

ARTM

(**A**tmosphärisches **R**adionuklid-**T**ransport-**M**odell)

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

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

Anhang

A	Modellbeschreibung des Programmpakets ARTM.....	49
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 2002-07-24.¹ 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

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

- Situationsabhängige Emissionsparameter
- Schätzung der statistischen Unsicherheit
- Automatische Festlegung des Rechnernetzes
- 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 werden², sie wird aber auch unter www.austal2000.de wie auch eine Linux-Version zur Verfügung gestellt.

² siehe 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 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 <i>sys</i>
<code>artm-vers-anleitung.zip</code>	Modellbeschreibung und Programmbeschreibung (Handbuch) zu ARTM
<code>artm-vers-rauhigkeit.zip</code>	Kataster der Rauheitslängen (Datei <code>rl.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:

<i>sys</i>	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 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.dmna` 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 Protokolldatei. Diese Option betrifft nicht die Eingabedateien. Dort sind beide Schreibweisen zulässig, 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 getrennt 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 Längen- und Koordinatenangaben erfolgen in Meter und beziehen sich auf dieses Koordinatensystem. 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 Koordinatenangaben in Gauß-Krüger-Darstellung zulässig sind. Alle anderen Koordinatenangaben 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 `rl.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.³ 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 Hochkomma⁴ 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
```

³ Eine Zeile darf höchstens 31996 Zeichen lang sein.

⁴ 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 $h_{q+0.5} \cdot c_q$, 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.⁵

`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).

⁵ 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.

- h_q (n_q) Höhe der Quelle (Unterkante) über dem Erdboden (Standardwert nicht vorhanden, dieser Parameter muss gesetzt werden), vgl. a_q.
- l_q (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. l_q kann zeitabhängig vorgegeben werden.
- n_x (n_n) Anzahl der Gittermaschen in *x*-Richtung, vgl. dd.
- n_y (n_n) Anzahl der Gittermaschen in *y*-Richtung, vgl. dd.
- n_z (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.⁶
- 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

⁶ 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 Δz . 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.⁷ Das feinste Netz hat die horizontale Maschenweite Δx . Die Werte von Δx und Δz

⁷ 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.

⁸ Umrechnungsformel $R = 0.25 \cdot 3.1415926 \cdot dq \cdot dq \cdot vq \cdot 273.15 / (273.15 + tq)$

- 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_U (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 CO₂ ‚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.⁹ 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 Handbuches 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`).

⁹ 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 Bq/m³ angegeben. Trockene und nasse Deposition in Bq/(m²·s) und die Gammawolkenstrahlung in Bq/m². 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 σ_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.dmna
cs137a-cnccs.dmna
cs137a-depz.dmna
cs137a-deps.dmna
cs137a-wetz.dmna
cs137a-wets.dmna
cs137a-g01m.dmna
cs137a-g10m.dmna
cs137a-depz.dmna
cs137a-deps.dmna
```

Bei Zeitreihenrechnung zusätzlich:

```
Cs137a-zbpz.dmna
```

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:

Stoff Typ : Wert (+/- Toleranz%) 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/m³ (+/- 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 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 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*).¹⁰

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

¹⁰ 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:¹¹

```
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
```

¹¹ 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"
locl"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 mnt_n , x -Koordinate mnt_x , y -Koordinate mnt_y und Höhe über dem Erdboden mnt_z (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) zur Verfügung. Das Datenformat scheint wenig genormt

zu sein. ARTM erwartet die Daten im Format Arcinfo-GRIDASCII¹², 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`.

Beispiel¹³(Ausschnitt):

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

¹² 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.

¹³ Diese Daten (Datei `tittling.grid`) wurden aus den vom Bayerischen Landesvermessungsamt im Internet (www.bayern.de/vermessung) zur Verfügung gestellten Testdaten umgewandelt und beschreiben ein Gebiet von 13×12 km² 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 werden¹⁴. 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.¹⁵ 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.dmna` (bei geschachtelten Netzen in die Datei `volout01.dmna` und gegebenenfalls `volout02.dmna`) 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

¹⁴ Der kreisförmige Grundriss wird intern als regelmäßiges 36-Eck behandelt.

¹⁵ Für eine quaderförmige Zelle mit Mittelpunkt (x_m, y_m, z_m) , horizontaler Ausdehnung Δx und vertikaler Ausdehnung Δz 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.¹⁶ In dieses werden dann die Gebäudeeinflüsse eingearbeitet.¹⁷ 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 Δ/u_a (Δ : 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.

¹⁶ Dieser Teil entspricht dem früher verwendeten diagnostischen mesoskaligen Windfeldmodell *TALdiames*.

¹⁷ Dieser Teil wird von dem mikroskaligen Windfeldmodell DMK übernommen, das im Abschlussbericht *tal2dmk.pdf* auf 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,¹⁸ 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.¹⁹
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.

¹⁸ 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.

¹⁹ 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.dmna* 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.dmna*, 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.dmna 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.dmna Turbulente Geschwindigkeitsfluktuationen (Turbulenzfeld) mit den Komponenten σ_u , σ_v , σ_w und ϑ (potentielle Temperatur in Grad). Sie ersetzen die Werte aus dem Grenzschichtmodell von *ARTM*. Die Zahlenwerte sind in m/s anzugeben.

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

k????a00.dmna 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 m^2/s anzugeben.

<code>k????d00.dmna</code>	Austauschkoeffizienten, die zu denen aus dem Grenzschichtmodell von <i>ARTM</i> addiert werden. Die Zahlenwerte sind in m^2/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 `akl` 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:²⁰

<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

²⁰ 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.²¹ 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

²¹ 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 Rechenetz 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 Dezimalbrüchen²² 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.

²² 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.²³

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.²⁴ Eine gültige Netzwahl bei einer 50 m hohen Punktquelle im Ursprung des Koordinatensystems wäre also beispielsweise:

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

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.

²³ 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`.

²⁴ 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.²⁵ 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 Handbuchs). 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:

²⁵ 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 Wärmeinhalt 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:

Nr.	Ordner	Beschreibung
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.

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 1503.1²⁶. 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

²⁶ 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)²⁷

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*)	Washout-koeffizient**) 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

²⁷ 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- konstante 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 ^{*)}	Washout- koeffizient ^{**)} 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 ₂
	L	elementare Form
	R	organisch
	W	Wasser

***) stoffspezifischer Washoutkoeffizient Λ_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 Λ_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 μm	Depositions- geschwindigkeit v_d in m/s	Sedimentations- geschwindigkeit v_s in m/s	Washoutkoeffizient Λ_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/m²·s proportional der über die z-Koordinate integrierten Konzentrationsverteilung. Der Proportionalitätsfaktor ist der Washoutkoeffizient Λ in s⁻¹.

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

mit κ : stoffspezifischer Exponent
 Λ_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⁻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 μ , 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·m²/(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/m³ 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 ε_{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 ε_{111} kann nicht durch eine Gauß-Quadratur berechnet werden, da der Integrand singulär ist. Die Singularität kann man durch Übergang zu räumlichen Polarkoordinaten (r, ϑ, φ) 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 ξ und η kann man sich zur Berechnung von ε_{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 (ϑ, φ) 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:

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

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 $(0,0,0)$, $(\xi_1, 0, \zeta_1)$, (ξ_1, η_1, ζ_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 γ -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 γ -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 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 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.