



Hafenmonitoring

Teil E: Bestimmung von NO_x -Emissionsraten fahrender
Schiffe aus landseitigen Onshore-Messungen und
Anwendung zur Emissionsberechnung

[LANUV-Fachbericht 126](#)

Hafenmonitoring

Teil E: Bestimmung von NO_x-Emissionsraten fahrender Schiffe aus landseitigen Onshore-Messungen und Anwendung zur Emissionsberechnung

[LANUV-Fachbericht 126](#)

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Recklinghausen 2022

IMPRESSUM

Herausgeber Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen (LANUV)
Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
Telefax 02361 305-3215
E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de

Bearbeiter Anton Bergen (LANUV), Dr. Dieter Busch, Kai Krause (IUP, Universität Bremen),
Folkard Wittrock (IUP; Universität Bremen)

Dieser Bericht ist ein Teilbericht des CLINSH-Projektes LIFE15 ENV/NL/000217 „CLean INland SHipping (CLINSH)“. CLINSH ist ein LIFE+-Projekt der EG, das mit dem Beitrag des LIFE-Finanzierungsinstruments der Europäischen Gemeinschaft durchgeführt wird. Dieses Ergebnis ist Teil der Aktion B1, Technologien zur Emissionsminderung. Das Ziel von LIFE „CLINSH“ ist die Verbesserung der Luftqualität in städtischen Gebieten in der Nähe von Häfen und Binnenwasserstraßen durch beschleunigte Reduzierung der Emissionen der Binnenschifffahrt.

Projekt-Website www.clinsh.eu



Titelbild ©Dr. Dieter Busch (LANUV)

ISSN 1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachberichte

Informationsdienste Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter
• www.lanuv.nrw.de
Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im
• WDR-Videotext

Bereitschaftsdienst Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV
(24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Vorwort

Maßnahmen zur Minderung der Emissionen von Binnenschiffen können zur Verbesserung der Luftqualität am Rhein beitragen. Voraussetzung dafür ist aber zunächst eine möglichst gute Kenntnis über Mengen der Schiffsabgase und deren Anteil an der Luftbelastung in den Wohngebieten an den Wasserstraßen.

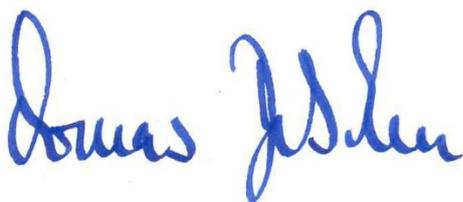
Viele der Eingangsdaten für das NRW-Emissionskataster „Binnenschiffe“ mussten bisher aus verschiedenen Statistiken abgeleitet werden. Mit dem EU-Life-Projekt „CLean INland SHipping (CLINSH)“ bot sich die Möglichkeit, die Mengen der Schiffsabgase und deren Wirkung auf die Luftqualität im Raum Düsseldorf-Duisburg intensiv zu untersuchen.

Im Rahmen des CLINSH-Projektes konnten das LANUV und die Universität Bremen eine neue, realitätsnähere Methode zur Erfassung der NO_x-Emissionen der fahrenden Schiffe entwickeln. Mit den umfangreichen Messdaten von zwei automatischen Messstationen am Rhein (Duisburg und Neuss) wurde es möglich, bei geeigneten Windrichtungen die Schadstoffwolken der vorbeifahrenden Schiffe durch Messungen vom Ufer (onshore) als deutlich sichtbare und quantifizierbare Peaks zu erfassen.

Mit aufwändigen Rechenmethoden ist es der Universität Bremen im Rahmen einer Dissertation gelungen, aus diesen onshore-Messungen belastbare Emissionsfaktoren zu ermitteln. Mittlerweile stehen etwa 27.000 solcher Faktoren zur Verfügung, die nach Schiffsgröße, Berg- oder Talfahrt sowie nach Geschwindigkeit (über Grund) klassifiziert wurden.

Mit diesen Faktoren und der Erfassung des realen Verkehrsgeschehens über die AIS-Signale der Schiffe ist es möglich geworden, die Emissionsmengen des Schiffsverkehrs deutlich besser abzuschätzen. Das neue Verfahren bildet eine wichtige Grundlage für die Fortschreibung des bestehenden Emissionskatasters Binnenschiffe in NRW.

Ich bedanke mich bei allen Beteiligten, die zu dieser Methodenentwicklung mit ihrem Fachwissen und ihrem engagierten Einsatz beigetragen haben.



Dr. Thomas Delschen

Präsident des Landesamtes für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	7
1 Einleitung.....	9
2 Messstellen	11
3 Methodik.....	14
4 Ergebnisse	21
5 Anwendung der Emissionsfaktoren: Berechnungen der Emissionen für das Emissionskataster in Nordrhein-Westfalen	26
6 Fazit	35
7 Ausblick.....	36
8 Literaturverzeichnis.....	37
9 CLINSH-Partner	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	AIS-Signale von vorbeifahrenden Schiffen werden für die Zuordnung von NO _x -Spitzenwerten zu bestimmten Schiffen verwendet.....	10
Abbildung 2:	Automatisierte Messstation in Duisburg vom Rhein aus gesehen	11
Abbildung 3:	Satellitenbild der Messstelle in Duisburg (DURH)	12
Abbildung 4:	Automatisierte Messstation in Neuss	13
Abbildung 5:	Satellitenbild der Messstelle in Neuss (NERH).....	13
Abbildung 6:	Modellierte Abgasfahne für ein Frachtschiff der Klasse Va, das stromaufwärts fährt und die Messstelle in Duisburg am 29. August um 10:46 Uhr passiert.....	16
Abbildung 7:	Beispiel einer Fahnensimulation im Vergleich zur jeweiligen Messung.....	18
Abbildung 8:	Übersicht über das in diesem Bericht verwendete Schiffsklassifikationssystem	21
Abbildung 9:	Schiffsverkehr auf dem nordrhein-westfälischen Rheinabschnitt (Rhein-km 640-865) im Jahr 2019.....	22
Abbildung 10:	Emissionsraten für Schiffsklasse IV in Funktion Schiffsgeschwindigkeit über Grund und Fahrtrichtung.....	23
Abbildung 11:	MS FREYA, ein Beispiel für einen 85 m Tanker der Klasse IV	23
Abbildung 12:	Emissionsraten für die Schiffsklasse Va (110 x 11,4 x 3,5 m, Ladekapazität 2.800 Tonnen) in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund und der Fahrtrichtung, abgeleitet aus Messdaten von DURH.....	24
Abbildung 13:	MS CURA DEI, ein Beispiel für ein 110 m langes Frachtschiff	24
Abbildung 14:	Emissionsraten für die Schiffsklasse Vb in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund und der Fahrtrichtung.....	25
Abbildung 15:	MS Oriana, ein Beispiel für ein 135 m langes Frachtschiff.....	25
Abbildung 16:	Definierte Emissionslinienquellen von fahrenden Schiffen im Duisburger Hafen.....	30
Abbildung 17:	Definierte Emissionslinienquellen von fahrenden Schiffen im Hafen von Neuss.....	31
Abbildung 18:	Zuordnung der Schiffe zu den Linienquellen der Schifffahrtswege im Duisburger Hafen.....	32
Abbildung 19:	Zuordnung der Schiffe zu den Linienquellen der Schifffahrtswege im Neusser Hafen.....	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Klassifizierungsschema der atmosphärischen Stabilität auf der Grundlage der Windgeschwindigkeit und der globalen Einstrahlung (Tag) oder der Wolkenbedeckung (Nacht)	16
Tabelle 2:	Atmosphärische Ausbreitungsparameter σ_y , σ_x und σ_z für verschiedene Stabilitätsklassen in Abhängigkeit von der Entfernung (x) zur Quelle in Metern.....	17
Tabelle 3:	Unsicherheiten der in den Monte-Carlo-Simulationen verwendeten Eingangsparmeter.....	20
Tabelle 4:	Beispiel für die Schiffsdaten, die für die Berechnung der NO _x -Emissionen auf dem Rhein verwendet wurden.....	28
Tabelle 5:	Emissionen von fahrenden Binnenschiffen auf dem Rhein bei verschiedenen Rheinkilometern	28
Tabelle 6:	Geschwindigkeitsklasse und Emissionsfaktoren, die für die Berechnung der Emissionen der fahrenden Schiffe in den Häfen von Duisburg und Neuss verwendet wurden.....	29
Tabelle 7:	Gesamte NO _x -Emissionen durch fahrende Schiffe in t/a für jeden Abschnitt innerhalb von DURH und NERH	34

1 Einleitung

In Städten an stark befahrenen Wasserstraßen wie dem Rhein sind die Dieselmotoren von Binnenschiffen eine bedeutende Emissionsquelle. Die Gesamtmenge und die Auswirkungen dieser Emissionen hängen von der Verkehrsdichte entlang dieser Wasserstraßen und den Emissionen der einzelnen Schiffe ab.

Um die Auswirkungen dieser Emissionen auf die Luftqualität zu begrenzen, haben die Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) und die EU im Laufe der Jahre verschiedene Vorschriften für Schiffsmotoren erlassen, die jedoch jeweils nur für neue Motoren gelten (Schiffsneubau oder Austausch alter Motoren). Für Motoren auf bereits in Betrieb befindlichen Schiffen gilt der Bestandsschutz. Die Wirkung dieser Emissionsregelungen ist daher begrenzt, da Schiffsmotoren eine sehr lange Nutzungsdauer haben. Eine kontinuierliche Überwachung der Emissionen von in Betrieb befindlichen Schiffen, wie dies beispielsweise bei Straßenfahrzeugen der Fall ist, ist nicht vorgesehen.

Zur Ermittlung der Emissionen des Schiffsverkehrs fehlten bisher konkrete Eingangsdaten, sowohl zum tatsächlichen Schiffsverkehr als auch zum Emissionsverhalten der verschiedenen Schiffsmotoren im realen Fahrbetrieb. Daher musste eine Vielzahl von Annahmen getroffen werden, um die von den Schiffen verursachten Emissionsmittel zu ermitteln.

Es wurde versucht, anhand von Frachtstatistiken ein Szenario für den zugehörigen Schiffsverkehr zu entwickeln. Darauf folgte eine Abschätzung der Zusammensetzung dieses Verkehrsszenarios aus verschiedenen Schiffstypen und -größen.

In einem weiteren Schritt mussten zur Ermittlung der Emissionen weitere Annahmen über die Maschinenausstattung und die jeweilige durchschnittliche Reisegeschwindigkeit (stromaufwärts/stromabwärts) getroffen werden. Diese Annahmen bildeten dann die Grundlage für die Abschätzung des Leistungsbedarfs und des damit verbundenen Dieserverbrauchs aus theoretischen Leistungskurven durchschnittlicher Schiffsmotoren.

Dieser geschätzte Dieserverbrauch bildete wiederum die Grundlage für die Berechnung der Emissionswerte des Schiffsverkehrs. Es liegt auf der Hand, dass eine so große Anzahl von Annahmen auch ein erhebliches Unsicherheitspotenzial bei den resultierenden Emissionen mit sich bringt.

Es erschien daher sinnvoll, realistischere Methoden zur Bestimmung der Schiffsemissionen zu entwickeln. Die direkte Messung von Schiffsemissionen ist mit zwei Methoden möglich, die im Rahmen des CLINSH-Projekts eingesetzt wurden:

- a) direkte Messung mit In-situ-Instrumenten an Bord der Schiffe selbst
- b) Messung der Emissionen von vorbeifahrenden Schiffen mit einer automatischen und kontinuierlichen Messstation an Land.

In beiden Fällen werden in der Regel relative Emissionsfaktoren abgeleitet, z.B. wird die Menge der emittierten Stoffe pro verbrauchter Treibstoffmenge oder pro Zeiteinheit bestimmt. Um die Gesamtmenge eines emittierten Stoffes aus dem Schiffsverkehr zu ermitteln, sind weitere Informationen über den Treibstoffverbrauch erforderlich, die jedoch oft nicht verfügbar oder eher unsicher sind.

Beide Methoden wurden im Rahmen des CLINSH-Projekts erfolgreich angewandt. An mehr als 40 Binnenschiffen, die am CLINSH-Projekt teilgenommen haben, wurden direkte Messungen der NO_x-Emissionen durchgeführt. Darüber hinaus wurden vom LANUV im Rahmen von CLINSH zwei kontinuierlich messende, automatische Messstationen auf dem Rhein bei Duisburg und im Neusser Hafen eingerichtet, mit denen in den Jahren 2018-2020 mehr als 19.000 Emissionspeaks von vorbeifahrenden Schiffen erfasst und ausgewertet werden konnten. Mit der Auswertung der Messungen aus dem Jahr 2021 sind noch einmal ca. 8.000 weitere Emissionspeaks hinzugekommen, die die bisherigen Ergebnisse bestätigt haben.

Darüber hinaus wurden an beiden Messstationen AIS-Empfänger aufgestellt, mit denen der reale Schiffsverkehr erfasst und hinsichtlich Schiffstyp, Längenklasse, Fahrtrichtung und Geschwindigkeit (über Grund) ausgewertet und klassifiziert werden konnte.

Im Rahmen von CLINSH wurde eine Methode entwickelt, um aus hochauflösenden Onshore-Messungen absolute Stickoxid (NO_x)-Emissionsraten (in Gramm pro Sekunde) abzuleiten. Bei günstigen Windverhältnissen werden die Abgasfahnen der vorbeifahrenden Schiffe in Richtung der Messstelle am Flussufer transportiert. Am Messort kann die Abgasfahne eindeutig als eine kurzzeitige Erhöhung (ein Peak) der gemessenen NO_x-Konzentration identifiziert werden. Diese Peaks können über die AIS-Signale den jeweiligen Quellschiffen zugeordnet werden. Aus der Peakfläche kann anschließend die jeweilige Emissionsrate berechnet werden. Ein Beispiel für eine Zeitreihe mit zugeordneten Schiffen ist in Abbildung 1 dargestellt.

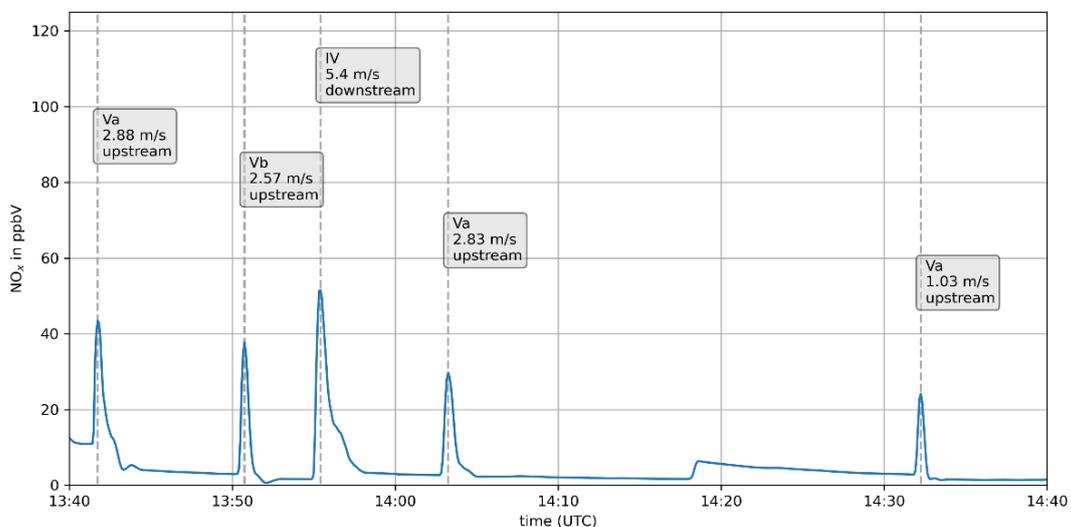


Abbildung 1: AIS-Signale von vorbeifahrenden Schiffen werden für die Zuordnung von NO_x-Spitzenwerten zu bestimmten Schiffen verwendet. Daraus lassen sich Informationen über Fahrtrichtung, Geschwindigkeit und Längenklassen der vorbeifahrenden Schiffe ermitteln. (Schiffsklassen: IV = 85 m Schiff, Va = 110 m Schiff, Vb = 135 m Schiff)

2 Messstellen

Das LANUV richtete für das CLINSH-Projekt zwei kontinuierliche Messstationen in Duisburg (DURH) und in Neuss (NERH) ein, die die NO_x-Konzentration und meteorologische Parameter wie Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung in Rheinnähe messen. Die zeitliche Auflösung dieser NO_x-Messungen beträgt fünf Sekunden. (LANUV 2021a).

Zusätzlich wurden diese Messstationen auch mit AIS-Empfängern (automatisches Identifikationssystem) ausgestattet, die Informationen über die vorbeifahrenden Schiffe liefern. Bei günstigen Windverhältnissen (d. h. wenn die Schiffsabgasfahnen in Richtung der In-situ-Systeme geweht werden) zeigen beide Messstationen eine starke Erhöhung der NO_x-Werte, wenn ein Schiff die Messstelle passiert. Diese sind deutlich als Spitzenwert in der Zeitreihe zu erkennen.

Duisburg Rheinhafen (DURH)

In Duisburg befindet sich die Messstelle am östlichen Rheinufer. Die vorherrschende Windrichtung hat eine westliche Komponente, so dass die Emissionen von Schiffen die meiste Zeit in Richtung der Messstelle transportiert werden. Auf diese Weise kann eine hohe Anzahl von Emissionspeaks der Binnenschiffe innerhalb der gemessenen NO_x-Konzentrationszeitreihen identifiziert werden.

Generell ist die Messstelle für die Ableitung von Emissionsraten gut geeignet, da sie sich in der Nähe des Rheins und der Einfahrt zum Duisburger Hafenbecken befindet. Daher können die gemessenen Emissionspeaks für Schiffe unterschieden werden, die die Messstelle unter verschiedenen Fahrbedingungen passieren, z.B. Schiffe, die stromaufwärts („zu Berg“) gegen die Strömung oder stromabwärts („zu Tal“) mit der Strömung fahren. Diese Messstelle wurde im Oktober 2017 eingerichtet und ist immer noch aktiv. Für CLINSH wurden die Emissionsraten für die Jahre 2018 bis 2020 ausgewertet.



Abbildung 2: Automatisierte Messstation in Duisburg vom Rhein aus gesehen (Foto: Dr. D. Busch, LANUV)

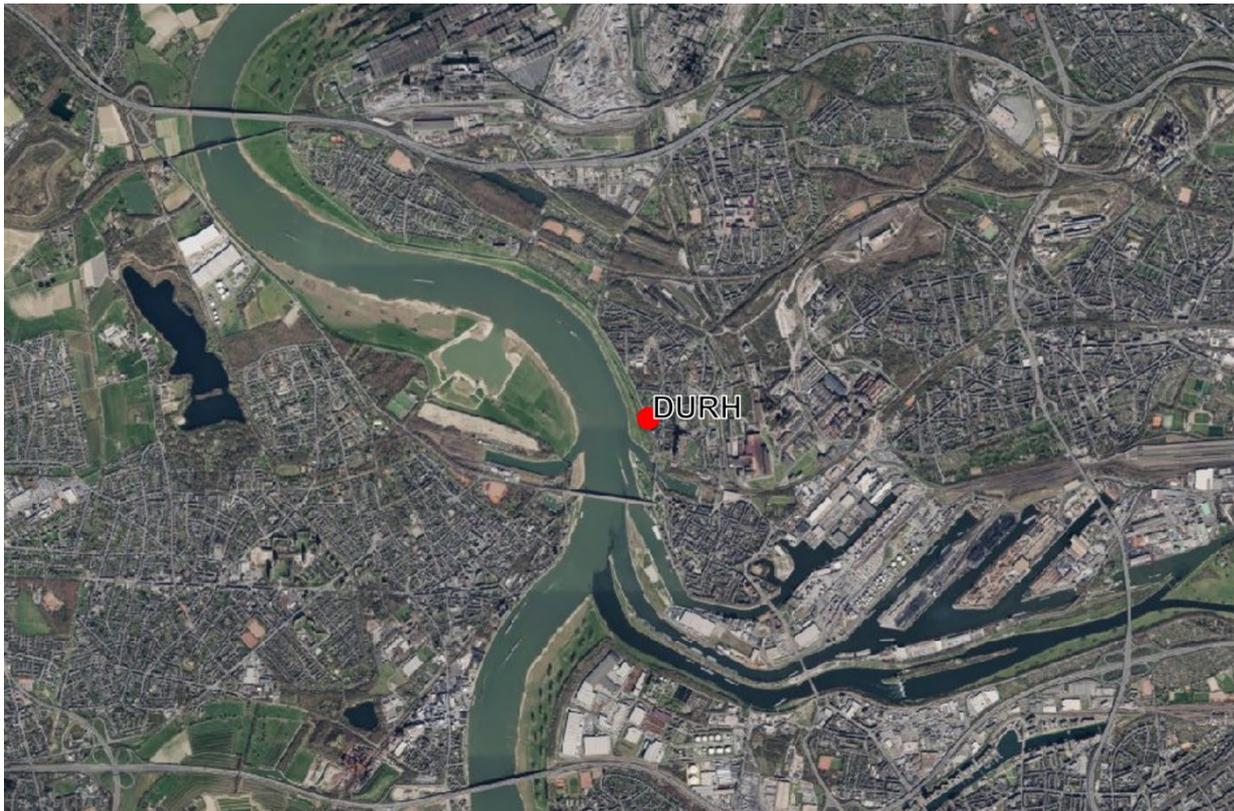


Abbildung 3: Satellitenbild der Messstelle in Duisburg (DURH) (Luftbild: GEOportal.NRW)

Neuss Rheinhafen (NERH)

Die Messstelle in Neuss befindet sich im Hafen am Zufahrtskanal zu den Hafenbecken, der westlich des Rheins liegt. Gebäude und Vegetation versperren die direkte Sichtlinie von der Messstation zum Rhein. In Kombination mit der vorherrschenden südwestlichen Windrichtung werden nur wenige Abgasfahnen von Schiffen, die auf dem Rhein fahren, erfasst. Dennoch ist die Messstelle aufgrund ihrer Lage direkt im Hafen gut geeignet, um die Emissionen von langsamen Schiffen innerhalb der Hafengebiete und ohne den Einfluss von Flussströmungen zu bewerten. Diese Messstation wurde im September 2017 eingerichtet und Ende 2019 wieder abgebaut. Somit wurden die Emissionsraten für die Schiffe im Hafenbetrieb für einen etwas kürzeren Zeitraum als in Duisburg abgeleitet.



Abbildung 4: Automatisierte Messstation in Neuss (Foto: Dr. D. Busch, LANUV)

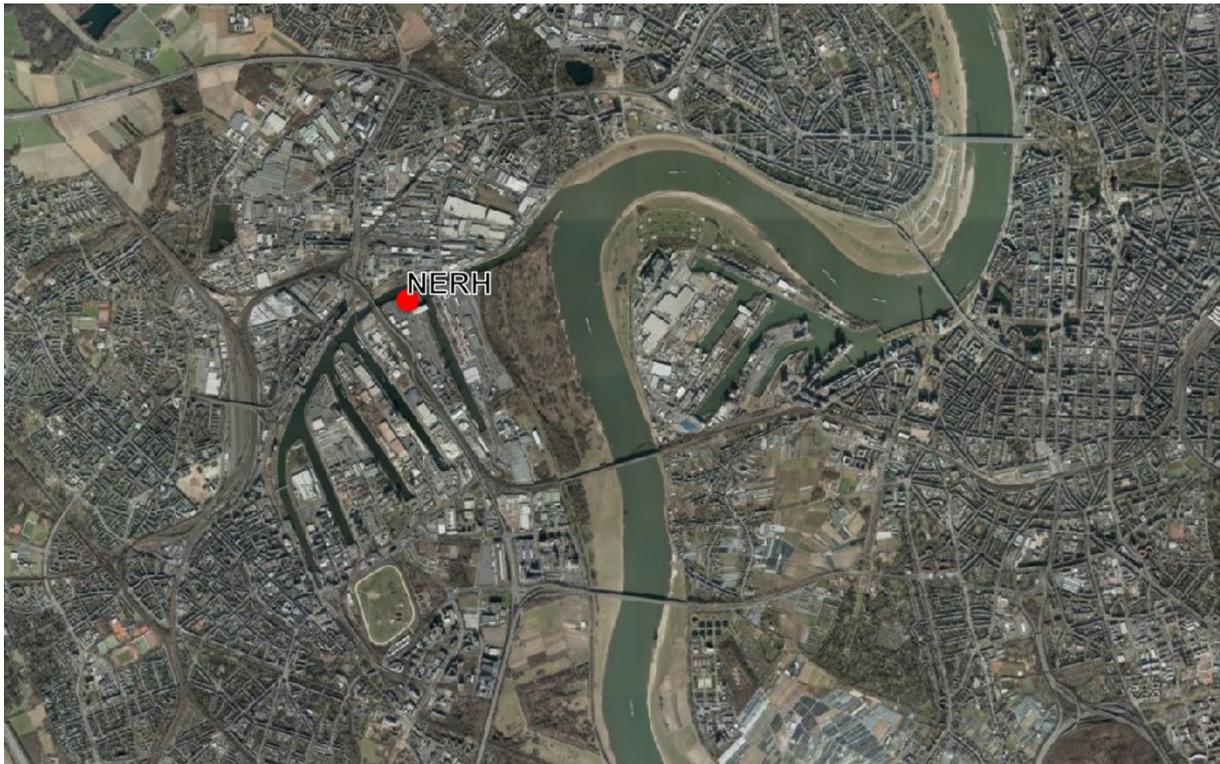


Abbildung 5: Satellitenbild der Messstelle in Neuss (NERH) (Luftbild: GEOportal.NRW)

3 Methodik

Die Kombination der verschiedenen Messungen und der empfangenen AIS-Signale ermöglicht die Berechnung der Schiffsemissionen von vorbeifahrenden Schiffen in drei verschiedenen Schritten, die im Folgenden beschrieben werden.

Identifikation der der Emissionspeaks der Schiffe

Der erste Schritt besteht darin, die durch vorbeifahrende Schiffe verursachten Peaks zu identifizieren. Um die Peaks zu identifizieren, wird aus den gemessenen Zeitreihen eine tiefpassgefilterte Zeitreihe mit einem laufenden Median und einer Fensterlänge von 5 Minuten berechnet. Diese Tiefpass-Zeitreihe beschreibt die durch meteorologische Faktoren und andere Emissionsquellen verursachten Änderungen der Hintergrundkonzentration, schließt aber die durch vorbeifahrende Schiffe verursachten kurzfristigen Schwankungen aus.

Die tiefpassgefilterte Zeitreihe wird dann von der gemessenen Zeitreihe subtrahiert. Dieses Verfahren führt zu einer Zeitreihe, die im Durchschnitt nahe bei Null liegt, aber immer noch die durch die vorbeifahrenden Schiffe verursachten starken Spitzenkonzentrationen aufweist. Für diese Peaks wird dann geprüft, ob sie einen bestimmten Schwellenwert überschreiten, um sicherzustellen, dass es sich um tatsächliche Erhöhungen und nicht nur um Rauschen in den Messungen handelt. In diesem Fall wurde der Schwellenwert auf 2 ppbv festgelegt. Für jeden identifizierten Peak werden der Zeitpunkt des Auftretens (t_{peak}), die Breite des Peaks und die Höhe des Maximums über der Hintergrundkonzentration bestimmt.

Zuordnung der Schiffe

Der zweite Schritt besteht dann darin, die jeweilige Quelle des Peaks zu ermitteln. Für jeden Peak wird geprüft, ob sich Schiffe in einem Radius von 5 km um den Messort (in einer Zeitspanne von bis zu 5 Minuten vor der Messung des Peakmaximums) befanden. Für jedes Schiff werden die entsprechenden AIS-Signale innerhalb des gegebenen Zeitrahmens gesammelt und mit einer Zeitauflösung von einer Sekunde interpoliert. Für jede AIS-Signalposition wird eine Trajektorie berechnet, um zu prüfen, ob die an dieser spezifischen Schiffsposition verursachten Emissionen durch den Wind zum Messort transportiert worden sein könnten.

Die Windgeschwindigkeit und -richtung, die für diese Trajektorien verwendet werden, sind die 30-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit in Windrichtung am Messort. Jede Trajektorie wird für die Zeitspanne zwischen dem Zeitstempel des AIS-Signals (t_{AIS}) und dem Zeitpunkt des Spitzenwertes (t_{peak}) berechnet. Anschließend wird geprüft, ob die Trajektorie in einem Radius von 50 m um den Messort endet. Wenn nur die Trajektorien eines einzigen Schiffes in dem gegebenen Zeitrahmen in der Nähe der Messstelle enden, wird das Schiff dem Peak als jeweilige Quelle zugeordnet.

Die endgültige Zuweisung der Quellposition erfolgt dann auf der Grundlage der Entfernung zum Messort. Von allen möglichen AIS-Positionen, deren Trajektorien in der Nähe des Messortes enden, wird die nächstgelegene als Quellenposition zugewiesen. Werden mehrere Schiffe als mögliche Quelle des Peaks identifiziert, wird der Peak für die weitere Analyse nicht berücksichtigt, da eine eindeutige Zuordnung zu einem einzelnen Schiff nicht möglich ist.

Nachdem das Verursacherschiff identifiziert wurde, werden alle Informationen für diese Schiffspassage dem Peak zugeordnet. Hierbei handelt es sich um die Längenklasse des Schif-

fes, die Geschwindigkeit über Grund sowie die Fahrtrichtung (Berg-/Talfahrt). Die erste zugewiesene Schiffsposition ist die 180 Sekunden vor t_{AIS} übermittelte Position und die letzte zugewiesene Position ist die Position 180 Sekunden nach t_{peak} .

Berechnung der Emissionsrate

Im dritten Schritt wird die NO_x-Emissionsrate für jeden Peak mit einer gültigen Schiffsquelle berechnet. Da die Stationen nur die NO_x-Konzentration an ihrem Standort (onshore) und nicht am Schornstein des Schiffes messen, muss ein Modell angewandt werden, um die Emissionsrate anhand der am Onshore-Messort festgestellten Konzentrationserhöhung zu schätzen. Ein einfacher Ansatz ist die Annahme, dass die Schiffsfahne durch ein Gauß-Puff-Modell beschrieben werden kann,

$$C(x, y, z) = \sum^{n_{\text{puff}}} \frac{Q dt}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z (2\pi)^{1.5}} \times \exp\left(\frac{-(x - U \times (t - dt))^2}{2\sigma_x^2}\right) \times \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \\ \times \left[\exp\left(\frac{-(z - H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z + H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

wobei die Konzentration an einem Punkt ($C(x, y, z)$) als Funktion der Emissionsrate (Q), der Dispersion aufgrund der atmosphärischen Stabilität ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), der Zeitdauer der Emission (dt) an einem bestimmten Quellpunkt ($x=0, y=0$), der Schornsteinhöhe (H), der gesamten Transportzeit (t) und der Windgeschwindigkeit (U) beschrieben werden kann.

Die Windrichtung ist immer entlang x . Das Modell setzt an der Position des Schiffes eine Schadstoffwolke frei, die dann für eine bestimmte Zeit (t) vom Wind transportiert wird und sich entsprechend der aktuellen atmosphärischen Stabilität verteilt. Die Zeitspanne (t) ist für jede Schiffsposition unterschiedlich und ergibt sich immer aus der Zeit des Auftretens des Spitzenmaximums (t_{peak}) minus der Zeit des jeweiligen AIS-Signals (t_{AIS}). Das Ergebnis ist ein Konzentrationsfeld, das durch die Emission von Schadstoffen an der jeweiligen Schiffsposition für die Zeit dt entsteht.

Dieser Schritt wird dann für alle Schiffspositionen wiederholt. Die berechneten Konzentrationsfelder beschreiben dann, wie sich die Schadstofffahne während der Schiffspassage entwickelt hat.

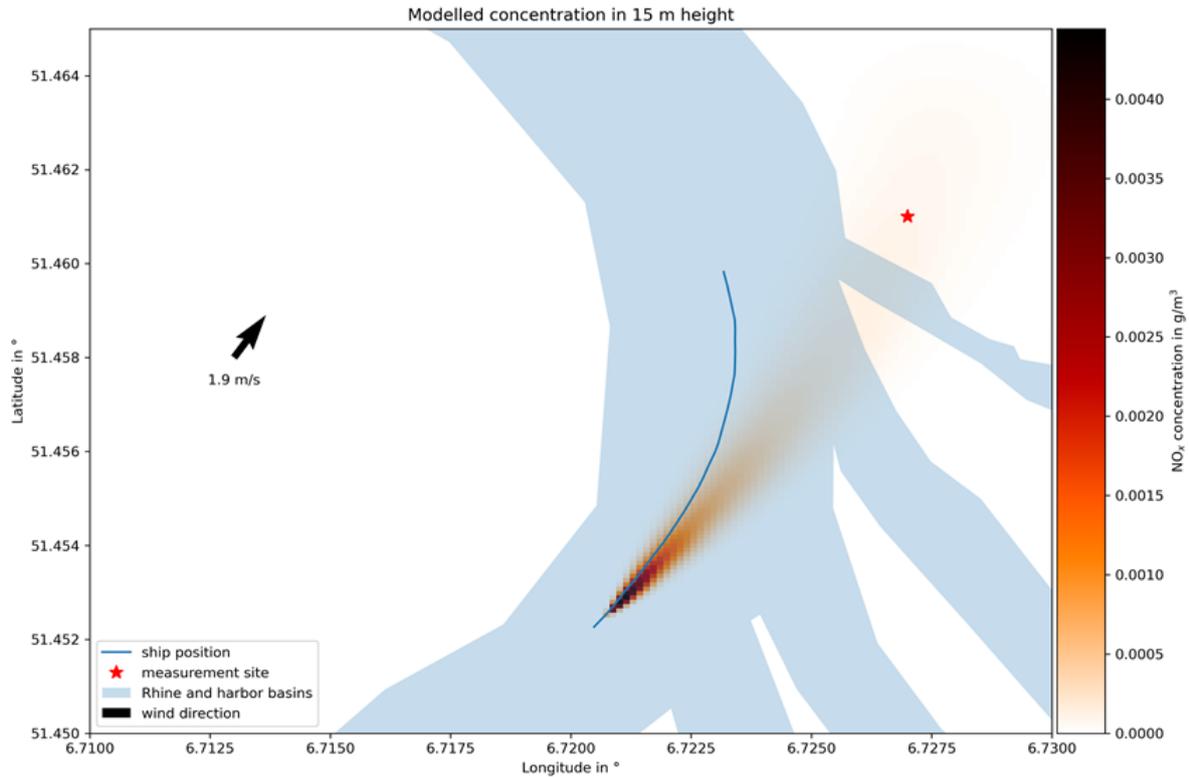


Abbildung 6: Modellierter Abgasfahne für ein Frachtschiff der Klasse Va (110 x 11,4 x 3,5 m, Ladekapazität 2.800 Tonnen), das stromaufwärts fährt und die Messstelle in Duisburg am 29. August um 10:46 Uhr passiert. Die Windrichtung war Südwest und die Windgeschwindigkeit betrug 1,9 m/s.

Tabelle 1: Klassifizierungsschema der atmosphärischen Stabilität auf der Grundlage der Windgeschwindigkeit und der globalen Einstrahlung (Tag) oder der Wolkenbedeckung (Nacht) (Pasquill, 1968). Die Skala reicht von sehr instabil (A) bis mäßig stabil (E)

Windgeschwindigkeit (ms ⁻¹)	Globalstrahlung			Wolkenbedeckung	
	Stark	Mittel	Schwach	>= 4/8 Wolken	<= 3/8 Wolken
< 2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Tabelle 2: Atmosphärische Ausbreitungsparameter σ_y , σ_x und σ_z für verschiedene Stabilitätsklassen in Abhängigkeit von der Entfernung (x) zur Quelle in Metern. Für Zwischenfälle wie B-C wurde der Mittelwert der beiden Werte ermittelt (Briggs 1973)

Stabilitätsklasse	$\sigma_y(x)$ und $\sigma_x(x)$	$\sigma_z(x)$
A	$0.32x(1+0.0004x)^{-0.5}$	$0.24x(1+0.001)^{-0.5}$
B	$0.32x(1+0.0004x)^{-0.5}$	$0.24x(1+0.001)^{-0.5}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-0.5}$	$0.2x$
D	$0.16x(1+0.0004x)^{-0.5}$	$0.14x(1+0.003)^{-0.5}$
E	$0.11x(1+0.0004x)^{-0.5}$	$0.08x(1+0.00015)^{-0.5}$
F	$0.11x(1+0.0004x)^{-0.5}$	$0.08x(1+0.00015)^{-0.5}$

Da die Emissionsrate nicht bekannt ist, wird das Modell mit einer willkürlichen Emissionsrate (Q_{Modell}) berechnet. Die Höhe des Zentrums der Abgasfahne wird näherungsweise auf der Höhe des Schornsteins über dem Wasserspiegel angesetzt, wobei davon ausgegangen wird, dass die Abgasfahne aufgrund von Wind und Schiffsbewegungen schnell nach unten abknickt.

Außerdem wird angenommen, dass diese Höhe bei allen Schiffen immer ungefähr gleich ist. Die Ausbreitungsparameter werden entsprechend der atmosphärischen Stabilität gewählt. Diese wird anhand der Windgeschwindigkeit am Messort sowie der einfallenden Globalstrahlung (DWD Climate Data Center (CDC)) und der Wolkenbedeckung (DWD Climate Data Center (CDC)) von einer nahe gelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes am Düsseldorf Flughafen ermittelt.

Zur Ableitung der Emissionsrate wird dann die integrierte gemessene Konzentration, d.h. die Fläche unter dem Peak (C_{meas}), die um den schwankenden Hintergrund korrigiert wurde, mit der modellierten Konzentration am Messort, d.h. der Fläche unter dem modellierten Peak (C_{modell}) verglichen.

Unter der Annahme, dass das Modell die Schiffsfahne ausreichend beschreibt, ist der einzige Unterschied zwischen der modellierten und der gemessenen Konzentration auf die unterschiedliche Emissionsrate zurückzuführen. Daher kann die tatsächliche Emissionsrate des Schiffes (Q_{meas}) anhand der folgenden Gleichung geschätzt werden:

$$Q_{\text{meas}} = \frac{C_{\text{meas}}}{C_{\text{modell}}} Q_{\text{modell}}$$

Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass die Emissionsrate für den gesamten modellierten Zeitbereich konstant ist. Ein Beispielfall ist in Abb. 7 dargestellt, wo eine Schiffspassage am 22. August 2018 um 16:36 Uhr modelliert und nach dem oben beschriebenen Schema ausgewertet wurde.

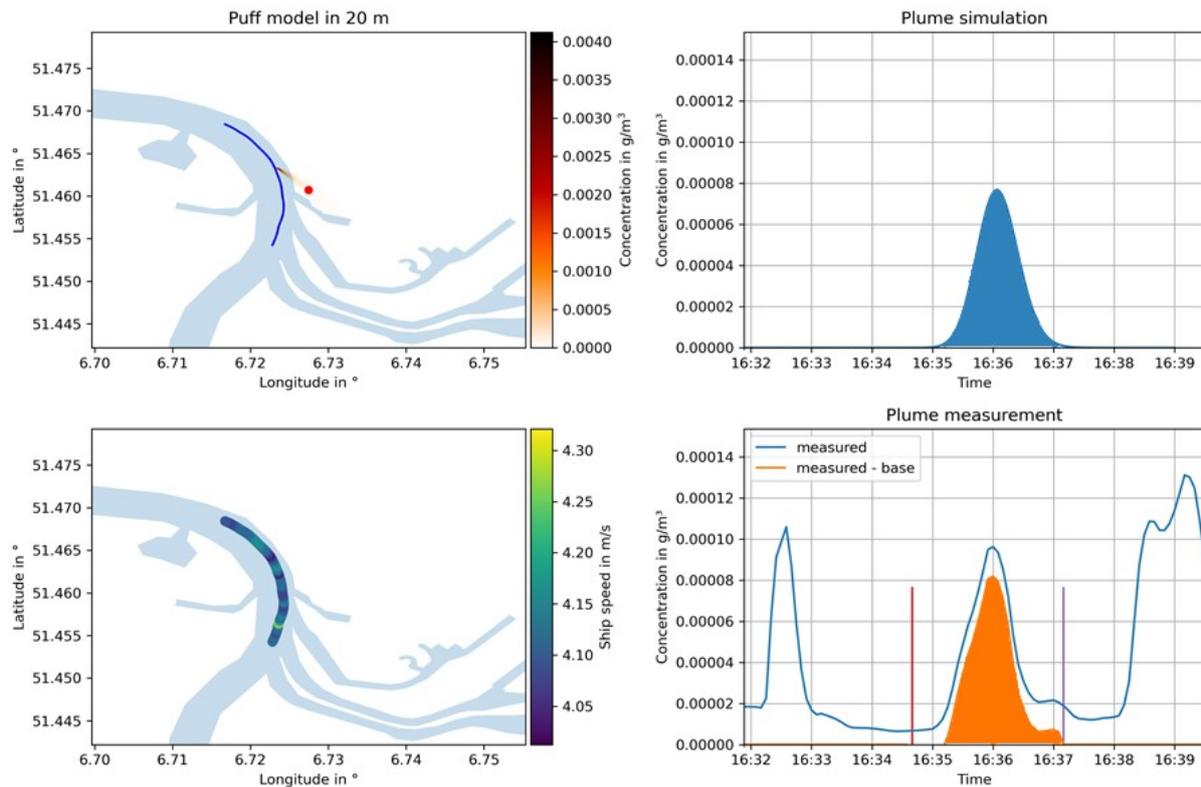


Abbildung 7: Beispiel einer Fahnsimulation im Vergleich zur jeweiligen Messung

Das obere linke Feld zeigt die Abgasfahne zu dem Zeitpunkt, an dem die höchste Konzentration gemessen wurde. Das rechte obere Feld zeigt den entsprechenden modellierten Spitzenwert. Unten links ist die Schiffsgeschwindigkeit über Grund für jeden Zeitschritt dargestellt. Rechts unten ist die gemessene Konzentration im Zeitverlauf dargestellt, wobei die blaue Linie die gemessene Konzentration und die orangefarbene Linie die hintergrundkorrigierte Konzentration des Peaks angibt. Rote und violette Linien zeigen die Grenzen des Peaks an. Die modellierte (blau, obere rechte Grafik) und die gemessene Peakfläche (orange, untere rechte Grafik) sind identisch.

Qualitätskontrolle

Nicht in allen Fällen spiegeln die im Modell getroffenen Annahmen tatsächlich die Bedingungen zum Zeitpunkt der Messung wider. Um die Qualität der abgeleiteten Emissionsraten zu beurteilen, wurden mehrere Kriterien festgelegt. Die meisten dieser Kriterien basieren auf der Unsicherheit der Eingabeparameter und deren Einfluss auf die abgeleiteten Emissionsraten.

Für jeden Peak und damit jede einzelne Schiffspassage werden Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Hierbei werden die Windgeschwindigkeit (U), die Windrichtung (θ), die atmosphärische Stabilität und die Position des Schiffes in Länge, Breite und Höhe innerhalb ihres jeweiligen Unsicherheitsbereichs variiert. Für jeden dieser Parameter (j) ergibt dies eine Reihe von Simulationen, und für jede dieser Simulationen wird die Konzentration an der Messstelle bestimmt. Für jeden Parameter werden dann die resultierenden Konzentrationen eines Satzes durch den Mittelwert (mean_{C_j}), die Standardabweichung (σ_{C_j}) sowie den Minimal- (min_{C_j}) und Maximalwert (max_{C_j}) zusammengefasst. Diese Werte werden dann mit der Referenzsimulation mit den ungestörten Eingangsparametern verglichen.

Um im Rahmen von CLINSH weiter ausgewertet werden zu können, müssen die folgenden fünf Kriterien für jeden Eingabeparameter erfüllt werden:

- 1) $\text{mean}C_j / C_{\text{model}}$ muss zwischen 0,5 und 1,5 liegen, um Fälle mit einer systematischen Abweichung aufgrund der Unsicherheit eines einzelnen Inputs auszuschließen.
- 2) $\sigma_{C_j} / C_{\text{model}}$ muss kleiner oder gleich 1 sein, um Fälle mit einer hohen Variabilität aufgrund der Unsicherheit eines einzelnen Eingangsparameters auszuschließen.
- 3) Die Differenz zwischen $\text{min}C_j / C_{\text{model}}$ und $\text{max}C_j / C_{\text{model}}$ muss kleiner als 2 sein, um Fälle mit einer großen Streuung zwischen Minimum und Maximum aufgrund der Unsicherheit einer einzelnen Eingabe auszuschließen.
- 4) Der absolute Fehler der abgeleiteten Emissionsrate muss kleiner als 5 g/s sein, um Fälle auszuschließen, in denen die Unsicherheit in einer größeren Größenordnung liegt als die Emissionsrate.
- 5) Der relative Fehler der abgeleiteten Emissionsrate muss weniger als 200 % betragen, wodurch Fälle ausgeschlossen werden, in denen die Unsicherheit viel größer ist als die Emissionsrate.

Die Unsicherheit der abgeleiteten Emissionsrate ist gegeben durch:

$$\sigma_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_{\text{meas}}}{\partial C_{\text{meas}}} \times \sigma_{C_{\text{meas}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{\text{meas}}}{\partial C_{\text{model}}} \times \sigma_{C_{\text{model}}}\right)^2}$$

wobei $\sigma_{C_{\text{meas}}}$ die Unsicherheit der gemessenen Spurengaskonzentration und $\sigma_{C_{\text{model}}}$ die Unsicherheit der modellierten Spurengaskonzentration ist. Die Unsicherheit des Modells ist definiert als:

$$\sigma_{C_{\text{model}}} = \sqrt{\sigma_{C_{\text{CU}}}^2 + \sigma_{C_{\text{C}\theta}}^2 + \sigma_{C_{\text{stability}}}^2 + \sigma_{C_{\text{clon}}}^2 + \sigma_{C_{\text{clat}}}^2 + \sigma_{C_{\text{CH}}}^2}$$

wobei jedes σ_{C_j} die Standardabweichung der modellierten Spurengaskonzentrationen der Monte-Carlo-Simulationen in Bezug auf Änderungen eines einzelnen Eingangsparameters (j) ist. In den Monte-Carlo-Simulationen wird jeder Parameter einzeln geändert, so dass mögliche Wechselwirkungen bei gleichzeitiger Änderungen mehrerer Parameter vernachlässigt werden.

Tabelle 3: Unsicherheiten der in den Monte-Carlo-Simulationen verwendeten Eingangsparameter

Symbol	Name	Ermittlung des Wertes
σ_{lon}	Schiffsposition Längengrad	Unsicherheit des AIS-Signales, 10 m
σ_{lat}	Schiffsposition Breitengrad	
σ_H	Abgasfahnenhöhe	$\sqrt{\sigma_{fh}^2 + \sigma_{wl}^2}$
σ_{fh}	Schornsteinhöhe	Estimated, 5 m
σ_{wl}	Wasserstand	Mittleres Hochwasser – Mittleres Niedrigwasser
σ_{θ}	Windrichtung	Geschätzt auf 10°
σ_U	Windgeschwindigkeit	Standardabweichung der ermittelten Windgeschwindigkeit (30 min Mittel)
$\sigma_{stability}$	Atmosphärische Stabilität	atmosphärische Ausbreitungsparameter der jeweils höheren und niedrigeren Stabilitätsklasse
σ_{Cmeas}	Unsicherheit der gemessenen Peakfläche	$\sqrt{std(peak)^2 \times n}$, wobei n die Anzahl der zu Berechnung der Fläche verwendeten Einzelmessungen ist

4 Ergebnisse

Für Duisburg wurden insgesamt 22.625 Schiffspeaks identifiziert, die einem bestimmten Quellschiff zugeordnet werden konnten. Für 16.423 dieser Peaks konnte die Emissionsrate unter Einhaltung der oben genannten Qualitätskriterien, bestimmt werden.

In Neuss wurden 5.560 Peaks identifiziert und die entsprechenden Emissionsraten abgeleitet, in 3.238 Fällen erfüllen diese abgeleiteten Emissionsraten die Qualitätskriterien. Diese Emissionsraten wurden dann im Zusammenhang mit der jeweiligen CEMT-Schiffsklasse, der Fahrtrichtung (stromaufwärts oder stromabwärts) und ihrer Geschwindigkeit über Grund zusammengefasst. Abb. 8 zeigt das in CLINSH verwendete Schiffsklassifizierungsschema.

Class			
I	 Spits Length 38,5 meters - width 5,05 meters - draught 2,20 meters - cargo capacity 350 tonnes	Va	 Large Rhine vessel Length 110 meters - width 11,40 meters - draught 3,00 meters - cargo capacity 2.750 tonnes
II	 Campine vessel Length 55 meters - width 6,60 meters - draught 2,59 meters - cargo capacity 655 tonnes	Vb	 Large Rhine vessel Length 135 meters - width 11,40 meters - draught 3,5 meters - cargo capacity 4.000 tonnes
III	 Dortmund-Ems canal vessel Length 67 meters - width 8,20 meters - draught 2,50 meters - cargo capacity 1.000 tonnes	Vla	 Two lighter pushing unit Length 172 meters - width 11,40 meters - draught 4 meters - cargo capacity 5.500 tonnes
		Vlb	 Four or six lighter pushing unit Length 193 meters - width 22,80 / 34,20 meters - diepgang 4 meters - laadvermogen 11.000 / 16.500 tonnes
		Vlc	
IV	 Rhine-Herne canal vessel Length 85 meters - width 9,50 meters - draught 2,50 meters - cargo capacity 1.350 tonnes	Va	 Standard tank vessel Length 110 meters - width 11,40 meters - diepgang 3,50 meters - cargo capacity 3.000 tonnes

Abbildung 8: Übersicht über das in diesem Bericht verwendete Schiffsklassifikationssystem, analog zur Klassifikation nach CEMT. Schiffsgrafik: Bureau Voorlichting Binnenvaart

Die Analyse des Schiffsverkehrs auf dem Rhein hat gezeigt, dass der Frachtverkehr auf dem Niederrhein mit einem Anteil von 70-80% durch Schiffe der Größenklassen IV (85 m, 16%-23%), Va (110 m, 32%-42%) und Vb (135 m, 15%-21%) abgewickelt wird. Hinzu kommen Schub- und Koppelverbände, die in der Summe einen Anteil etwa 7%-10% am Gesamtverkehr haben. Die kleineren Fracht- und Tankschiffe der Klassen I, II und III spielen nur eine untergeordnete Rolle (LANUV 2021b).

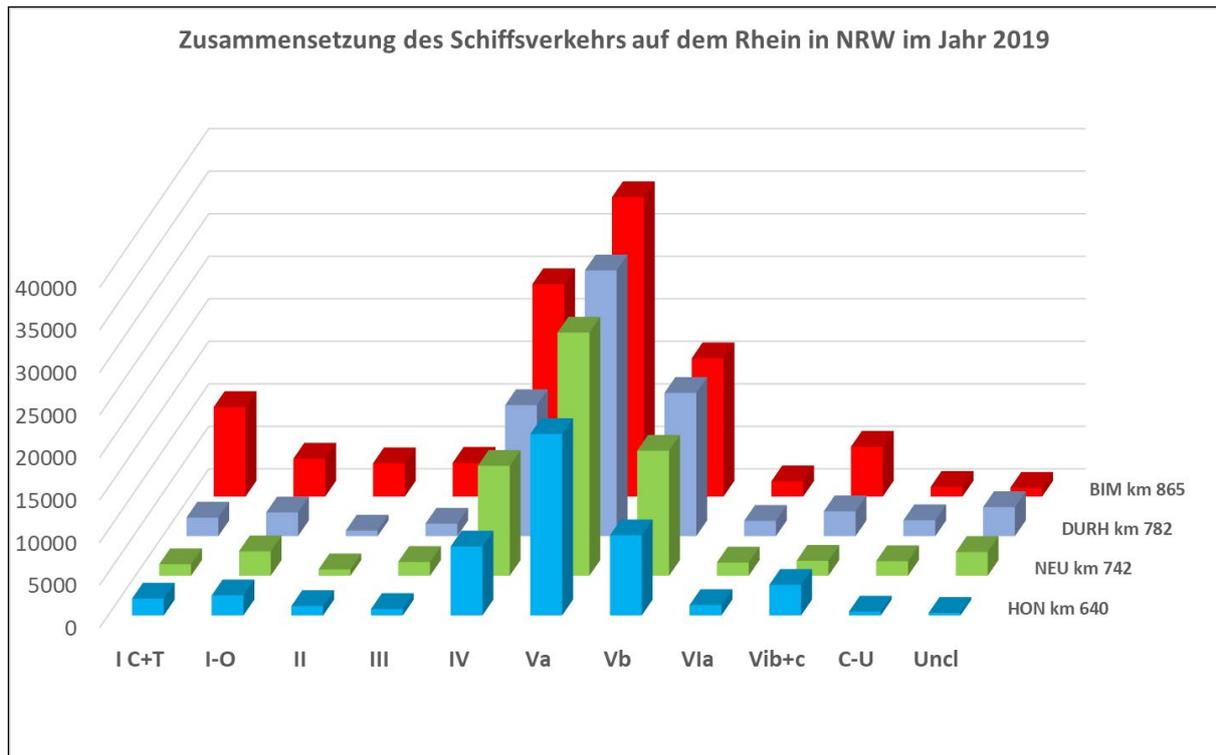


Abbildung 9: Schiffsverkehr auf dem nordrhein-westfälischen Rheinabschnitt (Rhein-km 640-865) im Jahr 2019, Zusammensetzung nach den einzelnen Schiffgrößenklassen

Auf Grund der hohen Anzahl von Schiffspassagen der drei Schiffsklassen IV, Va und Vb (85-135m) lassen sich so die Emissionsraten der jeweiligen Klasse unter realen Fahrbedingungen gut charakterisieren (siehe Abbildungen 10, 12, 14). Für die Schiffsklassen mit geringeren Anteilen am Rheinverkehr gibt es insgesamt weniger Beobachtungen, was zu einer höheren Unsicherheit der zusammengefassten Emissionsraten für diese Klasse führt.

Für die kleineren Schiffsklassen (I-III) gibt teilweise nicht genügend Daten, um die ermittelten unterschiedlichen Emissionsraten bezogen auf Fahrtrichtung und Geschwindigkeitsstufe sicher zu klassifizieren. Hierdurch können für diese Schiffsklassen größere Fehlerbreiten für die ermittelten Emissionsklassen entstehen. Diese relativieren sich aber bei den Emissionsberechnungen für die einzelnen Rheinabschnitte durch die geringen Verkehrsanteile.

Im Allgemeinen korreliert die Emissionsrate mit der Größe der Schiffe, wobei größere Schiffsklassen in der Regel höhere Emissionsraten aufweisen als kleinere Schiffe. Darüber hinaus korreliert auch die Geschwindigkeit über Grund mit den Emissionsraten, wobei höhere Geschwindigkeiten über Grund erwartungsgemäß zu höheren Emissionsraten führen.

Darüber hinaus besteht auch ein Zusammenhang mit der Fahrtrichtung: Schiffe, die gegen die Strömung, d. h. stromaufwärts fahren, weisen bei in der jeweiligen Geschwindigkeitsklasse über Grund eine höhere Emissionsrate auf als Schiffe, die bei gleicher Geschwindigkeit über Grund stromabwärts fahren.

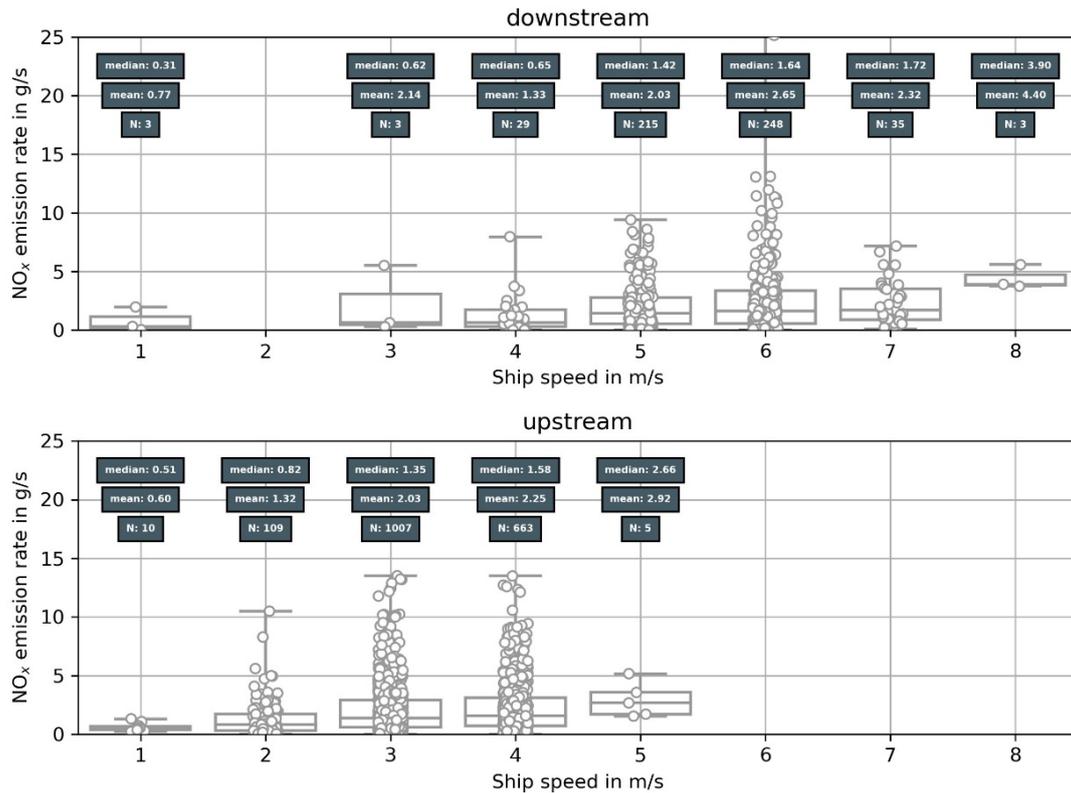


Abbildung 10: Emissionsraten für Schiffsklasse IV (85 x 9,5 x 2,5 m, Ladekapazität 1350 Tonnen) in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund und der Fahrtrichtung, abgeleitet aus den bei DURH gemessenen Daten

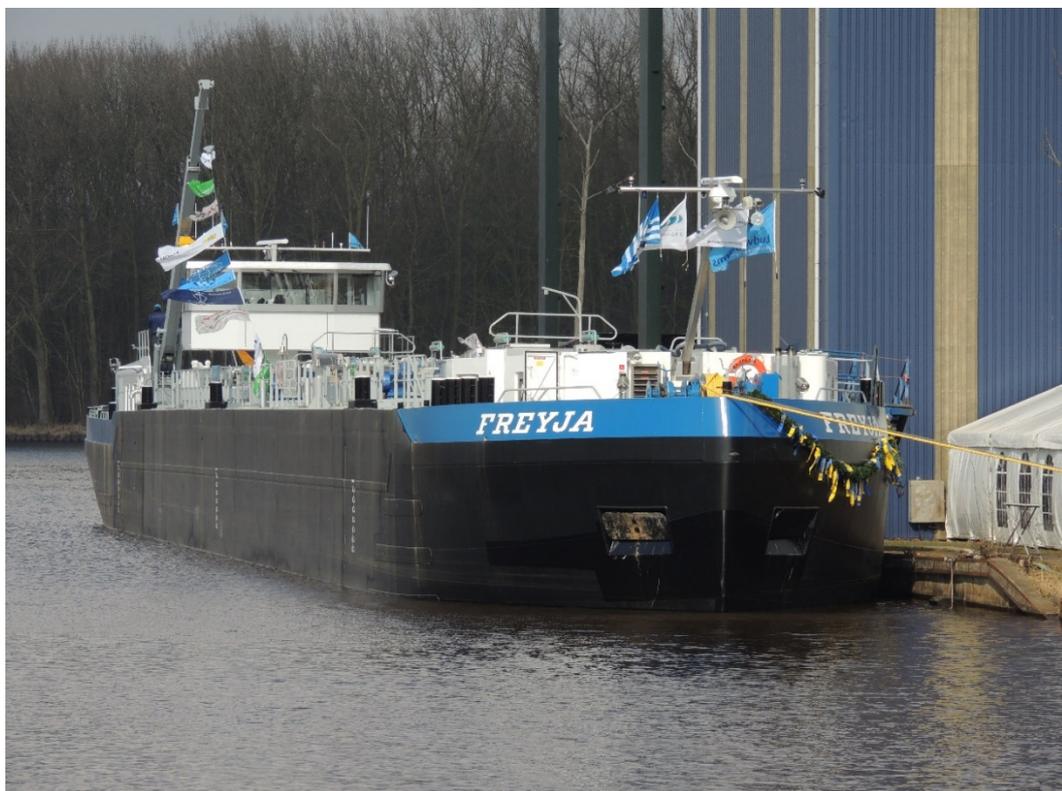


Abbildung 11: MS FREYJA, ein Beispiel für einen 85 m Tanker der Klasse IV (Foto: Dr. D. Busch, LANUV)

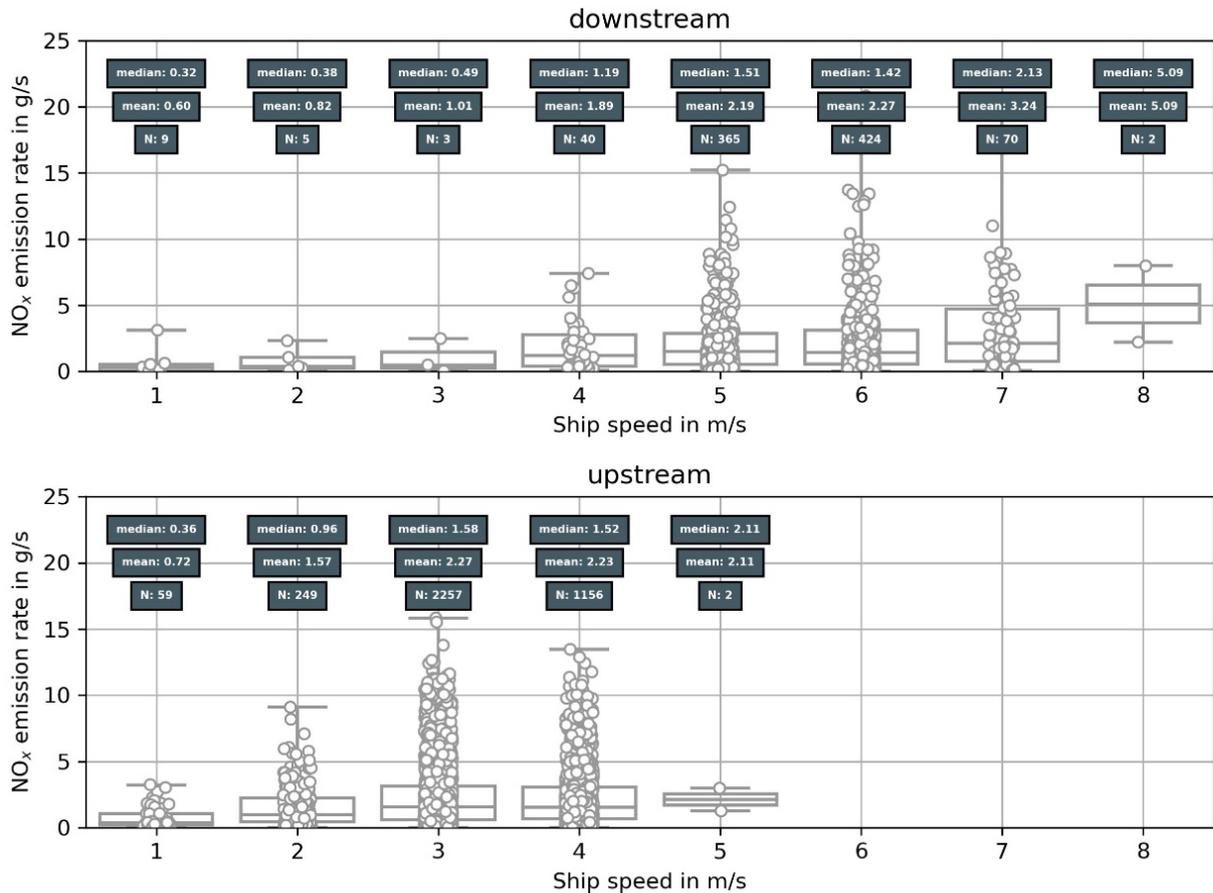


Abbildung 12: Emissionsraten für die Schiffsklasse Va (110 x 11,4 x 3,5 m, Ladekapazität 2800 Tonnen) in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund und der Fahrtrichtung, abgeleitet aus Messdaten von DURH



Abbildung 13: MS CURA DEI, ein Beispiel für ein 110 m langes Frachtschiff der Klasse Va (Foto: Dr. D. Busch, LANUV)

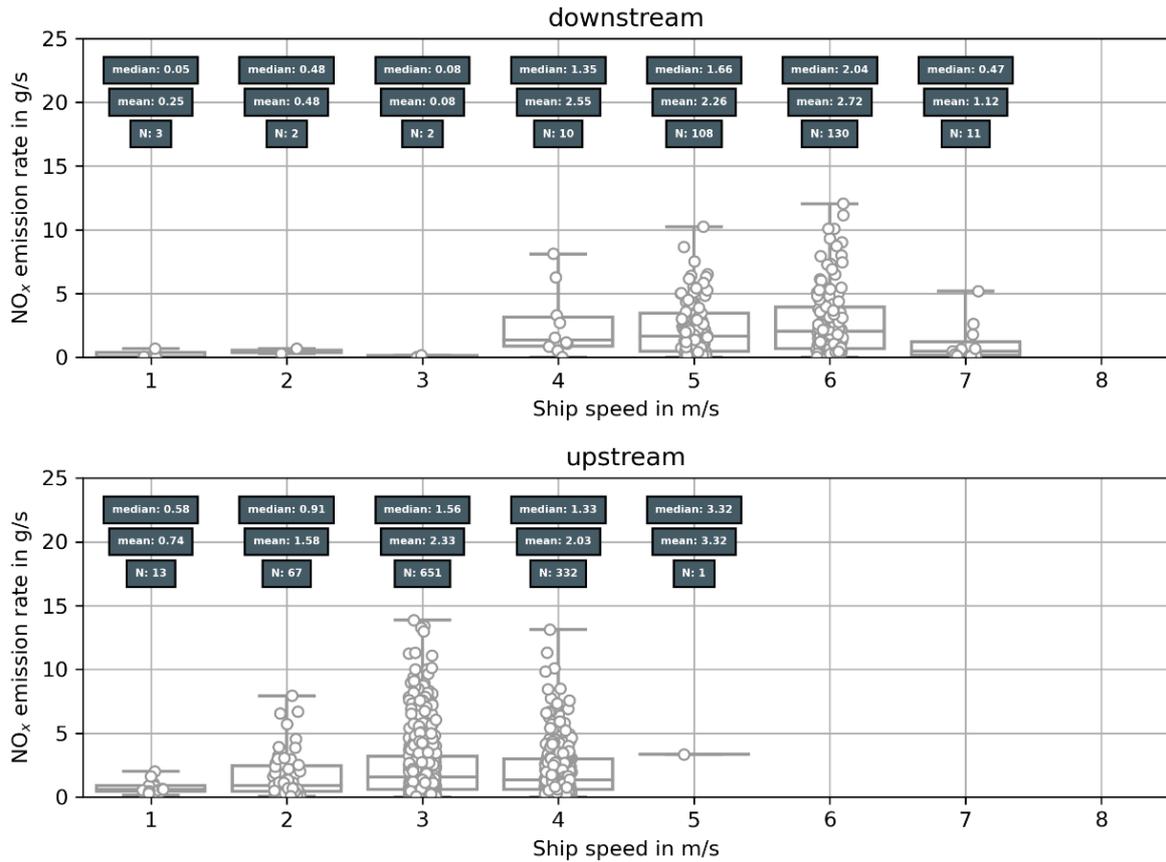


Abbildung 14: Emissionsraten für die Schiffsklasse Vb (135 x 11,4 x 3,5 m, Ladekapazität 4000 Tonnen) in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund und der Fahrtrichtung, abgeleitet aus den bei DURH gemessenen Daten



Abbildung 15: MS Oriana, ein Beispiel für ein 135 m langes Frachtschiff der Klasse Vb (Foto: Dr. D. Busch, LANUV)

5 Anwendung der Emissionsfaktoren: Berechnungen der Emissionen für das Emissionskataster in Nordrhein-Westfalen

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) führt das Emissionskataster für die Binnenschifffahrt in Nordrhein-Westfalen. Dieses Register basiert bisher auf Verkehrsdaten, die aus Verkehrsmeldungen und Frachtdaten ermittelt werden. Darüber hinaus wurden Schätzungen für weitere Größen (z.B. Motorisierung, Längenkategorie, Durchschnittsgeschwindigkeit der Schiffe) benötigt, die in die Emissionsberechnungen einfließen.

Die theoretisch erforderliche Maschinenleistung wird aus Geschwindigkeits-/Leistungskurven geschätzt und die damit verbundenen Emissionen werden aus Leistungs-/Emissionskurven über den Dieselverbrauch der Schiffe ermittelt. Es gibt daher eine Vielzahl von potenziellen Unsicherheitsquellen bei den berechneten Emissionen. Daher ist es sinnvoll, ein Verfahren zur Emissionsbestimmung zu entwickeln, bei dem möglichst alle relevanten Größen auf der Basis realer Messdaten ermittelt werden.

Durch den Einsatz der automatischen Messstationen für CLINSH war es möglich, viele Emissionspeaks der vorbeifahrenden Schiffe zu quantifizieren und über die AIS-Signale mit dem bereits in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Verfahren jedem einzelnen Schiff zuzuordnen. Durch die Klassifizierung der Emissionsfaktoren wurde es möglich, eine neue Methode zur Bestimmung der NO_x-Emissionen von fahrenden Schiffen zu entwickeln. Diese Methode wurde für das CLINSH-Projekt bereits in der LANUV-Modellierung für die Hafengebiete von Duisburg und Neuss und die dazugehörigen Rheinabschnitte eingesetzt.

Emissionen von fahrenden Schiffen auf dem Rhein

Die Emissionsberechnung wurde mit dem Ziel durchgeführt, die Luftbelastung durch Binnenschiffe auf dem Rhein möglichst genau abzubilden und dabei reale Messdaten zu verwenden. Daher wurden sowohl die Schiffsbewegungen als auch die Emissionsfaktoren direkt anhand der tatsächlich fahrenden Schiffe ermittelt.

Zu diesem Zweck wurden die Schiffsbewegungsdaten aus den AIS-Signalen der Schiffe abgeleitet. Diese elektronisch übermittelte Kennung, die jedes Handelsschiff in Intervallen von wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten sendet, enthält unter anderem Informationen über die Größe und den Typ des Schiffes sowie seine Position und Geschwindigkeit.

Klassifizierung der Daten

Die AIS-Daten bieten die Möglichkeit, vorbeifahrende Schiffe nach ihrer Größe, Fahrtrichtung (stromaufwärts/stromabwärts) und Geschwindigkeit zu klassifizieren.

Die Größenklassifizierung erfolgte nach dem Schema der niederländischen "Bureau Voorlichting Binnenvaart" (Abb. 8), das auf der CEMT (Europäische Konferenz der Verkehrsminister, französisch: "Conférence Européenne des Ministres des Transports (CEMT)"), basiert.

Für die Geschwindigkeitsklassifizierung wurden Geschwindigkeitsklassen im Bereich von 0 bis 9 m/s in Schritten von 1 m/s festgelegt. Darüber hinaus wurde eine zusätzliche Klasse für die wenigen Schiffe mit Geschwindigkeiten über 9 m/s definiert. Jede Schiffspassage wurde entsprechend seiner Geschwindigkeit und Fahrtrichtung einer dieser Klassen zugeordnet. Diese Einteilung diente auch als Grundlage für die Bestimmung der Emissionsfaktoren, so dass für

jede Kombination aus Fahrtrichtung, Schiffsgeschwindigkeit und Schiffgröße unterschiedliche Emissionsfaktoren [g/s] ermittelt und den entsprechenden Schiffen über ihre Längensklasse zugeordnet werden konnten.

Berechnung der Emissionen

Im Rahmen des CLINSH-Projekts wurde diese Methode verwendet, um die Emissionen von fahrenden Schiffen für die Rheinkilometer 728 bis 756 und 770 bis 794 in NRW sowie für die Hafengebiete Duisburg und Neuss für das Jahr 2018 zu ermitteln. Im Folgenden wird das Verfahren näher erläutert.

Die Reichweite der AIS-Signale ist abhängig von der Stärke der Sendeanlage und der Montagehöhe der Sendeantenne. So haben Signale von großen Containerschiffen, die ihre Brücke bei voller Beladung um mehrere Meter hochgefahren haben, eine größere Reichweite als die Sendeanlagen von kleineren Frachtschiffen.

Auch die umgebende Geländegeometrie hat einen Einfluss auf die Reichweite der AIS-Signale. Im kurvenreichen und bergigen Mittelrheintal ist sie zum Beispiel deutlich geringer als am flachen Niederrhein.

Die Auswertung der eingehenden AIS-Signale aus den für CLINSH eingesetzten AIS-Empfängern in Duisburg und Neuss ergab einen zuverlässigen Empfang in einer Entfernung von etwa 10 km. Mit zunehmender Entfernung nahm auch die Anzahl der detektierbaren AIS-Signale kontinuierlich ab.

Zwischen den beiden CLINSH-Stationen gab es daher einen Bereich von etwa 14 Kilometern, in dem die Anzahl der empfangenen AIS-Signale deutlich geringer war als erwartet. Da die meisten Schiffe, die den sicheren Empfangsbereich in Neuss erreichen oder verlassen, vermutlich auch den sicheren Empfangsbereich in Duisburg erreichen, wurde die Anzahl der Schiffe für die „nicht sicheren“ Abschnitte interpoliert.

Für jeden Rheinkilometer, für den eine Abdeckung mit einem AIS-Empfänger vorlag, wurde die Emissionsberechnung separat durchgeführt. Aus der Geschwindigkeit der Schiffe lässt sich die Zeit berechnen, die ein Schiff für die Strecke auf dem Rhein benötigt, und damit die Zeitspanne, in der es Schadstoffe ausstößt. Die Emission jedes einzelnen Schiffes errechnet sich aus dem Produkt der Zeit und dem jeweiligen Emissionsfaktor. Die Summe der Emissionen der einzelnen Schiffe ergibt schließlich die Gesamtmenge der Emissionen aller Schiffe, die die beobachteten Rheinabschnitte befahren. Tabelle 4 zeigt einen Auszug aus den Berechnungsdaten, der verdeutlicht, wie die Berechnungen für die einzelnen Rheinkilometer durchgeführt wurden. Die berechneten Emissionen für ausgewählte Rheinkilometer sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 4: Beispiel für die Schiffsdaten, die für die Berechnung der NO_x-Emissionen auf dem Rhein verwendet wurden. Der dargestellte Gesamt-NO_x-Ausstoß wird für den Rhein-Kilometer 782 für das Jahr 2018 berechnet. Die gleiche Berechnung wurde für jeden beobachtet

Rhein-kilometer	Schiffs-klasse	Richtung	Geschwindigkeit über Grund [m/s]	Zeit pro km [s]	Emissionsrate NO _x [g/s]	Emission NO _x [g]
			v	1.000/v = t	EFNOX	t*EFNOX
782	IV (85m)	Bergfahrt	4	250	2.25	563
782	Va (110m)	Talfahrt	6	167	2.27	379
782	Va (110m)	Bergfahrt	5	200	2.19	438
782	IV (85m)	Talfahrt	3	333	2.03	676
...
Gesamte NOX Emission pro Jahr am Rheinkilometer 782:						59 t

Tabelle 5: Emissionen von fahrenden Binnenschiffen auf dem Rhein bei verschiedenen Rheinkilometern

Rheinkilometer	NO _x -Emissionen von Binnenschiffen pro Rheinkilometer [t/yr]		
	2018	2019	2020
730	36.3	35.8	Keine Daten
740 (Neuss Hafen)	53.3	49.0	Keine Daten
750	47.2	42.9	Keine Daten
772	45.5	42.4	39.6
782 (Duisburg Hafen)	85.7	50.1	50.0
792	57.7	48.4	47.1

Die Ergebnisse der Berechnungen mit der beschriebenen neuen Methode zeigen, dass durch fahrende Binnenschiffe im Untersuchungsgebiet von Neuss/Düsseldorf bis Duisburg im Jahr 2018 eine Gesamtmenge von 3.743 t NO_x (1.643t NO_x Düsseldorf/Neuss und 2.100t NO_x Duisburg) emittiert wurde.

Analog zu den Berechnungen für den Rhein wurden für die Berechnung der Emissionen der fahrenden Binnenschiffe in den Häfen von Neuss und Duisburg für das Jahr 2018 die AIS-Signale der Schiffe herangezogen. Sie lieferten Informationen über die Durchschnittsgeschwindigkeit, die einzelnen Schiffsklassen, die Anzahl der im untersuchten Jahr in den jeweiligen Häfen abgefertigten Schiffe, getrennt nach Schiffsklassen und die Positionen der Schiffe in den Häfen, an denen sie festgemacht hatten.

Darüber hinaus wurden, wie oben beschrieben, Emissionsfaktoren für die einzelnen Schiffsgrößen- und Geschwindigkeitsklassen ermittelt. Außerdem wurden die offiziellen Schiffszahlen bei den Hafenbetreibern angefordert. Da diese nicht getrennt nach Schiffsklassen vorlagen, wurden die AIS-Daten mit den offiziellen Zahlen skaliert, so dass die Verteilung der Schiffsklassen aus den AIS-Daten verwendet werden konnte, die Anzahl der Schiffe aber immer noch den Angaben der Hafenbetreiber entsprach.

Wie bei den Berechnungen für den Rhein wurden die Zeiten, die zur Zurücklegung der Strecken in den Häfen benötigt wurden, aus der Geschwindigkeit der Schiffe berechnet. Tabelle 6 zeigt die mittlere Geschwindigkeit über Grund und die Emissionsfaktoren für die einzelnen Schiffsklassen, die in die Berechnungen der Emissionen eingeflossen sind.

Tabelle 6: Geschwindigkeitsklasse und Emissionsfaktoren, die für die Berechnung der Emissionen der fahrenden Schiffe in den Häfen von Duisburg und Neuss verwendet wurden

Hafen	Schiffsklasse	Geschwindigkeitsklasse [m/s]	Emissionsrate [g/s]
Duisburg	I Frachter- oder Tanker	2.5	0.31
	I andere	2.5	0.56
	II	2.5	0.45
	III	1.5	0.55
	IV	1.5	0.5
	Jowi Klasse	1.5	0.55
	Koppelverband	1.5	0.63
	Va	1.5	0.52
	Vb	1.5	0.57
	Vla	1.5	0.62
	VIb	1.5	0.37
	VIc	1.5	0.38
	Nicht klassifiziert	1.5	0.63
	Nicht klassifiziert, groß	1.5	0.63
Neuss	I Frachter- oder Tanker	0.5	0.42
	I andere Schiffe	1.5	0.27
	II	1.5	0.43
	III	1.5	0.55
	IV	1.5	0.5
	Jowi Klasse	0.5	0.39
	Koppelverband	0.5	0.32
	Va	1.5	0.52
	Vb	0.5	0.36
	Vla	0.5	0.34
	VIb	0.5	0.14
	VIc	0.5	0.38
	Nicht klassifiziert	1.5	0.63

Mit diesen Informationen war es möglich, jedem Schiff eine Geschwindigkeitsklasse und einen Emissionsfaktor entsprechend der Schiffsgrößenklasse zuzuordnen. Die Emissionen wurden dann für jedes Schiff separat berechnet, indem die Zeit, die für die Zurücklegung der Strecken im Hafen benötigt wurde, mit dem jeweiligen Emissionsfaktor multipliziert wurde. Es wurde jeweils mit dem Mittelwert der Geschwindigkeitsklasse gerechnet. (Beispiel : Klasse 2-3 m/s = 2,5 m/s). Die Gesamtemissionen wurden schließlich aus der Summe der Teilemissionen aller Schiffe berechnet.

Bei der Berechnung der Emissionen musste berücksichtigt werden, dass die Schiffe nicht gleichmäßig im Hafen verteilt sind. So fahren einige Schiffe durch den gesamten Hafen bis in das am weitesten entfernte Becken, während andere nah an der Hafeneinfahrt festmachen. Diesem Umstand wurde wie unten beschrieben Rechnung getragen.

Da die einzelnen Schiffe je nach Liegeplatz unterschiedliche Bereiche des Hafens durchfahren, wurden jeweils Linienquellen definiert, die den Fahrweg im Hafengebiet beschreiben (Abbildung 16, Abbildung 17).



Abbildung 16: Definierte Emissionslinienquellen von fahrenden Schiffen im Duisburger Hafen

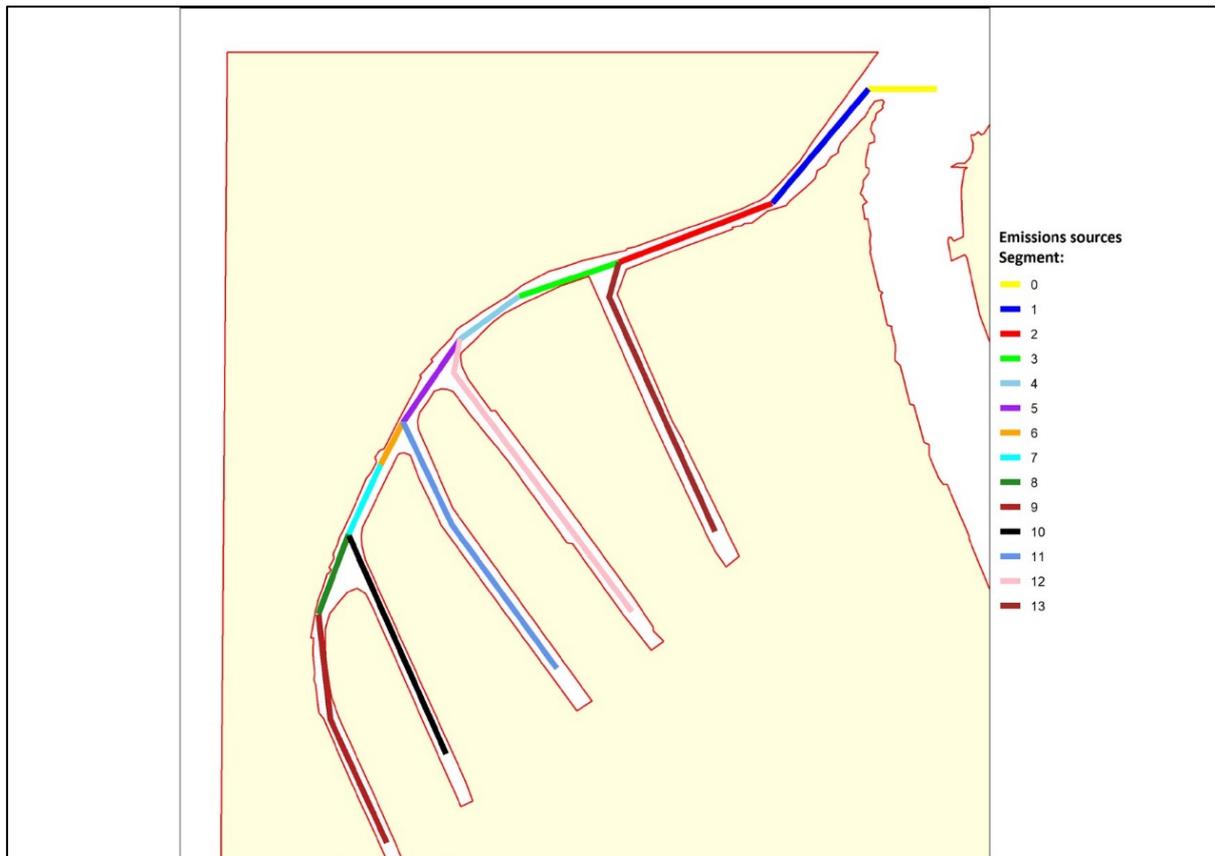


Abbildung 17: Definierte Emissionslinienquellen von fahrenden Schiffen im Hafen von Neuss

Für die unterschiedlich gefärbten Segmente in diesen Grafiken wurden die Emissionsbeiträge der einzelnen Schiffe separat addiert, wobei berücksichtigt wurde, dass nur ein Teil der Schiffe jedes einzelne Segment durchfährt. So passieren im Neusser Hafen noch alle einlaufenden Schiffe das Segment 0, während das Segment 13 nur von Schiffen durchfahren wird, die bis zum Becken 1 weiterfahren. Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen, welche Schiffe im jeweiligen Liniensegment berücksichtigt wurden.

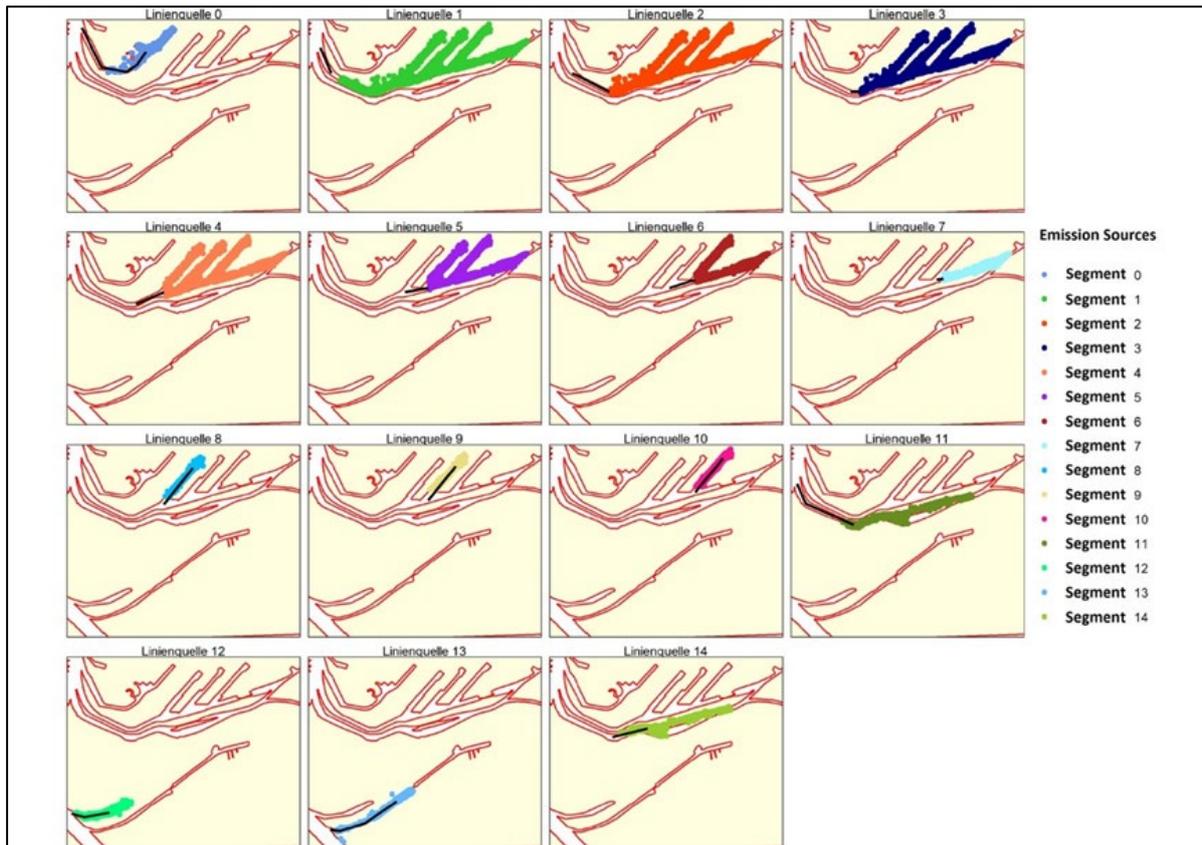


Abbildung 18: Zuordnung der Schiffe zu den Linienquellen der Schifffahrtswege im Duisburger Hafen. Die schwarzen Linien zeigen die einzelnen Emissionsquellen und die farbigen Punkte zeigen die Schiffe, die bei der Berechnung der jeweiligen Emissionsquelle berücksichtigt wurden.

Für alle Schiffe im Hafenbetrieb wurde davon ausgegangen, dass jedes Schiff, das in den Hafen einläuft, diesen auf demselben Weg wieder verlässt, so dass die Emissionen für jedes Segment der Linienquellen mit dem Faktor zwei multipliziert wurden. Tabelle 7 zeigt die berechneten Emissionen. Für den Schiffsverkehr zu den Schleusen wurde pro Schleusungsvorgang jeweils nur die einfache Strecke berechnet.

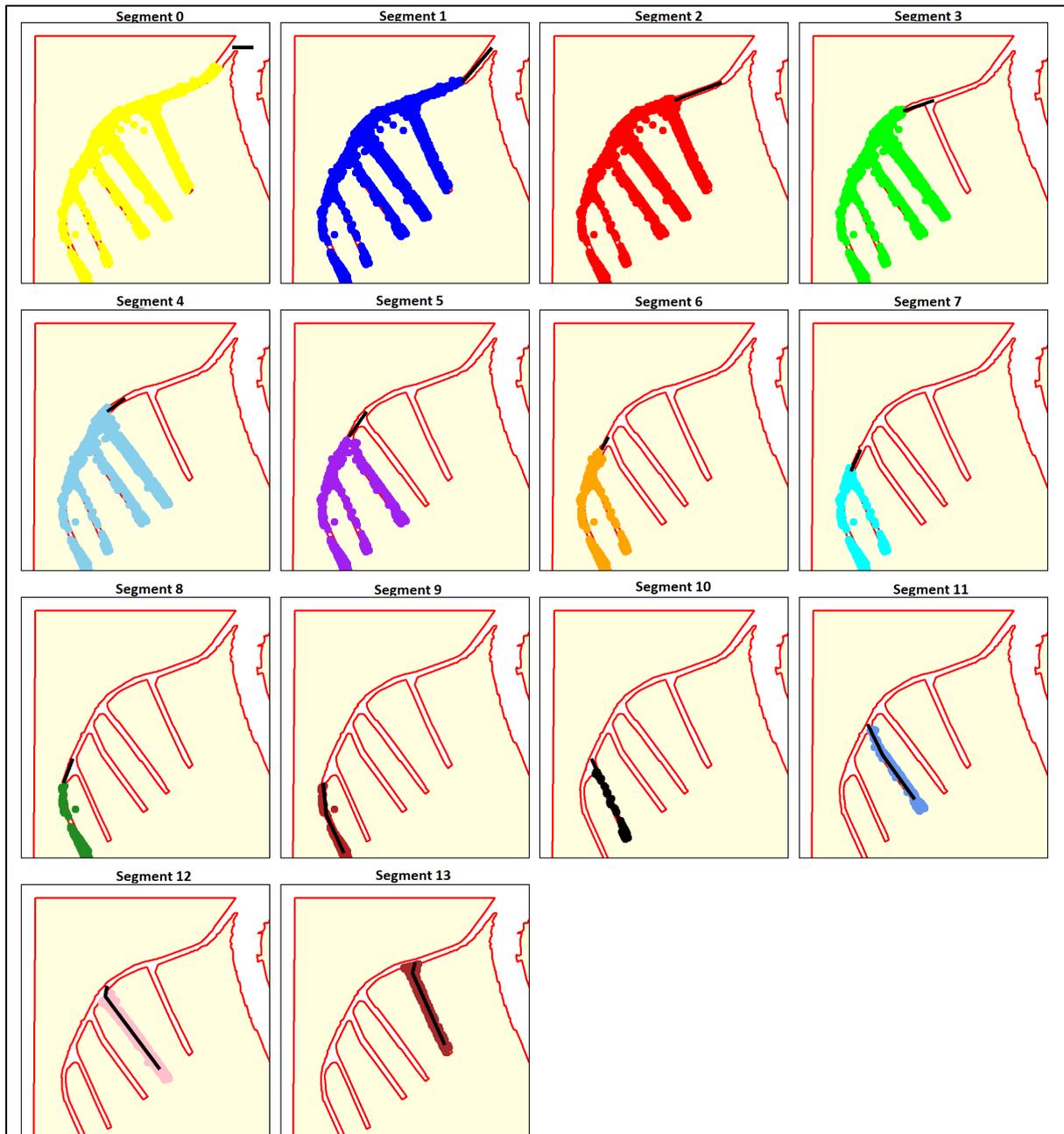


Abbildung 19: Zuordnung der Schiffe zu den Linienquellen der Schifffahrtswege im Neusser Hafen. Die schwarzen Linien zeigen die einzelnen Emissionsquellen und die farbigen Punkte zeigen die Schiffe, die bei der Berechnung der jeweiligen Emissionsquelle berücksichtigt wurden.

Tabelle 7: Gesamte NO_x-Emissionen durch fahrende Schiffe in t/a für jeden Abschnitt innerhalb von DURH und NERH

Hafen	Emissionsquelle	NO _x -Emission [t/a]
Duisburg	Segment 0	4.9
	Segment 1	4.9
	Segment 2	7.3
	Segment 3	1.7
	Segment 4	5.0
	Segment 5	2.7
	Segment 6	2.9
	Segment 7	0.7
	Segment 8	2.3
	Segment 9	0.4
	Segment 10	0.7
	Segment 11	2.1
	Segment 12	1.9
	Segment 13	3.3
	Segment 14	0.4
total	41.2	
Neuss	Segment 0	1.6
	Segment 1	3.5
	Segment 2	3.8
	Segment 3	1.6
	Segment 4	1.0
	Segment 5	0.6
	Segment 6	0.2
	Segment 7	0.4
	Segment 8	0.3
	Segment 9	0.9
	Segment 10	0.2
	Segment 11	0.4
	Segment 12	2.0
	Segment 13	2.1
total	18.6	

Die Ergebnisse für das Jahr 2018 zeigen, dass durch die im Hafen und zu den Schleusen fahrenden Schiffe im Duisburger Hafen 41 t NO_x emittiert wurden. Für den Neusser Hafen ergab sich eine Emissionsmenge von knapp 19 t NO_x für das gleiche Jahr (Tab. 7).

6 Fazit

Frühere Schätzungen der Emissionen der Binnenschifffahrt erforderten eine Vielzahl von Annahmen über den Schiffsverkehr, die Motorisierung, die Schiffsgeschwindigkeit, den Kraftstoffverbrauch und das Emissionsverhalten der jeweiligen Motoren, da direkte Emissionsmessungen des realen Verkehrs nicht verfügbar waren.

Jede dieser Annahmen hat auch eine gewisse Fehlermarge. Wenn eine große Anzahl von Annahmen in solche Schätzungen einfließt, können große Unsicherheiten bei den resultierenden Emissionen entstehen.

Im Rahmen des CLINSH-Projekts wurde eine neue Methode zur Berechnung der Emissionen von Binnenschiffen entwickelt, die es durch die Verwendung von AIS-Daten und Onshore-Emissionsfaktoren ermöglicht, die Berechnungen auf der Grundlage der tatsächlich registrierten Schiffsdaten durchzuführen.

Diese neue Methode bietet die Möglichkeit, bestehende Unsicherheiten zu beseitigen, die im derzeitigen Emissionskataster für Binnenschiffe in NRW durch bisher notwendige Schätzungen entstehen können. Das Verfahren konnte bereits anhand von Emissionsberechnungen für fahrende Schiffe auf dem Rhein und in den Häfen Duisburg und Neuss angewendet werden. Es ist geplant, dieses Verfahren bei der zukünftigen Fortschreibung des Binnenschiffs-Emissionskatasters des Landes Nordrhein-Westfalen für die Emissionsermittlung einzusetzen.

7 Ausblick

Die neu entwickelte Methode bietet die Möglichkeit, die NO_x-Emissionen der Binnenschifffahrt auf der Basis von direkten Messungen an Land realistischer abzuschätzen. Eine wichtige Grundlage dafür ist die Erfassung und Klassifizierung des realen Schiffsverkehrs nach Schiffsgrößenklasse, Geschwindigkeit über Grund und Berg- und Talfahrt. Damit stehen erstmals Daten des realen Schiffsverkehrs für eine Abschätzung der Emissionen zur Verfügung.

Mit den automatischen Messstationen war es möglich, für mehr als 19.000 Schiffspassagen in den Jahren 2018-2020 bei geeigneter Windrichtung die NO_x-Emissionsspitzen der vorbeifahrenden Schiffe zu erfassen und die verursachenden Schiffe anhand von AIS-Daten zu identifizieren. Mit Hilfe des Gauß-Wolken-Modells konnten aus diesen Onshore-Messungen Emissionsfaktoren berechnet werden. Damit standen für CLINSH bereits rund 19.000 Onshore-Emissionsfaktoren zur Klassifizierung nach Schiffsgrößenklasse, Geschwindigkeit über Grund und Fahrt stromaufwärts/stromabwärts zur Verfügung, mit denen sich die Emissionen des gesamten Schiffsverkehrs ermitteln lassen. Ein weiterer Vorteil dieser Faktoren ist, dass nicht nur die Emissionen der Hauptmaschine, sondern auch die Emissionen von Hilfsaggregaten wie Bugstrahlruder etc. einbezogen werden.

Die im Zeitraum 2018-2020 erhobenen Emissionsfaktoren wurden vom LANUV im Rahmen von CLINSH bereits für die Hafengebiete Duisburg und Neuss/Düsseldorf zur Berechnung der schiffverkehrsbedingten Emissionen angewendet. Die Methode und die Ergebnisse sind in diesem Bericht in Kapitel 3 dargestellt.

Weitere Erläuterungen sind auch im CLINSH-Bericht des LANUV "Hafenmonitoring Teil C: Emissionsinventare der Neusser und Duisburger Hafengebiete" und im LANUV "Fachbericht 123: Hafenmonitoring Teil B: Emissionsinventare der Neusser und Duisburger Hafengebiete".

Inzwischen sind auch die Messergebnisse der DURH-Messstation in Duisburg am Rhein für das Jahr 2021 ausgewertet worden. Daraus ergeben sich rund 8.000 zusätzliche Emissionsfaktoren für die auf dem Rhein fahrenden Schiffe. Diese Ergebnisse bestätigen die Validität der bisherigen Auswertungen.

Bei der Aktualisierung der Emissionsfaktoren mit diesen neuen Daten kommt es nur zu geringen Änderungen in der ersten Nachkommastelle und häufiger nur in der zweiten Nachkommastelle. Gleichzeitig steigt die Zahl der Beobachtungen erheblich, insbesondere für die häufigsten Schiffsklassen (IV (85 m); Va (110 m) und Vb (135 m)), die zusammen mehr als 80 % des Schiffsverkehrs auf dem Niederrhein ausmachen.

Die Dauermessstation in Duisburg wird auch in den kommenden Jahren in Betrieb bleiben. Es ist geplant, die Messungen in der in diesem Bericht beschriebenen Weise weiter auszuwerten, um die Qualität der abgeleiteten Emissionsraten zu verbessern.

Das LANUV wird die anstehende Aktualisierung seines Emissionskatasters "Binnenschiffe" sowohl auf der Grundlage der Erfassung des realen Schiffsverkehrs über die Auswertung der AIS-Signale als auch unter Anwendung der an Land gemessenen Emissionsfaktoren der Schiffe für NO_x durchführen.

8 Literaturverzeichnis

Briggs, G. A. (1973): Diffusion estimation for small emissions. Preliminary report. United States, 1973. Online verfügbar unter <https://www.osti.gov/biblio/5118833>, zuletzt geprüft am 25.01.2021.

Bureau Voorlichting Binnenvaart (BVB); /www.bureauvoorlichtingbinnenvaart.nl, Types of vessels, Internet 15.03.2021.

DWD Climate Data Center (CDC): Historical 10-minute station observations of solar incoming radiation, longwave downward radiation and sunshine duration for Germany, version V1, zuletzt geprüft am 16.11.2020.

DWD Climate Data Center (CDC): Selected 81 stations, distributed over Germany, in the traditional KL-standard format, version recent, zuletzt geprüft am 16.11.2020.

LANUV 2021a: Fachbericht 115, Hafenmonitoring: Luftqualität auf dem Rhein und in den Binnenhäfen von Duisburg und Neuss/Düsseldorf - Teil A: Immissionsseitige Effekte der Emissionen aus Schiffs- und Hafenbetrieb auf die Luftbelastung mit Stickoxiden.

LANUV 2021b: Fachbericht 122, LANUV 2021: Analyse des Schiffsverkehrs auf dem nordrhein-westfälischen Niederrhein in den Jahren 2018-2020 für das EU-Life-Projekt "CLINSH".

Pasquill, Frank (1968): Atmospheric diffusion. The dispersion of windborne material from industrial and other sources. 1st publ. 1962, repr. London: Van Nostrand.

9 CLINSH-Partner



Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de