



Emissionskataster für den Schiffsverkehr in NRW 2012

LANUV-Fachbericht 67



Emissionskataster für den Schiffsverkehr in NRW 2012

LANUV-Fachbericht 67

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2016



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
Autoren	Dipl.-Ing. H. Lorentz, Dipl.-Ing. W. Schmidt, Dr. rer. nat. I. Düring, Dipl.-Geogr. T. Nagel (Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, An der Roßweid 3, 76229 Karlsruhe)
Projektbetreuung/Redaktion	Ursula Senger, Thomas Schulz (LANUV)
Titelfoto	KNSYphotographie
ISSN	1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachberichte
Informationsdienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter • www.lanuv.nrw.de Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179
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.

Inhalt

Einführung	5
1 Einleitung	7
1.1 Aufgabenstellung	7
1.2 Vorgehensweise	8
2 Emissionsbestimmung	9
2.1 Grundsätzliche Gegebenheiten bei der Emissionsberechnung	9
2.1.1 Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Motorleistung.....	9
2.1.2 Motorleistungen	14
2.1.3 Beispiel für die Berechnung der Emissionsdichte auf einer freien Strecke ohne Fließgeschwindigkeit.....	17
2.2 Emissionsbestimmung im Bereich einer Schleuse in einem Gewässer ohne Fließgeschwindigkeit.....	18
2.2.1 Emissionsrelevante Vorgänge.....	19
2.2.2 Schadstoffemission bei Manövern.....	20
2.3 Emissionsbestimmung in Häfen	23
2.4 Emissionsbestimmung bei frei fließenden Gewässern	24
2.4.1 Berg- und Talfahrer mit gleicher Relativgeschwindigkeit zum Wasser.....	24
2.4.2 Berg- und Talfahrer mit ungleicher Relativgeschwindigkeit zum Wasser.....	26
2.4.3 Schleuse	26
3 Eingangsdaten	27
3.1 Wasserstraßen.....	27
3.1.1 Geometrie der Wasserstraßenabschnitte	27
3.1.2 Schiffsbewegungen.....	27
29	
3.1.3 Passagierschiffe.....	29
3.2 Schleusen	30
3.3 Häfen	30
4 Schiffsemissionen in NRW 2012	31
5 Literatur	34

Anhang: Abbildungen Schiffsemissionen NRW 2012

- 6.1:** Gesamt-NOX- Emissionen
- 6.2:** Gesamt-CO₂- Emissionen
- 6.3:** Gesamt-PM₁₀-Emissionen
- 6.4:** Gesamt-HC-Emissionen
- 6.5:** Gesamt-Kraftstoffverbrauch
- 6.6:** NO_x-Emissionen im Bereich der Schleusen
- 6.7:** CO₂-Emissionen im Bereich der Schleusen
- 6.8:** PM₁₀-Emissionen im Bereich der Schleusen
- 6.9:** HC-Emissionen im Bereich der Schleusen
- 6.10:** Kraftstoffverbrauch im Bereich der Schleusen
- 6.11:** NO_x-Emissionen im Bereich der Häfen
- 6.12:** CO₂-Emissionen im Bereich der Häfen
- 6.13:** PM₁₀-Emissionen im Bereich der Häfen
- 6.14:** HC-Emissionen im Bereich der Häfen
- 6.15:** Kraftstoffverbrauch im Bereich der Häfen

Einführung

Der Transport von Massengütern, PKW und Containern mit Binnenschiffen entlastet die Straßen und auch den Schienenverkehr. Dabei gilt das Binnenschiff als vergleichsweise umweltfreundliches Transportmittel. Doch wegen des regen Schiffsverkehrs auf Rhein, Weser und Binnenkanälen werden auch diese Emissionen zu einem nicht zu vernachlässigenden Problem für die Luftreinhaltung in NRW.

Binnenschiffe verursachen, bezogen auf transportierte Gütermenge und Distanzkilometer (Emissionen/t*km), auch heute noch geringere Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen als der Straßen- und Schienenverkehr. Vor allem für Stickoxide (NO_x) und Feinstaub (PM₁₀) hingegen liegen die Emissionen von Schiffen aber inzwischen über denen von Straße und Schiene [UBA 2012]. Kritisch zu bewerten sind insbesondere die Stickoxidemissionen, da in vielen Großstädten die Belastungen über den Grenzwerten der EU-Luftqualitätsrichtlinie liegen.

Um den Beitrag der Schiffe zur Luftbelastung in NRW beurteilen zu können, bietet das seit 1996 geführte Schiffsemissionskataster Hilfestellung. Grundlage für die Berechnungen sind die Anzahl der Schiffsbewegungen, die jährlich von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes veröffentlicht werden. Weiter werden die gesetzlich zulässigen Emissionsgrenzwerte in Abhängigkeit des Motorenalters in Form des Emissionsfaktors berücksichtigt. Auch die Geometrie der befahrenen Wasserstraße, sowie das Fahrverhalten im Bereich von Schleusen und Häfen haben Bedeutung für die Berechnungen.

Da die letzten Berechnungen sich auf Schiffsbewegungsdaten aus dem Jahre 2004 beziehen, wurde eine Fortschreibung unter Berücksichtigung aktuell verfügbarer Daten für eine aussagefähige Berichterstattung erforderlich.

Das LANUV beauftragte daher das Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG mit der Fortschreibung für das Bezugsjahr 2012. In seinem im Folgenden in wesentlichen Passagen wiedergegebenen Abschlussbericht erläutert der Auftragnehmer die Vorgehensweise, die zur Berechnung der Emissionswerte für die Binnenschifffahrt in NRW (s.Tab.0.1) geführt hat.

Die ermittelten Werte bestätigen, dass auch die Binnenschifffahrt einen signifikanten Belastungsfaktor für die Luft der großen Ballungsgebiete am Rhein und an den Schifffahrtskanälen darstellt. Durch diese zusätzlichen Emissionen steigt die Belastung der Luft mit Feinstaub (PM₁₀) um 7 % der Straßenverkehrsbelastung und mit nitrosen Gasen (NO_x) um sogar 25 % der Straßenverkehrsbelastung. Dies trägt zu einem erhöhten Risiko der betroffenen Menschen für Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen bei.

Zum Vergleich können für Gesamtdeutschland entsprechende Werte dem Gutachten des Umweltbundesamtes [UBA 2012a] entnommen werden (s.Tab.0.2).

Tab. 0.1: Schiffsemissionen in NRW 2012

	Einheit	Gesamt	Wasserstraßen ohne Schleusen	Häfen	Schleusen
Kraftstoff- verbrauch	t/a	369.195	367.125	35	2.035
NO_x	t/a	21.176	21.015	45	117
CO	t/a	2.735	2.713	7	15
HC	t/a	877	868	3,7	4,8
CO₂	t/a	1.176.478	1.167.023	2.986	6.470
NO₂(direkt)	t/a	2.114	2.098	4,5	11,6
PM₁₀	t/a	456	452	1	2,5
Ruß	t/a	182	181	0,4	1
SO₂	t/a	364	362	0,4	2
CH₄	t/a	21	21	0,2	0,1
NH₃	t/a	3,6	3,6	0,01	0,02
N₂O	t/a	638	633	1,2	3,5
BaP	kg/a	11	11	0,02	0,05

Tab. 0.2: Emissionen der Binnenschifffahrt in 2012 in t/a

	NRW	Deutschland
NO_x	21.176	24.601
CO₂	1.176.478	1.542.309
PM₁₀	456	623

Die ermittelten Daten zeigen, dass in NRW der weitaus größte Anteil der deutschen Schiffsemissionen freigesetzt wird. Die Daten sind allerdings nicht unmittelbar vergleichbar, da die Emissionen für Deutschland vom UBA mit dem Emissionsmodell TREMOD, die des LANUV für NRW mit dem Modell LuWas ermittelt werden. U.a. werden vom UBA niedrigere Emissionsfaktoren verwendet.

Es ist aber durchaus plausibel, dass NRW einen sehr hohen Anteil an den Emissionen in Deutschland aufweist, da NRW mit ca. 47% am deutschen Güterumschlag in der Binnenschifffahrt beteiligt ist. Zusätzlich weist NRW in hohem Maße Durchgangsverkehr auf, insbesondere zwischen den Niederlanden und den rheinaufwärts gelegenen Bundesländern.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) benötigt Aussagen zum Emissionsaufkommen resultierend aus dem Schiffsverkehr. Die letzte Untersuchung wurde vom Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. bezogen auf Schiffsbewegungen im Jahr 2004 durchgeführt (DST, 2007). In vorliegender Untersuchung sollen die Emissionen resultierend aus dem Schiffsverkehr auf den befahrensten Nordrhein-Westfälischen Binnengewässern (Abb.1.1) für das Bezugsjahr 2012 ermittelt werden. Die hierfür genutzten Eingangsdaten und Berechnungsalgorithmen sowie die Ergebnisse werden in einer fortschreibungsfähigen Microsoft Access-Datenbank eingepflegt und mittels VBA-Programmierung umgesetzt.

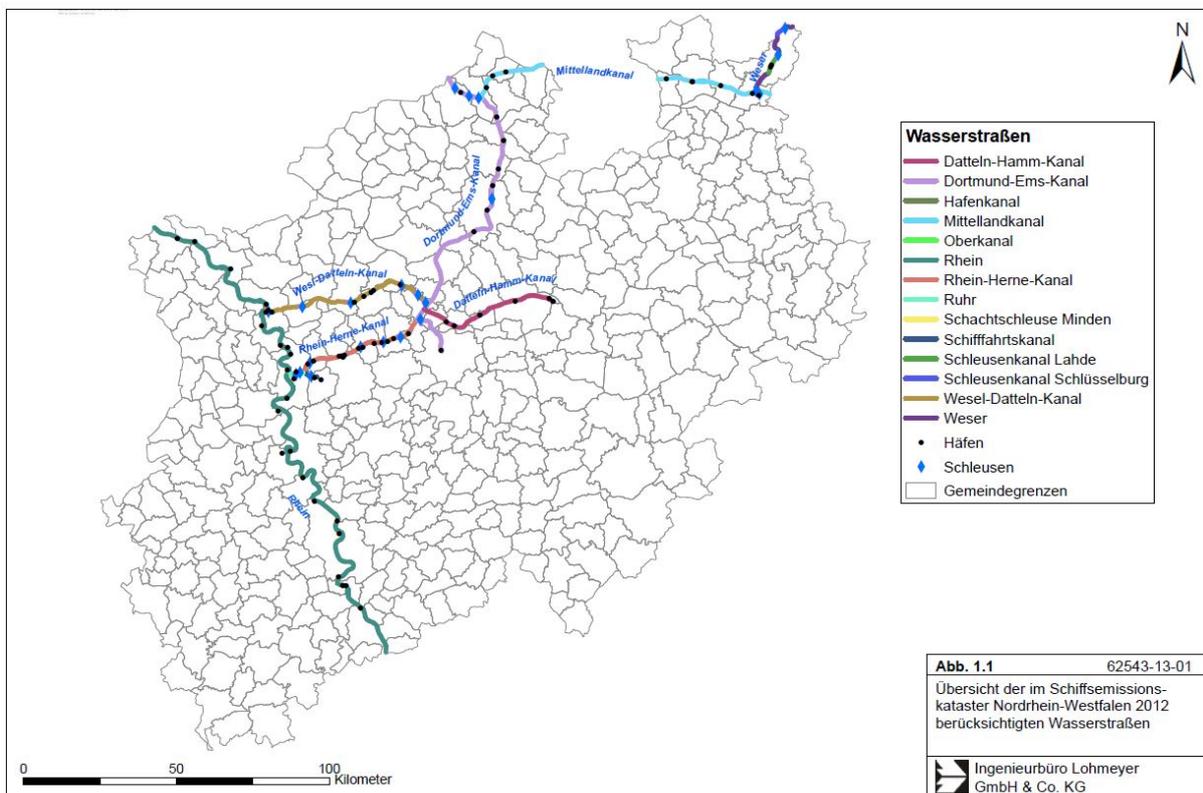


Abb.1.1: Übersicht über die im Emissionskataster berücksichtigten Wasserstraßen

1.2 Vorgehensweise

Zuerst wurde die Methodik zur Emissionsbestimmung festgelegt. Sie unterscheidet sich zu der Methodik in DST (2007) und ist in Abschnitt 2 beschrieben. Zudem wurden die für die Emissionsbestimmung benötigten Emissionsfaktoren verschiedener Bezugsjahre auf Grund einer Literaturrecherche auf einen aktuellen Stand gebracht.

Die für die Emissionsbestimmung benötigten und im Folgenden aufgeführten Eingangsdaten wurden wie in Abschnitt 3 beschrieben aufbereitet:

- das Schiffsaufkommen pro Wasserstraßenabschnitt und Schiffstyp
- die mittlere Tragfähigkeitstonne pro Wasserstraßenabschnitt aus denen die mittlere Schifflistung abgeleitet wird
- die Geometrie der Wasserstraßenabschnitte
- Schleusenbecken sowie Abschnitte vor Schleusen
- die Hafenbeckenflächen und das jährliche Güteraufkommen pro Hafen

Die in Abschnitt 2 beschriebene Methodik zur Emissionsbestimmung wurde mittels Programmierung in einer Microsoft Access-Datenbank umgesetzt. Darüber hinaus wurden in der Access-Datenbank verschiedene Szenarien für Schiffsbelegungsdaten sowie Emissionsfaktoren für verschiedene Bezugsjahre verwendet, sodass Berechnungen verschiedener Emissionsszenarien möglich sind.

2 Emissionsbestimmung

2.1 Grundsätzliche Gegebenheiten bei der Emissionsberechnung

2.1.1 Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von der Motorleistung

Die Emissionsberechnung in der Binnenschifffahrt erfolgt auf Basis von Emissionsfaktoren, die in der Literatur leistungsabhängig in g/kWh oder verbrauchsabhängig in g/kg Kraftstoff vorliegen.

Das nachfolgend beschriebene Verfahren verwendet leistungsbezogene Emissionsfaktoren in g Schadstoff pro kWh (vom Antrieb des Schiffes geleistete Arbeit). Dies hat den Vorteil, dass besondere Fahrcharakteristiken, wie z. B. stromauf- und stromabwärts, Kurvenfahrt, Schleusenfahrt etc. entsprechend der aufzubringenden Leistung direkt berücksichtigt werden können. Diese wird im Emissionsmodul des Programms „Luftverunreinigungen an Wasserstraßen“ (LuWas, Ausarbeitung im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz und seit 2001 im Einsatz) verwendet. Danach berechnet sich die Emission eines Schiffes auf dem Wasserstraßensegment der Länge L auf einem Gewässer mit vernachlässigbarer Fließgeschwindigkeit wie folgt:

$$E_i = e_{fi} \cdot P \cdot L / v_R \quad (2.1)$$

mit

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

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

P : vom Schiff aufgebrachte Leistung in kW

L : Länge des betrachteten Wasserstraßensegmentes in km

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

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

$$q_i = e_{fi} \cdot P / v_R \quad (2.2)$$

Die spezifischen Emissionsfaktoren e_{fi} sind dem Atmospheric Emission Inventory Guidebook (EEA, 2013) entnommen. Darin werden getrennt nach Güterschiffen und Sportbooten verbrauchsabhängige Emissionsfaktoren in g/kg Diesel für die Komponenten NO_x , NMVOC, PM_{10} und $PM_{2.5}$ angegeben. Zur Umrechnung in leistungsabhängige Emissionsfaktoren ist der leistungsabhängige Verbrauch in kg Diesel/kWh gegeben. Die Emissionsfaktoren liegen für das Bezugsjahr 2005 vor.

Die zeitliche Fortschreibung der Emissionsfaktoren der Güterschiffe erfolgt prinzipiell unter Berücksichtigung des Inkrafttretens gesetzlich vorgeschriebener Abgasgrenzwerte für Binnenschiffsmotoren sowie der prozentualen jährlichen Neuzugänge im Binnenschiffsbestand.

Die Reduzierung der Emissionsfaktoren erfolgte entsprechend der Verschärfung der Abgasgrenzwerte zwischen ZKR Stufe I (ZKR, 2002) und Stufe II (ZKR, 2007) für Binnenschiffsmotoren mit einer Nennleistung >130 kW (siehe Tab. 2.1). In der Diskussion ist, eine weitere Verschärfung der Abgasgrenzwerte etwa ab dem Jahre 2016 vorzunehmen. Da derzeit jedoch weder der genaue Zeitpunkt noch die konkreten Grenzwerte verbindlich feststehen, wurde diese Reduzierung nicht in die Fortschreibung der Emissionsfaktoren einbezogen.

Tab. 2.1: Schadstoffgrenzwerte (g/kWh) ZKR Stufe I und Stufe II für Binnenschiffsmotoren mit einer Nennleistung >130 kW

	CO	HC	NOx	PM₁₀
ZKR Stufe I (seit 2002)	5.0	1.3	9.2	0.54
ZKR Stufe II (seit 07/2007)	3.5	1.0	6.0	0.2
Reduzierung	-30 %	-23 %	-35 %	-63 %

Zur Berechnung der prozentualen Neuzugänge wurde die mittlere Lebensdauer eines Güterschiffes abgeschätzt. Im Elektronischen Wasserstraßen-Informationsservice (ELWIS) der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes werden die jährlichen Bestandsdaten unter Angabe der Zu- und Abgänge getrennt nach Schiffstypen veröffentlicht. Die bestandsbezogenen prozentualen Neuzugänge liegen dort im Zeitraum 2001 – 2011 zwischen 1.6 % (ca. 62 Jahre) und 5.6 % (ca. 18 Jahre), im bestandsgewichteten Mittel bei 2.5 % (40 Jahre). Darin wird jedoch die Umrüstung der Schiffe mit neueren Maschinen nicht berücksichtigt, sodass diese Zahlen nur bedingt die Lebensdauer der Motoren widerspiegeln. In (EEA, 2011) wird bei Güterschiffen von einer durchschnittlichen Lebensdauer von 25 Jahren (4 %) ausgegangen. In (PLANCO, 2010) wird bei Binnenschiffen von einer mittleren Lebensdauer von 30 Jahren (3.3 %) bei älteren Motoren und 15-18 Jahren (5.5 % - 7 %) bei neueren Motoren ausgegangen. Abb. 2.1 zeigt die jährliche Erneuerung (Zugang/Bestand) der Binnenschiffe in Deutschland (ELWIS), im Vergleich mit mittleren Lebensdauern für Binnenschiffe nach EEA (2011) und PLANCO (2010). Für die Fortschreibung wurde den Annahmen aus EEA (2011) gefolgt und eine mittlere Lebensdauer von 25 Jahren angenommen, das entspricht einem jährlichen prozentualen Neuzugang von 4 %.

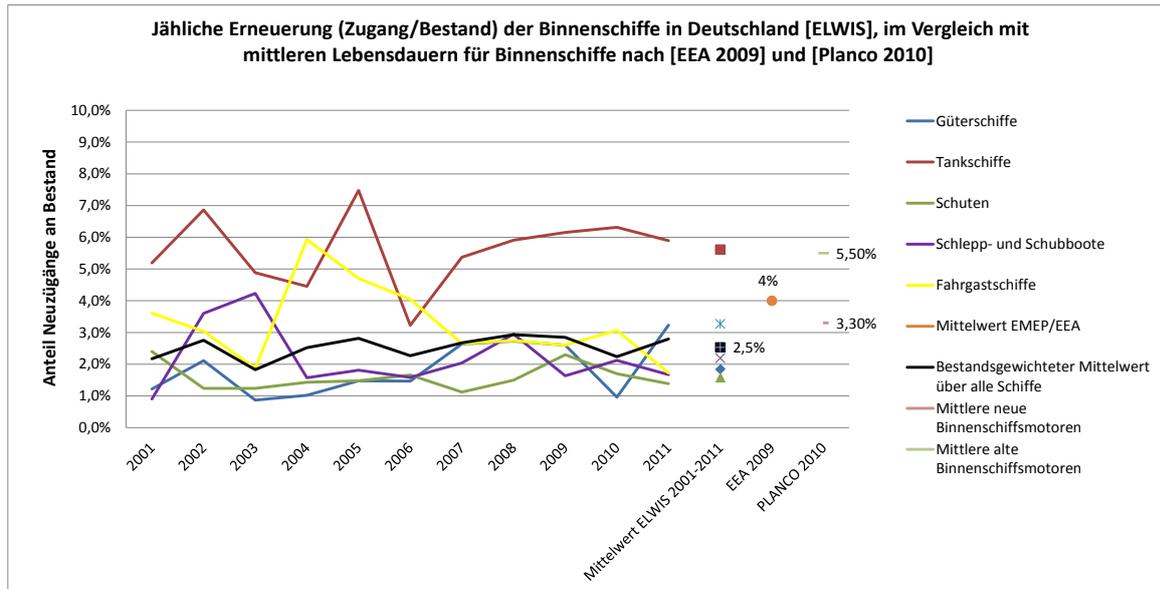


Abb. 2.1: Jährliche Erneuerung (Zugang/Bestand) der Binnenschiffe in Deutschland [ELWIS], im Vergleich mit mittleren Lebensdauern für Binnenschiffe nach EEA (2011) und PLANCO (2010)

Für die SO_2 -Emissionsfaktoren wurde von einem mittleren Schwefelgehalt von 0.1 Gew.-% im Dieselkraftstoff und einem mittleren Verbrauch von 0.203 kg Diesel/kWh ausgegangen (EEA, 2011). Ausgehend von diesem Verbrauch wurden die CO_2 -Emissionsfaktoren von 3.179 kg/kg_{Diesel} aus HBEFA3.1 (UBA, 2010) berechnet. Die Emissionsfaktoren für HC wurden über die Anteile CH_4 und NMVOC der Dieselmotoren für schwere Nutzfahrzeuge aus HBEFA3.1 abgeleitet. Darin beträgt der Anteil CH_4 an HC 2.4 %. Ruß wurde anteilig aus den abgasbedingten PM_{10} -Emissionen ermittelt. Der Rußanteil von 40 % an PM_{10} entsprechend dem Vorschlag des Umweltbundesamtes für schwere Nutzfahrzeuge (FIGE, 1995) angesetzt. Der Emissionsfaktor für Benzo(a)pyren (BaP) wurde mit 30 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Kraftstoff, die Faktoren für NH_3 und N_2O mit 0.002 g/kWh bzw. 0.35 g/kWh angenommen (EEA, 2013).

In Tab. 2.2 ist die Fortschreibung der Emissionsfaktoren der Güterschiffe 2005 - 2025 nach der beschriebenen Vorgehensweise dargestellt. Die Emissionsfaktoren für CO liegen bereits im Basisjahr 2005 unter den Grenzwerten der Stufe II, sodass hierfür keine weitere Reduktion angenommen wurde. Für SO_2 , NH_3 , N_2O und BaP erfolgt keine Verschärfung der Abgasgrenzwerte für Binnenschiffe, sodass diese Emissionsfaktoren ebenfalls als bezugsjahrunabhängig betrachtet wurden.

Tab. 2.2: Fortschreibung der Emissionsfaktoren der Güterschiffe 2005 – 2025

Komponente	2005	2010	2012	2015	2020	2025
Kraftstoff ¹	203	203	203	203	203	203
CO ¹	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
HC ¹	0.5	0.49	0.48	0.47	0.45	0.43
CO ₂ ¹	645.3	645.3	645.3	645.3	645.3	645.3
NO _x ¹	12.8	11.94	11.61	11.13	10.38	9.68
NO ₂ ¹	1.28	1.19	1.16	1.11	1.04	0.97
PM10 ¹	0.3	0.27	0.25	0.24	0.21	0.18
PM _{2.51}	0.3	0.27	0.25	0.24	0.21	0.18
Ruß ¹	0.12	0.11	0.1	0.09	0.08	0.07
SO ₂ ¹	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
CH ₄ ²	12.3	11.7	11.5	11.2	10.7	10.2
NH ₃ ²	2	2	2	2	2	2
N ₂ O ¹	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
BaP ³	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09
¹ in g/kWh ² in mg/kWh ³ in µg/kWh						

Zur Einordnung der in Tab. 2.2 dargestellten Emissionsfaktorenfortschreibung sind in Tab. 2.3 vergleichend Werte aus anderen Studien gegenübergestellt. Darin zeigt sich, dass sich die für das Jahr 2010 berechneten Emissionsfaktoren relativ gut in die Werte aus IFEU (2011) und INFRAS (2012) einordnen. Für die Prognosejahre liegen die berechneten Werte tendenziell über denen aus INFRAS (2012) bzw. PLANCO (2007a), da dort von der Annahme ausgegangen wurde, dass die Grenzwerte der ZKR IV ab 2016 in Kraft treten. Die Emissionsfaktoren 2025 aus PLANCO (2007a) stellen das technische Optimum dar und entsprechen im Wesentlichen den Abgasgrenzwerten der ZKR Stufe IV.

Tab. 2.3: Einordnung der fortgeschriebenen Emissionsfaktoren (g/kWh)

Bezugs- jahr	Vergleichsquelle	CO	HC	NOx	PM₁₀
2005		1.5	0.5	12.8	0.3
2006	PLANCO (2007a)	1.29 - 1.63	0.69 - 0.82	9.49 - 9.75	0.18 - 0.23
2010		1.5	0.49	11.94	0.27
2010	IFEU (2011)	2.03 - 2.54	0.9 - 1.08	11.4 - 14.2	0.36 - 0.46
2010	INFRAS 2012)	1.5	0.6	10.3	0.25
2015		1.5	0.47	11.13	0.24
2015	INFRAS (2012); unter der Annahme, dass Stufe IV in Kraft tritt	1.5	0.6	9	0.22
2020		1.5	0.45	10.38	0.21
2020	INFRAS (2012); unter der Annahme, dass Stufe IV in Kraft tritt	1.5	0.6	7.7	0.19
2025		1.5	0.43	9.68	0.18
2025	PLANCO (2007a), technisches Optimum unter der Annahme, dass Stufe IV in Kraft tritt	0.6	0.19	0.4	0.025
diskutier- te Grenz- werte ab 2016	ZKR Stufe IV	2.5	0.19	0.4	0.025

2.1.2 Motorleistungen

Die Motorleistung des Schiffes hängt vom Gewässerprofil, dem Tiefgang (Beladung), der Schiffsklasse und der Fahrgeschwindigkeit ab. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wird nachstehendes vereinfachtes Rechenverfahren aus LuWas für die Motorleistungsbestimmung angewendet. Das derzeit in LuWas angewandte Verfahren, welches den Einfluss des Kanalquerschnittes vernachlässigt, ist nachstehend geschildert.

Die vom Schiff im stationären Zustand bei der Geschwindigkeit v_R in km/h (relativ zum Wasser) aufzubringende Leistung P in kW wird proportional v_R^3 und entsprechend Gl. (2.3) angesetzt. Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass jedes voll beladene Schiff 15 km/h bis 20 km/h fährt, wenn der Motor eine über die Tragfähigkeitstonnen zugeordnete Nennleistung entsprechend Tab. 2.4 abgibt. Es wird dafür 18 km/h angesetzt. Dabei ist berücksichtigt, dass das Schiff in der Regel im Kanal maximal 11 km/h fährt, der genaue Wert wird für den betrachteten Streckenabschnitt jeweils abgefragt. Weiterhin geht in Gl. (2.3) ein, dass die Motoren im Leerlauf emittieren als sei eine Last von 10 % der Nennleistung vorhanden.

$$P = P_{\text{nenn}} \cdot (0.1 + 0.00015432 \cdot v_R^3) \quad (2.3)$$

mit

P_{nenn} : Nennantriebsleistung des Schiffes in kW

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

Der in Gl. (2.3) gegebene Zusammenhang ist zusammen mit Messwerten in Abb. 2.2 dargestellt. Man setzt damit also höhere Emissionen an als die Autoren der beiden dort angegebenen Literaturstellen, weil im vorliegenden Fall höhere Leerlaufleistungen und geringere Fahrgeschwindigkeiten bei voller Motorleistung angesetzt werden.

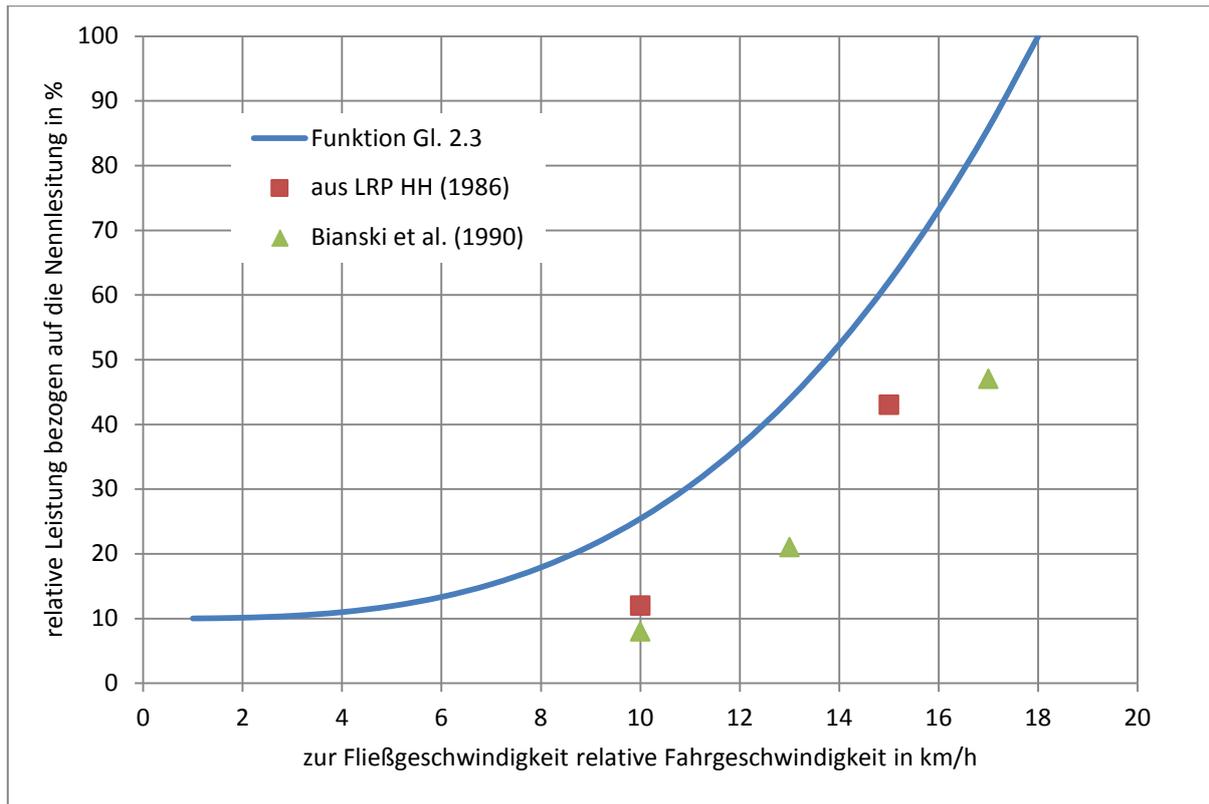


Abb. 2.2: Angesetzter Lastfaktor in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit in einem Gewässer ohne Fließgeschwindigkeit. Funktion ist Gl. (2.3).

Zusätzlich wird folgendes in Ansatz gebracht:

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

$$\text{Beladungsgrad} = \text{Anteil der vollbeladenen Schiffe} + 0.5 * \text{Anteil leerer Schiffe} \quad (2.4)$$

Die Festlegung der Leistung erfolgt anhand der Tragfähigkeitsklassen. Die Zuordnung erfolgt entsprechend Tab. 2.4.

Tab. 2.4: Zuordnung der Tragfähigkeitsklassen zur Nennmotorleistung

Schiffstyp bzw. Tragfähigkeitsklasse	Masse [t]	Nennmotorleistung	
		[kW]	[PS]
0 - 400 TT	413	153	208
401 - 650 TT	792	255	347
651 - 900 TT	1 154	330	448
901 - 1000 TT	1 436	412	560
1001 - 1500 TT	1 830	522	709
1501 - 2000 TT	2 577	708	962
> 2000 TT	3 726	942	1 280
< 650 TT; SV mit SL	750	400	544
650 - 1000 TT; SV mit SL	1 500	660	897
1001 - 1500 TT; SV mit SL	2 250	870	1 182
1501 - 2000 TT; SV mit SL	3 000	1 120	1 522
> 2000; SV mit SL	3 750	1 300	1 767
Fahrgastschiff (TT 410)	600	221	300
TT-Tragfähigkeit in Tonnen, SV-Schubverband, SL-Schubleichter			

2.1.3 Beispiel für die Berechnung der Emissionsdichte auf einer freien Strecke ohne Fließgeschwindigkeit

Im Folgenden wird die Emissionsdichte q_i auf dem Abschnitt Wesel-Datteln-Kanal an der Schleuse Friedrichsfeld, da staugeregelt, ohne Fließgeschwindigkeit ($v_G = 0$) unter folgenden Randbedingungen berechnet:

Nennleistung P_{nenn} aus mittlerer Tragfähigkeit pro Schiff von 1 604 t und Zuordnung aus Tab. 2.4	708 kW
Anzahl Schiffe pro Jahr n_s	18 687 /a
Fahrgeschwindigkeit v_R	11 km/h
Anteil leerer Schiffe	0.3 (fiktiver Wert)
Beladungsgrad (unter Berücksichtigung vom Anteil leerer Schiffe, siehe Gl. (2.4))	0.85
Lastfaktor (aufgrund Fahrgeschwindigkeit v_R , siehe Gl. (2.3) bzw. Abb. 2.2)	0.31
NO_x -Emissionsfaktoren q_i Bezugsjahr 2012 (Tab. 2.2)	HC: 0.48 g/kWh, NO_x : 11.61 g/kWh, PM_{10} : 0.25 g/kWh, Ruß: 0.10 g/kWh, SO_2 : 0.2 g/kWh, CO: 1.5 g/kWh

Die Emissionsdichte q_i eines Schiffes wird mit der Anzahl der Schiffe n_s multipliziert, die in der Stunde fahren, um die Emissionsdichte Q_i in der Stunde s zu erhalten (siehe Gl. 1.2).

Unter Anwendung des Lastfaktors und des Beladungsgrades erhält man für die Antriebsleistung $P = 183.79$ kW. Damit erhält man folgende Emissionsdichten der Strecke:

Schadstoff	NO_x	Ruß	SO_2	PM_{10}	CO	HC
Emissionsdichte [g/(km*h)]	414	3.6	7.1	8.9	53	17

2.2 Emissionsbestimmung im Bereich einer Schleuse in einem Gewässer ohne Fließgeschwindigkeit

Im Folgenden werden zunächst die emissionsrelevanten Vorgänge beim Schleusen beschrieben.

Die entsprechenden Betriebszustände sind in Abb.: 2.3 dargestellt.

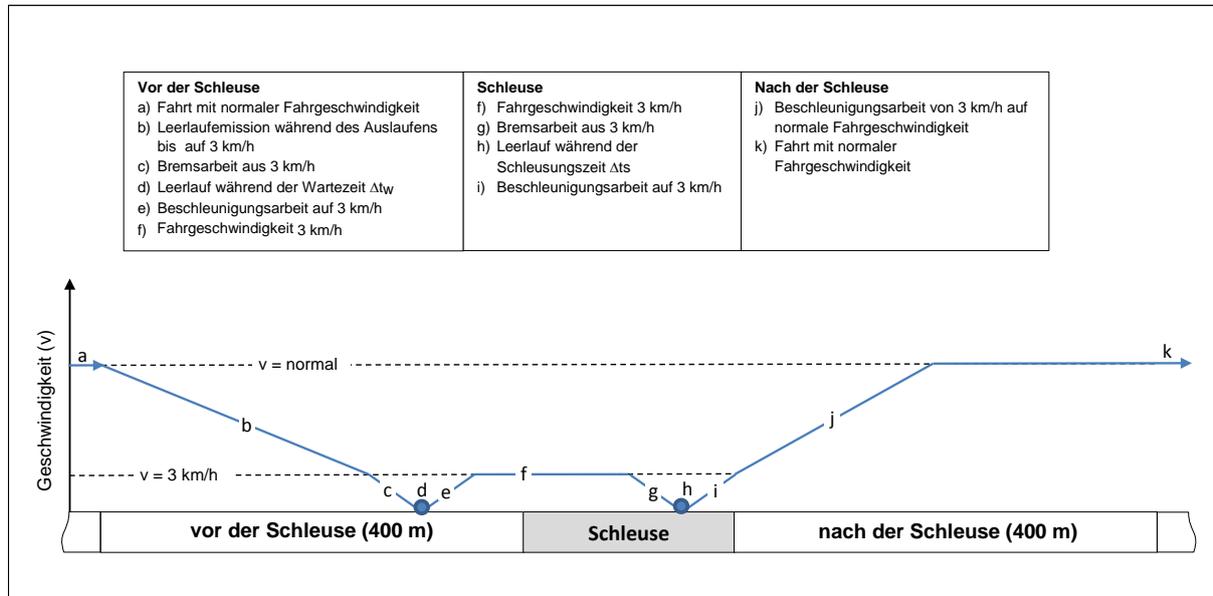


Abb. 2.3: Bei der Emissionsbestimmung berücksichtigte Betriebszustände eines Schiffes vor, in und nach einer Schleuse

2.2.1 Emissionsrelevante Vorgänge

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

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

2.2.2 Schadstoffemission bei Manövern

2.2.2.1 Herleitung des Berechnungsverfahrens

Im Folgenden wird die Vorgehensweise bei der Berechnung der Schadstoffemissionen bei Manövern, hier zunächst beim Bremsen, erläutert. Dazu wird davon ausgegangen, dass das Schiff der Masse m mit der Geschwindigkeit v_R z. B. in eine Schleuse einfährt. Bei Ankunft am Liegeplatz in der Schleuse muss die Geschwindigkeit des Schiffes auf Null abgebaut werden. Es folgt die Bestimmung der Arbeit [kWh], die für dieses Bremsmanöver gebraucht wird und mit der man dann aus Tab. 2.2 die Schadstoffemission (g Schadstoff/Bremsmanöver) berechnen kann.

Bei der Einfahrt hat das Schiff eine kinetische Energie E von

$$E = 1/2 \cdot m \cdot v_R^2 \quad (2.5)$$

mit

E = kinetische Energie in Ws

m = Masse des Schiffes in kg

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

Benutzt man für Gl. (2.5) die eher gebräuchlichen Maßeinheiten kWh, Tonnen und km/h statt Ws, kg und m/s, dann ist Gl. (2.5) umzuformen in

$$E = 1/2 \cdot m \cdot v_R^2 / (3.6^2 \cdot 3\,600) \quad (2.6)$$

mit

E = kinetische Energie in kWh

m = Masse des Schiffes in Tonnen

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

Die Energie zum Beschleunigen wird berechnet auf Basis von Gl. (2.6) zu:

$$\Delta E = 1/2 \cdot m (v_R^2 - v_S^2) / (3.6^2 \cdot 3\,600) \quad (2.7)$$

mit

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

m = Masse des Schiffes in Tonnen

v_R = Reisegeschwindigkeit in km/h und

v_S = Fahrgeschwindigkeit in der Schleuse in km/h.

Die kinetische Energie ist gleich der Arbeit, die beim Brems- oder Beschleunigungsmanöver durch den Strömungswiderstand des Schiffes und den Schiffsantrieb aufgebracht werden muss. Entsprechend LuWas (Lohmeyer, 1998) wird bei einem Bremsvorgang von 3 km/h auf Null km/h von einer Bremszeit von 15 Sekunden und von einem 17%igen Wirkungsgrad für Bremsmanöver und einem 50%igen Propulsionswirkungsgrades für Beschleunigungsmanöver ausgegangen (Wirkungsgrad: kinetische Energie des Schiffes zu Beginn des Bremsvorgangs dividiert durch vom Motor während des Bremsvorgangs aufzubringende Energie). Damit kann dann die Emission beim Bremsen errechnet werden.

2.2.2.2 Zahlenbeispiele

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

Die während des Bremsmanövers zu erbringende Motorleistung errechnet sich nach Gleichung (2.6) zu: $E = 0.145 \text{ kWh}$. Bremszeit ist 15 Sekunden, Wirkungsgrad 17 %, damit sind 204 kW ($0.145 \text{ kWh} / (15 \text{ s} \cdot 0.17) \cdot 3 600$) Leistung erforderlich, der Motor erbringt eine Arbeit von 0.9 kWh ($204 \text{ kW} \cdot 15 \text{ s} / 3 600$). Die NO_x -Emission für das Bremsmanöver errechnet sich demnach zu

$$0.9 \text{ kWh} \cdot 11.6 \text{ g NO}_x/\text{kWh} = 10.4 \text{ g NO}_x.$$

Emission im Leerlauf:

Ein 1 000 TT-Schiff mit einer Nennleistung des Motors von 522 kW hat (laut Abschnitt 0 bei 10 % Nennleistung) eine Motorleistung von $0.1 \cdot 522 = 52 \text{ kW}$ und damit eine NO_x -Emission von

$$522 \text{ kW} \cdot 0.1 \cdot 11.6 \text{ g NO}_x/\text{kWh} = 605.5 \text{ g NO}_x/\text{h}.$$

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

$$10.4 \text{ g NO}_x / (605.5 \text{ g NO}_x/\text{h}) = 0.017 \text{ h} = 1 \text{ Min}.$$

Emissionen im Fahrbetrieb:

Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h hat der Motor nach Abschnitt 2.1.2 eine Leistung P von

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

zu erbringen. Die NO_x -Emission beträgt damit

$$54 \text{ kW} \cdot 11.6 \text{ g NO}_x/\text{kWh} = 626 \text{ g NO}_x/\text{h},$$

dies entspricht einer Emission von $0.21 \text{ g NO}_x/\text{m}$.

Die bei einem Bremsmanöver emittierten 10.4 g NO_x entsprechen also den Emissionen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h in

$$10.4 \text{ g NO}_x / 0.21 \text{ g NO}_x/\text{m},$$

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

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

Emissionen während der Schleusung:

Läuft der Motor des o.a. Schiffes während der Schleusung im Leerlauf, z. B. während 15 Min., emittiert er dabei

$$626 \cdot 15/60 \text{ g NO}_x = 157 \text{ g NO}_x.$$

Programmtechnische Umsetzung

Die im Abschnitt 2.2.1 (a bis k) aufgezählten emissionsrelevanten Vorgänge wurden auf Basis der o. a. ersten Sensitivitätsanalyse programmtechnisch wie folgt umgesetzt. Siehe dazu auch Abb. 2.3.

- a) Wird im vorherigen Streckenabschnitt berücksichtigt.
- b) Auf einem Streckenabschnitt zwischen 400 m Abstand und der Wartestelle vor dem Schleusentor wird die Leerlaufemission berechnet während das Schiff von Reisegeschwindigkeit auf 3 km/h ausläuft (8 Minuten Auslaufzeit bei vollem Schiff, 3 Minuten bei leerem Schiff).
- c) Die beim Bremsmanöver aus 3 km/h emittierende Emission wird berechnet.
- d) Die Emission während der Wartezeit Δt_w wird auf den o. a. 400 m gleichverteilt ermittelt.
- e) Die beim Beschleunigen auf 3 km/h entstehende Emission wird berechnet.
- f) Auf Streckenabschnitt beginnend in 400 m Abstand vor Schleusentor bis Ende der Schleuse wird die Emission bei gleichbleibender Fahrgeschwindigkeit 3 km/h ermittelt.
- g) Die beim Bremsmanöver in der Schleuse aus 3 km/h entstehende Emission wird berechnet.
- h) Die Emission während der Liegezeit Δt_s in der Schleuse wird ermittelt.
- i) Die beim Beschleunigen auf 3 km/h entstehende Emission wird ermittelt.
- j) Die beim Beschleunigen von 3 km/h auf Reisegeschwindigkeit entstehende Emission wird ermittelt.
- k) Wird im Folgeabschnitt berücksichtigt.

2.3 Emissionsbestimmung in Häfen

Eine detaillierte Emissionsbestimmung von Schiffsbewegungen in Häfen erfordert eine Vielzahl von Eingangsparametern (z.B. gefahrene Strecken, Wartezeiten, Anzahl der Brems- und Beschleunigungsmanöver, Betriebszeiten von Hilfsmotor und Bugstrahlruder), die im Rahmen vorliegender Untersuchung nicht erhoben werden konnten und auch über vorhandene Statistiken nicht erhoben werden können. Daher wurde eine vereinfachte Methode zur Emissionsbestimmung in Häfen angewendet, die fortschreibbar ist und auf den in der Studie 2004 (DST, 2007) berechneten Emissionen basiert. In dieser vereinfachten Methodik wurden Emissionsfaktoren pro umgeschlagene Tonne für in der Studie 2004 (DST, 2007) betrachteten Häfen berechnet. Hierfür wurden die pro Hafen berechneten Emissionen durch die 2004 umgeschlagenen Gütermengen (DESTATIS, 2006) dividiert. Zusätzlich wurde der mittlere Emissionsfaktor über alle Häfen gebildet. Die so ermittelten mittleren Emissionsfaktoren sind in Tab. 2.5 aufgeführt.

Für jeden in der Studie 2004 betrachteten Hafen wurde die relative Abweichung zum mittleren Emissionsfaktor aus Tab. 2.5 gebildet, welcher neben dem jährlich umgeschlagenen Gütern als Eingangsparameter jedem Hafen zugeordnet wurde.

Tab. 2.5: Mittlere Emissionsfaktoren für Häfen in NRW 2004 bezogen auf eine umgeschlagene Güertonne

Stoff	Emissionsfaktor pro umgeschlagener Güertonne	Einheit
CO	91	g/a
HC	46	g/a
CO ₂	37	kg/a
NO _x	556	g/a
NO ₂	56	g/a
PM ₁₀	13	g/a
PM ₂₅	13	g/a
Ruß	5.1	g/a
SO ₂	4.7	g/a
CH ₄	2.1	g/a
NH ₃	70	mg/a
N ₂ O	15	g/a
BaP	0.3	mg/a

Die Emissionen für das jeweilige Bezugsjahr werden wie folgt berechnet:

$$E_{hi} = e_{fi} \cdot G \cdot f_h \quad (2.8)$$

wobei

E_{hi} : Emission des Schadstoffes i in t/a im Hafen h

e_{fi} : mittlerer Emissionsfaktor für Schadstoff i in t/a

G : Güterumschlagsmenge pro Jahr in t

f_h : Korrekturfaktor vom mittleren Emissionsfaktor für den Hafen h

2.4 Emissionsbestimmung bei frei fließenden Gewässern

2.4.1 Berg- und Talfahrer mit gleicher Relativgeschwindigkeit zum Wasser

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

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

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

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

Pro Stunde emittiert jedes Schiff:

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

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

- als Bergfahrer: $\Delta t_B = L/(v_R - v_G)$ [h/(Strecke L und Schiff)]
- als Talfahrer: $\Delta t_T = L/(v_R + v_G)$ [h/(Strecke L und Schiff)]

Auf der Strecke der Länge L emittiert also jedes Schiff:

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

Es wird davon ausgegangen, dass im Mittel genauso viele Schiffe zu Berg wie zu Tal fahren. Damit errechnet sich die mittlere Emission pro Schiff, welches auf dem Querschnitt fährt, zu

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

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

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

Zum Vergleich mit Gl. (2.2) lässt sich die o.a. Gleichung umformen in

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

oder

$$q_i = ef_i \cdot P \cdot \frac{1}{v_R} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 - v_G / v_R} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + v_G / v_R} \right) \text{ [g/(Schiff \cdot km)]} \quad (2.9)$$

Die Gleichungen (2.2) und (2.9) unterscheiden sich um den dimensionslosen Faktor

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 - v_G / v_R} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + v_G / v_R} \quad [-] \quad (2.10)$$

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

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

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

Für den Gültigkeitsbereich ($v_G / v_R < 1$) nimmt er die Werte in Tab. 2.6 an, ist also erwartungsgemäß immer ≥ 1 .

Tab. 2.6: Verstärkungsfaktor F für die Emissionen in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeit v_G des Gewässers und Fahrgeschwindigkeit v_R der Schiffe relativ zum Wasser

v_G/v_R	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
v_R/v_G	∞	5	2.5	1.7	1.3	1
F	1	1.04	1.19	1.56	2.78	\square

2.4.2 Berg- und Talfahrer mit ungleicher Relativgeschwindigkeit zum Wasser

Bei hoher Fließgeschwindigkeit v_G des Gewässers wird der Bergfahrer in der Regel mit einer höheren Relativgeschwindigkeit zum Wasser fahren als der Talfahrer. Bezeichnet man mit v_{RB} die Relativgeschwindigkeit des Bergfahrers und mit v_{RT} diejenige des Talfahrers dann modifizieren sich die Gleichungen aus Abschnitt 2.4.1.1 wie folgt.

Pro Stunde emittiert jedes Schiff

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

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

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

Auf der Strecke der Länge L emittiert also jedes Schiff

- als Bergfahrer: $ef_{iB} \cdot P_B \cdot L / (v_{RB} - v_G)$ [g/(Strecke L und Schiff)]
- als Talfahrer: $ef_{iT} \cdot P_T \cdot L / (v_{RT} + v_G)$ [g/(Strecke L und Schiff)]

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

$$\frac{1}{2} ef_{iB} \cdot P_B \cdot L \cdot \frac{1}{v_{RB} - v_G} + \frac{1}{2} ef_{iT} \cdot P_T \cdot L \cdot \frac{1}{v_{RT} + v_G} \text{ [g/(Strecke L und Schiff)]}$$

bzw. eine Emissionsdichte q_i von

$$q_i = \frac{1}{2} ef_{iB} P_B \cdot \frac{1}{v_{RB} - v_G} + \frac{1}{2} ef_{iT} P_T \cdot \frac{1}{v_{RT} + v_G} \text{ [g/(Schiff \cdot km)]}$$

Diese Beziehung wird bei der Emissionsbestimmung im Programm berücksichtigt.

2.4.3 Schleuse

Der Bereich von Schleusen wird hinsichtlich der Fließgeschwindigkeit wie ein staugeregeltes Gewässer bzw. wie ein Kanal (siehe Abschnitt 2.2) behandelt. Ausnahme bildet die Emissionsbestimmung der freien Fahrt [emissionsrelevanter Vorgang f)]

3 Eingangsdaten

3.1 Wasserstraßen

3.1.1 Geometrie der Wasserstraßenabschnitte

Für die Verortung der Schiffsemissionen wurden Streckenabschnitte der Gewässerstraßen aus aktuellen Daten des Deutschen Landnutzungsmodells übernommen. Die Abschnitte wurden so geteilt, dass der Wechsel von Schiffsbewegungen an Häfen und Fluss- bzw. Kanaleinmündungen abgebildet werden können. Um die Vergleichbarkeit mit der Studie 2004 (DST, 2007) herstellen zu können, wurden die alten Streckenbezeichnungen informativ in die Datenbank mit aufgenommen.

3.1.2 Schiffsbewegungen

Das Schiffsaufkommen wurde aus den Berichten der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte (WSD-MITTE, 2012) und der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt Außenstelle West (WSD-WEST, 2013) entnommen. Die in diesen Berichten vorliegenden Daten sind sehr stark generalisiert. Um eine Differenzierung auf den einzelnen Wasserstraßenabschnitten zu erzeugen, wurden die relativen Änderungen aus der vorliegenden Datenbank einer Studie von PLANCO (2007b) übernommen, in der für alle Deutschen Wasserstraßen Schiffsbewegungszahlen für 2004 ermittelt und 2025 prognostiziert wurden. Dazu wurden auf die den generalisiert vorliegenden Abschnitten der WSD die Abschnittswechsel der PLANCO-Datenbank übertragen (siehe Abb. 3.1, blaue und orangene Linie).

Der relative Abweichungsfaktor, in Folgendem Belegungsfaktor genannt, wurde durch die Normierung anhand des Abschnitts mit der höchsten Schiffsbelegung berechnet. Vor der Emissionsberechnung werden die Schiffsbelegungswerte nur für Gütermotorschiffe (GMS_Anz) und Schubverbände (SV_Anz) mit dem Belegungsfaktor multipliziert (siehe Abb. 3.1, dunkelrote Linie). Die für alle berücksichtigten Wasserstraßen abgeleiteten Schiffbelegungen sind in Abb.3.2 dargestellt.

In WSD-MITTE (2012) und WSD-WEST (2013) wird nur die Anzahl der Schubleichter angegeben. Die auf einem Abschnitt fahrenden Schubverbände wurden aus der Anzahl der Schubleichter mit einem Faktor zusammengefasst. Für den Rhein wurde vom Auftraggeber der Wert 4 vorgegeben. Die Faktoren für die restlichen betrachteten Wasserstraßen wurden wie folgt abgeschätzt: Ab einer Länge des Schleusenbeckens von 185 m ist die Durchfahrt von einem Schubverband mit 2 Leichtern möglich. Die Schleusenbeckenabschnitte wurden auf Basis der topographischen Karten digitalisiert, sodass die Möglichkeit einer Durchfahrt von Schubverbänden mit 2 Leichtern für jeden Abschnitt abgeschätzt werden konnte. Es wurde jedoch nicht der Faktor 1/2 sondern nur 1/1.5 angesetzt, da nicht davon auszugehen ist,

dass alle Schubleichter in einem Schubverband mit 2 Leichtern fahren. Folgende Faktoren wurden angesetzt:

- Rhein Faktor 1/4
- Ruhr und Weser sowie Schleusenkanal Faktor 1
- Dortmund-Ems-Kanal (nördlich von Abzweig Mittellandkanal) Faktor 1
- Datteln-Hamm-Kanal Faktor 1
- Restliche Kanäle Faktor 1/1.5

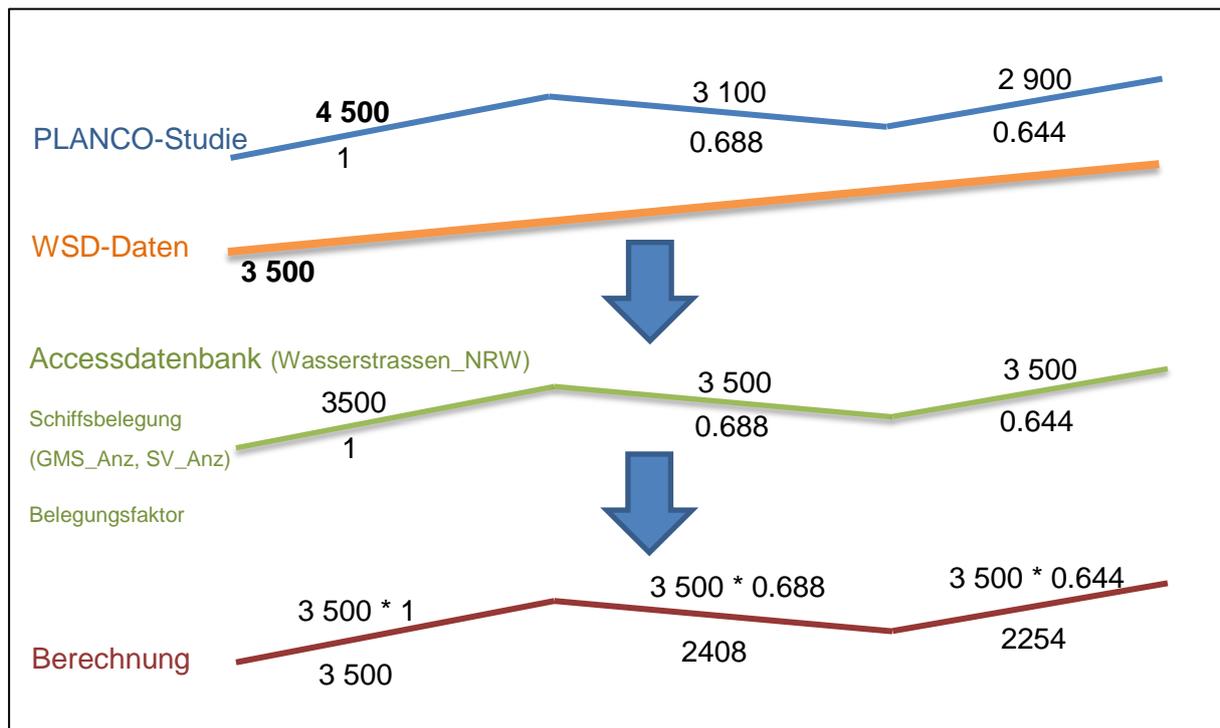


Abb. 3.1: Schemaskizze zur Übertragung der Differenzierung der Schiffbelegungen aus der PLANCO-Studie in die Accessdatenbank, fiktives Beispiel

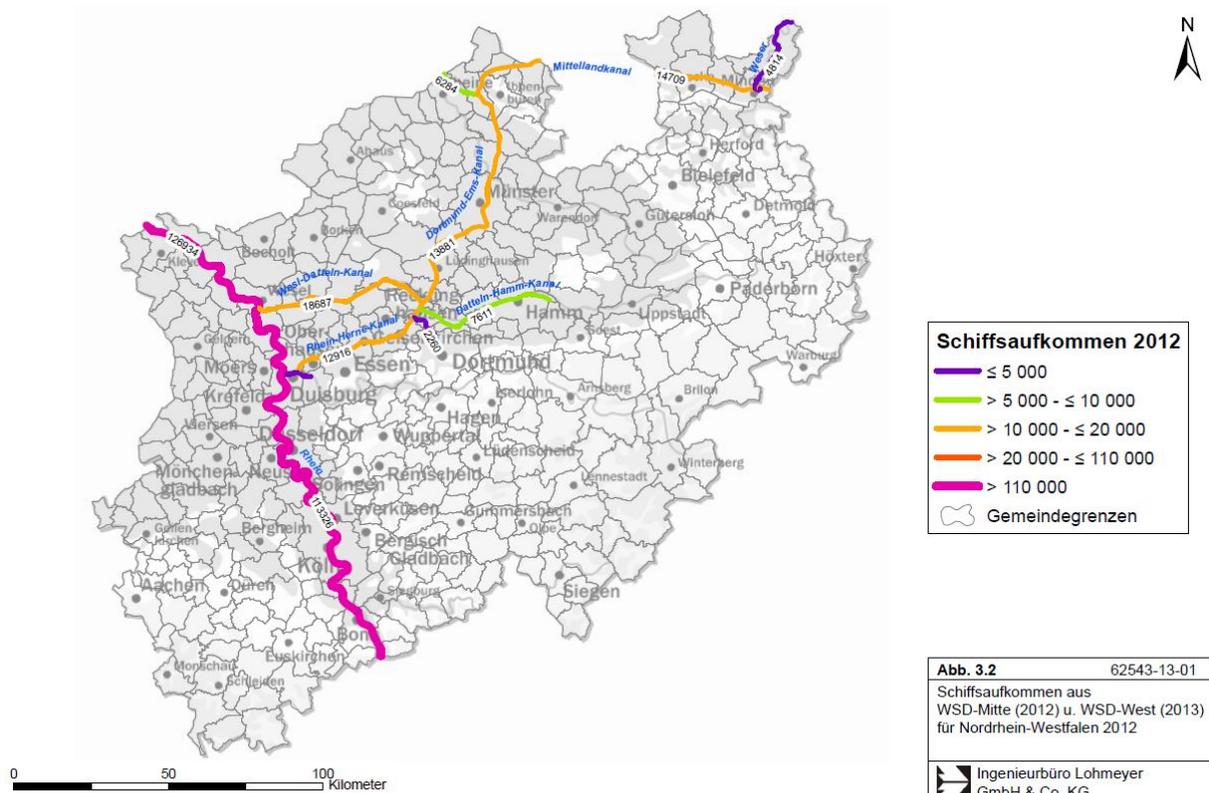


Abb. 3.2: Schiffsaufkommen 2012 in NRW (Anzahl der Güterschiffe und Schubverbände basierend auf der beschriebenen Vorgehensweise)

3.1.3 Passagierschiffe

In der Emissionsberechnung kann das jährliche Passagierschiffsaufkommen berücksichtigt werden. Daten für das Passagierschiffsaufkommens lagen während der Bearbeitungszeit nicht in ausreichender Menge vor. Das Passagierschiffsaufkommens wurde nur für die Strecke zwischen Köln und Linz auf Grundlage der Fahrpläne des Jahres 2012 der Köln Düsseldorf Handelsvertretung (KD) ermittelt und in die Datenbank eingepflegt. Die aus den Fahrplänen der KD ermittelten Schiffbewegungen beziehen sich nur auf den Linienverkehr, der von der KD auf dem Rhein zu einem großen Teil abgedeckt wird. Daten zu anderen Linienverkehren und Charterfahrten sowie Hotelschiffe wurden nicht erfasst.

3.2 Schleusen

Für die Auswertung der Emissionen wurden Streckenabschnitte zu punktbezogenen Lage von Schleusen (siehe Tab. 3.2) zugeordnet. Als Grundlage für die Punktkoordinaten wurde die Shape-Datei *Schleusen_NRW2004_utm.shp* verwendet.

3.3 Häfen

Anhand der in IT.NRW 2012, Tabelle 5 aufgeführten Häfen wurden die Hafenbecken lokalisiert und wenn Sie in der Shape-Datei *44005_Hafenbecken.shp* der Studie 2004 (DST, 2007) noch nicht vorhanden waren, digitalisiert. Jedem Hafen wurden die jährlich umgeschlagenen Güter in Tonnen aus IT.NRW 2012 Tabelle 5 zugeordnet.

Zusätzlich wurde für die Auswertung der Emissionen der Schwerpunkt der Polygone der Hafenbecken erzeugt und in der Accessdatenbank abgelegt.

4 Schiffsemissionen in NRW 2012

Die für das Jahr 2012 berechneten Schiffsemissionen sind in Tab. 4.1 aufgeführt. Alle Emissionsmengen sind in Tonnen pro Jahr angegeben. Nur Benzo(a)Pyren (BaP) wurde auf Grund seiner niedrigen Werte in Kilogramm pro Jahr ausgewertet.

Die Emissionsauswertung wurde getrennt nach Wasserstraßen ohne Schleusen, Häfen und Schleusen vorgenommen. Aus Tab. 4.1 wird deutlich, dass das Emissionsaufkommen der Wasserstraßen ohne Schleusen mit ca. 99 % den größten Anteil am Gesamtemissionsaufkommen darstellt.

Tab. 4.1: Schiffsemissionen in Nordrhein-Westfalen 2012, gesamt und getrennt nach Wasserstraßen, Häfen und Schleusen (Quelle: EKataster_Schiff_NRW_GDB.mdb)

	Einheit	Gesamt	Wasserstraßen ohne Schleusen	Häfen	Schleusen
Kraftstoff- verbrauch	t/a	369 195	367 125	35	2 035
NO_x	t/a	21 176	21 015	45	117
CO	t/a	2 735	2 713	7	15
HC	t/a	877	868	3.7	4.8
CO₂	t/a	1 176 478	1 167 023	2986	6 470
NO₂(direkt)	t/a	2 114	2 098	4.5	11.6
PM₁₀	t/a	456	452	1	2.5
Ruß	t/a	182	181	0.4	1
SO₂	t/a	364	362	0.4	2
CH₄	t/a	21	21	0.2	0.1
NH₃	t/a	3.6	3.6	0.01	0.02
N₂O	t/a	638	633	1.2	3.5
BaP	kg/a	11	11	0.02	0.05

Um Aussagen zur räumlichen Verteilung des Emissionsaufkommens machen zu können, wurden u.a. die Schiffsemissionen in Nordrhein-Westfalen 2012, getrennt nach Wasserstraßenbereichen für NO_x ausgewertet (siehe Tab. 4.2). Aus Tab. 4.2 ist ersichtlich, dass das Emissionsaufkommen auf dem Rhein mit ca. 96 % den größten Anteil der Gesamtemissionen der Wasserstraßen ausmacht. Gefolgt mit ca. 1% Wesel-Datteln-Kanal und Dortmund-Ems-Kanal. Die restlichen Wasserstraßenbereiche tragen jeweils deutlich unter 1 % zum Emissionsgesamtaufkommen der Binnenschifffahrt in NRW bei.

Tab. 4.2: Schiffsemissionen in Nordrhein-Westfalen 2012, auf Wasserstraßenbereiche (inklusive Schleusen) für Stickstoffoxide (NO_x)
(Quelle: EKataster_Schiff_NRW_GDB.mdb, Abfrage: Wasserstraßen_NRW_ERG Nach Wasserstraßen)

Wasserstraßenbereiche	Kurzname	NO _x in t/a	Anteil in %
Rhein	rh	20 360	96
Wesel-Datteln-Kanal	wdk	245	1
Dortmund-Ems-Kanal	dek	207	1
Mittellandkanal	mlk	132	0.6
Rhein-Herne-Kanal, Hafenkanal und Dortmund-Ems-Kanal von Ende Rhein-Herne-Kanal bis Vorhafen Hebewerk	rhk	122	0.6
Datteln-Hamm-Kanal	dhk	37	0.2
Weser, Oberkanal, Schleusenkanal Lahde, Schleusenkanal Schlüsselburg, Mittellandkanal	we	24	0.1
Ruhr und Schifffahrtskanal	ru	5	0.02
Schachtschleuse Minden	min	2	0.01

Für den Vergleich der Gesamtemissionen 2012 und 2004 (DST, 2007) sind die berechneten Werte beider Jahre in Tab. 4.3 gegenübergestellt. Der Güterumschlag der Binnenschifffahrt hat sich zwischen den Bezugsjahren um etwa 3% verringert. Der in Tab. 4.3 aufgeführte Kraftstoffverbrauch liegt 2012 im Vergleich zu 2004 um 11% niedriger. Dieser Wert erscheint in Anbetracht der allmählichen Modernisierung der Flotte plausibel. Ein direkter Vergleich der Werte von 2004 und 2012 ist allerdings nicht möglich, da die Berechnungen mit unterschiedlichen Emissionsmodellen und aufgrund neuer Erkenntnisse geänderten Emissionsfaktoren durchgeführt wurden.

Allgemein kann aber gesagt werden, dass die berechneten Emissionswerte der einzelnen Schadstoffe von 2012 den Größenordnungen von 2004 entsprechen. Auffällig ist allerdings der starke Anstieg der für 2012 ausgewiesenen SO₂-Emissionen. Hauptursache ist der im Gutachten 2004 nach damaligem Kenntnisstand deutlich geringer angesetzte SO₂-Emissionsfaktor.

Tab. 4.3: Schiffsemissionen in Nordrhein-Westfalen 2012 und 2004 (DST 2007, Anhang Tab. A5.2)

	Einheit	2004	2012	Änderung 2012 zu 2004
Kraftstoffverbrauch	t/a	415 891.7	369 195.2	-11%
NO_x	t/a	19 879.6	21 176.1	7%
CO	t/a	3 244.0	2 735.1	-16%
HC	t/a	1 642.8	876.6	-47%
CO₂	t/a	1 320 456.1	1 176 478.2	-11%
NO₂ (direkt)	t/a	N.N.	2 114.0	-
PM₁₀	t/a	457.5	455.7	0%
Ruß	t/a	183.0	182.3	0%
SO₂	t/a	166.4	364.1	119%
CH₄	t/a	74.9	21.1	-72%
NH₃	t/a	2.5	3.6	46%
N₂O	t/a	536.5	637.7	19%
BaP	kg/a	N.N.	10 ⁻⁹	-

Im Anhang sind die Verteilungen der Emissionen für Kohlenstoffdioxid (CO₂), Stickstoffoxide (NO_x), Feinstäube (PM₁₀), Kohlenwasserstoffe (HC) und Kraftstoffverbrauch (mKr) in Abbildungen dargestellt. Es wurden Abbildungen mit Gesamtemissionen bezogen auf ein 1 x 1 km-Raster und auf Gemeindeflächen erzeugt. Zusätzlich wurden die Emissionsmengen getrennt nach Wasserstraßen, Häfen und Schleusen dargestellt.

5 Literatur

2003/44/EG: Richtlinie 2003/44/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Juni 2003 zur Änderung der Richtlinie 94/25/EG zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Sportboote

Bialonski, W.; Vanck, P.; Schulze, K.; Wakob, H.; (1990): Spezifischer Energieeinsatz in Verkehr, Ermittlung und Vergleich der spezifischen Energieverbräuche. Verkehrswissenschaftliches Institut der Technischen Hochschule Aachen, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr

DST (2007): Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., Weiterentwicklung des landesweiten Emissionskatasters für den Schiffsverkehr in NRW und Aktualisierung auf das Jahr 2004, im Auftrag des Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, August 2007.

EEA (2007): Joint EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Copenhagen: European Environment Agency, Dezember 2007
<http://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR5>

EEA (2011): Joint EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Copenhagen: European Environment Agency, update März 2011.

EEA (2013): Joint EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Copenhagen: European Environment Agency, September 2013.
<http://eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidbook-2013>

ELWIS: Elektronischen Wasserstraßen-Informationsservice,
<http://www.elwis.de/Verkehrsstatistik/zbbd/index.html>

FIGE (1995): Emissionsfaktoren für verschiedenen Fahrzeugschichten, Straßenkategorien, Verkehrszustände und Bezugsjahre (II), Forschungsvorhaben Umweltbundesamt Berlin 105 06 044 „Erarbeitung von Grundlagen für die Umsetzung von § 40.2 BImSchG“. 3. Zwischenbericht, Von Steven, H. (FIGE GmbH, Herzogenrath). Oktober 1995.

IFEU (2011): Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMODO, Version 5.2), IFEU Heidelberg, im Auftrage des Umweltbundesamtes, 2011

INFRAS (2012): Luftschadstoffemissionen der Schifffahrt in den Kantonen Basel-Stadt und Basel-Landschaft, INFRAS, im Auftrage des Lufthygieneamtes beider Basel, 2012

LOHMEYER (1998): LuWas, PC-Programm zur Ermittlung der schiffahrtsbedingten Luftschadstoffbelastung an Wasserstraßen - Hintergrundinformationen. Ingenieurbüro Dr.-Ing. Achim Lohmeyer, Karlsruhe. Projekt 1177 überarbeitet Oktober 2000. Gutachten im Auftrag von: Wasserstraßen-Neubauamt Berlin.

LRP HH (1986): Luftreinhalteplan Hamburg. Hrsg.: Umweltbehörde Hamburg

PLANCO (2007a): PLANCO Consulting GmbH, Essen in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz: Verkehrswirtschaftlicher und ökologischer Ver-

- gleich der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße, im Auftrag der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes; Essen; 2007
- PLANCO (2007b): PLANCO Consulting GmbH, Essen: Umlegung der verkehrsträgerübergreifenden Güterverkehrsprognose auf die Binnenwasserstraßen, im Auftrag für das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Essen; Dezember 2007
- PLANCO (2010): PLANCO Consulting GmbH, Essen, Aktualisierung von Bewertungsansätzen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen in der Bundesverkehrswegeplanung; PLANCO, BVU, ITP; FE-Vorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; 2010
- UBA (2010): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 3.1/Januar 2010. INFRAS AG Bern/Schweiz in Zusammenarbeit mit IFEU Heidelberg. Hrsg.: Umweltbundesamt Berlin. <http://www.hbefa.net/d/start.html>.
- UBA (2012): Daten und Verkehr 2012, Oktober 2012, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-verkehr>
- UBA (2012a): Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD, Endbericht, Im Auftrag des Umweltbundesamtes FKZ 3711 45 10530, https://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/IFEU%202014_Bericht%20Binnenschifffahrt%20TREMODO.pdf
- WSD-MITTE (2012): Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte: Verkehrsbericht 2012, Hannover; 2012
- WSD-WEST (2013): Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt Außenstelle West, Verkehrsbericht 2012; Duisburg; Mai 2013
- IT.NRW (2012): IT.NRW: Statistische Berichte; Binnenschifffahrt in Nordrhein-Westfalen; 2012; Düsseldorf; 2012
- ZKR (2002): Richtlinie der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR), Stufe I, Gültig seit 2002.
- ZKR (2007): Richtlinie der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR), Stufe II bzw. Richtlinie 2004/26/EG, Gültig seit 06/2007

6 Anhang: Abbildungen Emissionen NRW 2012

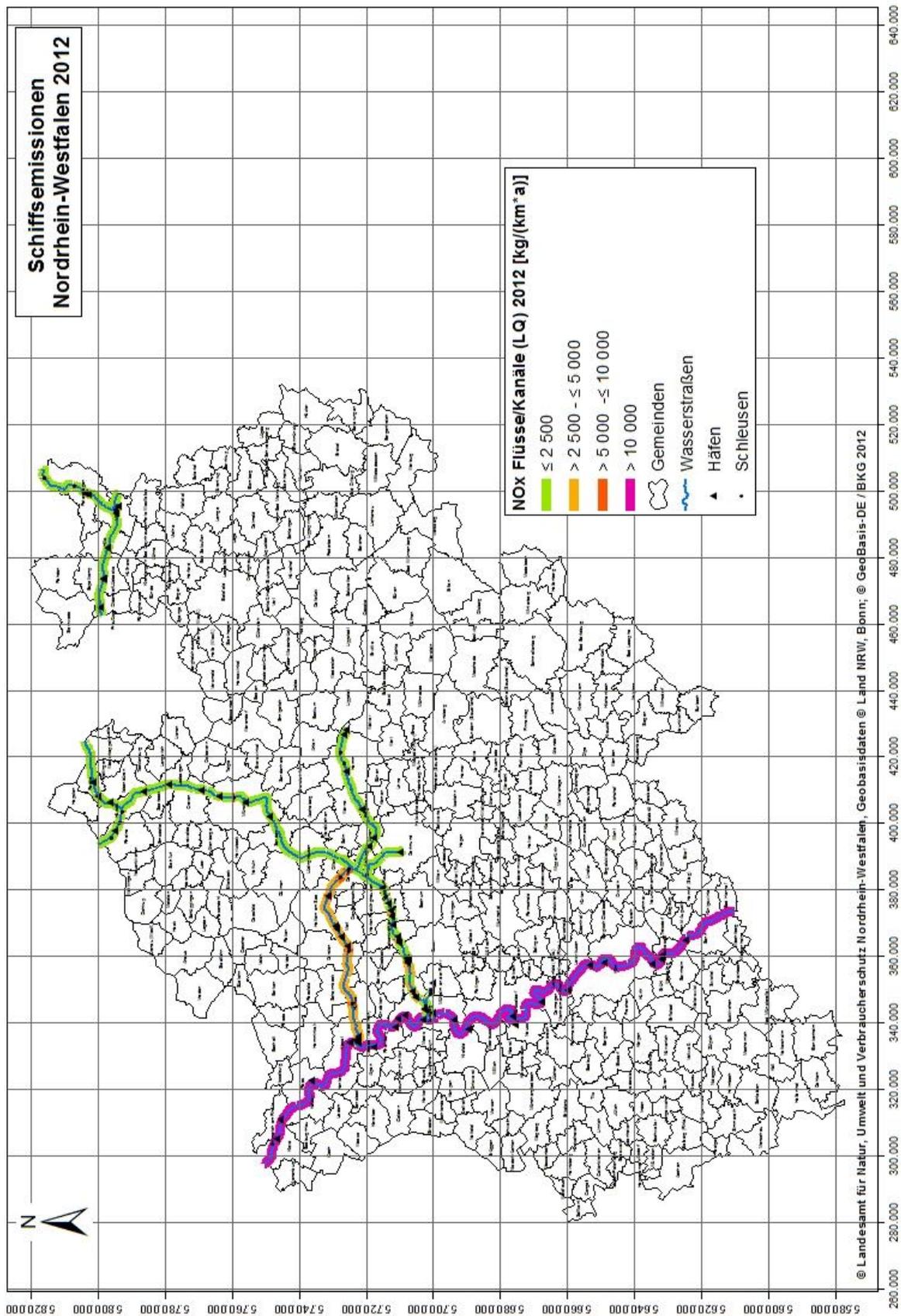


Abb.6.1: Gesamt- NOx- Emissionen

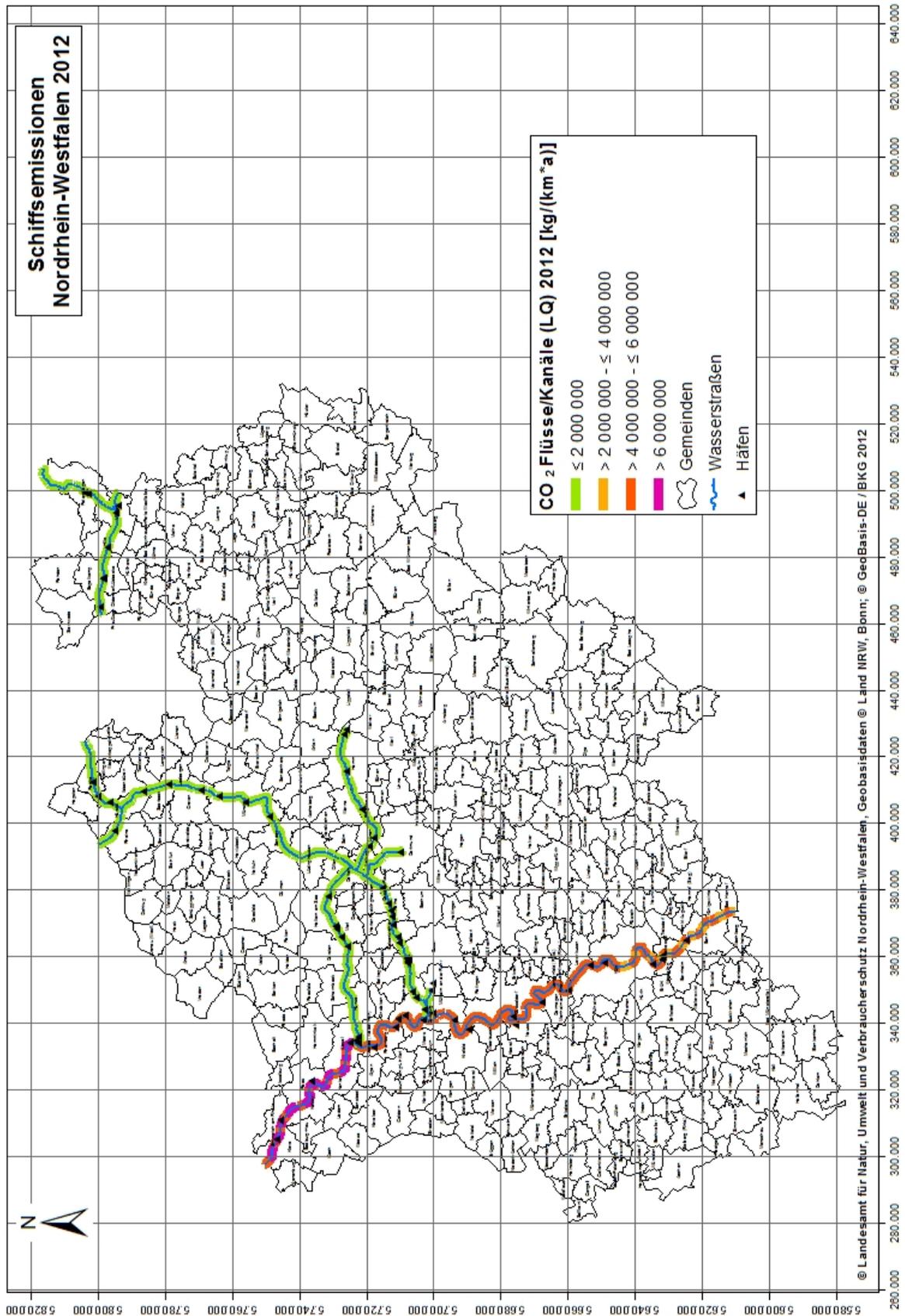


Abb.6.2: Gesamt-CO₂- Emissionen

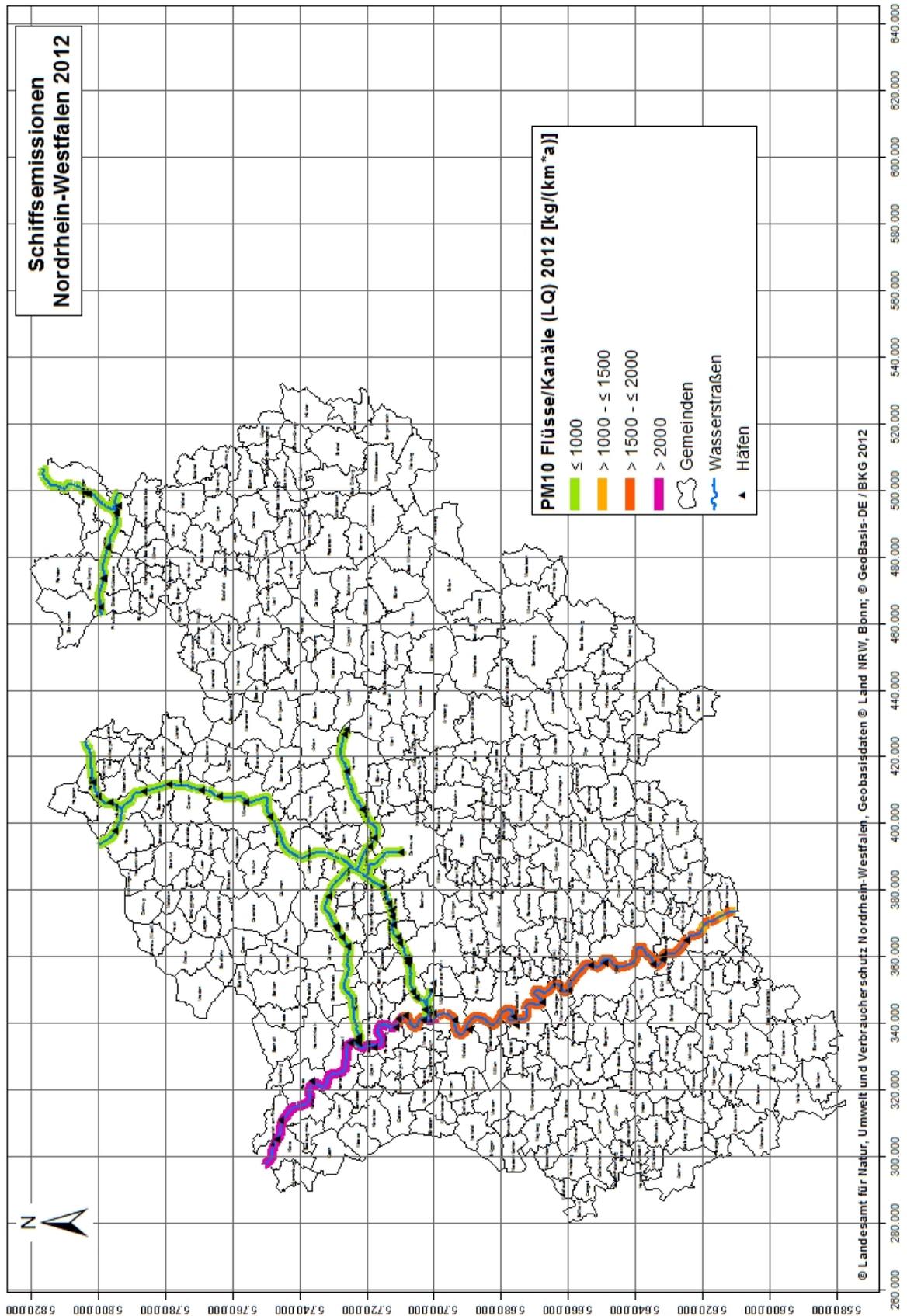


Abb.6.3: Gesamt-PM₁₀-Emissionen

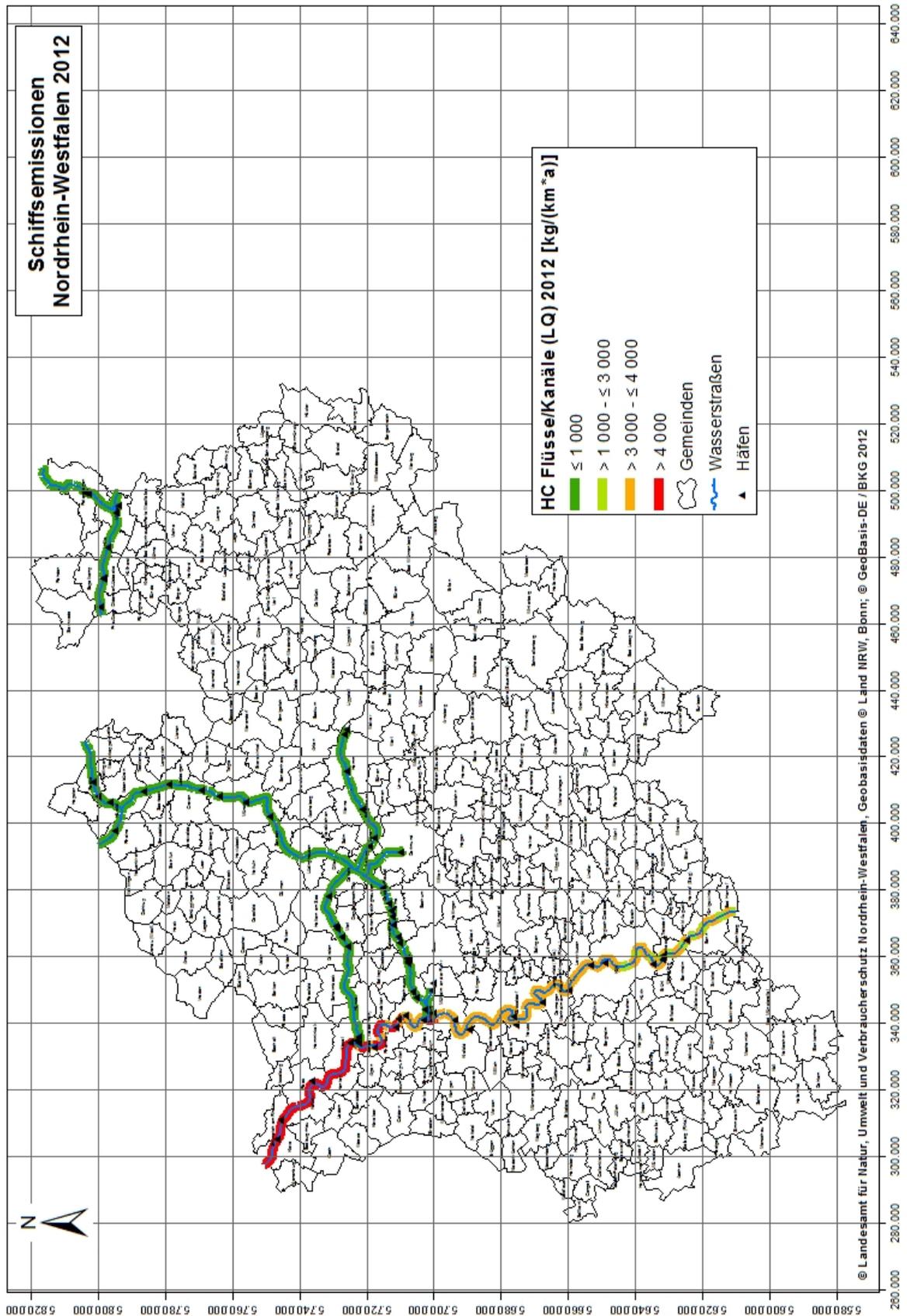


Abb.6.4: Gesamt-HC-Emissionen

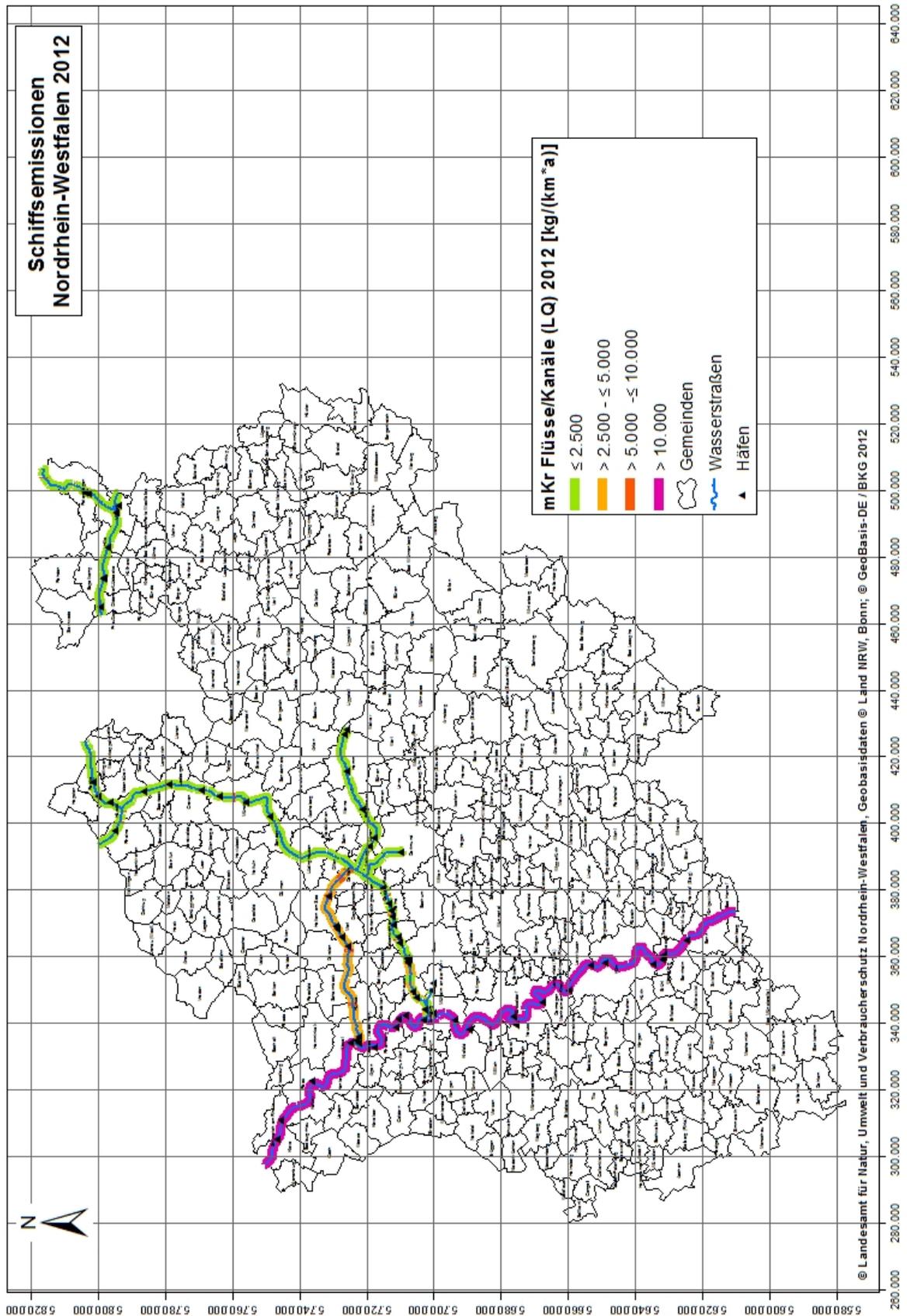


Abb.6.5: Gesamt-Kraftstoffverbrauch

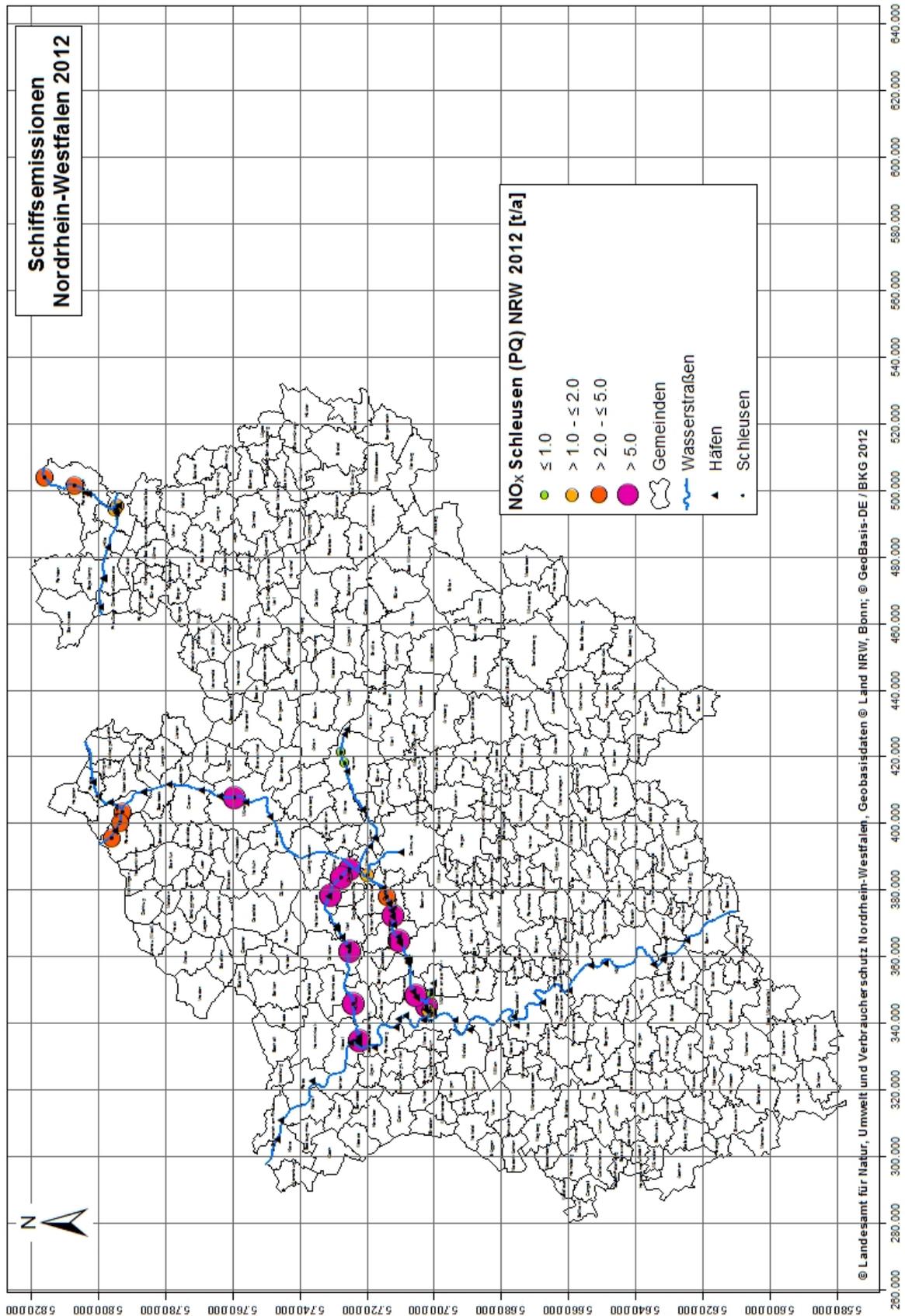


Abb.6.6: NO_x-Emissionen im Bereich der Schleusen

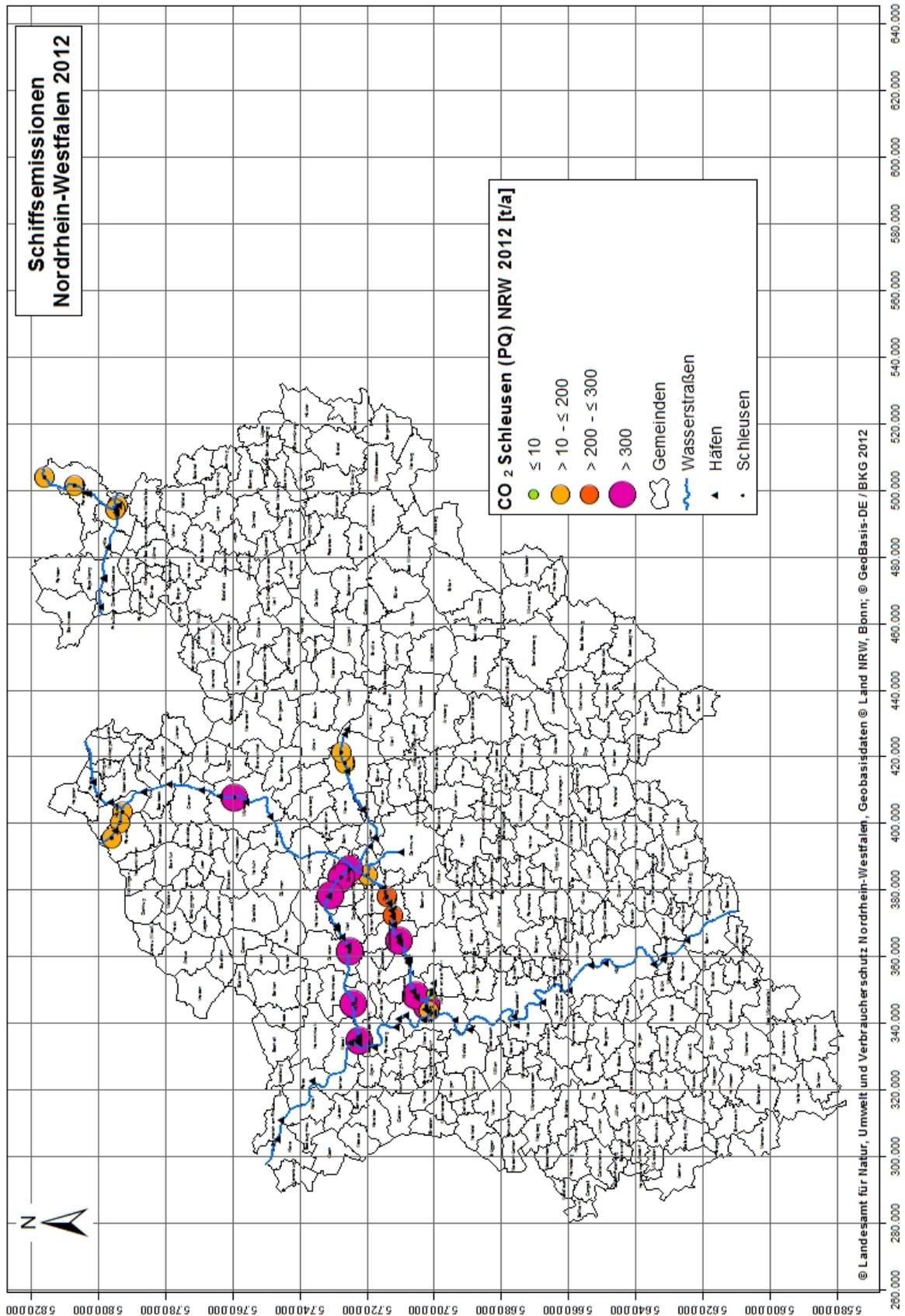


Abb.6.7: CO₂-Emissionen im Bereich der Schleusen

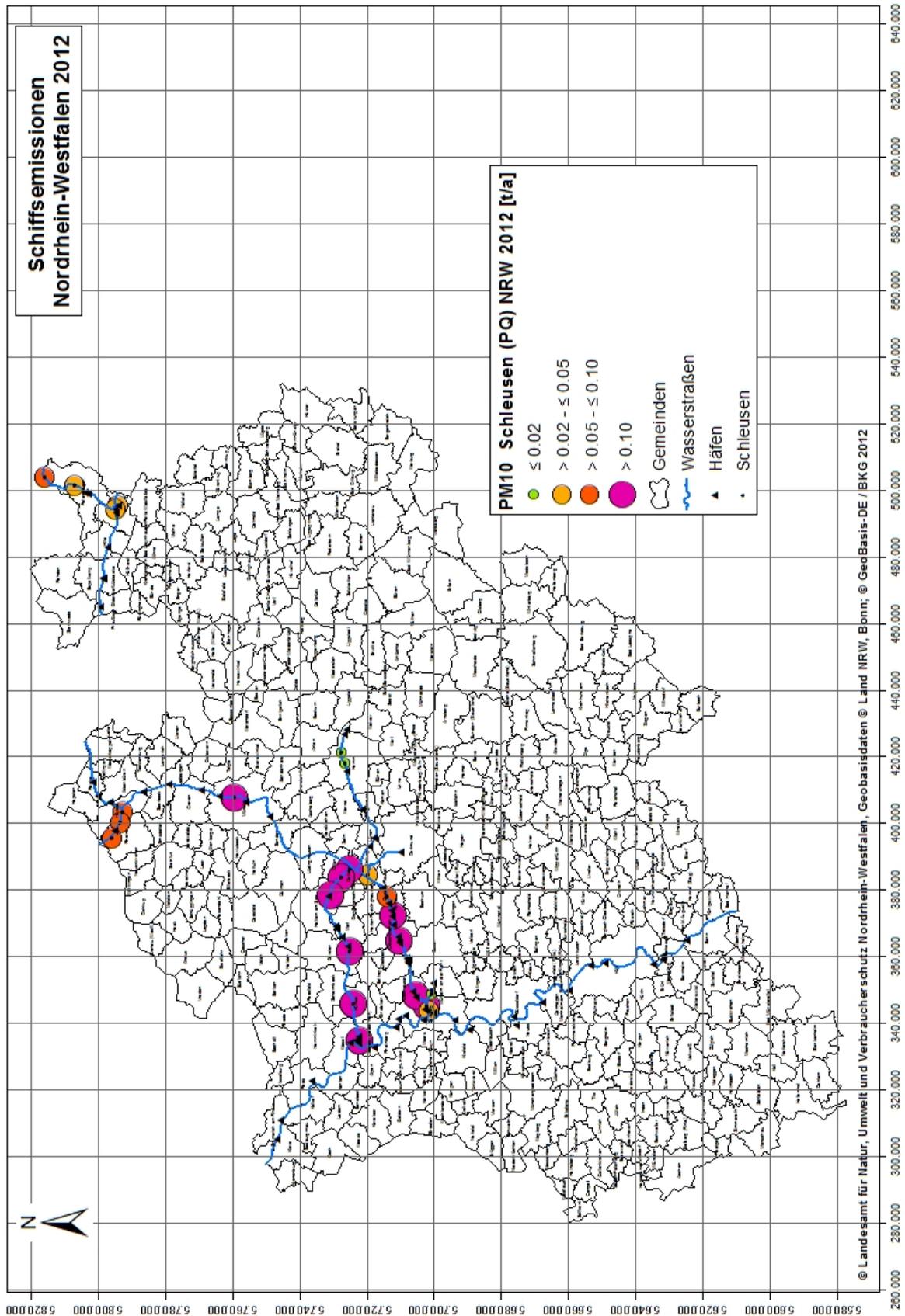


Abb.6.8: PM₁₀-Emissionen im Bereich der Schleusen

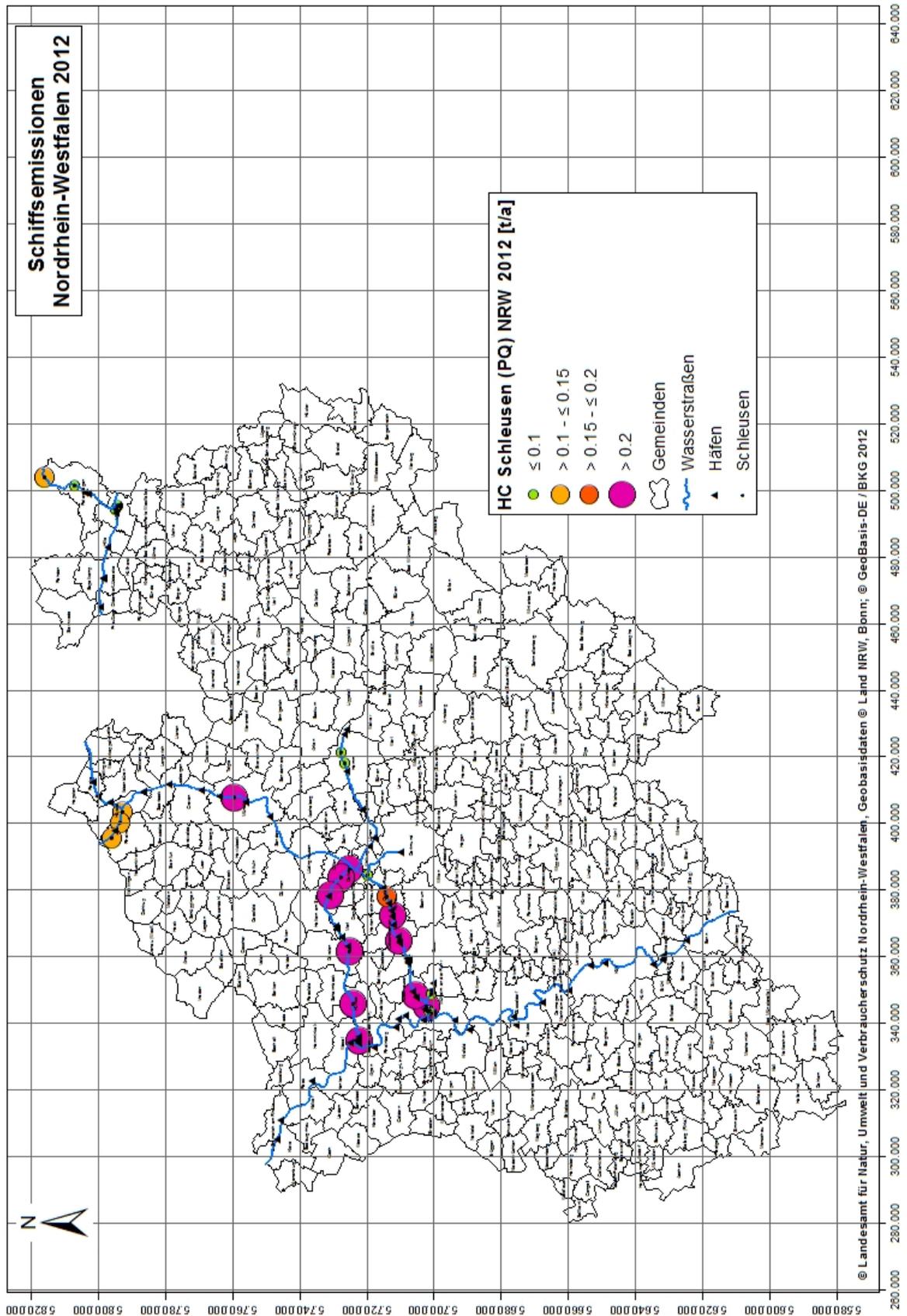


Abb.6.9: HC-Emissionen im Bereich der Schleusen

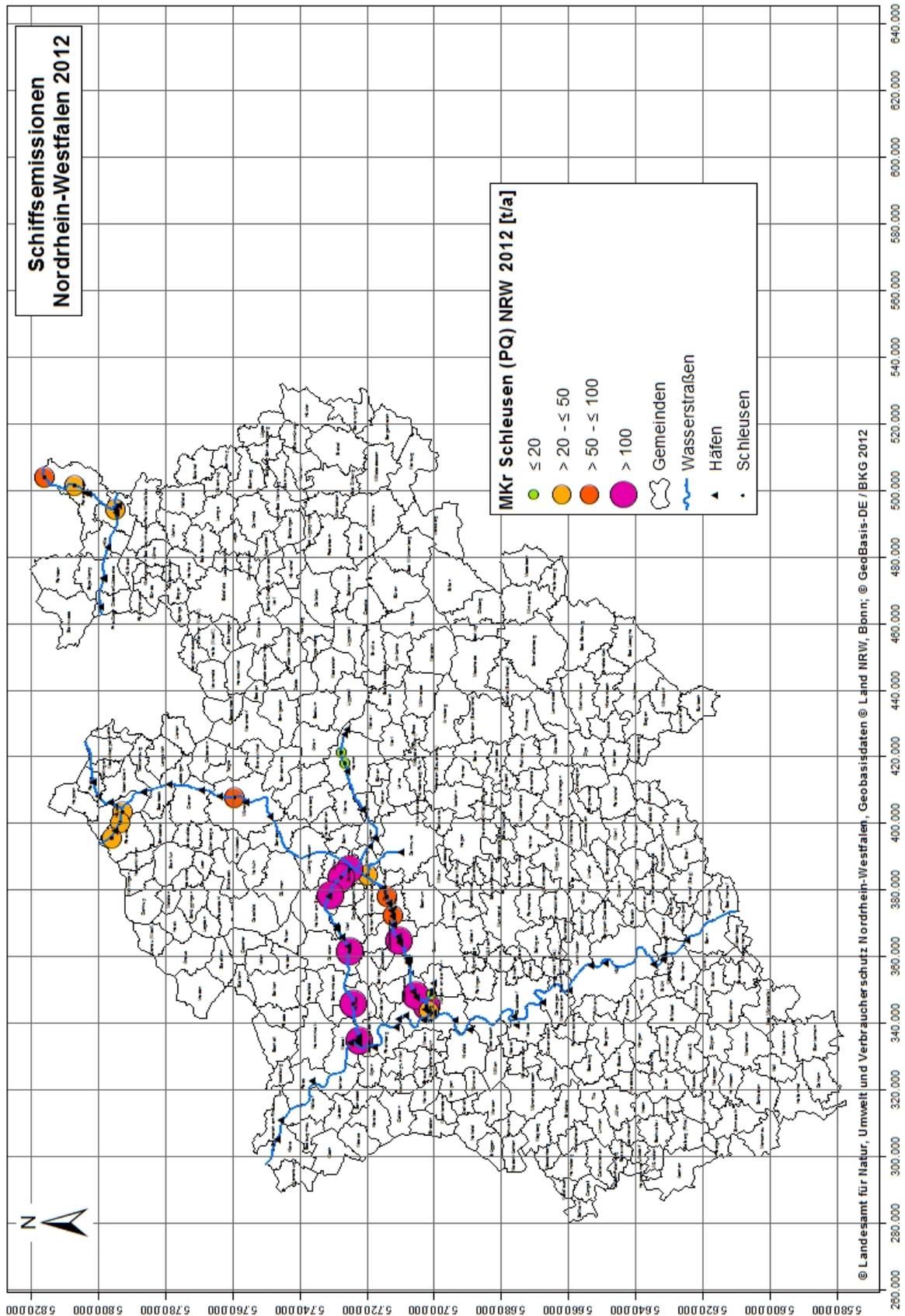


Abb.6.10: Kraftstoffverbrauch im Bereich der Schleusen

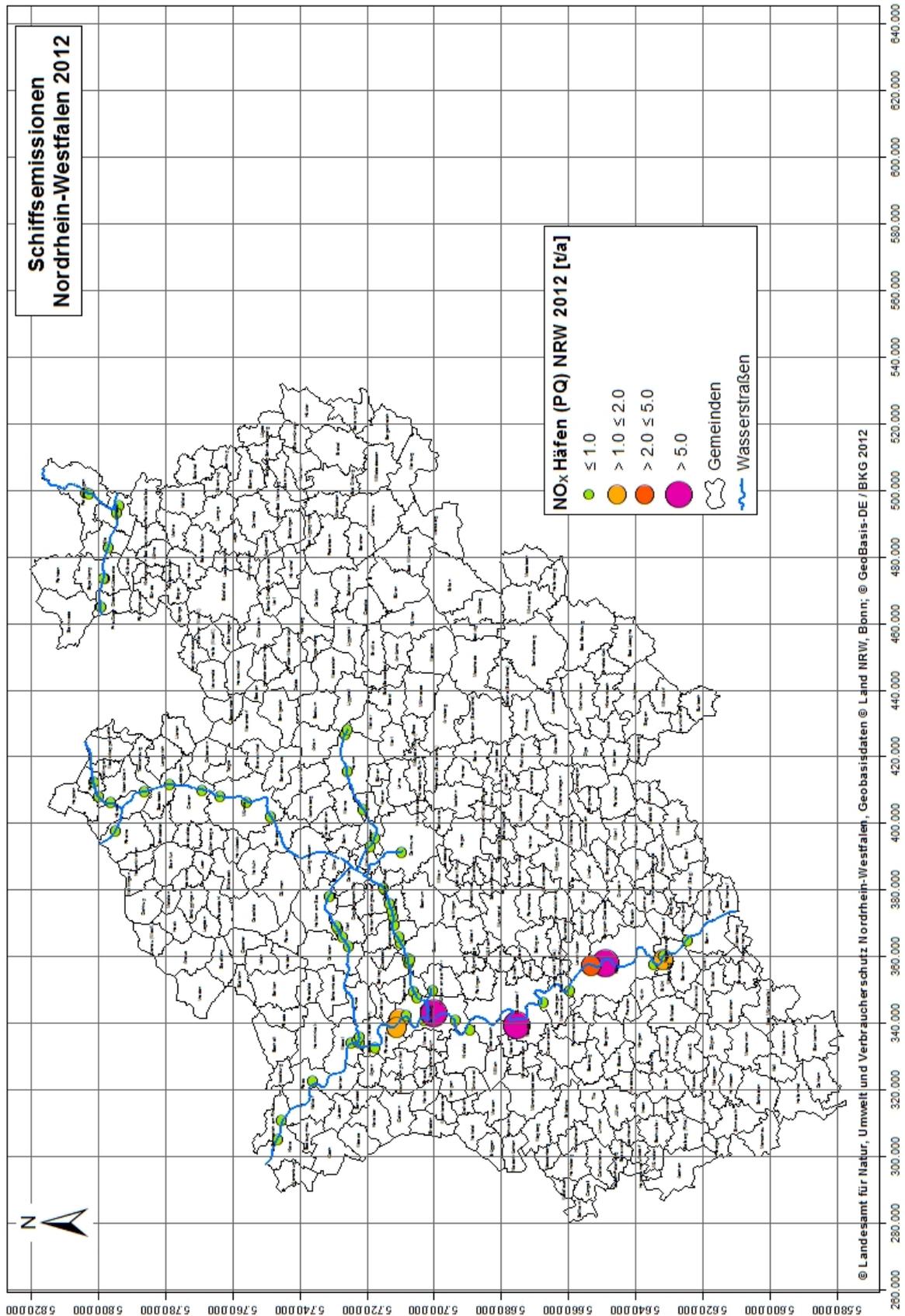


Abb.6.11: NO_x-Emissionen im Bereich der Häfen

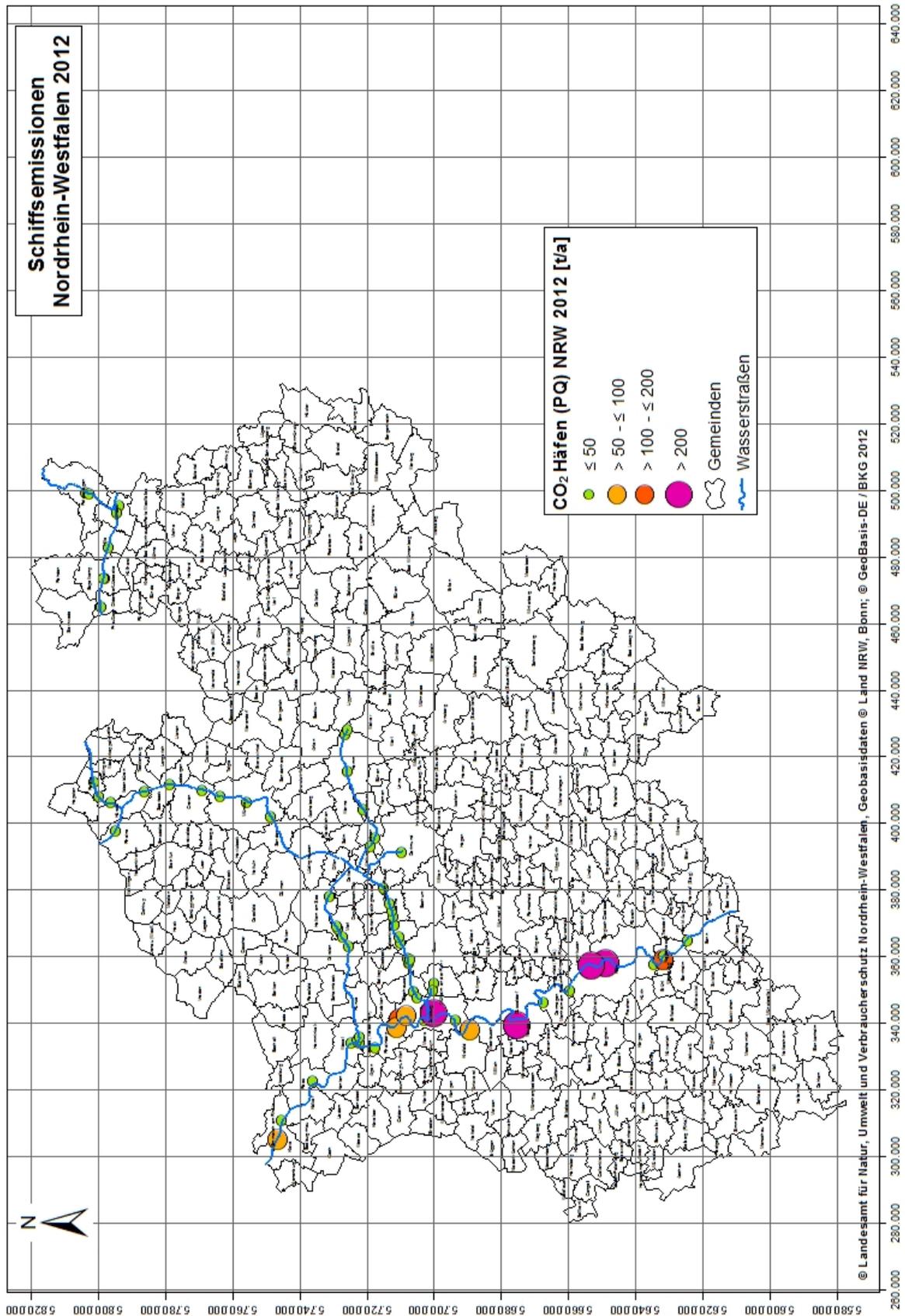


Abb.6.12: CO₂-Emissionen im Bereich der Häfen

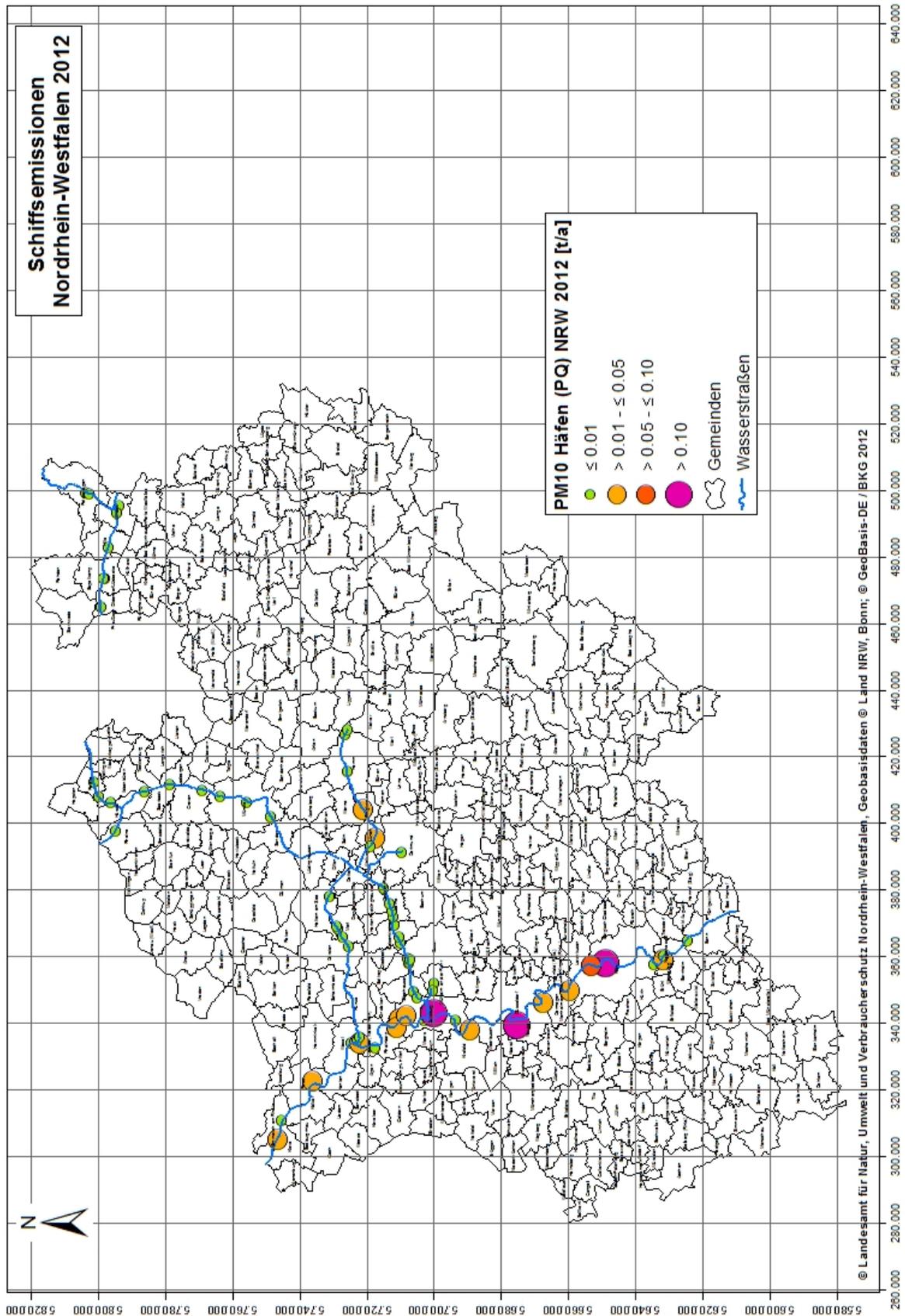


Abb.6.13: PM₁₀-Emissionen im Bereich der Häfen

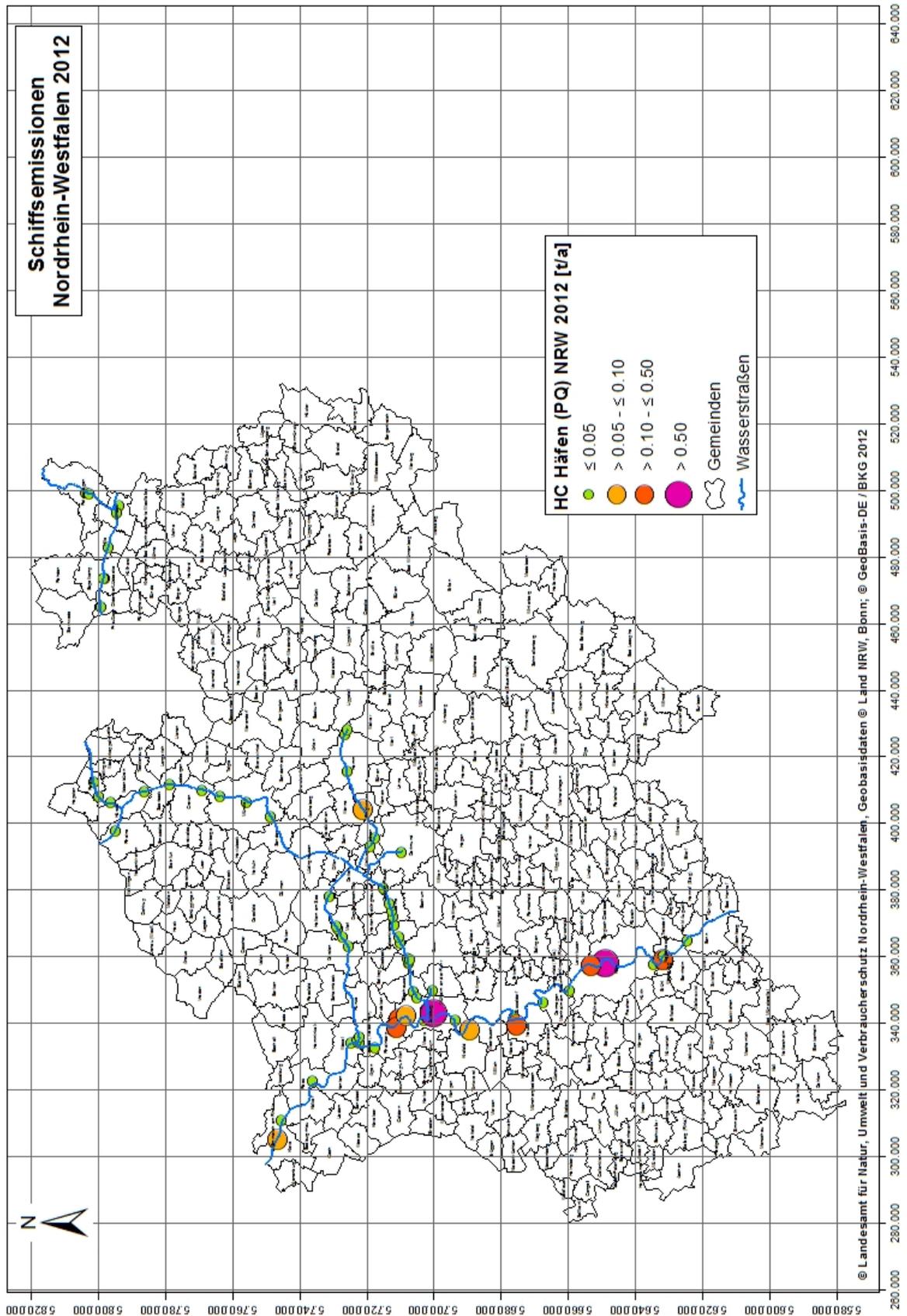


Abb.6.14: HC-Emissionen im Bereich der Häfen

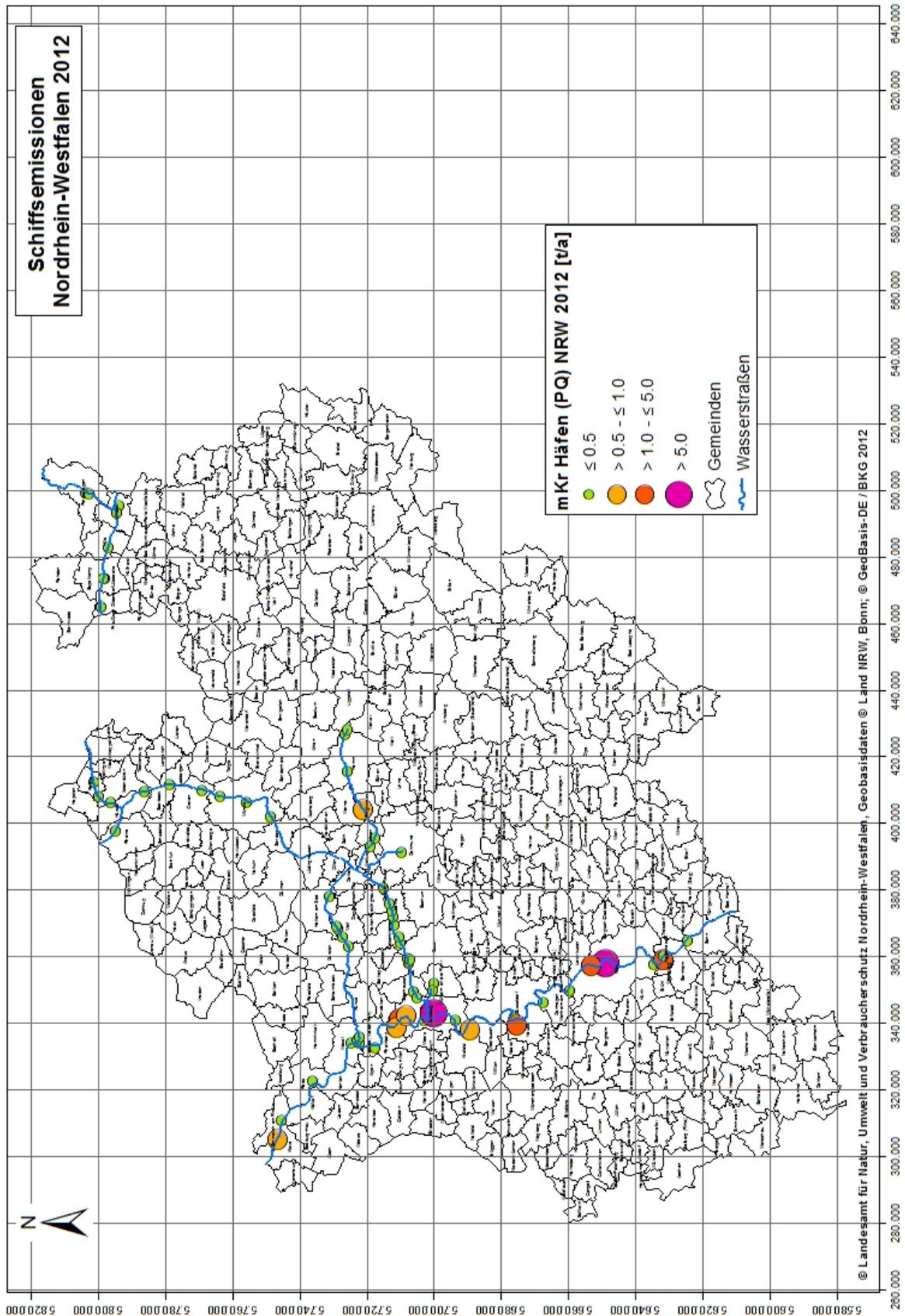


Abb.6.15: Kraftstoffverbrauch im Bereich der Häfen

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

