

**Ingenieurbüro  
Dr.-Ing. Achim Lohmeyer  
Karlsruhe und Dresden**

Strömungsmechanik  
Immissionsschutz  
Windkanaluntersuchungen

An der Roßweid 3  
76229 Karlsruhe  
E-Mail:  
USt-IdNr.:

Telefon: 0721 / 6 25 10 - 0  
Telefax: 0721 / 6 25 10 30  
lohmeyer\_ka@t-online.de  
DE 143545044

**LuWas, PC-PROGRAMM ZUR ERMITTLUNG  
DER SCHIFFFAHRTSBEDINGTEN  
LUFTSCHADSTOFFBELASTUNG AN  
WASSERSTRASSEN  
- HINTERGRUNDINFORMATIONEN -**

Auftraggeber: Wasserstraßen-Neubauamt Berlin  
Postfach 171125  
10203 Berlin

Fachliche Beratung:  
Bundesanstalt für Gewässerkunde  
Außenstelle Berlin

Dr.rer.nat. R. Bösing  
Dipl.-Met. A. Rühling  
Dr.rer.nat. G. Schädler

Dr.-Ing. A. Lohmeyer  
Dr.-Ing. W. Bächlin

August 1998, überarbeitet Oktober 2000  
Projekt 1177

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>0 VERANLASSUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>1 GRUNDSÄTZLICHE GEGEBENHEITEN BEI DER EMISSIONS- BERECHNUNG</b> .....	<b>2</b>
1.1 Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Motorleistung.....	2
1.2 Motorleistungen.....	4
1.3 Beispiel für die Berechnung der Emissionsdichte auf einer freien Strecke ohne Fließgeschwindigkeit (theoretischer Fall).....	5
<b>2 EMISSIONSBESTIMMUNG IM BEREICH EINER SCHLEUSE IN EINEM GEWÄSSER OHNE FLIESSGESCHWINDIGKEIT (THEORETISCHER FALL)</b> .....	<b>8</b>
2.1 Emissionsrelevante Vorgänge.....	8
2.2 Schadstoffemission bei Manövern.....	9
2.2.1 Herleitung des Berechnungsverfahrens.....	9
2.2.2 Zahlenbeispiel und erste Sensitivitätsanalyse.....	10
2.3 Programmtechnische Umsetzung.....	11
2.4 Vergleich der Emissionen auf einer freien Strecke mit denen in einer Schleuse.....	13
<b>3 EMISSIONSBESTIMMUNG IM BEREICH VON LIEGESTELLEN AN EINEM GEWÄSSER OHNE FLIESSGESCHWINDIGKEIT</b> .....	<b>18</b>
3.1 Emissionsrelevante Vorgänge.....	18
3.2 Kaltstart.....	19
3.3 Programmtechnische Umsetzung.....	20
<b>4 EMISSIONSBESTIMMUNG BEI FREI FLIESSENDEN GEWÄSSERN</b> .....	<b>24</b>
4.1 Strecke.....	24
4.1.1 Berg- und Talfahrer mit gleicher Relativgeschwindigkeit zum Wasser.....	24

4.1.2 Berg- und Talfahrer mit ungleicher Relativgeschwindigkeit zum Wasser .....	26
4.2 Schleuse.....	27
4.3 Liegestellen .....	27
<b>5 TAGESGANGLINIE ZUR BERECHNUNG DES 98-PERZENTILWERTES DER ZUSATZBELASTUNG .....</b>	<b>28</b>
<b>6 AUSPUFFANLAGEN .....</b>	<b>30</b>
<b>7 KANÄLE IM AUFTRAG (DAMMSTRECKEN) ODER IM EINSCHNITT .....</b>	<b>31</b>
<b>8 BERÜCKSICHTIGUNG DER ZEITLICHEN KORRELATION ZWISCHEN METEOROLOGIE UND EMISSION .....</b>	<b>34</b>
<b>9 BERÜCKSICHTIGUNG DER RAUHIGKEIT UND DER ATMOSPHÄ- RISCHEN STABILITÄTSVERHÄLTNISSE ÜBER WASSER .....</b>	<b>35</b>
9.1 Physikalische Grundlagen .....	35
9.2 Programmtechnische Umsetzung.....	36
<b>10 METEOROLOGISCHE VORGABEWERTE .....</b>	<b>40</b>
<b>11 AUSBREITUNGSRECHNUNG FÜR DIE EMISSION DER SCHIFFE.....</b>	<b>46</b>
11.1 Berechnung der Immissionen mit PROKAS_V .....	46
11.2 Berechnung der Immissionen an Wasserstraßen mit dichter Randbebauung mit PROKAS_B .....	48
11.3 Änderungen an PROKAS für Autoabgase für dessen Einsatz an Wasserstraßen.....	49
<b>12 IMMISSIONSBEITRÄGE DURCH DIE UMLIEGENDEN STRASSEN .....</b>	<b>51</b>
<b>13 VERGLEICH VON BERECHNUNGEN MIT MESSUNGEN .....</b>	<b>52</b>
<b>14 LITERATUR .....</b>	<b>54</b>

## 0 VERANLASSUNG

Das PC-Programm LuWas zur Ermittlung der schiffahrtsbedingten Luftschadstoffbelastung an Wasserstraßen besteht aus folgende Modulen:

- Eingabemodul mit Bildschirmmasken zur Abfrage der Eingangsdaten (Beschreibung siehe Handbuch)
- Rechenkern PROKAHN mit
  - Emissionsbestimmungsmodul zur Berechnung der schiffahrtsbedingten Emissionen auf den einzelnen Streckenabschnitten (Beschreibung siehe vorliegenden Bericht, Kapitel 1 bis 5) sowie
  - Ausbreitungsrechnungsmodul zur Berechnung der Immissionen, hervorgerufen von den schiffahrtsbedingten Emissionen und zur Bestimmung der Gesamtbelastung aus großräumiger Vorbelastung, sowie Belastung aus Schifffahrt und Kfz-Verkehr (Beschreibung siehe vorliegenden Bericht, Kapitel 11)
- PROKAS\_V und PROKAS\_B zur Berechnung der Immissionen, hervorgerufen von den Kfz auf einzelnen umliegenden Straßen (Beschreibung siehe vorliegenden Bericht, Kapitel 11 und 12)
- Ausgabemodul für Grafiken auf Bildschirm und Ablage auf Datei (Beschreibung siehe Handbuch zu LuWas)

Die Dokumentation von LuWas ruht auf 2 Säulen: Dem Handbuch zum Programm und dem vorliegenden Bericht mit Hintergrundinformationen.

Das Handbuch zum Programm macht den Anwender mit der reinen Rechentechnik vertraut, es führt ihn so durch das Programm, daß er es bedienen kann.

Der vorliegende Bericht mit Hintergrundinformationen liefert die über das Handbuch hinaus zu dokumentierenden Informationen wie z.B. Rechenansätze, Vergleich zwischen Rechnung und Messungen, verwendete Literatur etc. Weiterhin enthält er die Informationen, welche erforderlich sind für ein vertieftes Verständnis bei der Bereitstellung der Eingangsdaten, der Rechenweise und der sachgerechten Interpretation der errechneten Ergebnisse.

# 1 GRUNDSÄTZLICHE GEGEBENHEITEN BEI DER EMISSIONSBERECHNUNG

## 1.1 Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Motorleistung

Die Emissionen von Schiffsmotoren werden häufig in Abhängigkeit vom Kraftstoffverbrauch berechnet. Das bedeutet, daß die schadstoffspezifischen Emissionsfaktoren pro Schiff in g Schadstoff pro kg verbrauchten Kraftstoff angesetzt werden (UBA, 1992 und 1994; PROGROS, 1993).

Das nachfolgend beschriebene Verfahren verwendet leistungsbezogene Emissionsfaktoren in g Schadstoff pro kWh (vom Antrieb des Schiffes geleistete Arbeit). Dies hat den Vorteil, daß besondere Fahrcharakteristiken, wie z.B. stromauf- und stromabwärts, Kurvenfahrt, Schleusenfahrt etc. entsprechend der aufzubringenden Leistung direkt berücksichtigt werden können. Die Vorgehensweise wird u.a. beschrieben im Luftreinhalteplan Hamburg (LRP HH, 1986) und in Agena et al. (1986). Danach erhält man die Emission eines Schiffes auf dem Wasserstraßensegment der Länge L auf einem Gewässer mit vernachlässigbarer Fließgeschwindigkeit:

$$E_i = e_{fi} \cdot P \cdot L / v_R \quad (1.1)$$

wobei

$E_i$  : Emission des Schadstoffes i in g/Schiff auf Strecke der Länge L

$e_{fi}$  : spezifischer Emissionsfaktor für Schadstoff i in g/kWh

P : vom Schiff aufgebrachte Leistung in kW

L : Länge des betrachteten Wasserstraßensegmentes in km

$v_R$  : vom Schiff relativ zum Wasser gefahrene Geschwindigkeit in km/h

Die Emissionsdichte  $q_i$  in g/(Schiff · km), das ist die Emission pro Schiff und pro km Streckenlänge, errechnet sich entsprechend zu

$$q_i = e_{fi} \cdot P / v_R \quad (1.2)$$

Die in **Tab. 1.1** aufgeführten spezifischen Emissionsfaktoren  $e_{fi}$  sind dem Atmospheric Emission Inventory Guidebook (EEA, 1996) entnommen, das ist die derzeit neueste, international verfügbare Datenbasis der Europäischen Umweltagentur. Für die SO<sub>2</sub>-Werte wurde dabei von einem mittleren Schwefelgehalt von 0.15 Gew.-% im Dieselmotorkraftstoff und einem mittleren Verbrauch von 0.254 kg Diesel/kWh in Deutschland (EEA, 1996) ausgegangen. Benzol und Ruß wurden anteilig aus den Kohlenwasserstoff- bzw. Partikelemissionen ermit-

telt. Die Benzolanteile (2 % für Dieselabgas bzw. 4.5 % für Ottoabgase) sind nach EEA (1996) und der Rußanteil von 40 % entsprechend dem Vorschlag des Umweltbundesamtes für schwere Nutzfahrzeuge (FIGE, 1995) angesetzt.

Für Sportboote wurde angesetzt, daß zu je einem Drittel Diesel-, 4-Takt-Otto- und 2-Takt-Ottomotoren vorkommen. Weiter wurden 0.017 Gew.-% Schwefel im Ottokraftstoff (VW, 1988) und ein mittlerer Verbrauch von 0.4 kg Ottokraftstoff/kWh angesetzt.

	Emissionsfaktor $ef_i$ je Schiff [g/kWh]					
	Benzol (aus KW)	Ruß (aus Partikel)	SO <sub>2</sub>	KW	CO	NO <sub>x</sub>
Güterschiffe	0.026	0.44	0.76	1.3	3	14.4
Sportboote	3.2	0.15	0.34	72	256	5.2

Tab. 1.1: Spezifische leistungsbezogene Emissionsfaktoren für Binnenschiffe (bei Leistungen > 130 kW und fabrikneuen Motoren). Aus Atmospheric Emission Inventory Guidebook (EEA, 1996), Benzolgehalt an Kohlenwasserstoffen 2 % bei Diesel- bzw. 4.5 % bei Ottoabgas, Rußanteil an Partikeln 40 %, S-Gehalt im Diesel 0.15 Gew-%.

Wenn die Leistung  $P \leq 130$  kW wird, werden für Güterschiffe anstelle der in **Tab. 1.1** angegebenen Werte für  $ef_i$  in g/kWh die in **Tab. 1.2** gegebenen Funktionen angesetzt (EEA, 1996):

<b>Benzol:</b>	$ef_{Bzl}$	=	$0.02 \cdot (12 - 6.5 \cdot P^{0.1})$
<b>Ruß:</b>	$ef_{Ru\beta}$	=	$0.4 \cdot (6 - 3 \cdot P^{0.1})$
<b>SO<sub>2</sub>:</b>	$ef_{SO_2}$	=	$0.003 \cdot (272 - 0.12 \cdot P)$
<b>KW:</b>	$ef_{KW}$	=	$12 - 6.5 \cdot P^{0.1}$
<b>CO:</b>	$ef_{co}$	=	$26 - 14 \cdot P^{0.1}$
<b>NO<sub>x</sub>:</b>	$ef_{NO_x}$	=	<b>14.4</b>

Tab. 1.2: Spezifische leistungsbezogene Emissionsfaktoren für Binnenschiffe (bei Leistungen < 130 kW). Aus Atmospheric Emission Inventory Guidebook (EEA, 1996), Benzolgehalt an Kohlenwasserstoffen 2 % bei Diesel- bzw. 4.5 % bei Ottoabgas, Rußanteil an Partikeln 40 %, S-Gehalt im Diesel 0.15 Gew-%.

Die Entwicklung der Emissionsfaktoren mit zunehmendem Betriebsalter der Motoren wird mit nachfolgendem Korrekturfaktor  $df_i$  berücksichtigt, wobei nach EEA (1996) gilt:

$$ef_{i\text{-gealtert}} = ef_{i\text{-neu}} \cdot df_i \quad (1.3)$$

mit

$$df_i = 1 + f_i \cdot X$$

mit  $X$  = mittleres Betriebsalter des Motors in Jahren und  $f_i$  nach **Tab. 1.3**.

Schadstoff i	Benzol	Ruß	SO <sub>2</sub>	KW	CO	NO <sub>x</sub>
Güterschiffe $f_i$	0.015	0.03	0.01	0.015	0.015	0
Sportboote $f_i$	0.014	0.03	0.01	0.014	0.015	-0.022

Tab. 1.3: Dimensionsloser Parameter  $f_i$  zur Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung der Emissionsfaktoren

## 1.2 Motorleistungen

Die Motorleistung des Schiffes hängt ab vom Gewässerprofil, dem Tiefgang (Beladung), der Schiffsklasse und der Fahrgeschwindigkeit. In der Literatur findet sich derzeit keine Beziehung, welche alle diese Parameter berücksichtigt. Deshalb wird zunächst nachstehendes vereinfachte Rechenverfahren für die Motorleistungsbestimmung angewendet. Später, wenn nähere Informationen vorliegen, wird das Programm diesbezüglich ergänzt. Die Leistungsbeziehung in LuWas ist deshalb als separates, austauschbares Modul vorhanden. Das derzeit angewandte Verfahren, welches den Einfluß des Kanalquerschnittes vernachlässigt, ist nachstehend geschildert.

Die Begründung für diese vorläufige Vernachlässigung des Kanalquerschnitts bzw. der endlichen Wassertiefe findet sich z.B. in Fahrdynamik von Binnenschiffen, 1992, dort Abb. 5.7. Erst bei Fahrgeschwindigkeiten >13 km/h bis >14 km/h ist z.B. der Einfluß einer endlichen Wassertiefe von 4 m bei einem Europaschiff relevant.

Die vom Schiff im stationären Zustand bei der Geschwindigkeit  $v_R$  in km/h (relativ zum Wasser) aufzubringende Leistung  $P$  in kW wird proportional  $v_R^3$  und (angelehnt an Agena et al., 1986 und LRP HH, 1986) entsprechend Gl. 1.4 angesetzt. Zusätzlich wird vorausgesetzt, daß jedes voll beladene Schiff 15 km/h bis 20 km/h fährt, wenn der Motor gerade die (im Programm LuWas als Variable abgefragte) Nennleistung abgibt. Im Programm ist dafür 18 km/h angesetzt. Dabei ist berücksichtigt, daß das Schiff in der Regel im Kanal maximal 10 km/h bis 12 km/h fährt, der genaue Wert wird für den betrachteten Streckenabschnitt

jeweils vom Programm abgefragt. Weiterhin geht in Gl. 1.4 ein, daß die Motoren im Leerlauf emittieren als sei eine Last von 10 % der Nennleistung vorhanden.

$$P = P_{\text{nenn}} \cdot (0.1 + 0.00015432 \cdot v_R^3) \quad (1.4)$$

$P_{\text{nenn}}$  : Nennantriebsleistung des Schiffes in kW

$v_R$  : Vom Schiff relativ zum Wasser gefahrene Geschwindigkeit in km/h

Der in Gl. 1.4 gegebene Zusammenhang ist zusammen mit Meßwerten in **Abb. 1.1** dargestellt. Man setzt damit also höhere Emissionen an als die Autoren der beiden dort angegebenen Literaturstellen, weil im vorliegenden Fall höhere Leerlaufleistungen und geringere Fahrgeschwindigkeiten bei voller Motorleistung angesetzt werden.

Zusätzlich wird folgendes in Ansatz gebracht:

- bei Kurvenfahrt 10 %ige Erhöhung der Leistung P
- bei Gegenverkehr 10 %ige Erhöhung der Leistung P
- ein leeres Schiff benötigt für eine gegebene Fahrgeschwindigkeit 50 % der Leistung eines voll beladenen Schiffes. Je nach Beladungsgrad des Schiffstyps wird linear interpoliert. Außer bei Sportbooten, dort ist kein Beladungsgrad definiert.

### 1.3 Beispiel für die Berechnung der Emissionsdichte auf einer freien Strecke ohne Fließgeschwindigkeit (theoretischer Fall)

Im folgenden wird die Quellstärke auf einer Strecke ohne Fließgeschwindigkeit (Fließgeschwindigkeit  $v_G = 0$ ) unter folgenden Randbedingungen berechnet:

Schiffstyp	: 'Johann Welker'
Nennleistung $P_{\text{nenn}}$	= 552 kW
Anzahl Schiffe pro Jahr $n_s$	= 3 650 /a (alles Johann Welker)
Fahrgeschwindigkeit $v_R$	= 11 km/h
Lastfaktor (aufgrund Fahrgeschw. $v_R$ , siehe Gl. 1.4 bzw. <b>Abb. 1.1</b> )	= 0.31
Motoralter	= fabrikneu

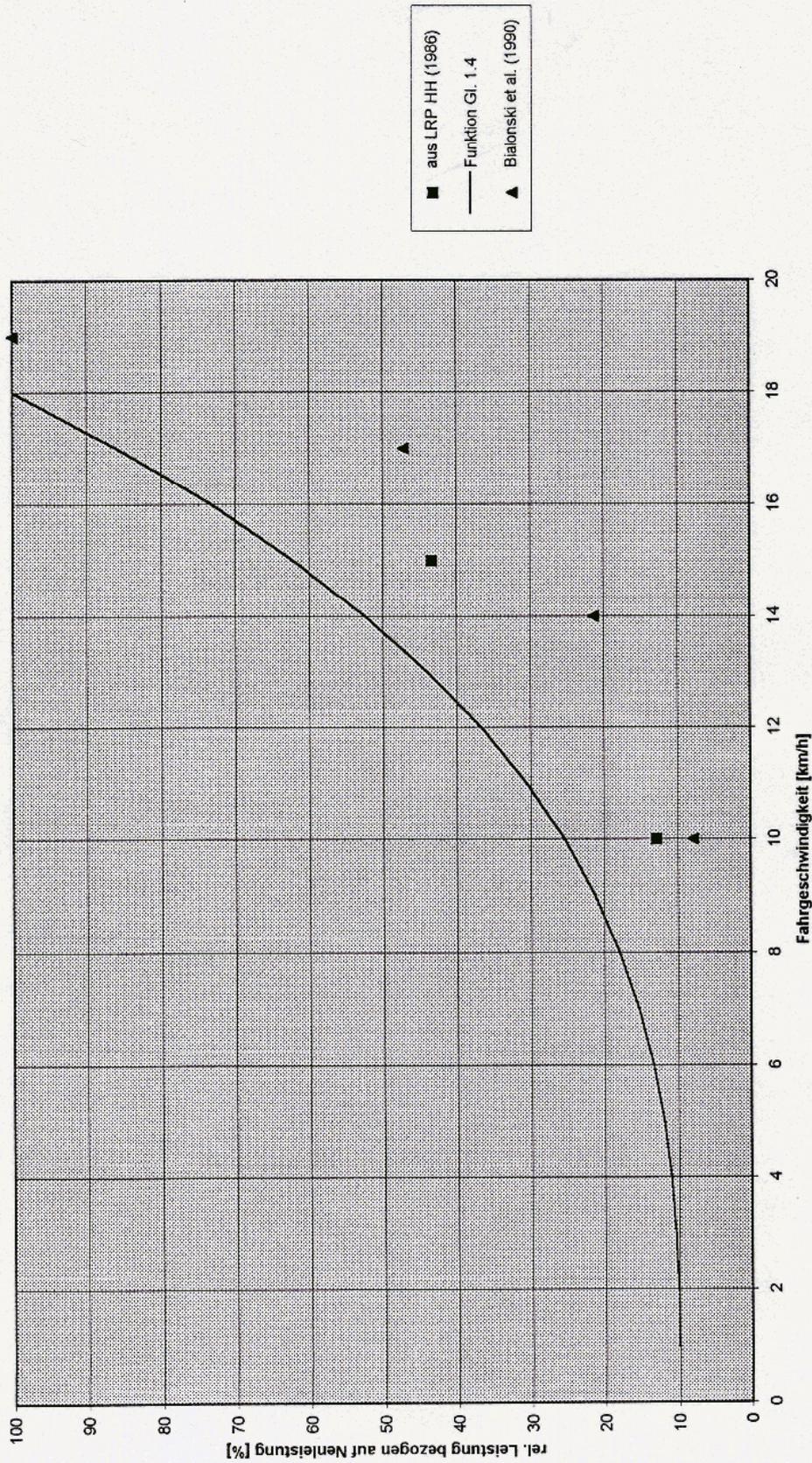


Abb. 1.1: Angesetzter Lastfaktor in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit in einem Gewässer ohne Fließgeschwindigkeit. Funktion ist Gl. (1.4).



Die Emissionsdichte  $q_i$  eines Schiffes (siehe Gl. 1.2) wird mit der Anzahl der Schiffe  $n_s$  multipliziert, die in der Stunde fahren, um die Emissionsdichte  $Q_i$  in der Stunde  $s$  zu erhalten. Aus dem Lastfaktor folgt für die Antriebsleistung  $P = 169 \text{ kW}$  und damit erhält man folgende Emissionsdichten der Strecke:

<b>Schadstoff</b>	<b>Benzol</b>	<b>Ruß</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>KW</b>	<b>CO</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>
<b>Emissionsdichte [g/(km*h)]</b>	0.17	2.8	4.9	8.3	19	92

## 2 EMISSIONSBESTIMMUNG IM BEREICH EINER SCHLEUSE IN EINEM GEWÄSSER OHNE FLIESSGESCHWINDIGKEIT (THEORETISCHER FALL)

Im folgenden werden zunächst die emissionsrelevanten Vorgänge beim Schleusen beschrieben, dann die programmtechnische Umsetzung.

### 2.1 Emissionsrelevante Vorgänge

Es wird vereinfachend davon ausgegangen, daß die Schleuse folgende Auswirkungen hat:

- a) Bis 400 m vor das Schleusentor behält das Schiff seine normale Fahrgeschwindigkeit bei.
- b) Zwischen 400 m vor der Schleuse und der Wartestelle vor dem Schleusentor läuft der Schiffsmotor im Leerlauf, das Schiff verliert ohne Bremsmanöver Geschwindigkeit bis auf 3 km/h. Dann wird ein Bremsmanöver gemacht, das Schiff kommt zum Stillstand.
- c) Das Schiff muß eine Zeitspanne  $\Delta t_w$  ( $w =$  warten) auf die Einfahrt in die Schleuse warten. Der Motor läuft im Leerlauf.
- d) Nach Freigabe der Schleuseneinfahrt beschleunigt das Schiff auf eine Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h.
- e) Nach Beschleunigung auf diese Geschwindigkeit fährt es mit gleichbleibender Geschwindigkeit vom Liegeplatz in die Schleuse.
- f) Kurz vor Erreichen seines Liegeplatzes bremst das Schiff seine Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h bis zum Stillstand ab.
- g) Während des Schleusungsvorgangs, d. h. über den Zeitraum  $\Delta t_s$  ( $s =$  schleusen) läuft der Motor im Leerlauf.
- h) Nach Ende des Schleusungsvorgangs beschleunigt das Schiff auf eine Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h und fährt aus der Schleuse aus.
- i) Nach Ausfahrt des Schiffshecks aus der Schleuse beschleunigt das Schiff auf einer Strecke von 400 m auf seine Reisegeschwindigkeit.
- j) Ab Schleusentor fährt das Schiff mit seiner Reisegeschwindigkeit.

## 2.2 Schadstoffemission bei Manövern

### 2.2.1 Herleitung des Berechnungsverfahrens

Im folgenden wird die Vorgehensweise bei der Berechnung der Schadstoffemissionen bei Manövern, hier zunächst beim Bremsen, erläutert. Dazu wird davon ausgegangen, daß das Schiff der Masse  $m$  mit der Geschwindigkeit  $v_R$  z. B. in eine Schleuse einfährt. Bei Ankunft am Liegeplatz in der Schleuse muß die Geschwindigkeit des Schiffes auf Null abgebaut werden. Es folgt die Bestimmung der Arbeit [kWh], die für dieses Bremsmanöver gebraucht wird und mit der man dann aus **Tab. 1.1** und **Tab. 1.2** die Schadstoffemission (g Schadstoff/Bremsmanöver) berechnen kann.

Bei der Einfahrt hat das Schiff eine kinetische Energie  $E$  von

$$E = 1/2 \cdot m \cdot v_R^2 \quad (2.0)$$

mit

$E$  = kinetische Energie in Js

$m$  = Masse des Schiffes in kg

$v_R$  = Fahrgeschwindigkeit des Schiffes relativ zum Wasser in m/s.

Benutzt man für Gl. (2.0) die eher gebräuchlichen Maßeinheiten kWh, Tonnen und km/h statt Js, kg und m/s, dann ist Gl. (2.0) umzuformen in

$$E = 1/2 \cdot m \cdot v_R^2 / (3.6^2 \cdot 3\,600) \quad (2.1)$$

mit

$E$  = kinetische Energie in kWh

$m$  = Masse des Schiffes in Tonnen

$v_R$  = Fahrgeschwindigkeit des Schiffes relativ zum Wasser in km/h.

Diese kinetische Energie ist gleich der Arbeit, die beim Bremsmanöver durch den Strömungswiderstand des Schiffes und den Schiffsantrieb aufgebracht werden muß. Nach Angaben des Auftraggebers wird in freien Gewässern aus einer Fahrgeschwindigkeit von 18 km/h heraus ca. 80 % der Nennleistung des Motors eingesetzt, um das Schiff in ca. 2 Minuten zum Stillstand zu bringen. In Kanälen sind es aus einer Fahrgeschwindigkeit von 12 km/h heraus ca. 50 % der Nennleistung, die das Schiff nach ca. 2 Minuten zum Stillstand bringen.

Daraus errechnet sich für ein volles Schiff mit einer Masse von 1 500 Tonnen aus einer Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h bei Einsatz von 50 % der Nenn-Motorleistung die Bremszeit

zu ca. 15 Sekunden und ein Wirkungsgrad von 17 % (Wirkungsgrad kinetische Energie des Schiffes zu Beginn des Bremsvorgangs dividiert durch vom Motor während des Bremsvorgangs aufzubringende Energie). Damit kann dann die Emission beim Bremsen errechnet werden.

### **2.2.2 Zahlenbeispiel und erste Sensitivitätsanalyse**

Betrachtet wird ein voll beladenes 1 000 TT-Schiff (Masse 1 500 Tonnen), welches mit 3 km/h in eine Schleuse einfährt und eine Nenn-Motorleistung von 522 kW hat.

Die während des Bremsmanövers zu erbringende Motorleistung errechnet sich nach Abschnitt 2.2.1 zu:  $E = 0.145 \text{ kWh}$ . Bremszeit ist 15 Sekunden, Wirkungsgrad 17 %, damit sind 204 kW Leistung erforderlich, der Motor erbringt eine Arbeit von 0.9 kWh. Die  $\text{NO}_x$ -Emission für das Bremsmanöver errechnet sich demnach bei einem fabrikneuen Motor zu

$$0.9 \text{ kWh} \cdot 14.4 \text{ g NO}_x/\text{kWh} = 13 \text{ g NO}_x.$$

Um die Bedeutung dieser Emission einordnen zu können, wird sie im folgenden mit anderen Emissionen des Schiffes verglichen.

#### **Vergleich mit der Emission im Leerlauf:**

Ein 1 000 TT-Schiff mit einer Nennleistung des Motors von 522 kW hat (laut Abschnitt 1.2 bei 10 % Nennleistung) eine Motorleistung von  $0.1 \cdot 522 = 52 \text{ kW}$  und damit eine  $\text{NO}_x$ -Emission von

$$522 \text{ kW} \cdot 0.1 \cdot 14.4 \text{ g NO}_x/\text{kWh} = 752 \text{ g NO}_x/\text{h}.$$

Die Emission infolge Bremsmanöver ist also genau so groß wie die Leerlaufemissionen des Schiffes in

$$13 \text{ g NO}_x / (752 \text{ g NO}_x/\text{h}) = 0.017 \text{ h} = 1 \text{ Min}.$$

Konsequenz: Das Berücksichtigen von Wartezeiten vor der Schleuse und von Liegezeiten in der Schleuse von 1 Minute ist also genau so wichtig wie die Berücksichtigung eines Bremsmanövers.

**Vergleich mit den Emissionen im Fahrbetrieb:**

Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h hat der Motor nach Abschnitt 1.2 eine Leistung P von

$$P = 522 (0.1 + 0.00015432 \cdot 3^3) = 54 \text{ kW}$$

zu erbringen. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen beträgt damit

$$54 \text{ kW} \cdot 14.4 \text{ g NO}_x/\text{kWh} = 783 \text{ g NO}_x/\text{h}, \text{ dies entspricht einer Emission von } 0.26 \text{ g NO}_x/\text{m}.$$

Die bei einem Bremsmanöver emittierten 13 g NO<sub>x</sub> entsprechen also den Emissionen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h in

$$13 \text{ g NO}_x / 0.26 \text{ g NO}_x/\text{m},$$

das sind die Emissionen auf einer Fahrstrecke von ca. 50 m Länge.

Konsequenz: Das Berücksichtigen der Emissionen durch ein Bremsmanöver in einer Schleuse bringt bei einer Schleusenlänge von 100 m etwa halb so viele Emissionen wie die Durchfahrt durch die Schleuse mit konstanter Geschwindigkeit.

**Vergleich mit den Emissionen während der Schleusung:**

Läuft der Motor des o.a. Schiffes während der Schleusung im Leerlauf, z.B. während 15 Min., emittiert er dabei  $752 \cdot 15/60 \text{ g NO}_x = 188 \text{ g NO}_x$ .

Konsequenz: Die Leerlaufemissionen in einer Schleuse sind wichtiger als die Emissionen beim Bremsen und im Fahrbetrieb durch die Schleuse. Zur korrekten Emissionsbestimmung im Schleusenbereich ist also die Schleusungszeit möglichst korrekt zu bestimmen. Manche Schiffe haben kein Getriebe, in der Schleuse ist deshalb der Motor abgestellt. Dies ist gegebenenfalls bei der Emissionsbestimmung zu berücksichtigen.

**2.3 Programmtechnische Umsetzung**

Die im Abschnitt 2.1 (a bis j) aufgezählten emissionsrelevanten Vorgänge wurden auf Basis der o. a. ersten Sensitivitätsanalyse programmtechnisch wie folgt umgesetzt. Siehe dazu auch **Abb. 2.1**.

a) nicht erforderlich

b) Auf einer Linie zwischen 400 m Abstand und der Wartestelle vor dem Schleusentor wird die Leerlaufemission freigesetzt während das Schiff von Reisegeschwindigkeit auf 3 km/h

ausläuft (8 Minuten Auslaufzeit bei vollem Schiff, 3 Minuten bei leerem Schiff). Zusätzlich wird die beim Bremsmanöver aus 3 km/h emittierte Emission freigesetzt (gleichverteilt über die 400 m). Hier und in den folgenden Punkten wird eine Gleichverteilung der Emissionen über den Streckenabschnitt angesetzt, weil sich je nach Länge der Schiffe und Liegepositionen die Emissionen über das Jahr gesehen über die Strecke gleichmäßig verteilen werden. Da die einzelnen Emissionsereignisse typischerweise weniger als 1 h andauern, wird dies auch bei der Bestimmung des 98-Perzentilwertes der Zusatzbelastung angesetzt. Es wird immer ein volles Schiff vorausgesetzt.

- c) Die Emission während der Wartezeit  $\Delta t_w$  wird auf den o. a. 400 m gleichverteilt freigesetzt.
- d) Beim Beschleunigen auf 3 km/h entstehende Emission (konservativerweise identisch mit Arbeit beim Bremsen angesetzt) wird auf o. a. 400 m gleichverteilt freigesetzt.
- e) Auf Linie beginnend in 400 m Abstand vor Schleusentor bis Ende der Schleuse wird die Emission bei gleichbleibender Fahrgeschwindigkeit 3 km/h freigesetzt.
- f) Beim Bremsmanöver in Schleuse aus 3 km/h entstehende Emission wird gleichverteilt in der Schleuse (auf Linie zwischen den beiden Schleusentoren) freigesetzt.
- g) Die Emission während der Liegezeit in der Schleuse wird gleichverteilt in der Schleuse freigesetzt.
- h) Beim Beschleunigen auf 3 km/h entstehende Emission wird gleichverteilt in der Schleuse freigesetzt.
- i) Beim Beschleunigen von 3 km/h auf Reisegeschwindigkeit entstehende Emission wird auf der Linie zwischen Schleusentor und 400 m Abstand gleichverteilt freigesetzt. Die Energie zum Beschleunigen wird berechnet auf Basis von Gl. (2.1) und eines Propulsionswirkungsgrades von 50 % zu:

$$\Delta E = m (v_R^2 - v_S^2) / (3.6^2 \cdot 3\,600) \text{ [kWh]} \quad (2.2)$$

mit

$\Delta E$  = Energie um das Schiff von der Fahrgeschwindigkeit in der Schleuse auf seine Reisegeschwindigkeit zu beschleunigen in kWh. Dabei für Emissionsbestimmung Ansatz, daß während des Beschleunigens 100 % der Nennleistung eingesetzt wird.

$m$  = Masse des Schiffes in Tonnen

$v_R$  = Reisegeschwindigkeit in km/h und

$v_S$  = Fahrgeschwindigkeit in der Schleuse in km/h.

j) Emission bei Reisegeschwindigkeit ab Schleusentor.

Damit ergibt sich zusammenfassend die in **Abb. 2.1** im oberen Teil dargestellte Emissionsmodellierung bei den von links nach rechts fahrenden Schiffen. Für von rechts nach links fahrende Schiffe wird entsprechend vorgegangen. Im unteren Teil der **Abb. 2.1** sind die dementsprechend für jede der Fahrtrichtungen auf den Streckenabschnitten anzusetzenden Emissionen angegeben. Es wird immer angesetzt, daß in jede Richtung gleich viele Schiffe mit dem gleichen Beladungsgrad fahren. Damit ergeben sich die in **Abb. 2.2** für die Emissionsbestimmung dargestellten Fakten.

**Hinweis:** Fahren nicht in jede Richtung Schiffe mit dem gleichen Beladungsgrad, dann kann ein über die beiden Fahrtrichtungen entsprechend gemittelter Beladungsgrad verwendet werden, oder aber es wird im Programm ein zusätzliches Streckensegment definiert, welches mit dementsprechenden Verkehr belegt wird.

## 2.4 Vergleich der Emissionen auf einer freien Strecke mit denen in einer Schleuse

Im folgenden soll eine Abschätzung dafür gegeben werden, ob die Emissionen im Bereich einer freien Strecke höher oder niedriger sind als im Bereich einer Schleuse der Länge  $L = 220$  m. Als Beispiel dient wieder das vollbeladene 1 000 TT-Schiff aus Abschnitt 2.2.2. Es fahre pro Stunde 1 Schiff von links nach rechts und eines von rechts nach links. Die Reisegeschwindigkeit auf der freien Strecke betrage 12 km/h, die Fließgeschwindigkeit  $v_G$  des Gewässers sei  $v_G = 0$ .

### Freie Strecke

Für die freie Strecke errechnet sich:

Erforderliche Leistung pro Schiff:	$P = 522 (0.1 + 0.00015432 \cdot 12^3) = 191$ kW
NO <sub>x</sub> -Emission im Jahr 1998 pro Schiff:	$191 \cdot 14.4 = 2\,750$ g NO <sub>x</sub> /h
Fahrstrecke in 1 h:	12 km
Emissionsdichte (verursacht von 1 Schiff):	$2\,750 / 12$ g NO <sub>x</sub> /(km · h) = 229 g NO <sub>x</sub> /(km · h)
Emissionsdichte (verursacht von 2 Schiffen):	$Q_{NO_x} = 458$ g NO <sub>x</sub> /(km · h)

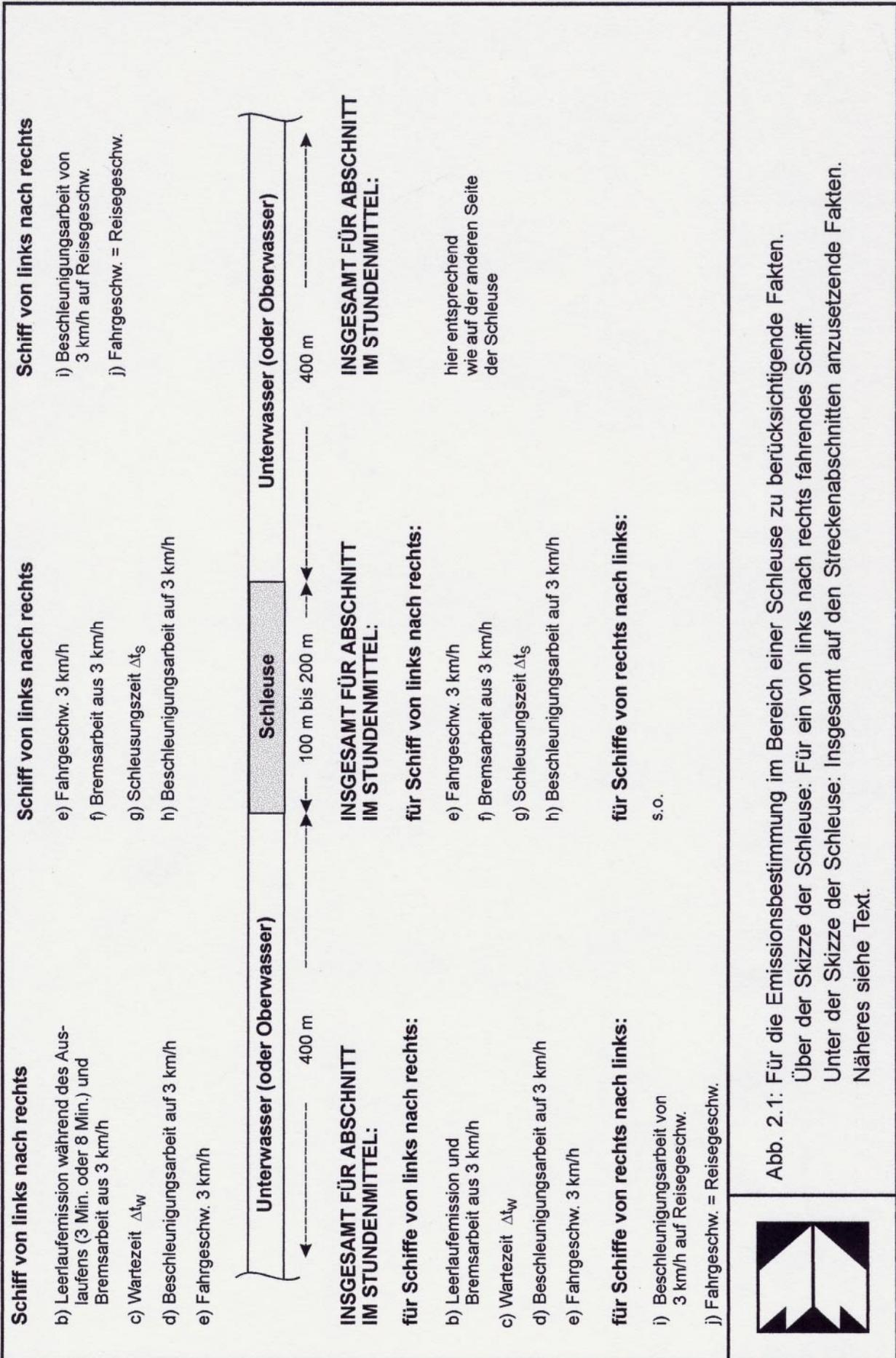
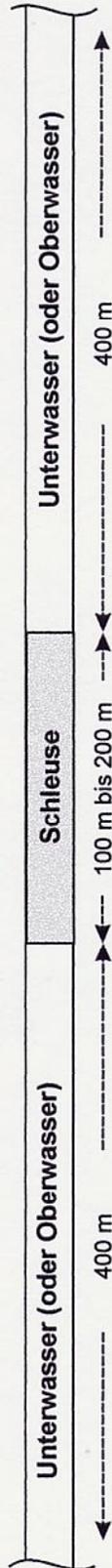


Abb. 2.1: Für die Emissionsbestimmung im Bereich einer Schleuse zu berücksichtigende Fakten.  
 Über der Skizze der Schleuse: Für ein von links nach rechts fahrendes Schiff.  
 Unter der Skizze der Schleuse: Insgesamt auf den Streckenabschnitten anzusetzende Fakten.  
 Näheres siehe Text.



Anzahl Schiffe	Emissionen je Schiff	Anzahl Schiffe	Emissionen je Schiff	hier entsprechend wie auf der anderen Seite der Schleuse
1/2 N <sub>jS</sub>	Leerlauf bei Auslaufzeit	1 N <sub>jS</sub>	Fahrtgeschw. 3 km/h	
1/2 N <sub>jS</sub>	2 x Fahrtänderungsarbeit	1 N <sub>jS</sub>	2 x Fahrtänderungsarbeit	
1/2 N <sub>jS</sub>	Wartezeit $\Delta t_w$	1 N <sub>jS</sub>	Schleusungszeit $\Delta t_s$	
1/2 N <sub>jS</sub>	Fahrtgeschw. 3 km/h			
1/2 N <sub>jS</sub>	Beschleunigungsarbeit von 3 km/h auf Reisegeschw.			
1/2 N <sub>jS</sub>	Fahrtgeschw. = Reisegeschw.			

Abb. 2.2: Insgesamt im Bereich einer Schleuse für die Emissionsbestimmung anzusetzende Fakten bei einem gegebenen jährlichen Schiffsverkehrsaufkommen  $N_{jS}$  ( $j$  = jährlich,  $S$  = Strecke) auf der Wasserstraße (Summe aus beiden Richtungen). Fahrtänderungsarbeit = Bremsarbeit von 3 km/h auf Stillstand oder Beschleunigungsarbeit von Stillstand auf 3 km/h. Auslaufzeit = Zeit, die das Schiff zum Auslaufen von Reisegeschwindigkeit auf 3 km/h braucht = Zeit, in der es Leerlaufemissionen freisetzt. Näheres siehe **Abb. 2.1** und Text.



### Schleusenbereich

Für den Schleusenbereich errechnet sich bei einer Anzahl von 1 Schiff pro Stunde von links nach rechts, einer Wartezeit vor der Schleuse von  $\Delta t_w = 15$  Min. und einer Schleusungszeit von  $\Delta t_s = 10$  Min. für die Punkte a bis i aus Abschnitt 2.1:

a) ---

b) Emission während des Auslaufens (siehe Abschnitt 2.3 Punkt b) = Leerlaufemission während 8 Min. Emission im Leerlauf:  $522 \text{ kW} \cdot 0.1 \cdot 14.4 \text{ g NO}_x/\text{kWh} = 752 \text{ g NO}_x/\text{h}$ . Bei 8 Min. Auslaufzeit sind das  $752 \cdot 8/60 = 100 \text{ g NO}_x/\text{h}$ , umgelegt auf die 0.4 km Strecke gibt das  $251 \text{ g NO}_x/(\text{km} \cdot \text{h})$ . Zusätzliche Emission infolge Bremsarbeit (siehe Abschnitt 2.2) =  $16 \text{ g NO}_x/\text{h}$ , das ergibt eine Emissionsdichte von  $40 \text{ g NO}_x/(\text{km} \cdot \text{h})$ .

c) Emission im Leerlauf:  $522 \text{ kW} \cdot 0.1 \cdot 14.4 \text{ g NO}_x/\text{kWh} = 752 \text{ g NO}_x/\text{h}$ . Bei 15 Min. Wartezeit sind dies  $752 \cdot 15 / 60 = 188 \text{ g NO}_x$ . Diese verteilen sich auf eine Strecke von 0.4 km, dies ergibt eine Emission von  $188 / 0.4 = 470 \text{ g NO}_x/(\text{km} \cdot \text{h})$ .

d) Emission infolge Beschleunigung ist wie beim Bremsen  $E_b = 40 \text{ g NO}_x/(\text{km} \cdot \text{h})$

e) Emission infolge Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h

$$\text{Leistung } P = 522 (0.1 + 0.00015432 \cdot 3^3) = 54 \text{ kW}$$

$$\text{Emission} = 54 \text{ kW} \cdot 14.4 \text{ g NO}_x/\text{kWh} = 783 \text{ g NO}_x/\text{h}$$

$$\text{Fahrstrecke in 1 h} = 3 \text{ km}$$

$$\text{Emissionsdichte} = (783 \text{ g NO}_x/\text{h}) / (3 \text{ km}) = 261 \text{ g NO}_x/(\text{km} \cdot \text{h})$$

f) Emission ist wie bei Punkt b)  $16 \text{ g NO}_x/\text{h}$ , jedoch auf die Länge  $L = 220 \text{ m}$  der Schleuse bezogen, bedeutet dies eine Emissionsdichte von  $72 \text{ g NO}_x/(\text{km} \cdot \text{h})$ .

g) Emission während Liegezeit in Schleuse beträgt wie bei Punkt c)  $752 \text{ g NO}_x/\text{h}$ . Bei einer Schleusungszeit von 10 Min. errechnet sich damit eine Emissionsdichte von  $313 \text{ g NO}_x/(\text{km} \cdot \text{h})$ .

h) Emissionsdichte ist wie bei Punkt f)  $72 \text{ g NO}_x/(\text{km} \cdot \text{h})$ .

i) Beschleunigungsarbeit von 3 km/h auf 12 km/h (laut Gl. 2.2) =  $1500 \cdot (12^2 - 3^2) / (3.6^2 \cdot 3600) = 4.3 \text{ kWh}$ . Dies führt zu einer Emission von  $63 \text{ g NO}_x/\text{h}$ , d. h. auf dem Abschnitt von 0.4 km Länge zu einer Emissionsdichte von  $158 \text{ g NO}_x/(\text{km} \cdot \text{h})$ .

j) Siehe Emissionsdichte bei freier Strecke pro Schiff von  $229 \text{ g NO}_x/(\text{km} \cdot \text{h})$ .

Auf der Strecke mit der Länge von 400 m zu beiden Seiten der Schleuse werden bei einem Schiff pro Stunde von links nach rechts und einem Schiff von rechts nach links laut **Abb. 2.1**

und **Abb. 2.2** die Emissionen aus den Punkten b), c), d), e), i) und j) freigesetzt, das sind insgesamt 1 198 g NO<sub>x</sub>/(km · h).

In der Schleuse werden je Schiff die Emissionen aus den Punkten e), f), g) und h) freigesetzt, das sind insgesamt 718 g NO<sub>x</sub>/(km · h), für 2 Schiffe also 1 436 g NO<sub>x</sub>/(km · h).

Im oben durchgerechneten Beispiel liegt also unter den dort angesetzten Randbedingungen die höchste Emissionsdichte mit 1 436 g NO<sub>x</sub>/(km · h) in der Schleuse vor, im Bereich bis 400 m vor und hinter der Schleuse ist die Emissionsdichte mit 1 198 g NO<sub>x</sub>/(km · h) geringer, aber immer noch höher als die Emissionsdichte auf der freien Strecke von 458 g NO<sub>x</sub>/(km · h).

Der wichtigste Emissionsbeitrag in der Schleuse ist mit fast der Hälfte der Emissionen die Emission im Leerlauf des Motors während der Schleusungszeit. Der wichtigste Beitrag auf der Strecke vor der Schleuse ist mit ca. 40 % der Beitrag der Leerlaufemissionen der auf die Einfahrt wartenden Schiffe.

Hinweis: Schiffe, die kein Wendegetriebe haben und die Drehrichtung der Schraube durch Umsteuern des Motors erreichen, können die Schraube bei laufendem Motor nicht zum Stillstand bringen. Für diese Schiffe wird angesetzt, daß sie während der Wartezeit  $\Delta t_w$  und der Schleusungszeit  $\Delta t_s$  keine Emissionen freisetzen.

Im Rechenprogramm LuWas wird die Anzahl der Schiffe ohne Wendegetriebe nicht abgefragt. Der Anwender hat ihre Anzahl bei der Angabe von  $\Delta t_w$  und  $\Delta t_s$  zu berücksichtigen. Besitzt z.B. 10 % der Schiffe kein Wendegetriebe, dann ist die Eingabe der Warte- und Schleusungszeit ins Programm jeweils um 10 % gegenüber dem realen Wert zu kürzen.

### 3 EMISSIONSBESTIMMUNG IM BEREICH VON LIEGESTELLEN AN EINEM GEWÄSSER OHNE FLIESSGESCHWINDIGKEIT

Im folgenden werden zunächst die emissionsrelevanten Vorgänge im Bereich einer Liegestelle beschrieben, dann die programmtechnische Umsetzung.

#### 3.1 Emissionsrelevante Vorgänge

Es wird vereinfachend davon ausgegangen, daß eine Liegestelle folgende Auswirkungen hat:

- a) Bis 400 m vor der Liegestelle behält das Schiff im Leerlauf seine normale Fahrgeschwindigkeit bei.
- b) Beginnend 400 m vor der Liegestelle läuft das Schiff im Leerlauf auf eine Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h aus, dann fährt es mit 3 km/h zur Liegestelle.
- c) An der Liegestelle macht das Schiff eine Anzahl von  $n_{\text{Brems}}$  Bremsmanövern und von  $n_{\text{Beschl}}$  Beschleunigungsmanövern um sich parallel zum Kai an die Festmachestelle zu manövrieren. Dazu gehört ggfs. eine Drehung um  $180^\circ$ . Die bei jedem Brems- oder Beschleunigungsmanöver vom Schiffsmotor aufzubringende Arbeit wird so angesetzt, als bremse das Schiff von einer Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h auf Stillstand bzw. beschleunige von Stillstand auf 3 km/h. Falls vorhanden, wird hier auch das Bugstrahlruder während der Zeitspanne  $\Delta t_{\text{BugsAnl}}$  eingesetzt. Die Ankerwinde wird betätigt während der Zeitspanne  $\Delta t_{\text{AWAnl}}$ .
- d) Während des Anlegemanövers (während der Zeitspanne  $\Delta t_{\text{AnIM}}$ , ausgenommen die kurzen Beschleunigungs- und Bremsmanöver) und nach dem Anlegen während der Zeitspanne  $\Delta t_{\text{AnIL}}$  läuft die Hauptmaschine, insgesamt also während der Zeitspanne  $\Delta t_{\text{AnIM}} + \Delta t_{\text{AnIL}}$ , im Leerlauf. Wenn während des Anlegemanövers zusätzlich die Hilfsmaschine läuft, ist im Programm LuWas die Zeitspanne  $\Delta t_{\text{AnIL}}$  für das Laufen der Hauptmaschine im Leerlauf entsprechend zu verlängern.
- e) Während des Liegens läuft bei einer Anzahl  $n_z$  von Schiffen die Hilfsmaschine während der Zeitspanne  $\Delta t_{\text{Hilfs}}$ , oder die Hauptmaschine läuft im Leerlauf während der Zeitspanne  $\Delta t_L$  oder es wird ein Notstromaggregat während der Zeitspanne  $\Delta t_{\text{Not}}$  betrieben.
- f) Am Ende der Liegezeit findet ein Kaltstart der Hauptmaschine statt.

- g) Nach Start der Hauptmaschine bis zum eigentlichen Ablegemanöver während der Zeitspanne  $\Delta t_{AbIL}$  und während des Ablegemanövers während der Zeitspanne  $\Delta t_{AbIM}$  läuft die Hauptmaschine während der Zeitspanne  $\Delta t_{AbIL} + \Delta t_{AbIM}$  im Leerlauf.
- h) Zum Ablegen wird die Ankerwinde während der Zeitspanne  $\Delta t_{AWAbI}$  betätigt und das Schiff macht eine Anzahl von  $n_{Beschl}$  Beschleunigungsmanövern und  $n_{Brems}$  Bremsmanövern um sich in Fahrtrichtung zu manövrieren. Dazu gehört ggfs. eine Drehung um  $180^\circ$  und ggfs. der Einsatz eines Bugstrahlruders.
- i) Das Schiff beschleunigt von einer Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h auf seine Reisegeschwindigkeit.
- j) Das Schiff fährt über die ganze Liegestelle hinweg mit seiner Reisegeschwindigkeit.

### 3.2 Kaltstart

Es gibt keine Messungen über die Kaltstartemissionen bei Schiffsdieselmotoren. Auch bei LKW-Dieselmotoren gibt es nur ganz vereinzelte Messungen (INFRAS, 1999), für die jedoch angemerkt ist, daß sie nicht auf andere LKW-Dieselmotoren übertragbar sind. Das neue Emissionsbestimmungsverfahren MOBILEV des Umweltbundesamtes (FIGE, 1995) berücksichtigt deshalb keine Kaltstartzuschläge für LKW-Dieselmotoren.

Da jedoch einige Luftschadstoffe bei nicht betriebswarmen Schiffsmotor in erhöhtem Maße emittiert werden, soll in der vorliegenden Studie dafür zumindest ein pauschaler Kaltstartzuschlag berücksichtigt werden. Dabei wird berücksichtigt, daß laut INFRAS, 1999 und MLuS-82, 1982 (das MLuS-92 sagt darüber nichts aus) außer bei den Stickoxiden auf den ersten 5 km Fahrstrecke eines Kfz die Emissionen um ca. 30 % erhöht sind. Setzt man für ein Kfz nach dem Kaltstart eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 25 km/h ein, dann treten bei einem Kfz die erhöhten Emissionen in einem Zeitraum von  $5 \text{ km} / 25(\text{km/h}) = 0.2 \text{ h} = 12 \text{ Min.}$  auf.

Für die Schiffsmotoren wird angesetzt, daß es auch bei diesen 12 Minuten dauert, bis die Kaltstartphase überwunden ist. Außer beim  $\text{NO}_x$  wird deshalb für die ersten 12 Minuten Betriebszeit eine um 30 % erhöhte Emission angesetzt.

Zahlenbeispiel: Betrachtet wird das schon zuvor behandelte Schiff mit 1 000 TT und 522 kW-Motor. Das Schiff befinde sich nach dem Kaltstart noch an der Liegestelle, der Motor werde im Leerlauf (10 % Nennleistung) betrieben, also mit 52 kW. Der Emissionsfaktor Benzol errechnet sich damit zu

$$ef_{\text{Bzl}} = 0.02 (12 - 6.5 \cdot 52^{0.1}) = 0.047 \text{ g/kWh},$$

die stündliche Benzolemission damit zu 2.44 g/h, der Kaltstartzuschlag von 30 % während 12 Minuten beläuft sich damit als additiver Term auf 0.15 g Benzol/Kaltstart.

### 3.3 Programmtechnische Umsetzung

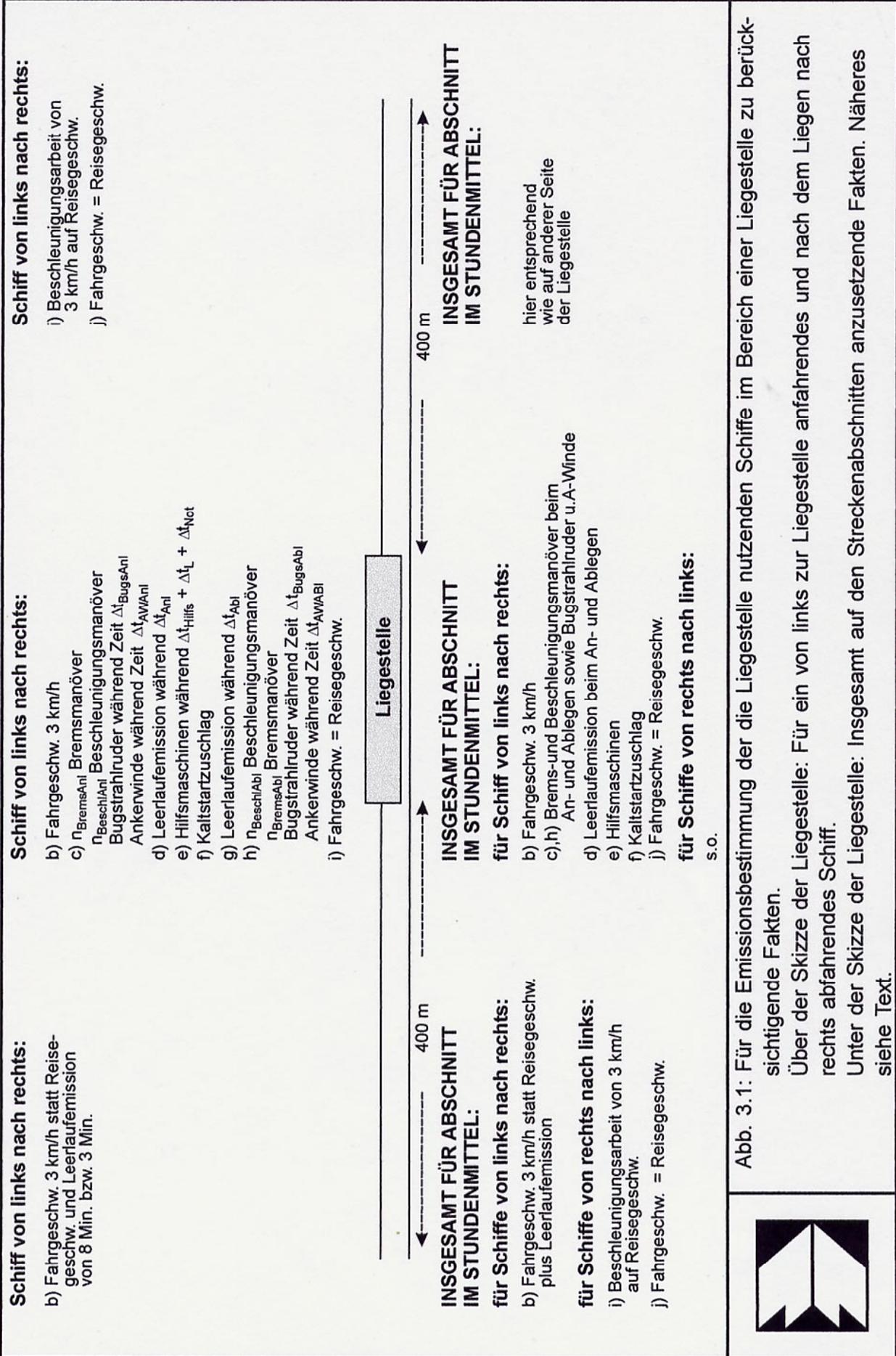
Die in den Abschnitten 3.1 (a bis i) und 3.2 aufgezählten emissionsrelevanten Vorgänge wurden programmtechnisch wie folgt umgesetzt.

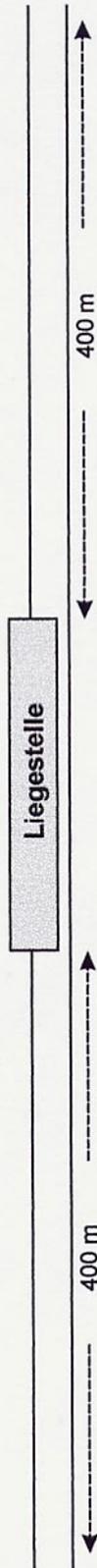
- a) nicht erforderlich.
- b) Auf Linie beginnend in 400 m Abstand vor Liegestelle bis Ende der Liegestelle wird die Emission im Leerlauf (8 Minuten bei vollem Schiff, 3 Minuten bei leerem Schiff) angesetzt, zusätzlich wird die Emission bei Fahrgeschwindigkeit 3 km/h freigesetzt.
- c) Bei  $n_{\text{Brems}}$  Brems- und  $n_{\text{Beschl}}$  Beschleunigungsmanövern entstehende Emissionen werden gleichverteilt auf der Liegefläche (auf Linie zwischen Anfang und Ende der Liegefläche) freigesetzt. Ebenfalls die während der Nutzungszeit  $\Delta t_{\text{Bugs}}$  des Bugstrahlruders entstehenden Emissionen. Die für den Betrieb des Bugstrahlruders erforderliche Motorleistung wird in Anlehnung an Angaben des Auftraggebers mit 1/3 der Nennleistung der Hauptmaschine angesetzt. Die Zeit für das Betätigen der Ankerwinde ist vom Anwender festzulegen, die dafür erforderliche Leistung wird mit 10 % der Nennleistung der Hauptmaschine angesetzt. Dies ist also gleichbedeutend mit dem Fall, daß die Hauptmaschine im Leerlauf läuft.
- d) Die Leerlaufemissionen während der Anlegezeit werden gleichverteilt auf der Liegefläche freigesetzt.
- e) Die Emissionen der Hilfsmaschinen werden gleichverteilt auf der Liegefläche freigesetzt. Die Leistung der Hilfsmaschine oder eines Notstromaggregats wird mit 10 % der Nennleistung der Hauptmaschine angesetzt. Dies ist also gleichbedeutend mit dem Fall, daß die Hauptmaschine im Leerlauf läuft. Für die Zeit  $\Delta t_{\text{Hilfs}}$  ist also die Summe der Betriebszeiten von Hauptmotor im Leerlauf, Betriebszeit Hilfsmaschine und Betriebszeit Notstromaggregat anzusetzen.
- f) Der Kaltstartemissionszuschlag wird gleichverteilt auf der Liegefläche freigesetzt.
- g) Siehe Punkt d.

- h) Siehe Punkt c.
- i) Die beim Beschleunigen von 3 km/h auf Reisegeschwindigkeit entstehende Emission wird auf der Linie zwischen Ende der Liegestelle und 400 m Abstand gleichverteilt angesetzt.
- j) Emission bei Reisegeschwindigkeit über die gesamte Länge der Liegestelle hinweg.

Damit ergibt sich zusammenfassend die in **Abb. 3.1** im oberen Teil dargestellte Emissionsmodellierung für von links nach rechts fahrende Schiffe. Für von rechts nach links fahrende Schiffe wird entsprechend vorgegangen. Im unteren Teil der **Abb. 3.1** sind die dementsprechend insgesamt auf den Streckenabschnitten anzusetzenden Emissionen angegeben. Es wird immer vorausgesetzt, daß aus jeder Richtung gleich viele Schiffe mit dem gleichen Beladungsgrad ankommen und daß in jede Richtung gleich viele Schiffe mit dem gleichen Beladungsgrad abfahren. Damit ergeben sich die in **Abb. 3.2** für die Emissionsbestimmung dargestellten Fakten.

**Hinweis:** Fahren nicht in jede Richtung Schiffe mit dem gleichen Beladungsgrad, dann kann ein über die beiden Fahrrichtungen entsprechend gemittelter Beladungsgrad verwendet werden, oder aber es wird im Programm ein zusätzliches Streckensegment definiert, welches mit dementsprechenden Verkehr belegt wird.





Anzahl Schiffe	Emissionen je Schiff	Anzahl Schiffe	Emissionen je Schiff	hier entsprechend wie auf der anderen Seite der Liegestelle
1 N <sub>JS</sub>	Leerlauf bei Auslaufzeit	1 N <sub>JS</sub>	Reisegeschw.	
1 N <sub>JS</sub> - 1/2 N <sub>JL</sub>	Reisegeschw.	1 N <sub>JL</sub>	Fahrtgeschw. 3 km/h	
1/2 N <sub>JL</sub>	Fahrtgeschw. 3 km/h	1 N <sub>JL</sub>	n mal Fahrtänderungsarbeiten bei An- und Ablegen	
1/2 N <sub>JL</sub>	Beschleunigungsarbeit von 3 km/h auf Reisegeschw.	X · N <sub>JL</sub>	Bugstrahlruder während Δt <sub>Bugs</sub>	
		1 N <sub>JL</sub>	Leerlaufemissionen bei An- und Ablegen	
		1 N <sub>JL</sub>	Hilfsmaschinen während Δt <sub>Hilfs</sub> + Δt <sub>L</sub> + Δt <sub>Not</sub>	
		1 N <sub>JL</sub>	Kaltstartzuschlag	



Abb. 3.2: Insgesamt im Bereich einer Liegestelle für die Emissionsbestimmung anzusetzende Fakten bei einem gegebenen jährlichen Schiffsverkehrsaufkommen auf der Strecke von N<sub>JS</sub> und einer jährlichen Anzahl von die Liegestelle nutzenden Schiffen N<sub>JL</sub> (L = Liegestelle). Näheres siehe **Abb. 3.1** und Text.

## 4 EMISSIONSBESTIMMUNG BEI FREI FLIESSENDEN GEWÄSSERN

### 4.1 Strecke

#### 4.1.1 Berg- und Talfahrer mit gleicher Relativgeschwindigkeit zum Wasser

Entsprechend der Vorgehensweise bei der Bestimmung der Schallimmission seitens der Schifffahrt im Bereich von fließenden Gewässern (Mitteilung der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin, an den Auftragnehmer) läßt sich für die Emissionsbestimmung von Luftschadstoffen folgende Überlegung anstellen.

Wenn ein Gewässer mit der Geschwindigkeit  $v_G$  zu Tal fließt, und die Schiffe mit der Geschwindigkeit  $v_R$  relativ zum Wasser fahren, so haben die Talfahrer relativ zum Ufer die Geschwindigkeit  $v_T = v_R + v_G$ . Die Bergfahrer haben relativ zum Ufer die Geschwindigkeit  $v_B = v_R - v_G$ .

Auch wenn gleich viele Schiffe zu Berg wie zu Tal fahren, heben sich die Effekte der Fließgeschwindigkeit nicht gegenseitig auf. Wenn z.B. die Geschwindigkeit des Gewässers die der Schiffe erreicht, werden die Bergfahrer zum Stillstand kommen und damit auf einer Stelle über Grund stehend ständig emittieren, während die Talfahrer doppelt so schnell sind wie in einem Gewässer mit vernachlässigbarer Fließgeschwindigkeit und damit nur die halbe Emissionsdichte verursachen.

Die Emissionsdichte auf einem fließenden Gewässer läßt sich mit diesen Überlegungen für  $v_R \geq v_G$  und gleichem  $v_R$  für Berg- und Talfahrer wie folgt bestimmen:

Pro Stunde emittiert jedes Schiff

$$ef_i \cdot P \quad [\text{g}/(\text{h und Schiff})].$$

Um das Wasserstraßensegment der Länge  $L$  zu durchfahren werden folgende Zeiten benötigt

- als Bergfahrer:  $\Delta t_B = L/(v_R - v_G) \quad [\text{h}/(\text{Strecke } L \text{ und Schiff})]$

- als Talfahrer:  $\Delta t_T = L/(v_R + v_G) \quad [\text{h}/(\text{Strecke } L \text{ und Schiff})]$

Auf der Strecke der Länge  $L$  emittiert also jedes Schiff

- als Bergfahrer:  $ef_i \cdot P \cdot L / (v_R - v_G) \quad [\text{g}/(\text{Strecke } L \text{ und Schiff})]$

- als Talfahrer:  $ef_i \cdot P \cdot L / (v_R + v_G) \quad [\text{g}/(\text{Strecke } L \text{ und Schiff})]$

Im Programm ist vorgesehen, daß im Mittel genau so viele Schiffe zu Berg wie zu Tal fahren. Damit errechnet sich die mittlere Emission pro Schiff, welches auf dem Querschnitt fährt, zu

$$\frac{1}{2} \text{ef}_i \cdot P \cdot L \cdot \left( \frac{1}{v_R - v_G} + \frac{1}{v_R + v_G} \right) [\text{g}/(\text{Strecke L und Schiff})]$$

also der Hälfte der Summe der Emission eines Bergfahrers und eines Talfahrers. Die Emissionsdichte  $q_i$  bestimmt sich daraus zu

$$q_i = \frac{1}{2} \text{ef}_i \cdot P \cdot \left( \frac{1}{v_R - v_G} + \frac{1}{v_R + v_G} \right) [\text{g}/(\text{Schiff} \cdot \text{km})]$$

Zum Vergleich mit Gl. (1.2) läßt sich die o.a. Gleichung umformen in

$$q_i = \text{ef}_i \cdot P \cdot \frac{1}{v_R} \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{v_R}{v_R - v_G} + \frac{v_R}{v_R + v_G} \right)$$

oder

$$q_i = \text{ef}_i \cdot P \cdot \frac{1}{v_R} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 - v_G / v_R} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + v_G / v_R} \right) [\text{g}/(\text{Schiff} \cdot \text{km})] \quad (4.1)$$

Die Gleichungen (1.2) und (4.1) unterscheiden sich um den dimensionslosen Faktor

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 - v_G / v_R} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + v_G / v_R} [-] \quad (4.2)$$

Erwartungsgemäß hat dieser Faktor F zur Berücksichtigung der Fließgeschwindigkeit auf die Emissionen bei

$v_G = 0$  den Wert  $F = 1$  und bei

$v_G = v_R$  den Wert  $F \rightarrow \infty$ .

Für den Gültigkeitsbereich ( $v_G/v_R < 1$ ) nimmt er die Werte in **Tab. 4.1** an, ist also erwartungsgemäß immer  $\geq 1$ .

<b><math>v_G/v_R</math></b>	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
<b><math>v_R/v_G</math></b>	$\infty$	5	2.5	1.7	1.3	1
<b>F</b>	1	1.04	1.19	1.56	2.78	$\infty$

Tab. 4.1: Verstärkungsfaktor F für die Emissionen in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeit  $v_G$  des Gewässers und Fahrgeschwindigkeit  $v_R$  der Schiffe relativ zum Wasser

#### 4.1.2 Berg- und Talfahrer mit ungleicher Relativgeschwindigkeit zum Wasser

Bei hoher Fließgeschwindigkeit  $v_G$  des Gewässers wird der Bergfahrer in der Regel mit einer höheren Relativgeschwindigkeit zum Wasser fahren als der Talfahrer. Bezeichnet man mit  $v_{RB}$  die Relativgeschwindigkeit des Bergfahrers und mit  $v_{RT}$  diejenige des Talfahrers dann modifizieren sich die Gleichungen aus Abschnitt 4.1.1 wie folgt.

Pro Stunde emittiert jedes Schiff

$$e_{fi} \cdot P \quad [\text{g}/(\text{h und Schiff})].$$

Um das Wasserstraßensegment der Länge L zu durchfahren werden folgende Zeiten benötigt

$$\text{- als Bergfahrer: } \Delta t_B = L/(v_{RB} - v_G) \quad [\text{h}/(\text{Strecke L und Schiff})]$$

$$\text{- als Talfahrer: } \Delta t_T = L/(v_{RT} + v_G) \quad [\text{h}/(\text{Strecke L und Schiff})]$$

Auf der Strecke der Länge L emittiert also jedes Schiff

$$\text{- als Bergfahrer: } e_{iB} \cdot P_B \cdot L / (v_{RB} - v_G) \quad [\text{g}/(\text{Strecke L und Schiff})]$$

$$\text{- als Talfahrer: } e_{iT} \cdot P_T \cdot L / (v_{RT} + v_G) \quad [\text{g}/(\text{Strecke L und Schiff})]$$

Wenn im Mittel genau so viele Schiffe zu Berg wie zu Tal fahren, errechnet sich die mittlere Emission zu

$$\frac{1}{2} \text{ef}_{i_B} \cdot P_B \cdot L \cdot \frac{1}{v_{RB} - v_G} + \frac{1}{2} \text{ef}_{i_T} \cdot P_T \cdot L \cdot \frac{1}{v_{RT} + v_G} \quad [\text{g}/(\text{Strecke } L \text{ und Schiff})]$$

bzw. eine Emissionsdichte  $q_i$  von

$$q_i = \frac{1}{2} \text{ef}_{i_B} P_B \cdot \frac{1}{v_{RB} - v_G} + \frac{1}{2} \text{ef}_{i_T} P_T \cdot \frac{1}{v_{RT} + v_G} \quad [\text{g}/(\text{Schiff} \cdot \text{km})]$$

Diese Beziehung ist im Programm berücksichtigt.

## 4.2 Schleuse

Der Bereich von Schleusen wird hinsichtlich der Fließgeschwindigkeit wie ein staugeregeltes Gewässer bzw. wie ein Kanal (siehe Kapitel 2) behandelt.

## 4.3 Liegestellen

Während des An- und Ablegemanövers muß während der Zeitspanne  $\Delta t_{AnIM}$  und  $\Delta t_{AbIM}$  (siehe Abschnitt 3.1 Punkte d und g) die Abdrift des Schiffes durch die Strömungsgeschwindigkeit kompensiert werden. Deshalb wird die Emission bei der für  $v_R = v_G$  erforderlichen Motorleistung während der Zeitspanne  $\Delta t_{AnIM} + \Delta t_{AbIM}$  zusätzlich zur Situation bei einem Gewässer mit vernachlässigbarer Fließgeschwindigkeit freigesetzt. Im Rechenprogramm wird diese Emission gleichmäßig über die Liegestelle verteilt freigesetzt.

## 5 TAGESGANGLINIE ZUR BERECHNUNG DES 98-PERZENTILWERTES DER ZUSATZBELASTUNG

Die gesetzlichen Bestimmungen der BRD, z.B. die 22. BImSchV, enthalten als Beurteilungswerte für Luftschadstoffkonzentrationen neben dem Jahresmittelwert den sogenannten 98-Perzentilwert. Das ist derjenige Konzentrationswert, der in 98 % der Zeit des Jahres gerade erreicht oder unterschritten wird.

Zur Berechnung des schiffahrtsbedingten 98-Perzentilwertes der Luftschadstoffzusatzbelastung muß die zeitliche Verteilung des Schiffsaufkommens bekannt sein, denn es ist ein Unterschied, ob sich die Emissionen der Schiffe z.B. gleichmäßig über alle Stunden einer Woche verteilen oder ob sie konzentriert während kürzer Zeiträume, z.B. nur während der Betriebszeit einer Schleuse, freigesetzt werden. Das PC-Programm LuWas kann diese unterschiedlichen Verhältnisse im Verlauf einer Woche berücksichtigen. Zur Emissionsbestimmung erwartet es die Bereitstellung (in der Datei TGL.DAT), wie sich das Schiffsaufkommen auf die 24 h eines Werktags, Samstags oder Sonntags aufteilen. **Tab. 5.1** gibt dafür ein Beispiel.

Im Beispiel der **Tab. 5.1** liegt eine Situation vor, in der werktags 1.28 mal so viele Schiffe fahren wie im Wochenmittel, samstags fahren 50 % und Sonntags 10 % der Schiffe des Wochenmittels. Weiterhin ist dort der Verkehr auf die Zeit zwischen 9 Uhr und 19 Uhr (9. bis 18. Stunde) konzentriert, in jeder dieser Stunden wird 10 % des täglichen Verkehrsaufkommens abgewickelt.

Schiffe fahren einzeln, auf allen Flüssen und Kanälen außer dem Rhein weniger als 80 Stück pro Tag. Mit dem o.a. Konzept ist es auch bei geringem Verkehrsaufkommen möglich, korrekte 98-Perzentilwerte zu berechnen. Würde z.B. an jedem Werktag nur 1 Schiff fahren (also 5/7 Schiffe pro Tag im Wochenmittel), wäre der Kopf der Datei in **Tab. 5.1** wie folgt zu modifizieren:

1.40 = alle Schiffe werktags/DTV (werktags fährt  $7/5 = 1.40$  des Wochenmittels)

0 = alle Schiffe samstags/DTV

0 = alle Schiffe sonntags/DTV

und für die einzelnen Stunden wäre werktags für irgendeine Stunde 100.00 anzusetzen und für alle restlichen Stunden sowie alle Stunden samstags und sonntags 0.00.

Fahren 2 Schiffe pro Tag, muß der Anwender entscheiden, ob diese Schiffe jeweils zur selben Stunde fahren oder zu unterschiedlichen Stunden und dementsprechend die Datei TGL.DAT ändern.

<b>Verteilung des Verkehrs auf Wochentage</b> 1.28 = alle Schiffe werktags/DTV 0.50 = alle Schiffe samstags/DTV 0.10 = alle Schiffe sonntags/DTV			
<b>Tagesganglinien</b>			
<b>Angaben Anteil Schiffe an Tagesmenge in %</b>			
<b>Stunde</b>	<b>Werktag</b>	<b>Samstag</b>	<b>Sonntag</b>
1	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00
9	10.00	10.00	10.00
10	10.00	10.00	10.00
11	10.00	10.00	10.00
12	10.00	10.00	10.00
13	10.00	10.00	10.00
14	10.00	10.00	10.00
15	10.00	10.00	10.00
16	10.00	10.00	10.00
17	10.00	10.00	10.00
18	10.00	10.00	10.00
19	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.00

Tab. 5.1: Inhalt der bereitzustellenden Datei TGL.DAT mit der Aufteilung des Verkehrs auf die Wochentage und die einzelnen Stunden dieser Tage.

## 6 AUSPUFFANLAGEN

Auspuffanlagen emittieren nach Angaben des Auftraggebers bei einem Teil der Flotte in 1.5 m Höhe über der Wasserlinie horizontal nach hinten, bei einem anderen Teil in 4 m Höhe vertikal nach oben und beim Rest in 6 m Höhe schräg nach hinten oben.

Bei der Ausbreitungsrechnung für Autoabgase berücksichtigt man die durch die Auspuffanlage und die fahrzeugerzeugte Turbulenz bewirkte Anfangsverdünnung der Abgasfahne durch eine Anfangsaufweitung der Abgasfahne und zwar direkt an der Quelle vertikal um den Betrag  $\sigma_{z0}$ . Standardmäßig beträgt diese Aufweitung bei Autoabgasen  $\sigma_{z0} = 1.5$  m. Vor allem bei den nach oben emittierenden Schiffen wird dieser Betrag größer sein, genauere Informationen darüber liegen jedoch nicht vor. Im Rahmen des vorliegend beschriebenen Screeningsmodells wird mit folgenden Schätzwerten gearbeitet:

$$\sigma_{z0} = X_H \cdot 1.5 \text{ m} + X_v \cdot 4 \text{ m} + X_s \cdot 6 \text{ m} \quad (6.1)$$

mit

$X_H$  = Anteil der Flotte der in 1.5 m Höhe über der Wasserlinie horizontal nach hinten emittiert

$X_v$  = Anteil der Flotte der in 4 m Höhe vertikal nach oben emittiert und

$X_s$  = Anteil der Flotte der in 6 m Höhe schräg nach hinten oben emittiert

Beispiel: Wenn jede der 3 o.a. Typen von Auspuffanlagen zu 33 % vorhanden ist, errechnet sich das  $\sigma_{z0}$  zu

$$\sigma_{z0} = 0.33 \cdot 1.5 \text{ m} + 0.33 \cdot 4 \text{ m} + 0.33 \cdot 6 \text{ m} = 3.8 \text{ m}$$

Um die Luftschadstoffkonzentrationen im Bereich von Schleusen eher konservativ zu errechnen, sollte dort von den o.a. Quellhöhen 4 m und 6 m der Schleusenhub bis auf minimal 1.5 m abgezogen werden. Der niedrigste Wert für  $\sigma_{z0}$  liegt also bei  $\sigma_{z0} = 1.5$  m, unabhängig von der Art der Auspuffanlagen ist dieser Wert also bei einem Schleusenhub  $\geq 4.5$  m einzusetzen.

## 7 KANÄLE IM AUFTRAG (DAMMSTRECKEN) ODER IM EINSCHNITT

Für die Ausbreitungsrechnung wird unterschieden zwischen Kanälen

- im Auftrag (Dammstrecken)
- ohne Freibord und
- im Einschnitt.

Die **Abb. 7.1** definiert die dafür maßgebenden Parameter. Die strömungsmechanisch wirksame Dammhöhe ist die Höhe der Dammkrone über dem umgebenden Gelände, nicht über der Wasseroberfläche. Die Tiefe des Einschnittes bezeichnet die Lage der Wasseroberfläche unter dem Niveau der Dammkrone.

Über den Einfluß von Einschnitten oder Dämmen auf die Ausbreitung von Abgasen gibt es nur wenige Einzelinformationen, wie z.B. diejenigen in MLuS-92 (1992, dort Kapitel 5). Angelehnt daran werden in LuWas Einschnitte der Tiefe  $T$  und Dämme der Höhe  $H$  durch eine Modifikation der Anfangsausweitung  $\sigma_{zo}$  der Abgasfahne überschlägig wie folgt berücksichtigt.

Die Tieflage vermindert bei den in 4 m und 6 m Höhe über dem Wasserspiegel emittierenden Schiffen (siehe Kapitel 6) die effektive Quellhöhe der Abgasfahne und zwar betragsmäßig um die Tiefe  $T$  des Einschnitts, jedoch nicht unter eine Minimalhöhe von 1.5 m. Die Gl. 6.1 aus Kapitel 6 lautet also bei Vorliegen einer Tieflage

$$\sigma_{zo} = X_H \cdot 1.5 \text{ m} + X_v \cdot (4 \text{ m} - T [\text{m}]) + X_s \cdot (6 \text{ m} - T [\text{m}]) \quad (7.1)$$

wobei für die beiden Klammerterme minimal der Wert 1.5 m anzusetzen ist.

Beispiel: Wenn jede der 3 Typen von Auspuffanlagen aus Kapitel 6 zu 33 % vorhanden ist und eine Einschnittlage der Tiefe  $T = 3 \text{ m}$  vorliegt, dann errechnet sich das  $\sigma_{zo}$  zu

$$\sigma_{zo} = 0.33 \cdot 1.5 \text{ m} + 0.33 \cdot 1.5 \text{ m} + 0.33 \cdot 3 \text{ m} = 2 \text{ m}$$

mit

$X_H$  = Anteil der Flotte der in 1.5 m Höhe über der Wasserlinie horizontal nach hinten emittiert

$X_v$  = Anteil der Flotte der in 4 m Höhe vertikal nach oben emittiert und

$X_s$  = Anteil der Flotte der in 6 m Höhe schräg nach hinten oben emittiert

$T$  = Tiefenmaß, siehe **Abb. 7.1**

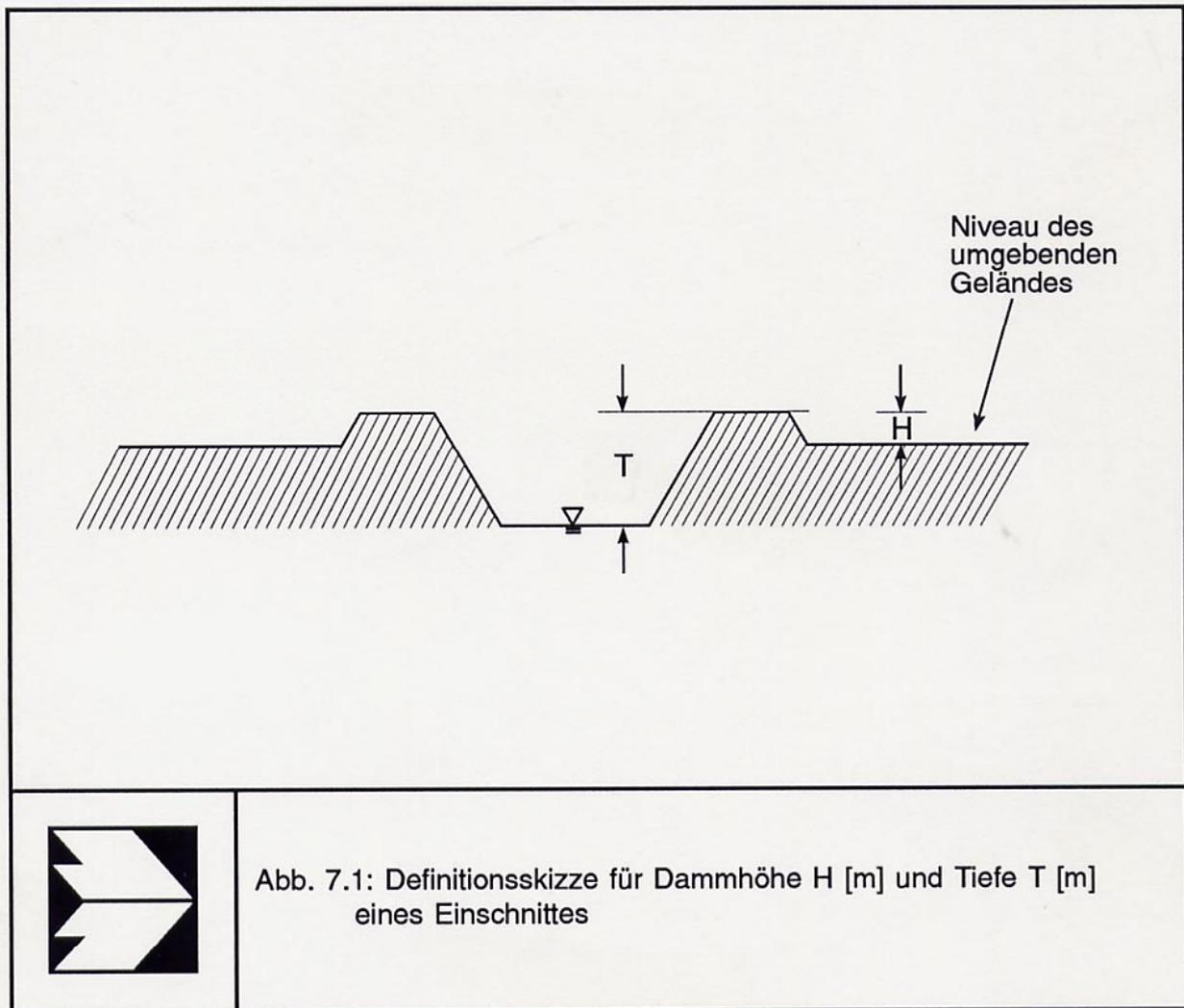


Abb. 7.1: Definitionsskizze für Dammhöhe H [m] und Tiefe T [m] eines Einschnittes

Ein Damm verbessert die Vermischung der Abgase, jedoch nur dann, wenn er nahe der Quelle ist, d.h. nur wenn er in einem Bereich liegt, in dem die Abgasfahne relevante Konzentrationsgradienten hat. Ist die Abgasfahne erst einmal über eine Höhe von mehreren Dammhöhen (also in großer Entfernung) gleichmäßig vermischt, dann bringt eine weitere Vermischung durch den Damm nichts mehr. Deshalb wird angesetzt:

- In Quellnähe bewirkt der Damm zusätzlich zu der Aufweitung nach Gl. 7.1 eine Zusatzaufweitung der Abgasfahne von  $\Delta\sigma_{z0} = 0.5 \cdot H$  (H = Dammhöhe, siehe **Abb. 7.1**).
- Ist der Abstand der Quelle vom Damm größer als 10 Dammhöhen, hat der Damm keinen Einfluß mehr.
- Zwischen den beiden o.a. Abständen nimmt der Einfluß des Damms auf  $\Delta\sigma_{z0}$  linear mit der Entfernung ab.
- Für den Abstand der Quelle zum Damm wird beim vorliegend beschriebenen Screeningmodell LuWas immer  $0.5 \cdot B$  mit B = Wasserspiegelbreite angesetzt.

Unter den o.a. Voraussetzungen errechnet sich die Zusatzaufweitung infolge Damm  $\Delta\sigma_{z0}$  zu

$$\Delta\sigma_{z0} [\text{m}] = - 0.025 \cdot B [\text{m}] + 0.5 \cdot H [\text{m}] \quad (7.2)$$

mit

B = Wasserspiegelbreite und

H = Dammhöhe nach **Abb. 7.1**

wobei für  $\Delta\sigma_{z0}$  minimal der Wert 0 anzusetzen ist.

Beispiel: Ein Kanal mit der Wasserspiegelbreite B = 50 m sei von Dämmen der Höhe H = 5 m begrenzt. Dann errechnet sich die Zusatzaufweitung zu

$$\Delta\sigma_{z0} = - 0.025 \cdot 50 \text{ m} + 0.5 \cdot 5 \text{ m} = 1.25 \text{ m}.$$

Sei der im Anschluß an Gl. 7.1 gerechnete Einschnitt der Tiefe T = 3 m also von Dämmen der Höhe H = 5 m umgeben, wäre also  $\Delta\sigma_{z0}$  für Ausbreitungsrechnung der Wert  $\sigma_{z0} = 2 \text{ m} + 1.25 \text{ m} = 3.25 \text{ m}$  anzusetzen.

Hinweis: Die o.a. Quantifizierungen der Einflüsse von Einschnitten und Dämmen stellen erste Abschätzungen dar. Sie sind derzeit nicht validiert. Sie berücksichtigen auf konservativer Basis wesentliche strömungsmechanische Gegebenheiten. Bei Bedarf genauerer Rechenergebnisse sind vom Anwender Berechnungen mit mikroskaligen Strömungs- und Ausbreitungsmodellen zu veranlassen.

## **8 BERÜCKSICHTIGUNG DER ZEITLICHEN KORRELATION ZWISCHEN METEOROLOGIE UND EMISSION**

Tagsüber sind die Ausbreitungsverhältnisse (= Verdünnungsfähigkeit) für die Emissionen in der Atmosphäre meist besser als nachts. Da die Emissionen bevorzugt tagsüber freigesetzt werden, ist die zeitliche Korrelation zwischen Meteorologie und Emission zu berücksichtigen, d.h. es ist mit Zeitreihen der Emission und der meteorologischen Parameter zu rechnen. Sensitivitätsuntersuchungen am Beispiel von Autoabgasen zeigen, daß die Berücksichtigung dieser Korrelation die errechneten Immissionen um 0 % bis 10 % senkt, den Aufwand an Eingangsdaten und Rechenzeit jedoch deutlich erhöht. Wie auch bei der Ausbreitungsrechnung für Autoabgase üblich wird deshalb auch im vorliegenden Fall ohne diese Korrelation gearbeitet, d.h. es wird mit Emissionsstatistiken und Ausbreitungsklassenstatistiken gerechnet und nicht mit Zeitreihen der meteorologischen Parameter. Die errechneten Immissionswerte werden aus diesem Grunde im vorliegenden Fall um 0 % bis 10 % überschätzt.

## 9 BERÜCKSICHTIGUNG DER RAUHIGKEIT UND DER ATMOSPHERISCHEN STABILITÄTSVERHÄLTNISSE ÜBER WASSER

### 9.1 Physikalische Grundlagen

Bei der Ausbreitung der Schiffsemissionen war entsprechend den Vorgaben des Auftraggebers zu berücksichtigen, daß die Ausbreitungsverhältnisse für die Emissionen über Wasser anders sind als über Land und zwar wegen

- der geringeren aerodynamischen Rauzigkeit der Wasseroberfläche und damit ggfs. schlechteren Verdünnung der Emissionen als über Land und
- der ggfs. über Wasser und über Land unterschiedlichen Stabilitätsverhältnisse.

Zur Integration dieser Bedingungen in die Ausbreitungsrechnung wurde wie folgt vorgegangen:

#### **a Geländerauhigkeit**

Über Wasser wird immer mit den Ausbreitungsparametern der Richtlinie VDI 3782, Blatt1 für glattes Gelände gerechnet, über Land je nach vorliegender Rauzigkeit mit den Parametern aus der o.a. RL für glattes oder rauhes Gelände. Die Rauzigkeit des die Wasseroberfläche umgebenden Geländes wird deshalb vom Programm beim Anwender abgefragt.

#### **b Stabilität der Atmosphäre**

Für die Ausbreitungsrechnung über Wasser wird mit einer anderen Ausbreitungsklassenstatistik gerechnet als über Land. Das Programm errechnet sich diese Ausbreitungsklassenstatistik auf Basis der vom Anwender zur Verfügung zu stellenden Ausbreitungsklassenstatistik über Land. Die Grundlage dafür bilden folgende Überlegungen.

**Tab. 9.1** zeigt Anhaltswerte für den Vergleich der Stabilitätsverhältnisse über Wasser und über Land. Im Frühjahr und Herbst sind die Stabilitätsverhältnisse im Tagesmittel über Wasser und Land in etwa gleich. Im Winter ist die Stabilität über Wasser eher geringer als über Land, im Sommer ist dies umgekehrt. Um konservativ zu bleiben, wurden deshalb die Stabilitätsverhältnisse im Winter über dem Wasser wie über Land angesetzt. Verbleibt also noch der Sommer. Für diesen, also  $\frac{1}{4}$  der Zeit des Jahres, wurde ange-

setzt, daß bei Windgeschwindigkeiten  $u_{10} \leq 3$  m/s die Atmosphäre über dem Wasser um eine Stabilitätsklasse stabiler geschichtet ist als über Land.

	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
	<b>Stabilität am Tage</b>			
über Wasser	neutral/stabil	stabil	neutral/stabil	neutral/labil
über Land	neutral/labil	labil	neutral/labil	neutral/stabil
	<b>Stabilität in der Nacht</b>			
über Wasser	neutral/labil	neutral/stabil	neutral/labil	neutral/labil
über Land	neutral/stabil	stabil	neutral/stabil	neutral/stabil

Tab. 9.1: Anhaltswerte für den Vergleich der Stabilitätsverhältnisse über Wasser und über Land

Zur Überprüfung der Auswirkungen dieser Vorgehensweise wurden anhand eines praktischen Beispiels Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Dazu wurden die errechneten Immissionen für folgende Fälle verglichen:

- Ausbreitung über Wasser (aerodynamische Rauigkeit gering, Ausbreitungsklassenstatistik entsprechend der o.a. Vorgaben modifiziert)
- Ausbreitung über glattem Gebäude (aerodynamische Rauigkeit gering, Ausbreitungsklassenstatistik unmodifiziert)
- Ausbreitung über rauhem Gelände (aerodynamische Rauigkeit hoch, Ausbreitungsklassenstatistik unmodifiziert)

Es zeigte sich, daß die Modifikation der Ausbreitungsbedingungen über Wasser die errechnete Gesamtbelastung von NO<sub>2</sub> (Jahresmittelwert und 98-Perzentil), Ruß und Benzol (jeweils Jahresmittelwert) an keinem der Untersuchungspunkte um mehr als 5 % erhöhte.

## 9.2 Programmtechnische Umsetzung

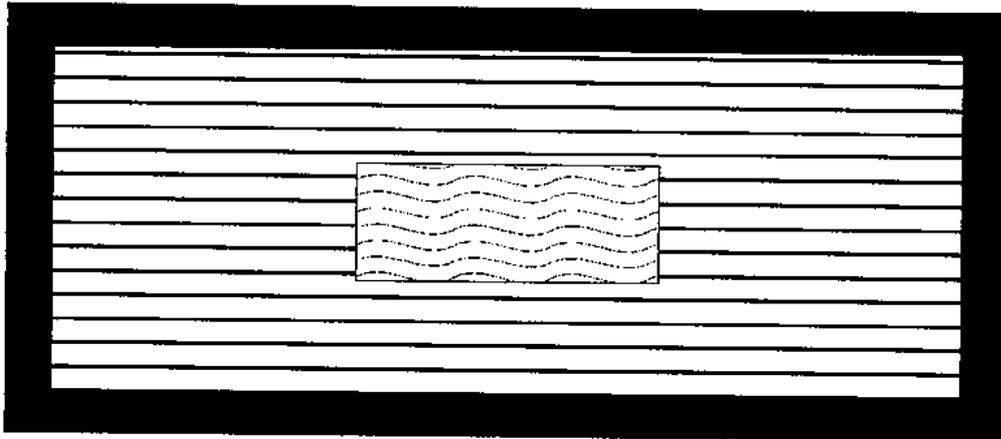
Die Koordinaten aller Untersuchungspunkte im Untersuchungsgebiet werden vorgegeben. Aus der Information über die Lage der Linienquellensegmente und die Wasserspiegelbreite

kann errechnet werden, welcher der Punkte auf der Wasseroberfläche liegt. Dort werden die Konzentrationswerte mit den Ausbreitungsbedingungen über der Wasseroberfläche errechnet.

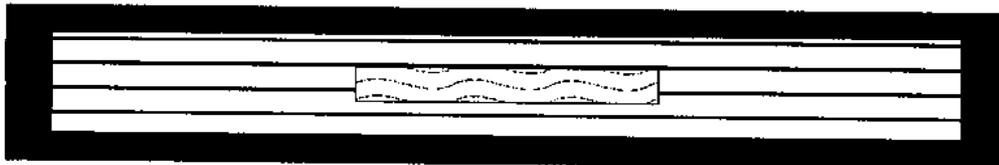
Für alle Untersuchungspunkte in Abständen größer 1 Wasserspiegelbreite vom Ufer werden die Konzentrationswerte mit den Ausbreitungsbedingungen über Land errechnet. Es wird also davon ausgegangen, daß in dieser Entfernung der Einfluß der Wasseroberfläche auf die Ausbreitung weitgehend abgeklungen ist. Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, daß die dadurch verursachte Rechenunsicherheit im allgemeinen kleiner 5 % der Gesamtbelastung ist (siehe oben).

Für alle Untersuchungspunkte in Abständen zwischen 0 und einer Wasserspiegelbreite vom Ufer wird sich eine Mischung aus Konzentrationswert „als fände die Ausbreitung immer über Wasser statt“ und Konzentrationswert „als fände die Ausbreitung immer über Land statt“ einstellen. Da die Ausbreitung über Wasser schlechter ist als über Luft wird im Sinne konservativer Vorgehensweise in diesem Zwischenbereich immer so gerechnet, als fände die Ausbreitung über Wasser statt. Der dadurch vorhandene Konzentrationssprung im Abstand einer Wasserspiegelbreite vom Ufer ist bei den dort im Verhältnis zu den Konzentrationen am Ufer vorliegenden geringen Konzentrationswerten und seiner Größe von im allgemeinen weniger als 5 % der Gesamtbelastung vertretbar.

Die o.a. Definition „Abstand größer 1 Wasserspiegelbreite vom Ufer“ macht Sinn bei langen Linienquellen. Bei Flächenquellen oder bei kurzen Linienquellen ist dieser Abstand programmtechnisch so wie in **Abb. 9.1** aufgezeigt berücksichtigt. Die Abmessungen der Wasseroberfläche werden in die jeweilige Richtung nach außen verlängert. **Abb. 9.2** zeigt an einem Beispiel, wie die Aufteilung in einem Untersuchungsgebiet aussieht.



a) Flächenquelle: Die Abmessungen der Wasserfläche werden in die jeweilige Richtung nach außen verlängert.



b) Linienquellensegment: Auch hier werden die jeweiligen Abmessungen der Wasserfläche in alle Richtungen verlängert.

 Untersuchungspunkte auf Landfläche: Berechnung als fände Ausbreitung immer über Land statt.

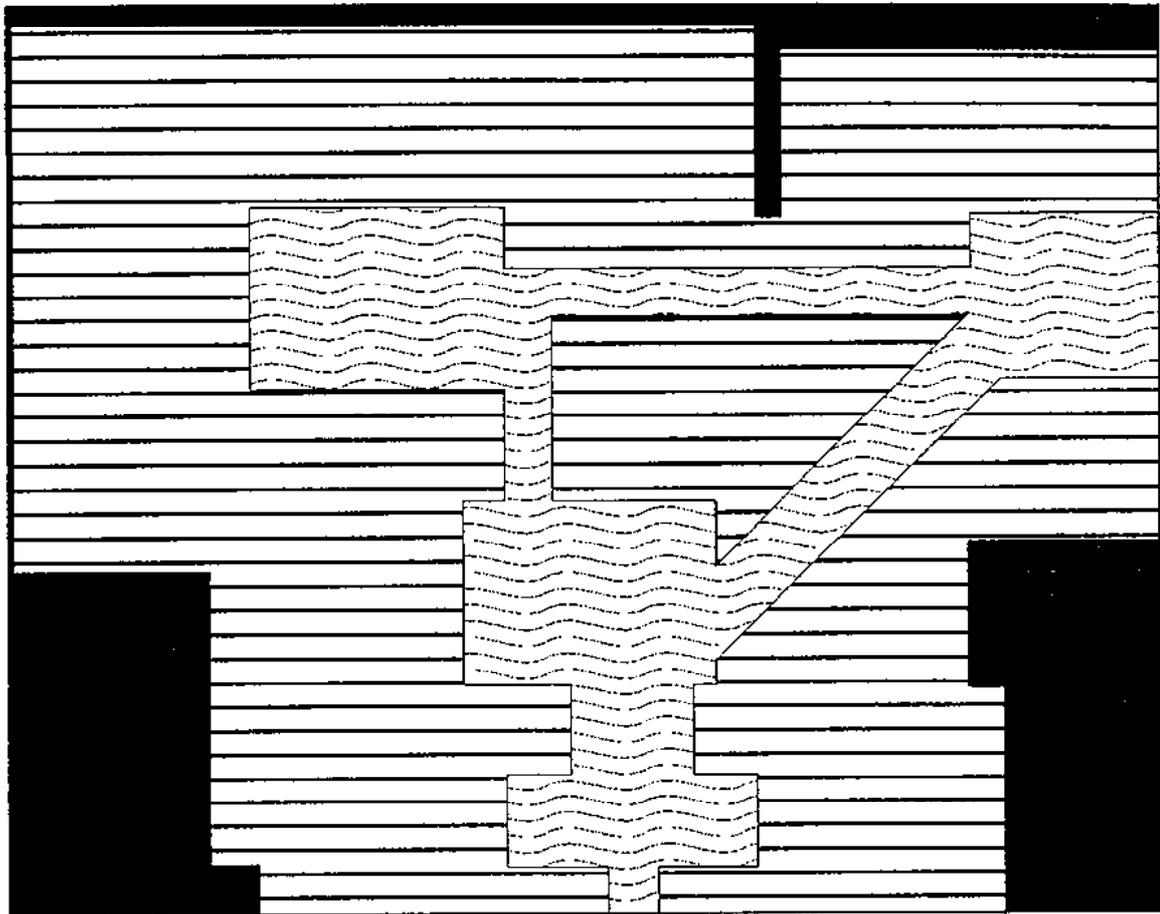
 Untersuchungspunkte auf Landfläche: Berechnung als fände Ausbreitung immer über Wasser statt.

 Untersuchungspunkte auf Wasseroberfläche: Berechnung als fände Ausbreitung immer über Wasser statt.

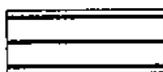
c) Definition der Flächen.



Abb 9.1: Aufteilung der Untersuchungspunkte um ein Wasserflächensegment



Untersuchungspunkte auf Landfläche: Berechnung als fände Ausbreitung immer über Land statt.



Untersuchungspunkte auf Landfläche: Berechnung als fände Ausbreitung immer über Wasser statt.



Untersuchungspunkte auf Wasseroberfläche: Berechnung als fände Ausbreitung immer über Wasser statt.



Abb 9.2: Aufteilung der Untersuchungspunkte im Untersuchungsgebiet in Relation zum Abstand zum Ufer am Beispiel eines Kanalnetzes

## 10 METEOROLOGISCHE VORGABEWERTE

Für den Fall, daß für das Untersuchungsgebiet keine Ausbreitungsklassenstatistik bekannt ist, bietet das Programm die Möglichkeit der Auswahl des Ansatzes von 5 Hauptwindrichtungsverteilungen. Diese sind im Detail in **Abb. 10.1** bis **Abb. 10.5** dokumentiert.

Für die Häufigkeiten der einzelnen Ausbreitungsklassen nach TA Luft (1986) werden bei der Verwendung der o.a. Hauptwindrichtungsverteilungen folgende Werte verwendet.

Klasse		Häufigkeit in % der Jahresstunden
I	(sehr stabil)	5.8
II	(stabil)	13.6
III/1	(neutral)	54.2
III/2	(neutral)	16.1
IV	(labil)	6.4
V	(sehr labil)	4.0

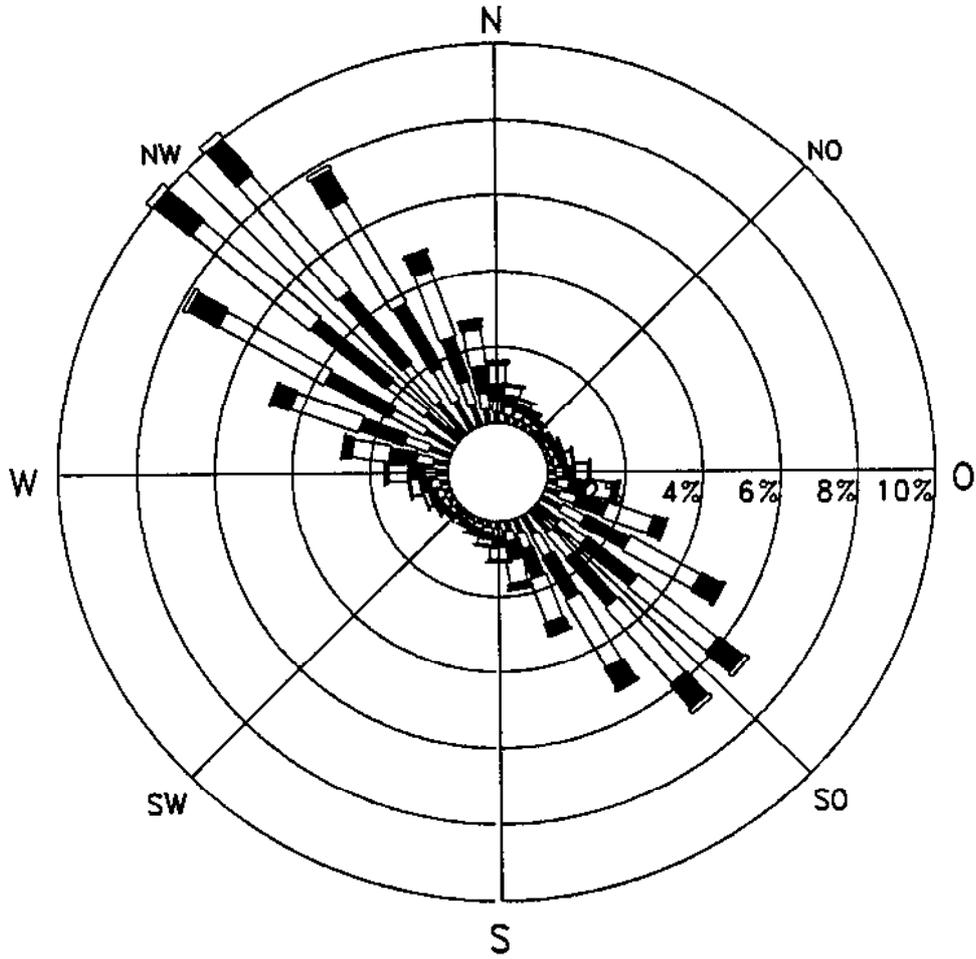
Tab. 10.1: Häufigkeiten der Ausbreitungsklassen bei der Verwendung der Default-Hauptwindrichtungsverteilungen.

Bei der Verwendung der o.a. meteorologischen Vorgabewerte wird auch der Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe abgefragt. Wie auch im derzeitigen Entwurf (Stand Januar 1998) für die Fortschreibung des MLuS-92 (1992) wird die Abhängigkeit der Luftschadstoffkonzentration  $c$  vom Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit in der Form

$$c \text{ proportional } u^{-1}$$

berücksichtigt.

# Hauptwindrichtung Nordwest



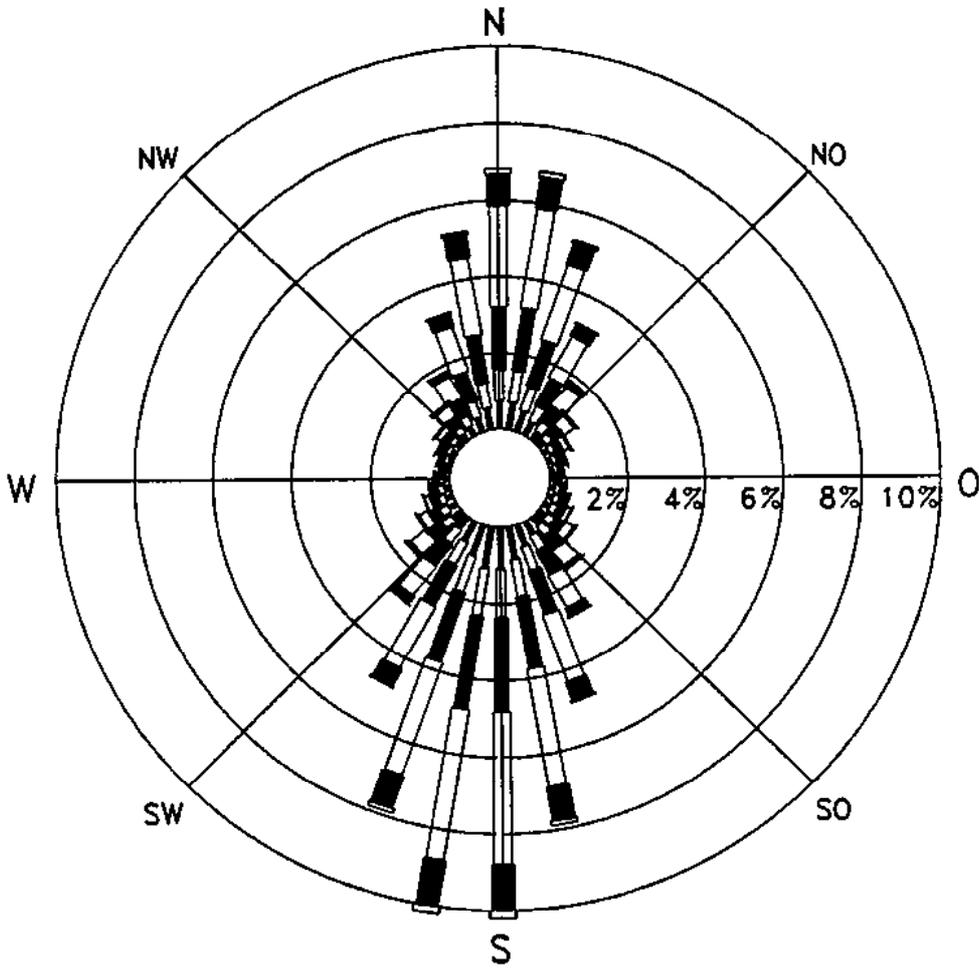
Station : Synthetisch  
Höhe : 10 m  
Zeitraum : 10 Jahre

- kleiner 1.4 m/s
- ▨ 1.4 bis 2.3 m/s
- 2.4 bis 3.8 m/s
- 3.9 bis 6.9 m/s
- 7.0 bis 10 m/s
- größer 10 m/s



Abb. 10.1: Windrichtungsverteilung bei Hauptwindrichtungsverteilung Nordwest / Südost

# Hauptwindrichtung Süd



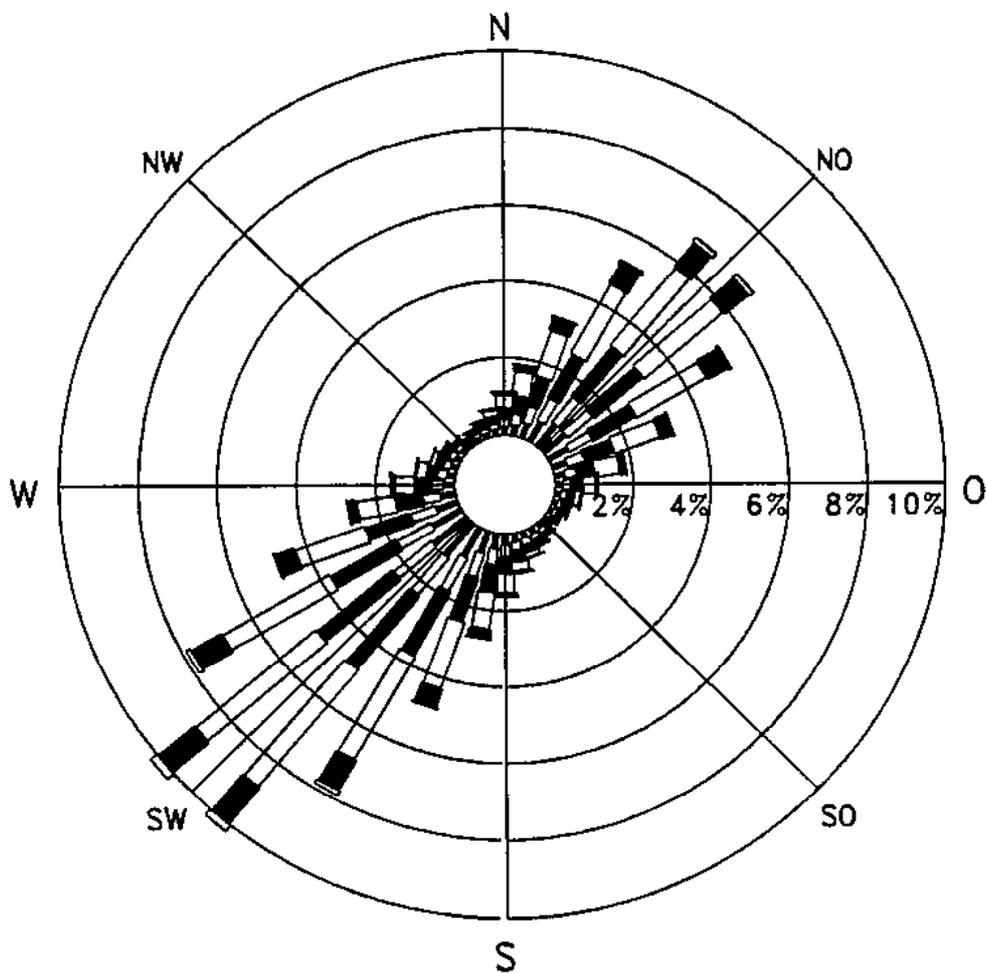
Station : Synthetisch  
Höhe : 10 m  
Zeitraum : 10 Jahre

- kleiner 1.4 m/s
- ▬ 1.4 bis 2.3 m/s
- 2.4 bis 3.8 m/s
- ▬ 3.9 bis 6.9 m/s
- 7.0 bis 10 m/s
- ▬ größer 10 m/s



Abb. 10.2: Windrichtungsverteilung bei Hauptwindrichtungsverteilung Nord / Süd

# Hauptwindrichtung Südwest



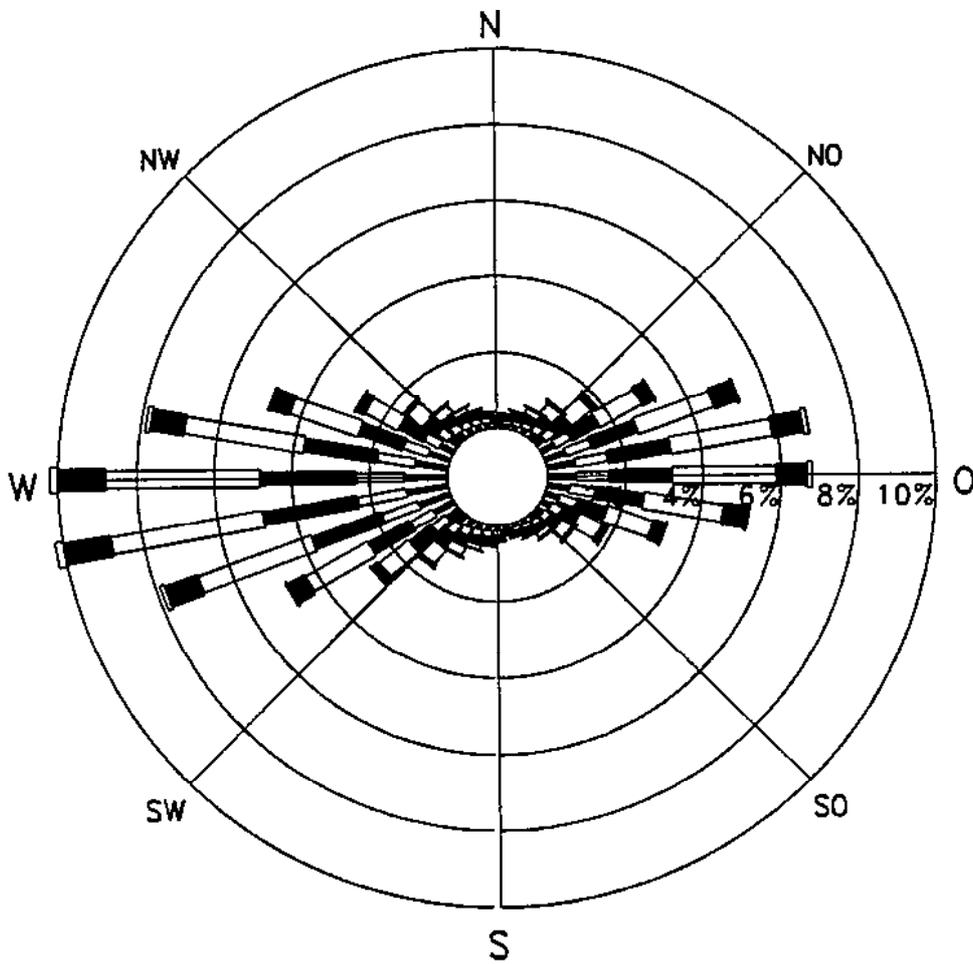
Station : Synthetisch  
Höhe : 10 m  
Zeitraum : 10 Jahre

- kleiner 1.4 m/s
- ▬ 1.4 bis 2.3 m/s
- 2.4 bis 3.8 m/s
- ▬ 3.9 bis 6.9 m/s
- 7.0 bis 10 m/s
- ▬ größer 10 m/s



Abb. 10.3: Windrichtungsverteilung bei Hauptwindrichtungsverteilung Südwest / Nordost

# Hauptwindrichtung West



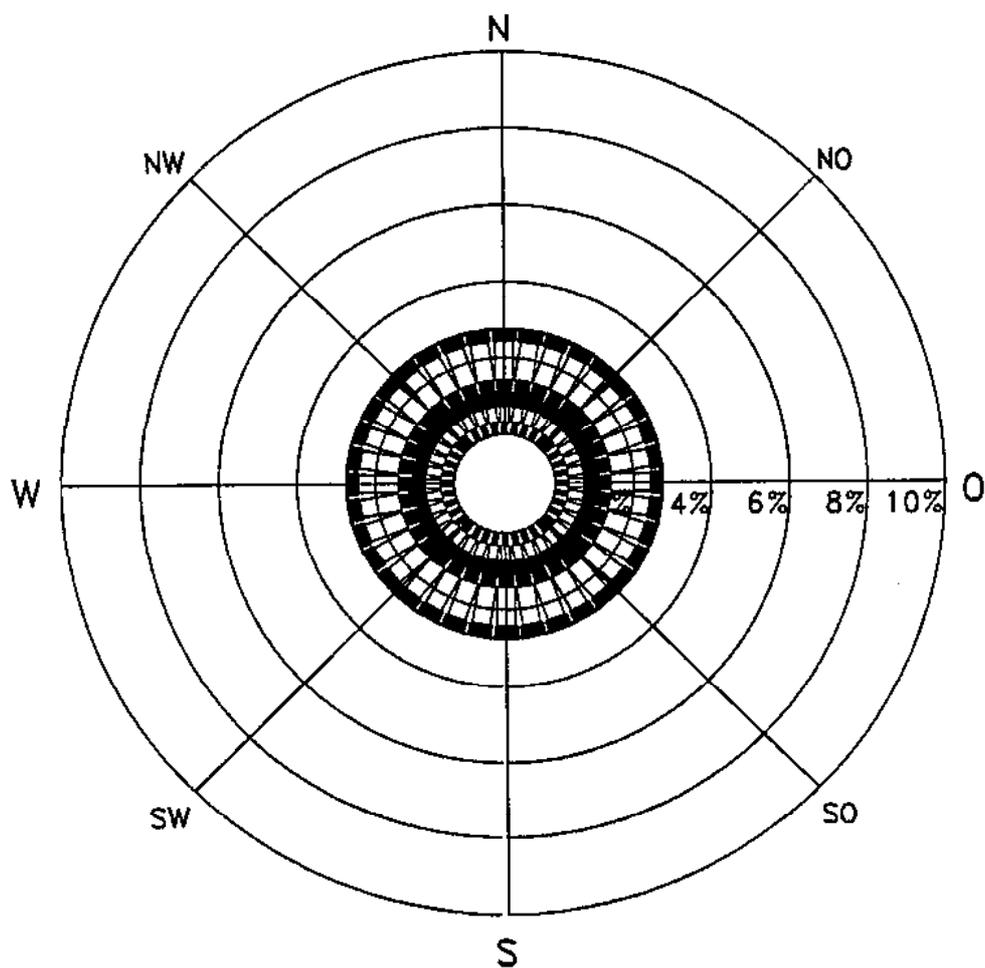
Station : Synthetisch  
Höhe : 10 m  
Zeitraum : 10 Jahre

- kleiner 1.4 m/s
- ▬ 1.4 bis 2.3 m/s
- ▬ 2.4 bis 3.8 m/s
- ▬ 3.9 bis 6.9 m/s
- ▬ 7.0 bis 10 m/s
- ▬ größer 10 m/s



Abb. 10.4: Windrichtungsverteilung bei Hauptwindrichtungsverteilung West / Ost

# Gleichverteilung



Station : Synthetisch  
Höhe : 10 m  
Zeitraum : 10 Jahre

- kleiner 1.4 m/s
- ▬ 1.4 bis 2.3 m/s
- 2.4 bis 3.8 m/s
- ▬ 3.9 bis 6.9 m/s
- 7.0 bis 10 m/s
- ▬ größer 10 m/s



Abb. 10.5: Windrose bei gleichverteilten Windrichtungen

## 11 AUSBREITUNGSRECHNUNG FÜR DIE EMISSIONEN DER SCHIFFE

Die Berechnung der Immissionen an den Untersuchungspunkten erfolgt mit dem mathematischen Modell PROKAS, welches für die Ausbreitungsrechnung von Autoabgasen vielfach erprobt ist und für den vorliegenden Einsatzfall leicht modifiziert wurde. Es berücksichtigt den Einfluß des umgebenden Wasserstraßennetzes bis in eine Entfernung von mehreren Kilometern vom Untersuchungspunkt. Es besteht aus dem Basismodul PROKAS\_V (Gauß-fahnenmodell), für die Berechnung der Immissionen an Wasserstraßen mit dichter Randbebauung wird das integrierte Bebauungsmodul PROKAS\_B eingesetzt.

### 11.1 Berechnung der Immissionen mit PROKAS\_V

PROKAS\_V ist ein Ausbreitungsmodell für die Ermittlung detaillierter Konzentrationsverteilungen als Folge der Emissionen von sogenannten Punkt-, Linien- und/oder Flächenquellen.

Der Gaußansatz in PROKAS\_V entspricht dem "Ausbreitungsmodell für Luftreinhaltepläne", Richtlinie VDI 3782, Blatt 1. Die Luftschadstoffe in der Abgasfahne werden mit einer repräsentativen Geschwindigkeit  $u_T$  transportiert, die sich durch die gewichtete Mittelung des vertikalen Windprofils über die Konzentrationsverteilung in der Abgasfahne ergibt. Da sich das vertikale Konzentrationsprofil mit der Entfernung zur Quelle ändert, wird auch  $u_T$  eine Funktion des Quellabstandes. Dadurch ist gewährleistet, daß die Kontinuitätsgleichung für die Schadstoffmasse in jeder betrachteten Entfernung von der Wasserstraße eingehalten wird.

Für die Rechnung wird das gesamte Wasserstraßennetz in kurze Linienquellen zerlegt und die Emission jeder der Linienquellen auf mehrere Punktquellen verteilt. Der Abstand zwischen den zu einer Linienquelle gehörenden Punktquellen beträgt maximal  $1/5$  der Entfernung der Punktquelle zum Untersuchungspunkt. Insgesamt wird somit ein Wasserstraßennetz je nach seiner Dichte durch einige 10 000 Punktquellen angenähert. Sensitivitätsuntersuchungen haben gezeigt, daß das Rechenergebnis bei einer weiteren Verkürzung der Abstände zwischen den Punktquellen unbeeinflusst bleibt. Mit diesem Aufteilen in Einzelquellen ist zum Beispiel auch der Fall berücksichtigbar, wenn sich die Emissionen im Verlauf einer Wasserstraße ändern, zum Beispiel bei Geschwindigkeitsbeschränkung auf einem Teil einer Wasserstraße. Dann emittieren die Punktquellen, die dieses Wasserstraßenstück repräsentieren, mit einer anderen Quellstärke als die Quellen auf dem Wasserstraßenstück ohne Geschwindigkeitsbegrenzung.

Mit Hilfe der o. a. Vorgehensweise ist gewährleistet, daß jeder der Wasserstraßenzüge gleichzeitig emittieren kann, d. h. daß jeweils das gesamte Wasserstraßennetz emittiert. Damit können auch die Verhältnisse im Nahbereich von Kreuzungen realistisch nachgebildet werden, wo es Aufpunkte gibt, die bei einigen Windrichtungen gleichzeitig von Schadstoffen von mehreren Wasserstraßen beaufschlagt werden. Bei der Bestimmung der 98-Perzentilwerte (Konzentrationen, die in 98 % der Zeit nicht überschritten werden) ist es in solchen Fällen nicht korrekt, den Einfluß jedes Wasserstraßenzuges einzeln zu berechnen und dann später zusammenzufassen.

Für eine korrekte Bestimmung des 98-Perzentilwertes ist es wichtig, die mit der Tageszeit veränderliche Verkehrsstärke zu berücksichtigen. Dabei kommt es auch auf die korrekte Erfassung der Verkehrs- und damit Emissionsspitzen an. Das Modell berücksichtigt deshalb die Eingabe von 5 verschiedenen Emissionsniveaus und deren Auftretenshäufigkeit.

Bezüglich der Meteorologie wird mit 36 verschiedenen Windrichtungsklassen, 9 verschiedenen Windgeschwindigkeitsklassen und 6 verschiedenen Ausbreitungsklassen gerechnet. Die Ausbreitungsklassen berücksichtigen, daß die Verdünnung der Abgase für eine gegebene Windrichtung und Windgeschwindigkeit auch noch von der Stabilität der Atmosphäre abhängt. So ist zum Beispiel die Verdünnung bei "Inversionswetterlagen" schlechter als bei sonnigen "Normalwetterlagen". Insgesamt werden also  $36 \times 9 \times 6 = 1\,944$  Wetterlagen mit den jeweiligen Häufigkeiten berücksichtigt.

Als Rechenergebnis erhält man dadurch für jeden betrachteten Punkt aus 1 944 Wetterlagen  $\times 5$  Emissionsniveaus = 9 720 unterschiedliche Konzentrationswerte mit der zugehörigen Häufigkeit, also Angaben darüber, wie häufig die jeweiligen 9 720 Konzentrationswerte pro Jahr auftreten. Aus diesen Ergebnissen wird dann eine Häufigkeitsverteilung hergestellt und es wird derjenige Wert bestimmt, der in 98 % der Zeit unterschritten wird. Dies ist der gesuchte 98-Perzentilwert der Zusatzbelastung.

Die Ermittlung der Immissionskenngößen für die Gesamtbelastung aus den Kenngößen für die Vorbelastung (Grundbelastung) und die Zusatzbelastung (infolge Verkehrsemissionen auf der betrachteten Straße) erfolgt nach dem in der TA Luft (1986) in Anhang D angegebenen Verfahren.

Die Stickoxid-Konversion wird nach dem Verfahren von Romberg et al. (1996) durchgeführt.

## 11.2 Berechnung der Immissionen an Wasserstraßen mit dichter Randbebauung mit PROKAS\_B

Im Falle von teilweise oder ganz geschlossener Randbebauung (vergleichbar mit einer Straßenschlucht) ist die Immissionsberechnung nicht mit PROKAS\_V durchführbar. Hier wird das ergänzende Bebauungsmodul PROKAS\_B verwendet. Es basiert auf Modellrechnungen mit dem mikroskaligen Ausbreitungsmodell MISKAM für idealisierte Bebauungstypen. Dabei wurden für 20 Bebauungstypen und jeweils 36 Anströmrichtungen die dimensionslosen Abgaskonzentrationen  $c^*$  in 1.5 m Höhe und 1 m Abstand zum nächsten Gebäude bestimmt.

Die Bebauungstypen werden unterschieden in Wasserstraßen mit ein- oder beidseitiger Randbebauung mit verschiedenen Gebäudehöhe-zu-Schluchtbreite-Verhältnissen und unterschiedlichen Lückenanteilen in der Randbebauung. Unter Lückigkeit ist der Anteil nicht verbauter Flächen am Rand mit (einseitiger oder beidseitiger) Randbebauung zu verstehen. Die Schluchtbreite ist jeweils definiert als der zweifache Abstand zwischen Wasserstraßenmitte und straßennächster Randbebauung. Die **Tab. 1** beschreibt die Einteilung der einzelnen Bebauungstypen.

Aus den dimensionslosen Konzentrationen errechnen sich die vorhandenen Abgaskonzentrationen  $c$  zu

$$c = \frac{c^* \cdot Q}{B \cdot u'}$$

wobei:	$c$	=	Abgaskonzentration [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
	$c^*$	=	dimensionslose Abgaskonzentration [-]
	$Q$	=	emittierter Schadstoffmassenstrom [ $\mu\text{g}/\text{m s}$ ]
	$B$	=	Schluchtbreite [m] beziehungsweise doppelter Abstand von der Wasserstraßenmitte zur Randbebauung
	$u'$	=	Windgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der schiffserzeugten Turbulenz [m/s]

Die Konzentrationsbeiträge von PROKAS\_V für die Vorbelastung und von PROKAS\_B werden für jede Einzelsituation, also zeitlich korreliert, zusammengefaßt.

Typ	Randbebauung	Gebäudehöhe/ Schluchtbreite	Lückenanteil [%]
0*	locker	-	61 - 100
101	einseitig	1:3	0 - 20
102	"	1:3	21 - 60
103	"	1:2	0 - 20
104	"	1:2	21 - 60
105	"	1:1.5	0 - 20
106	"	1:1.5	21 - 60
107	"	1:1	0 - 20
108	"	1:1	21 - 60
109	"	1.5:1	0 - 20
110	"	1.5:1	21 - 60
201	beidseitig	1:3	0 - 20
202	"	1:3	21 - 60
203	"	1:2	0 - 20
204	"	1:2	21 - 60
205	"	1:1.5	0 - 20
206	"	1:1.5	21 - 60
207	"	1:1	0 - 20
208	"	1:1	21 - 60
209	"	1.5:1	0 - 20
210	"	1.5:1	21 - 60

Tab. 1: Typisierung der Randbebauung der Wasserstraße

### 11.3 Änderungen an PROKAS für Autoabgase für dessen Einsatz an Wasserstraßen

Der bei der Ausbreitungsrechnung von Autoabgasen eingesetzte Rechenkern von PROKAS wurde für die vorliegende Problemstellung übernommen. Die Peripherie wurde um folgende Punkte erweitert bzw. ergänzt:

---

\* Typ 0 wird angesetzt, wenn mindestens eines der beiden Kriterien (Schluchtbreite  $\geq 5$  x Gebäudehöhe bzw. Lückenanteil  $\geq 61$  %) erfüllt ist.

- 
- Emissionsbestimmung (siehe Kapitel 2 bis 4)
  - Auspuffanlagen (siehe Kapitel 6)
  - Einfluß von Dammstrecken oder im Einschnitt (Kapitel 7)
  - Berücksichtigung der Rauigkeit und der atmosphärischen Stabilitätsverhältnisse über Wasser (siehe Kapitel 9)
  - Einführung meteorologischer Defaultwerte (siehe Kapitel 10)
  - Erzeugung von Programmmodulen zur Auflösung von Flächenquellen in Linienquellen, zur grafischen Darstellung der Ergebnisse etc.

## **12 IMMISSIONSBEITRÄGE DURCH DIE UMLIEGENDEN STRASSEN**

Die Immissionsbeiträge der umliegenden Straßen werden ebenfalls mit dem in Kapitel 11 beschriebenen PROKAS\_V und PROKAS\_B berechnet. Zur Emissionsbestimmung wurde das im Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen (MLuS-92, Ausgabe 2000) beschriebene Verfahren programmtechnisch umgesetzt, um einige für die Anwendung in Städten relevante Straßenkategorien erweitert und in LuWas integriert. Die Fortschreibung des Handbuchs für Emissionsfaktoren (Version 1.2 aus UBA, 1999) ist darin enthalten. Es wurde darauf geachtet, daß die Ausbreitung der Emissionen der Wasserstraße jeweils mit denselben meteorologischen Eingangsdaten gerechnet wird wie die Emissionen der Kfz-Straße und daß die Rechenergebnisse jeweils an denselben Untersuchungspunkten errechnet werden und automatisch überlagert werden können.

Das Verfahren ist anwendbar auf beliebige Anzahlen von Straßen und auch auf kreuzende Straßen in beliebigen Abständen von der Wasserstraße.

### 13 VERGLEICH VON BERECHNUNGEN MIT MESSUNGEN

Bisher lagen im Einflußbereich von Wasserstraßen keine Meßergebnisse vor, welche mit Rechenergebnissen verglichen werden können. Vorhandene Meßwerte wurden entweder so weit von der Wasserstraße entfernt erhoben, daß der Einfluß der Wasserstraße von den Konzentrationsbeiträgen umliegender Straßen oder der Industrie überdeckt wurde, oder es fehlten zur Durchführung von Berechnungen Angaben über das Aufkommen an Schiffsverkehr.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden deshalb am Wesel-Datteln-Kanal und am Teltowkanal jeweils an einem Streckenabschnitt und an einer Schleuse für NO<sub>2</sub> erste Validierungsmessungen durchgeführt. Dazu wurden im Jahr 1998 von Januar bis Juni die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen und das Schiffsverkehrsaufkommen vermessen. Über die Ergebnisse und den Vergleich mit den Berechnungen wurde mit Datum Oktober 2000 ein separater Bericht erstellt: "Immissionen an Wasserstraßen - Vergleich der Berechnungsergebnisse von Lu-Was mit NO<sub>2</sub>-Meßwerten".

Wegen der im Vergleich zu Kfz-Emissionen schlechteren Datenlage bei Schiffsemissionen wird die Schiffsemissionsbestimmung und damit die Bestimmung der Zusatzbelastung durch Schiffe unsicherer sein als bei Kfz. Andererseits ist zu beachten, daß die Beurteilung der Relevanz der Immissionen bezüglich Schutz der menschlichen Gesundheit auf der Gesamtbelastung, also der Summe aus Zusatzbelastung und Vorbelastung zu beruhen hat. Da im quellnahen Bereich die Zusatzbelastung durch Schiffsemissionen i.d.R. geringer ist als die Zusatzbelastung durch Kfz-Abgase, wirken sich Unsicherheiten in der Emissionsbestimmung der Schiffe auf die Gesamtbelastung weniger aus als bei Kfz.

Die vorliegenden Ergebnisse der o.a. ersten Validierungsmessungen deuten folgende Einschätzung an:

An den Meßstellen am Wesel-Datteln-Kanal (Schiffsaufkommen ca. 20 000 Schiffe/Jahr) wurde in Abständen von 0 m bis ca. 50 m für NO<sub>2</sub> bei einer Vorbelastung von ca. 24 µg/m<sup>3</sup> an dem Meßpunkt mit der höchsten Konzentration ca. 32 µg/m<sup>3</sup> gemessen und ca. 36 µg/m<sup>3</sup> errechnet. Der Rechenwert liegt hier also am Punkt mit den höchsten Konzentrationen um ca. 15 % über dem Meßwert, an den anderen Meßpunkten ist die Abweichung geringer.

An den Meßstellen am Teltowkanal ist die Abweichung zwischen Messung und Rechnung geringer weil dort die Zusatzbelastung infolge Schiffsverkehr geringer ist.

Insgesamt läßt sich damit feststellen, daß die Rechenergebnisse von LuWas gut mit den Meßergebnissen auf den 4 Untersuchungsflächen übereinstimmen.

Auf dem Feld der Autoabgaskonzentrationen arbeitet man mit größeren Abweichungen, weil dort die Zusatzbelastung gewöhnlich höher liegt. Siehe die Angaben im Anhang 1.

Im Rechenprogramm sind zwar einige Konservativitäten enthalten [Berücksichtigung der Auspuffanlagen (Kapitel 6), Benutzung einer meteorologischen Statistik für das ganze Jahr anstelle einer Zeitreihe (Kapitel 8)], die Hauptunsicherheiten liegen jedoch weniger darin als in der Emissionsbestimmung. Deshalb ist eine generelle Aussage darüber, ob das Rechenprogramm die Immissionen grundsätzlich über- oder unterschätzt nicht möglich.

## 14 LITERATUR

- Agena, H., Hadler, C., Mou, I. (1986): Verfahren zur Erstellung eines Emissionskatasters für den Schiffsverkehr im Hafen Hamburg. Staub - Reinhaltung der Luft, Band 46, 7/8, 343-348.
- Bialonski, W., Vanck, P., Schulze, K., Wakob, H. (1990): Spezifischer Energieeinsatz in Verkehr, Ermittlung und Vergleich der spezifischen Energieverbräuche. Verkehrswissenschaftliches Institut der Technischen Hochschule Aachen, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr.
22. BImSchV (1993): Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Immissionswerte). Bundesgesetzblatt, Teil II, Nr. 58, S. 1819-1820.
- EEA (1996): Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook, First Edition, Copenhagen: European Environment Agency, 1996.
- Esser, J. (1995): Persönliche Mitteilung.
- FIGE (1995): Emissionsfaktoren für verschiedene Fahrzeugschichten, Straßenkategorien und Verkehrszustände und Bezugsjahre (II). Forschungsvorhaben Umweltbundesamt, Berlin 105 06 044 "Erarbeitung von Grundlagen für die Umsetzung von § 40.2 BImSchG". 3. Zwischenbericht. Von Steven, H. (FIGE GmbH, Herzogenrath).
- INFRAS (1999): INFRAS im Auftrag des UBA, Berlin - Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 1.2.
- LRP HH (1986): Luftreinhalteplan Hamburg. Hrsg.: Umweltbehörde Hamburg.
- MLuS-82 (1982): Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen. Teil: Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung. Köln: Forschungsanstalt für Straßen- und Verkehrswesen.
- MLuS-92 (2000): Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen. Teil: Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung. Stand 2000. Mit Allgemeinem Rundschreiben Straßenbau Nr. 24/2000 - Sachgebiet 12.2: Umweltschutz/Luftreinhaltung des BMVBW am 31.10.2000 eingeführt. Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln.

- Prognos (1993): Entwicklung der Emissionen von Luftschadstoffen und CO<sub>2</sub> durch den Verkehr in Ost- und Westdeutschland bis 2010, Untersuchung im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Bonn, FE-Nr. 90344/91, Schlußbericht.
- Richtlinie VDI 3782, Blatt 1 (1992): Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre. Gaußsches Ausbreitungsmodell für Luftreinhaltepläne.
- Romberg, E., Bösing, R., Lohmeyer, A., Ruhnke, R., Röth, E. (1996): NO-NO<sub>2</sub>-Umwandlungsmodell für die Anwendung bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase. Hrsg.: Gefahrstoffe-Reinhalte der Luft, Band 56, Heft 6, S. 215-218.
- TA Luft (1986): 1. Allg. Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft). GMBI., 37. J., Nr. 7, 28.02.1986, S. 95 - 143.
- UBA (1992) (Höpfner, U., Knörr, W. et al.): Motorisierter Verkehr in Deutschland - Energieverbrauch und Luftschadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in der DDR, Berlin (Ost) und der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1988-2005. Berlin: Umweltbundesamt. (UBA Berichte 5/92).
- UBA (1994): Verminderung der Luft- und Lärmbelastungen im Güterfernverkehr 2010. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Zusammenarbeit vom Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung Berlin (DIW) mit dem Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) und mit der Gesellschaft für Informatik, Verkehrs- und Umweltplanung mbH/Hannoversche Consulting für Verkehrswesen, Transporttechnik und Elektronische Datenverarbeitung (IVU/HACON), Umweltbundesamt, Berlin.
- UBA (1999): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 1.2. Umweltbundesamt, Berlin, Update 1999.
- UMEG (1995a): Daten der Station Karlsruhe-Straße. UMEG Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen mbH, persönliche Mitteilung. Karlsruhe, 20. April 1995.
- UMEG (1995b): Ergebnisse von Rußmessungen in Baden-Württemberg 1993-1995. Bericht Nr. 31-5/95.

**A N H A N G A1: Vergleich von Berechnungen mit Messungen  
bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase**

## A1 Vergleich von Berechnungen mit Messungen bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase

Für einen Vergleich der Rechenwerte mit Meßwerten, die mit dem Programmsystem PROKAS im Einflußbereich von Kfz-Straßen berechnet wurden, wurden folgende Datensätze benutzt:

- Messungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) an der A 4 bei Bergisch Gladbach (Esser, 1995)
- Messungen der UMEG, Karlsruhe, im Rahmen der Dauermeßstellen des Landes Baden-Württemberg in Karlsruhe und Stuttgart (UMEG, 1995a und 1995b)
- Stichprobenmessungen des Landesamtes für Umwelt und Geologie Sachsen, der UMEG und des Amtes für Umweltschutz der Stadt Dresden in Dresden (1994/95).

Die Meßstellen lagen sowohl in locker bebautem als auch in dicht bebautem Gelände. Im locker bebauten Gelände wurde die Gesamtbelastung mit PROKAS\_V berechnet, im dicht bebauten Gelände die Vorbelastung durch das umgebende Straßennetz mit PROKAS\_V, die Zusatzbelastung mit PROKAS\_B.

Grafisch aufbereitet wurde der Vergleich in den **Abb. A1** und **Abb. A2**, es zeigt sich insgesamt eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Der Vergleich der Datensätze deutet auf die in **Tab. A1** angegebenen Abweichungen hin.

Statistische Kenngröße	Relative Abweichung
NO <sub>2</sub> -Jahresmittel	- 20 % bis + 20 %
NO <sub>2</sub> -98-Perzentilwert	- 20 % bis + 50 %
Benzol-Jahresmittel	- 20 % bis + 20 %
Ruß-Jahresmittel	- 40 % bis + 10 %

Tab. A1: Relative Abweichung der Rechenergebnisse mit PROKAS\_V (in Straßenschluchten Vorbelastung mit PROKAS\_V und Zusatzbelastung mit PROKAS\_B) im Vergleich zu den Meßwerten an den Untersuchungspunkten in Karlsruhe, Stuttgart und Dresden und an der A 4. Siehe auch **Abb. A1** und **Abb. A2**.

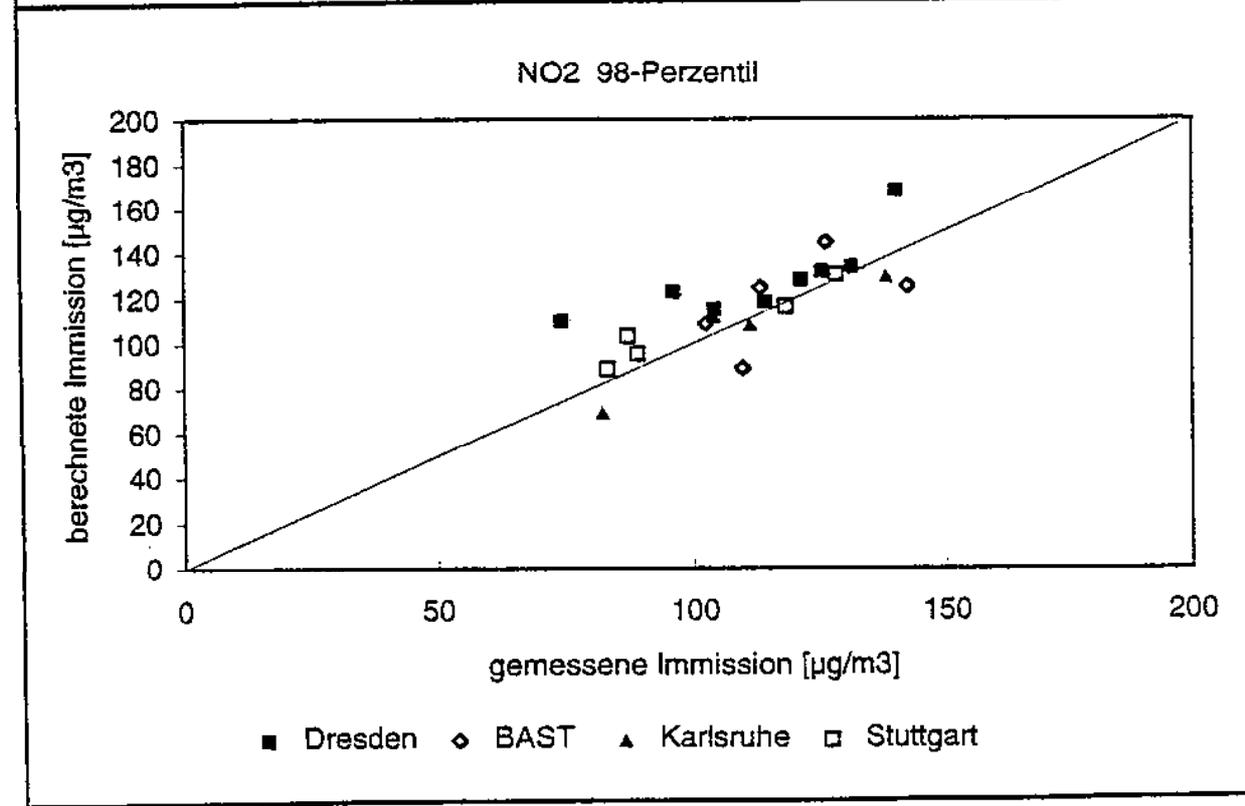
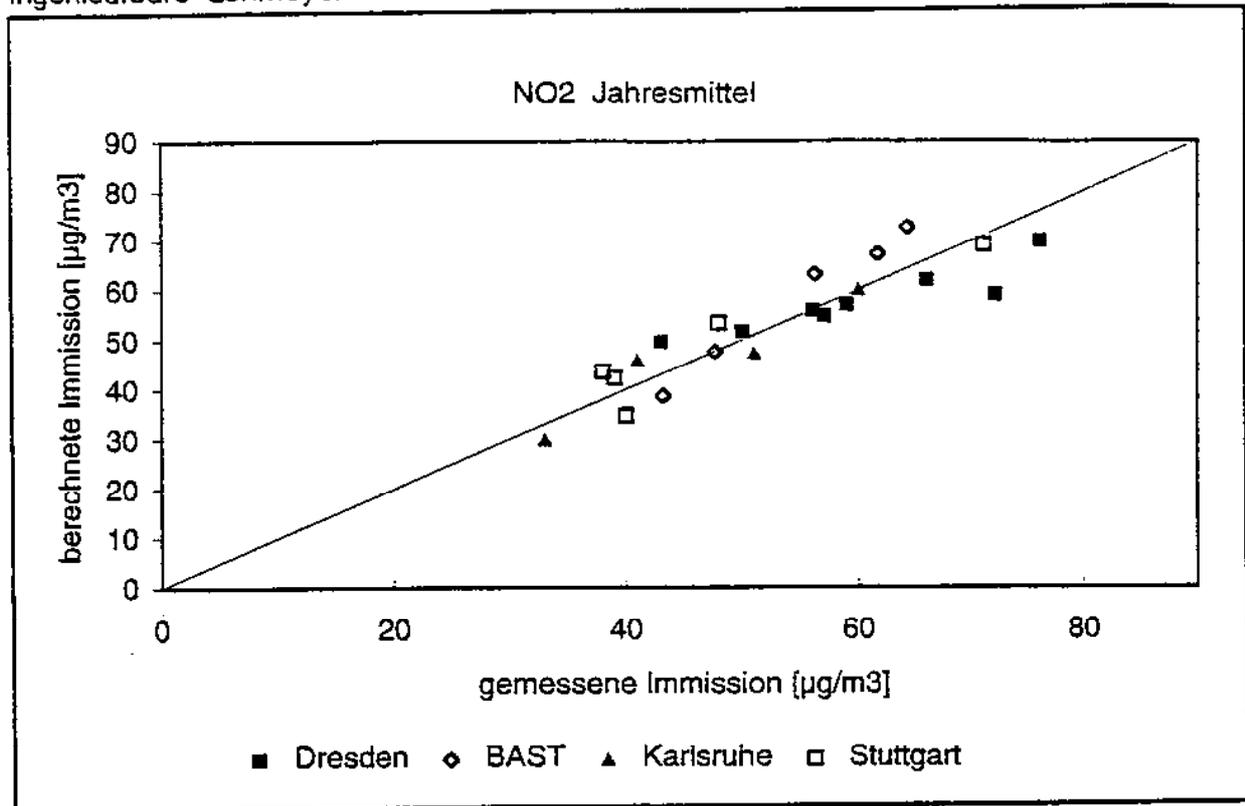


Abb. A1: Vergleich der mit PROKAS (und bei Bebauung anhand typisierter Bebauungsstrukturen mit MISKAM) berechneten NO<sub>2</sub>-Immissionen mit den Messungen in Karlsruhe, Stuttgart, Dresden und an der A 4

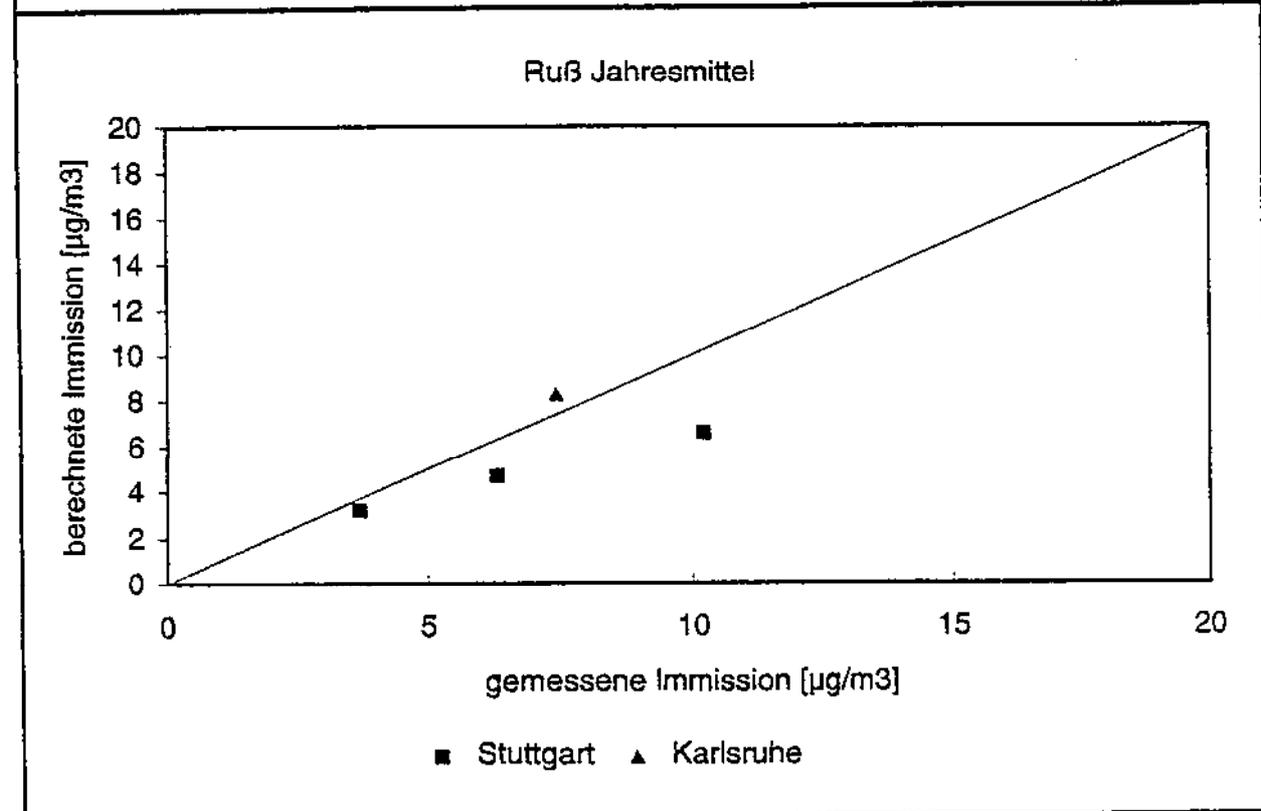
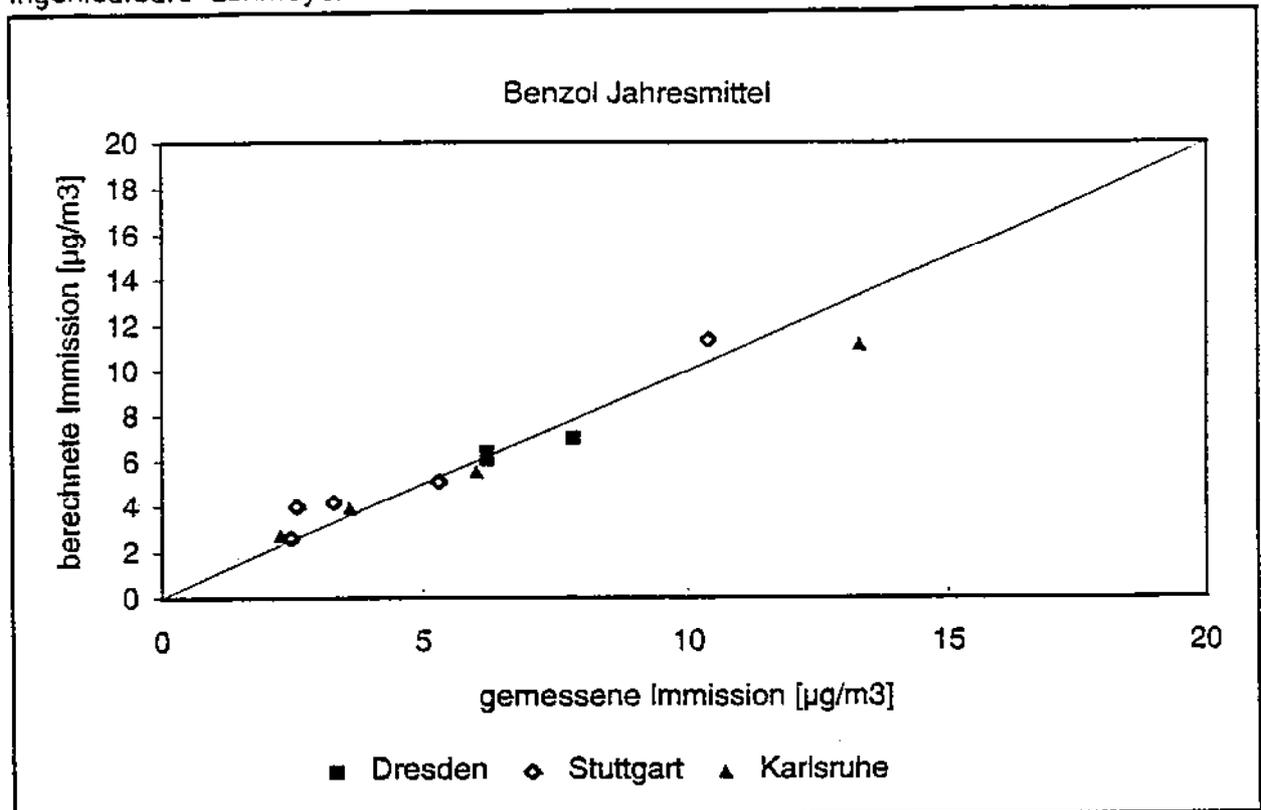


Abb. A2: Vergleich der mit PROKAS (und bei Bebauung anhand typisierter Bebauungsstrukturen mit MISKAM) berechneten Benzol- und Ruß-Immissionen mit den Messungen in Karlsruhe, Stuttgart und Dresden

Die Abweichungen zwischen Meß- und Rechenwerten resultieren nicht nur aus der Modellierung der Schadstoffausbreitung, sondern auch aus Unsicherheiten in den verwendeten Eingangsdaten, die in den nicht idealen, sondern realen natürlichen Gegebenheiten begründet sind. Das heißt, daß Parameter wie genaue Verkehrszahlen, Wochengänge der Fahrzeuge, Meteorologie usw. meist nicht exakt bekannt sind. Weiterhin ist genau zu hinterfragen, in welchem Zeitraum und mit welcher Häufigkeit die Einzelmessungen zu den statistischen Kenngrößen zusammengefaßt wurden.

So sind z. B. die angegebenen NO<sub>2</sub>-98-Perzentilwerte der Messungen in Dresden häufig höher als die errechneten Werte (**Abb. A1**). Ein Grund dafür ist sicher der Stichprobencharakter der Messungen, wodurch dieser Datensatz mehr Unsicherheiten enthält als die anderen Datensätze.

Größere relative Abweichungen sind auch beim Ruß festzustellen. Das kommt zum einen daher, daß nur für 4 Fälle ein Vergleich Messung/Rechnung durchgeführt wurde. Zum anderen gibt es sowohl bei der Ruß-Emissionsbestimmung als auch bei der Ruß-Immissionsmessung Unsicherheiten. Da sich Benzol und Ruß als inerte, nicht sedimentierende Luftschadstoffe gleich ausbreiten (Rußpartikeldurchmesser < 10 µm), hat die Ausbreitungsrechnung für Benzol und Ruß die gleiche Güte. Unterschiede in den Rechenergebnissen sind also nicht in der Ausbreitungsrechnung begründet, sondern folgen aus Unsicherheiten in der Emissionsbestimmung, der Immissionsmeßtechnik und des Ansatzes der Vorbelastung infolge nicht explizit berücksichtigter Quellen.