

Schornsteinhöhe nach TA Luft

BESMAX

Programmbeschreibung zu Version 1.0.1

Stand 2021-10-07

Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
Ingenieurbüro Janicke, Überlingen

Allgemeine Hinweise

Die sachgerechte Anwendung des Programms erfordert Fachkenntnisse im Bereich der TA Luft. Programm und Daten werden unter der GNU Public Licence kostenlos zur Verfügung gestellt. Es wird keine Gewähr für deren Richtigkeit oder Eignung für einen bestimmten Zweck übernommen. Das ganze Risiko bei der Verwendung liegt beim Anwender.

Das Programm wird auf den Internet-Seiten des Umweltbundesamtes zur Verfügung gestellt. Hier erscheinen bei Bedarf auch Aktualisierungen und Hinweise zu Problemen. Fragen im Zusammenhang mit dem Programm können an die Email-Adresse `info@austal.de` gerichtet werden.

1 Das Programm

Die TA Luft (2021) schreibt in Nummer 5.5.2.1 für den Fall mehrerer Schornsteine die Prüfung auf Einhaltung des S-Wertes durch Überlagerung der Konzentrationsfahnen vor. Das Programm BESMAX (Bestimmung der maximalen Konzentration) führt diese Überlagerung durch und weist den maximalen, bodennahen Konzentrationswert aus, der mit dem S-Wert verglichen werden kann.

Die Ausführungen der Nummer 5.5 für sich alleine ermöglichen bereits eine programmtechnische Umsetzung des vorgeschriebenen Rechenverfahrens. Mit BESMAX wird vom Umweltbundesamt eine öffentliche Referenzlösung zur Verfügung gestellt. Sie kann sowohl für praktische Anwendungen eingesetzt werden als auch für eine Überprüfung anderer Programme, denen die Eigenschaft zugesprochen wird, das Rechenverfahren nach Nr. 5.5 der TA Luft umzusetzen.

Das Copyright für das Programm BESMAX liegt beim Ingenieurbüro Janicke, 88662 Überlingen, und dem Umweltbundesamt, 06813 Dessau-Roßlau. Das Programm wird inklusive Quelltext kostenlos zur Verfügung gestellt. Programm und Quelltext unterliegen der GNU Public Licence (GPL). Quelltext und GPL sind in der JAR-Datei (Archivdatei) enthalten.

Die Berechnung der maximalen bodennahen Konzentration basiert auf einer Bibliothek von Einzelfahnen, die gemäß TA Luft (2021), Anhang 2, Abschnitt 14 berechnet worden sind. Der Ordner mit den Einzelfahnen hat den Namen `plumes` und besitzt eine Größe von rund 1 GB. Das Programm prüft, ob der Inhalt dem Original entspricht, es dürfen daher keine Änderungen in den Dateien vorgenommen werden.

Hinweis: BESMAX ist speicherintensiv. Es wird empfohlen, das Programm auf einem 64-Bit-System mit mindestens 4 GB RAM zu betreiben. Auf einem 32-Bit-System ist das Programm in der Regel deutlich langsamer und bleibt unter Umständen bei der grafischen Darstellung längere Zeit hängen.

Das Programm BESMAX ist ein JAVA-Programm und benötigt ein *Java Runtime Environment* (JRE) einschließlich JavaFX. Ausgetestet wurde das Programm unter JAVA Version 1.8. Zu BESMAX wird für Windows 64-Bit und für Linux 64-Bit ein lokales JRE 1.8 mitgeliefert (Unterordner `jre`). Das Programm hat den Namen `Besmax.jar` und befindet sich im Unterordner `jar`. Das JAVA-Programm erwartet in dem Ordner, in dem es sich befindet, auch den Ordner `plumes`.

Im Ordner oberhalb von `jar` wird für Windows 64-Bit das Programm `Besmax.exe` und für Linux 64-Bit das Programm `Besmax` mitgeliefert, das `Besmax.jar` mit dem mitgelieferten lokalen JRE startet. Es führt folgenden Befehl aus:

```
jre\bin\javaw -jar jar\Besmax.jar
```

Mit einem im System installierten JRE 1.8 kann der Aufruf auch als

```
java -jar jar\Besmax.jar
```

oder für den interaktiven Modus einfach durch einen Doppelklick auf `Besmax.jar` erfolgen.

BESMAX benötigt für die Berechnung das Überhöhungsmodell PLURIS, das im *Bericht zur Umweltphysik* Nr. 10 (2019) festgelegt ist. Es ist in dem JAVA-Programm `IBJpluris.jar` implementiert, das im Unterordner `jar` erwartet wird.

Die aktuellen Programm-Versionen sind BESMAX 1.0.1 und IBJpluris 3.1.6.

Hinweis: Der Ordner `plumes` enthält 1508 Textdateien in 29 Ordnern und befindet sich im Unterordner `jar`.

Hinweis: Das ausgelieferte Programm `Besmax.jar` hat die CRC32-Prüfsumme `B56C8A2D`. Das ausgelieferte Programm `IBJpluris.jar` hat die Prüfsumme `09CE6C42`.

2 Arbeitsweise

Das Programm BESMAX berechnet für eine oder mehrere benachbarte Punktquellen die maximale stündliche bodennahe Konzentration (Mittelwert über die untersten drei Meter) eines emittierten Stoffes. Dabei wird auf die Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen zurückgegriffen, die für jede der in Betracht zu ziehenden Wettersituationen¹ und ein Spektrum von Emissionshöhen für eine passive Punktquelle in ebenem Gelände, ohne Gebäudeeinfluss und ohne Deposition durchgeführt worden sind.

Die Berechnung erfolgt in drei Schritten:

¹Klassen I bis III/2 und Windgeschwindigkeiten entsprechend einer AKS von 1 bis 12 m/s

1. Es wird für jede Quelle und jede Wettersituation die effektive Quellschöpfungshöhe h_{eff} mit dem Programm PLURIS berechnet.
2. Es wird für jede Quelle und jede Wettersituation die bodennahe Konzentrationsverteilung bestimmt, indem aus den vorberechneten Feldern auf die vorliegende effektive Quellschöpfungshöhe interpoliert wird.
3. Für jede Wettersituation und jede Windrichtung (in Schritten von 5 Grad variiert) werden die Konzentrationsfelder der einzelnen Quellen überlagert und aufsummiert und der maximal auftretende Konzentrationswert bestimmt.

2.1 Arbeitsablauf

Der Arbeitsablauf ist folgendermaßen:

1. Für die erste Quelle in den vorgesehenen Eingabefeldern die erforderlichen Daten einsetzen (vorgegebene Beispielwerte ersetzen). Die einzugebenden Daten sind: Quellstärke, Position, Schornsteinbauhöhe, Schornsteindurchmesser, Ausströmgeschwindigkeit, Austrittstemperatur und Wasserbeladung. Zusätzlich kann jeder Quelle ein beliebig wählbarer Name gegeben werden.

Das Programm lässt folgende Wertebereiche zu:

Kurzname	Parameter	Maßeinheit	Wertebereich
q	Emissionsmassenstrom	kg/h	> 0
h	Bauhöhe	m	[6, 250]
d	Innendurchmesser	m	[0, 200]
v	Austrittsgeschwindigkeit	m/s	[0, 50]
T	Austrittstemperatur	°C	[10, 600]
z	Wasserbeladung	kg/(kg tr)	[0, 2]

2. Für die Eingabe weiterer Quellen ist jeweils der Knopf mit dem Plus-Zeichen zu drücken, worauf das Programm eine weitere Datenspalte für eine neue Quelle einrichtet, deren Eingabefelder wie zuvor auszufüllen sind. Eine Quelle (Datenspalte) kann wieder gelöscht werden, indem man zuerst den Namen löscht und anschließend *RETURN* drückt (der Cursor muss sich noch im Namensfeld befinden).
3. Die Rechnung wird durch Drücken der Taste *Maximale Konzentration berechnen* gestartet. Die Taste verschwindet und statt dessen zeigt ein farbiger Balken an, wie weit die Rechnung fortgeschritten ist.

Hinweis: Rechnungen mit Kombinationen von sehr unterschiedlichen effektiven Quellschöpfungshöhen (Bauhöhe plus Überhöhung) können sehr lange dauern, da dann Fahnen für ein sehr großes Gebiet mit sehr feiner Auflösung überlagert werden müssen.

Für die Berechnung setzt BESMAX mehrere Rechenkerne ein (standardmäßig alle verfügbaren Rechenkerne (*Threads*) minus eins). Die Anzahl der Rechenkerne kann im Aufruf vorgegeben werden (siehe Batch-Betrieb).

4. Ist die Rechnung beendet, wird das Ergebnis in den darunter stehenden Feldern angezeigt: Maximaler Konzentrationswert und seine geschätzte Unsicherheit, Ort seines Auftretens und die Wettersituation (einschließlich Windrichtung), bei der er auftritt.²

Bei der Eingabe von Zahlenwerten führt das Programm eine Prüfung durch: Ist die Angabe nicht als Zahlenwert interpretierbar, wird der Hintergrund des Eingabefeldes gelb gefärbt. Ist der Zahlenwert nicht zulässig, wird der Hintergrund rot gefärbt. Eine Rechnung kann nur durchgeführt werden, wenn keine Fehler erkannt wurden.

Die Ergebnisse können durch Drücken der Taste *Emissionsquellen und berechnete Konzentration abspeichern* gespeichert werden. Die Speicherung erfolgt im Ordner `log`, der sich auf derselben Ebene wie der Ordner `jar` befindet und bei Bedarf neu angelegt wird. Der Dateiname ist `besmax(n).log`, wobei *n* eine Zahl zur Unterscheidung verschiedener Ergebnisdateien ist und immer um 1 weitergezählt wird.

Zur Information kann die gefundene Konzentrationsverteilung graphisch dargestellt werden (Taste *Grafik*). Die Darstellung erfolgt im Wind-System, d.h. die x-Achse verläuft windabwärts. Den Nullpunkt des Koordinatensystems bildet der Emissions-Schwerpunkt.

Die in der Grafik aufgeführten Zahlen sind die im Auswertegitter auftretenden Konzentrationswerte in Prozent des vorgebbaren Referenzwertes *Cref*. Mit *Tick* kann der Abstand der Achsenbeschriftung gewählt werden. Die Quellen sind mit ihrem Namen an der vorgegebenen Position eingezeichnet. Voreinstellungen sind:

Kl, Ua: Wettersituation, bei der das Maximum auftritt.
Ra: Windrichtung, bei der das Maximum auftritt.
Tick: Das 10-fache der Maschenweite des Auswertegitters.
Cref: Der maximal auftretende Konzentrationswert.

Mit Drücken der Maustaste auf der Grafik bei gleichzeitig gedrückter Steuerungstaste (`[strg]`) kann die Grafik als SVG-Datei gespeichert werden.

²In manchen Fällen wird eine geringfügig andere Wettersituation als von BESMIN ausgewiesen. Ursache sind unterschiedliche Interpolationsverfahren, was sich bei fast gleichen Maximalkonzentrationen für unterschiedliche Wettersituationen bemerkbar machen kann, aber für die weitere Beurteilung nicht relevant ist.

2.2 Batch-Betrieb

Im Batch-Modus werden die Quellparameter als Argument beim Programmaufruf anzugeben:

```
Besmax --source=n,x,y,h,d,v,t,z,q
```

oder

```
jre\bin\java -jar jar\Besmax.jar --source=n,x,y,h,d,v,t,z,q
```

Es bedeuten:

<i>n</i>	Name
<i>x</i>	x-Koordinate (m)
<i>y</i>	y-Koordinate (m)
<i>h</i>	Höhe (m)
<i>d</i>	Durchmesser (m)
<i>v</i>	Ausströmgeschwindigkeit (m/s)
<i>t</i>	Austrittstemperatur (°C)
<i>z</i>	Wasserbeladung (kg/(kg tr))
<i>q</i>	Quellstärke (kg/h)

Auf dem Bildschirm werden Kontrollausgaben und die Parameter des Maximums aufgelistet:

[... :]	Nullpunkt des Koordinatensystems
[... :]	Quellparameter
cm:	Konzentrationswert
dm:	Statistische Unsicherheit
xp:	x-Koordinate
yp:	y-Koordinate
kl:	Stabilitätsklasse
ua:	Windgeschwindigkeit
ra:	Windrichtung

Wird zusätzlich die Option `--interactive` angegeben, dann werden diese Quellparameter in die Tabelle der Benutzeroberfläche von BESMAX eingetragen und die Berechnung kann interaktiv durchgeführt werden.

BESMAX verwendet mehrere Rechenkerne, standardmäßig alle verfügbaren Rechenkerne (*Threads*) minus eins. Die Anzahl kann mit der Option `--num-threads=Wert` vorgegeben werden, wobei *Wert* intern auf den Bereich 1 bis 64 beschränkt wird. Eine interaktive Verwendung von BESMAX mit 4 *Threads* kann beispielsweise mit folgendem Aufruf gestartet werden:

```
Besmax --num-threads=4 --interactive
```

3 Technische Details

3.1 Fahnenüberlagerung

BESMAX greift auf Daten zurück, die durch Ausbreitungsrechnungen für passive, punktförmige Quellen der Quellstärke 1 g/s und der Höhe h_l durchgeführt worden sind,

$$h_0 = 10 \text{ m} \quad (1)$$

$$h_l = h_0 \cdot 2^{l/4}, \quad l = 0..26, \quad (2)$$

zuzüglich der Höhen 6 m und 8 m. Damit wird der Höhenbereich 6 m bis 905 m abgedeckt. Die höchste von PLURIS ausgewiesene effektive Quellhöhe beträgt 800 m. Von den berechneten Konzentrationsfeldern werden nur die Werte in der untersten Schicht ($0 \leq z \leq 3 \text{ m}$) verwendet: Konzentration $c_{i,j;l,m}$ für die Gitterzelle (i, j) , die Quellhöhe h_l und die Wetter-situation m und die zugehörige statistische Unsicherheit $d_{i,j;l,m}$. Die Rechengitter \mathcal{G}_l haben folgende Ausdehnung:

$$\text{Anzahl der Maschen in } x\text{-Richtung } n_x = 220 \quad (3)$$

$$\text{Anzahl der Maschen in } y\text{-Richtung } n_y = 200 \quad (4)$$

$$\text{Maschenweite } \Delta_l = h_l/2 \quad (5)$$

$$\text{Linker Rand } x_{\min,l} = -20\Delta_l \quad (6)$$

$$\text{Unterer Rand } y_{\min,l} = -100\Delta_l \quad (7)$$

Die Indexbereiche sind $i = 1..n_x$ und $j = 1..n_y$. Bei einem verschobenen Gitter $\mathcal{G}_l^*(\delta_x, \delta_y)$ liegt die Quelle nicht im Nullpunkt sondern bei (δ_x, δ_y) . Im verschobenen Gitter erhält man die Konzentration c^* am Punkt (x, y) durch³

$$c_{l,m}^*(x, y) = c_{i^*,j^*;l,m} \quad (8)$$

$$i^* = 1 + \lfloor (x - \delta_x - x_{\min})/\Delta_l \rfloor \quad (9)$$

$$j^* = 1 + \lfloor (y - \delta_y - y_{\min})/\Delta_l \rfloor \quad (10)$$

Die Ausbreitungsrechnung hat die Windrichtung $r_a = 270$ Grad verwendet, die Fahne verläuft also im Wesentlichen in x-Richtung.

Vom Anwender sind n_q Emissionsquellen mit den Parametern \mathcal{P}_n vorgegeben, zu denen u.a. folgende Werte gehören ($n = 1..n_q$):

$e_{q,n}$	Quellstärke
$x_{q,n}$	x -Koordinate
$y_{q,n}$	y -Koordinate
$h_{q,n}$	Bauhöhe

³ $\lfloor x \rfloor$ bezeichnet die größte ganze Zahl, die nicht größer ist als x

Der Emissionsschwerpunkt (\bar{x}, \bar{y}) ist

$$\bar{x} = \sum_n e_{q,n} x_{q,n} / \sum_n e_{q,n} \quad (11)$$

$$\bar{y} = \sum_n e_{q,n} y_{q,n} / \sum_n e_{q,n} \quad (12)$$

Die auf den Emissionsschwerpunkt bezogenen Koordinaten der Emissionsquellen sind

$$\tilde{x}_{q,n} = x_{q,n} - \bar{x} \quad (13)$$

$$\tilde{y}_{q,n} = y_{q,n} - \bar{y} \quad (14)$$

Eine graphische Darstellung erfolgt hier immer so, dass der Emissionsschwerpunkt den Koordinaten-Nullpunkt bildet.

Für jede Wettersituation m werden die folgenden Schritte durchgeführt:

1. Für jede Quelle n werden folgende Schritte durchgeführt:

- (a) Mit PLURIS wird die effektive Quellhöhe $h_{e,n}$ berechnet.
- (b) Es wird die Rechenhöhe h_{l_n} herausgesucht, die unmittelbar unter der effektiven Quellhöhe liegt, also

$$h_{l_n} \leq h_{e,n} < h_{l_n+1} \quad (15)$$

- (c) Aus den Konzentrationswerten der Gitter \mathcal{G}_{l_n} und \mathcal{G}_{l_n+1} werden später die Konzentrationswerte der Quelle n durch lineare Interpolation bestimmt. Hierzu werden die beiden Interpolationsgewichte $w_{0,n}$ und $w_{1,n}$ festgelegt:

$$w_{0,n} = \frac{h_{l_n+1} - h_{e,n}}{h_{l_n+1} - h_{l_n}} \quad (16)$$

$$w_{1,n} = 1 - w_{0,n} \quad (17)$$

- (d) Die beiden Gitter werden an den Ort der Quelle verschoben, es werden also die Gitter $\mathcal{G}_{l_n}^*(\tilde{x}_{q,n}, \tilde{y}_{q,n})$ und $\mathcal{G}_{l_n+1}^*(\tilde{x}_{q,n}, \tilde{y}_{q,n})$ verwendet.

2. Es wird ein Auswertegitter \mathcal{G}_{res} festgelegt, dessen Maschenweite Δ_{res} gleich der kleinsten vorkommenden Maschenweite ist,

$$\Delta_{\text{res}} = \min_n \{\Delta_{l_n}\} \quad (18)$$

und das alle Gitter $\mathcal{G}_{l_n+1}^*$ umfasst.

3. Die Konzentration $c_{\text{res},i,j}$ im Auswertegitter wird aus der Summe der Beiträge der einzelnen Quellgitter berechnet:

$$c_{\text{res},i,j;m} = \sum_n \left[w_{0,n} c_{l_n,m}^*(x_i, y_j) + w_{1,n} c_{l_n+1,m}^*(x_i, y_j) \right] \quad (19)$$

$$(x_i, y_j) = \text{Mittelpunkt der Zelle } (i, j) \text{ des Auswertegitters } \mathcal{G}_{\text{res}} \quad (20)$$

Die statistische Unsicherheit $d_{\text{res},i,j;m}$ wird entsprechend durch Addition der Varianzen berechnet.

4. Die maximale bodennahe Konzentration für die Wettersituation m und die Standardwindrichtung $r = 0$ ist

$$c_{\text{max},m,0} = \max_{i,j} \{c_{\text{res},i,j;m}\} \quad (21)$$

5. Die Schritte 1 bis 4 werden für alle anderen Windrichtungen soweit erforderlich wiederholt, wobei die Windrichtung in Schritten von 5 Grad verändert wird. Dies wird technisch dadurch erreicht, dass die Gruppe der Quellen um den Emissionsschwerpunkt im Gegensinn gedreht wird. Damit bleibt die Ausrichtung der Gitter an den Koordinatenachsen des Auswertegitters erhalten. Die maximale Konzentration für die Wettersituation m ist

$$c_{\text{max},m} = \sum_r c_{\text{max},m,r} \quad (22)$$

Der von BESMAX als maximale Konzentration ausgewiesene Wert c_{max} ist das Maximum über alle Wettersituationen:

$$c_{\text{max}} = \max_m \{c_{\text{max},m}\} \quad (23)$$

3.2 Weitere Details

Besmin.jar und IBJpluris.jar greifen zur Verarbeitung von DMN-Dateien auf das Programmpaket IBJdmn.jar im Unterordner lib zurück.

Für Testzwecke können im Batch-Betrieb mit der Zusatzoption -v verschiedene Zusatzoptionen und die Protokolldatei von IBJpluris für die erste durchgeführte Überhöhungsrechnung ausgegeben werden, mit der Zusatzoption --skip-stacktip-downwash der *stacktip downwash* in der Überhöhungsrechnung unterdrückt und mit --break-factor=Wert ein anderer Abbruchfaktor für die Überhöhungsrechnung festgelegt werden.