Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen

Bestimmung der NO_x- und Feinstaub-emissionen (PM_{10}) von Binnenschiffen am Liegeplatz

LANUV-Fachbericht 119

LANUV
Kompetenz für ein lebenswertes Land

CLINSH

Bestimmung der NO_x- und Feinstaub-emissionen (PM_{10}) von Binnenschiffen am Liegeplatz

LANUV-Fachbericht 119

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Recklinghausen 2021

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

Bearbeitung
Dr. Dieter Busch, Anton Bergen (LANUV)

Dieser Bericht ist ein Teilbericht des CLINSH-Projektes LIFE15 ENV/NL/000217 „CLean IN-land SHipping (CLINSH)“. CLINSH ist ein LIFE+-Projekt der EG, das mit dem Beitrag des LIFE-Finanzierungsinstruments der Europäischen Gemeinschaft durchgeführt wird. 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
©AdobeStock_etfoto

Stand
November 2021

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

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

Gute Luft zum Atmen ist eine wesentliche Grundlage für die Erhaltung der Gesundheit. Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) ist in Nordrhein-Westfalen sowohl für das Messnetz zur Luftqualität als auch für die Ermittlung der Belastungsanteile der einzelnen Schadstoffquellen zuständig. Um einen Überblick über die einzelnen Emissionsquellen zu bekommen, wurden landesweite Emissionskataster aufgelegt, die für Nordrhein-Westfalen vom LANUV gepflegt werden. Die erfassten Emissionen der unterschiedlichen Quellen werden u. a. dazu verwendet, um die Anteile der verschiedenen Verursachergruppen an der Immissionsbelastung per Modellrechnung zu ermitteln. Mit den Ergebnissen lassen sich Maßnahmenkonzepte entwickeln, die gezielt bei den Verursachern zur Emissionsminderung führen.

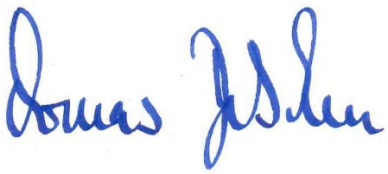
Auch für die Binnenschifffahrt in Nordrhein-Westfalen ist bereits ein Emissionskataster vorhanden, dessen Datengrundlage nun im Rahmen des europäischen CLINSH-Projektes deutlich verbessert wurde. Die Emissionen der in den Häfen liegenden Schiffe und des Hafenbetriebes wurden bisher nur pauschal aus Frachtstatistiken über den Güterumschlag abgeleitet. Daten zum eigentlichen Schiffsverkehr in den Häfen wie Anzahl der Schiffe, Liegeorte und Liegezeiten konnten nicht erfasst werden.

Das LANUV hat im Rahmen des CLINSH-Projektes eine Methodik zur besseren Erfassung der Emissionen der liegenden Schiffe entwickelt, die eine realitätsnähere Berechnung der Emissionen an Stickoxiden und Feinstaub ermöglicht, die durch die Stromversorgung der Schiffe entstehen.

Hierbei wurden die Anzahl der die Häfen anlaufenden Schiffe, deren Liegezeiten und die Emissionsfaktoren der an Bord befindlichen Stromgeneratoren in die Emissionsberechnungen einbezogen. Damit können erstmals auch Fragestellungen zu Emissionen und deren Wirkungen in einzelnen Hafenbereichen oder an einzelnen Liegeplätzen, z.B. für die stadtnahen Anleger der Flusskreuzfahrtschiffe beantwortet werden.

Das Verfahren ist grundsätzlich auch für andere Binnenhäfen oder Liegeplätze von Binnenschiffen anwendbar. Es ermöglicht eine sehr viel realistischere Erhebung der Schiffsemissionen und deren Einfluss auf die Luftqualität.

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



Dr. Thomas Delschen
Präsident des Landesamtes für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Inhalt

Abbildungsverzeichnis 7

Tabellenverzeichnis 8

1 Einleitung 11

2 Erforderliche Daten zur Bestimmung der Emissionen aus der Stromerzeugung 12

2.1 Fracht- und Tankerschiffe am Liegeplatz ohne bordseitige Ladetätigkeit 12
2.2 Entladevorgänge bei Tankschiffen 13

3 Daten über den Bestand an Generatoren auf Fracht- und Tankschiffen 14

3.1 Leistung und Alter der "kleinsten" Generatoren 14
3.2 Emissionswerte der "kleinsten" und "größten" Generatoren 19

3.2.1 Auswertung der Datenbankeinträge zu den Emissionsstufen 19
3.2.2 Klassifizierung von Schiffsgeneratoren ohne Informationen zur Emissionsstufe und Zusammenfassung der Zertifizierung nach EU- und ZKR-Anforderungen 19

3.3 Gesamtbewertung der Verteilung der auf den Schiffen vorhandenen Emissionsstufen 21

4 Dieselverbrauch und Emissionsfaktoren der "kleinsten" Generatoren 23

4.1 Dieselverbrauch im Kleinlastbereich 23
4.2 Emissionsfaktoren 25
4.3 Gruppierung der Generatoren zu TREMOD-Emissionswerten 27
4.4 Grundlage der Berechnungen 27

5 Abschätzung der Emissionen von Binnenschiffen am Liegeplatz beim Betrieb der jeweils "kleinsten" Generatoren 30

5.1 Fracht- und Tankschiffe ohne schiffsseitige Ladetätigkeit 30

5.2 Reale Berechnung der Emissionen von Tankschiffen 33

5.2.1 Transportwege und erwartete Ladevorgänge 33
5.2.2 Ladekapazitäten der Tankschifftypen auf dem Rhein in NRW 34
5.2.3 Be- und Entladeverfahren für Tankschiffe 34

5.2.3.1 Ladevorgänge 34
5.2.3.2 Entladevorgänge 34
5.2.3.3 Kapazität der kleinsten und "größten" Generatoren auf Tankschiffen 35

5.3 Berechnung der Emissionen aus dem realen Tankerverkehr auf der "Ölinsel" im Duisburger Hafen für das Jahr 2018 37

6 Abschätzung der Emissionen von Passagierschiffen (Kreuzfahrt- und Hotelbetrieb) 39

6.1 Energiebedarf liegender Flusskreuzfahrtschiffe 39
6.2 Generatorenausstattung von Flusskreuzfahrtschiffen 41
6.3 Abschätzung der zu erwartenden Emissionsmengen von Flusskreuzfahrtschiffen an innenstadtnahen Liegeplätzen. 47

6.4 Genauere Abschätzungen der von Kreuzfahrtschiffen emittierten Schadstoffmengen auf Basis einer realen Erfassung des Energieverbrauchs in Nijmegen 48
6.4.1 Klassifizierung der Schiffe in den OPS-Einrichtungen in Nijmegen 48
6.4.2 Abschätzung der eingesparten Emissionen durch die Onshore-Stromversorgungsanlagen (OPS) in Nijmegen 49
7 Emissionen von Schiffen am Liegeplatz durch die Schiffsheizung 50
8 Berechnungen für die Häfen Duisburg und Neuss 52
8.1 Art und Anzahl von Schiffen an den Liegeplätzen 52
8.1.1 Schiffszahlen für den Hafen Duisburg 52
8.1.2 Schiffszahlen für den Hafen Neuss 53
8.2 Lokalisierung der genutzten Liegeplätze 53
8.3 Emissionsberechnungen für liegende Frachtschiffe 54
8.4 Emissionsberechnungen für liegende Tankschiffe 55
8.4.1 Tankschiffszahlen im Hafen Duisburgs 55
8.4.2 Tankschiffszahlen im Hafen Neuss 56
8.5 Emissionen liegender Schiffe in den Häfen Duisburg und Neuss 57
8.6 Maßnahmen zur Minderung der Emissionen liegender Schiffe 60
9 Ausblick 61
10 Danksagung 62
11 Literaturverzeichnis 63
12 CLINSH-Partner 64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tankschiffe an der Ölinsel in Duisburg 13

Abbildung 2: Größenklassen der Fracht- und Tankschiffe in diesem Bericht, analog zur CEMT-Klassifizierung 15

Abbildung 3: Modernes 85-m-Tankschiff 22

Abbildung 4: Spezifischer Brennstoffverbrauch von Generatoraggregaten in Abhängigkeit von der Last. Modifiziertes Diagramm aus der "Walstroom-Studie" der TU Delft 23

Abbildung 5: Extrapolation des spezifischen Kraftstoffverbrauchs von Generatoraggregaten auf den Niedriglastbereich von 8 % Auslastung. Modifiziertes Diagramm aus der Waalstrom-Studie 24

Abbildung 6: Modernes 110-m-Frachtschiff im Hafen von Neuss 31

Abbildung 7: Ein 135-m-Containerschiff im Duisburger Hafen 32

Abbildung 8: Drei Flusskreuzfahrtschiffe und ein Tagesausflugsschiff liegen vor der Kölner Altstadt. Im Vordergrund ein 135 m Frachtschiff 44

Abbildung 9a: Anzahl der liegenden Schiffe im Hafen Duisburg über die Auswertung von AIS-Signalen 53

Abbildung 9b: Anzahl der liegenden Schiffe im Hafen Neuss über die Auswertung von AIS-Signalen 54

Abbildung 10: Georeferenzierte Emissionen der liegenden Schiffe im Hafen Duisburg im Jahr 2018 58

Abbildung 11: Georeferenzierte Emissionen der liegenden Schiffe im Hafen Neuss im Jahr 2018 59

Abbildung 12: Tankschiff an der Ladeeinrichtung des Tanklagers von Oiltanking in Duisburg 60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1a: Überblick über die analysierten Daten der Frachtschiffe....16

Tabelle 1b: Übersicht über die analysierten Daten zu Tankschiffen....17

Tabelle 2: Übersicht über die Auswertung der „kleinsten“ Generatoren....19

Tabelle 3: Inkrafttreten der jeweiligen Emissionsregelungen....20

Tabelle 4a: Kombination der verschiedenen Ansätze zur Ermittlung der jeweiligen Emissionswerte für die "kleinsten" Generatoren der Frachtschiffe....21

Tabelle 4b: Kombination der verschiedenen Ansätze zur Ermittlung der jeweiligen Emissionswerte für die "kleinsten" und "größten" Generatoren der Tankschiffe der Größenklassen IV, Va und Vb....22

Tabelle 5: Abschätzung des Dieselverbrauchs der "kleinsten" Generatoren auf Fracht- und Tankerschiffen im Niedriglastbereich von ca. 8 % der Kapazität ("Walstroom-Studie")....24

Tabelle 6: Emissionsfaktoren TREMOD-MM 5.11, Dieselgeneratoren, Mittelwert 2020....25

Tabelle 7a: TREMOD-Basisemissionsfaktoren für mobile Dieselmotoren mit Anpassung für den Niedriglastbereich (8 % Lastfaktor)....26

Tabelle 7b: TREMOD-Basisemissionsfaktoren für mobile Dieselmotoren der Leistungsklasse 130-299 kW....26

Tabelle 8: Basistabelle für NO_X-Emissionsmengen von Fracht- und Tankschiffen am Liegeplatz aus Dieselaggregaten mit unterschiedlicher Emissionscharakteristik im Niedriglastbereich....28

Tabelle 9: Basistabelle für PM_{10}-Emissionsmengen von Fracht- und Tankschiffen am Liegeplatz aus Dieselgeneratoren mit unterschiedlichen Emissionscharakteristiken im Niedriglastbereich....29

Tabelle 10a: Abschätzung der NO_X-Emissionen der Generatoren von Fracht- und Tankschiffen (ohne Ladetätigkeit an Bord) am Liegeplatz, unter Berücksichtigung der Zusammensetzung der Emissionswerte der "kleinsten" Generatoren....31

Tabelle 10b: Abschätzung der PM_{10} (Feinstaub)-Emissionen der Stromgeneratoren an den Liegeplätzen von Schiffen und Tankschiffen ohne schiffsseitige Ladetätigkeit, unter Berücksichtigung der Zusammensetzung der Emissionswerte der "kleinsten" Stromerzeuger....32

Tabelle 11: Technische Daten von Tankschiffen der Längenklassen IV, Va und Vb....34

Tabelle 12: Durchschnittliche Ladezeiten von Tankschiffen in den Längenklassen IV, Va und Vb bei Aufnahmekapazität der Landanlage 400 m³/h....35

Tabelle 13: Leistungsstrukturen (durchschnittliche Leistung) der "kleinsten" und „größten“ Generatoren auf Tankschiffen....35

Tabelle 10c: Abschätzung der NO_X- und PM_{10}-Emissionen (Feinstaub) der Stromgeneratoren von verankerten Tankschiffen mit Ladetätigkeit an Bord, unter Berücksichtigung der Zusammensetzung der Emissionswerte der "größten" Generatoren....36

Tabelle 14: Beladungs- und Entladungsvorgänge an der „Ölinsel“ im Hafen Duisburg im Jahr 2018 37

Tabelle 15: Abschätzung der NO_X- und PM_{10}-Emissionen der Tankschiffe, die an der "Ölinsel" im Hafenbecken A in Duisburg be- oder entladen werden, für das Jahr 2018 38

Tabelle 17: Leistungsbedarf (kW) von Flusskreuzfahrtschiffen mit Passagieren am Liegeplatz. Auswertung der realen Stromverbrauchsdaten an Landstromanlagen in Nijmegen (2019-2020)....40

Tabelle 18: Durchschnittliche Anzahl von Passagieren und Besatzungsmitgliedern für die einzelnen Schiffsgrößen und zugehöriger durchschnittlicher Leistungsbedarf (kW) für Anlegephasen während einer Kreuzfahrt. 41

Tabelle 19: TREMOD-Basisemissionsfaktoren für mobile Dieselmotoren der Leistungsklasse 130-299 kW 42

Tabelle 20: Zusammensetzung des Generatorpools auf Kabinenschiffen gemäß Auszug aus der deutschen ZBBD-Datenbank 43

Tabelle 21: Zusammensetzung der Generatoren auf Kreuzfahrtschiffen nach verschiedenen Emissionsstufen (TREMOD) 44

Tabelle 22a: Abschätzung der durchschnittlichen NO_X-Emissionen von liegenden Kreuzfahrtschiffen mit Besatzung und Passagieren 45

Tabelle 22b: Abschätzung der durchschnittlichen PM_{10}-Emissionen von liegenden Kreuzfahrtschiffen mit Besatzung und Passagieren 46

Tabelle 23: Schadstoffemissionen von anlegenden Flusskreuzfahrtschiffen mit Passagieren 47

Tabelle 24: Klassifizierung der besuchenden Kreuzfahrtschiffe an den OPS-Einrichtungen in Nijmegen 49

Tabelle 25: Abschätzung der eingesparten Emissionsmengen im Jahr 2019 durch die vier OPS-Systeme in Nijmegen 49

Tabelle 26: Mittlere Emissionsfaktoren für kleine und mittlere KuMFA-Feuerungsanlagen ohne Rauchgasreinigung, Stand: 5. Februar 2018 für den Bericht 2016 50

Tabelle 27: Abschätzung der Emissionen aus den Heizungsanlagen der liegenden Schiffe. 51

Tabelle 28a: Verteilung der Schiffe auf die einzelnen Hafenbereiche in Duisburg 52

Tabelle 28b: Verteilung der Schiffe auf die einzelnen Hafenbereiche in Neuss 53

Tabelle 29: Berechnete Emissionen der liegenden Frachtschiffe und der sonstigen Schiffe in Ruheposition für die einzelnen Hafenbecken 55

Tabelle 30: Ladevorgänge von Tankschiffen im Hafen Duisburg 56

Tabelle 31: Ladevorgänge von Tankschiffen im Hafen Neuss 56

Tabelle 32: Emissionsbilanzierung der in den Häfen liegenden Schiffe im Jahr 2018 57

1 Einleitung

Die Emissionen der Binnenschifffahrt sind im Rahmen der Diskussionen um die Einhaltung der durch die EU-Luftqualitätsrichtlinie zwingend vorgegebenen Grenzwerte für die Belastung der Luft mit Stickstoffdioxid (NO_2) und Feinstaub (PM_{10}) immer wieder als potentieller Belastungsfaktor identifiziert worden. Das bisherige, vom LANUV für NRW geführte Emissionskataster für den Schiffsverkehr in NRW (LANUV-Fachbericht Nr. 67) ermöglichte eine Abschätzung der Größenordnung der Emissionen der auf den Wasserstraßen fahrenden Schiffe.

Nicht nur die fahrenden Schiffe, sondern auch die in den Häfen liegenden Schiffe verursachen durch den Betrieb der an Bord laufenden Elektro-Generatoren zusätzliche Emissionen, deren tatsächliche Menge genauer bestimmt werden sollte. Für die Ermittlung dieser Emissionen aus dem Lade- und Liegebetrieb in den Häfen in NRW war bisher keine befriedigende Methodik vorhanden.

Diese Emissionen wurden auf der Basis des Güterumschlages als Flächenquellen abgeschätzt. Die Datengrundlage dafür stammte aus verschiedenen Tabellenwerken der Bundesministerien zum Güterverkehr auf dem Rhein und anderen Wasserstraßen. Diese grob geschätzten Emissionsmengen waren nicht besonders befriedigend und gingen als „Flächenquellen“ in die Modellierungen zu den Luftreinhalteplänen ein.

Im Rahmen des EU-Life-Projektes „Clean Inland Shipping (CLINSH)“ stellte sich heraus, dass auch bei den anderen CLINSH-Partnern keine befriedigende Methode zur Bestimmung dieser Emissionen vorhanden war. Teilweise wurden sogar anhand von prozentualen Leistungen der Hauptmaschine ab- und damit deutlich überschätzt. Für die direkte Abschätzung der durch Binnenfracht-, Tank- und Kreuzfahrtschiffe am Liegeplatz verursachten Emissionen gab es bisher keine verlässliche, differenzierte Datengrundlage.

Im Rahmen von CLINSH hat das LANUV daher eine Methodik entwickelt, um eine realitätsnähere Abschätzung der Emissionen der in den Häfen Duisburg und Neuss liegenden Schiffe durch Stromerzeugung und Heizung zu ermöglichen. Hierbei wurden die Emissionsquellen „Stromerzeugung durch Generatoren“ und „Schiffsheizung mittels handelsüblicher Ölbrenner“ untersucht.

Die neue Berechnungsmethode verwendet die Zahl der tatsächlich den Hafen anlaufenden Schiffe und die mittleren Liegezeiten. Um tatsächlichen Emissionen besser abschätzen zu können, wurde die Zusammensetzung der gegenwärtig auf den Schiffen installierten Generatoren hinsichtlich ihrer Leistung, ihres Alters und, bei den „jüngeren“ Generatoren, der für sie geltenden Emissionsbestimmungen (Emissionsstufen) untersucht.

Mit der in diesem Bericht beschriebenen Methode ist es nunmehr möglich, ein realistischeres Bild der durch liegende Schiffe verursachten Emissionsmengen zu gewinnen. Es ist zudem gelungen, die Emissionsquellen liegende Frachtschiffe, Tankschiffe und Flusskreuzfahrtschiffe als Linien- bzw. Punktquellen besser zu charakterisieren, zu quantifizieren und zu lokalisieren. Diese Methode wurde im Rahmen von CLINSH bereits für weitere Häfen und Liegestellen angewandt und kann auch für beliebige andere Häfen verwendet werden.

2 Erforderliche Daten zur Bestimmung der Emissionen aus der Stromerzeugung

2.1 Fracht- und Tankerschiffe am Liegeplatz ohne bordseitige Ladetätigkeit

Ein liegendes Schiff benötigt Strom für die Bordelektrik, z.B. für Beleuchtung, Küche (Herd, Kühlschrank, etc.), Wohnbereich und Büro (Fernseher, Radio, Computer, etc.). Der Energiebedarf eines normalen Frachtschiffes entspricht in etwa dem Bedarf eines Haushalts mit drei bis vier Personen. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Binnenschiff während der Liegezeiten eine durchschnittliche Leistung von 1-2 kW benötigt, wenn die Energieversorgung für die Be- und Entladevorgänge landseitig bereitgestellt wird. Diese Energiemenge ergibt sich aus Umfragen des LANUV bei Schiffsführern, Binnenschifffahrtsreedereien und aus der Studie "Walstroom versus Generatorstroom" der TU Delft (2012) (1).

Die Stromversorgung von liegenden Schiffen erfolgt in der Regel durch einen der Dieselgeneratoren an Bord. Eine wichtige Grundlage für die Emissionsberechnungen ist daher die Kenntnis der in der Binnenschifffahrtsflotte vorhandenen Generatoranlagen und deren Emissionsverhalten. Es kann davon ausgegangen werden, dass für den Strombedarf bei den Liegezeiten der kleinste Generator an Bord im Niedriglastbereich betrieben wird. Für die Abschätzung der Emissionen für den Strombedarf der liegenden Frachtschiffe wurde ein konservativer Ansatz von 2 kW pro Stunde gewählt. Für moderne Doppelhüllen-Tankschiffe (Längenklassen 85-130 m) ergab die Befragung der Reedereien einen höheren Grundbedarf von ca. 8-9 kW. Dieser Bedarf entsteht z.B. durch den zusätzlichen Betrieb von Lüftungsanlagen (Explosionsschutz).

Für die Abschätzung der Emissionsmenge, die von Fracht- und Tankschiffen am Liegeplatz verursacht wird, sind folgende Daten notwendig:

- Anzahl der Schiffe am Liegeplatz,
- Unterscheidung in Tank- und Frachtschiffe (Schiffstyp).
- Klassifizierung nach Größen-(Längen-)klassen der Schiffe.
  a) Ermittlung der durchschnittlichen Leistung der jeweils "kleinsten" Generatoren pro Schiffstyp und Schiffsklasse.
  b) ggf. Zusammenfassung der Generatoreigenschaften von Schiffsklassen.
- Anteile der verschiedenen Emissionsstufen im Generatorpool der Schiffsklassen.
- Emissionsfaktoren für die verschiedenen Emissionsstufen gemäß der Fortschreibung der gesetzlichen Regelungen (TREMOD) (4).
- Dieselverbrauch (g/kWh) der Generatoren im Niedriglastbereich.
- Ermittlung eines Emissionsfaktors für den „durchschnittlichen kleinsten Flottengenerator“ aus der Zusammensetzung des Generatorenpools (Prozentuale Anteile der Generatoren der verschiedenen Emissionsstufen).
- Annahme einer Leistungsaufnahme von ca. 2 kW für Frachtschiffe, 9 kW für Tankschiffe (konservative Schätzung).
- Ermittlung der durchschnittlichen Liegezeiten.
  Lokalisierung der Liegeplätze mittels AIS-Daten zur Bestimmung der Eigenschaften der Emissionsquellen (z.B. Linienquelle längs der Kaimauer).

2.2 Entladevorgänge bei Tankschiffen

Bei Tankschiffen kann davon ausgegangen werden, dass beim Entladen der Schiffe zusätzliche Energie benötigt wird, da das Entladen in der Regel durch die Pumpen in den Tanks erfolgt, die durch den größten Generator an Bord angetrieben werden.

Zusätzlich zu den unter Kap. 2.1 aufgeführten Daten werden für Tankschiffe weitere Angaben benötigt:

- Aufnahmekapazität der Landanlage (m³/h).
- Förderkapazität der (Tauch-)Pumpen an Bord (m³/h).
- Ladevolumen der verschiedenen Tankschiffsklassen (m³).
- Ermittlung der erforderlichen Entladezeiten.
- Energiebedarf der an Bord befindlichen Pumpen für die jeweilige Aufnahmekapazität der Landanlage, der in der Regel durch den größten Generator an Bord erzeugt wird.
- Ermittlung der durchschnittlichen Leistung der "größten" Generatoren auf den Tankschiffen pro Schiffsklasse.
- Dieselverbrauch (g/kWh) der großen Generatoren im Normallastbereich.
- Anteile der verschiedenen Emissionsstufen im Generatorpool „größter Generator“ der einzelnen Schiffsklassen der Tankschiffe.
- Emissionsfaktoren für die verschiedenen Emissionsstufen (TREMOD) (4).
- Ermittlung eines Emissionsfaktors für den „durchschnittlichen größten Flottengenerator“ aus der Zusammensetzung des Generatorenpools (prozentuale Anteile der Generatoren der verschiedenen Emissionsstufen).

Abbildung 1: Tankschiffe an der Ölinsel in Duisburg (Foto: D. Busch, LANUV)

3 Daten über den Bestand an Generatoren auf Fracht- und Tankschiffen

Für die Ermittlung der Emissionen lagen keine detaillierten Daten über die Generatorausstattung der mitteleuropäischen Binnenflotte vor. Aus diesem Grund hat das LANUV im Rahmen von CLINSH die vorhandenen Datenbanken untersucht. Eine Analyse der vom "Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt e.V. (BDB)" geführten IVR-Datenbank (Auszug für CLINSH 2017 angefordert) (2) ergab, dass die Daten zu den Hauptmaschinen teilweise nicht aktuell und die Daten zur Generatorflotte weder aktuell noch vollständig und damit für die notwendige Analyse zur Fragestellung nicht geeignet waren.

Ähnlich wie Fahrzeuge im Straßen- und Schienenverkehr werden auch Binnenschiffe in regelmäßigen Abständen auf Sicherheit und Funktionalität überprüft. Die Schiffseigner können frei wählen, in welchem EU-Mitgliedstaat sie ihre Schiffe überprüfen lassen. Im Rahmen der Amtshilfe hat das LANUV NRW die in der deutschen ZBBD-Datenbank (Deutsche Schiffsuntersuchungskommission) (3) verfügbaren Daten zu den Motoren und Generatoren der von der deutschen Kommission überprüften Schiffe angefordert.

Die verwendeten Daten stammen hauptsächlich von deutschen Schiffen, aber auch etwa 100 niederländische und belgische Schiffe sind enthalten. Der Auszug der Datenbank enthielt Daten zu 670 Frachtschiffen, 304 Tankschiffen und 34 Flusskreuzfahrtschiffen. Die Datensätze von 280 Tankschiffen (92 %), 609 Frachtschiffen (91 %) und von allen Flusskreuzfahrtschiffen enthielten Informationen über die Leistung zumindest eines der an Bord befindlichen Generatoren und waren somit für die Analyse des Generatorenpools geeignet.

Leider konnten die Daten der niederländischen und belgischen Inspektionskommissionen trotz wiederholter Anfragen weder von der Provinz Südholland noch von den belgischen Hafenbehörden im Rahmen der Amtshilfe für CLINSH zur Verfügung gestellt werden. Die Einbeziehung zusätzlicher niederländischer und belgischer Daten hätte zu einem noch zuverlässigeren Ergebnis geführt. Dennoch liefert die Auswertung der Generatorflotte unter Verwendung der deutschen ZBBD-Datenbank aufgrund der hohen Anzahl von Schiffen ein repräsentatives Bild, das für die Emissionsschätzungen verwendet werden kann. Die Tabellen 1a und 1b zeigen einen Überblick über die ausgewerteten Daten der Schiffe und ihrer Generatoren, getrennt nach Fracht- und Tankschiffen.

3.1 Leistung und Alter der "kleinsten" Generatoren

Für insgesamt 923 Tank-, Frachtschiffe und Flusskreuzfahrtschiffe liegen Leistungsdaten (kW) zu den Schiffsgeneratoren und teilweise auch zu deren Baujahr und Emissionsstufe vor. Die Schiffe wurden nach den Schiffslängenklassen der CEMT (European Conference of Ministers of Transport, Conférence Européenne des Ministres des Transports) (2) eingeteilt (Abb. 2).

Size Class	Type of ship
I	**Spitz, Peniche** **Length** 38,5 m - **width** 5,05 m, **draught** 2,2 m - **cargo capacity** 350 t
II	**Campine vessel** **Length** 55 m - **width** 6,6 m, **draught** 2,50 - **cargo capacity** 655 t
III	**Dortmund-Ems-canal vessel** **Length** 67 m - **width** 8,2 m, **draught** 2,50 - **cargo capacity** 1000 t
IV	**Rhein-Herne-canal vessel** **Length** 85 m - **width** 9,5 m, **draught** 2,50 - **cargo capacity** 1350 t
Va	**Large Rhine vessel** **Length** 110 m - **width** 11,4 m, **draught** 3,0 m - **cargo capacity** 2750 t
Vb	**Large Rhine vessel** **Length** 135 m - **width** 11,4 m, **draught** 3,5 m - **cargo capacity** 4000 t

Abbildung 2: Größenklassen der Fracht- und Tankschiffe in diesem Bericht, analog zur CEMT-Klassifizierung, Schiffsgrafik: Bureau Voorlichting Binnenvaart

Length = Länge; width = Breite; draught = Tiefgang, Cargo capacity = Ladekapazität

a) Frachtschiffe: Bei der Auswertung der Leistung der jeweils „kleinsten“ Generatoren an Bord ergibt sich für die Klasse I-Va (bis 110 m Länge) von Frachtschiffen ein recht homogenes Bild. Die durchschnittliche Leistung liegt im Bereich von 23 - 33 kW. Für diese Generatoren können daher zur Abschätzung der Emissionen die TREMOD-Basisfaktoren (4) der Leistungsgruppe 28-36 kW verwendet werden.

Die „kleinsten“ Generatoren auf den Schiffen der Klasse Vb mit Längen bis 135 m haben eine etwas höhere durchschnittliche Leistung von etwa 55 kW. Da es in der großen Klasse (111-135 m) nur Daten von 10 Schiffen gibt, bleibt die Leistungsbestimmung hier etwas unsicherer.

Bei den Frachtschiffen liegen in 370 Fällen Informationen über das Baujahr des kleinsten Generators vor. In 189 (31 %) Fällen ist auch die Emissionsstufe angegeben (Tab. 4a). Das durchschnittliche Alter (Tab. 1a) dieser Generatoren liegt, je nach Schiffsklasse, zwischen 13 (Klasse Vb) und 22 Jahren (Klasse IV). Das tatsächliche Durchschnittsalter der Generatoren für die Schiffsklassen I-IV liegt vermutlich deutlich höher, da bei 236 Schiffen (39 %) das Baujahr der Generatoren unbekannt ist. Diese fallen vermutlich zumindest überwiegend in die schlechteste TREMOD-Emissionsstufe (Transport Emission Model des Umweltbundesamtes, UBA) (4) mit einem Baujahr vor 1981.

Tabelle 1a: Überblick über die analysierten Daten der Frachtschiffe (Deutsche ZBBD Daten, 2019)

Frachtschiffe	Größenklasse der Schiffe					
	I < 40 m	II 41-67 m	III 58-67 m	IV 68-86 m	Va 86-110 m	Vb > 110 m
Schiffe						
Anzahl	**14**	**29**	**69**	**361**	**185**	**12**
Baujahre, Spanne	**1876-2002**	**1884-2017**	**1902-1965**	**1889-1996**	**1897-2017**	**1970-2007**
Mittleres Baujahr	**1943**	**1948**	**1945**	**1950**	**1974**	**1989**
Mittleres Alter (Jahre)	**77**	**72**	**75**	**70**	**46**	**31**
Hauptmaschine						
Leistungsspanne (kW)	**65-353**	**121-780**	**147-616**	**276-1491**	**456-2700**	**993-2030**
Mittlere Leistung (kW)	**230**	**302**	**383**	**616**	**1066**	**1281**
Baujahr, Spanne	**1957-2014**	**1937-2018**	**1950-2017**	**1949-2019**	**1959-2019**	**1972-2006**
Mittleres Baujahr	**1985**	**1979**	**1969**	**1980**	**1997**	**1996**
Mittleres Alter (Jahre)	**35**	**41**	**51**	**40**	**23**	**24**
Mit Emissionsstufe	**1**	**5**	**3**	**79**	**89**	**3**
Generatoren an Bord						
Angabe Leistung (kW)	**6**	**19**	**59**	**336**	**178**	**11**
Anzahl der Generatoren						
1	**3**	**15**	**24**	**61**	**13**	**4**
2	**2**	**4**	**28**	**174**	**83**	**5**
3	**1**	**--**	**6**	**83**	**64**	**2**
4	**--**	**--**	**--**	**11**	**17**	**--**
5	**--**	**--**	**--**	**2**	**1**	**--**
"Kleinster" Generator						
Angabe zum Baujahr	**2**	**17**	**29**	**192**	**122**	**8**
Baujahre, Spanne	**2006,2015**	**1960-2018**	**1953-2017**	**1955-2018**	**1968-2019**	**2001-2014**
Mittleres Baujahr	**2011**	**2004**	**1998**	**2006**	**2005**	**2007**
Mittleres Alter (Jahre)	**9**	**16**	**22**	**14**	**15**	**13**
Leistung, Spanne (kW)	**Jul 77**	**5-121**	**5-310**	**3-137**	**5-83**	**30-83**
Mittlere Leistung (kW)	**24**	**25**	**23**	**23**	**33**	**55**
Mit Emissionsstufe	**2**	**6**	**6**	**96**	**72**	**6**
"Größter" Generator						
Angabe zum Baujahr	**3**	**14**	**30**	**208**	**135**	**8**
Baujahre, Spanne	**1996-2015**	**1960-2016**	**1953-2018**	**1961-2018**	**1981-2019**	**2001-2011**
Mittleres Baujahr	**2006**	**2008**	**2000**	**2005**	**2007**	**2006**
Mittleres Alter (Jahre)	**14**	**12**	**20**	**15**	**13**	**14**
Leistung, Spanne (kW)	**Jul 77**	**5-121**	**6-310**	**6-699**	**23-357**	**53-83**
Mittlere Leistung (kW)	**28**	**25**	**29**	**37**	**56**	**61**
Mit Emissionsstufe	**2**	**5**	**8**	**122**	**102**	**6**

Tabelle 1b: Übersicht über die analysierten Daten zu Tankschiffen (Deutsche ZBBD-Daten, 2019)

Tankschiffe	Größenklasse der Schiffe				
	I < 40 m	II+III 41-67 m	IV 68-86 m	Va 86-110 m	Vb > 110 m
Schiffe					
Anzahl	**37**	**9**	**118**	**135**	**5**
Baujahre, Spanne	**1886-2017**	**1937-2016**	**1954-2016**	**1956-2015**	**1990-2009**
Mittleres Baujahr	**1955**	**1969**	**1993**	**1996**	**2003**
Mittleres Alter (Jahre)	**65**	**51**	**27**	**24**	**17**
Hauptmaschine					
Leistungsspanne (kW)	**71-447**	**221-632**	**315-1492**	**588-2236**	**1491-2290**
Mittlere Leistung (kW)	**224**	**389**	**778**	**1164**	**1681**
Baujahr, Spanne	**1955-2018**	**1958-2016**	**1957-2018**	**1961-2016**	**2001-2008**
Mittleres Baujahr	**1992**	**1985**	**2000**	**2001**	**2005**
Mittleres Alter (Jahre)	**28**	**35**	**20**	**19**	**15**
Mit Emissionsstufe	**11**	**3**	**76**	**82**	**4**
Generatoren an Bord					
Angabe Leistung (kW)	**27**	**8**	**113**	**127**	**5**
Anzahl der Generatoren					
1	**18**	**4**	**16**	**1**	**1**
2	**8**	**4**	**45**	**41**	**--**
3	**--**	**--**	**45**	**53**	**4**
4	**--**	**--**	**5**	**20**	**--**
5	**--**	**--**	**1**	**3**	**--**
"Kleinster" Generator					
Angabe zum Baujahr	**19**	**4**	**94**	**115**	**4**
Baujahre, Spanne	**1985-2016**	**1999-2016**	**1971-2018**	**1981-2018**	**2001-2008**
Mittleres Baujahr	**2001**	**2009**	**2008**	**2007**	**2005**
Mittleres Alter (Jahre)	**19**	**11**	**12**	**13**	**15**
Leistung, Spanne (kW)	**9-270**	**12-109**	**8-155**	**13-153**	**36-61**
Mittlere Leistung (kW)	**49**	**35**	**54**	**66**	**50**
Mit Emissionsstufe	**6**	**2**	**76**	**91**	**2**
"Größter" Generator					
Angabe zum Baujahr	**21**	**5**	**94**	**126**	**5**
Baujahre, Spanne	**1960-2017**	**1997-2016**	**1971-2018**	**1956-2018**	**2001-2008**
Mittleres Baujahr	**2001**	**2007**	**2007**	**2004**	**2005**
Mittleres Alter (Jahre)	**19**	**13**	**13**	**16**	**15**
Leistung, Spanne (kW)	**9-270**	**12-357**	**20-465**	**13-511**	**56-447**
Mittlere Leistung (kW)	**66**	**74**	**159**	**174**	**242**
Mit Emissionsstufe	**9**	**3**	**77**	**99**	**4**

b) Tankschiffe: Bei der Abschätzung der Emissionen von Tankschiffen am Liegeplatz muss zwischen Liegeplatzbedingungen **ohne** Einsatz von Bordpumpen (in der Regel Ladevorgänge oder Wartezeiten) und **mit** Einsatz von Bordpumpen (in der Regel Entladevorgänge) unterschieden werden.

Ladevorgänge und Wartezeiten: Der Leistungsbedarf ist mit ca. 9 kW etwas höher als bei einem Frachtschiff am Liegeplatz und wird z.B. für den zusätzlichen Betrieb von Lüftungsanlagen (z.B. Explosionsschutz) benötigt. Die kleinsten Generatoren, die auf Tankschiffen installiert sind, haben in der Regel in allen Schiffsklassen eine höhere Durchschnittsleistung als auf Frachtschiffen. Die Längenklassen I (< 40 m), IV (85 m), Va (110 m) und Vb (135 m) zeigen ein recht homogenes Bild. Hier liegen die kleinsten Generatoren an Bord in einem durchschnittlichen Leistungsbereich von etwa 50-65 kW.

Die mittleren Klassen II (56) und III (68 m) sind mit insgesamt 8 Schiffen nur sehr schwach vertreten. Hier liegt die Generatorleistung nur im Bereich von 35 kW. In diesem Fall bleibt die Bestimmung der Leistung eher unsicher.

Für 244 Tankschiffe (84%) liegen Informationen über das Baujahr des "kleinsten" Generators vor. In 177 (63%) Fällen ist auch die Emissionsstufe angegeben. Je nach Schiffsklasse liegt das Durchschnittsalter der Generatoren zwischen 13 und 19 Jahren. Die Schiffsklasse I (< 40 m) weist mit 19 Jahren das höchste Durchschnittsalter der Generatoren auf Tankschiffen auf. Bei den größeren Schiffen der Klassen IV, Va und Vb liegt das mittlere Alter zwischen 12 und 15 Jahren.

Das tatsächliche Durchschnittsalter der Generatoren für die Schiffsklassen I-IV liegt wahrscheinlich etwas höher, da bei 44 Schiffen (16 %) das Baujahr der Generatoren unbekannt ist. Diese fallen vermutlich überwiegend in die beiden schlechtesten TREMOD-Emissionsstufen (gebaut vor 1981 bzw. 1991).

Entladevorgänge: Bei Entladevorgängen werden in der Regel die "größten" Generatoren an Bord benötigt, um die für die Pumpen benötigte elektrische Energie bereitzustellen. (Siehe Kapitel 6.2).

Die "größten" Generatoren für die Tanksschiffsklassen I, II und III haben eine durchschnittliche Leistung von 66-74 kW. Die Schiffsklassen IV und Va weisen eine deutlich höhere mittlere Generatorenleistung von 159 kW bzw. 74 kW auf, während Schiffe der Klasse Vb (135 m) sogar eine mittlere Leistung von 242 kW für die "größten" Generatoren haben.

Bei den Tankschiffen liegen in 251 Fällen Informationen über das Baujahr des "größten" Generators vor. In 192 (69%) Fällen ist auch die Emissionsstufe angegeben. Je nach Schiffsklasse liegt das Durchschnittsalter der Generatoren zwischen 11 und 19 Jahren. Die "größten" Generatoren von Tankern erreichen in der Schiffsklasse I (< 40 m) mit 19 Jahren das höchste Durchschnittsalter. Bei den größeren Schiffen der Klassen IV, Va und Vb (85-135 m) liegt das mittlere Alter zwischen 13 und 16 Jahren. Auch hier dürfte das tatsächliche Durchschnittsalter der Generatoren für die Schiffsklassen I-IV etwas höher liegen, da bei 35 (13%) Schiffen das Baujahr der Generatoren unbekannt ist.

3.2 Emissionswerte der "kleinsten" und "größten" Generatoren

3.2.1 Auswertung der Datenbankeinträge zu den Emissionsstufen

Eine Übersicht über den Datenbestand zu den "kleinsten" Schiffsgeneratoren ist in Tab. 2 zusammengefasst. Für die Generatoren mit bekannter Leistung liegen bei den Frachtschiffen in 189 (31%) Fällen und bei den Tankschiffen in 177 (63%) Fällen auch Angaben zur jeweiligen Emissionsstufe (EU II, EU IIIa, EU V oder ZKR I, ZKR II) vor (Tab. 2).

Tabelle 2: Übersicht über die Auswertung der „kleinsten“ Generatoren

Frachtschiffe														
Generatoren nach Baujahr und Emissionsstufe	Längenklasse der Schiffe													
	Gesamt		< 40 m		41-56 m		57-68 m		69-85 m		86-110 m		111-135 m	
	Anzal	%	Anzal	%	Anzal	%	Anzal	%	Anzal	%	Anzal	%	Anzal	%
Gesamt	670		14		29		69		361		185		12	
Kleinster Generator														
Leistungsangabe (kW)	609		6		19		59		336		178		11	
Baujahr	370	*61*	2	*33*	17	*89*	29	*49*	192	*57*	122	*69*	8	*73*
Emissionslevel														
ohne Angabe	420	*68*	4	*67*	13	68	53	*90*	240	*71*	105	*59*	5	*45*
mit Angabe	189	*31*	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
ZKR I	6	*1*	1	*17*	--	--	--	--			4	*2*	1	*9*
ZKR II	4	*1*	--	--	--	--	--	--	--	--	4	*2*	--	--
EU II	73	*12*	--	--	2	11	3	*5*	37	*11*	28	*16*	3	*27*
EU IIIa	105	*17*	1	*17*	4	22	3	*5*	59	*18*	36	*20*	2	*18*
EU V	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1	*1*	--	--
Tankschiffe														
Generatoren anch Baujahr und Emissionsstufe	Längenklasse der Schiffe													
	Gesamt		< 40 m		41-56 m		57-68 m		69-85 m		86-110 m		111-135 m	
	Anzal	%	Anzal	%	Anzal	%	Anzal	%	Anzal	%	Anzal	%	Anzal	%
Gesamt	304		36											
Kleinster Generator														
Leistungsangabe (kW)	280		27		8				113		127		5	
Baujahr	236	*84*	19	*70*	4			*50*	94	*83*	115	*91*	4	*80*
Emissionslevel														
ohne Angabe	103	*37*	21	78	6			*75*	37	*33*	36	*28*	3	*60*
mit Angabe	177	*63*	6	*22*	2			*25*	76	*67*	91	*72*	2	*40*
ZKR I	28	*10*	--	--	--			--	5	*4*	23	*18*	--	--
ZKR II	12	*4*	1	*4*	1			*12,5*	7	*6*	3	*2*	--	--
EU II	93	*33*	1	*4*	--			--	43	*38*	47	*37*	2	*40*
EU IIIa	44	*16*	4	*15*	1			*12,5*	21	*19*	18	*14*	--	--
EU V	--	--	--	--	--			--	--	--	--	--	--	--

3.2.2 Klassifizierung von Schiffsgeneratoren ohne Informationen zur Emissionsstufe und Zusammenfassung der Zertifizierung nach EU- und ZKR-Anforderungen

Für 420 (69%) der Fracht- und 103 (37%) der Tankschiffe enthält die Datenbank keine Informationen zur Zertifizierung der Generatoren. Für diese Schiffe können die geltenden Emissionsstufen über das Baujahr des Generators oder hilfsweise über das Baujahr des Schiffes ermittelt werden. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass die Generatoren die Emissionsanforderungen erfüllen, die in ihrem jeweiligen Baujahr erforderlich waren. Für die verschiedenen Leistungsklassen der Generatoren hat die EU unterschiedliche Termine für das Inkrafttreten der Vorschriften vorgesehen. Um die Auswertung zu vereinfachen, sind die für das Baujahr geltenden Emissionsregeln in Tab. 3 aufgeführt. Als Datum des Inkrafttretens wurde jeweils der Jahresanfang genommen, da für die Generatoren nur das Baujahr, nicht

aber der Monat in der Datenbank enthalten ist. Daher ergeben sich kleinere Ungenauigkeiten bei der Zuordnung der jeweiligen Emissionswerte nach dem Baujahr der Generatoren.

Tabelle 3: Inkrafttreten der jeweiligen Emissionsregelungen

Leistungsklasse der Generatoren	Jahr des Inkrafttretens der jeweiligen Emissionsgrenzwerte					
	EU 1	EU II	EU IIIa	EU V	CCNR I	CCNR II
18-37 kW		2001	2007	2019	2003	2007
37-75 kW	1999	2004	2008	2019		
130-560 kW	1999	2002	2006	2019		

Teilweise sind die EU-Spezifikationen für die einzelnen Motorleistungsklassen nicht zum 1. Januar sondern mitten im Jahr in Kraft getreten. Auch die Vorgaben nach ZKR I und ZKR II sind nicht vollständig zu den EU-Regelungen kompatibel. Es musste ein Kompromiss für eine zusammenfassende Gruppierung der Generatoren nach EU-Stufe, ZKR-Verordnung und Klassifizierung nach Baujahr gefunden werden, um zu komplizierte Berechnungen bei der Emissionsabschätzung der Flotte zu vermeiden.

Für Generatoren, die nur nach ihrem Baujahr oder alternativ nach dem Baujahr des Schiffes klassifiziert sind, wurde die Zuordnung der Emissionsfaktoren nach TREMOD (4) durchgeführt. Für diejenigen Baujahre, bei denen von einer Emissionszertifizierung ausgegangen werden kann, wurde eine einheitliche Klassifizierung nach EU II (Baujahr ab 2001 bzw. 2004) oder nach EU Stufe IIIa (ab Baujahr 2007 bzw. 2008) vorgenommen. Bestehende Zertifizierungen mit ZKR I wurden mit der EU-Stufe II zusammengefasst, Zertifizierungen mit ZKR II mit der EU-Stufe IIIa. Die Emissionsberechnungen wurden für die durchschnittliche Leistung der "kleinsten" bzw. "größten" (Tanker) Generatoren unter Verwendung der Leistungsklassen nach TREMOD (4) durchgeführt.

a) Klassifizierung der Generatoren nur mit Angabe des Baujahrs des Generators:

Für 184 Fracht- und 59 Tankschiffe ist nur das Baujahr des jeweiligen Generators bekannt. Anhand dieser Angaben wurde aus den im Baujahr geltenden Vorschriften auf den jeweiligen Emissionsfaktor geschlossen. Die Baujahre vor 2003 wurden entsprechend der Klassifizierung der Emissionsfaktoren nach TREMOD eingestuft (Tab. 7a&b).

b) Ohne Angaben zur Emissionszertifizierung und zum Baujahr des Generators

Bei 236 Fracht- und 44 Tankschiffen liegen nur Leistungsdaten des Generators vor, aber keine Informationen über das Baujahr des "kleinsten" Generators. In diesem Fall kann eine Altersschätzung des Generators nur auf Basis des Schiffsbaujahres vorgenommen werden. Es wird davon ausgegangen, dass in die Schiffsneubauten immer auch neue Generatoren eingebaut werden. Bei diesem Ansatz werden die meisten Generatoren auf Basis des Schiffsbaujahres der ältesten Klasse zugeordnet, die vor 1981 gebaut wurde. Die tatsächlichen Emissionen werden daher vermutlich etwas überschätzt, da einige dieser Generatoren wahrscheinlich bereits erneuert wurden und somit jünger als 1981 sind.

3.3 Gesamtbewertung der Verteilung der auf den Schiffen vorhandenen Emissionsstufen

Die mit den vorgestellten Methoden erstellten Tabellen 4a und 4b geben einen Überblick über die angenommene Zusammensetzung der Emissionsstufen bzw. Emissionsfaktoren der "kleinsten" Stromerzeuger der Binnenschifffahrtsflotte, wie sie sich aus den ZBBD-Daten ermitteln lässt.

Umfragen bei den Tanklagerbetreibern in Neuss und Duisburg haben ergeben, dass hier nur Tankschiffe der Größenklassen IV (85m), Va (110 m) und Vb (135 m) abgefertigt werden können. Daher bezieht sich die weitergehende Auswertung zu den Emissionen der liegenden Tankschiffe in der Tabelle 4b nur auf diese Größenklassen.

Tabelle 4a: Kombination der verschiedenen Ansätze zur Ermittlung der jeweiligen Emissionswerte für die "kleinsten" Generatoren der Frachtschiffe

Frachtschiffe "Kleinster" Generator					
Emissionstufe nach TREMOD	**Anzahl**	**%**	**Nach Emissionsstufe des Generators**	**Nach Baujahr des Generators**	**Nach Baujahr des Schiffes**
vor 1981	234	**38,4**	--	12	222
1981-1990	36	**5,9**	--	28	8
1991-2002	77	**12,6**	--	72	5
ZKR I	6	1,0	6	--	--
ZKR II	4	0,7	4	--	--
EG II (ab 2003)	105	17,2	73	32	--
EG IIIa (ab 2007)	146	24,0	105	40	1
EU V (ab 2019)	1	**0,2**	1	--	--
∑ EU II + ZKR I	111	**18,1**	--	--	--
∑ EU IIIa + ZKR II	150	**24,6**	--	--	--
Gesamt	**609**		**189**	**184**	**236**

Die Zahlen in den grauen Feldern werden für "gesamt" nicht aufaddiert.

Eine Auswertung der Daten für den "kleinsten" Generator zur Klassifizierung des Emissionspotenzials war für 609 Frachtschiffe möglich. Bei einigen Tankschiffen enthielt die Datenbank nur Informationen zu einem Generator. In diesen Fällen ist der Generator sowohl als "kleinster" als auch als "größter" Generator aufgeführt. Für die Tankschiffe der Größenklassen IV-Vb war die Einstufung in 244 Fällen für den "kleinsten" Generator und in 243 Fällen für den "größten" Generator möglich.

Da in vielen Fällen die Zuordnung nur über das Baujahr des Schiffes möglich war, werden die Emissionen in diesen Fällen wahrscheinlich überschätzt, so dass die Ergebnisse als "konservativ" zu bewerten sind.

Tabelle 4b: Kombination der verschiedenen Ansätze zur Ermittlung der jeweiligen Emissionswerte für die "kleinsten" und "größten" Generatoren der Tankschiffe der Größenklassen IV, Va und Vb

Tankschiffe "Kleinster" Generator (Schiffsklasse IV, Va, Vb = 68 - 135 m)					
Emissionstufe nach TREMOD	Anzahl	%	Nach Emissionsstufe des Generators	Nach Baujahr des Generators	Nach Baujahr des Schiffes
vor 1981	16	6,6	--	2	14
1981-1990	9	3,7	--	9	--
1991-2002	26	10,7	--	24	2
ZKR I	44	18,1	44	--	--
ZKR II	18	7,4	18	--	--
EG II (ab 2003)	59	24,3	55	3	1
EG IIIa (ab 2007)	71	29,2	65	--	6
EU V (ab 2019)	--	--	--	--	--
∑ EU II + ZKR I	103	42,4	--	--	--
∑ EU IIIa + ZKR II	89	36,6	--	--	--
Gesamt	243		182	38	23

Die Zahlen in den grauen Feldern werden für "gesamt" nicht aufaddiert.

Abbildung 3: Modernes 85-m-Tankschiff (Foto: Arne Harms)

4 Dieselverbrauch und Emissionsfaktoren der "kleinsten" Generatoren

4.1 Dieselverbrauch im Kleinlastbereich

Die Bestimmung des Dieselverbrauchs und der Emissionsfaktoren von Generatoren in einem Niedriglastbereich von 2 kW (Kleinlastbereich) ist nicht unproblematisch. Die Leistungskurven der meisten Hersteller decken in der Regel den Leistungsbereich unter 25 % nicht ab.

Eine Anfrage des LANUV bei den Herstellern wurde inhaltlich nur von der Firma Hatz (Herr Tornquist, mündl. Mitt.) beantwortet**.** *„Der Kraftstoffverbrauch ist stark von der Motorbelastung abhängig und schwankt z.B. bei der Baureihe L/M (Generatoren im Bereich 14-50 kW) zwischen ca. 450 g/kWh (geringe Auslastung) und 230 g/kWh (hohe Auslastung).“*

Die TU Delft hat in einer Studie zur Wirtschaftlichkeit der Nutzung der Landstromversorgung (OPS) für die Schiffseigner auch mit dem Dieselverbrauch der Bordgeneratoren im Niedriglastbereich untersucht. In der Studie „Walstroom versus Generatorenstroom“ (2012) (1) finden sich Leistungs-/Verbrauchsdiagramme verschiedener auf Binnenschiffen typischer Generatoren (Abb.4). Die Leistungskurven wurden hierbei in den Niedriglastbereich (1-2 kW) extrapoliert (Abb. 5).

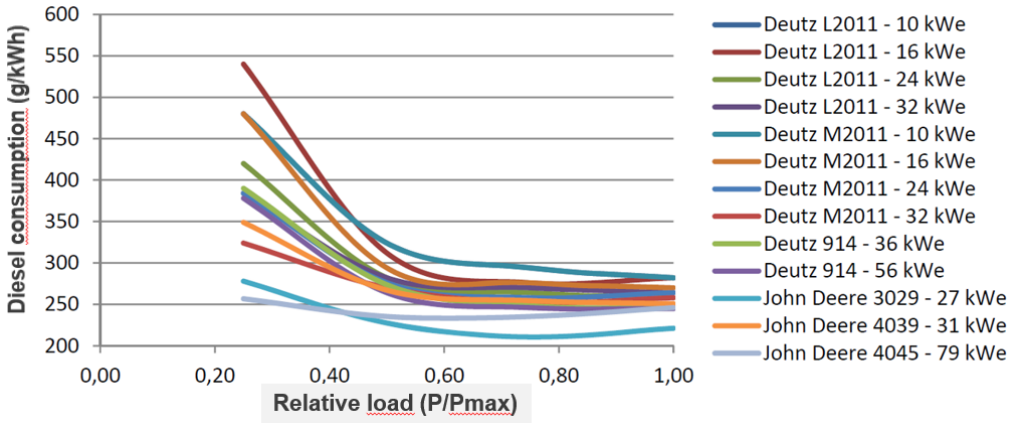


Abbildung 4: Spezifischer Brennstoffverbrauch (Gramm pro elektrischer kWh) von Generatoraggregaten in Abhängigkeit von der Last. Modifiziertes Diagramm aus der "Walstroom-Studie" der TU Delft

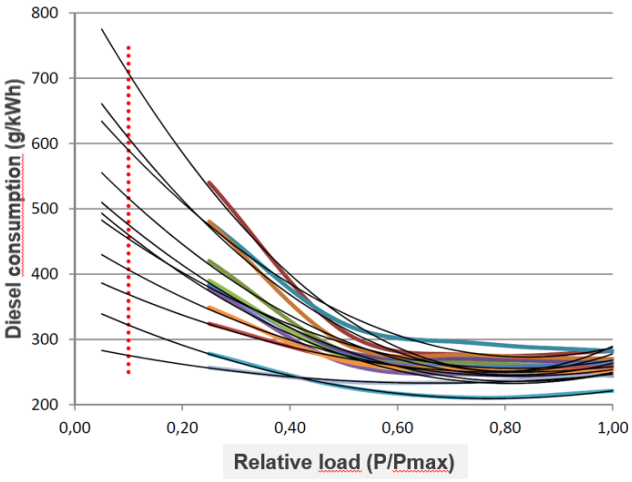


Abbildung 5: Extrapolation des spezifischen Kraftstoffverbrauchs (Gramm pro elektrischer kWh) von Generatoraggregaten auf den Niedriglastbereich von 8 % Auslastung. Modifiziertes Diagramm aus der Waalstrom-Studie

Aus diesen Kurven lassen sich für den Niedriglastbereich von etwa 8 % Lastleistung folgende Dieselverbräuche abschätzen (Abb. 5; Tab. 5). Für die für TREMOD (4) definierten Leistungsklassen der Generatoren (28-36 kW und 37-74 kW) kann daraus ein durchschnittlicher Dieselverbrauch pro kWh abgeleitet werden.

Tabelle 5: Abschätzung des Dieselverbrauchs der "kleinsten" Generatoren auf Fracht- und Tankerschiffen im Niedriglastbereich von ca. 8 % der Kapazität ("Walstroom-Studie")

			Dieselverbrauch bei Niedriglast
Hersteller	TYP	kW max	g/kWh
Deutz	L2011	10	600
Deutz	M2011	10	590
Deutz	L2011	16	700
Deutz	M2011	16	610
Deutz	L2011	24	525
Deutz	M2011	24	460
J. Deere	3029	27	325
J. Deere	4039	31	410
Deutz	L2011	32	375
Deutz	M2011	32	380
Deutz	914	36	475
		Mittelwert	525
Deutz	914	56	580
J. Deere	4045	79	280
		Mittelwert	430

4.2 Emissionsfaktoren

Das in Deutschland häufig eingesetzte Emissionsberechnungsmodell "TREMOD" (Transport Emission Model) des IFEU-Instituts (4) bildet den motorisierten Verkehr in Deutschland hinsichtlich seiner Verkehrs- und Fahrleistung, seines Energieverbrauchs und den damit verbundenen Klimagas- und Luftschadstoffemissionen für den Zeitraum von 1960 bis 2018 und in einem Trendszenario bis 2050 ab. Dabei werden auch die Emissionen von Binnenschiffen und mobilen Stromerzeugern berücksichtigt.

Für Dieselgeneratoren der Leistungsklassen 18-36 kW und 56-74 kW werden im Modell TREMOD für die für 2020 angenommene Alterszusammensetzung der Generatoren (**nicht** speziell Generatoren auf Binnenschiffen) folgende Emissionsfaktoren im "normalen" Leistungsbereich angenommen, die jedoch nicht automatisch auf den "Niedriglastbereich" von Generatoren auf Binnenschiffen übertragen werden können:

Tabelle 6: Emissionsfaktoren TREMOD-MM 5.11, Dieselgeneratoren, Mittelwert 2020

Leistungsklasse	Stoff	g/kWh	g/kg Diesel
18-36 kW	**NO_X**	**6,21**	**23,72**
	PM_{10}	**0,47**	**1,78**
56-74 kW	**NO_X**	**3,75**	**14,43**
	PM_{10}	**0,16**	**0,63**

Aus den Daten der ZBB-Datenbank wurde daher versucht, die Emissionssituation der aktuell auf den Binnenschiffen verbauten Stromgeneratoren genauer abzubilden (vergl. Tab. 10a&b). Da die "kleinsten" Generatoren auf den Binnenschiffen zur Stromversorgung an den Liegestellen mit 1-2 kW Leistungsbedarf im Niedriglastbereich arbeiten, wurden die aus dem TREMOD entnommenen "Basisfaktoren" für mobile Generatoren rechnerisch mit dem Dieselverbrauch pro kWh aus der "Walstroom-Studie"(1) ins Verhältnis gesetzt.

Tabelle 7a zeigt die für die jeweiligen Emissionsstufen gültigen Basis-Emissionsfaktoren aus dem TREMOD-Modell. Diese gelten jedoch für normale Leistungen, nicht für den Niedriglastbereich unter 25 % Auslastung, weshalb von einem höheren Dieselverbrauch pro kWh ausgegangen werden muss. Daher wurden für die Emissionsabschätzungen der Schiffe am Liegeplatz die Emissionsfaktoren pro kW mittels des höheren durchschnittlichen Dieselverbrauchs im Niedriglastbereich korrigiert.

Die größeren Generatoren der Leistungsklasse 130-299 kW (Tab. 7b) werden beim Entladen (Leerpumpen) der Tanker eingesetzt. Sie versorgen die großen Pumpen an Bord mit Energie und arbeiten daher nicht im Niedriglastbereich. Daher werden keine Faktoren für den Niedriglastbereich benötigt.

Tabelle 7a: TREMOD-Basisemissionsfaktoren für mobile Dieselmotoren mit Anpassung für den Niedriglastbereich (8 % Lastfaktor)

Generatoren mit 28-36 kW Leistung						
Stufe	**Diesel g/kWh**		**NO_X g/kWh**		**PM g/kWh**	
	TREMOD	**Niedriglast**	**TREMOD**	**Niedriglast**	**TREMOD**	**Niedriglast**
vor 1981	**300**	**525**	**18**	**31,5**	**2**	**3,5**
1981-1990	**281**	**525**	**18**	**33,6**	**1,4**	**2,6**
1991-Stufe I	**262**	**525**	**9,8**	**19,6**	**1,4**	**2,8**
Stufe I	**262**	**525**	**7,7**	**15,4**	**1,4**	**2,8**
Stufe II	**262**	**525**	**6,5**	**13,0**	**0,37**	**0,7**
Stufe IIIa	**262**	**525**	**6,1**	**12,2**	**0,37**	**0,7**
Stufe IIIb	**262**	**525**	**6,1**	**12,2**	**0,54**	**1,1**
Stufe IV	**262**	**525**	**--**	**--**	**--**	**--**
Stufe V	**262**	**525**	**4,23**	**8,5**	**0,015**	**0,03**

Generatoren mit 37-74 kW Leistung						
Stufe	**Diesel g/kWh**		**NO_X g/kWh**		**PM g/kWh**	
	TREMOD	**Niedriglast**	**TREMOD**	**Niedriglast**	**TREMOD**	**Niedriglast**
vor 1981	**290**	**430**	**7,7**	**11,4**	**1,8**	**2,7**
1981-1990	**275**	**430**	**8,6**	**13,4**	**1,2**	**1,9**
1991-Stufe I	**260**	**430**	**11,5**	**19,0**	**0,8**	**1,3**
Stufe I	**260**	**430**	**7,7**	**12,7**	**0,35**	**0,6**
Stufe II	**260**	**430**	**5,5**	**9,1**	**0,22**	**0,4**
Stufe IIIa	**260**	**430**	**3,8**	**6,3**	**0,22**	**0,4**
Stufe IIIb	**260**	**430**	**5,1**	**8,4**	**0,025**	**0,041**
Stufe IV	**260**	**430**	**4,05**	**6,7**	**0,025**	**0,041**
Stufe V	**260**	**430**	**2,1**	**3,5**	**0,015**	**0,025**

Tabelle 7b: TREMOD-Basisemissionsfaktoren für mobile Dieselmotoren der Leistungsklasse 130-299 kW

Generatoren der Leistungsklasse 130-299 kW			
Emissionstufe nach TREMOD	**Diesel g/kWh TREMOD**	**NO_X g/kWh TREMOD**	**PM g/kWh TREMOD**
before 1981	**270**	**17,8**	**0,9**
1981-1990	**260**	**12,4**	**0,8**
1991-Stufe I	**250**	**11,2**	**0,4**
Stufe I	**250**	**7,6**	**0,2**
Stufe II	**250**	**5,2**	**0,1**
Stufe IIIa	**250**	**3,2**	**0,1**
Stufe IIIb	**250**	**2,63**	**0,025**
Stufe IV	**250**	**2,25**	**0,025**
Stufe V	**250**	**0,4**	**0,015**

4.3 Gruppierung der Generatoren zu TREMOD-Emissionswerten

Frachtschiffe: Für die Emissionsabschätzungen der Schiffe am Liegeplatz werden alle Emissionen der Generatoren für Frachtschiffe bis 110 m mit den TREMOD-Basisemissionen, angepasst für "Niedriglast“ für die Leistungsklasse 28-36 kW, berechnet (siehe Tab. 7a). Für die nachfolgende Modellierung wurden auch die 135-m-Schiffe dieser Klasse zugerechnet.

Tankschiffe: Bei der Abschätzung der Emissionen von Tankschiffen am Liegeplatz muss zwischen Liegeplatzbedingungen ohne schiffsseitige Pumpvorgänge (in der Regel Ladevorgänge) und mit schiffsseitigen Pumpvorgängen (in der Regel Löschvorgänge) unterschieden werden.

Beladevorgänge von Tankschiffen: Für die Emissionsabschätzungen der Tankschiffe am Liegeplatz ohne schiffsseitige Beladungsvorgänge werden alle Generatoren mit den Basisemissionen der Leistungsklasse 37-74 kW, angepasst für "Niedriglast", berechnet (Tab. 7a).

Entladevorgänge von Tankschiffen: Die Berechnung erfolgt mit den Basisemissionen der Generatoren der Leistungsklasse 130-299 kW (Tab. 7b), die für den Pumpenbetrieb eingesetzt werden.

4.4 Grundlage der Berechnungen

Mit den in den in den obigen Tabellen zusammengestellten Daten können die NO_X- und Partikelemissionen (PM_{10}) der Schiffe am Liegeplatz modellhaft berechnet werden.

Hierbei wird angenommen, dass ein **Frachtschiff** durchschnittlich 8 h in einem Hafen liegt und ein Strombedarf von 2 kW durch den "kleinsten" Dieselgenerator an Bord gedeckt wird. Die Berechnungen für NO_X und PM_{10} basieren auf dem Dieselverbrauch bei geringer Last (siehe Tab. 7a) und den Basis-Emissionsfaktoren für Dieselgeneratoren aus TREMOD.

Zusätzlich wird ermittelt, welche Emissionsmengen in einem theoretischen Modellhafen anfallen würden, wenn dort 50 Schiffe im Tagesdurchschnitt für jeweils 8 Stunden anlegen würden. Im "worst case" (alle Generatoren vor Baujahr 1981) würden die **NO_X-Emissionen** im Hafen (50 Frachtschiffe/d und Generatoren im Leistungsbereich 28-36 kW) etwa 9,2 t/a erreichen. Würden alle Generatoren bereits die Stufe V erfüllen, würden die jährlichen Emissionen auf 2,48 t/a sinken (Tab. 8).

Für **Tanker** am Liegeplatz (Generatoren im Leistungsbereich 37-74 kW) ohne Entladevorgänge ergibt sich ein höherer Energiebedarf von 9 kW als bei Frachtschiffen. Daher würden im "worst casel" etwa 15 t/a NO_X von 50 Tankern ohne eigene Entladetätigkeit emittiert werden. Erfüllen alle Generatoren bereits die Anforderungen der Stufe V, ergäben sich **NO_X-Emissionen** von etwa 4,6 t/a. Die Generatorenausstattung der Tankschiffe ist viel jünger als die auf Frachtschiffen und hat daher einen deutlich höheren Anteil an Generatoren, die bereits die EU-Emissionsstandards der Stufe II und IIIa erfüllen. Der "worst case" kann daher praktisch nicht eintreten (Tab. 8).

Tabelle 8: Basistabelle für NO_X-Emissionsmengen von Fracht- und Tankschiffen am Liegeplatz aus Dieselaggregaten mit unterschiedlicher Emissionscharakteristik im Niedriglastbereich.

Frachtschiffe: "Kleinster" Generator mit 28-36 kW; Leistungsbedarf 2 kW						
Emissionen nach TREMOD	**NO_X**	**1 Schiff/h**	**1 Schiff/8h**	**1 Schiff/a**	**50 Schiffe/8h**	**50 Schiffe/a**
	g/kWh	**g**	**g**	**kg**	**kg/a**	**t/a**
vor 1981	**31,5**	**63**	**504**	**184**	**25,2**	**9,2**
1981-1990	**33,6**	**67,2**	**537,6**	**196,2**	**26,88**	**9,81**
1991-EU Stufe I	**19,6**	**39,2**	**313,6**	**114,5**	**15,68**	**5,72**
EU I	**15,4**	**30,8**	**246,4**	**89,9**	**12,32**	**4,5**
EU II	**13**	**26**	**208**	**75,9**	**10,4**	**3,8**
EU IIIa	**12,2**	**24,4**	**195,2**	**71,2**	**9,76**	**3,56**
EU IIIb	**12,2**	**24,4**	**195,2**	**71,2**	**9,76**	**3,56**
EU IV	**keine Angaben**					
EU V	**8,5**	**17**	**136**	**49,6**	**6,8**	**2,48**
Tankschiffe: Größenklassen IV, Va, Vb; 85-130 m, keine schiffsseitigen Entladeaktivitäten, "kleinster" Generator mit 37-74 kW Leistung; Leistungsbedarf 9 kW						
Emissionen nach TREMOD	**NO_X**	**1 Schiff/h**	**1 Schiff/8h**	**1 Schiff/a**	**50 Schiffe/8h**	**50 Schiffe/a**
	g/kWh	**g**	**g**	**kg**	**kg/a**	**t/a**
vor 1981	**11,4**	**102,6**	**820,8**	**299,6**	**41,0**	**14,98**
1981-1990	**13,4**	**120,6**	**964,8**	**352,2**	**48,2**	**17,61**
1991-EU Stufe I	**19**	**171**	**1368**	**499,3**	**68,4**	**24,97**
EU I	**12,7**	**114,3**	**914,4**	**333,8**	**45,7**	**16,69**
EU II	**9,1**	**81,9**	**655,2**	**239,1**	**32,8**	**11,96**
EU IIIa	**6,3**	**56,7**	**453,6**	**165,6**	**22,7**	**8,28**
EU IIIb	**8,4**	**75,6**	**604,8**	**220,8**	**30,2**	**11,04**
EU IV	**keine Angaben**					
EU V	**3,5**	**31,5**	**252**	**92,0**	**12,6**	**4,60**

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den **Feinstaubemissionen (PM_{10})**. Wären alle Frachtschiffe mit den ältesten Generatoren ausgerüstet, würden im Jahr 1.022 kg PM_{10} emittiert werden. Bei einer Ausrüstung mit Generatoren der Stufe V würde die Emissionsmenge auf nur 7,3 kg/a absinken.

Bei Tankschiffen ohne schiffsseitige Ladetätigkeiten (Generatoren im Leistungsbereich 37-74 kW) würden im "worst case" etwa 3,6 Tonnen/a emittiert werden. Wenn alle Generatoren bereits die Anforderungen der Stufe V erfüllen würden, lägen die PM_{10}-Emissionen bei nur 26 kg/a.

Tabelle 9: Basistabelle für PM_{10}-Emissionsmengen von Fracht- und Tankschiffen am Liegeplatz aus Dieselgeneratoren mit unterschiedlichen Emissionscharakteristiken im Niedriglastbereich

Frachtschiffe: "Kleinster" Generator mit 28-36 kW; Leistungsbedarf 2 kW						
Emissionen nach TREMOD	**PM_{10}**	**1 Schiff/h**	**1 Schiff/8h**	**1 Schiff/a**	**50 Schiffe/8h**	**50 Schiff/a**
	g/kWh	**g**	**g**	**kg**	**kg/a**	**kg/a**
vor 1981	**3,5**	**7**	**56**	**20,4**	**2,8**	**1022,0**
1981-1990	**2,6**	**5,2**	**41,6**	**15,2**	**2,08**	**759,2**
1991-EU Stufe I	**2,8**	**5,6**	**44,8**	**16,4**	**2,24**	**817,6**
EU I	**2,8**	**5,6**	**44,8**	**16,4**	**2,24**	**817,6**
EU II	**0,7**	**1,4**	**11,2**	**4,1**	**0,56**	**204,4**
EU IIIa	**0,7**	**1,4**	**11,2**	**4,1**	**0,56**	**204,4**
EU IIIb	**1,1**	**2,2**	**17,6**	**6,4**	**0,88**	**321,2**
EU IV	**keine Angaben**					
EU V	**0,03**	**0,06**	**0,48**	**0,2**	**0,02**	**7,3**
Tankschiffe: Größenklassen IV, Va, Vb; 85-130 m, keine schiffsseitigen Entladeaktivitäten, "kleinster" Generator mit 37-74 kW Leistung; Leistungsbedarf 9 kW						
Emissionen nach TREMOD	**PM_{10}**	**1 Schiff/h**	**1 Schiff/8h**	**1 Schiff/a**	**50 Schiffe/8h**	**50 Schiffe/a**
	g/kWh	**g**	**g**	**kg**	**kg/a**	**kg/a**
vor 1981	**2,7**	**24,3**	**194,4**	**70,96**	**9,72**	**3.548**
1981-1990	**1,9**	**17,1**	**136,8**	**49,93**	**6,84**	**2.497**
1991-EU Stufe I	**1,3**	**11,7**	**93,6**	**34,16**	**4,68**	**1.708**
EU I	**0,6**	**5,4**	**43,2**	**15,77**	**2,16**	**788**
EU II	**0,4**	**3,6**	**28,8**	**10,51**	**1,44**	**526**
EU IIIa	**0,4**	**3,6**	**28,8**	**10,51**	**1,44**	**526**
EU IIIb	**0,04**	**0,36**	**2,88**	**1,05**	**0,14**	**53**
EU IV	**keine Angaben**					
EU V	**0,02**	**0,18**	**1,44**	**0,53**	**0,07**	**26**

5 Abschätzung der Emissionen von Binnenschiffen am Liegeplatz beim Betrieb der jeweils "kleinsten" Generatoren

5.1 Fracht- und Tankschiffe ohne schiffsseitige Ladetätigkeit

Ist die Generatorenausstattung eines Schiffes und die weiteren Liegeparameter bekannt, könnten die Emissionen jedes individuellen Hafenbesuches einzeln ermittelt und die jährlichen Emissionen aus den einzelnen Besuchen aufaddiert werden. Diese Vorgehensweise ist für die Praxis viel zu aufwändig. Zudem dürfte es in vielen Fällen auch nicht möglich sein, die Daten der Bordgeneratoren jedes einzelnen Schiffes genau zu erfassen.

Aus den ZBBD-Daten wurde daher zunächst die prozentuale Zusammensetzung des aktuellen Generatorenpools aus den verschiedenen Basisemissionsstufen nach TREMOD (4) ermittelt. Aus dieser Zusammensetzung und den dazugehörigen Emissionsfaktoren kann auf die zu erwartenden Emissionsfaktoren eines theoretischen, durchschnittlichen "kleinsten" Generators (im Folgenden "kleinster Flottengenerator" genannt) pro kWh geschlossen werden. Anhand dieser Emissionsfaktoren, der Anzahl der im Jahr abgefertigten Schiffe, dem Leistungsbedarf der Schiffstypen (Frachter/Tanker) und der durchschnittlichen Liegezeiten kann die zu erwartende jährliche Emissionsmenge der im Hafen liegenden Schiffe abgeschätzt werden.

Um zunächst die Größenordnung der jährlichen Emissionsmengen liegender Schiffe in großen Binnenhäfen abzuschätzen, wurde auf Basis der ermittelten aktuellen Emissionsfaktoren eine Modellrechnung für einen Hafenbetrieb von 50 abgefertigten Fracht- bzw. Tankschiffen pro Tag mit einer Liegezeit von jeweils 8 Stunden durchgeführt. Für ein Frachtschiff wird ein durchschnittlicher Leistungsbedarf von 2 kW angenommen. Für moderne Tankschiffe wurde ein Energiebedarf von ca. 9 kW angesetzt. Die ermittelten Daten (Zusammensetzung der Emissionswerte des „Flottengenerators“ nach ihren jeweiligen Anteilen an den Emissionsstufen nach dem aktuellen ZBB-Datenbestand 2019) sind in den Tabellen 10a und 10b zusammengestellt.

Würden **50 Frachtschiffe** in unserem **Modellhafe**n liegen, wäre eine tägliche Emissionsmenge von 17,5 kg NO_X zu erwarten, die sich über das Jahr zu einer NO_X Emission von 6.4 t/a summieren würde (Tab. 10a). Für PM_{10} wären 1,7 kg täglich und eine Jahresmenge von 628 kg zu erwarten, die fast ausschließlich aus Ruß besteht (Tab. 10b). Bei **50 Tankern** ohne schiffsseitige Ladetätigkeiten ergeben sich durch den höheren Energiebedarf trotz jüngerer, d.h. "sauberer" Generatoren höhere Emissionen. Die zu erwartende NO_X Menge liegt bei 36,4 kg täglich und 13,3 t jährlich (Tab. 10a). Für PM_{10} wären 2,7 kg/d und eine Jahresmenge von 973 kg zu erwarten (Tab. 10b).

Die Annahme eines "Modellhafens" mit jeweils 50 Frachtschiffen bzw. Tankern übersteigt die tatsächliche Hafenaktivität in Mitteleuropas größtem Binnenhafen, Duisburg. Sie verdeutlicht jedoch anschaulich die Größenordnung der derzeit zu erwartenden Emissionen für NO_X im ein- oder niedrigen zweistelligen Tonnenbereich und für PM_{10} im dreistelligen kg-Bereich. Das Beispiel zeigt, dass sich aus der Energieversorgung der Schiffe vermutlich geringere Emissionsmengen als ursprünglich angenommen, ergeben.

Abbildung 6: Modernes 110-m-Frachtschiff im Hafen von Neuss (Foto: D. Busch, LANUV)

Tabelle 10a: Abschätzung der NO_X-Emissionen der Generatoren von Fracht- und Tankschiffen (ohne Ladetätigkeit an Bord) am Liegeplatz, unter Berücksichtigung der Zusammensetzung der Emissionswerte der "kleinsten" Generatoren

Frachtschiffe: "kleinster" Generator 28-36 kW, 2 kW/h							
NO_X	**Flottenanteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Basis-emissionen pro 2 kWh**	**Anteil am "Flotten-generator"**	**1 Schiff**	**50 Schiffe**	
Emissionslevel nach TREMOD	**%**	g/kWh	g/ 2kWh	g/kWh	g/8h	kg/8h	t/a
vor 1981	**38,4**	31,5	63	12,1	193,5	9,7	3,5
1981-1990	**5,9**	33,6	67,2	2,0	31,7	1,6	0,6
1991-2002	**12,6**	19,6	39,2	2,5	39,5	2	0,7
∑ EU II + ZKR I	**18,1**	13	26	2,4	37,6	1,9	0,7
∑ EU IIIa + ZKR II	**24,6**	12,2	24,4	3,0	48,0	2,4	0,9
EG V (ab 2019)	**0,2**	8,5	17	0,02	0,272	0,01	0,01
Basisdaten für die Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**			**g/kWh 21,9**	**g/8h 350,7**	**kg/8h 17,5**	**t/a 6,4**
Tankschiffe: "kleinster" Generator 37-74 kW; (Schiffsklassen IV, Va, Vb = 85 - 135 m), 9 kW/h							
NO_X	**Flottenanteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Basis-emissionen pro 9 kWh**	**Anteil am "Flotten-generator"**	**1 Schiff**	**50 Schiffe**	
Emissionslevel nach TREMOD	**%**	g/kWh	g/ 9kWh	g/kWh	g/8h	kg/8h	t/a
vor 1981	**7,0**	11,4	102,6	0,8	57,5	2,9	1,0
1981-1990	**4,1**	13,4	120,6	0,5	39,6	2,0	0,7
1991-2002	**13,1**	19	171	2,5	179,2	9,0	3,3
∑ EU II + ZKR I	**53,3**	9,1	81,9	4,9	349,2	17,5	6,4
∑ EU IIIa + ZKR II	**22,5**	6,3	56,7	1,4	102,1	5,1	1,9
EG V (ab 2019)	**--**	3,5	--	--	--	--	--
Basisdaten für die Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**			**g/kWh 10,1**	**g/8h 727,5**	**kg/8h 36,4**	**t/a 13,3**

Tabelle 10b: Abschätzung der PM_{10} (Feinstaub)-Emissionen der Stromgeneratoren an den Liegeplätzen von Schiffen und Tankschiffen ohne schiffsseitige Ladetätigkeit, unter Berücksichtigung der Zusammensetzung der Emissionswerte der "kleinsten" Stromerzeuger

Frachtschiffe: "kleinster" Generator 28-36 kW, 2 kW/h							
PM	**Flottenanteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Basis-emissionen pro 2 kWh**	**Anteil am "Flotten-generator"**	**1 Schiff**	**50 Schiffe**	
Emissionslevel nach TREMOD	%	g/kWh	g/ 2kWh	g/kWh	g/8h	kg/8h	t/a
vor 1981	**38,4**	3,5	7	1,3	21,5	1075,2	392,5
1981-1990	**5,9**	2,6	5,2	0,2	2,5	122,7	44,8
1991-2002	**12,6**	2,8	5,6	0,4	5,6	282,2	103
∑ EU II + ZKR I	**18,1**	0,7	1,4	0,1	2,0	101,4	37
∑ EU IIIa + ZKR II	**24,6**	0,7	1,4	0,2	2,8	137,8	50,3
EG V (ab 2019)	**0,2**	0,03	0,06	0,00	0,00096	0,05	0,018
Basisdaten für die Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**			**g/kWh**	**g/8h**	**kg/8h**	**kg/a**
				2,1	**34,4**	**1,7**	**627,6**
Tankschiffe: "kleinster" Generator 37-74 kW; (Schiffsklassen IV, Va, Vb = 85 - 135 m), 9 kW/h							
PM	**Flottenanteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Basis-emissionen pro 9 kWh**	**Anteil am "Flotten-generator"**	**1 Schiff**	**50 Schiffe**	
Emissionslevel nach TREMOD	%	g/kWh	g/ 9kWh	g/kWh	g/8h	kg/8h	t/a
vor 1981	**7,0**	2,7	24,3	0,2	13,6	680,4	248,3
1981-1990	**4,1**	1,9	17,1	0,1	5,6	280,4	102,4
1991-2002	**13,1**	1,3	11,7	0,2	12,3	613,1	223,8
∑ EU II + ZKR I	**53,3**	0,4	3,6	0,2	15,4	767,5	280,1
∑ EU IIIa + ZKR II	**22,5**	0,4	3,6	0,1	6,5	324,0	118,3
EG V (ab 2019)	**--**	0,02	--	--	--	--	--
Basisdaten für die Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**			**g/kWh**	**g/8h**	**kg/8h**	**kg/a**
				0,7	**53,3**	**2,7**	**972,9**

Abbildung 7: Ein 135-m-Containerschiff im Duisburger Hafen (Foto: D. Busch, LANUV)

5.2 Reale Berechnung der Emissionen von Tankschiffen

5.2.1 Transportwege und erwartete Ladevorgänge

Die Emissionen von Tankschiffen am Liegeplatz sind schwieriger zu ermitteln als bei motorisierten Frachtschiffen, da das Entladen von Tankschiffen mit den Pumpen an Bord erfolgt. Für die Einschätzung der zu erwartenden Emissionen ist es wichtig, zunächst einige grundlegende Informationen zur Tankschifffahrt auf dem Rhein zu geben.

Der Transport von Mineralölprodukten auf dem Rhein, wie Benzin und Diesel ("Gasöl") und Rohöl erfolgt hauptsächlich von der Küste ins Binnenland. Das bedeutet, dass die Schiffe in den Küstenhäfen wie Rotterdam oder Antwerpen beladen werden und dann stromaufwärts zu ihren Zielhäfen fahren. Teilweise laufen die Schiffe auf dieser Reise auch Zwischenhäfen an, um dort einen Teil der Ladung abzuliefern. Dies hat den Vorteil, dass z.B. bis Duisburg die tiefere Wasserstraße des Niederrheins für die großen Schiffe genutzt werden kann. Nach Ablieferung eines Teils der Ladung ("Leichterung") hat das Schiff weniger Tiefgang und kann dann problemlos Häfen wie Basel am Oberrhein erreichen.

Für Mineralölprodukte gibt es in den meisten Fällen keine Rückfracht, so dass die Tanker überwiegend leer (unter "Ballast") zu den Küstenhäfen zurückkehren. Beim Transport von Mineralölprodukten und Rohöl handelt es sich daher in vielen Tanklagern überwiegend um Entladevorgänge, die schiffsseitig über bordeigene Pumpen durchgeführt werden. Ein Tankschiff, das Mineralölprodukte transportiert, hat daher beim Entladen einen deutlich höheren Energiebedarf als ein Frachtschiff und damit auch ein höheres Emissionspotenzial.

Bei flüssigen Industriechemikalien und petrochemischen Produkten kommt es häufiger zu nachgelagerten Transporten. Dabei handelt es sich sowohl um Transporte zwischen den Küstenhäfen und den Industriestandorten als auch zwischen den verschiedenen Industriestandorten. In einigen Fällen findet auch ein Umschlag von Bahnkesselwagen auf Tankschiffe oder umgekehrt an den Umschlaganlagen statt.

Auch bei Industriechemikalien und Fertigprodukten findet in der Regel nur ein Ent- oder Beladevorgang an den Umschlaganlagen statt. D.h. das beladene Schiff kommt am Liegeplatz an, wird entladen und fährt leer wieder ab. Oder ein leeres Schiff kommt an und nimmt seine Ladung auf. Eine Situation, in der sowohl das Entladen als auch das Beladen während eines Liegevorgangs stattfindet, kommt in der Praxis selten vor, da die Tanks bei Produktwechsel gereinigt werden müssen.

Je nach Flüssiggut, für das die jeweiligen Landanlagen ausgelegt sind, überwiegen an den einzelnen Anlagen entweder die Lösch- oder die Ladevorgänge. Für eine realistische Abschätzung der von liegenden Tankschiffen emittierten Emissionen ist es daher wichtig auch die Relationen zwischen den Entlade- und Ladevorgängen in den betrachteten Häfen zu kennen. Diese Information kann nur durch direkte Befragung der Betreiber der jeweiligen Landanlagen erhoben werden.

5.2.2 Ladekapazitäten der Tankschifftypen auf dem Rhein in NRW

Der Hauptgüterverkehr mit flüssigen Produkten auf dem nordrhein-westfälischen Rheinabschnitt wird mit Tankschiffen der Längenklassen 85 m, 110 m und 135 m Länge abgewickelt. Das durchschnittliche Schiff der jeweiligen Längenklasse hat die folgenden technischen Daten (Tab. 11):

Tabelle 11: Technische Daten von Tankschiffen der Längenklassen IV, Va und Vb

Schiffsklasse	Länge (m)	Breite (m)	Tiefgang (m)	Anzahl der Tanks	Ladekapazität (m^3)
IV	**85**	**9,5**	**2,5**	**5**	**1.800**
Va	**110**	**11,4**	**3**	**8-10**	**3.300**
Vb	**135**	**11,4**	**3,5**	**14**	**4.050**

5.2.3 Be- und Entladeverfahren für Tankschiffe

Die für das Be- und Entladen benötigte Zeit hängt von der Größe des Schiffes sowie von den Pump- und Aufnahmekapazitäten von Schiff und Landanlagen ab. Auf modernen Tankschiffen ist in der Regel jeder Tank mit einer Tauchpumpe ausgestattet. Die Pumpe eines niederländischen Herstellers (Marflex-Pumpe MDPD 80) mit einer Förderleistung von bis zu 90 m^3/h ist sehr verbreitet. Etwa 75 % der Tankschiffe im Rheingebiet sollen mit Pumpen dieses Typs ausgestattet sein (Reederei Deymann, mündl. Mitteilung). Ältere "Einprodukt"-Tankschiffe haben manchmal nur eine Pumpe (300-700 kW), die sich an Deck befindet. Auf diesen Schiffen bedient diese Pumpe alle vorhandenen Tanks.

5.2.3.1 Ladevorgänge

Die Beladung von Tankschiffen am Liegeplatz wird in der Regel von landseitigen Anlagen durchgeführt, die auch die notwendige Pumpenleistung bereitstellen. Während des Ladevorgangs benötigt das Schiff dann nur die Energie für Lüftung, Wohnräume, Maschinenraum und Steuerhaus. Nach Angaben der Reederei Harms (persönliche Mitteilung) entsteht auf modernen Tankern am Liegeplatz ein Leistungsbedarf von ca. 9 kW, der in der Regel durch den kleinsten Generator an Bord erzeugt wird. Der höhere Leistungsbedarf ergibt sich aus den höheren Sicherheitsanforderungen an die Belüftung (z.B. Maschinenraum, Wohnräume, etc.) und ggf. auch aus dem Einsatz von elektrischen Heizsystemen.

5.2.3.2 Entladevorgänge

Entladevorgänge werden schiffsseitig mit den Pumpen an Bord durchgeführt, die einen wesentlich höheren Leistungsbedarf haben. Die für die Entladung benötigte Zeit hängt daher sowohl von den schiffsseitigen Parametern wie Ladungsmenge und an Bord verfügbarer Pumpleistung als auch von der landseitigen Aufnahmekapazität (m^3/h) der Anlage ab. Die Anlagen auf der "Ölinsel" im Duisburger Hafen haben z.B. eine Aufnahmekapazität von jeweils 400 m^3/h.

Bei der Entladung eines Tankschiffes können an solchen Anlagen maximal 4-5 Tanks gleichzeitig mit den bordeigenen Pumpen entladen werden. Mitarbeiter verschiedener Reedereien (mündl. Kommunikation mit den Reedereien Jägers und Deymann) schätzten den Leistungs-

bedarf in der Praxis für die einzelnen Tauchpumpen auf jeweils 20-30 kW. Bei einer Aufnahmekapazität der Landanlage von 400 m³/h werden in der Regel die Pumpen von 4-5 Tanks verwendet, die dann jeweils etwa 20 kW Leistung benötigen.

Nach diesen Angaben muss während eines Entladevorgangs eine Leistung von etwa 110 kW zur Verfügung gestellt werden. In der Praxis wird diese Energiemenge mit einem der großen Dieselgeneratoren an Bord erzeugt. Der Entladevorgang wird zunächst "langsam angefahren", d.h. man beginnt mit etwa der Hälfte des benötigten Durchflusses und steigert langsam auf die volle Leistung. Zur Abschätzung der beim Entladevorgang entstehenden Emissionen wurden einheitlich die TREMOD Emissionsfaktoren für Motoren der Leistungsklasse 130-299 kW verwendet.

Für die jeweiligen Schiffsgrößen ergeben sich folgende aktive "Pumpzeiten" für die Entladevorgänge, wenn die Landanlage eine Aufnahmekapazität von 400 m³/h hat:

Tabelle 12: Durchschnittliche Ladezeiten von Tankschiffen in den Längenklassen IV, Va und Vb bei Aufnahmekapazität der Landanlage 400 m³/h

	Durchschnittliche Lade- und Entladezeiten der Tankschiffe			
Schiffsklasse	**Länge**	**Ladevolumen**	**Ladezeiten**	**Ein-/Ausklarieren**
IV	**85 m**	**1800 m³**	**about 5-6 h**	**1h**
Va	**110 m**	**3300 m³**	**about 8-9 h**	**1h**
Vb	**135 m**	**4050 m³**	**about 10-12 h**	**1h**

5.2.3.3 Kapazität der kleinsten und "größten" Generatoren auf Tankschiffen

Für insgesamt 280 Tankschiffe liegen Leistungsdaten (kW) zu den Schiffsgeneratoren und zum Teil auch zu deren Baujahr und Emissionsniveau vor (Tab. 13).

Tabelle 13: Leistungsstrukturen (durchschnittliche Leistung) der "kleinsten" und „größten“ Generatoren auf Tankschiffen. Übersicht über die analysierten Daten auf Tankschiffen (deutsche ZBBD-Datenbank, 2019)

	Längenklasse der Schiffe					
	I	**II**	**III**	**IV**	**Va**	**Vb**
Länge	**< 40 m**	**40-56 m**	**56-68 m**	**68-85 m**	**86-110 m**	**> 110 m**
Anzahl	**27**	**8**		**113**	**127**	**5**
Mittlere Leistung „kleinste” Generatoren (kW)	**49**	**35**		**54**	**66**	**50**
Mittlere Leistung „größte” Generatoren (kW)	**66**	**74**		**159**	**174**	**242**

Zu den reinen "Pumpzeiten" kommen noch 1-2 Stunden für das Anschließen des Schiffes an die Landanlage, für das Trennen der Anschlüsse nach der Tankentleerung und für das jeweilige Ein- und Ausklarieren des Schiffes an der Anlage hinzu.

Nach den vorliegenden Daten kann die Berechnung von Tankschiffen am Liegeplatz ohne eigene Ladetätigkeit mit den TREMOD-Basisfaktoren der Leistungsklasse 27-74 kW erfolgen,

die für Niedriglast angepasst wurden (Tab. 7a). Die Berechnungen der schiffsseitigen Entladetätigkeit erfolgen mit den Basisfaktoren der Leistungsklasse 130-299 kW (Tab. 7b), der Zusammensetzung der in der Flotte vorhandenen Generatoren und den daraus ermittelten stündlichen Emissionen des "durchschnittlich größten Flottengenerators" (Tab. 10c).

5.2.4 Emissionsfaktoren für die „größten“ Generatoren der Tankschiffe

Analog zur Vorgehensweise für die "kleinsten" Generatoren wurden auch Emissionsfaktoren für den "größten durchschnittlichen Flottengenerator" auf den Tankschiffen ermittelt (Tab. 10c). Die zu erwartenden Emissionen wurden sowohl jeweils pro kWh als auch für eine Stunde Entladetätigkeit mit einem Leistungsbedarf von 110 kW (Summe aus Grundbedarf Tanker (9 kW) und 100 kW Leistungsbedarf der Pumpen) ermittelt.

Dieser Energiebedarf für die Entladung wird durch große Bordgeneratoren >110 kW bereitgestellt. Diese Generatoren gehören überwiegend in die Emissionsgruppe der Motoren 130-299 kW (TREMOD).

Tabelle 10c: Abschätzung der NO_X- und PM_{10}-Emissionen (Feinstaub) der Stromgeneratoren von verankerten Tankschiffen mit Ladetätigkeit an Bord, unter Berücksichtigung der Zusammensetzung der Emissionswerte der "größten" Generatoren

Tankschiffe: "größter" Generator 130-299 kW; (Schiffsklassen IV, Va, Vb = 85 - 135 m), 110 kW/h				
NO_X	**Flottenanteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Anteil am "Flottengenerator"**	
Emissionslevel nach TREMOD	%	g/kWh	g/kWh	g/110 kWh
vor 1981	**6,6**	17,8	1,2	129,2
1981-1990	**3,7**	12,4	0,5	50,5
1991-2002	**10,7**	11,2	1,2	131,8
∑ EU II + ZKR I	**42,4**	5,2	2,2	242,5
∑ EU IIIa + ZKR II	**36,6**	3,2	1,2	128,8
EG V ab 2018	--	--	--	--
Basisdaten für die Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**		**g/kWh**	**g/110kWh**
			6,2	**682,88**
Tankschiffe: "größter" Generator 130-299 kW; (Schiffsklassen IV, Va, Vb = 85 - 135 m), 110 kW/h				
PM	**Flottenanteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Anteil am "Flottengenerator"**	
Emissionslevel nach TREMOD	%	g/kWh	g/kWh	g/110 kWh
vor 1981	**6,6**	0,90	0,06	6,5
1981-1990	**3,7**	0,80	0,03	3,3
1991-2002	**10,7**	0,40	0,04	4,7
∑ EU II + ZKR I	**42,4**	0,10	0,04	4,7
∑ EU IIIa + ZKR II	**36,6**	0,10	0,04	4,0
EG V ab 2018	--	--	--	--
Basisdaten für die Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**		**g/kWh**	**g/110kWh**
			0,21	**23,19**

5.3 Berechnung der Emissionen aus dem realen Tankerverkehr auf der "Ölinsel" im Duisburger Hafen für das Jahr 2018

Im Duisburger Hafen wird auf der sogenannten "Ölinsel" zwischen den Hafenbecken A und B ein Tanklager betrieben. Die sieben Anlagen zur Abfertigung von Tankschiffen befinden sich alle östlich der Ölinsel im Hafenbecken A. Die Landanlagen haben eine Aufnahmekapazität von jeweils 400 m³/h. Die Tankschiffe werden mit den schiffseigenen Pumpen entladen, während die Beladung mit landseitigen Pumpen erfolgt.

Der Betreiber des Tanklagers hat die Schiffsbewegungen für das Jahr 2018 zur Verfügung gestellt. In diesem Jahr haben insgesamt 1.864 Tankschiffe an der „Ölinsel“ festgemacht. Davon gehörten 40% Schiffe zur Größenklasse IV (85 m) und 60% Schiffe zur Größenklasse Va (110 m). Schiffe der Klasse Vb laufen die Anlagen nur selten an (ca. 1-2 Schiffe pro Monat). Aus diesem Grund wurden zusätzlich 5 Entlade- und 12 Ladevorgänge für diese Klasse in die Schätzung einbezogen. Tanker der kleineren Längenklassen I-III können an der Anlage nicht abgefertigt werden. In 715 Fällen wurden die Schiffe entladen, in 1.149 Fällen wurden die Schiffe beladen. (Tab. 14)

Die Berechnung der Emissionen der Tankschiffe am Liegeplatz ohne schiffsseitigen Pumpeneinsatz erfolgt analog zur Vorgehensweise bei den Gütermotorschiffen durch Verrechnung der Anzahl der liegenden Schiffe, der durchschnittlichen Liegezeit und der Emissionsfaktoren für den angenommenen durchschnittlichen "kleinsten Flottengenerator" der Tankschiffe, der für die Längenklassen IV, Va und Vb ermittelt wurde (Tab. 10a & b).

Tabelle 14: Beladungs- und Entladungsvorgänge an der „Ölinsel“ im Hafen Duisburg im Jahr 2018

„Ölinsel“ Duisburg	Ladeaktivitäten		Schiffsklasse	
2018	**Anzahl**	**Anteil**	**IV**	**Va**
		%	**85 m (40 %)**	**110 m (60 %)**
Entladungen	**715**	**38,4**	**286**	**429**
Beladungen	**1.149**	**61,6**	**460**	**689**
Gesamt	**1.864**		**746**	**1.118**

Die Emissionsmengen der Tankschiffe mit schiffsseitiger Ladetätigkeit werden aus der Anzahl der Ladevorgänge pro Schiffsklasse, aus der Annahme der benötigten Gesamtleistung von 110 kW, der durchschnittlichen Entladezeit pro Schiffsklasse und den Emissionsfaktoren des durchschnittlichen „größten Flottengenerators“ (Tab. 10c) der Tankschiffe (Längenklassen IV, Va und Vb) berechnet.

Da die Schiffe für das Ein- und Ausklarieren eine zusätzliche Liegezeit von ca. 1h benötigen, bekamen alle Entladevorgänge einen "Emissionszuschlag" von einer Stunde mit Laufzeit "kleinster Generator". Die Ergebnisse der Emissionsberechnungen für die „Ölinsel“ im Jahr 2018 wurden in Tabelle 15 zusammengestellt. Insgesamt ergab die Abfertigung der insgesamt 1.864 Tanker an der "Ölinsel" im Jahr 2018 eine Emissionsmenge von 4,06 t NO_X und 145 kg Feinstaub (PM_{10}).

Tabelle 15: Abschätzung der NO_X- und PM_{10}-Emissionen der Tankschiffe, die an der "Ölinsel" im Hafenbecken A in Duisburg be- oder entladen werden, für das Jahr 2018

Entladevorgänge mit bordeigenen Pumpen	**Schiffsklasse**	**IV 85 m**	**Va 110 m**	**Vb 135 m**
	Entladezeit	**6 h**	**9 h**	**12 h**
Emissionen pro Entladevorgang	**NO_X (kg)**	**4,10**	**6,15**	**8,20**
	PM (g)	**139,2**	**208,8**	**278,4**
Entladevorgänge	**Anzahl**	**286**	**429**	**5**
Emissionen 2018	**NO_X (kg)**	**1172,0**	**2637,1**	**41,0**
	PM (kg)	**39,8**	**89,6**	**1,4**
Zuschlag für Ein- und Ausklarieren 1h "kleinster" Generator	**NO_X (kg)**	**14,5**		
	PM (kg)	**1,0**		
Entladevorgänge	**Emissionen liegender Tankschiffe Duisburg 2018 Entladevorgänge in Hafenbecken A**			
	NO_X (t)	**3,86**		
	PM (kg)	**131,8**		
Ladevorgänge mit landseitigen Pumpen	**Schiffsklasse**	**IV 85 m**	**Va 110 m**	**Vb 135 m**
	Ladezeit	**7 h**	**10 h**	**13 h**
Emissionen pro Ladevorgang	**NO_X (g)**	**141,4**	**181,8**	**242,4**
	PM (g)	**9,8**	**12,6**	**16,8**
Ladevorgänge	**Anzahl**	**460**	**689**	**12**
Emissionen 2018	**NO_X (kg)**	**65,04**	**125,26**	**2,91**
	PM (kg)	**4,5**	**8,7**	**0,2**
Zuschlag für Ein- und Ausklarieren	**Bereits in den Ladezeiten enthalten**			
Ladevorgänge	**Emissionen liegender Tankschiffe Duisburg 2018 Ladevorgänge in Hafenbecken A**			
	NO_X (t)	**0,19**		
	PM (kg)	**13,4**		
2018	**Emissionen liegender Tankschiffe Duisburg 2018 Tankschiffe im Hafenbecken A "Ölinsel"**			
	NO_X (t)	**4,06**		
	PM (kg)	**145,2**		

6 Abschätzung der Emissionen von Passagierschiffen (Kreuzfahrt- und Hotelbetrieb)

Während einer Flusskreuzfahrt werden in der Regel die innerstädtischen Bereiche angelaufen, in denen die Schiffe längere Zeit zur Stadtbesichtigung und zur Nachtruhe vor Anker liegen. Diese Liegeplätze führen häufig zu Beschwerden von Anwohnern über Lärm- und Abgasbelastungen. Die Planung neuer Liegeplätze oder deren Umbau ist mit komplexen Genehmigungsverfahren verbunden, bei denen auch die Höhe der zu erwartenden Emissionen ermittelt werden muss. Daher werden die mit den Liegezeiten verbundenen Schadstoff- und Lärmemissionen für die Luftreinhalteplanung in Städten, die an großen Wasserstraßen liegen, besonders relevant.

6.1 Energiebedarf liegender Flusskreuzfahrtschiffe

In der Regel legen die Flusskreuzfahrtschiffe am frühen Nachmittag an ihrem Tagesziel an In der Regel legen die Flusskreuzfahrtschiffe am frühen Nachmittag an ihrem Tagesziel an und setzen die Reise am nächsten Morgen fort. Die Liegezeiten betragen etwa 18 Stunden. Der Energiebedarf der Schiffe steigt proportional zur Anzahl der Passagiere an Bord, so dass davon ausgegangen werden kann, dass kleinere Schiffsgrößen (85-100 m) einen geringeren Energiebedarf haben als die großen 110-135 m langen Schiffe. Der Energiebedarf schwankt auch über den Verlauf der Liegezeit. Er ist tagsüber am höchsten, wenn alle Passagiere aktiv sind und der Restaurantbetrieb zu den Essenszeiten läuft. Wenn ein leeres Schiff am Ende der Reise länger auf neue Passagiere wartet, kann der Energiebedarf deutlich niedriger sein.

Umfragen bei deutschen Reedereien erbrachten recht unterschiedliche Angaben für den Energiebedarf liegender Flusskreuzfahrtschiffe in der Größenordnung zwischen 30 und 230 kW. Eine der Reedereien machte genauere Angaben:

Durchschnittliche Aufenthaltsdauer in Düsseldorf: 8 h

Durchschnittlicher Energiebedarf: 85 m Schiff 130 kW

110 m Schiff 180 kW

135 m Schiff: 230 kW.

Diese Zahlen spiegeln die Dimensionen des tatsächlichen Energiebedarfs wider, ermöglichen aber nur grobe Abschätzungen der Emissionen. Reale Daten über den tatsächlichen Energiebedarf von Kreuzfahrtschiffen können aus dem tatsächlichen Stromverbrauch an bestehenden Landstromanlagen (OPS-Anlagen) gewonnen werden. Für CLINSH konnten Originaldaten zur Energieabnahme am Liegeplatz von einem niederländischen Landstrombetreiber (Niederlande) aus den Jahren 2019 und 2020 ausgewertet werden. Es handelt sich um Landstromanlagen am Waal-Kai im Innenstadtbereich von Nijmegen, die hauptsächlich von Flusskreuzfahrtschiffen genutzt werden.

In 332 Fällen (61 %) lagen neben dem Energieverbrauch auch Daten zu den jeweiligen Schiffsgrößen vor, so dass der Energiebedarf nach den Schiffslängen klassifiziert werden kann. Für diese Schiffe konnten Durchschnittswerte für den durchschnittlich zu erwartenden Energiebedarf abgeleitet werden, wenn die Schiffe mit Passagieren unterwegs sind. Für 39 % der die Landstromanlagen nutzenden Schiffe lagen keine Längenangaben vor. Diese Schiffe wurden anhand ihres Energiebedarfs einer Größenklasse zugeordnet.

Tabelle 16: Nutzungshäufigkeit und durchschnittliche Nutzungsdauer der verschiedenen Landstromanlagen in Nijmegen
*Der Vikingsteiger war 2019/20 außer Betrieb

Anlagen zur Landstrom-versorgung in Nijmegen	Anzahl der Schiffe in 2019/2020	Durchschnittliche Liegezeiten
Name der Anlage	n	h
Grote Straat	233	14
Labyrinth	90	15
Oude Haven	195	12
Vikingsteiger*	1	16
Unbenannte Anlage	11	154
Gesamt	530	16

Aus den 332 Verbrauchsdateneinträgen mit Angaben zur jeweiligen Schiffslänge lassen sich die in Tab. 17 zusammengestellten Größenordnungen für die Abschätzung des durchschnittlichen Leistungsbedarfs eines Flusskreuzfahrtschiffes mit Passagieren ableiten.

Energieverbräuche unter 30 kW wurden nicht ausgewertet, da davon ausgegangen werden kann, dass einige der Schiffe ohne Passagiere, z.B. zu Beginn der Reise zum Einschiffen, angelegt haben (Beispiel 110 m Schiff, Ankunft 04.05.2019, 7:27 Uhr, Abfahrt 12:30 Uhr, durchschnittliche Leistungsaufnahme 22,4 kW). Während längerer Ruhezeiten (z.B. außerhalb der Saison im Winter) kann der Leistungsbedarf auch in den Bereich von 1 - 2 kW absinken.

Tabelle 17: Leistungsbedarf (kW) von Flusskreuzfahrtschiffen mit Passagieren am Liegeplatz. Auswertung der realen Stromverbrauchsdaten an Landstromanlagen in Nijmegen (2019-2020).

Leistungsbedarf der Schiffe in Nijmegen	Längenklasse der Schiffe		
	< 110 m	110 m	135 m
Anzahl	28	131	154
Mittler Bedarf (kW)	**70,3**	**95,7**	**113,7**
Minimum (kW)	31,3	30,4	30,0
Maximum (kW)	126,8	179,5	203,5

*Schiffe ab 105 m wurden der 110-m-Klasse und Schiffe ab 130 m der 135-m-Klasse zugeordnet.

Aus der Analyse der Daten ergeben sich vier verschiedene Lastbereiche:

- **Leistungsaufnahme unter 30 kW:** Schiff liegt ohne Passagiere und Bordbetrieb.
- **Leistungsaufnahme 30-80 kW:** Kleinere Schiffe der Längenklasse IV (85 m), oder das Schiff ist am Beginn oder Ende der Reise vorübergehend ohne Passagiere.
- **Stromaufnahme 80-105 kW:** Schiffe der Längenklasse Va (110 m)
- **Stromaufnahme > 115 kW:** Schiffe der Längenklasse Vb (135 m)

Aus den Auswertungen ergeben sich folgende Größenordnungen für die Leistungsabnahme in Nijmegen (Tab. 18). Die zusammengestellten Daten zum Leistungsbedarf können auch als Grundlage für die Berechnung der zu erwartenden Emissionsmengen an den Liegeplätzen ohne Landstromanlage dienen.

Tabelle 18: Durchschnittliche Anzahl von Passagieren und Besatzungsmitgliedern für die einzelnen Schiffsgrößen und zugehöriger durchschnittlicher Leistungsbedarf (kW) für Anlegephasen während einer Kreuzfahrt.

Schiffslänge	Klasse	Passagiere	Crew	Personen an Bord	Leistungsbedarf
85-104 m	**IV**	70-100	25-30	95-130	70 kW *
105-129 m	**Va**	110-150	30-40	140-190	95 kW
< 130 m	**Vb**	140-190	45-50	195-250	115 kW

* Schätzung, da Datenbasis zu klein

6.2 Generatorenausstattung von Flusskreuzfahrtschiffen

Um die Emissionen von Flusskreuzfahrtschiffen an innerstädtischen Liegeplätzen abschätzen zu können, ist die Kenntnis der an Bord befindlichen Generatoren und deren Emissionsverhalten notwendig. Zur Analyse des Generatorenpools standen Daten von 34 Flusskreuzfahrtschiffen der Längenklassen (IV, Va und Vb) in der deutschen ZBBD-Datenbank zur Verfügung (3). Die Anzahl der Schiffe in der Datenbank ist relativ klein, kann aber dennoch zur Abschätzung der Zusammensetzung der Generatoren, zumindest für die Schiffe der Größenklassen Va (110 m) und Vb (135 m), verwendet werden (Tab. 20). Allerdings bleibt die Repräsentativität der Zusammensetzung für Schiffsgrößen der Klasse IV (85 m) eher gering. Für CLINSH wäre es daher vorteilhafter gewesen, wenn auch Daten der niederländischen und belgischen Schiffsuntersuchungskommissionen verfügbar gewesen wären.

Die Höhe der Emissionen hängt sowohl vom jeweiligen Energiebedarf der Schiffe als auch vom Alter der eingesetzten Generatoren und deren Emissionsverhalten ab. Je höher der Anteil der "jungen" Generatoren ist, die bereits eine der EU- oder ZKR-Zertifizierungen erfüllen, desto geringer sind auch die Emissionen. Die Generatoren der 110 m-Schiffe waren im Durchschnitt etwa 20 Jahre alt (Tab. 20), nur 52 % der Generatoren unterlagen bereits den Emissionsvorschriften. Die meisten der Kabinenschiffe der 135 m Klasse wurden nach 2010 gebaut, so dass hier alle Generatoren der Leistungsklasse 130-299 kW bereits Emissionsvorschriften erfüllen mussten. Dies erklärt die deutlich geringeren Emissionen pro Liegestunde im Vergleich zu den 110 m Schiffen (Tab. 21a&b).

Die Emissionen wurden anhand der Emissionswerte nach TREMOD (4) (Leistungsklasse 130-299 kW; Tab. 20) und unter Berücksichtigung der tatsächlichen Zusammensetzung des Generatorenpools abgeschätzt. Anhand dieser Daten wurden Emissionsfaktoren für die durchschnittlichen "mittleren Flottengeneratoren" pro Schiffsgrößenklasse ermittelt, die zur Abschätzung der durchschnittlichen NO_X- und Feinstaubemissionen pro Liegezeit herangezogen werden können (Tab. 21).

Tabelle 19: TREMOD-Basisemissionsfaktoren für mobile Dieselmotoren der Leistungsklasse 130-299 kW

Generatoren der Leistungsklasse 130-299 kW			
Emissionstufe nach TREMOD	**Dieselverbrauch g/kWh**	**NO_X g/kWh**	**PM g/kWh**
vor 1981	270	17,8	0,9
1981-1990	260	12,4	0,8
1991-Stufe I	250	11,2	0,4
Stufe I	250	7,6	0,2
Stufe II	250	5,2	0,1
Stufe IIIa	250	3,2	0,1
Stufe IIIb	250	2,63	0,025
Stufe IV	250	2,25	0,025
Stufe V	250	0,4	0,015

Tabelle 20: Zusammensetzung des Generatorpools auf Kabinenschiffen gemäß Auszug aus der deutschen ZBBD-Datenbank

Flusskreuzfahrtschiffe	Größenklasse der Schiffe		
	IV	Via	Vb
Schiffe	**68-86 m**	**86-110 m**	**>110 m**
Anzahl	**4**	**19**	**11**
Baujahre, Spanne	**1979-2000**	**1961-2011**	**2002-2016**
Mittleres Baujahr	**1992**	**1996**	**2009**
Mittleres Alter (Jahre)	**28**	**24**	**11**
Hauptmaschine(n)			
Leistungsspanne (kW)	**440-882**	**1.176-1.732**	**1.324-1.600**
Mittlere Leistung (kW)	**745**	**1.475**	**1.439**
Baujahr, Spanne	**1998-2017**	**1961-2017**	**2002-2016**
Mittleres Baujahr	**2008**	**2000**	**2009**
Mittleres Alter (Jahre)	**12**	**20**	**11**
Mit Emissionsstufe	**3**	**11**	**11**
Generatoren an Bord			
Angabe Leistung (kW)	**7**	**60**	**32**
Anzahl der Generatoren			
1	**2**	**1**	**--**
2	**1**	**1**	**1**
3	**1**	**7**	**6**
4	**--**	**9**	**2**
5	**--**	**1**	**--**
Mit Emissionsstufe	**6**	**44**	**30**
"Kleinster" Generator			
Angabe zum Baujahr	**4**	**19**	**11**
Baujahre, Spanne	**1979-2018**	**1983-2017**	**2002-2013**
Mittleres Baujahr	**1999**	**2000**	**2008**
Mittleres Alter (Jahre)	**21**	**20**	**12**
Leistung, Spanne (kW)	**70-390**	**47-403**	**37-587**
Mittlere Leistung (kW)	**230**	**150**	**240**
"Größter" Generator			
Angabe zum Baujahr	**4**	**19**	**11**
Baujahre, Spanne	**1979-2018**	**1908-2010**	**2002-2013**
Mittleres Baujahr	**1999**	**2000**	**2008**
Mittleres Alter (Jahre)	**21**	**20**	**12**
Leistung, Spanne (kW)	**70-390**	**118-403**	**418-587**
Mittlere Leistung (kW)	**230**	**288**	**461**

Tabelle 21: Zusammensetzung der Generatoren auf Kreuzfahrtschiffen nach verschiedenen Emissionsstufen (TREMOD)

Kreuzfahrtschiffe : Emissionsstufen der Bordgeneratoren mit Leistung >130 kW						
Emissionsstufen nach TREMOD	**bis 85 m (IV)**		**bis 110 m (Va)**		**bis 135 m (Va)**	
	Anzahl	**%**	**Anzahl**	**%**	**Anzahl**	**%**
Gesamt	6		44		30	
vor 1981	1	16,7	2	4,5	--	--
1981-1991	--	--	6	13,6	--	--
1991-2002	2	33,3	13	29,5	--	--
EU II + ZKR I			12	27,3	8	26,7
EU IIIa+ ZKR II	3	50	11	25	22	73,3

Auf Basis der vorliegenden Daten kann auch das Emissionsverhalten eines "durchschnittlichen Flottengenerators" aus der Zusammensetzung des jeweiligen Generatorpools und damit auch die zu erwartende Emissionsmenge pro kWh ermittelt werden. Anhand des für die Schiffsgröße zu erwartenden durchschnittlichen Energiebedarfs, der Besuchshäufigkeit und der Emissionsmenge/kWh lassen sich anschließend die jeweils zu erwartenden Emissionen am Liegeplatz abschätzen.

Abbildung 8: Drei Flusskreuzfahrtschiffe und ein Tagesausflugsschiff liegen vor der Kölner Altstadt. Im Vordergrund ein 135 m Frachtschiff. (Foto: Busch, LANUV)

Tabelle 22a: Abschätzung der durchschnittlichen NO_X-Emissionen von liegenden Kreuzfahrtschiffen mit Besatzung und Passagieren

Kabinenschiff 85 m, Generatorenklasse 130-299 kW, Leistungsbedarf 70 kW/h					
NO_X	**Flotten-anteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Emissionen "Flottengenerator"**		
			Anteil	**1 Schiff/h**	**1 Schiff/18 h**
Emissionsstufe nach TREMOD	**%**	g/kWh	g/kWh	g/h	g/18h
vor 1981	**16,7**	17,8	2,97	208,1	3745,5
1981-1990	--	12,4		--	--
1991-2002	**33,3**	11,2	3,73	261,1	4699,3
∑ EU II + ZKR I	--	5,2		--	--
∑ EU IIIa + ZKR II	**50**	3,2	1,60	112,0	2016,0
EG V ab 2018	--	0,4		--	--
Basisdaten für Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**		**g/kWh**	**g/70 kWh**	**kg/18h**
			8,30	**581**	**10,5**
Kabinenschiff, 110 m, Generatorenklasse 130-299 kW, Leistungsbedarf 95 kW/h					
NO_X	**Flotten-anteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Emissionen "Flottengenerator"**		
			Anteil	**1 Schiff/h**	**1 Schiff/18 h**
Emissionsstufe nach TREMOD	**%**	g/kWh	g/kWh	g/h	g/18h
vor 1981	**4,5**	17,8	0,81	76,9	1383,5
1981-1990	**13,6**	12,4	1,69	160,6	2891,5
1991-2002	**29,5**	11,2	3,31	314,4	5658,5
∑ EU II + ZKR I	**27,3**	5,2	1,42	134,7	2425,1
∑ EU IIIa + ZKR II	**25,0**	3,2	0,80	76,0	1368,0
EG V ab 2018	--	0,4	--	--	--
Basisdaten für Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**		**g/kWh**	**g/95 kWh**	**kg/18h**
			8,03	**763**	**13,7**
Kabinenschiff, 135 m, Generatorenklasse 130-299 kW, 115 kW/h					
NO_X	**Flotten-anteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Emissionen "Flottengenerator"**		
			Anteil	**1 Schiff/h**	**1 Schiff/18 h**
Emissionsstufe nach TREMOD	**%**	g/kWh	g/kWh	g/h	g/18h
vor 1981	--	17,8	--	--	--
1981-1990	--	12,4	--	--	--
1991-2002	--	11,2	--	--	--
∑ EU II + ZKR I	**26,7**	5,2	1,39	159,7	2874,0
∑ EU IIIa + ZKR II	**73,3**	3,2	2,35	269,7	4855,4
EG V ab 2018	--	0,4	--	--	--
Basisdaten für Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**		**g/kWh**	**g/110 kWh**	**kg/18h**
			3,73	**429**	**7,7**

Tabelle 22b: Abschätzung der durchschnittlichen PM_{10}-Emissionen von liegenden Kreuzfahrtschiffen mit Besatzung und Passagieren

Kabinenschiff 85 m, Generatorenklasse 130-299 kW, Leistungsbedarf 70 kW/h					
PM	**Flotten-anteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Emissionen "Flottengenerator"**		
			Anteil	**1 Schiff/h**	**1 Schiff/18 h**
Emissionsstufe nach TREMOD	%	g/kWh	g/kWh	g/h	g/18h
vor 1981	**16,7**	0,9	0,15	10,5	189,4
1981-1990	--	0,8		--	--
1991-2002	**33,3**	0,4	0,13	9,3	167,8
∑ EU II + ZKR I	--	0,1		--	--
∑ EU IIIa + ZKR II	**50**	0,1	0,05	3,5	63,0
EG V ab 2018	--	0,015		--	--
Basisdaten für Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**		**g/kWh**	**g/70 kWh**	**g/18h**
			0,33	**23,3**	**420**
Kabinenschiff, 110 m, Generatorenklasse 130-299 kW, Leistungsbedarf 95 kW/h					
PM	**Flotten-anteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Emissionen "Flottengenerator"**		
			Anteil	**1 Schiff/h**	**1 Schiff/18 h**
Emissionsstufe nach TREMOD	%	g/kWh	g/kWh	g/h	g/18h
vor 1981	**4,5**	0,9	0,04	3,9	70,0
1981-1990	**13,6**	0,8	0,11	10,4	186,5
1991-2002	**29,5**	0,4	0,12	11,2	202,1
∑ EU II + ZKR I	**27,3**	0,1	0,03	2,6	46,6
∑ EU IIIa + ZKR II	**25,0**	0,1	0,03	2,4	42,8
EG V ab 2018	--	0,015	--	--	--
Basisdaten für Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**		**g/kWh**	**g/95 kWh**	**g/18h**
			0,32	**30**	**548**
Kabinenschiff, 135 m, Generatorenklasse 130-299 kW, Leistungsbedarf 115 kW/h					
PM	**Flotten-anteil**	**Basis-emissionen pro Stufe**	**Emissionen "Flottengenerator"**		
			Anteil	**1 Schiff/h**	**1 Schiff/18 h**
Emissionsstufe nach TREMOD	%	g/kWh	g/kWh	g/h	g/18h
vor 1981	--	0,9	--	--	--
1981-1990	--	0,8	--	--	--
1991-2002	--	0,4	--	--	--
∑ EU II + ZKR I	**26,7**	0,1	0,03	3,1	55,3
∑ EU IIIa + ZKR II	**73,3**	0,1	0,07	8,4	151,7
EG V ab 2018	--	0,015	--	--	--
Basisdaten für Berechnung	**Emissionen "Flottengenerator"**		**g/kWh**	**g/110 kWh**	**g/18h**
			0,10	**11,5**	**207**

6.3 Abschätzung der zu erwartenden Emissionsmengen von Flusskreuzfahrtschiffen an innenstadtnahen Liegeplätzen

Es zeigt sich, dass die Kabinenschiffe im Kreuzfahrt- oder Hotelbetrieb sehr unterschiedliche Schadstoffmengen pro Schiffsgrößenklasse emittieren können (Tab. 22a&b). Die 135 m langen Schiffe der Klasse Vb, die ausschließlich mit Generatoren der Emissionsstufe EU Stufe II (bzw. ZKR I) und EU Stufe IIIa (bzw. ZKR II) ausgestattet waren, erzeugten mit 429 g/h NO_X und 11,5 g/h PM_{10} im Durchschnitt die niedrigsten Emissionen. Das durchschnittliche Alter dieser Generatoren lag bei 11 Jahren.

Die Schiffe der 110-m-Längenklasse (Va) erreichten mit 761 g/h NO_X und 30,4 g/h PM_{10} deutlich höhere durchschnittliche Emissionen. In der 85-m Klasse (IV) lagen die Emissionen für beide Schadstoffe etwas niedriger, was aber aufgrund der geringen Anzahl der untersuchten 85-m-Schiffe nicht unbedingt repräsentativ ist. Das durchschnittliche Alter der Generatoren auf den 85- und 110-m-Schiffen lag bei 20 Jahren.

Auf der Grundlage der in Tab. 23 dargestellten Daten kann eine Abschätzung der Größenordnung der von den anlegenden Kabinenschiffen verursachten Emissionen vorgenommen werden. Für ein 110 m langes Kabinenschiff ergeben sich daraus während einer durchschnittlichen Liegezeit von 18 h Emissionen in einer Größenordnung von ca.14 kg NO_X und 550 g PM_{10}.

Die Schiffe der Größenklasse Vb (135 m) tragen während einer 18 stündigen Liegezeit mit etwa 8 kg NO_X und ca. 210 g PM_{10} weniger zur Luftverschmutzung bei. Aufgrund der geringen Anzahl der untersuchten Schiffe (4 Schiffe) in der Größenklasse IV (85 m) können keine repräsentativen Emissionsdaten auf Basis der Generatorzusammensetzung abgeleitet werden. Die zu erwartenden Emissionen hängen vom Alter der eingesetzten Generatoren ab und sind insgesamt wegen des geringeren Leistungsbedarfes vermutlich niedriger als die der 110 m Schiffe.

Tabelle 23: Schadstoffemissionen von anlegenden Flusskreuzfahrtschiffen mit Passagieren

Schadstoffemissionen liegender Kabinenschiffe pro Stunde			
Längenklasse	85 m	110 m	135 m
Emittierte Substanz	g/h	g/h	g/h
NO_X	581	761	429
PM_{10}	23,3	30,4	11,5
Schadstoffemissionen liegender Kabinenschiffe pro 18 h Liegezeit			
Emittierte Substanz	kg/18 h	kg/18 h	kg/18 h
NO_X	10,5	13,7	7,7
PM_{10}	0,419	0,547	0,207
Schadstoffemissionen liegender Kabinenschiffe pro Jahr bei 280 Nutzungen/a			
Emittierte Substanz	kg/a	kg/a	kg/a
NO_X	2.929	3.835	2.164
PM_{10}	117	153	58

Eine Anlegestelle in der Nähe des Stadtzentrums, die während der Saison für Flusskreuzfahrten häufig genutzt wird, kann durchaus bis zu 280 Mal im Jahr von Kreuzfahrtschiffen angefahren werden. Würde die Anlegestelle nur von Schiffen der 110-m-Größenklasse genutzt, wären NO_X-Emissionen von ca. 3,8 t/a und PM_{10}-Emissionen von ca. 153 kg/a zu erwarten.

Bei ausschließlicher Nutzung durch Schiffe der 135 m Klasse lägen die jährlichen Emissionen in der Größenordnung von 2,17 t NO_X und 58 kg PM_{10}. Bei einer gleichmäßigen Verteilung der Anteile der Größenklassen Va (110 m) und Vb (135 m) wären Emissionen einer Größenordnung von 3 t/a NO_X und 100 kg/a PM_{10} zu erwarten. Diese Mengenschätzung dürfte den real anfallenden Emissionen bei der tatsächlichen Nutzung am nächsten kommen.

Für genauere, standortbezogene Analysen muss die genaue Zusammensetzung der Schiffsgrößenklassen und die Anzahl der Liegestunden ermittelt werden. Inwieweit die berechneten Emissionen zur Luftverschmutzung in den benachbarten Siedlungen beitragen, hängt von der Entfernung zwischen Liegeplatz und Siedlung, den vorherrschenden Windrichtungen und der Morphologie des Ufers und der Siedlung ab.

6.4 Genauere Abschätzungen der von Kreuzfahrtschiffen emittierten Schadstoffmengen auf Basis einer realen Erfassung des Energieverbrauchs in Nijmegen

Liegen genauere Daten wie die Anzahl der Schiffsbesuche, deren Verteilung auf die Größenklassen, genaue Liegezeiten und/oder der tatsächliche Energieverbrauch vor, sind realitätsnahe Abschätzungen der zu erwartenden Emissionsmengen möglich. Im Rahmen von CLINSH waren solche Daten der Landstrom- (OPS-) Anlagen in Nijmegen verfügbar. Diese OPS-Anlagen befinden sich vor der Altstadt direkt am linken Waalufer und werden hauptsächlich von auf Kreuzfahrt befindlichen Kabinenschiffen mit Passagieren besucht. Die Berechnung wurde für das Jahr 2019 durchgeführt. Im Corona-Jahr 2020 war die Nutzung der OPS-Anlagen mit nur 118 Schiffsbesuchen sehr stark vermindert.

Im Jahr 2019 wurden die OPS-Anlagen von insgesamt 530 Schiffen genutzt (Tab. 24). Die drei häufig frequentierten Anlagen zählten im Durchschnitt jeweils 173 Schiffsbesuche. Insgesamt wurden 8592,5 Stunden Liegezeit im Jahr kumuliert (Tab. 25). Die Energieabnahme aller Schiffe betrug insgesamt 467.499 kWh. Es zeigte sich, dass der durchschnittliche Energiebedarf von Kreuzfahrtschiffen proportional zur Länge des Schiffes bzw. der Anzahl der Passagiere an Bord ist.

6.4.1 Klassifizierung der Schiffe in den OPS-Einrichtungen in Nijmegen

Wenn die Länge der anlegenden Schiffe bekannt ist, können diese den jeweiligen Größenklassen zugeordnet werden. Es wird angenommen, dass sich die besuchenden Schiffe auf einer Flusskreuzfahrt mit Passagieren befinden. Die Emissionen von Hotelschiffen mit Gastronomiebetrieb dürften in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Für einen Teil der Schiffe (n=263) waren leider keine Längenangaben verfügbar.

Um die Berechnung durchführen zu können, wurde diesen Fällen auf Basis der aufgenommenen Leistung (kW) auf die Schiffslänge rückgeschlossen, um den zu verwendenden Emissionsfaktor bestimmen zu können. Insgesamt ergibt sich die in Tabelle 24 zusammengestellte Verteilung (Tab. 24):

Tabelle 24: Klassifizierung der besuchenden Kreuzfahrtschiffe an den OPS-Einrichtungen in Nijmegen

Schiffsklasse	2019	Leistungsbedarf
	Anzahl	kW
unbekannt	44	< 30
< 110 m	112	30-80
110 (105-115) m	167	80-105
135 (ab 130) m	208	> 105

Diese Zuordnung von Schiffen ohne Längenangabe zu den Schiffslängenklassen bleibt aufgrund der großen Spannbreite der Leistungsaufnahme der Schiffe unsicher, ist aber für die Berechnung der Emissionen notwendig, da über die Schiffsgröße auf die Emissionsfaktoren der an Bord befindlichen Generatoren rückgeschlossen werden muss. Für die 44 Schiffe mit einer Leistungsaufnahme von weniger als 30 kW, die auch nach dieser Zuordnung "unbekannt" bleiben, wurde die Berechnung mit den Emissionsfaktoren des "durchschnittlichen Flottengenerators" der Klasse IV durchgeführt. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich hier entweder um Kabinenschiffe ohne Passagiere, Frachtschiffe oder private Yachten handelte. Aufgrund der geringen Anzahl von Schiffen und der geringen Leistungsaufnahme ist deren Anteil an den Gesamtemissionen und somit auch die Fehlerquote bei diesem Verfahren gering.

6.4.2 Abschätzung der eingesparten Emissionen durch die Onshore-Stromversorgungsanlagen (OPS) in Nijmegen

Wenn sowohl die Schiffsklasse als auch der Stromverbrauch für die einzelnen Liegezeiten bekannt sind, kann für jeden einzelnen Datensatz nach der Formel:

Stromverbrauch (kWh) * Emissionsfaktor „Flottengenerator“ (g/kWh)

die Menge der zu erwartenden Emissionen pro Besuch berechnet werden, die ohne die Nutzung der OPS-Anlage entstanden wäre. Grundlage für die Berechnung ist wiederum der Emissionsfaktor eines "durchschnittlichen Flottengenerators", der die Zusammensetzung der Generatoren auf den Schiffen der jeweiligen Längenklassen repräsentiert (Tab. 22 a&b). Die Summe der Emissionen aller Liegevorgänge in 2019 ergibt dann die Jahresemissionsmenge.

Die Berechnung erfolgt für jedes einzelne Schiff durch Multiplikation der Anzahl der verbrauchten kWh mit dem jeweiligen, zur Größenklasse des Schiffes gehörenden Emissionsfaktor von NO_X bzw. PM_{10}. Die durch die Nutzung der OPS-Systeme in Nijmegen eingesparten Emissionsmengen sind in Tabelle 25 zusammengefasst. Ohne OPS-Systeme wären im Jahr 2019 von den Flusskreuzfahrtschiffen NO_X-Mengen in der Größenordnung von 2,6 t und PM_{10}-Mengen von 93 kg emittiert worden.

Tabelle 25: Abschätzung der eingesparten Emissionsmengen im Jahr 2019 durch die vier OPS-Systeme in Nijmegen

Schiffe	Liegezeit	Energieabnahme	NO_X	PM_{10}
Anzahl	h	kWh	t	kg
531	8.593	467.499	2,6	93,0

7 Emissionen von Schiffen am Liegeplatz durch die Schiffsheizung

Binnenschiffe verfügen häufig über ölbefeuerte Heizungsanlagen. In der Regel sind normale Brenner installiert, wie sie auch zur Beheizung von Häusern verwendet werden. Auf modernen Tankschiffen wird die Raumheizung z.T. durch elektrische Konvektoren oder durch die Klimaanlage bereitgestellt.

Die Heizungsanlagen haben in der Regel eine Leistung im Bereich von 20-40 kW. Die Anlage auf dem NRW-Laborschiff "Max Prüss" hat z.B. eine Leistung von 37 kW. Eine Abschätzung der Emissionen von Schiffsheizungen kann daher analog zur Vorgehensweise bei kleinen und mittleren Feuerungsanlagen abgeleitet werden. Die Grundlagen für eine solche Ableitung werden von der Landesanstalt für Umwelt, Baden-Württemberg (LUBW) (5) bundesweit gepflegt (Tab. 26).

Tabelle 26: Mittlere Emissionsfaktoren für kleine und mittlere KuMFA-Feuerungsanlagen (nach 1. BIm-SchV vom 26.01.2010) ohne Rauchgasreinigung, Stand: 5. Februar 2018 für den Bericht 2016 (LUBW, Landesanstalt für Umwelt, Baden-Württemberg)

Heizöl EL	**Einheit**	
Brennwert	*MJ/kg*	*42,7*
Emittierte Substanzen:		
NO_X ($NO+NO_2$ als NO_2)	kg/TJ	42
Feinstaub	kg/TJ	0,89
PM_{10}	kg/TJ	0,85
$PM_{2,5}$	kg/TJ	0,85

Basierend auf diesen Daten kann folgende Berechnung für die Emissionen der Heizungsanlage am Max Prüss als Beispiel durchgeführt werden:

Heizungsanlage mit Nennwärmeleistung 37 kW (Max Prüss), Heizöl EL:

a) Berechnung von TJ/h (Terajoule/h) = 37 000 J/s = 0,0001332 TJ/h.

b) Emissionen pro Stunde Volllast:

- NO_X : 42 (kg/TJ) * 0,0001332 = 5,6 g/h
- PM_{10} : 0,9 (kg/TJ) * 0,0001332 = 0,12 g/h

Bei der Abschätzung der Emissionsmengen wird davon ausgegangen, dass diese Heizungsanlagen 980 Stunden pro Jahr unter Volllast betrieben werden. Daraus ergibt sich eine jährliche durchschnittliche Betriebszeit von ca. 11,2 % der Jahresstunden, was einer Laufzeit von ca. 6,5 Minuten/Stunde entspricht. Daraus ergeben sich die durchschnittlichen stündlichen Emissionen (Größenordnung) für die Heizungsemissionen einer Anlage (und damit eines Schiffes am Liegeplatz) im Jahresmittel:

- NO_X = 5,6 g/h * 0,11 = 0,62 g/h
- PM_{10} = 0,12 g/h * 0,11 = 0,013 g/h

Anhand dieser Werte kann eine Abschätzung der Emissionen aus der Schiffsheizung für einen Modellhafen mit täglich 50 liegenden Schiffen (durchschnittliche Liegezeit von 8 h) vorgenommen werden. Daraus ergeben sich NO_X-Emissionen von etwa 90 kg und Feinstaubemissionen von etwa 2 kg pro Jahr.

Tabelle 27: Abschätzung der Emissionen aus den Heizungsanlagen der liegenden Schiffe

Emissionen von Ölheizungen auf Binnenschiffen				
	1 Schiff		50 Schiffe	
	g/h	g/8h	g/8h	kg/a
NO_X	0,62	4,96	248	90,5
PM_{10}	0,013	0,104	5,2	1,9

Im Vergleich zu den wesentlich höheren Emissionen der Dieselgeneratoren sind diese Emissionsmengen zu vernachlässigen (Tab. 27). Bei modernen Tankschiffen mit elektrischer Heizung sind die benötigte Energie und die daraus resultierenden Emissionen bereits in dem Leistungsbedarf von 9 kW enthalten.

8 Berechnungen für die Häfen Duisburg und Neuss

8.1 Art und Anzahl von Schiffen an den Liegeplätzen

Ein wichtiger Baustein ist die Ermittlung von Art und Anzahl der Schiffe an den Liegeplätzen. Im ersten Schritt wurde versucht, die Liegedaten anhand der Auswertung von AIS-Signalen zu gewinnen. Gleichzeitig wurden die Hafenbetreiber gebeten, die Anzahl der in den Jahren 2018-2020 in ihren Häfen liegenden Schiffe zur Verfügung zu stellen.

Es stellte sich heraus, dass die Auswertung der AIS-Signale für die liegenden Schiffe sowohl für Neuss als auch für Duisburg zu unplausibel hohen Schiffszahlen führte, die etwa das Doppelte der tatsächlich vom Hafenbetreiber erfassten Schiffszahlen betrugen. Beide Hafenbetreiber erklärten, dass bei den von Ihnen erhobenen Daten Fehlerquoten von etwa 1 % möglich sind.

Daher wurden die Emissionsberechnungen auf der Grundlage der Angaben der Hafenbetreiber durchgeführt. Für die Georeferenzierung der jeweiligen Liegeplätze wurde sowohl die Auswertung der AIS-Daten als auch Angaben der Hafenbetreiber herangezogen.

Es stellte sich heraus, dass die liegenden Frachtschiffe in der Verteilung ihrer Liegeplätze durch die Mobilität vieler Entladevorrichtungen (Kräne, Containerbrücken) recht flexibel sind. Die Emissionen liegender Frachtschiffe werden daher am besten als Linienquellen für die weiteren Modellierungen charakterisiert. Tankschiffe sind dagegen an feste Ladeeinrichtungen gebunden. Die Emissionen der be- oder entladenden Tankschiffe können daher gut als Punktquellen georeferenziert werden.

8.1.1 Schiffszahlen für den Hafen Duisburg

Nach aktualisierten Angaben von ***duisport*** wurde der Hafenbereich in Duisburg im Jahr 2018 von insgesamt 16.400 Schiffen und Schubleichtern besucht, die teilweise auch (vor allem in Bereich des Hafenkanals) in Warteposition lagen. Die Berechnung der Emissionen erfolgte anhand dieser Angaben. Für das Jahr 2019 nannte der Hafenbetreiber eine Zahl von insgesamt 14.200 Schiffen.

Tabelle 28a: Verteilung der Schiffe auf die einzelnen Hafenbereiche in Duisburg

Hafen	Becken	Verteilung der Schiffe auf die Becken [%]
Duisburg	Südhafen/Vinckekanal	26,0
	Becken A	22,2
	Becken B	3,7
	Becken C	7,4
	Hafenkanal	7,4
	Ruhrmündung	7,4
	Außenhafen	3,7
	Parallelhafen	22,2

8.1.2 Schiffszahlen für den Hafen Neuss

Nach Angaben von **Rheincargo** besuchten im Jahr 2018 insgesamt 6.785 Tank- und Frachtschiffe den Hafen Neuss. Die Berechnung der Emissionen erfolgte anhand dieser Angaben.

Tabelle 28b: Verteilung der Schiffe auf die einzelnen Hafenbereiche in Neuss

Becken	Verteilung der Schiffe auf die Becken [%]
Becken 1	10,1
Becken 2	2,7
Becken 3	7,4
Becken 4	19,0
Becken 5	12,2
Becken 6 „Rheinkanal“	48,6

8.2 Lokalisierung der genutzten Liegeplätze

Die Verteilung der Schiffe in den Hafenbecken ist nicht homogen. An den Hafenbecken befinden sich sehr unterschiedliche Ladeeinrichtungen und Industriebetriebe. Daher werden bestimmte Hafenbereiche hinsichtlich der Schiffstypen (Bulkcarrier, Containerschiffe, Tankschiffe) je nach Ladegut auch sehr unterschiedlich besucht. Auch die Anzahl der jährlich abgefertigten Schiffe kann stark variieren.

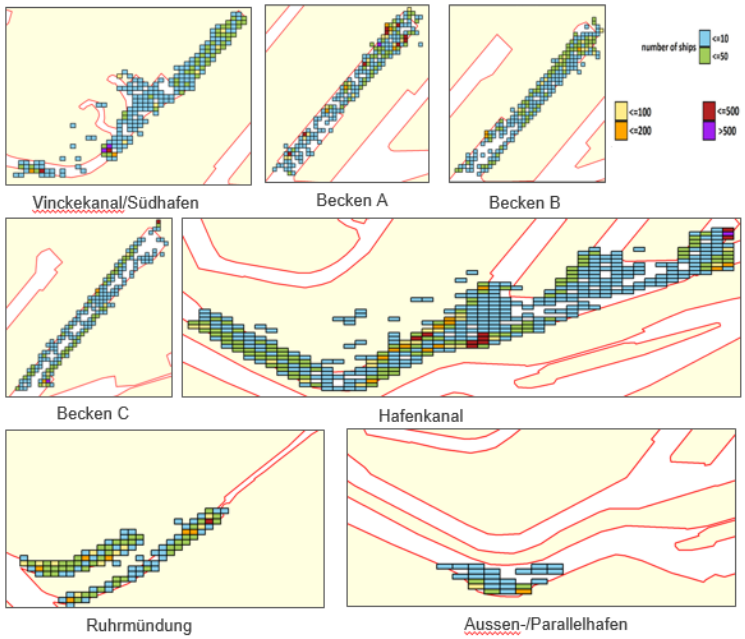


Abbildung 9a: Anzahl der liegenden Schiffe im Hafen Duisburg über die Auswertung von AIS-Signalen. (Quelle: Anton Bergen, LANUV)

Dargestellt sind die Rasterzellen, in denen Liegeplätze von Schiffen registriert wurden. Die Füllfarbe gibt an, wie viele Schiffe sich in der jeweiligen Rasterzelle befanden.

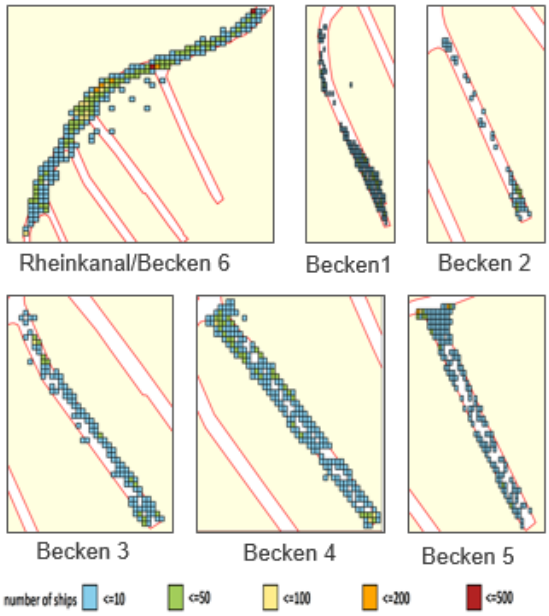


Abbildung 9b: Anzahl der liegenden Schiffe im Hafen Neuss über die Auswertung von AIS-Signalen. (Quelle: Anton Bergen, LANUV)

Dargestellt sind die Rasterzellen, in denen Liegeplätze von Schiffen registriert wurden
Die Füllfarbe gibt an, wie viele Schiffe sich in der jeweiligen Rasterzelle befanden.

Die Abbildungen 9a und 9b zeigen die Verteilungen der Schiffe auf die einzelnen Hafenbecken. Es ist erkennbar, dass unterschiedliche Abschnitte der Becken unterschiedlich intensiv genutzt werden. Die Schiffsverteilungen in den Becken Häfen zeigt dass die Emissionen von liegenden Frachtschiffen und wartenden Tankschiffe als Linienquellen charakterisiert werden können. Die nicht im Bereich der eigentlichen Wasserflächen liegenden Schiffssignale zeigen, dass die Positionsangaben der AIS-Signale in einigen Hafenbereichen (z.B. Hafenkanal Duisburg) eine gewisse Schwankungsbreite aufweisen. Der Anteil der „an Land“ positionierten Schiffe ist aber glücklicherweise gering. Diese wurden für die Emissionsberechnungen den angrenzenden Linienquellen wieder zugeordnet.

8.3 Emissionsberechnungen für liegende Frachtschiffe

Die Emissionsberechnungen wurden für jedes Schiff separat durchgeführt. Dafür wurde jedem Schiff der Emissionsfaktor des dazugehörige „Flottengenerators“ zugewiesen. (Tab. 10a und 10b) und anhand der durchschnittlichen Liegezeit am jeweiligen Liegeort die entstandenen Emissionen berechnet.

Für die einzelnen Hafenabschnitte wurden die ermittelten Liegeorte jeweils als Linienquelle charakterisiert und georeferenziert. Die Emissionen der hier liegenden Einzelschiffe wurden aufsummiert und der entsprechenden Linienquelle zugeordnet.

Die Tabelle 29 zeigt die Emissionsmengen, die für die einzelnen Hafenbecken für die liegenden Frachtschiffe und sonstige Schiffe (Tankschiffe, Hafenbetriebsschiffe, Polizeiboote, usw.) in Warte- oder Ruheposition berechnet wurden.

Tabelle 29: Berechnete Emissionen der liegenden Frachtschiffe und der sonstigen Schiffe in Ruheposition für die einzelnen Hafenbecken

Hafen	Becken	NO_X [t/a]	PM_{10} [kg/a]
Duisburg	Südhafen/ Vinckekanal	1,435	140,7
	Becken A	0,499	48,9
	Becken B	0,079	7,7
	Becken C	0,190	18,6
	Hafenkanal	0,247	24,2
	Ruhrmündung	0,323	31,7
	Außenhafen	0,997	97,7
	Parallelhafen	0,115	11,2
	gesamt	**3,884**	**380,8**
Neuss	Becken 1	0,803	77,9
	Becken 2	0,172	16,7
	Becken 3	0,302	28,9
	Becken 4	1,203	116,4
	Becken 5	0,513	50,0
	Becken 6	1,069	103,6
	gesamt	**4,062**	**393,5**

8.4 Emissionsberechnungen für liegende Tankschiffe

Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, kann die Emissionsberechnung für liegende Tankschiffe mit Ladeaktivitäten nicht pauschal erfolgen. Die Entladevorgänge, die in der Regel mit den bordeigenen Generatoren durchgeführt werden, haben einen erheblich höheren Energiebedarf als die von den Landanlagen durchgeführten Beladevorgänge.

Als Berechnungsgrundlage dient die individuelle Datenerhebung bei den einzelnen Tanklagern. Ein detaillierter Berechnungsvorgang für die an einem großen Tanklager anfallenden Emissionen ist am Beispiel der „Ölinsel“ in Duisburg in Kapitel 5.3 (Tab. 15) dargestellt.

8.4.1 Tankschiffszahlen im Hafen Duisburgs

Die Resultate der Datenerhebungen bei den Tanklagerbetreibern in Duisburg sind in der Tabelle 30 zusammengestellt. Im Jahr 2018 gab es im Hafen Duisburg insgesamt 3.137 Ladevorgänge für Tankschiffe. Es handelte sich um 1.984 Ent- und 1.153 Beladungen. In den Folgejahren 2019 und 2020 lagen die Zahlen mit insgesamt 2.499 bzw. 2.586 Ladevorgängen etwa 20 % niedriger. Hier wird ein Einfluss der niedrigen Wasserstände des Rheines im Jahr 2018 sichtbar, da größere Tanker in diesem Jahr über einen längeren Zeitraum nicht vollständig beladen fahren konnten.

Tabelle 30: Ladevorgänge von Tankschiffen im Hafen Duisburg

Ladevorgänge für Tankschiffe im Hafen Duisburg						
	2018		**2019**		**2020**	
	Entladen	Beladen	Entladen	Beladen	Entladen	Beladen
Ölinsel	715	1.149	577	870	528	1.059
Ruhrmündung	808	0	569	0	514	
Parallelhafen	461	4	436	47	449	36
gesamt	**1.984**	**1.153**	**1.582**	**917**	**1.491**	**1.095**

8.4.2 Tankschiffszahlen im Hafen Neuss

Die Datenerhebungen zu den Tankschiffen im Untersuchungsgebiet Neuss erfolgte bei den Hafen- und Tanklagerbetreibern. Im Jahr 2018 gab es in Neuss insgesamt 1.282 Ladevorgänge für Tankschiffe (Tabelle 31). Es handelte sich um 1.062 Ent- und 220 Beladungen. Die Datensätze für die Folgejahre 2019 und 2020 sind leider nicht vollständig.

Tabelle 31: Ladevorgänge von Tankschiffen im Hafen Neuss

Ladevorgänge für Tankschiffe im Hafen Neuss		
2018	Entladen	Beladen
Becken 1	57	43
Becken 2	127	0
Becken 3	715	1
Becken 4	163	46
Becken 6	0	130
gesamt	1.062	220

8.5 Emissionen liegender Schiffe in den Häfen Duisburg und Neuss

Mit dem dargestellten Verfahren ist eine bessere Abschätzung der durch liegende Schiffe emittierten NO_X- und PM_{10}-Mengen möglich. Die Ergebnisse zeigen, dass die Menge der Emissionen von liegenden Fracht-, Tank- und Passagierschiffen im Vergleich zu den Emissionen der fahrenden Schiffe deutlich geringer ist als bisher angenommen.

Im Jahr 2018 wurden an den Liegeplätzen im Untersuchungsgebiet Duisburg insgesamt ca. 15,5 t NO_X und 760 kg PM_{10} durch die liegenden Schiffe emittiert. Für das Untersuchungsgebiet Neuss ergaben die Berechnungen insgesamt eine Menge von ca. 9,5 t NO_X und ca. 590 kg PM_{10} (Tab. 32).

Die Untersuchungen ergaben, dass die Tankschiffe in den Häfen, trotz deutlich geringerem Anteil an den besuchenden Schiffen, bei den Entladevorgängen mit den bordeigenen Pumpen erheblich größere Emissionsmengen verursachen, als die Frachtschiffe. Im Hafenbe-reich Duisburg machen die Tankschiffsemissionen etwa 75 % der Gesamtemissionen der liegenden Schiffe aus. Im Hafen Neuss liegt der Tankeranteil bei 57%.

Tabelle 32: Emissionsbilanzierung der in den Häfen liegenden Schiffe im Jahr 2018

2018	Duisburg		Neuss	
	NO_X (t)	%	NO_X (t)	%
Frachtschiffe	3,9	25	4,1	43
Tankschiffe	11,6	75	5,4	57
Gesamt	**15,5**		**9,5**	
	PM_{10} (kg)	%	PM_{10} (kg)	%
Frachtschiffe	380	50	390	66
Tankschiffe	384	50	198	34
Gesamt	**764**		**588**	

Ruhepositionen lassen sich mit ihren flexibleren Liegepositionen gut als Linienquellen zusammenfassen und georeferenzieren. Tankschiffe müssen für die Ladevorgänge jeweils die entsprechenden Ladevorrichtungen der Tanklager anlaufen. Daher lassen sich diese Emissionen gut als Punktquellen charakterisieren.

Die georeferenzierten Emissionen der liegenden Schiffe in den Häfen Duisburg und Neuss im Jahr 2018 sind in den Abbildungen 10 und 11 dargestellt.

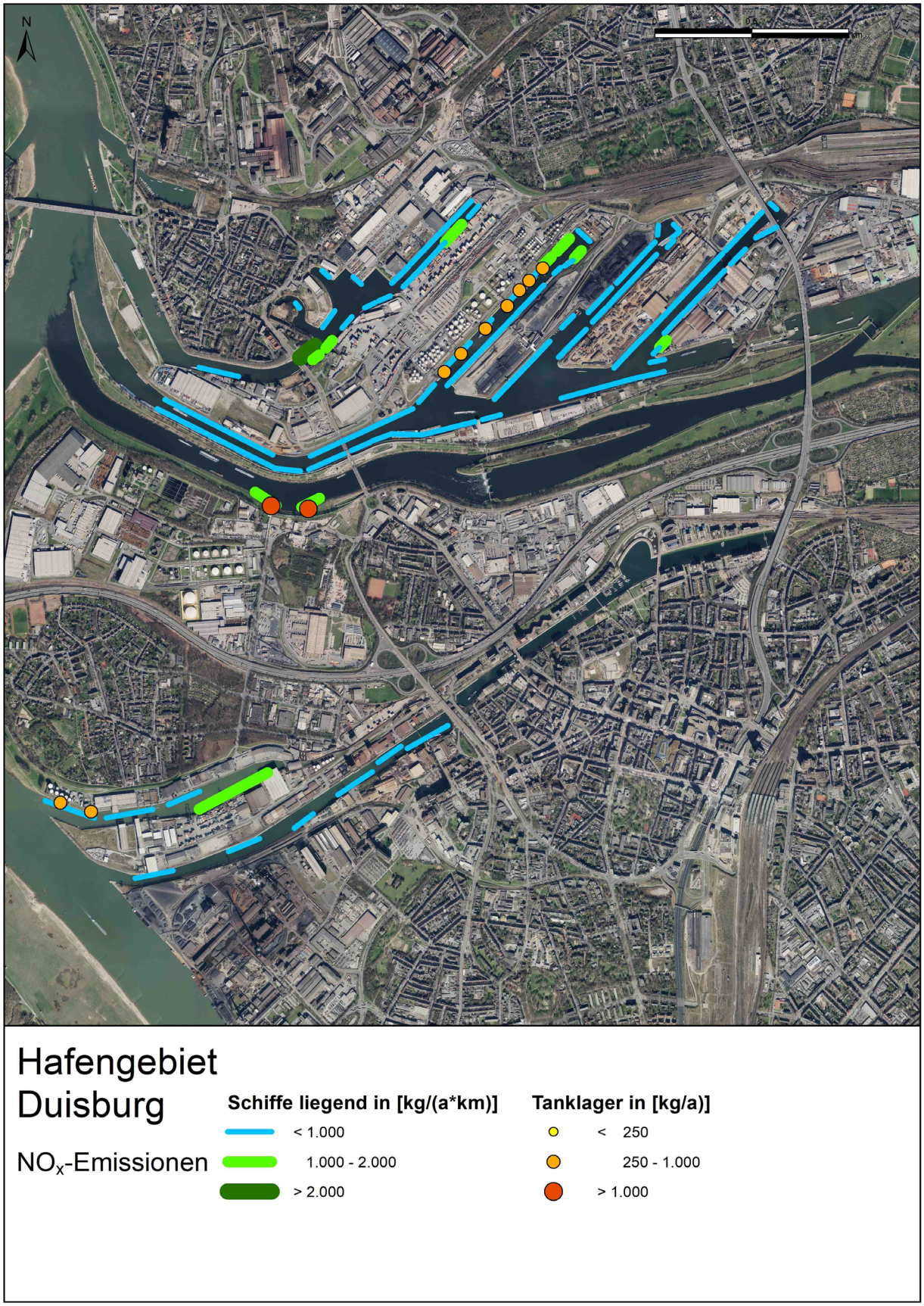


Abbildung 10: Georeferenzierte Emissionen der liegenden Schiffe im Hafen Duisburg im Jahr 2018 (Quelle: LANUV)

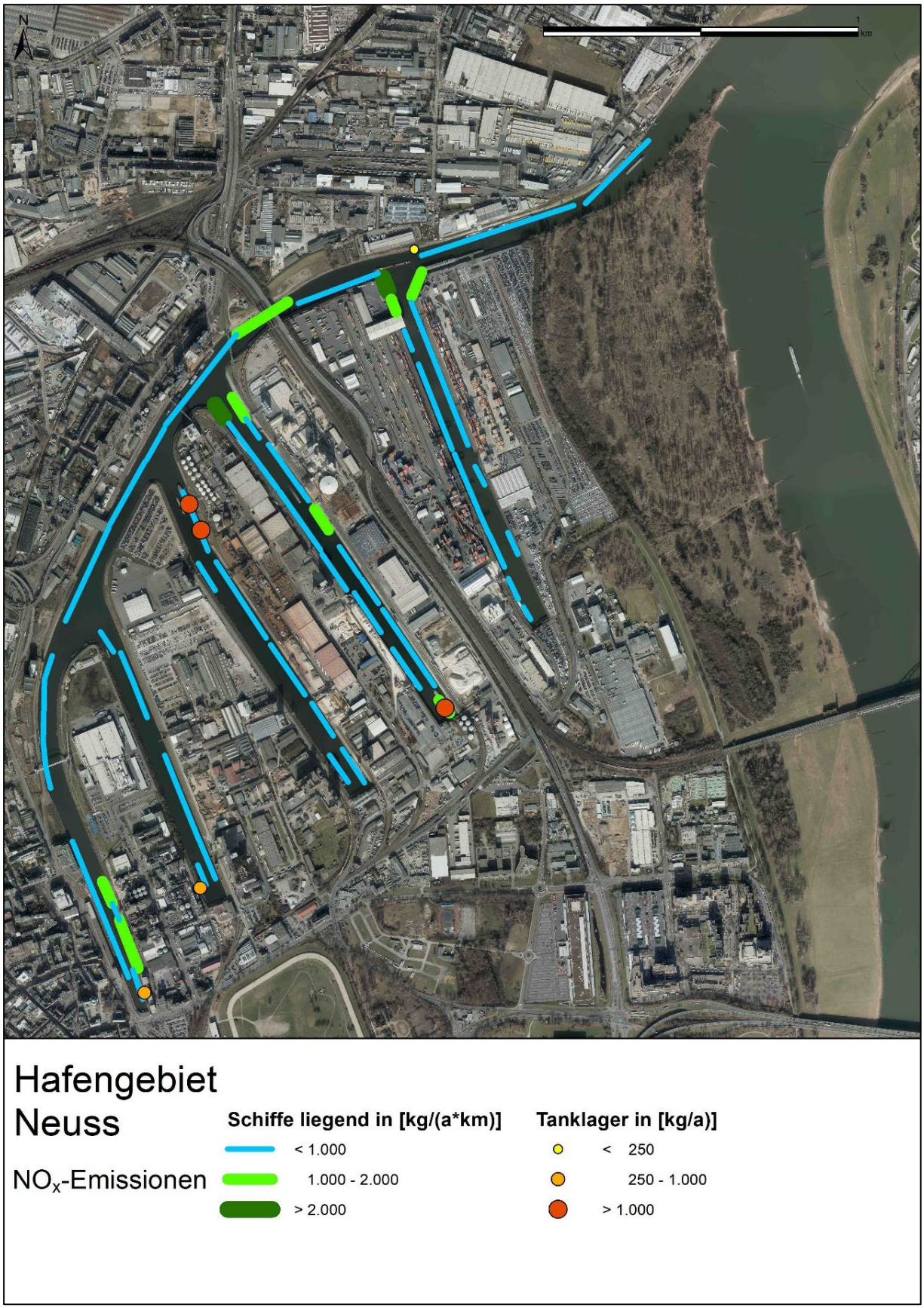


Abbildung 11: Georeferenzierte Emissionen der liegenden Schiffe im Hafen Neuss im Jahr 2018 (Quelle: LANUV)

8.6 Maßnahmen zur Minderung der Emissionen liegender Schiffe

Maßnahmen zur Minderung der Emissionen liegender Schiffe können sowohl an Bord der Schiffe als auch landseitig erfolgen. Wie aus den Tabellen 8 und 9 ersichtlich ist, haben vor allem die älteren Generatoren der Baujahre bis einschließlich 2002 besonders hohe Emissionsfaktoren.

Eine Erneuerung dieser durchschnittlich über 20 Jahre alten Generatoren durch die aktuelle Stage V-Generation würde die Emissionen liegender Schiffe deutlich verringern. Bei den liegenden Frachtschiffen könnten auf diese Weise für NO_X Emissionsminderungen um 80 % und für PM_{10} um etwa 90 % erreicht werden. Für Tankschiffe, die bereits mit neueren Generatoren ausgestattet sind, wären Emissionsminderungen für NO_X in einer Größenordnung von 40 % und für PM_{10} im Bereich von 60 % möglich.

Auch mit gezielten landseitigen Maßnahmen können, z.B. durch die Einrichtung von Landstromversorgung, deutliche Minderungseffekte erreicht werden. Die erste Priorität zur Einrichtung derartiger Anlagen sollte hierbei auf den stadtnahen Anlegemöglichkeiten für Flusskreuzfahrtschiffen und in den Hafenbereichen auf die Ladeeinrichtungen für Tankschiffe an den Tanklagern liegen.

Die Abschätzung der Schiffsemissionen ergab sowohl in Duisburg (ca. 75 %) als auch in Neuss (ca. 57%) einen sehr hohen Anteil der Emissionen der liegenden Tankschiffe, der vor allem bei den Entladevorgängen entsteht. Wie aus den Abb. 10 und 11 erkennbar ist, gibt es im Hafen Duisburg elf und im Hafen Neuss sechs Ladeeinrichtungen für Tankschiffe. Bei einer Ausstattung dieser 17 Ladeeinrichtungen mit Anlagen zur Landstromversorgung, könnten in Neuss etwa 57 % und in Duisburg etwa 75 % der in diesen Häfen durch die liegenden Schiffe verursachten Emissionen vermindert werden.

Abbildung 12: Tankschiff an der Ladeeinrichtung des Tanklagers von Oiltanking in Duisburg (Foto: D. Busch, LANUV)

9 Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Dimensionen der Emissionen von liegenden Binnenfracht-, Tank- und Passagierschiffen geringer sind als bisher angenommen, wenn reale Nutzungsdaten der Häfen und reale Emissionsfaktoren für die Abschätzung verwendet werden.

In Zukunft kann die beschriebene Methode dazu dienen, realistischere Emissionsmengen von Schiffen am Liegeplatz in Binnenhäfen abzuschätzen. Grundlage hierfür könnten die aus AIS-Daten abgeleiteten realen Schiffszahlen und Liegezeiten in Verbindung mit den Angaben der Hafenbetreiber zum realen Schiffsverkehr im betrachteten Referenzjahr sein. Die Berechnung der Emissionen kann mit diesen Verkehrszahlen und den im Rahmen von CLINSH abgeleiteten Emissionsfaktoren der "durchschnittlichen Flottengeneratoren" erfolgen. Die so ermittelten Emissionen der liegenden Schiffe werden als Punkt- oder Linienquelle georeferenziert.

Die in diesem Bericht dargestellte Methode bildet eine wichtige Grundlage für eine bessere Abschätzung der von den liegenden Schiffen im Hafen verursachten Emissionen und wurde bereits vom LANUV bei den Emissionsberechnungen in den Häfen Duisburg und Neuss/Düsseldorf verwendet.

Basierend auf den Ergebnissen der im Rahmen von CLINSH durchgeführten Überwachung der Luftqualität in den Hafengebieten und weiteren Erhebungen der realen Emissionen der fahrenden Schiffe (AIS-Daten, landseitige Emissionsfaktoren), des Emissionskatasters NRW und der neu erfassten bzw. berechneten Emissionen aus dem Schiffs- und Hafenbetrieb soll eine genaue Ursachenanalyse der gemessenen Luftbelastung (Belastungsanteile der verschiedenen Quellen) durchgeführt werden.

Es ist geplant, die Ergebnisse sowohl als englischsprachige “CLINSH”-Berichte des LANUV als auch als deutschsprachige LANUV Fachberichte zu veröffentlichen.

10 Danksagung

Die Autoren danken allen Kolleginnen und Kollegen des LANUV, die bei der Erstellung dieses Berichtes mitgewirkt haben.

Vielen Dank an Jan Eckel und Michael Reindorf (**RheinCargo**) und Alexander Garbar (***duisport***) für die Bereitstellung vieler Daten zu den in den Häfen liegenden Schiffen.

Vielen Dank auch an

- Christof Dahlhoff und Walter Mainka (Ölinsel Duisburg), Jens Zelles (Oiltanking), Utz-Achim Schultze und Markus Strabag (Total-Tanklager), die uns mit Informationen über den Be- und Entladebetrieb ihrer Tanklager sehr geholfen haben.
- Arne Harms (Harms Beerederungs GmbH), Norbert Poschinski (Tankmatch), Norbert Kuhlmann (Reederei Jaegers) und Hendrik Stöhr (Reederei Deymann), die uns mit Informationen zum Betrieb von Fracht- und Tankschiffen und dem Energiebedarf von Tankschiffen am Liegeplatz geholfen haben.
- Eckhard Eden und Sven Tornquist (Motorenfabrik Hatz GmbH & Co. KG), die uns mit Informationen zum Dieselverbrauch von Generatoren geholfen haben.
- Remco Hoogma und Erik Lubberding (City of Nijmegen), die uns die Daten zu den Besuchen und Energieverbräuchen der liegenden Flusskreuzfahrtschiffe in Nijmegen zur Verfügung gestellt haben.
- Christoph Heidt (IFEU Institut) für Informationen zum aktuellen Stand des "Transport Emission Model of the German Federal Environment Agency"(TREMOD).
- Kai Krause (Institut für Umweltphysik der Universität Bremen) für die Unterstützung bei der Auswertung der AIS-Daten.

Die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen von Untersuchungen für das von der EU geförderte Life-Projekte “**CL**ean **IN**land **SH**ipping (**CLINSH**)” (Projektnummer: LIFE 15/ENV/NL/000217-CLINSH) erarbeitet.

11 Literaturverzeichnis

(1) Walstroom versus Generatorstroom, En studie naar de kosten, P. de Vos & R. van Gils, TU Delft, 2011, unpublished.

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

(3) German ZBBD database (German Ship Inspection Commission) on the engines and generators on the ships inspected by the Commission. (Database extract requested for CLINSH 2020)

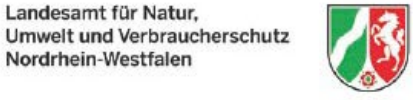
(4) TREMOD-(Transport Emission Model of the German Federal Environment Agency, UBA), UBA-Texte 117: Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020, (Berichtsperiode 1990-2018), Berichtsteil „TREMOD-MM“, C. Heidt, H. Helms, C. Kämper, J. Kräck, Institut für Energie und Umweltforschung (ifeu), Heidelberg, 2020, Auftrag des Umweltbundesamtes, Projektnummer 123 135

(5) Ökopol, Christian Tebert, Susanne Volz; Ermittlung und Aktualisierung von Emissionsfaktoren für das nationale Emissionsinventar bezüglich kleiner und mittlerer Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher Az 50 121-2/22, Ufoplan 3712 42 313-2 Umweltforschungsplan des BMfUNBR, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Hamburg Februar 2016

(6) “Harbour Monitoring Part A: Air quality on the Rhine and in the inland ports of Duisburg and Neuss/Düsseldorf. Immission-side effect of emissions from shipping and port operations on nitrogen oxide pollution" D. Busch; A. Bergen, K. Krause, W. Wosniok (2021) CLINSH delivery of the LANUV to Action B.4 Modelling, evaluating and scenario building https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/luft/eu-life-projekt-clean-inland-shipping

(7) D. Busch, K. Krause (2021) Air quality on the Rhine and in the inland ports of Duisburg and Neuss – Immission-side effect of emissions from shipping and port operations on nitrogen oxide pollution – Results from the EU Life Project „Clean Inland Shipping“ (CLINSH), Immissionsschutz 2/2021, PP. 78-85

12 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