

# Texte

Texte

**36  
04**

ISSN  
0722-186X

**Monte-Carlo-Simulation zur  
Schätzung der Exposition  
von Oberflächengewässern  
durch Abdrift von  
Pflanzenschutzmitteln**

**Umwelt  
Bundes  
Amt**



Für Mensch und Umwelt



**Monte-Carlo-Simulation zur  
Schätzung der Exposition  
von Oberflächengewässern  
durch Abdrift von  
Pflanzenschutzmitteln**

von

**Marlis von der Hude**

Fachhochschule Bonn-Rhein-Sieg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter  
<http://www.umweltbundesamt.de>  
verfügbar.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr  
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und  
Vollständigkeit der Angaben sowie für  
die Beachtung privater Rechte Dritter.  
Die in der Studie geäußerten Ansichten  
und Meinungen müssen nicht mit denen des  
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt  
Postfach 33 00 22  
14191 Berlin  
Tel.: 030/8903-0  
Telex: 183 756  
Telefax: 030/8903 2285  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet IV 2.2  
Dr. Wolfgang Koch  
Fachgebiet IV 1.3  
Dr. Bernd Stein

Berlin, Dezember 2004

# Monte-Carlo-Simulation zur Schätzung der Exposition von Oberflächengewässern durch Abdrift von Pflanzenschutzmitteln

Marlis von der Hude

Fachhochschule Bonn-Rhein-Sieg

## Zusammenfassung

Zur Schätzung der Exposition von Oberflächengewässern durch Pflanzenschutzmittel werden PEC-Werte mit Hilfe eines probabilistischen Verfahrens ermittelt. Hierfür werden zunächst verschiedene Regressionsanalysen zur Modellierung der Abdrift durchgeführt. Anschließend wird die ausgewählte Abdriftverteilung mit verschiedenen Verteilungsansätzen für die Aufwandmenge und das Gewässervolumen kombiniert.

Es folgt ein Vergleich der Ergebnisse des probabilistischen Ansatzes und der deterministischen PEC-Wert-Berechnung, bei der das empirische 90-Perzentil mit festen Werten der Aufwandmenge und des Gewässervolumens kombiniert wird.

## Abstract

Probabilistic methods are performed in order to obtain the predicted exposure concentration of plant protection products (PPP) in surface water. In a first step the distribution of spray-drift values is investigated by means of regression analyses. The spray-drift distribution is combined with several distributions modeling the applied amount of the PPP and the volume of the surface water.

The results of this probabilistic approach are compared to those of a deterministic one using the 90<sup>th</sup> percentile of the empirical spray-drift distribution in combination with fixed values for the applied amount of the PPP and volume of the surface water.

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>0 Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1 Untersuchung des Einflusses verschiedener Witterungsparameter auf die Abdriftwerte im Ackerbau</b> | <b>2</b>  |
| 1.1 Auswertung der Versuche von 1990 . . . . .  | 3         |
| 1.2 Auswertung der Versuche von 1996 bis 1999 . . . . .   | 9         |
| <b>2 Zusammenstellung der Witterungsbedingungen zu den Zeitpunkten der Versuche</b>                     | <b>11</b> |
| 2.1 Versuche von 1990 . . . . .   | 11        |
| 2.2 Versuche von 1996 bis 1999 . . . . .  | 12        |
| 2.3 repräsentative Vergleichsdaten . . . . .  | 13        |
| 2.4 Vergleich der Bedingungen . . . . .   | 14        |
| <b>3 Simulation von Abdriftwerten</b>   | <b>15</b> |
| 3.1 Vergleich der Ergebnisse der drei Ansätze . . . . .   | 16        |
| <b>4 Verteilung der PEC-Werte</b>   | <b>19</b> |
| 4.1 Verteilung der Eingangsgrößen . . . . .   | 19        |
| 4.2 Alternative Darstellungsarten einer Ergebnisverteilung . . . . .                                    | 21        |
| 4.3 Auswirkungen der verschiedenen Verteilungsannahmen . . . . .  | 22        |
| 4.4 Sensitivitätsanalyse . . . . .  | 24        |
| 4.5 Schlussfolgerungen . . . . .  | 26        |
| 4.6 Danksagung . . . . .  | 26        |
| <b>5 Literatur</b>  | <b>26</b> |

# 0 Einleitung

Im Rahmen des Zulassungsverfahrens von Pflanzenschutzmitteln ist es die Aufgabe des Umweltbundesamtes, die Bewertung von Umweltrisiken der Substanzen vorzunehmen. Unter anderem sind die Auswirkungen auf Gewässerorganismen zu bewerten. Sind unvertretbare Auswirkungen auf diese Organismen nicht auszuschließen, werden Risikominimierungsmaßnahmen wie z.B. Abstandsaufgaben zu Gewässern festgelegt.

Die bisher gängige Praxis in Deutschland basiert auf folgenden Prinzipien:

Aus Versuchen wurde das Ausmaß der Abdrift von Pflanzenschutzmitteln in verschiedenen Entfernung vom Ausbringungsort ermittelt. Als "realistic worst case" wird das empirische 95%-Quantil bzw. das 90%-Quantil der Abdriftverteilung pro Entfernung gewählt. Mit diesem Wert wird der PEC-Wert ( $\text{PEC} \triangleq \text{Predicted Environmental Concentration}$ ), eines fiktiven Gewässers geschätzt. Hierzu wird ein sogenanntes Standardgewässer mit einer Wassertiefe von 30 cm festgelegt. Man geht bei der Expositionsabschätzung davon aus, dass die zugelassene Höchstmenge des Pflanzenschutzmittels eingesetzt wird. Dieses deterministische Vorgehen bietet keine Möglichkeit, die Höhe bestimmter Expositionsrisiken zu quantifizieren.

In den USA und in einigen europäischen Staaten werden Methoden des probabilistischen Ansatzes für das Risk Assessment eingesetzt. Hierbei werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Eingangsgrößen ermittelt, die anschließend mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen zur Erzeugung der Expositionsverteilung dienen. Da bei der probabilistischen Methode verschiedene zufallsabhängige Faktoren durch Simulation miteinander kombiniert werden können, besteht der Vorteil gegenüber der deterministischen Berechnung darin, dass die Kombination mehrerer "worst-cases" nur – entsprechend der jeweiligen Verteilung – mit geringer Wahrscheinlichkeit auftritt, ohne dass diese jedoch von vornherein ausgeschlossen werden.

Im RIVM-Report *Probabilistic risk assessment for new and existing chemicals* (Jager, T., H.A. den Hollander, G.B. Janssen, P. van der Poel, M.G.J. Rikken, T.G. Vermeire) wird z.B. der Einfluss der Variabilität von chemikalienspezifischen Parametern auf die Verteilungen von PEC-Werten in verschiedenen Ökosystemen betrachtet. Darüberhinaus werden auch Einflüsse von Umweltparametern wie z.B. Verdünnungsfaktoren in Oberflächengewässern und der Anteil organischer Substanzen im Boden untersucht. Die Einbeziehung der Umweltparameeter erfolgt durch Be trachtungen von unterschiedlichen Szenarien. Es wurde gezeigt, dass diese Parameter einen erheblichen Einfluss auf die Lage der Verteilung der PEC-Werte haben können.

In der vorliegenden Arbeit werden die Möglichkeiten des Einsatzes probabilistischer Methoden bei der Abschätzung der Exposition von Oberflächengewässern durch Pflanzenschutzmittel untersucht.

## Übersicht

1. Zunächst wird die Abhängigkeit der Abdriftwerte von Witterungsparametern untersucht. Hierzu wird aus Abdriftversuchen ein Modell entwickelt, das die Abhängigkeit der Stärke der Abdrift von Witterungsbedingungen und der Entfernung der Messung vom Ausbringungsort beschreibt.

2. Im zweiten Teil werden Witterungsdaten aus mehreren Jahren für die im Ackerbau relevanten Ausbringungszeiträume zusammengestellt. Es wird überprüft, ob die Witterungsbedingungen zu den Zeitpunkten der Versuche als repräsentativ angesehen werden können.
3. Anhand des in Teil 1 ermittelten Modells werden Abdriftwerte simuliert. Man erhält für jede Entfernung eine Verteilung der Abdriftwerte.
4. Die Verteilungen der PEC-Werte werden simuliert. Hierbei dienen die Verteilungen der Abdriftwerte wiederum als Eingangsverteilungen für die PEC-Verteilungen. Es werden zusätzlich die Aufwandmenge und das Volumen des Gewässers als variabel betrachtet. Die Auswirkungen verschiedener Verteilungsansätze für die Aufwandmenge und das Volumen auf die Expositionsverteilung werden untersucht.
5. Die 95%-Quantile der simulierten PEC-Verteilungen werden mit den deterministisch ermittelten Werten verglichen.

## **1 Untersuchung des Einflusses verschiedener Witterungsparameter auf die Abdriftwerte im Ackerbau**

Um das Ausmaß der Abdrift von Pflanzenschutzmitteln zu bestimmen, wurden bundesweit Versuchsprogramme durchgeführt. In den Jahren 1989 bis 1992 wurden Abdriftwerte in Entfernnungen bis zu 30m vom Ausbringungsort untersucht. Die Messungen im Ackerbau fanden 1990 statt (Ganzelmeier, H., D. Rautmann, R. Spangenberg, M. Strelake, M. Herrmann, H.-J. Wenzelburger, H.-F. Walter). Weitere Versuche wurden von 1996 bis 1999 unternommen, wobei es aufgrund verbesserter Analysemethoden möglich war, kleinere Mengen als in den ersten Versuchen verlässlich nachzuweisen. Daher konnten Messungen in Entfernnungen bis zu 100m durchgeführt werden (Rautmann, D., M. Strelake, R. Winkler.).

### **Kurzbeschreibung der ersten Versuche (1990):**

Es wurden jeweils acht Versuche zum frühen (Mitte September bzw. Mitte Oktober) und späten Entwicklungsstadium (Mitte April bzw. Mitte Juni) durchgeführt. Gemessen wurde in Entfernnungen von 1m bis 30m vom Ausbringungsort, wobei es jeweils 5 bzw. 6 Messwiederholungen (Schalen) pro Entfernung gab. Daraus erhielt man zum frühen und späten Entwicklungsstadium jeweils 450 Messwerte.

### **Kurzbeschreibung der neueren Versuche (1996 - 1999):**

In den Jahren 1996 bis 1999 wurden insgesamt 42 Ackerbauversuche Anfang Oktober bzw. Mitte April durchgeführt. Die maximale Messentfernung vom Ausbringungsort betrug teilweise 100m, teilweise 50m. Es gab jeweils 10 Messwiederholungen pro Entfernung. Anfang Oktober wurden insgesamt 2800 Versuche durchgeführt, Mitte April waren es 560 Versuche.

Die Versuche führen zu unterschiedlichen Simulationsmodellen. Die älteren Versuche deuten auf eine Abhängigkeit der Abdriftwerte von der Windgeschwindigkeit hin. Diese Abhängigkeit konnte durch die neueren Versuche nicht bestätigt werden. Im Folgenden werden die Auswertungen im Detail präsentiert. Anschließend werden die auf Basis beider Ansätze erhaltenen Simualtionsergebnisse für die Abdriftwerte verglichen.

## 1.1 Auswertung der Versuche von 1990

### Abhängigkeit der Abdrift von der Entfernung

Die folgenden Grafiken zeigen, dass offensichtlich ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen den Abdriftwerten und der Entfernung besteht:

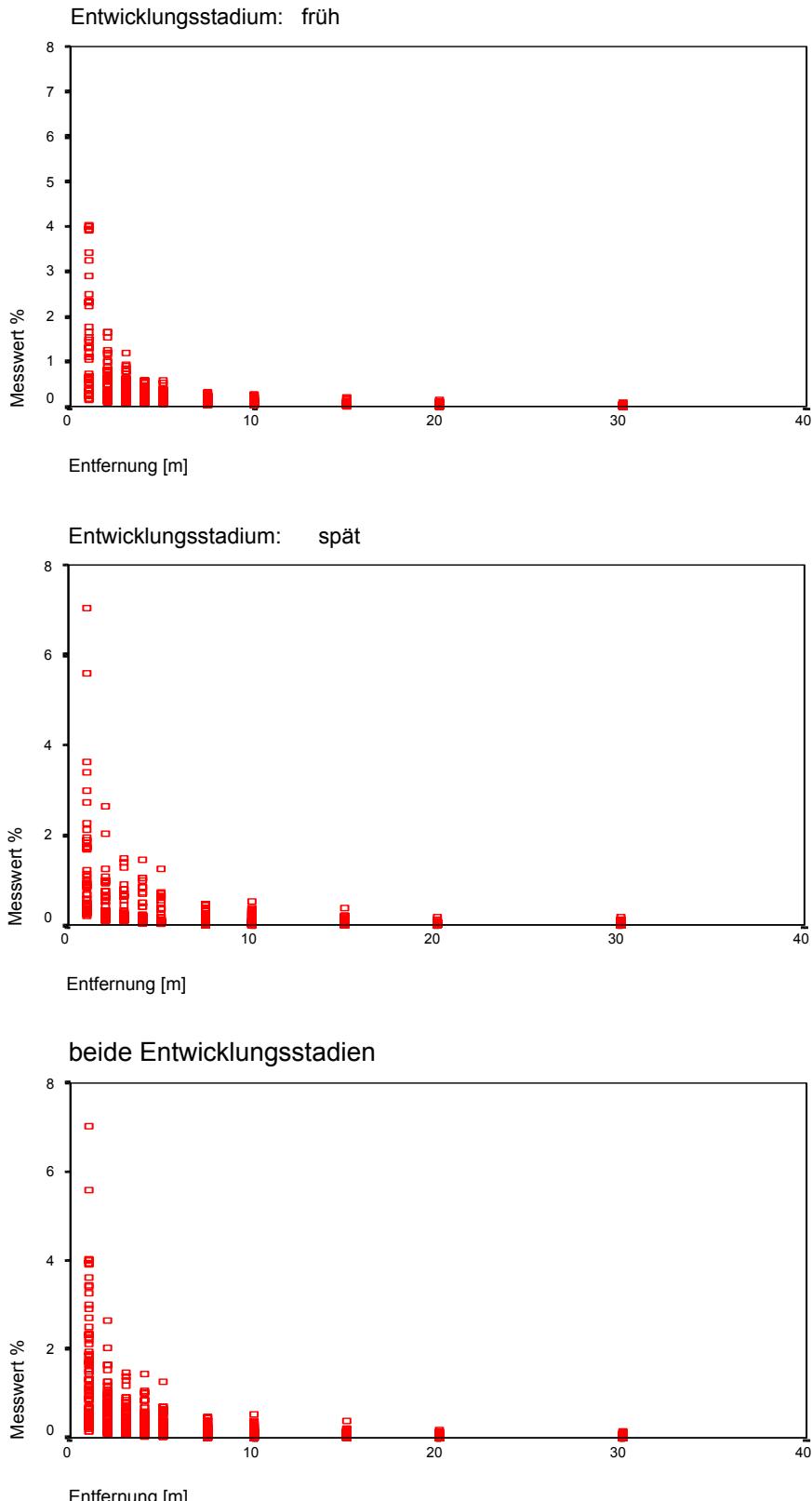


Abb 1a-c: Abhängigkeit der Abdrift von der Entfernung

Zwischen den logarithmierten Messwerten und den logarithmierten Entfernungen ist ein linearer Zusammenhang erkennbar. Das entspricht einem funktionalen Zusammenhang zwischen den Messwerten der *Abdrift* und den Entfernungswerten *Entf* der Form

$$Abdrift = a \cdot Entf^b.$$

Dieser Zusammenhang wurde bei den neueren Versuchen bestätigt (vgl. Rautmann, Strelcke und Winkler, 2001).

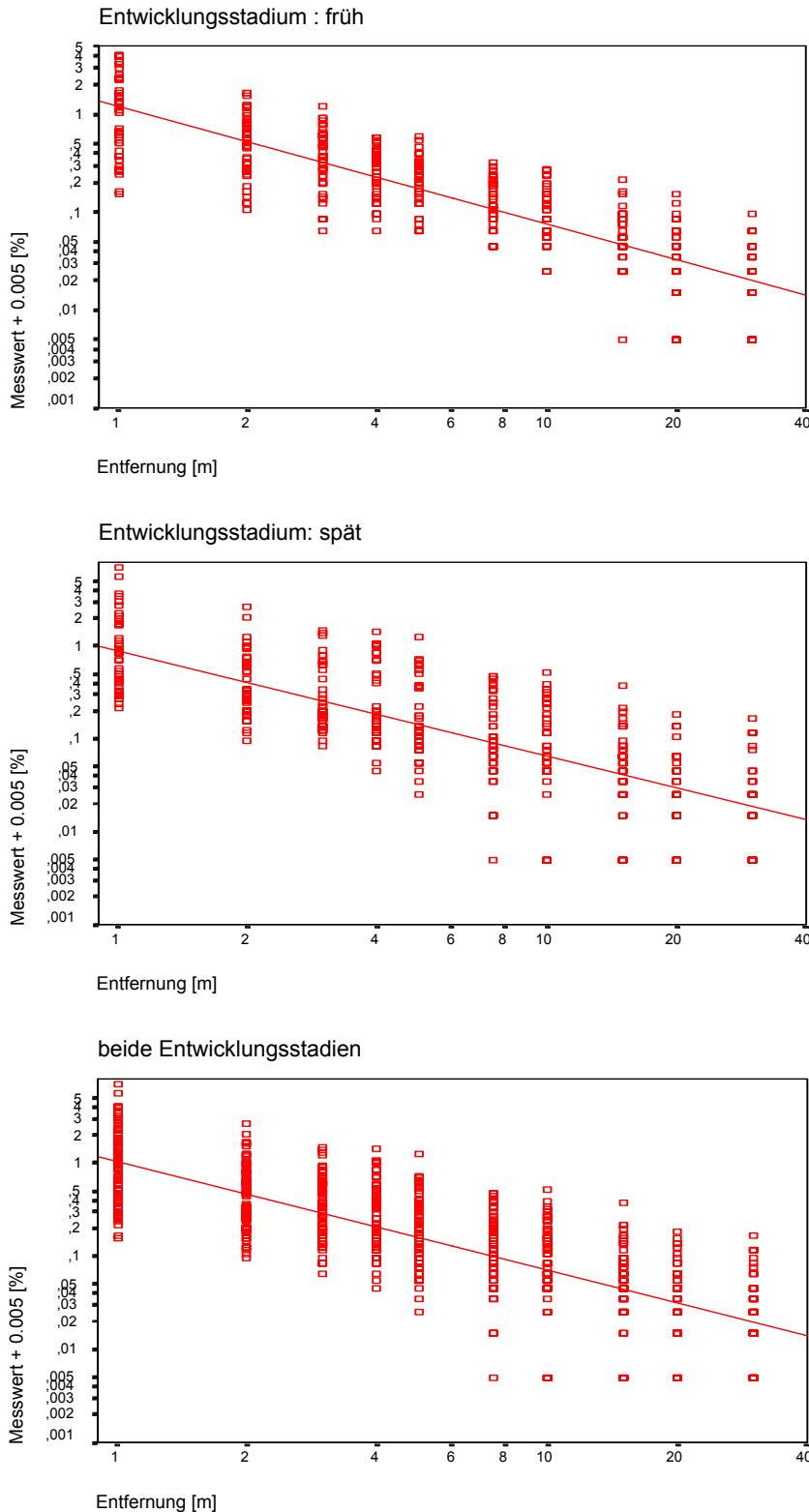


Abb 2a-c: Abhängigkeit der Abdrift von der Entfernung, logarithm. Darstellung

Um nicht die 0%-Messungen durch Logarithmierung von der Analyse auszuschließen, wurde vorher zu allen Werten 0.005% addiert.

Die Entwicklungsstadien unterscheiden sich hinsichtlich der Abdriftwerte nicht wesentlich; daher werden sie im Folgenden nicht mehr getrennt behandelt.

### Abhängigkeit der Abdrift von Witterungsparametern

Für ausgewählte Entfernung (1, 4, 10 und 30m) sind in den folgenden Grafiken die Abhängigkeiten der Abdriftwerte von Witterungsparametern sowie der Witterungsparameter untereinander in Matrixplots dargestellt (hierbei bedeutet LOGOHNE0: logarithmierter Abdriftwert nach Addition von 0.005%)



Abb. 3a-b: Abhängigkeit der Abdrift von Witterungsparametern

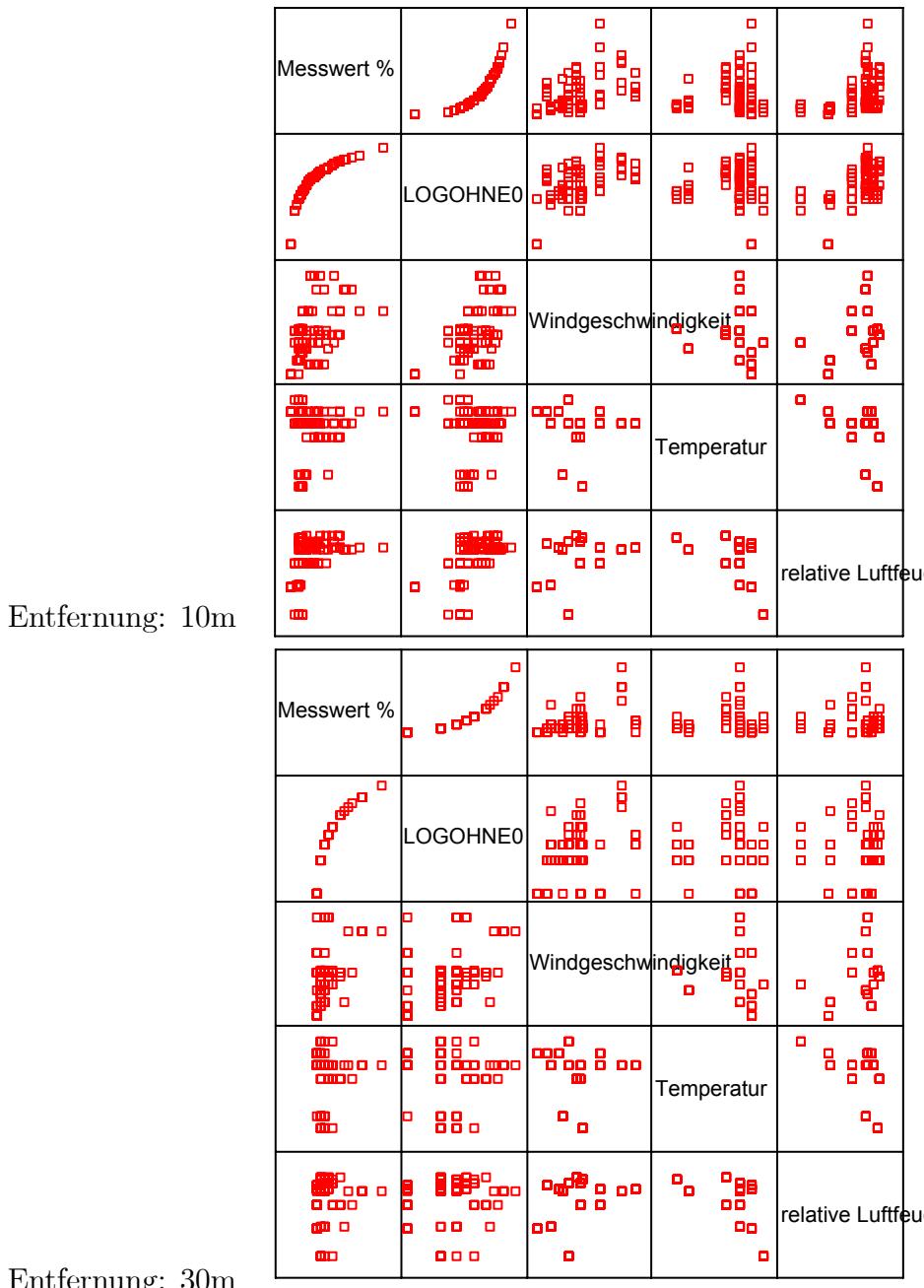


Abb. 3c-d: Abhängigkeit der Abdrift von Witterungsparametern

Die Grafiken zeigen insbesondere eine leichte Abhängigkeit der Abdrift von der Windgeschwindigkeit bei Entfernungen über 1m.

### Regressionsanalysen

Es wurde eine schrittweise Regressionsanalyse durchgeführt; bei diesem Verfahren werden die potentiellen Einflussvariablen in der Reihenfolge der Stärke ihres Einflusses ins Modell einbezogen. Da sich die Windgeschwindigkeit in größerer Entfernung stärker auswirkt als in geringer Entfernung, wurde die Wechselwirkung  $\ln(\text{Entfernung}) * \text{Windgeschwindigkeit}$  als potentielle Einflussvariable ins Modell aufgenommen.

Wie die unten stehende Tabelle der Ergebnisse zeigt, sind die stärksten Einflussfaktoren die (logarithmierte) Entfernung LNENTF und die Windgeschwindigkeit, bzw. die Wechselwirkung (WW) zwischen diesen beiden Variablen,  $\ln(\text{Entfernung}) * \text{Windgeschwindigkeit}$ . Die relative

Luftfeuchtigkeit und Temperatur tragen nur in geringem Maße zur Erklärung der Variabilität der Abdriftwerte bei (Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  von 70.9% auf 72.4% bzw. auf 73.4%)

#### Modellzusammenfassung

| Modell | R                 | R-Quadrat | Korrigiertes R-Quadrat | Standardfehler des Schätzers |
|--------|-------------------|-----------|------------------------|------------------------------|
| 1      | ,808 <sup>a</sup> | ,653      | ,653                   | ,8632                        |
| 2      | ,842 <sup>b</sup> | ,709      | ,708                   | ,7916                        |
| 3      | ,851 <sup>c</sup> | ,724      | ,723                   | ,7716                        |
| 4      | ,857 <sup>d</sup> | ,734      | ,732                   | ,7578                        |
| 5      | ,857 <sup>e</sup> | ,735      | ,733                   | ,7569                        |

- a. Einflußvariablen : (Konstante), LNENTF
- b. Einflußvariablen : (Konstante), LNENTF, WW
- c. Einflußvariablen : (Konstante), LNENTF, WW, relative Luftfeuchtigkeit
- d. Einflußvariablen : (Konstante), LNENTF, WW, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur
- e. Einflußvariablen : (Konstante), LNENTF, WW, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Windgeschwindigkeit

Tab. 1: Modellzusammenfassung

Ähnliche Ergebnisse wurden auf der 52. Deutschen Pflanzenschutztagung präsentiert (Kaul, Moll, Gebauer, Neukampf). Neben verschiedenen Ausbringungsmethoden ist dort als einziger signifikanter Witterungsparameter die Windgeschwindigkeit genannt.

Die Hauptwirkung (HW) der Windstärke und die Wechselwirkung (WW) sind im Versuchsbereich stark korreliert; daher wird bei der automatischen Modellwahl nur die Wechselwirkung einbezogen. In den neueren Versuchen wurden Abdriftmessungen in bis zu 100m Entfernung vom Ausbringungsort durchgeführt. Vergleicht man die mit Hilfe des Modells simulierten Werte in 100m Entfernung mit den Messungen der neueren Versuche, so zeigt sich eine bessere Übereinstimmung, wenn sowohl die Haupt- als auch die Wechselwirkung ins Modell einbezogen werden. Daher wird im Folgenden dieses Modell betrachtet.

Mit den Variablen:

$$\begin{aligned}
 \text{Abdrift} &: \text{Abdrift [%]} \\
 y &: \ln(\text{Abdrift} + 0.005) \\
 \text{Entf} &: \text{Entfernung [m]} \\
 \text{Wind} &: \text{Windgeschwindigkeit [m/s]} \\
 \epsilon &: \text{Residuum, "unerklärter Rest"}
 \end{aligned}$$

erhält man als Modellgleichung :

$$y = -0.392 - 1.438 \cdot \ln(\text{Entf}) + 0.22 \cdot \text{Wind} + 0.141 \cdot \ln(\text{Entf}) \cdot \text{Wind} + \epsilon$$

mit der Standardabweichung der Residuen  $s_\epsilon = 0.787$ .

Daraus ergibt sich für die Abdriftwerte der Zusammenhang:

$$\begin{aligned}
 \text{Abdrift} &= e^y - 0.005 \\
 &= e^{-0.392-1.438\cdot\ln(\text{Entf})+0.22\cdot\text{Wind}+0.141\cdot\ln(\text{Entf})\cdot\text{Wind}+\epsilon} - 0.005
 \end{aligned}$$

## Verteilung der Residuen

Um Abdriftwerte in Abhängigkeit von der Entfernung und der Windgeschwindigkeit zu simulieren, muss die Verteilung der Residuen berücksichtigt werden.

Residuenverteilung

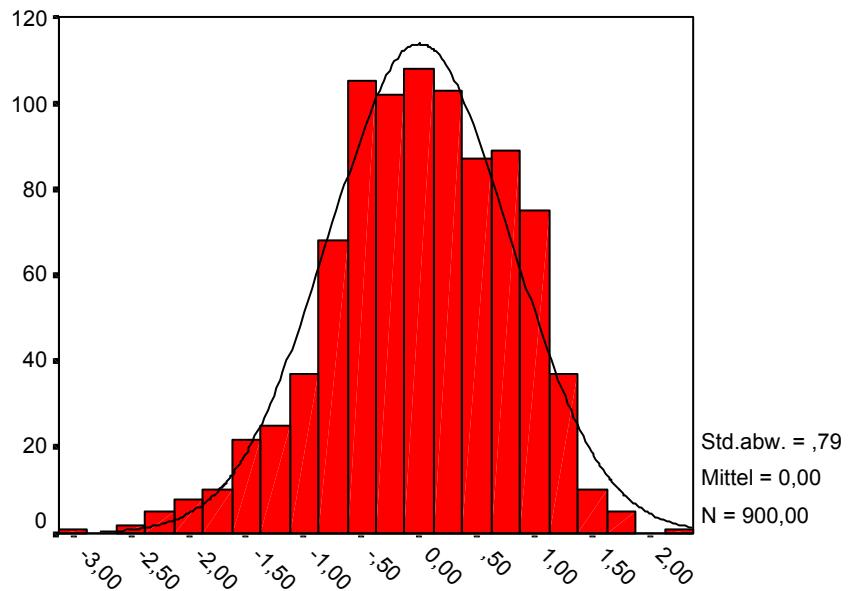


Abb. 4a: Residuenverteilung

Q-Q-Diagramm zur Überprüfung der

Normalverteilungsannahme

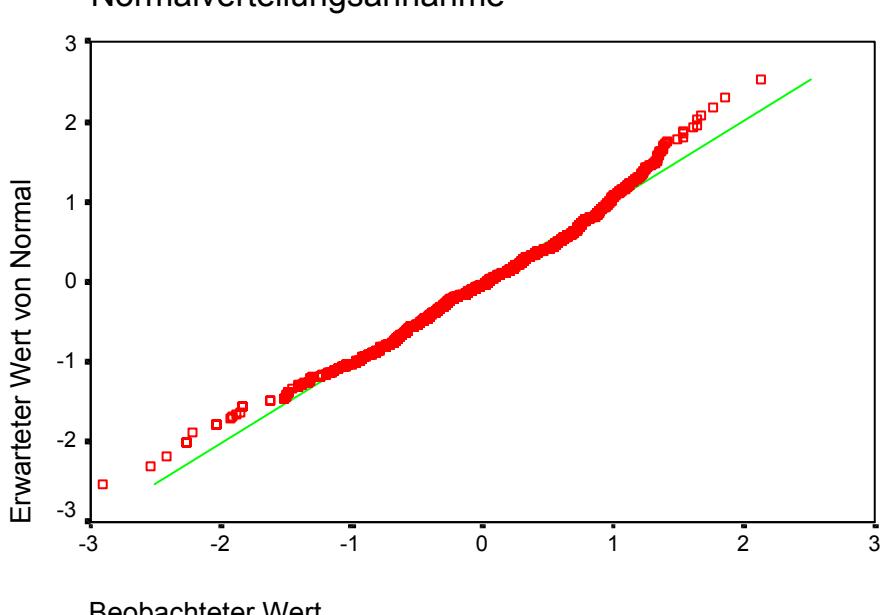


Abb. 4b: Q-Q-Diagramm zur Überprüfung der Normalverteilungsannahme der Residuen

Es gibt leichte, jedoch vernachlässigbare Abweichungen von der Normalverteilungskurve. Eine

genauere Betrachtung zeigt, dass die Anpassungen bei den kleinsten aber auch bei den großen Messwerten nicht optimal sind.

## 1.2 Auswertung der Versuche von 1996 bis 1999

### Regressionsanalyse

Bei den neueren Versuchen konnte die Abhängigkeit der prozentualen Abdrift von der Windgeschwindigkeit nicht bestätigt werden. Wie die folgende Tabelle zeigt, ist die Windgeschwindigkeit von geringerem Einfluss als die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und der Bewölkungsgrad, wobei berücksichtigt werden muss, dass diese Parameter untereinander korreliert sind. Der geringe Einfluss der Windgeschwindigkeit könnte dadurch erklärt werden, dass innerhalb der Messungen eines Versuches die Windrichtung mehr oder weniger stark schwankte, die Messschalen jedoch fest installiert waren. So befanden sich die Schalen nicht immer parallel zur Windrichtung.

Bei den 10 mit 0% angegebenen Abdriftmesswerten wurde zunächst die Hälfte des kleinsten positiven Messwertes addiert; diese Vorgehensweise führte jedoch bei der Regressionsanalyse zu sehr großen Residuen bei den ersetzen Werten. Daraufhin wurden diese Werte von der Analyse ausgeschlossen.

### Modellzusammenfassung

| Modell | R                 | R-Quadrat | Korrigiertes R-Quadrat | Standardfehler des Schätzers |
|--------|-------------------|-----------|------------------------|------------------------------|
| 1      | ,820 <sup>a</sup> | ,672      | ,672                   | ,8732                        |
| 2      | ,830 <sup>b</sup> | ,688      | ,688                   | ,8515                        |
| 3      | ,854 <sup>c</sup> | ,730      | ,730                   | ,7924                        |
| 4      | ,860 <sup>d</sup> | ,739      | ,739                   | ,7791                        |
| 5      | ,860 <sup>e</sup> | ,740      | ,740                   | ,7779                        |

- a. Einflußvariablen : (Konstante), LNENTF
- b. Einflußvariablen : (Konstante), LNENTF, Bewölkung
- c. Einflußvariablen : (Konstante), LNENTF, Bewölkung, Temperatur
- d. Einflußvariablen : (Konstante), LNENTF, Bewölkung, Temperatur, rel. Luftfeuchte
- e. Einflußvariablen : (Konstante), LNENTF, Bewölkung, Temperatur, rel. Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit

Tab. 2: Modellzusammenfassung

Alle Witterungsparameter liefern hier nur einen geringen Beitrag zur Reduktion des Bestimmtheitsmaßes gegenüber dem Modell, das nur die Entfernung vom Ausbringungsort enthält (Erhöhung von 67% auf 69% bzw. maximal 74% bei Einbeziehung aller Witterungsparameter); daher wird nur die Entfernung ins Modell einbezogen.

Als Modellgleichung erhält man:

$$y = 0.05266 - 0.995 \cdot \ln(Entf) + \epsilon$$

mit der Standardabweichung der Residuen  $s_\epsilon = 0.8729$ .

Daraus ergibt sich für die Abdriftwerte der Zusammenhang:

$$Abdrift = e^{0.05266 - 0.995 \cdot \ln(Entf) + \epsilon}$$

Die Standardabweichung der Residuen ist in diesem Modell größer als im Modell mit der Windgeschwindigkeit als explizit ausgewiesener Einflussgröße, das aus den älteren Versuchen abgeleitet wurde. Die größere Streuung der Residuen beinhaltet die Einflüsse von Faktoren, die nicht in

die Modellgleichung einbezogen wurden. Bei der Simulation der Abdriftwerte wird die Residualstreuung berücksichtigt. Insofern sind auch hier die Witterungseinflüsse implizit enthalten.

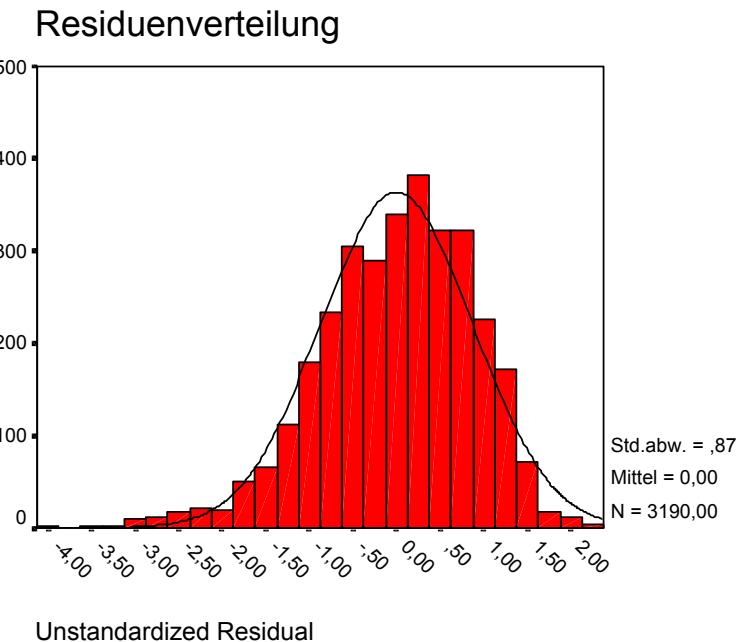


Abb. 5a: Residuenverteilung

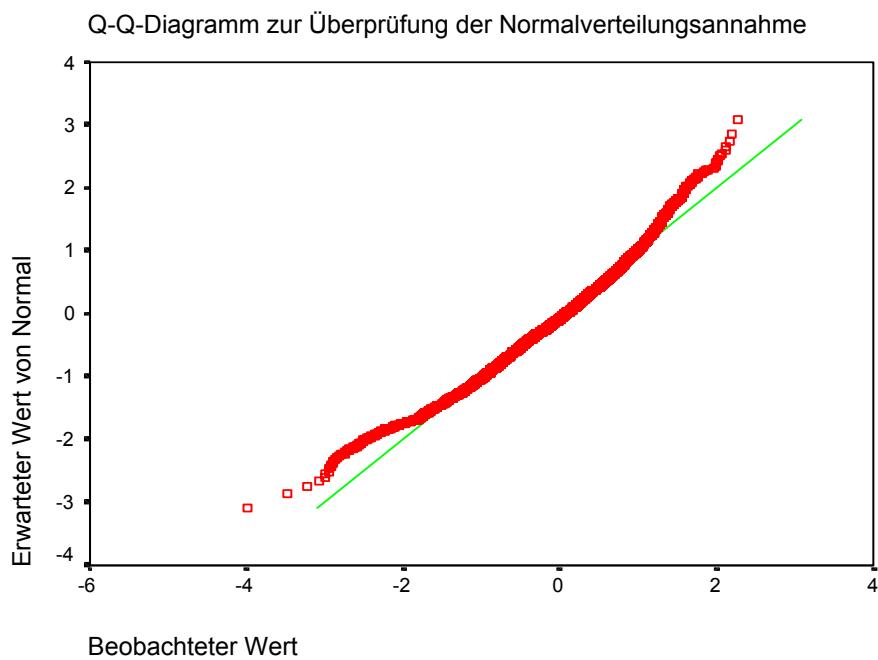


Abb. 5b: Q-Q-Diagramm zur Überprüfung der Normalverteilungsannahme der Residuen

Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Modell, das aus den älteren Versuchen gewonnen wurde.

## 2 Zusammenstellung der Witterungsbedingungen zu den Zeitpunkten der Versuche

Um überprüfen zu können, ob die Witterungsbedingungen zu den Zeitpunkten der Versuche als repräsentativ für diese Zeiträume angesehen werden können, werden die Verteilungen mit denjenigen eines umfangreichen Datensatzes verglichen. Hierzu wurden Witterungsdaten aus Hessen (Fulda) herangezogen. Für das im Ackerbau frühe Entwicklungsstadium wurde der Zeitraum von Mitte September bis Mitte November für die Jahre 1997 bis 2001 gewählt. Für das späte Entwicklungsstadium wurden Werte von Mitte April bis Mitte Juni für die Jahre 1998 bis 2002 zusammengestellt. Hierbei wurden Halbstundenmesswerte zwischen 8h und 20h berücksichtigt. Dies ergab insgesamt mehr als 13000 Messwerte.

### 2.1 Versuche von 1990

|                                | N | Minimum | Maximum | Mittelwert | Standardabweichung |
|--------------------------------|---|---------|---------|------------|--------------------|
| Windgeschwindigkeit            | 8 | 1,1     | 2,6     | 1,838      | ,450               |
| Temperatur                     | 8 | 14,0    | 16,0    | 15,000     | ,756               |
| relative Luftfeuchtigkeit      | 8 | 74      | 83      | 78,25      | 3,69               |
| Gültige Werte<br>(Listenweise) | 8 |         |         |            |                    |

Tab. 3a: frühes Entwicklungsstadium

|                                | N | Minimum | Maximum | Mittelwert | Standardabweichung |
|--------------------------------|---|---------|---------|------------|--------------------|
| Windgeschwindigkeit            | 8 | ,8      | 3,6     | 2,088      | ,980               |
| Temperatur                     | 8 | 10,0    | 17,0    | 14,375     | 2,504              |
| relative Luftfeuchtigkeit      | 8 | 57      | 82      | 73,25      | 8,81               |
| Gültige Werte<br>(Listenweise) | 8 |         |         |            |                    |

Tab. 3b: spätes Entwicklungsstadium

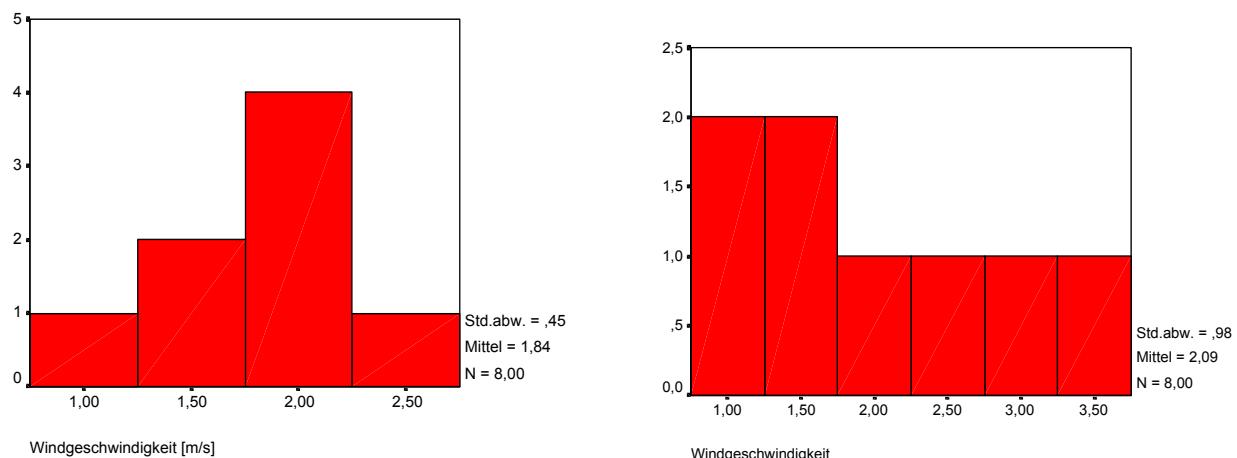


Abb. 6a-b: Verteilung der Windgeschwindigkeiten

frühes Entwicklungsstadium

spätes Entwicklungsstadium

## 2.2 Versuche von 1996 bis 1999

|                                | N  | Minimum | Maximum | Mittelwert | Standardabweichung |
|--------------------------------|----|---------|---------|------------|--------------------|
| Temperatur                     | 35 | 7,60    | 25,10   | 16,3314    | 6,2078             |
| rel. Luftfeuchte               | 35 | 42,00   | 100,00  | 73,3629    | 20,3023            |
| Windgeschwindigkeit            | 35 | 1,85    | 5,85    | 3,3514     | ,8802              |
| Bewölkung                      | 35 | 2,00    | 10,00   | 5,2571     | 2,8424             |
| Gültige Werte<br>(Listenweise) | 35 |         |         |            |                    |

Tab. 4a: Witterungsparameter, frühes Entwicklungsstadium

|                                | N | Minimum | Maximum | Mittelwert | Standardabweichung |
|--------------------------------|---|---------|---------|------------|--------------------|
| Temperatur                     | 7 | 12,00   | 18,00   | 14,6857    | 2,6309             |
| rel. Luftfeuchte               | 7 | 50,00   | 65,00   | 57,2857    | 5,1547             |
| Windgeschwindigkeit            | 7 | 2,60    | 4,75    | 3,6857     | ,8225              |
| Bewölkung                      | 7 | 2,00    | 3,00    | 2,1429     | ,3780              |
| Gültige Werte<br>(Listenweise) | 7 |         |         |            |                    |

Tab. 4b: Witterungsparameter, spätes Entwicklungsstadium

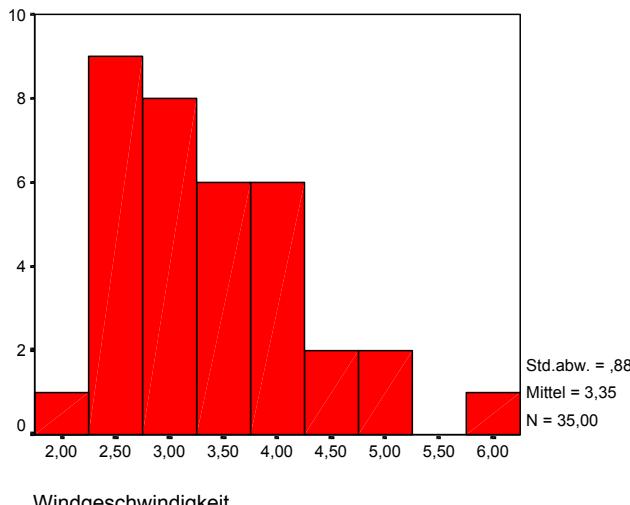
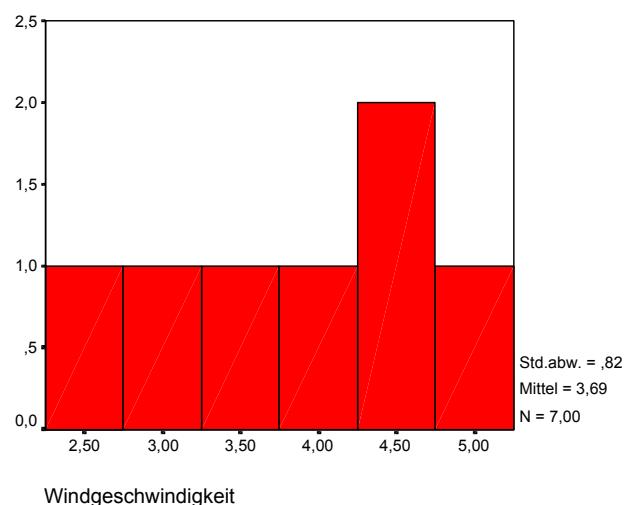


Abb. 7a-b: Verteilung der Windgeschwindigkeiten  
frühes Entwicklungsstadium



spätes Entwicklungsstadium

## 2.3 repräsentative Vergleichsdaten

|                                | N    | Minimum | Maximum | Mittelwert | Standardabweichung |
|--------------------------------|------|---------|---------|------------|--------------------|
| Temperatur                     | 6165 | ,20     | 31,30   | 15,7375    | 5,6528             |
| Windgeschwindigkeit            | 6090 | ,40     | 6,80    | 2,6493     | 1,1378             |
| Gültige Werte<br>(Listenweise) | 6090 |         |         |            |                    |

Tab. 5a: Witterungsparameter, frühes Entwicklungsstadium

|                                | N    | Minimum | Maximum | Mittelwert | Standardabweichung |
|--------------------------------|------|---------|---------|------------|--------------------|
| Temperatur                     | 7191 | -6,30   | 30,30   | 11,3804    | 5,1026             |
| Windgeschwindigkeit            | 6934 | ,40     | 8,80    | 2,3895     | 1,3175             |
| Gültige Werte<br>(Listenweise) | 6933 |         |         |            |                    |

Tab. 5b: Witterungsparameter, spätes Entwicklungsstadium

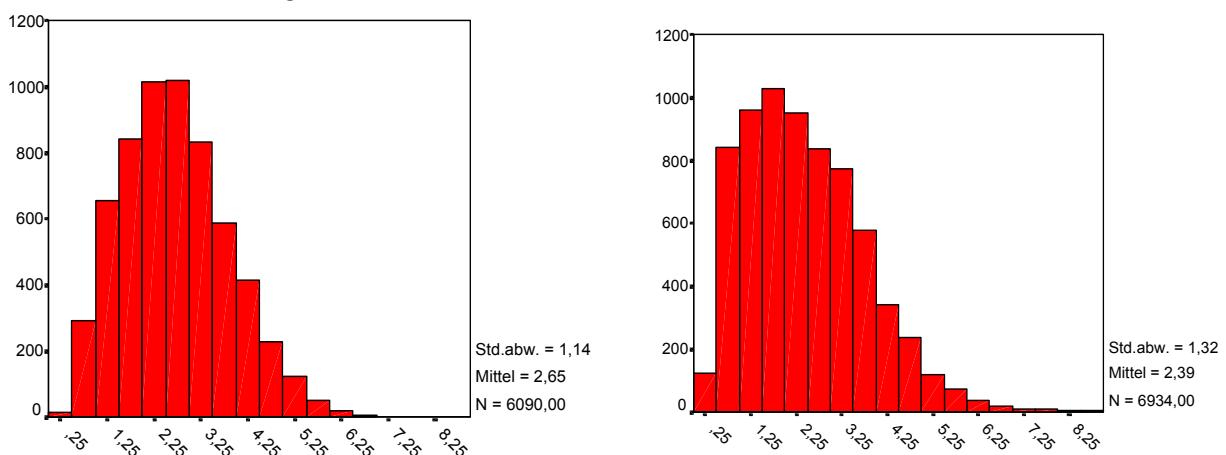


Abb. 8a-b: Verteilung der Windgeschwindigkeiten

frühes Entwicklungsstadium

spätes Entwicklungsstadium

Die Grafiken zeigen, dass die Verteilungen der Windgeschwindigkeiten zwar leicht linkssteil sind, eine Beschreibung durch eine Normalverteilung ist jedoch möglich. Eine Lognormalverteilung liefert eine wesentlich schlechtere Anpassung.

### Q-Q-Diagramm zur Überprüfung der Normalverteilungsannahme

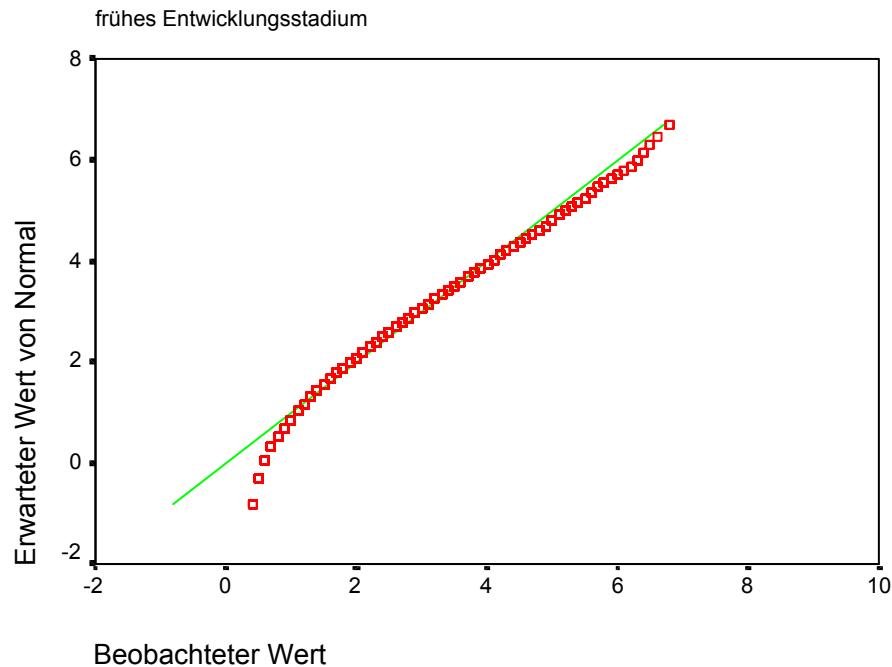


Abb. 9a: Q-Q-Diagramm, frühes Entwicklungsstadium

### Q-Q-Diagramm zur Überprüfung der Normalverteilungsannahme

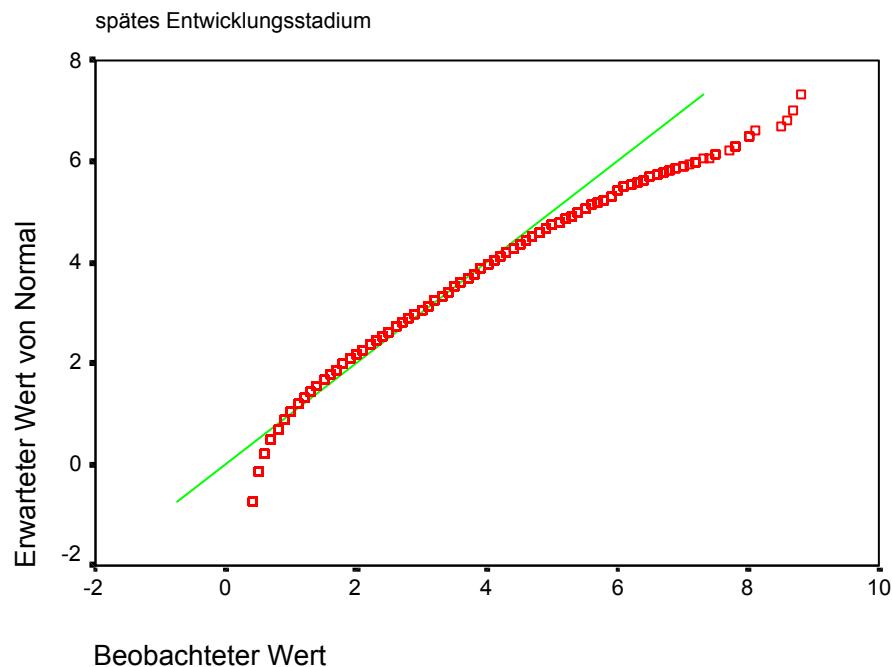


Abb. 9b: Q-Q-Diagramm, spätes Entwicklungsstadium

## 2.4 Vergleich der Bedingungen

Generell ist zu beachten, dass es sich bei den Witterungsdaten zu den Zeitpunkten der Versuche um sehr kleine Datensätze handelt.

Die Verteilungen der Windgeschwindigkeiten zu den Zeitpunkten der älteren Versuche liegen

deutlich unterhalb der Verteilungen der Vergleichsdaten aus Hessen. Ausserdem schöpfen die Witterungsbedingungen nicht alle Möglichkeiten der Ausbringungsbedingungen (max. Temperatur  $25^{\circ}C$ , max. Windgeschwindigkeit  $5m/s$ ) aus. Bei einer Simulation der Abdriftwerte sollte daher die repräsentative Verteilung der Windgeschwindigkeiten zugrundegelegt werden. Man muss hierbei jedoch berücksichtigen, dass es sich um Extrapolationen des aus dem Versuchsdatensatz gewonnenen Modells handelt.

Die Verteilungen der Windgeschwindigkeiten zu den Zeitpunkten der neueren Versuche liegen im Mittel oberhalb der Verteilungen der Vergleichsdaten aus Hessen; andererseits sind die Standardabweichungen etwas geringer. Die oberen Quantile dieser Verteilungen dürften daher nicht stark voneinander abweichen. Benutzt man für die weitere Analyse die empirische Verteilung der Versuchsdaten, so kann eine Unterschätzung der in der Praxis möglichen Abdriftwerte weitestgehend ausgeschlossen werden.

### 3 Simulation von Abdriftwerten

Aus den oben dargestellten Ergebnissen resultieren drei Möglichkeiten für die Erzeugung der Verteilung von Abdriftwerten:

1. Man benutzt das Regressionsmodell

$$Abdrift = e^{-0.392 - 1.438 \cdot \ln(Entf) + 0.22 \cdot Wind + 0.141 \cdot \ln(Entf) \cdot Wind + \epsilon} - 0.005,$$

mit der Standardabweichung der Residuen  $s_{\epsilon} = 0.787$ , das aus den Versuchsdaten von 1990 abgeleitet wurde. Hierzu sollte eine repräsentative Windgeschwindigkeitsverteilung herangezogen werden, wobei jedoch nur Zeitpunkte berücksichtigt werden, bei denen weder die Windstärke noch die Temperatur die Richtwerte von  $5m/s$  bzw.  $25^{\circ}$  überschreiten.

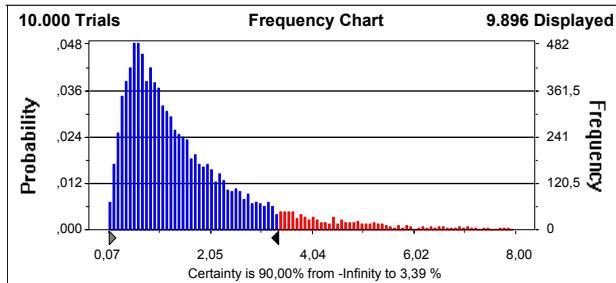
2. Man benutzt das Regressionsmodell, das aus den neueren Versuchen abgeleitet wurde:

$$Abdrift = e^{0.05266 - 0.995 \cdot \ln(Entf) + \epsilon},$$

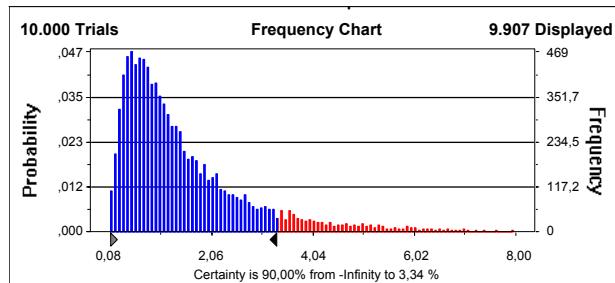
mit der Standardabweichung der Residuen  $s_{\epsilon} = 0.8729$ . Hier gehen keine Witterungsparameter ein.

3. Man verwendet die empirische Abdriftverteilung, die aus den neueren Versuchen erhalten wurde.

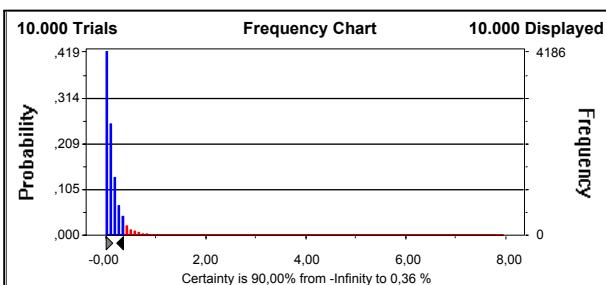
Für den ersten Ansatz werden einige Verteilungen der prozentualen Abdriftwerte exemplarisch dargestellt:



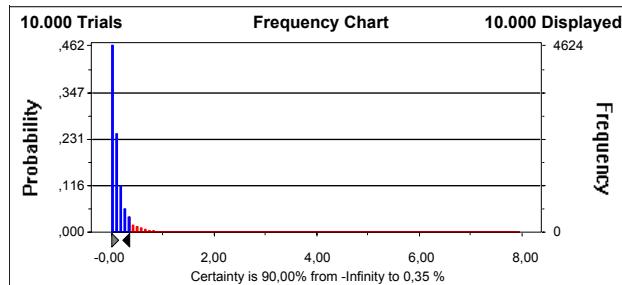
Abdrift 1m, früh



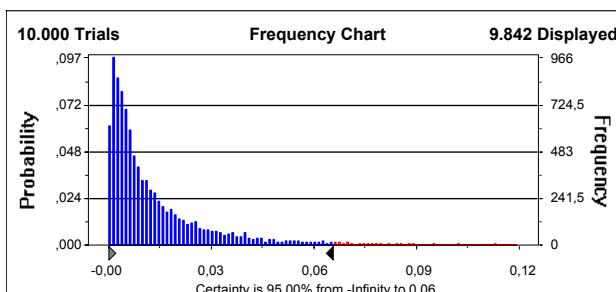
Abdrift 1m, spät



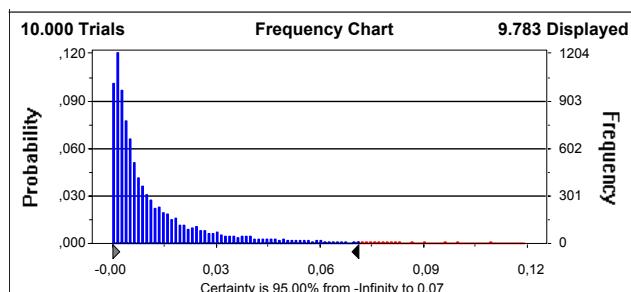
Abdrift 10m, früh



Abdrift 10m, spät



Abdrift 100m, früh



Abdrift 100m, spät

Abb. 10a-f: Verteilungen der Abdriftwerte in verschiedenen Entfernung im frühen und späten Entwicklungsstadium

### 3.1 Vergleich der Ergebnisse der drei Ansätze

In der folgenden Grafik werden – gemäß der drei Ansätze – die 90%-Werte der simulierten Verteilungen bzw. die empirischen 90%-Werte zusammengestellt. (Bei den empirischen 90%-Werten handelt es sich um über die Entfernung geglättete 90%-Werte, s. Rautmann, D., Streloke, M., Winkler, R.).

Da sich die Verteilungen hinsichtlich der Entwicklungsstadien nur sehr gering unterscheiden, wurden die Werte für den Vergleich über die Stadien gemittelt. Die Ergebnisse der drei verschiedenen Ansätze weichen nur sehr geringfügig voneinander ab. Die Abweichungen liegen in derselben Größenordnung, wie diejenigen der empirischen 90%-Werte von den geglätteten, d.h. im Zufallsbereich.

### Abdrift, 90%-Werte

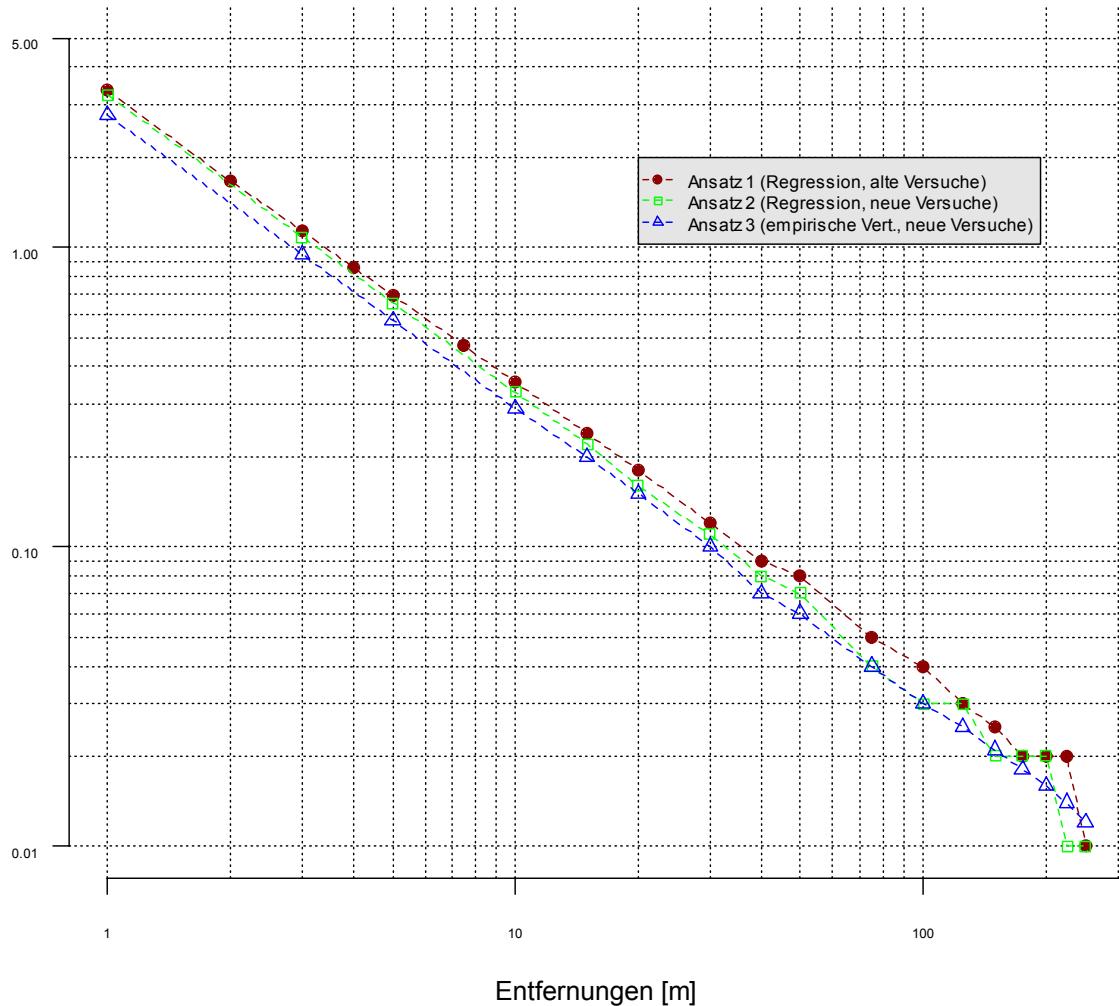


Abb. 11: Vergleich der drei Ansätze, 90%-Werte der Abdrift

Eine ähnliche Gegenüberstellung erfolgte für die 95%-Werte. Hierbei sind die empirischen Werte den Ergebnissen der Versuche von 1990 entnommen. Die Abweichungen der Ergebnisse zwischen den verschiedenen Ansätzen sind hier größer. Die empirischen 95%-Werte liegen deutlich unter den Simulationsergebnissen. Das kann dadurch erklärt werden, dass bei den ersten Abdriftversuchen keine repräsentative Windstärkenverteilung vorlag. Aber auch die Simulationsergebnisse weichen etwas stärker voneinander ab als bei den 90%-Werten.

### Abdrift, 95%-Werte, früh/spät gemittelt

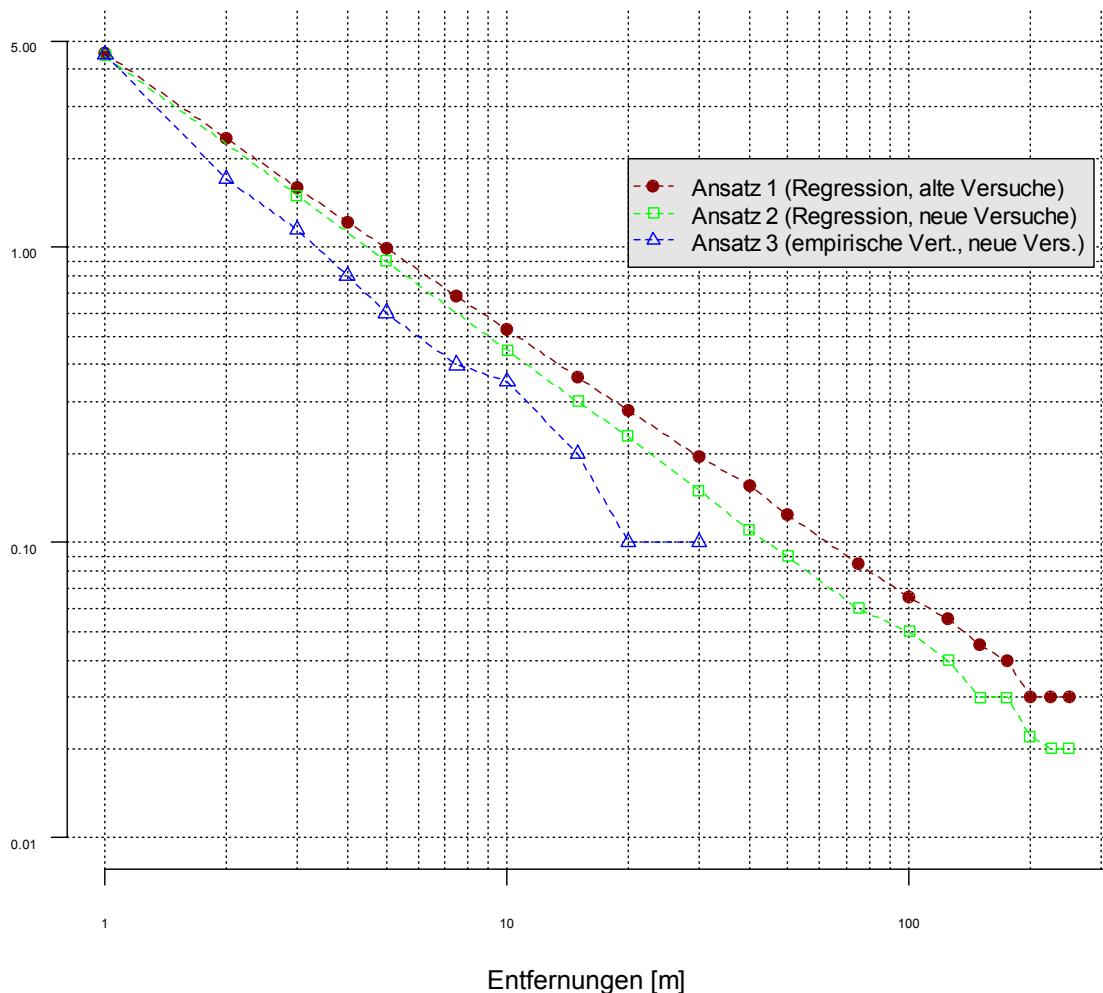


Abb. 12: Vergleich der drei Ansätze, 95%-Werte der Abdrift

#### Auswahl eines Ansatzes

Für die Simulation der Verteilung der PEC-Werte ist die Kenntnis der kompletten Verteilung der Abdriftwerte erforderlich; daher kann nicht mit Abdrifteckwerten gearbeitet werden. Eine Simulation auf Basis einer kompletten empirischen Verteilung der Abdriftwerte ist vom technischen Gesichtspunkt aus betrachtet schwieriger, als eine Simulation, die auf theoretischen Modellen basiert. Daher wird der Einsatz eines Regressionsmodells empfohlen. Das Regressionsmodell, das nur die Entfernung vom Ausbringungsort als Einflussvariable beinhaltet, liefert fast identische Ergebnisse mit dem Modell, das zusätzlich die Windgeschwindigkeit einbezieht; es ist jedoch einfacher in der Anwendung. Daher wird dieser einfache Ansatz für die Simulation der PEC-Werte benutzt werden.

## 4 Verteilung der PEC-Werte

Die PEC-Werte für den durch Abdrift zu erwartenden Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer werden berechnet durch

$$PEC = \frac{Aufwand \cdot AE}{V},$$

mit

$Aufwand$  : Aufwandmenge [ $ml/ha$ ]

$AE$  : Abdrifteckwert [%]

$V$  : Gewässertiefe (Volumen/  $m^2$  Fläche) in [ $l/m^2$ ]

Im deterministischen Ansatz werden die PEC-Werte für verschiedene Entferungen ermittelt, indem ein Quantil der Abdriftwerte mit einer festen Aufwandmenge und einer Standardwassertiefe von  $30cm$  kombiniert wird.

Im probabilistischen Ansatz wird die gesamte Verteilung der Abdriftwerte berücksichtigt. Darüberhinaus können auch die Aufwandmenge und Wassertiefe als variabel angesehen werden (vgl. Streliske, M. und H. Rothert). Durch Monte-Carlo-Simulation wird für jede Entfernung eine Verteilung der PEC-Werte durch Kombination von Zufallszahlen aus den Verteilungen der Eingangsgrößen Abdrift, Volumen und Aufwandmenge generiert.

### 4.1 Verteilung der Eingangsgrößen

#### Abdrift

Für die Abdriftwerte wurde eine Abhängigkeit von der Entfernung ermittelt. Das Regressionsmodell

$$Abdrift = e^{0.05266 - 0.995 \cdot \ln(Entf) + \epsilon}$$

mit normalverteilten Residuen mit einer Standardabweichung  $s_\epsilon = 0.8729$  wird zugrundegelegt.

#### Gewässertiefe

Im Standardszenarium wird eine Wassertiefe von  $30cm$  ( $\cong 300 l/m^2$ ) angenommen. Im Folgenden wird angenommen, dass die Wassertiefe zwischen  $10$  und  $50cm$  variieren kann ( $\cong 100 - 500 l/m^2$ ). Bei einer Normalverteilung liegen theoretisch 99.9% aller Werte – also praktisch alle Werte – im Bereich  $\mu \pm 3\sigma$ . Für die Simulation wurde daher zunächst folgende Verteilung für das Volumen pro  $m^2$  Fläche angenommen:

$$V \sim NV(\mu = 300 l/m^2, \sigma = 66.7 l/m^2).$$

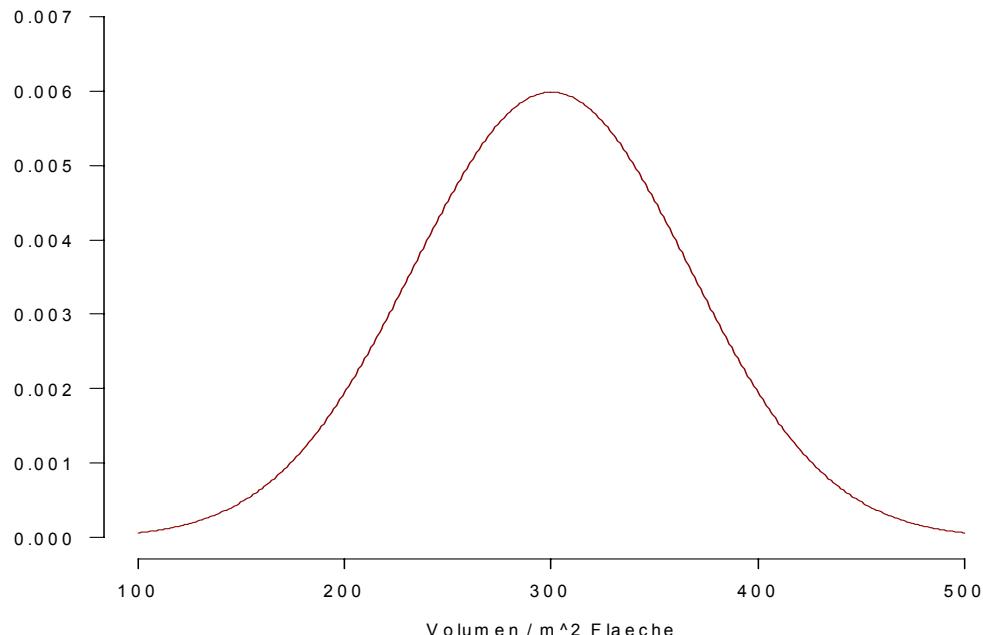
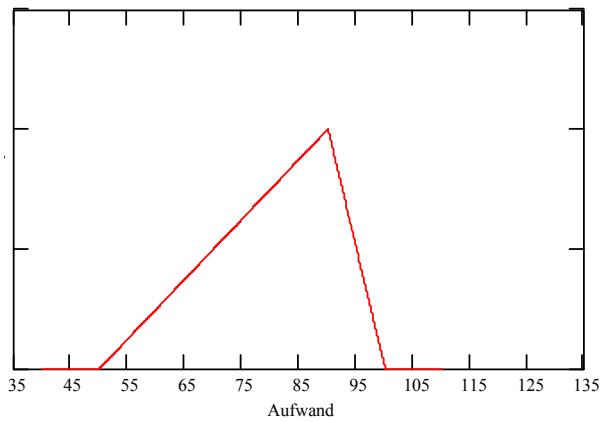


Abb.: 13: Dichte der Normalverteilung mit  $\mu = 300$ ,  $\sigma = 66.7$

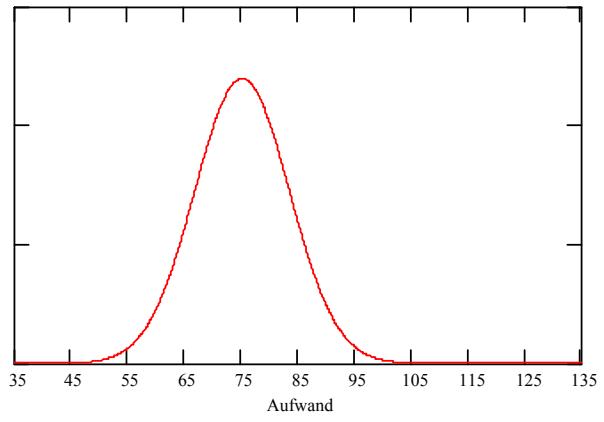
## Aufwandmenge

Im Ackerbau werden Unterschreitungen der bei der Zulassung vorgesehenen Aufwandmenge von 25-50% beobachtet (Streloke, Rothert). Ausgehend von einer zugelassenen Höchstmenge von 100ml/ha bedeutet dies eine Unterschreitung um bis zu 50ml/ha. Für die Simulation der Aufwandmengen wurden folgende Dreieck- und Normalverteilungen angenommen:

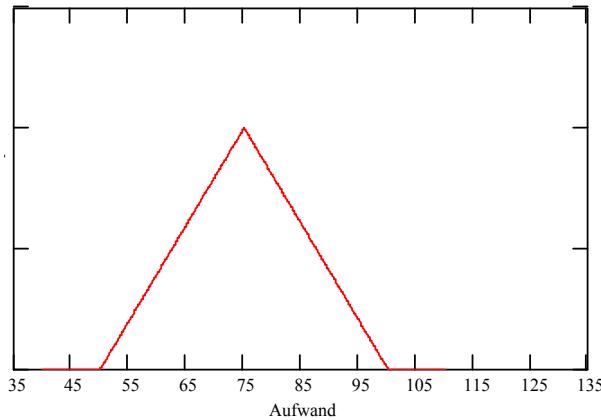
1. *Aufwand*  $\sim$  Dreieck(50, 90, 100). Bei dieser Verteilungsannahme geht man davon aus, dass die meisten Unterschreitungen um 10% betragen, und dass es keine Höchstmengenüberschreitungen gibt.
2. *Aufwand*  $\sim$  Dreieck(50, 75, 100). Bei dieser Verteilungsannahme geht man davon aus, dass die meisten Unterschreitungen um 25% betragen, und dass es keine Höchstmengenüberschreitungen gibt.
3. *Aufwand*  $\sim NV(\mu = 75, \sigma = 8.33)$ , ( $\Rightarrow 3\sigma = 25$  ml/ha) Diese Verteilungsannahme entspricht –bis auf die Form– in etwa der vorigen.
4. *Aufwand*  $\sim NV(\mu = 100, \sigma = 8.33)$ , ( $\Rightarrow 3\sigma = 25$  ml/ha) Bei dieser Verteilungsannahme geht man davon aus, dass es genausoviel Über- wie Unterschreitungen gibt, und dass diese maximal 25% betragen. (Dies beinhaltet worst-case Betrachtungen.)



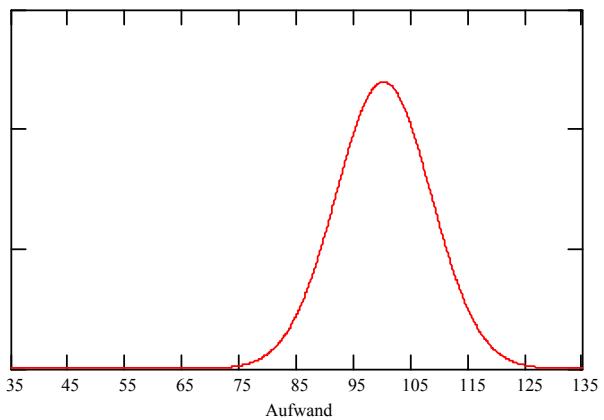
Dreieck (50, 90, 100)



NV ( $\mu = 75, \sigma = 8.33$ )



Dreieck (50, 75, 100)



NV ( $\mu = 100, \sigma = 8.33$ )

Abb. 14 a-d: Verteilungsannahmen für die Aufwandmenge

## 4.2 Alternative Darstellungsarten einer Ergebnisverteilung

Die Verteilung der PEC-Werte kann als Häufigkeitsverteilung, kumulierte Häufigkeitsverteilung oder Verteilung der Überschreitungen dargestellt werden. Die letztgenannte Darstellungsart wird bei der *Joint-Probability -Distribution*, bei der die Expositionenverteilung mit der Dosis-Wirkungs-Kurve der Toxizität verknüpft wird, benutzt.

Die drei Darstellungsarten werden exemplarisch für eine Entfernung von 7.5m gezeigt. Hierbei wurde für die Aufwandmenge die Verteilungsannahme  $NV(\mu = 75, \sigma = 8.33)$  getroffen:

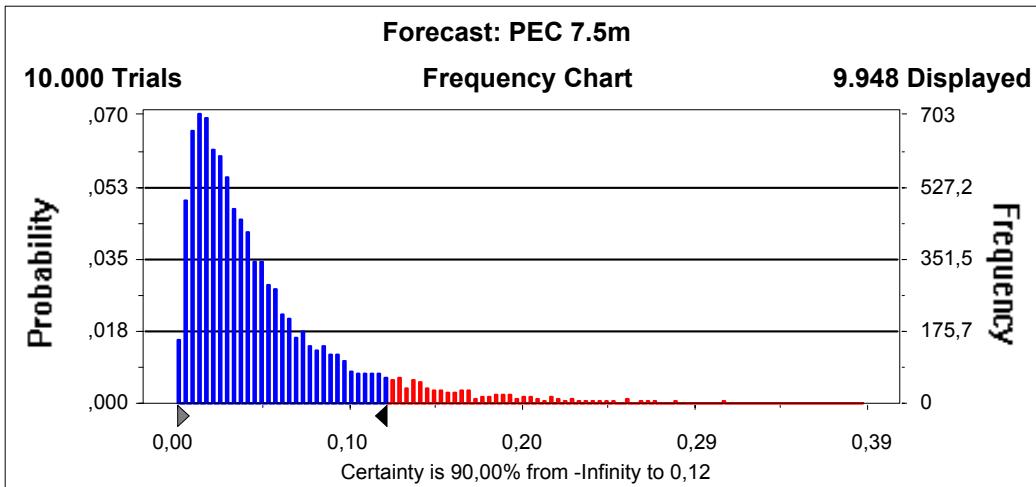


Abb. 15a: Häufigkeitsverteilung der PEC-Werte

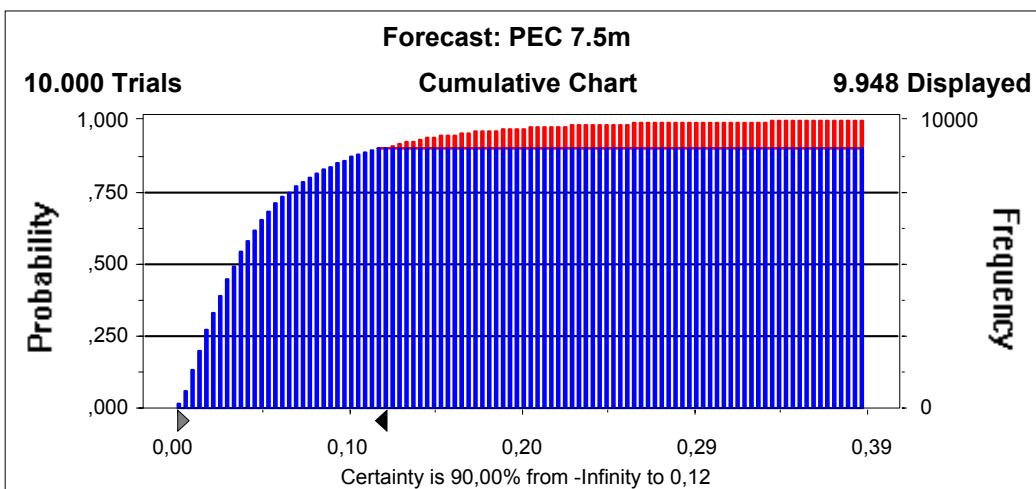


Abb. 15b: kumulierte Häufigkeitsverteilung der PEC-Werte

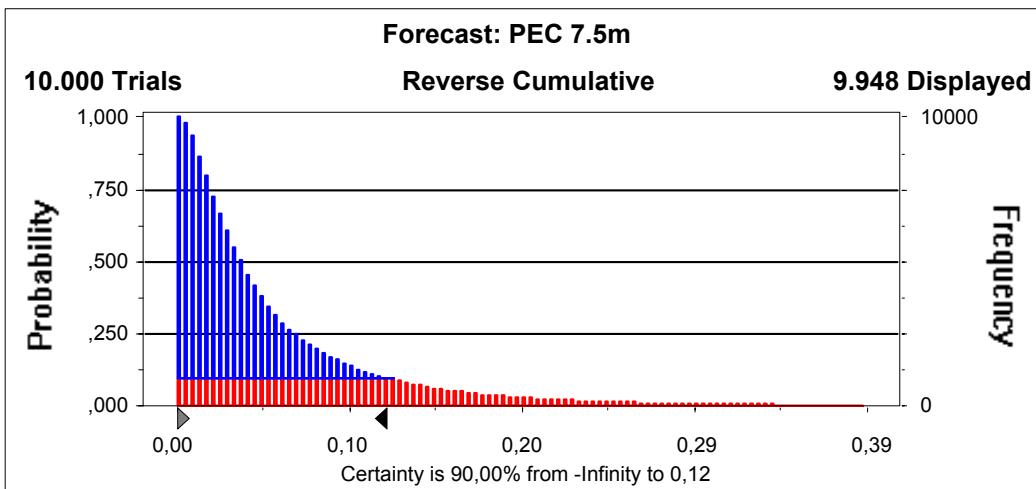


Abb. 15c: Überschreitungshäufigkeiten der PEC-Werte

#### 4.3 Auswirkungen der verschiedenen Verteilungsannahmen

Die folgenden Grafiken zeigen 95%- und 90%-Werte der simulierten Verteilungen der PEC-Werte. Die Grafik der 90%-Werte enthält zusätzlich die deterministischen Werte.

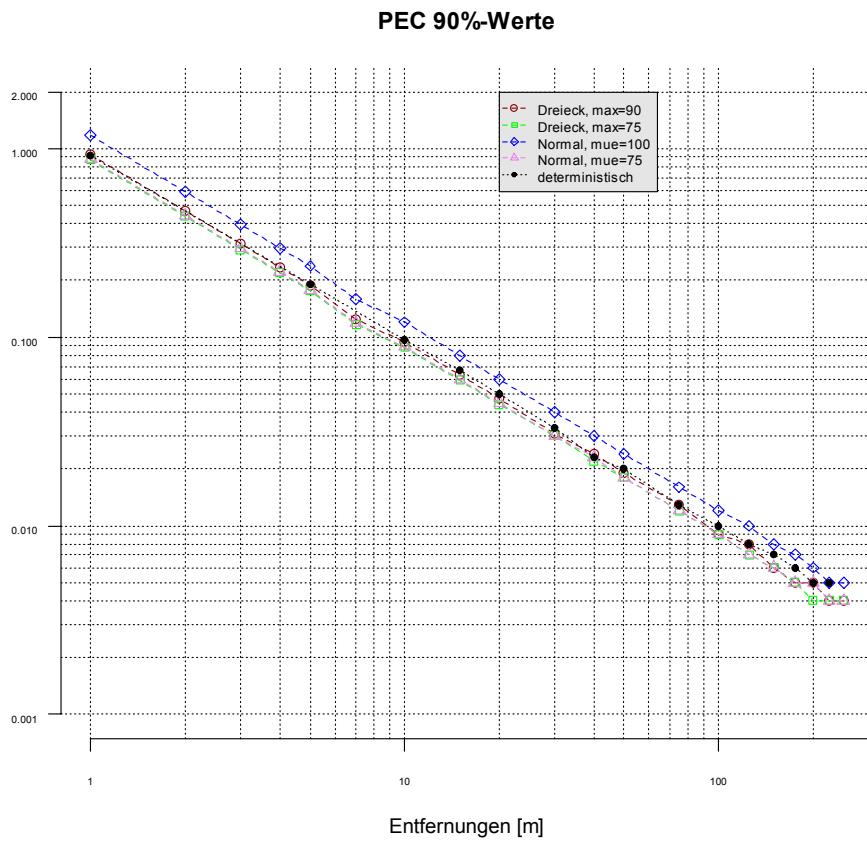


Abb. 16a: Vergleich verschiedener Verteilungsannahmen, 90%-Werte der PEC-Werte

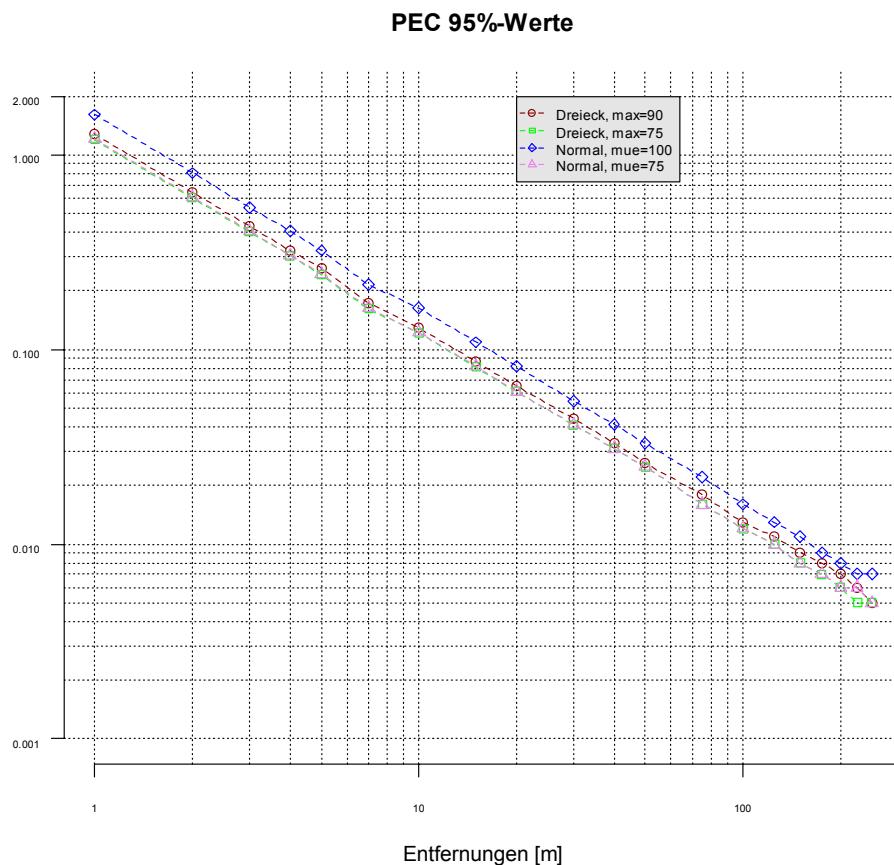


Abb. 16b: Vergleich verschiedener Verteilungsannahmen, 95%-Werte der PEC-Werte

Vergleiche:

- Die einzige Verteilung, deren Simulationsergebnisse deutlich von den anderen abweicht, ist die Normalverteilung  $NV(\mu = 100, \sigma = 8.33)$ , bei der, wie bereits oben erwähnt, auch von Überschreitungen der Aufwandmenge ausgegangen wird.
- Die deterministischen 90%-PEC-Werte stimmen mit den probabilistisch ermittelten Werten gut überein (mit Ausnahme der  $NV(\mu = 100, \sigma = 8.33)$ ).

## 4.4 Sensitivitätsanalyse

Die Eingangsvariablen können – bedingt durch unterschiedlich starke Variabilität, aber auch durch die Berechnungsvorschriften – einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Outputvariablen Abdrift und PEC haben. In den folgenden Grafiken sind exemplarisch für einige Entfernungswerte die Einflüsse der Eingangsvariablen auf die PEC-Werte durch Rangkorrelationskoeffizienten dargestellt. Für die Aufwandmenge wurde hierbei die Normalverteilung angenommen. Aufgrund der Modellwahl werden die Abdriftwerte nur von den Residuen der Regression beeinflusst – die auch die unterschiedlichen Witterungsbedingungen widerspiegeln –, eine grafische Darstellung erübrigt sich daher.

Zusammenstellung der Berechnungsvorschriften:

$$\begin{aligned} \text{Abdrift} &= e^{0.5266 - 0.995 \cdot \ln(Entf) + \epsilon} \\ PEC &= \frac{\text{Aufwand} \cdot \text{Abdrift}}{V}, \end{aligned}$$

| Variablen  |                         | Verteilungsannahmen                   |
|------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $Entf$     | Entfernung [m]          | feste Werte                           |
| $\epsilon$ | Residuum der Regression | $NV(\mu = 0, \sigma = 0.8729)$        |
| $Aufwand$  | Aufwandmenge            | $NV(\mu = 100, \sigma = 8.33)$        |
| $V$        | Volumen / $m^2$ Fläche  | $V \sim NV(\mu = 300, \sigma = 66.7)$ |

Tab. 6: Verteilungsannahmen für die Eingangsgrößen der Simulation der PEC-Werte

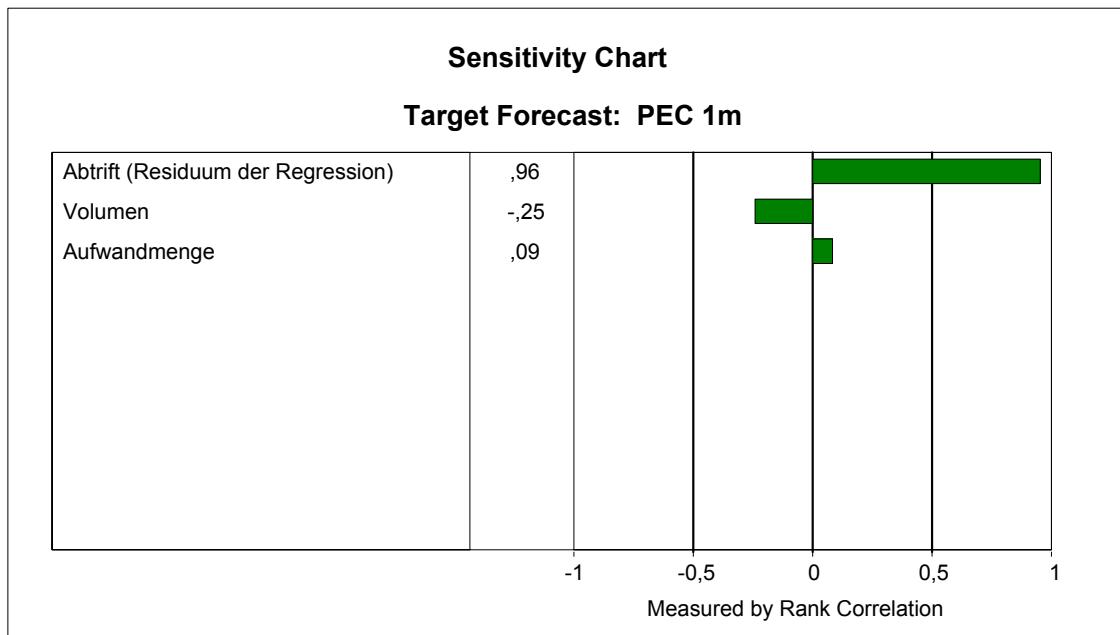


Abb. 17a: Rangkorrelationskoeffizienten zwischen Eingangsvariablen und PEC-Werten, Entfernung 1m

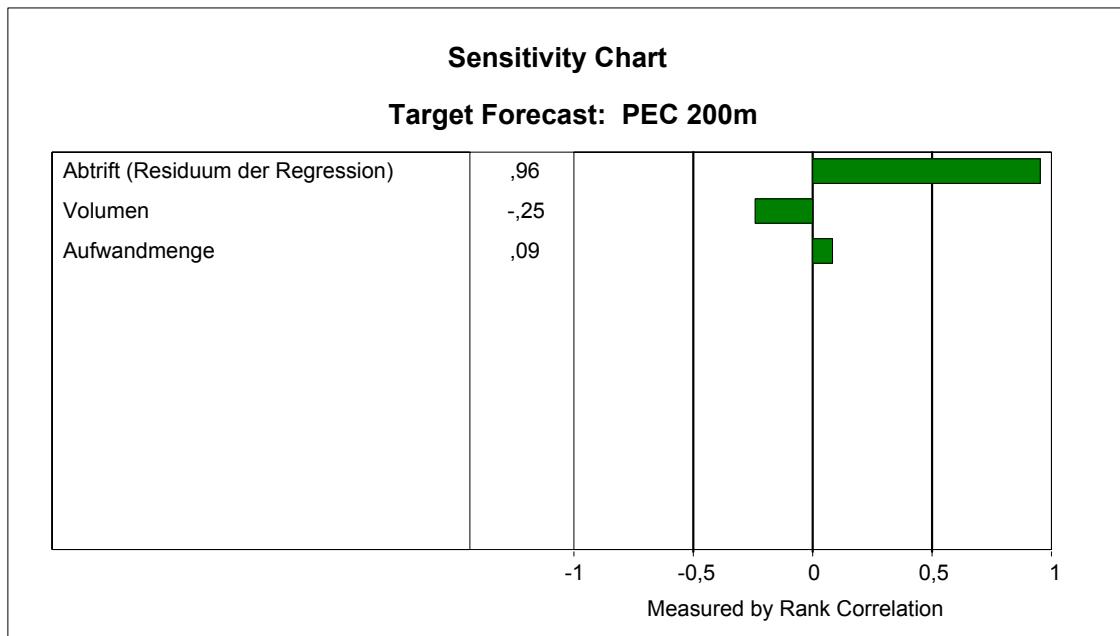


Abb. 17b: Rangkorrelationskoeffizienten zwischen Eingangsvariablen und PEC-Werten, Entfernung 200m

Für die PEC-Werte ändern sich die Einflüsse der Variablen mit zunehmender Entfernung nicht. Die Werte werden am stärksten von den Abdriftwerten beeinflusst. Erwartungsgemäß ist die Aufwandmenge positiv mit den PEC-Werten korreliert – die Korrelation ist jedoch sehr schwach – während das Volumen des Gewässers (im Nenner der Berechnungsvorschrift) und die PEC-Werte negativ korreliert sind, wobei das Volumen einen etwas stärkeren Einfluss ausübt als die Aufwandmenge.

## **4.5 Schlussfolgerungen**

Schließt man die Möglichkeit einer Höchstmengenüberschreitung der Aufwandmenge bei der probabilistischen Methode aus, so weisen die deterministisch und die probabilistisch ermittelten PEC-Werte einen hohen Grad der Übereinstimmung auf. Dies bedeutet, dass die deterministische Methode sehr robust ist gegenüber leichten Abweichungen von den zur Berechnung zugrunde gelegten Annahmen. Bei einem sachgerechten Pflanzenschutz unter Berücksichtigung der guten fachlichen Praxis ist jedoch insgesamt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens größerer Abweichungen von den in den Feldversuchen zur Abdrift gewählten Bedingungen als sehr gering zu beurteilen.

## **4.6 Danksagung**

Ich danke dem Umweltbundesamt, Berlin, insbesondere Herrn Burkhard Wagner, Herrn Wolfgang Koch und Herrn Bernd Stein, für die Unterstützung durch Anregungen und Hinweise zur Erstellung des Berichts. Des Weiteren möchte ich mich bei der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Braunschweig, insbesondere bei Herrn Dirk Rautmann für die Bereitstellung der Daten bedanken.

## **5 Literatur**

- Ganzelmeier, H., Rautmann, D., Spangenberg, R., Strelöke, M., Herrmann, M., Wenzelburger, H.-J., Walter, H.-F. (1995): Untersuchungen zur Abdrift von Pflanzenschutzmitteln – Ergebnisse eines bundesweiten Versuchsprogramms. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Heft 304
- Jager, T., den Hollander, H.A., Janssen, G.B., van der Poel, P., Rikken, M.G.J., Vermeire, T.G. (2000) Probabilistic risk assessment for new and existing chemicals: Sample calculations. RIVM (research for man and environment) report 679102 049
- Kaul, P., Moll, E., Gebauer, S., Neukampf, R. (2000): Modellierung der direkten Abdrift von Pflanzenschutzmitteln im Feldbau durch multiple Regression. 52. Deutsche Pflanzenschutztagung, Freising-Weihenstephan
- Rautmann, D., Strelöke, M., Winkler, R. (1999): New basic drift values in the authorization procedure for plant protection products. In: Forster, R.; Strelöke, M. (eds): Workshop on risk assessment and risk mitigation measures in the context of authorization of plant protection (WORMM): 27. -29. September 1999, Mitteilg. BBA 383, 133 – 141, Berlin 2001
- Strelöke, M., Rothert, H. (1999): Bewertung der Auswirkungen auf Gewässerorganismen sowie Erteilung geeigneter Auflagen zur Risikominimierung. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd., 51(11), S.295-298