cdot 10^{-6}$	1.00
Ce - 141	Cer-141	A	Siehe Tabelle 2		$2.48 \cdot 10^{-7}$	0.00
Ce - 144	Cer-144	A	Siehe Tabelle 2		$2.82 \cdot 10^{-8}$	0.00
Hg - 197	Quecksilber	A	Siehe Tabelle 2		$1.72 \cdot 10^{-7}$	0.96
Hg - 197	Quecksilber	L	$7 \cdot 10^{-5}$	0,01	$1.72 \cdot 10^{-7}$	0.96
Hg - 197	Quecksilber	R	$7 \cdot 10^{-7}$	0,0001	$1.72 \cdot 10^{-7}$	0.96
U - 234	Uran-234	A	Siehe Tabelle 2		$8.99 \cdot 10^{-14}$	0.00
U - 235	Uran-235	A	Siehe Tabelle 2		$2.98 \cdot 10^{-17}$	0.08
U - 238	Uran-238	A	Siehe Tabelle 2		$4.92 \cdot 10^{-18}$	0.00
Pu - 238	Plutonium-238	A	Siehe Tabelle 2		$2.51 \cdot 10^{-10}$	0.00
Pu - 239	Plutonium-239	A	Siehe Tabelle 2		$9.13 \cdot 10^{-13}$	0.03
Pu - 240	Plutonium-240	A	Siehe Tabelle 2		$3.36 \cdot 10^{-12}$	0.00
Am - 241	Americium-241	A	Siehe Tabelle 2		$5.09 \cdot 10^{-11}$	0.00
Cm - 242	Curium-242	A	Siehe Tabelle 2		$4.93 \cdot 10^{-8}$	0.00
Cm - 244	Curium-244	A	Siehe Tabelle 2		$1.42 \cdot 10^{-9}$	0.00

*)	Form:	Bedeutung:
	A	Schwebstoff (früher Aerosol)
	E	Edelgas
	G	gasförmig
	GB	gasförmig als CO <sub>2</sub>
	L	elementare Form
	R	organisch
	W	Wasser

\*\*\*) stoffspezifischer Washoutkoeffizient  $\Lambda_0$  für die Niederschlagsintensität  $I_0 = 1 \text{ mm/h}$

Bei der Ausbreitungsrechnung für radioaktive (Schwebstoffe) Stäube sind trockene und nasse Deposition sowie Sedimentation für die in Tabelle 1 den Schwebstoffen zugeordneten Radionukliden zu berücksichtigen. Die dabei zu verwendenden Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeiten und Washoutkoeffizienten  $\Lambda_0$  finden sich in Tabelle 1 und Tabelle 2. Die Ausbreitungsrechnung ist für folgende Größenklassen der Korngrößenverteilung, angegeben als aerodynamischer Durchmesser  $d_a$ , des Emissionsmassenstromes durchzuführen, wobei jeweils die angegebenen Werte von Depositionsgeschwindigkeit  $v_d$  und Sedimentationsgeschwindigkeit  $v_s$  zu verwenden sind:

Tabelle 2 Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeiten sowie stoffspezifischer Washoutkoeffizient für die Niederschlagsintensität  $I_0 = 1 \text{ mm/h}$  für Stäube

Klasse	$d_a$ in $\mu\text{m}$	Depositionsgeschwindigkeit $v_d$ in m/s	Sedimentationsgeschwindigkeit $v_s$ in m/s	Washoutkoeffizient $\Lambda_0$ in 1/s für Niederschlagsintensität $I_0=1\text{mm/h}$
1	kleiner 2,5	0,001	0,00	$1 \cdot 10^{-4}$
2	2,5 bis 10	0,01	0,00	$2 \cdot 10^{-4}$
3	10 bis 50	0,05	0,04	$3 \cdot 10^{-4}$
4	größer 50	0,20	0,15	$4 \cdot 10^{-4}$

## A.2 Erweiterungen der Modellphysik

Bei der Berechnung der radiologischen Konsequenzen einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen müssen zum Teil andere Prozesse als die bereits in AUSTAL2000 implementierten berücksichtigt werden. Dieses betrifft die Modellierung des radioaktiven Zerfalls, der nassen Deposition und der Gammasubmersion.

### A.2.1 Radioaktiver Zerfall

Durch die Aufnahme der radioaktiven Zerfallskonstante in die Liste von stoffspezifisch zu berücksichtigenden Parametern und der speziellen Modellphysik der Partikelmodelle ist die Modellierung des radioaktiven Zerfalls sehr einfach: Bei diesem Modelltyp wird das Schicksal von einzelnen Partikeln verfolgt, d.h. man kennt von jeder für eine bestimmte Anzahl von Atomen repräsentativen Untermenge jeweils ihren Ort und die seit der Freisetzung verstrichene Zeit. Daraus und der stoffspezifischen Zerfallskon-



stante kann zu jedem Zeitpunkt eine Wahrscheinlichkeit für den Zerfall eines jeden Partikels angegeben werden und damit der Zerfall per Zufallsgenerator gesteuert werden.

Der Aufbau von Tochternukliden wird in ARTM nicht berücksichtigt.

### A.2.2 Berechnung der nassen Deposition

Die Berechnung der nassen Deposition erfolgt in ARTM analog dem Verfahren in der AVV zu 47 StrlSchV. Demnach ist die Bodenkontaminationsrate durch Niederschlag (in Bq/m<sup>2</sup>·s proportional der über die z-Koordinate integrierten Konzentrationsverteilung. Der Proportionalitätsfaktor ist der Washoutkoeffizient  $\Lambda$  in s<sup>-1</sup>.

Es ist  $\Lambda = \Lambda_0 \cdot (I/I_0)^\kappa$

mit  $\kappa$ : stoffspezifischer Exponent  
 $\Lambda_0$ : stoffspezifischer Washoutkoeffizient für die Niederschlagsintensität  $I_0$   
 $I$ : Niederschlagsintensität in mm/h  
 $I_0$ : Niederschlagsintensität 1 mm/h

Für die einzelnen Radionuklide sind die stoffspezifischen Washoutkoeffizienten in der Tabelle 1 angegeben. Tabelle 2 enthält die verwendeten Werte für die vier Partikelgrößenklassen von ARTM zusammen mit den Depositions- und Sedimentationsgeschwindigkeiten.

### A.2.3 Berechnung der Gammasubmersion

Auf Grund der zu erwartenden Quellterme muss die Strahlenexposition in Folge Gammasubmersion (Gammawolkenstrahlung) als möglicher Expositionspfad betrachtet werden. Aus diesem Grunde wurde das Modell ARTM für entsprechende Dosisberechnungen erweitert. Die VDI-Richtlinie 3945, Blatt 3 /VDI 00/ enthält den Vorschlag für einen Algorithmus zur Berechnung der Gammasubmersion, dessen Implementierung in ARTM vorgenommen wurde.

Bei radioaktiven Stoffen, die Gammastrahlen aussenden, sind zur Berechnung der Gammawolkenstrahlung an einem Aufpunkt  $x$  die Beiträge von allen Punkten  $x'$  der Schadstoffwolke aufzuintegrieren. In der Regel wird die Gammasubmersion  $G(x)$  nur für Aufpunkte am Erdboden ( $z = 0$ ) berechnet. Gibt man die Quellstärke in Bq/s an, dann erhält man  $G(x, y)$  aus der Konzentrationsverteilung  $c(x)$  gemäß der AVV zu § 47 StrlSchV in der Einheit Bq m<sup>-2</sup> nach folgender Gleichung

$$G(x, y) = \int c(x') \cdot \frac{B(\mu R) \cdot \tilde{K}(\mu z', \mu S) \cdot \exp(-\mu R)}{4\pi R^2} d^3 x'$$

mit  $S = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$  in m

und  $R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z'^2}$  in m.

Der Gesamtschwächungskoeffizient  $\mu$ , der Dosisaufbaufaktor  $B(\mu R)$  und der Korrekturfaktor für den Einfluss des Bodens  $\tilde{K}(\mu z', \mu S)$  hängen von der Energie der Gammastrahlen ab (siehe Tabelle 3 bis Tabelle 6). Die Gammasubmersionsdosis erhält man aus  $G(x, y)$  durch Multiplikation mit dem nuklidspezifischen Dosisleistungsfaktor in Sv·m<sup>2</sup>/(Bq·s) und Integration über die Expositionszeit.

Mit dem Partikelmodell wird die dreidimensionale Konzentrationsverteilung  $c(x)$  in Form von Mittelwerten  $\bar{c}_{ijk}$  in Bq/m<sup>3</sup> über die Volumenelemente  $\tilde{\Delta}_{ijk}$  des räumlichen Auszählgitters berechnet. Die Gammasubmersion wird für Mittelpunkte  $(x_{lm}, y_{lm}, 0)$  der Maschen auf dem Erdboden berechnet:

$$G(x_{lm}, y_{lm}) = \sum_{i,j,k} \bar{c}_{ijk} E_{ijklm}$$

mit der Einflussmatrix  $E_{ijklm}$  in m

$$E_{ijklm} = \int_{\tilde{\Delta}_{ijk}} \frac{B(\mu R_{lm}) \cdot K(\mu z', \mu S_{lm}) \cdot \exp(-\mu R_{lm})}{4\pi R_{lm}^2} d^3 x'$$

$$S_{lm} = \sqrt{(x_{lm} - x')^2 + (y_{lm} - y')^2} \text{ in m}$$

horizontaler Abstand zwischen den Mittelpunkten der Gittermaschen

$$R_{lm} = \sqrt{(x_{lm} - x')^2 + (y_{lm} - y')^2 + z'^2} \text{ in m}$$

Abstand zwischen Mittelpunkt der bodennahen Masche mit Koordinaten  $(x_{lm}, y_{lm}, 0)$  und Mittelpunkt der Masche mit Koordinaten  $(x', y', z')$ .

In ebenem Gelände ist die Einflussmatrix  $E_{ijklm}$  nur eine Funktion von  $|i - l|$ ,  $|j - m|$  und  $k$ . Sie hängt nicht von der aktuellen Konzentrationsverteilung ab, sondern vom räumlichen Gitter. Solange man mit demselben Auszählgitter rechnet, braucht man die Ein-

flussmatrix  $E_{ijklm}$  nur einmal auszurechnen und kann dann mit der Gleichung zur Berechnung von  $G(x_{lm}, y_{lm})$  für jede Verteilung  $\bar{c}_{ijk}$  die Gammasubmersion berechnen.

Die Hauptaufgabe besteht also in der Bestimmung der Elemente der Einflussmatrix  $E_{ijklm}$ . Hier wird nur die Anwendung auf ebenes Gelände diskutiert, so dass sich die Einflussmatrix reduziert auf

$$E_{ijk} \equiv E_{ijk11}.$$

Bei dem Element  $E_{111}$  liegt der Aufpunkt im Mittelpunkt der Bodenfläche, der Integrand wird also singulär. Alle anderen Elemente sind unkritisch, für sie ist immer  $R > 0$ .

Zur Durchführung der Rechnung ist es zweckmäßig, das Koordinatensystem so zu wählen, dass sein Nullpunkt mit dem Aufpunkt  $(\hat{x}_1, \hat{y}_1)$  zusammenfällt und die Koordinaten auf  $1/\mu$  zu normieren:

$$\xi = \mu x$$

$$\eta = \mu y$$

$$\zeta = \mu z$$

$$E_{ijk} = \frac{\varepsilon_{ijk}}{4\pi\mu}$$

$$\varepsilon_{ijk} = \int_{V_{ijk}} B(r)K(\zeta, s)\exp(-r)r^{-2}d\xi d\eta d\zeta$$

mit  $r = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}$

$$s = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$$

Für alle Elemente außer  $\varepsilon_{111}$  kann die Integration als Gauß-Quadratur durchgeführt werden. Sind  $a_n$  die Abszissen und  $g_n$  die Gewichte für eine Gauß-Quadratur mit  $N$  Punkten ( $n = 1 \dots N$ ) über das Intervall von 0 bis 1, dann ist

$$\varepsilon_{ijk} = I_Q(\xi_{i-1}, \xi_i - \xi_{i-1}, \eta_{j-1}, \eta_j - \eta_{j-1}, \zeta_{k-1}, \zeta_k - \zeta_{k-1})$$

$$I_Q(\xi, \delta_\xi, \eta, \delta_\eta, \zeta, \delta_\zeta) = \sum_{i'=1}^N g_{i'} \sum_{j'=1}^N g_{j'} \sum_{k'=1}^N g_{k'} B(r')K(\zeta', s')\exp(-r')r'^{-2}$$

mit  $r' = \sqrt{\xi'^2 + \eta'^2 + \zeta'^2}$

$$s' = \sqrt{\xi'^2 + \eta'^2}$$

$$\xi' = \xi + a_i \delta_\xi$$

$$\eta' = \eta + a_j \delta_\eta$$

$$\zeta' = \zeta + a_k \delta_\zeta$$

Wenn das Volumen  $V_{ijk}$  sehr groß ist oder nahe am Nullpunkt liegt, kann es zur Erhöhung der numerischen Genauigkeit angebracht sein, das Integrationsvolumen zu unterteilen und die Gauß-Quadratur über jedes Teilvolumen separat durchzuführen.

Das Element  $\varepsilon_{111}$  kann nicht durch eine Gauß-Quadratur berechnet werden, da der Integrand singulär ist. Die Singularität kann man durch Übergang zu räumlichen Polarkoordinaten  $(r, \vartheta, \varphi)$  beseitigen:

$$\xi = r \sin(\vartheta) \cos(\varphi)$$

$$\eta = r \sin(\vartheta) \sin(\varphi)$$

$$\zeta = r \cos(\vartheta)$$

$$d\xi d\eta d\zeta = r^2 \sin(\vartheta) dr d\vartheta d\varphi$$

Mit der Substitution

$$\gamma = \cos(\vartheta)$$

$$d\gamma = -\sin(\vartheta) d\vartheta$$

erhält man

$$\varepsilon_{111} = \int_{V_{111}} B(r) K(\zeta, s) \exp(-r) dr d\gamma d\varphi$$

mit  $\zeta = \gamma r$

$$s = \gamma' r$$

$$\gamma' = \sqrt{1 - \gamma^2} = \sin(\vartheta)$$

Bei quadratischen Maschen in  $\xi$  und  $\eta$  kann man sich zur Berechnung von  $\varepsilon_{111}$  aus Symmetriegründen auf den Sektor  $0 \leq \varphi \leq \pi/4$  (Volumen  $V_S$ ) beschränken,

$$V_S = \{ (\xi, \eta, \zeta) \mid 0 \leq \xi \leq \xi_1, 0 \leq \eta \leq \xi, 0 \leq \zeta \leq \zeta_1 \}$$

$$\varepsilon_{111} = 8 I_S(\xi_1, \zeta_1)$$

$$I_S(\xi_1, \zeta_1) = \int_0^{\pi/4} d\varphi \int_0^1 d\gamma \int_0^{\tilde{r}(\gamma, \varphi)} dr B(r) K(\gamma r, \gamma' r) \exp(-r)$$

Hierbei ist  $\tilde{r}(\gamma, \varphi)$  die Länge des Vektors  $r$ , der vom Nullpunkt in Richtung  $(\vartheta, \varphi)$  bis zum Rand des Sektors  $V_S$  verläuft. Das Integral über  $r$  kann unter Verwendung der Definition von  $B$  und  $K$  in folgender Form geschrieben werden:

$$\begin{aligned}\tilde{I}(\gamma, \hat{r}, \xi_1, \zeta_1) &= \int_0^{\tilde{r}(\gamma, \varphi)} B(r) K(\gamma r, \gamma' r) \exp(-r) dr \\ &= \sum_i \sum_k \sum_m B_i K_{km} \gamma^k \int_0^{\tilde{r}(\gamma, \varphi)} r^{i+k} \exp\left[-\left(\frac{1}{2} m \gamma' + 1\right) r\right] dr\end{aligned}$$

Fasst man gleiche Potenzen von  $r$  zusammen und führt  $\rho = \left(\frac{1}{2} m \gamma' + 1\right) r$  als neue Integrationsvariable ein, dann ist

$$\begin{aligned}\tilde{I}(\gamma, \hat{r}, \xi_1, \zeta_1) &= \sum_n \sum_m P_{mn} E_n(\hat{\rho}_m) \\ P_{mn} &= \sum_i \sum_k B_i K_{km} \gamma^k \left(\frac{1}{2} m \gamma' + 1\right)^{-(n+1)} \delta_{i+k, n} \\ E_n(\hat{\rho}_m) &= \int_0^{\hat{\rho}_m} \rho^n \exp(-\rho) d\rho \\ \hat{\rho}_m(\gamma, \varphi) &= \left(\frac{1}{2} m \gamma' + 1\right) \hat{r}(\gamma, \varphi)\end{aligned}$$

Das Integral  $E_n$  kann analytisch (rekursiv) berechnet werden:

$$\begin{aligned}E_n(\rho) &= n E_{n-1}(\rho) - \rho^n \exp(-\rho) \\ E_0(\rho) &= 1 - \exp(-\rho)\end{aligned}$$

Es bleibt nur noch die Bestimmung der Funktion  $\hat{r}(\gamma, \varphi)$ .

Hierbei ist zwischen zwei Fällen zu unterscheiden:

- Der Vektor  $r$  endet in der senkrechten Randfläche  $\xi = \xi_1$ . Er durchläuft also das Volumen einer Pyramide mit der Grundfläche  $\xi = \xi_1, 0 \leq \eta \leq \eta_1, 0 \leq \zeta \leq \zeta_1$  und der Spitze im Nullpunkt.
- Der Vektor  $r$  endet in der horizontalen Deckfläche  $\zeta = \zeta_1$ . Er durchläuft dabei das Volumen eines Tetraeders mit den Eckpunkten  $(0,0,0)$ ,  $(\xi_1, 0, \zeta_1)$ ,  $(\xi_1, \eta_1, \zeta_1)$  und  $(0, 0, \zeta_1)$ .

Die Grenzfläche zwischen diesen beiden Gebieten ist gegeben durch

$$\gamma = \gamma_1(\varphi) = \frac{\zeta_1 \cos(\varphi)}{\sqrt{\xi_1^2 + \zeta_1^2 \cos^2(\varphi)}}$$

Mit dieser Fallunterscheidung erhält man:

$$\hat{r}(\gamma, \varphi) = \begin{cases} \frac{\xi_1}{\gamma \cos(\varphi)} & \text{für } \gamma \leq \gamma_1(\varphi) \\ \frac{\xi_1}{\gamma} & \text{für } \gamma \geq \gamma_1(\varphi) \end{cases}$$

Das Integral  $I_S$  über den Sektor  $V_S$  ist also die Summe aus dem Integral  $I_P$  über die Pyramide und dem Integral  $I_T$  über das Tetraeder,

$$I_S = I_P + I_T$$

$$I_P(\xi_1, \zeta_1) = \int_0^{\pi/4} d\varphi \int_0^{\gamma_1(\varphi)} d\gamma \tilde{I}(\gamma, \hat{r}, \xi_1, \zeta_1)$$

$$I_T(\xi_1, \zeta_1) = \int_0^{\pi/4} d\varphi \int_{\gamma_1(\varphi)}^1 d\gamma \tilde{I}(\gamma, \hat{r}, \xi_1, \zeta_1)$$

Das verbleibende Doppelintegral kann wieder problemlos durch Gauß-Quadratur bestimmt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das numerische Ergebnis für  $I_T$  umso schlechter wird, je flacher das Volumenelement  $V_{111}$  ist. Für  $\xi_1 \ll \zeta_1$  ist es daher zweckmäßig, das Volumenelement noch einmal zu unterteilen:

$$2I_S(\xi_1, \zeta_1) = 2I_S(\xi_{1'}, \zeta_1) + 2I_Q(\xi_{1'}, \xi_1 - \xi_{1'}, 0, \eta_{1'}, 0, \zeta_1) + I_Q(\xi_{1'}, \xi_1 - \xi_{1'}, \eta_{1'}, \eta_1 - \eta_{1'}, 0, \zeta_1)$$

mit  $\xi_{1'} = f_F \zeta_1 < \xi_1$

$$\eta_{1'} = \xi_{1'}$$

### Koeffizienten für die Berechnung der Gammasubmersion

Im Folgenden sind die zur Berechnung der Gammasubmersion erforderlichen Formeln und Koeffizienten zusammengestellt. Dabei orientiert sich die Nomenklatur weitgehend an den Ausführungen in Anhang 7 der AVV zu § 47 StrlSchV /AVV 05/. Die Koeffizienten für die Gammaenergie 1 MeV wurden direkt aus der AVV übernommen. Die für die Gammaenergie 0,1 MeV angegebenen Parameter wurden aus der Fachliteratur bezogen, weil die AVV hierfür keine Werte angibt.

### Dosisaufbaufaktor für $\gamma$ -Submersion

Für den Dosisaufbaufaktor in Luft ohne Einfluss des Bodens für die Energie 1 MeV bzw. 0,1 MeV ist folgende Näherungsformel anzuwenden:

$$B_{1MeV}(\mu_{1MeV} \cdot R) = 1 + \sum_{m=1}^5 b_{1MeV;m} \cdot (\mu_{1MeV} \cdot R)^m$$

$$\text{bzw. } B_{0,1\text{MeV}}(\mu_{0,1\text{MeV}} \cdot R) = 1 + \sum_{m=1}^5 b_{0,1\text{MeV};m} \cdot (\mu_{0,1\text{MeV}} \cdot R)^m$$

mit den Gesamtschwächungskoeffizienten für  $\gamma$ -Strahlung der Energien 1 MeV bzw. 0,1 MeV

$$\mu_{1\text{MeV}} = 7,78 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ bzw. } \mu_{0,1\text{MeV}} = 1,82 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$$

Die Koeffizienten  $b_{1\text{MeV};m}$  bzw.  $b_{0,1\text{MeV};m}$  sind für die Gammaenergien 1 MeV in der Tabelle 3 und für 0,1 MeV in der Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 3 Koeffizienten  $b_{1\text{MeV};m}$  zur Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 1 MeV aus /AVV 05/

$B_{1\text{MeV};m}$				
$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
$7,7 \cdot 10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^{-1}$	$-4,0 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$-8,2 \cdot 10^{-5}$

Diese Koeffizienten gelten für den Bereich  $\mu_{1\text{MeV}} \cdot R < 15$ , für größere  $\mu_{1\text{MeV}} \cdot R$  kann  $B_{1\text{MeV}} = B_{1\text{MeV}}(15)$  gesetzt werden.

Tabelle 4 Koeffizienten  $b_{0,1\text{MeV};m}$  zur Berechnung des Dosisaufbaufaktors in Luft bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 0,1 MeV abgeleitet aus /JAC 84/

$B_{0,1\text{MeV};m}$				
$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
1,9	1,7	$-3,4 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$-2,1 \cdot 10^{-3}$

### Korrekturfaktor für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion

Der Korrekturfaktor für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion ist nach folgender Näherungsformel zu berechnen:

$$K_{1\text{MeV}}(\mu_{1\text{MeV}} \cdot z', \mu_{1\text{MeV}} \cdot s) \approx \sum_{k=0}^3 \sum_{m=0}^3 a_{k,m} (\mu_{1\text{MeV}} \cdot z')^k \cdot \exp\left(-\frac{m}{2} \cdot \mu_{1\text{MeV}} \cdot s\right) \quad \text{für 1 MeV}$$

bzw.

$$K_{0,1\text{MeV}}(\mu_{0,1\text{MeV}} \cdot z', \mu_{0,1\text{MeV}} \cdot s) \approx \sum_{k=0}^3 \sum_{m=0}^3 a_{k,m} (\mu_{0,1\text{MeV}} \cdot z')^k \cdot \exp\left(-\frac{m}{2} \cdot \mu_{0,1\text{MeV}} \cdot s\right) \quad \text{für 0,1 MeV}$$

Die in Tabelle 5 angegebenen Koeffizienten  $a_{k,m}$  für die Energien 1 MeV wurden der AVV zu § 47 StrISchV /AVV 05/ entnommen und entsprechen den in einer Arbeit von Jacob et al. /JAC 85/ angegebenen Werten. Aus dieser Arbeit wurden auch die in Tabelle 6 angegebenen Bodenkorrekturfaktoren für 0,1 MeV entnommen.

Tabelle 5 Koeffizienten  $a_{k,m}$  zur Berechnung des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 0,1 MeV

$E_\gamma = 1 \text{ MeV}$	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$
$k = 0$	0,485	0,064	1,705	-1,179
1	0,137	1,878	-4,817	2,883
2	-0,0035	-0,8569	2,0527	-1,2552
3	-0,0018	0,0997	-0,2392	0,1503

Tabelle 6 Koeffizienten  $a_{k,m}$  zur Berechnung des Korrekturfaktors für den Einfluss des Bodens bei Gammasubmersion für die Gammaenergie 1,0 MeV

$E_\gamma = 0,1 \text{ MeV}$	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$
$k = 0$	0,279	0,595	-0,205	0,622
1	0,135	0,866	-0,716	-0,578
2	-0,0131	-0,324	0,1103	0,2892
3	0,0003	0,0313	-0,0017	-0,0337

#### A.2.4 Berücksichtigung der Vegetationsperiode (Sommerhalbjahr)

Die Berücksichtigung der Vegetationsperiode in ARTM erfolgt durch die Auswahl der meteorologischen Eingangsdaten. Diese können entweder aus Zeitreihen der Messgrößen Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Ausbreitungsklasse und Regenrate oder aus entsprechenden aufbereiteten 4-parametrischen Statistiken bestehen. Soll für die Vegetationsperiode (Sommerhalbjahr, d.h. vom 01. Mai bis zum 31. Oktober) gerechnet werden, so sind ARTM als meteorologische Eingangsdaten nur die für das Sommerhalbjahr gültigen Zeitreihen bzw. Statistiken vorzugeben.





## Verteiler

### Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS II 5

MinR Dr. A. Bühling 1 x

### Bundesamt für Strahlenschutz

SW 1.4 4 x

### GRS

Geschäftsführung (hah, stj) je 1 x

Bereichsleiter (brw, erl, erv, lim, tes, prg) je 1 x

Projektbetreuung (abt) 1 x

Projektleitung (mar) 1 x

Autoren (mar, thi) je 1 x

Abt. 1150 (reh) 1 x

Abt. 6020 (rop) 1 x

Bibliothek (hog) 1 x

### Ingenieurbüro Janicke - Gesellschaft für Umweltphysik

Dr. L. Janicke 1 x

**Gesamtauflage 21 x**