



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur



Expertennetzwerk
Wissen Können Handeln

Verkehr und Infrastruktur umweltgerecht gestalten

Ergebnisbericht des Themenfeldes 2 im BMVI-Expertennetzwerk für die
Forschungsphase 2016 – 2019



Deutsches Zentrum für
Schienenverkehrsforschung beim



Inhalt

Kurzfassung	11
Executive summary	13
1 Hintergrund und Zielstellung	15
1.1 Herausforderungen	15
1.2 Einordnung in das BMVI-Expertennetzwerk "Wissen – Können – Handeln"	16
2 Themenfeld 2 Verbundforschung 2016 bis 2019 – Forschungsergebnisse	18
2.1 Ökologische Vernetzung zur Förderung der Biodiversität und der strukturellen Lebensraumvielfalt (SPT 201)	18
2.1.1 Motivation	18
2.1.2 Ziele.....	18
2.1.3 Herangehensweise.....	19
2.1.4 Ergebnisse.....	20
2.1.5 Diskussion und Ausblick.....	31
2.1.6 Verwertung der Ergebnisse	35
2.2 Entwicklung praxisorientierter und präventiver Strategien zur Kontrolle und Minimierung der Beeinträchtigung durch Neobiota (SPT 202)	36
2.2.1 Motivation	36
2.2.2 Ziele.....	37
2.2.3 Herangehensweise und Teilprojekte	37
2.2.4 Ergebnisse.....	40
2.2.5 Diskussion und Ausblick.....	46
2.2.6 Verwertung der Ergebnisse	49
2.3 Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser und Boden (SPT 203).....	51
2.3.1 Motivation	51
2.3.2 Ziele.....	51
2.3.3 Herangehensweise und Handlungsfelder.....	52
2.3.4 Ergebnisse.....	57
2.3.5 Diskussion und Ausblick.....	65
2.3.6 Verwertung der Ergebnisse	67
2.4 Bau- und bauwerksbedingte Emissionen/Immissionen in Wasser und Boden (SPT 204).....	68
2.4.1 Motivation	68
2.4.2 Ziele.....	70
2.4.3 Herangehensweise.....	71
2.4.4 Ergebnisse.....	71
2.4.5 Diskussion und Ausblick.....	78
2.4.6 Verwertung der Ergebnisse	81

2.5	Minderungsmöglichkeiten von verkehrsbedingten Geräuschemissionen und Lärmimmissionen in Luft (SPT 205).....	81
2.5.1	Motivation	81
2.5.2	Ziele.....	82
2.5.3	Herangehensweise und Teilprojekte	83
2.5.4	Ergebnisse.....	88
2.5.5	Diskussion und Ausblick.....	97
2.5.6	Verwertung der Ergebnisse	98
3	Fazit und Ausblick	99
3.1	Wesentlicher Erkenntnisgewinn	99
3.2	Offene Forschungsfragen	100
3.3	Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase ab 2020	100
4	Literatur	101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur der Vernetzung innerhalb des BMVI-Expertennetzwerks	16
Abbildung 2: Themenfelder des BMVI-Expertennetzwerks im Kontext der Forschungsstrategie 2030.....	17
Abbildung 3: Untersuchungsräume, in denen umfassende verkehrsträgerübergreifend einheitliche Biodiversitätskartierungen erfolgten. Links: Untersuchungsraum Hildesheim. Mitte: Untersuchungsraum Aschaffenburg. Rechts: Hamburger Hafen (Kartengrundlage: OpenStreetMap).....	19
Abbildung 4: Biotopwertigkeit von Verkehrsnebenflächen und ihrer Begleitlandschaft. Links: Übersichtskarte des Untersuchungsraumes. Die Wertigkeit wurde gutachterlich bestimmt in 500 Meter breiten Korridoren um die Hauptverkehrswege, die einzelnen Biotop entweder den Verkehrsnebenflächen oder der Begleitlandschaft zugeordnet. Rechts: Einstufung der Biotop wurden auf Verkehrsnebenflächen und Begleitlandschaft nach Flächenanteilen. Wertstufe 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch (Kartengrundlage: OpenStreetMap).	22
Abbildung 5: Grenzliniendichte zwischen Biotoptypen als Maß für die strukturelle Lebensraumvielfalt in Abhängigkeit von der Entfernung zu Verkehrswegen (Kartengrundlage: OpenStreetMap).	22
Abbildung 6: Ähnlichkeit der Biotopzusammensetzung an Straßen, Schienen und Wasserstraßen untereinander in Abhängigkeit zur Distanz des Biotops zum Verkehrsweg. Farben vgl. Abbildung 5.	23
Abbildung 7: Ähnlichkeit der Artenzusammensetzung in Probeflächen (Punkte) an Straße (grau), Schiene (braun) und Wasserstraße (blau) bestimmt durch nichtmetrische multidimensionale Skalierung (NMDS).	23
Abbildung 8: Anzahl gemeinsamer und exklusiver Pflanzenarten im Untersuchungsraum Aschaffenburg, die jeweils in mehr als 10 % der Vegetationsaufnahmen nachgewiesen wurden. Links: Arten mit hoher Bedeckung der Flächen, rechts Arten mit geringer Bedeckung der Flächen.....	23
Abbildung 9: Genetische Gruppen der Haselmaus im Untersuchungsraum entlang der BAB 6. Die beiden Hauptgruppen Sachsenheim und Rosenberg unterteilen sich westlich in die Kochertal- (KOC) und Jagsttal-Gruppe (JAG) und östlich in die Schnelldorf- (SCH) und die Feuchtwangen-Gruppe (FEU). SCH beinhaltet straßenferne (AUS) und straßennahe (STR) Populationen (Kartengrundlage: OpenStreetMap).	25
Abbildung 10: Veränderung der Biotoptypenzusammensetzung im Hamburger Hafen zwischen 1985 und 2018. Oben: absolute Flächenanteile in den Jahren 1985 und 2018. Unten: relative prozentuale Veränderung der einzelnen Biotopeneinheiten.	27
Abbildung 11: Geschätzte Populationsgrößen der Haselmaus basierend auf der Fang-Wiederfang-Methode. In der Kategorie "Hecke, straßenfern" konnten aufgrund der geringen Nachweise (N = 14) keine Populationsgrößen kalkuliert werden (Foto: Patrick Jochum, ANUVA Stadt- und Umweltplanung GmbH).	29
Abbildung 12: An einem Isolator der Bahnüberleitung angebrachter "Vogel- und Kleintierabweiser" (Foto: Marion Leiblein-Wild, DZSF/EBA).....	30
Abbildung 13: Fluchtverhalten von adulten und juvenilen Zauneidechsen während der Begehungen im Gelände entlang des untersuchten Streckenabschnitts.	30

Abbildung 14: Anteil der Zuständigkeitsbereiche, in denen die aufgeführten Arten Probleme verursachen. Robinie, Götterbaum, Beifuß-Ambrosie und Sommerflieder wurden von den Teilnehmern der WSV zusätzlich als problemverursachende Arten aufgeführt. Her = Herkulesstaude, Knö = Staudenknöterich, Rob = Robinie, Spr = Indisches Springkraut, Gol = Goldrute, Göt = Götterbaum, Lup = Lupine, Amb = Beifuß-Ambrosie, Top = Topinambur, Som = Sommerflieder, Kar = Kartoffelrose, Gre = Schmalblättriges Greiskraut. Straße: N = 304, Schiene: N = 26, Wasserstraße: N = 96.....	40
Abbildung 15: Prozentualer Anteil der Teilnehmer, die von durch Neobiota verursachten Problemen und/oder Schäden berichten. An der Umfrage "Invasive Arten und ihre Auswirkungen auf Wirtschaft, Gesundheit und Natur" haben insgesamt 292 Personen teilgenommen. Etwa 65% (n=190) der Befragten hatten einen beruflichen Bezug zum Thema Neobiota.....	41
Abbildung 16: Links: Gesamtbewertung des Invasionsrisikos für alle IAS und ausgewählte Artengruppen für die Schiene; rechts: Anzahl der IAS, auf die sich laut Prognosen der Klimawandel positiv, neutral oder negativ auswirkt. k.A. keine Angaben.	41
Abbildung 17: Dichte des vorgefundenen Bioaufwuchses auf 121 untersuchten Sportbooten gemessen in der sechsstufigen Biofouling-Skala nach Floerl et al. (2005). Die Sportboote wurden untersucht in Häfen an Main, Mosel, Main-Donau-Kanal (Binnengewässer (Süßwasser)) und im Ostseeraum (Foto: Mariusz Zabrocki, BSH).....	42
Abbildung 18: Links: Ein Großteil der Binnenschiffe nutzt Ballastwasser im Alltagsbetrieb. Rechts: Ergebnisse aufgeteilt nach Wasserstraße. MLK = Mittellandkanal, RHK = Rhein-Herne-Kanal, WDK = Wesel-Datteln-Kanal.....	43
Abbildung 19: Beispielhafte Simulation der Ausbreitung von <i>Senecio inaequidens</i> durch die Verkehrsträger Straße und Schiene nach 4 Monaten (oben links), 5 Jahren (oben rechts), 10 Jahren (unten links) und 14 Jahren (unten rechts); Pinv = Invasionswahrscheinlichkeit (Kartengrundlage: OpenStreetMap).	44
Abbildung 20: Beispiel für eine Stationskarte von Hamburg mit Zahlen zur invasiven Arten und deren Verteilung auf verschiedene Artengruppen. Diese kann als Grundlage zur Optimierung von Monitoringvorhaben dienen (Kartengrundlage: OpenStreetMap).	45
Abbildung 21: Wirksamkeit der Bekämpfungsmaßnahmen, dargestellt als Anteil der Maßnahmen, die zu einer vollständigen und dauerhaften Beseitigung, zu einer verhinderten oder verlangsamten Ausbreitung führen, nicht erfolgreich sind und bezüglich derer die Wirksamkeit der Maßnahmen von den Teilnehmern nicht abgeschätzt werden konnte oder angegeben wurde (kA). Straße: N = 547, Schiene: N = 56, Wasserstraße: N = 178.....	46
Abbildung 22: Beispiel verkehrsbedingter Abriebpartikel unter dem Rasterelektronenmikroskop mit Röntgenspektroskopie für eine detaillierte chemisch-mineralische Einzelpartikelanalyse (Foto: DWD).	58
Abbildung 23: Exemplarische georeferenzierte Darstellung der Feinstaub und Glyphosat-/AMPA-Emissionen aus dem Messnetz der Bundesländer entlang von Schienenwegen für das Jahr 2016.	60
Abbildung 24: Exemplarische Feinstaubmessungen an einem Bahnübergang (A.) und bei Bautätigkeiten im Eisenbahntunnel bei Schotterverladungen (B.); A: Messabstand zum Gleis 5m; Messhöhe 1,5m; Messstandort Bonn; schwarz: Vorderes Gleis; grau: Hinteres Gleis; GW: Grenzwert; IC: Intercity; GZ: Güterzug; RB: Regionalbahn; RE: Regionalexpress (Foto: DZSF/EBA).....	61

Abbildung 25: Statistische Auswertung von Real-Driving-Emissions eines Großmotorgüterschiffs nach Maximum, oberem Quartil, Median, Mittelwert, unterem Quartil und Minimum der jeweils gemessenen Emissionen.	62
Abbildung 26: Emissionsanteile der Verkehrsträger für 2016 in den drei Ballungsräumen Hamburg, Duisburg und Frankfurt a. M.....	65
Abbildung 27: Schadensfall aus dem Wiederlagerbereich der Borkerstraßenbrücke Nr. 449 am Datteln-Hamm-Kanal mit abgängiger blauer Polyurethandeckbeschichtung (Foto: Roland Baier, BAW).....	69
Abbildung 28: Mit Epoxidharz beschichtete Stahlplatten vor (links) und nach UV-Bewitterung (rechts). Deutlich zu erkennen ist die durch Degradation des organischen Anteils und Freisetzung organischer Pigmente bedingte Farbänderung (Foto: Simon Brand, BfG).....	72
Abbildung 29: Probenahme auf See. Links: Kastengreifer für Sedimentprobenahme, rechts: Kranzwasserschöpfer für Wasserproben (Foto: Torben Kirchgeorg, BSH).....	74
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Quelle-Pfad-Ziel-Schemas für die Ableitung von Emissionsmaximalwerten zur Einhaltung der Immissionswerte am Ort der Beurteilung unter Berücksichtigung einer Übertragungsfunktion.	76
Abbildung 31: Exemplarische Ergebnisse der Stakeholderbefragung zur allgemeinen Einschätzung des Bedarfs und der Anforderungen an ein Informationssystem (ISy) zur Bewertung der Umwelteigenschaften für Baustoffe	78
Abbildung 32: Forschungsziele in SPT 205.....	83
Abbildung 33: Schematische Darstellung des Einflusses von Wind und Temperatur auf die Schallausbreitung.....	86
Abbildung 34: Gebiete mit Dominanz (blau und rot) bzw. Kumulationsgebiete (hellblau, gelb, hellrot) bei sich kreuzenden bzw. parallel verlaufenden Verkehrsführungen der Verkehrsträger Straße und Schiene; aus Eggers et al. (2019).....	89
Abbildung 35: Vergleich der Anteile von tiefen und hohen Tönen an den Geräuschemissionen verschiedener Verkehrsträger.....	90
Abbildung 36: Belästigungskurven der verschiedenen Verkehrsträger nach VDI 3722-2 (gestrichelt) und WHO (durchgezogen); aus Eggers et al. (2019).....	91
Abbildung 37: Erste Stufe des Verfahrens zur Lärminderung bei Kumulation; aus Eggers et al. (2019).....	92
Abbildung 38: Zweite Stufe des Verfahrens zur Lärminderung bei Kumulation; aus Eggers et al. (2019).....	93
Abbildung 39: Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für unterschiedliche Regelwerke; TA 3 bei Mitwind-Bedingungen (links), TA 2 bei schallausbreitungsgünstigen und homogenen Bedingungen (rechts); aus Liepert et al. (2019).....	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht häufiger Biotoptypen (inkl. Kürzel laut BfG-Biotoptypenschlüssel, BfG (2018)) an Verkehrswegen, die für eine verkehrsträgerübergreifende ökologische Vernetzung eine besondere Rolle spielen können	21
Tabelle 2: Häufig auf Verkehrsnebenflächen nachgewiesene Arten mit hohen ($\geq 1\%$) und geringen ($< 1\%$) Flächenanteilen an der Gesamtfläche der Verkehrsnebenflächen des jeweiligen Verkehrsträgers. Häufige Arten mit sehr unterschiedlichen Flächenanteilen an den verschiedenen Verkehrsträgern sind unterstrichen (Vorkommen an zwei Verkehrsträgern) bzw. fett gedruckt (Vorkommen an allen Verkehrsträgern). Gebietsfremde Arten sind mit einem Stern* markiert	24
Tabelle 3: Genetische Differenzierung (F_{ST}) zwischen den verschiedenen Untergruppen, eingeteilt in starke ($F_{ST} > 0,15$), moderate ($F_{ST} 0,14-0,10$) und geringe Differenzierung ($F_{ST} > 0,10$).....	26
Tabelle 4: Übersicht über mittlere gesamte Artenzahlen, mittlere Artenzahlen und Deckung invasiver gebietsfremder Arten und mittlerer Anzahl an Arten mit Schutz- oder Rote-Liste-Status in den einzelnen Untersuchungsflächen (Plots). Unterschieden werden die Plots in zufällig platzierten Transekten in 1, 5, 25 und 125 Meter Entfernung zum Verkehrsweg, sowie folgende Referenzplots: A-Plots (zufällig platzierte verkehrsferne Plots in Vergleichsbiotopen, die Verkehrsnebenflächen ähnlich sind), V-Plots (besonders artenreiche Plots auf Verkehrsnebenflächen) und B-Plots (besonders artenreiche Plots, verkehrsfern). Die Farben beziehen sich auf die Ränge 1 (dunkelgrün) bis 7 (rot) des Wertes in der jeweiligen Spalte.....	28
Tabelle 5: Berechneter Emissionsausstoß von Binnenschiffen über wenige Wochen auf Basis von AIS-Daten in t	63
Tabelle 6: Bestehende Regelwerke/Vorschläge zur Ableitung von Maximalwerten für Emissionen aus Baustoffen.....	77
Tabelle 7: Übersicht der betrachteten Regelwerke zur Beschreibung der Schallausbreitung und der jeweiligen meteorologischen Parameter und Anpassbarkeit. Die Einfärbung der Titel bildet die Einordnung in die oben genannten Cluster (I) , (II) und (III) ab.....	95

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
AIS	Automatic Identification System
Al	Aluminium
AMPA	Aminomethylphosphonsäure
Ba	Barium
BAB	Bundesautobahn
BAG	Bundesamt für Güterverkehr
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BauPVO	(EU-) Bauprodukteverordnung
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BSH	Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BUB	Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen
BUE	Behörde für Umwelt und Energie (Hamburg)
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
BWR	Grundanforderungen an Bauwerke nach EU-Bauprodukteverordnung (englisch "Basic Works Requirements")
BWÜ	Ballastwasser-Übereinkommen
CBD	Convention on Biological Diversity
CEN	Europäisches Komitee für Normung (französisch "Comité Européen de Normalisation")
CEN/TC	CEN Technical Committee
Cd	Cadmium
CDNI	Übereinkommen über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschifffahrt
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CNOSSOS-EU	Common Noise Assessment Methods in Europe
CRTN	Calculation of Road Traffic Noise
Cu	Kupfer
DB	Deutsche Bahn

DEGES	Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DGL	Deutsche Gesellschaft für Limnologie
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoffgehalt (englisch "Dissolved Organic Carbon")
DMS	Dauermessstation
DSLt	Dynamischer Oberflächenauslaugtest (englisch "Dynamic Surface Leaching Test")
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
DWD	Deutscher Wetterdienst
DZSF/EBA	Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt
EC	Ruß (Elemental Carbon)
EP	Epoxid(harz)
EU	Europäische Union
EU-IAS	Verordnung (EU) Nr. 1143/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über die Prävention und das Management der Einbringung und Ausbreitung invasiver gebietsfremder Arten
EU-MSRL	Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie
Fe	Eisen
FFH	Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie, Richtlinie 92/43/EWG
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
g	Gramm
GC/MS	Gaschromatografie mit Massenspektrometrie-Koppelung
GDWS	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
GFS	Geringfügigkeitsschwelle (im Sinne eines Schwellenwerts)
GIS	Geografisches Informationssystem
GrwV	Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung)
HC	Kohlenwasserstoffe
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HELCOM	Helsinki-Kommission für den Schutz der Ostsee
HPA	Hamburg Port Authority
Hz	Herz, Anzahl pro Sekunde
IAS	Invasive gebietsfremde Art oder Arten ("invasive alien species")

ICP-MS	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (englisch "Inductively Coupled Plasma")
IENE	Infra Eco Network Europe
IMO	International Maritime Organization
JHP	Joint Harmonized Procedure
l	Liter
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LC-MS	Flüssigchromatografie-Massenspektrometrie
Lkw	Lastkraftwagen
LoS	"Level of Service" (Verkehrsauslastung)
LuWaS	Programm zur Ermittlung der schiffahrtsbedingten Luftschadstoffbelastung an Wasserstraßen
mg	Milligramm
MSRL	(EU-) Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie
MP	Mikropartikel synthetischer Polymere
MTR	Maximal Tolerierbares Risiko
MVV TB	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen
µg	Mikrogramm
n	Anzahl
NEN	Niederländische Norm
ng	Nanogramm
NIS-DE	Neobiota-Informationssystem Deutschland
NMPB-Routes	Nouvelle Méthode de Prévision du Bruit des Routier
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Summe aus Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid
O ₃	Ozon
OGewV	Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung)
OSPAR	Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PNEC	Predicted No Effect Concentration
Pb	Blei
Pkw	Personenkraftwagen

PM	Staub (allgemein)
PM _x	Feinstaubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als x Mikrometer (µm)
PN	Partikelanzahl
PSM	Pflanzenschutzmittel
PUR	Polyurethan
RLS-90	Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
Sb	Antimon
SO _x	Summe verschiedener Schwefeloxide
SO ₂	Schwefeldioxid
StrÖff	"Strategien zur vorbildlichen Berücksichtigung von Biodiversitätsbelangen auf Flächen der öffentlichen Hand" gemäß Nationaler Strategie zur Biologischen Vielfalt
t	Tonne
TA	Testaufgabe
Ti	Titan
TraVis	Transportmengenvisualisierung
TOF-SIMS	Flugzeit ("Time-of-Flight") - Sekundärionenmassenspektrometrie
TSP	Total Suspended Particles
UAS	"Unmanned Aerial Systems", Drohnen
UV	Ultraviolettstrahlung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WHO	World Health Organization
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie, Richtlinie 2000/60/EG
WSD	Wasser- und Schifffahrtsdirektion
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
Zn	Zink

Kurzfassung

Ein zentrales Element der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland 2018) ist es, Verkehr und Infrastruktur umweltverträglich zu gestalten. Umweltaspekte sind daher ein integraler Bestandteil der Konzeption und Priorisierung von Verkehrs- und Infrastrukturrentscheidungen.

Für das BMVI-Expertennetzwerk wurden im Themenfeld "Verkehr und Infrastruktur umweltgerecht gestalten" (Themenfeld 2) von den mitarbeitenden Vertretern aller beteiligten Verkehrsträger drei Themenkomplexe identifiziert:

1. Erhaltung und Förderung von Biodiversität und Strukturdiversität
2. Bewertung und Minimierung stofflicher und nichtstofflicher Wirkungen
3. Entwicklung nachhaltiger Lösungsansätze

Das Themenfeld 2 leistet umweltbezogene wissenschaftliche Beiträge zur Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie aus der Perspektive Mobilität beziehungsweise zur Nationalen Mobilitätsstrategie aus der Perspektive Nachhaltigkeit und Umwelt. Die Kompetenz der beteiligten Behörden BAG, BAST, BAW, BfG, BSH, DWD und DZSF/EBA wird im Rahmen von fünf Schwerpunktthemen (SPT) vernetzt.

Obwohl thematisch sehr heterogen, hat der verkehrsträgerübergreifende Ansatz bei allen Schwerpunktthemen neue und wichtige Ergebnisse geliefert, die nun in der nächsten Phase des BMVI-Expertennetzwerks (2020-2025) validiert, erweitert und gemeinsam mit den Nutzern in die Praxis umgesetzt werden sollen.

Die im SPT 201 "Ökologische Vernetzung zur Förderung der Biodiversität und der strukturellen Lebensraumvielfalt" vorliegenden Ergebnisse belegen, dass die Verkehrsnebenflächen an Straßen, Schienen und Wasserstraßen Gemeinsamkeiten in der Biotopzusammensetzung und gewisse Ähnlichkeiten in der Zusammensetzung der dort vorkommenden Arten aufweisen und hier somit ein grundsätzliches Potenzial für die verkehrsträgerübergreifende Vernetzung zur Förderung von Biodiversität besteht. Diese Vernetzung gilt für Habitate sowie Tier- und Pflanzenarten gleichermaßen. Der Vergleich der vorhandenen bei den Verkehrsträgern vorliegenden Leitfäden für die Unterhaltung dieser Flächen zeigt, dass es eine Fülle geeigneter Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität gibt, die verkehrsträgerübergreifend angewandt werden können. Ein verkehrsträgerübergreifendes Management, für

dessen Entwicklung nun die Grundlagen geschaffen wurden, kann zukünftig einen wichtigen Beitrag bei der Erfüllung der durch die einschlägigen Konventionen vorgegebenen internationalen Verpflichtungen leisten.

Im Rahmen des SPT 202 "Entwicklung praxisorientierter und präventiver Strategien zur Kontrolle und Minimierung der Beeinträchtigungen durch gebietsfremde Arten (Neobiota)" wurde gezeigt, dass invasive Neobiota potenziell durch alle Verkehrsträger als Vektoren verbreitet werden. Für die Binnenschiffe/Sportboote wurde dies in situ nachgewiesen. Vor allem die Entwicklung des Neobiota-Informationssystems und des Modells zur Einfuhr und Ausbreitung von invasiven Arten entlang der Verkehrsträger sowie eine Methode zur Risikobewertung leisten hier einen wichtigen Beitrag, um bereits präventiv die Einbringung von solchen Arten zu verhindern bzw. zu reduzieren. Umfragen bei den Infrastrukturbetreibern sowie Literaturlauswertungen ergaben ferner eine bereits jetzt vorhandene erhöhte Belastung für die Betriebsdienste der jeweiligen Verkehrsträger infolge des Managements bereits etablierter Neobiota. Diese dürfte sich weiter erhöhen, wenn die Einfuhr und Ausbreitung von invasiven Neobiota nicht präventiv gestoppt bzw. minimiert wird. Die Ergebnisse belegen den dringenden Bedarf, verkehrsträgerübergreifende Maßnahmen für ein effektives und kosteneffizientes Management zu entwickeln. Die Grundlagen hierfür wurden in der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks geschaffen.

Bezüglich der verkehrsträgerübergreifenden Erfassung stofflicher Belastung (Luftschadstoffe, Abrieb) im SPT 203 "Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser, Boden" wurden Detailbetrachtungen in intensiver Zusammenarbeit der nachgeordneten Behörden des BMVI durchgeführt, z. B. durch In-situ-Messungen an einzelnen Verkehrsträgern (Lastkraftwagen (Lkw), Binnenschiffe, Untersuchungen zum Reifenabrieb) sowie durch die verkehrsträgerübergreifende Modellanalyse zu Schadstoffimmissionen in drei Ballungsräumen. Die Zusammenfassung der Ergebnisse zu den verschiedenen Kompartimenten und Handlungsfeldern im SPT 203 stellt eine erste Gesamtbeurteilung der Thematik zu den Emissionen und Immissionen der Verkehrsträger dar.

Die Arbeiten im SPT 204 "Bau- und bauwerksbedingte Emissionen/Immissionen in Wasser und Boden" zeigen, dass aus Korrosionsschutz unter ungünstigen Bedingungen

eludierbare Stoffe und Transformationsprodukte freigesetzt werden können, die im Labortest ökotoxikologische Wirkungen hervorrufen. Durch deren Integration in den Zulassungsprozess werden realistische Aussagen im Vorfeld der Planung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen möglich. Hinsichtlich der Enthaftungsproblematik von Polyurethan-Deckbeschichtungen auf bewitterten Epoxidharz-Zwischenbeschichtungen konnte, mithilfe moderner Analysetechniken, eine weitere Ursache für mögliche Enthaftungen ermittelt werden. Die Zwischenbeschichtung, die oft mehrere Monate der Bewitterung ausgesetzt ist, kann, insofern bei der Bauausführung die üblichen Anforderungen der ZTV-ING 4-3 nicht eingehalten werden, durch UV-Bestrahlung derart verändert werden, dass es zu verminderter Haftung der finalen Deckbeschichtung kommen kann. Die national durchgeführte Stakeholderanalyse bestätigt den Bedarf für eine Rechercheplattform zur Umweltverträglichkeit und Umweltbeständigkeit von Baustoffen. Die Identifizierung der meistverwendeten Baustoffe im Infrastrukturbereich sowie deren Eigenschaften und vor allem deren Beständigkeit unter Umwelteinflüssen bildet eine entscheidende Grundlage für den Aufbau eines Stoffstrominformationssystems für den Infrastrukturbau.

Mit den Untersuchungen im Rahmen des SPT 205 "*Minde- rungsmöglichkeiten von verkehrsbedingten Geräuschemissionen und Lärmimmissionen in Luft*" konnten zwei wichtige Ansatzpunkte für einen umfassenderen und verkehrsträger- übergreifenden Lärmschutz ausgebaut werden. Im Teilprojekt Lärmkumulation wurde mit dem Leitfaden "Verfahren zur Lärminderung bei Kumulation" (Eggers et al., in Vorbereitung) ein praktikables Werkzeug für die Gesamtlärbetrachtung erarbeitet. Es kann nun bei der Umsetzung von Lärmschutzprojekten herangezogen werden, wenn mehr als ein Verursacher zu einer Lärmsituation beiträgt. Auch der im Teilprojekt Lärmwetter erarbeitete Methodenvorschlag zur Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse auf die Schallausbreitung verspricht eine neuartige Hilfestellung, um Diskrepanzen zwischen Berechnungsmodellen und tatsächlicher Lärmbelastung aufzulösen.

Offene Forschungsfragen, die in der nächsten Bearbeitungsphase in Angriff genommen werden, betreffen in SPT 201 insbesondere die Übertragung der Ergebnisse auf zusätzliche Naturräume sowie die Erprobung und Weiterentwicklung des entwickelten Managementkonzepts. Auch werden effizientere Methoden der Biodiversitätserfassung benö-

tigt (Fernerkundung, Genetik, Ökosystemleistungen). In SPT 202 sollen Instrumente zur Früherkennung, Prognose und Verhinderung der Einfuhr und Ausbreitung von invasiven Neobiota weiterentwickelt sowie deren Implementierung im Verkehrsträgerbereich vorangetrieben werden. Für die problematischsten bereits vorhandenen invasiven Arten müssen effektive und effiziente Kontrollmaßnahmen entwickelt und in die Praxis überführt werden. Die Vernetzung und Kooperation mit anderen von invasiven Arten betroffenen Sektoren, Institutionen und den Bundesländern sollen ausgebaut werden. Bezüglich SPT 203 bestehen weiterhin Lücken zu Detailfragen von Emissionen und Konzentrationen feiner und grober Abriebpartikel in den Kompartimenten (z. B. beim Einsatz der neuen lärmarmen Verbundstoffbremssohlen) sowie zu Auswirkungen sich ändernder Einflussfaktoren auf Emissionen und Immissionen, welche geschlossen werden sollen. Darüber hinaus wird für künftige Detailbetrachtungen von Schadstoffmodellierungen der Verkehrsträger eine möglichst genaue und breite Datenbasis benötigt. In SPT 204 werden neben den in Phase 1 verwendeten Baumaterialien (Korrosionsschutzbeschichtungen, galvanische Anoden) verkehrsträgerübergreifend weitere Materialien, wie beispielsweise Betone oder Geotextilien, untersucht, da deren Auswirkungen auf die Umwelt beim Bau, während und nach der Nutzungsphase nicht bekannt sind. Auch die Beständigkeit der Materialien ist unter realen Umweltbedingungen häufig nicht ausreichend belegt. Zu den offen gebliebenen Fragestellungen in SPT 205 zählen neben der Praxiserprobung des erarbeiteten Leitfadens zur Gesamtlärbetrachtung und Maßnahmenfindung auch die Erweiterung des Maßnahmenspektrums um innovative technische Lärmschutzmaßnahmen und nutzerseitige Lärminderungspotenziale. Des Weiteren wurde die Eignung psychoakustischer Parameter und Einflussfaktoren noch nicht untersucht.

Generell sind in der nächsten Phase des BMVI-Experten- netzwerks Arbeiten zur Vertiefung der bisherigen Ergebnisse (weitere Datenerhebungen, Aufbau von Modellen und Informationssystemen etc.) zur Validierung der vorgeschlagenen Maßnahmen sowie zur Überführung derselben in die Praxis geplant. Daneben ist noch Raum für neue Projekte und für die Implementierung innovativer Methoden, die zeigen, dass das BMVI-Expertenetzwerk sich auf dem neuesten Stand der angewandten wissenschaftlichen Forschung befindet.

Executive summary

A key element of the German Sustainable Development Strategy (Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland 2018) is making transport and infrastructure environmentally sustainable. Environmental aspects are thus an integral component of the approach to, and prioritization of, transport and infrastructure decisions.

For the BMVI Network of Experts, the participating representatives of each transport mode identified three subject areas under the topic “Making Transport and Infrastructure Environmentally Sustainable” (Topic 2):

1. Preserve and promote biodiversity and structural diversity
2. Evaluate and minimize material and non-material impacts
3. Develop sustainable approaches to solving transport issues

Topic 2 provides scientific contributions both to the German Sustainable Development Strategy from an environmental and mobility viewpoint as well as to the National Mobility Strategy from the perspective of sustainability and the environment. The expertise of the participating authorities – Federal Office for Goods Transport (BAG), Federal Highway Research Institute (BASt), Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), Federal Institute of Hydrology (BfG), Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH), German Meteorological Service (DWD) and German Centre for Railway Research/Federal Railway Authority (DZSF/EBA) – form five interlinked sub-topics (SPT).

Thematically very diverse, the SPTs cover critical environmental aspects for developing a sustainable future in transport infrastructure. The cross-modal approach has delivered new and important findings in all SPTs, which are now to be validated, extended, and, in collaboration with the users, translated into practice in the next phase of the BMVI Network of Experts (2020-2025).

The findings available in SPT 201 – “*Ecological connectivity to promote biodiversity and structural habitat diversity*” – demonstrate that, areas bordering our roads, railways and waterways, exhibit common features in the composition of biotopes and certain similarities in the local species composition. Thus, there is fundamental potential to promote biodiversity by increasing cross-modal connectivity. This connectivity applies to both habitats and

to faunal and floral species in equal measure. A comparison of existing guidelines from individual modes of transport on verge maintenance shows that there is already a multitude of suitable measures for promoting biodiversity that can be applied across all modes of transport. Cross-modal management, for the development of which the foundations have now been laid, can in the future make a major contribution towards meeting the international obligations set out by the relevant conventions.

Within the scope of SPT 202 – “*Development of practically oriented and preventive strategies for monitoring and minimizing adverse impacts of alien species (neobiota)*” – the results show that invasive neobiota are potentially spread by all modes of transport as vectors. This was demonstrated in situ for both inland commercial shipping and recreational boating. Major contributions towards proactively preventing or reducing the introduction and spread of invasive species have been provided by the development of a neobiota information system, a model for the introduction and spread of invasive species along the transport infrastructure and a method for risk assessment. Furthermore, surveys among infrastructure managers and analyses of the literature revealed that in some cases there are already additional management or maintenance costs to transport agencies resulting from established neobiota. This expenditure is likely to increase further unless the introduction and spread of invasive neobiota is proactively stopped or minimized. The findings demonstrate the urgent need to develop cross-modal measures for effective and cost-efficient management. The foundations for this were laid in the first phase of the BMVI Network of Experts.

With regard to the cross-modal recording of pollution (air pollution, abrasion) caused by traffic in SPT 203 – “*Reducing air, water and soil pollution caused by substances emitted by traffic*” – detailed studies were conducted in close cooperation between the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure’s executive agencies, including in situ measurements on individual modes of transport (heavy goods vehicles (HGVs), inland waterway vessels, studies into tyre abrasion) and cross-modal model analysis on pollutant effects in three conurbations. The findings in SPT 203 represent an initial comprehensive survey of the issues involved in transport mode emissions and immissions.

The activities in SPT 204 – “*Emissions/immissions in water and soil caused by construction and structures*” – show that, in a laboratory test, substances and transformation products elutable from anticorrosive coatings produce ecotoxicological effects. By integrating them into the approval process, it is possible to make realistic statements of its potential impacts ahead of the planning of construction and maintenance works. With regard to the problems associated with the delamination of polyurethane top coats on weathered epoxy resin intermediate coats, it has been possible, with the help of modern analysis techniques, to discover the causes of the delamination. The intermediate coat, which is often exposed to weathering for several months, is transformed by UV radiation such that the final top coat cannot adhere. A stakeholder analysis conducted nationally confirms the need for a research platform to investigate the environmental compatibility and environmental resistance of building materials. Identification of the most-used building materials in the infrastructure sector and their properties, principally their resistance to environmental influences, forms a crucial foundation for the establishment of a substance flow information system for infrastructure construction.

With the studies conducted within the scope of SPT 205 – “*Ways of reducing noise emissions from traffic and noise immissions in the air*” – it was possible to expand two important aspects for more comprehensive and cross-modal noise mitigation. In the “noise accumulation” project, a guideline entitled “Methods for reducing noise in the event of accumulation” (Eggers et al., under preparation) has been developed, providing a practical tool for an overall approach to noise. It can now be used in noise mitigation projects if more than one mode of transport contributes to a noise situation. In the “noise weather” project a methodology has been developed considering the meteorological impacts on the propagation of sound. It promises to provide a new kind of toolkit for resolving discrepancies between calculation models and the actual exposure to noise.

Unresolved research issues that are to be addressed in the next phase of work include, in SPT 201, the transfer of the findings to additional natural environments and the trialling and further development of the proposed management strategy. There is also a need for more

efficient methods of recording biodiversity (remote sensing, genetics, ecosystem services). In SPT 202, instruments for the early detection, forecasting and prevention of the incursion and spread of invasive neobiota are to be developed and their implementation in the field is to be expedited. For the most problematic, already established invasive species, effective and efficient control measures have to be developed and translated into practice. The connectivity and cooperation with other sectors, institutions and federal states, affected by invasive species should be expanded. Regarding SPT 203, there are still gaps concerning details of emissions and concentrations of fine and coarse abraded particles in the compartments (for instance when the new low-noise composite brake blocks are used) and concerning the effects of changing influencing factors on emissions and immissions. These gaps are to be closed. In addition, a data foundation that is as precise and broad as possible is needed for future detailed studies of pollutant modelling methods for the modes of transport. In SPT 204, other materials such as concrete or geotextiles are studied across all transport modes in addition to the building materials used in phase 1 (anti-corrosion coating, galvanic anodes), because little is known about their environmental impact during construction or during and after the service life. In addition, there is frequently insufficient evidence of their durability in real-world environmental conditions.

The unresolved issues in SPT 205 include not only a practical trial of the guidance on overall noise assessment and identification of suitable actions, but also the enhancement of the spectrum of measures to be taken. This includes innovative technological noise mitigation measures and the potential for noise mitigation on the part of the transport users. In addition, the suitability of psychoacoustic parameters and determinants has not yet been studied.

In the next phase of the BMVI Network of Experts, there are general plans for activities to deepen the findings produced so far (further data collection, establishment of models and information systems, etc.) to validate the proposed measures and to translate them into practice. Alongside this, there is still scope for new projects and for the implementation of innovative methods that show how the BMVI Network of Experts is always at the cutting edge of applied scientific research.

1 Hintergrund und Zielstellung

Verkehr und Verkehrsinfrastruktur sind Grundvoraussetzungen für wirtschaftliche Stärke und Mobilität. Dem zunehmenden Bedürfnis von Bevölkerung und Wirtschaft nach Mobilität trägt der Staat durch vielfältige Verkehrsangebote und eine leistungsfähige Infrastruktur Rechnung. Ein zentrales Element der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie ist es, Verkehr und Infrastruktur umweltverträglich zu gestalten. Umweltaspekte sind daher ein integraler Bestandteil der Konzeption und Priorisierung von Verkehrs- und Infrastrukturentscheidungen. Der grundlegende Zusammenhang von Verkehr, Infrastruktur und Umwelt wird durch europäische Rahmenseetzungen, internationale Konventionen sowie nationale Gesetze, Regelwerke und Strategien untermauert.

1.1 Herausforderungen

Eine besondere Herausforderung bei der Realisierung einer nachhaltigen Verkehrsentwicklung ist die Berücksichtigung des Zusammenwirkens verschiedener Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasserstraße, Luftverkehr) in einem übergreifenden Konzept. Die Belange der einzelnen Verkehrsträger fordern zunächst eine gesonderte Betrachtung, da sie in Bezug auf die Wirkmechanismen und Störungsfaktoren (z. B. Landschaftsfragmentierung, Schadstoffemission, Lärm) unterschiedlich zur Gesamtbelastung für Mensch und Umwelt beitragen. Da sie letztlich jedoch in ihrer Gesamtheit auf das Ökosystem einwirken, ist für die Gewährleistung einer möglichst umweltgerechten Infrastrukturentwicklung auch eine Gesamtbetrachtung erforderlich. Durch die Zusammenschau der Ökosystemfunktionalitäten einerseits und der gesamten Verkehrsinfrastruktur als Einflussgröße andererseits können Entscheidungen zur Minimierung negativer und zur Förderung positiver Einflüsse besser priorisiert und damit zielführender getroffen werden.

Für das Themenfeld 2 des BMVI-Expertennetzwerks wurden zu Beginn drei Themenkomplexe identifiziert:

1. Erhaltung und Förderung von Biodiversität und Strukturdiversität
2. Bewertung und Minimierung stofflicher und nicht-stofflicher Wirkungen
3. Entwicklung nachhaltiger Lösungsansätze

Das Themenfeld 2 leistet umweltbezogene wissenschaftliche Beiträge zur Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie aus der Perspektive Mobilität beziehungsweise zur Nationalen Mobilitätsstrategie aus der Perspektive Nachhaltigkeit und Umwelt. Die Kompetenz der beteiligten Behörden BAG, BASt, BAW, BfG, BSH, DWD und DZSF/EBA wird im Rahmen von fünf Schwerpunktthemen (SPT) vernetzt.

Der Verkehr trennt und verbindet Lebensräume und fördert oder erschwert die Ausbreitung von Organismen. Unter diesem Aspekt werden zwei zentrale Problemstellungen der biologischen Vielfalt in ihrer Wechselwirkung mit Mobilität behandelt: zum einen die Bedeutung von Infrastruktureinrichtungen für den Erhalt und die Förderung von Biodiversität (SPT 201); zum anderen die Einschleppung und Verbreitung von gebietsfremden Arten (Neobiota), zu der alle Verkehrsträger beitragen (SPT 202). Intelligente Vernetzung und verkehrsübergreifendes Management von Verkehrsnebenflächen sowie die Minimierung des Eintrags von gebietsfremden Arten sollen die Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2007) und damit die Umsetzung der Internationalen Konvention zur Biologischen Vielfalt (CBD) unterstützen.

Die Rolle von Verkehr und Verkehrsinfrastruktur als Quelle für stoffliche (z. B. Schadstoffe) und nichtstoffliche (z. B. Lärm) Belastungen der Umwelt, werden ebenfalls in Themenfeld 2 adressiert. Die qualitative Beeinträchtigung des natürlichen Lebensraums von Menschen, Tieren und Pflanzen hängen unter anderem mit der Belastung durch Emissionen und Immissionen zusammen. Dieser Aspekt schließt die Identifizierung, Charakterisierung, Risikobewertung und Bilanzierung von verkehrsbedingten (SPT 203 und SPT 205) und infrastrukturbedingten (SPT 204) Einträgen in die Umwelt ein. Ferner wird der kurz-, mittel- und langfristige Einfluss von Verkehr und Infrastruktur auf natürliche Stoffkreisläufe betrachtet. Zum Schutz der Ökosysteme sind Lösungen zu entwickeln, die möglichst geringe Auswirkungen auf natürliche Stoffkreisläufe und anthropogene Klimaänderungen haben, z. B. in der Atmosphäre, im Gewässernetz, im System Gewässer/Boden oder im urbanen Raum.

Ziel der Arbeiten sind verkehrsträgerübergreifende Konzepte zur Bewertung und Minimierung der Beeinträch-

tigung von Umwelt und Mensch durch verkehrs- und bauwerksbedingte Faktoren und damit Beiträge für eine nachhaltige Entwicklung der Mobilität.

1.2 Einordnung in das BMVI-Expertennetzwerk "Wissen – Können – Handeln"

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) hat im Jahr 2016 die Gründung des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln veranlasst, um das Zusammenwirken seiner Ressortforschungseinrichtungen und Behörden hinsichtlich verkehrsträgerübergreifender Forschung zu fördern. Erstmals wurde damit in der Ressortforschung ein verkehrsträgerübergreifendes Forschungsnetzwerk entwickelt, erprobt und etabliert.

Im BMVI-Expertennetzwerk forschen das Bundesamt für Güterverkehr (BAG), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), der Deutsche Wetterdienst (DWD) und das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (DZSF/EBA) zusammen. Mehr als 70 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit unterschiedlichen Kompetenzen forschen vernetzt und transdisziplinär, um Lösungsansätze zu zukunftsorientierten Fragestellungen rund um das Verkehrssystem zu erarbeiten. Dabei sind die Forscherinnen

und Forscher in die Behörden eingebettet und werden dort fachlich und organisatorisch unterstützt. Die Abstimmung zu den Forschungsinhalten und den organisatorischen Abläufen erfolgt zwischen BMVI, Bundesoberbehörden und Expertinnen und Experten (Abbildung 1). Dadurch wird eine praxisorientierte fachwissenschaftliche Beratung des BMVI sichergestellt.

Der Forschungsprozess wird darüber hinaus von kontinuierlicher Interaktion mit Anwenderinnen und Anwendern begleitet, z. B. mit den Landesstraßenbaubehörden, der Deutschen Bahn AG und der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Dieser Praxisbezug ermöglicht die zielgerichtete Entwicklung von anwendungsorientierten Innovationen.

Die Vision des BMVI-Expertennetzwerks ist es, das Verkehrssystem resilient und umweltgerecht zu gestalten. Das BMVI-Expertennetzwerk stellt hierfür wissenschaftlich fundierte Grundlagen bereit. In diesem neuen Forschungsformat in der Ressortforschung wurden verkehrsträgerübergreifende Ziele definiert und in der Forschungsstrategie 2030 festgehalten (BMVI-Expertennetzwerk 2018). Dieser strategische Forschungsrahmen beschreibt den Umgang des BMVI-Expertennetzwerks mit Herausforderungen wie Klimawandel, Umweltschutz, Alterung der Infrastruktur sowie Digitalisierung und zeigt den Weg auf, wie die Vision schrittweise erreicht werden kann (Abbildung 2).

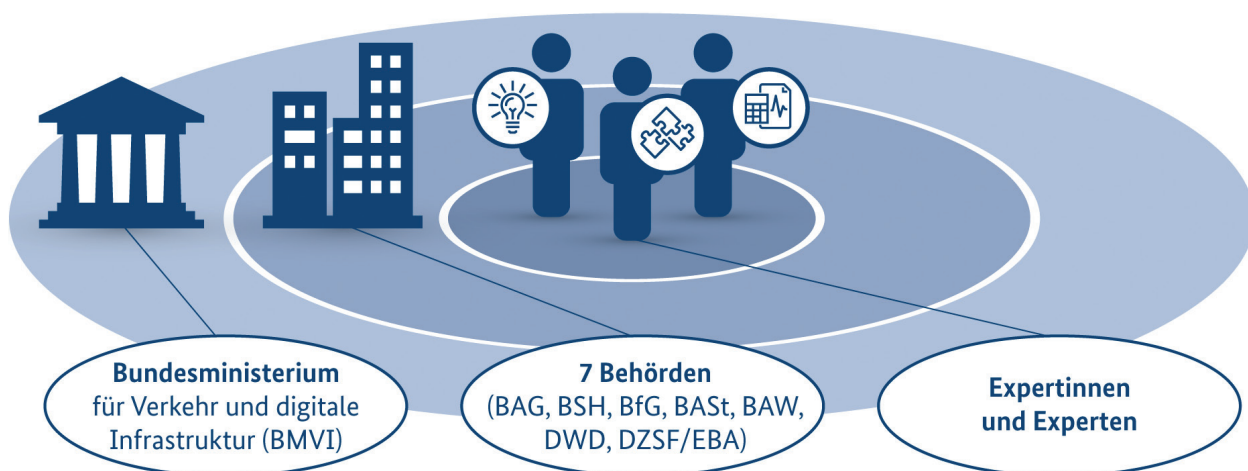


Abbildung 1: Struktur der Vernetzung innerhalb des BMVI-Expertennetzwerks.

FORSCHUNGSSTRATEGIE 2030

Das Verkehrssystem resilient und umweltgerecht gestalten



Abbildung 2: Themenfelder des BMVI-Expertennetzwerks im Kontext der Forschungsstrategie 2030.

Zur Gewährleistung einer effizienten Bearbeitung der wissenschaftlichen Fragestellungen wurde die Forschung in Themenfelder gegliedert (Abbildung 2). Die Arbeiten in den Themenfelder 1 bis 3 wurden bereits 2016 aufgenommen. Die Themenfelder 4 und 5 wurden in Form von Pilotprojekten ab 2017 bearbeitet. 2019 wurde das Themenfeld 6 etabliert. Die sechs Themenfelder des BMVI-Expertennetzwerks ergänzen sich inhaltlich und schaffen Grundlagen, um die Forschungsstrategie 2030 im Dialog mit Anwenderinnen und Anwendern erfolgreich umsetzen zu können.

Vorliegender Bericht stellt die Ergebnisse des Themenfeldes 2 aus der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks (2016–2019) dar. Die Forschungsergebnisse wurden unter Koordination durch die BfG von dem BAG, der BfG, der BAST, der BAW, dem BSH, dem DWD, dem DZSF/EBA und in Kooperation mit der DFS Deutschen Flugsicherung GmbH gemeinschaftlich erarbeitet.

2 Themenfeld 2 Verbundforschung 2016 bis 2019 - Forschungsergebnisse

2.1 Ökologische Vernetzung zur Förderung der Biodiversität und der strukturellen Lebensraumvielfalt (SPT 201)

Dr. Pia Bartels (BASt), Dr. Daniel Esser (BfG), Dr. Marion Leiblein-Wild (DZSF/EBA), Dr. Andreas Sundermeier (BfG, SPT-Koordinator), mit Beiträgen von Dr. Karl-Otto Nagel (BASt)

2.1.1 Motivation

Biodiversität, das heißt die Vielfalt an Ökosystemen, Arten und Genen, ist Träger des natürlichen Stoffkreislaufes und als solche von existenzieller Bedeutung als Lebensgrundlage für den Menschen und seine Umwelt (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2007). Der Erhalt der Funktions- und Regenerationsfähigkeit des Naturhaushalts sowie die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen sind deshalb zentrale Ziele des Naturschutzes in Deutschland. Die Berücksichtigung von Biodiversitätsbelangen spielt somit im täglichen Handeln der Bundesverwaltung, durch ihre gesellschaftliche Vorbildfunktion, eine besonders wichtige Rolle (Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland 2016) und ist auch, z. B. für die Bewirtschaftung von Bundesliegenschaften, gesetzlich vorgeschrieben (§2, Abs. 4, BNatSchG).

Die das Verkehrswegenetz begleitenden Grünflächen bedecken laut einer Schätzung mindestens 3 % der Gesamtfläche der Bundesrepublik (Reck & Müller 2018) und bergen, auch ob ihrer bundesweit durchgehenden Vernetztheit und dem nur geringen Nutzungsdruck, ein entsprechend hohes Potenzial zum Erhalt und zur Vernetzung der biologischen Vielfalt in Deutschland. Obwohl die biologische Vielfalt an Verkehrswegen, insbesondere an Straßen, gut untersucht ist, herrscht weiterhin Unklarheit darüber, welche Rolle die Verkehrs- und ihre Begleitflächen *verkehrsträgerübergreifend*¹ beim Erhalt und der Vernetzung der Biodiversität spielen und welche Maßnahmen zu ihrer Förderung unternommen werden können.

¹ Im Schwerpunktthema 201 (dieses Kapitel 2.1) meint verkehrsträgerübergreifend, so nicht weiter spezifiziert, Bundesfernstraßen, Schienenwege und Bundeswasserstraßen.

2.1.2 Ziele

Das Schwerpunktthema 201 "Biodiversität" untersucht die Rolle, welche Verkehrsnebenflächen² an Straßen, Schienen und Wasserstraßen für den Erhalt und die ökologische Vernetzung der biologischen Vielfalt spielen und welche Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität im Rahmen der Anlage und Unterhaltung der Verkehrswege möglich sind. Hierbei steht die Betrachtung der Verkehrsnebenflächen als Lebensraumnetz in der Landschaft im Allgemeinen und ihre Betrachtung als Lebensraum für geschützte oder planungsrelevante Arten im Speziellen im Vordergrund. Langfristig verfolgt das Schwerpunktthema die Entwicklung und Etablierung eines verkehrsträgerübergreifenden Managementkonzepts von Verkehrsnebenflächen zur Förderung der Biodiversität und strukturellen Lebensraumvielfalt.

Gemäß der Roadmap 2030 des Themenfeldes 2 (BMVI-Expertenetzwerk 2018) wurden für das Schwerpunktthema "Biodiversität" folgende Ziele bis 2020 festgelegt:

- I. Erfassung der ökologischen Wertigkeit von Verkehrsnebenflächen anhand von Untersuchungen in repräsentativen Beispielgebieten unterschiedlicher Verkehrsstruktur
- II. Ableitung allgemeingültiger Aussagen aus Ergebnissen der Beispielräume
- III. Entwicklung eines Managementkonzepts zur verkehrsträgerübergreifenden Vernetzung mit dem Ziel der Förderung der Biodiversität und strukturellen Lebensraumvielfalt von Verkehrsnebenflächen

Die hierfür erforderliche Wissensgrundlage wurde in mehreren Teilprojekten erarbeitet.

² Verkehrsnebenflächen sind alle diejenigen Flächen der Verkehrsinfrastruktur, die nicht unmittelbar als Fahrweg genutzt werden. Im vorliegenden Bericht bezieht sich der Begriff vor allem auf das Begleitgrün entlang der Verkehrswege, aber auch auf Hafen- und sonstige Warenumschlagsflächen, ungenutzte Gleisabschnitte oder Schleusenanlagen. Ausgeschlossen werden in der Regel sonstige Betriebsflächen wie Bau- und Betriebshöfe.

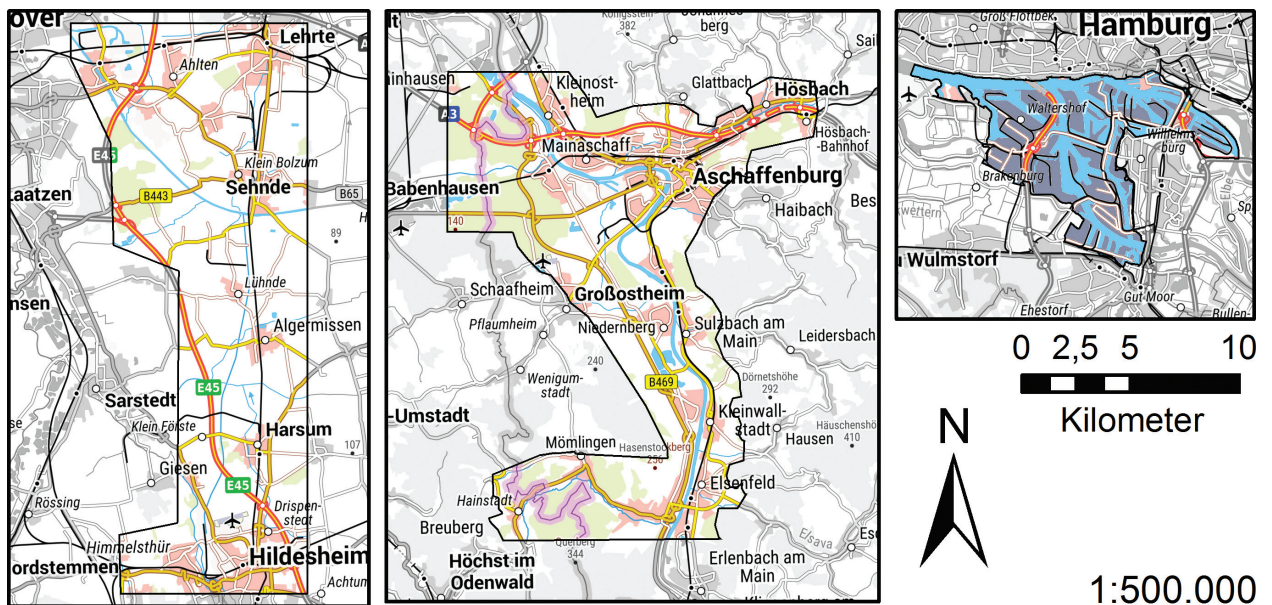


Abbildung 3: Untersuchungsräume, in denen umfassende verkehrsträgerübergreifend einheitliche Biodiversitätskartierungen erfolgten. Links: Untersuchungsraum Hildesheim. Mitte: Untersuchungsraum Aschaffenburg. Rechts: Hamburger Hafen (Kartengrundlage: OpenStreetMap).

2.1.3 Herangehensweise

Die Bearbeitung der verschiedenen Themen erfolgte im SPT 201 in enger Zusammenarbeit und Kooperation zwischen den beteiligten Behörden (BASt, BfG, BSH, DZSF/EBA) und dem SPT 202 (Abschnitt 2.2). Insgesamt wurden die folgenden Handlungsfelder bearbeitet:

2.1.3.1 Handlungsfeld 1

Verkehrsträgerübergreifende Aussagen zum ökologischen Potenzial von Verkehrsnebenflächen erfordern unter einem einheitlichen Beprobungsschema erhobene Daten zur Biodiversität, welche bisher nicht aus einem einheitlichen Untersuchungsraum vorlagen. Deshalb wurden umfassende Biodiversitätsuntersuchungen in zwei ca. 20.000 ha großen Untersuchungsräumen (Abbildung 3) bei Aschaffenburg (einer landschaftlich strukturreichen Mittelgebirgsregion) und Hildesheim (einer landschaftlich strukturarmeren Börderegion) beauftragt und unter Aspekten der Lebensraumfunktion und -vernetzung analysiert. Die Untersuchungen in Hildesheim sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch nicht abgeschlossen (Laufzeit bis März 2021), weshalb die Ergebnisse erst zu einem spä-

teren Zeitpunkt präsentiert werden. Im Hamburger Hafen wurden zudem umfassende Biodiversitätsstudien initiiert, um die kollektive Bedeutung der hier eng verzahnten Verkehrssträger für die Biodiversität zu erfassen.

2.1.3.2 Handlungsfeld 2

Um das Potenzial von Verkehrsnebenflächen als Lebensraum und zur Vernetzung zu beurteilen, wurden drei Tierarten auf Straßennebenflächen exemplarisch untersucht: die Haselmaus als eine planungsrelevante FFH-Art des Anhang IV³, die Mönchsgrasmücke als ein Heckenbrutvogel mit vergleichsweise kleinem Aktionsradius und der Hauhechel-Bläuling als ein Vertreter der flugfähigen Insekten, der zwar nicht unter Schutz steht, dessen Bestand aber seit einiger Zeit rückläufig ist. Ökologische und populationsrelevante Parameter wurden auf Straßennebenflächen mit vergleichbaren (verkehrsfernen) Lebensräumen verglichen: einem ca. 47 km langer Abschnitt der BAB 6 (Baden-Württemberg/Bayern) für Haselmaus und Mönchsgrasmücke

³ Dies sind die durch die Richtlinie 92/43/EWG als europaweit gefährdet anerkannten Arten, welche nicht in fest umgrenzten (Schutz-) Gebieten geschützt werden können.

und entlang der Kreisstraße 2576 (Baden-Württemberg) für den Hauhechel-Bläuling. Für Haselmaus und Mönchsgasmücke wurden Hecken- und Waldrandhabitats in jeweils straßennahen und -fernen Standorten unterschieden, während der Hauhechel-Bläuling auf straßennahen und -fernen Magerrasenstandorten untersucht wurde. Exemplarisch für diese Arten wurden auch Hinweise auf eine indirekte Fallenwirkung⁴ von Verkehrsnebenflächen untersucht. Für Haselmäuse und den Tagfalter wurden genetische Methoden erprobt, welche in Zukunft schnelle und kostengünstige Aussagen zur Populationsvernetzung entlang von Verkehrswegen ermöglichen sollen.

2.1.3.3 Handlungsfeld 3

Spezielle Fragestellungen zur Biodiversitätsförderung und zur Vermeidung von negativen Auswirkungen durch Anlage und Unterhaltung der Verkehrsinfrastruktur wurden in mehreren Teilprojekten bearbeitet. Ziel war es hierbei, eine solide Datengrundlage hinsichtlich noch offener Fragen zu geschützten Arten zu schaffen, um eine erhöhte Planungs- und Rechtssicherheit auf Seiten der Betreiber bei Instandhaltung und Nachrüstung herzustellen. So wurde die Auswirkung einer Streckeninstandhaltung (Schotterreinigung durch Bettungsreinigungsmaschine) auf im Gleisbereich vorkommende streng geschützte Zauneidechsenpopulationen untersucht. Ebenso wurde eine Evaluierung der Wirksamkeit von Vogelschutzeinrichtungen an Oberleitungsmasten der Bahn initiiert. Ein Vergleich der verschiedenen an Straßen, Schienen und Bundeswasserstraßen gültigen Leitfäden zur Grünpflege dient gemeinsam mit den Ergebnissen aus den anderen Teilprojekten als Grundlage zur Entwicklung des verkehrsträgerübergreifenden Managementkonzepts zur Förderung der Biodiversität auf Verkehrsnebenflächen.

⁴ Von indirekter Fallenwirkung spricht man, wenn eine Attraktionswirkung von Lebensräumen und eine negative Wirkung (z. B. erhöhte Mortalität) zusammen auf die lokale Population einer Tierart Einfluss nehmen.

2.1.3.4 Handlungsfeld 4

Da gebietsfremde Arten großen Anteil an der heimischen Biodiversität tragen, war eine enge Zusammenarbeit mit dem Schwerpunktthema 202 "Neobiota" möglich. Besonders enge Überschneidungen ergaben sich insbesondere bei den Biodiversitätsuntersuchungen in den Untersuchungsräumen Aschaffenburg und Hildesheim, sodass die Ergebnisse hierzu im Rahmen des vorliegenden Kapitels behandelt werden.

2.1.4 Ergebnisse

2.1.4.1 Verkehrsnebenflächen als Lebensraumnetz in der Landschaft

In den Untersuchungsräumen Aschaffenburg und Hildesheim wurden jeweils Biotoptypenkartierungen für das Gesamtgebiet (Maßstab 1:10.000) durchgeführt, welche durch stichprobenartige Feinkartierungen im Maßstab 1:500 entlang der Verkehrswege ergänzt wurden. Um auch sehr genaue Informationen über die Biotopentwicklung vom Verkehrsweg in die Normallandschaft hinein zu erhalten, wurden zudem Biotoptypen entlang von 72 Transekten von 125 Metern Länge im Maßstab 1:100 kartiert. Es wurden 14 Biotoptypen identifiziert, welche an allen drei Verkehrsträgern häufig anzutreffen sind und somit das größte verkehrsträgerübergreifende Vernetzungspotenzial tragen. Hinzu kommen 12 Biotoptypen, welche an zwei der drei Verkehrsträger regelmäßig anzutreffen sind (Tabelle 1).

Die linearen Eigenschaften der Verkehrsnebenflächen entlang der Verkehrsträger schaffen viele Saum- und Staudenstrukturen (Biotoptypen deren Kürzel in Tabelle 1 mit OU beginnen), die in der Normallandschaft nur relativ selten sind. Vor allem das häufige Vorkommen von Feldgehölzen und Hecken (Kürzel beginnend mit WG), extensiv bis mäßig intensiv bewirtschaftetem Grünland (Kürzel beginnend mit OTG) und die verschiedenen Saumstrukturen an allen drei Verkehrsträgern verdeutlichen, dass ein grundsätzliches verkehrsträgerübergreifendes, ökologisches Vernetzungspotenzial gegeben ist.

Tabelle 1: Übersicht häufiger Biotoptypen (inkl. Kürzel laut BfG-Biotoptypenschlüssel, BfG (2018)) an Verkehrswegen, welche für eine verkehrsträgerübergreifende ökologische Vernetzung eine besondere Rolle spielen können.

Biotoptypen, welche an allen drei Verkehrsträgern häufig auftreten			
OTGE1	artenarme, extensiv bis mäßig intensiv bewirtschaftete frische Mähwiese	WGFhF2	Feldgehölz frischer Standorte, strukturarm
OAASa3	konventionell intensiv bewirtschafteter Acker auf Sandboden	WGHhR22	Hecke auf ebenerdigen Rainen oder Böschungen frischer Standorte, mit Baumüberstand
OTGP1	artenreiche, frische Mähwiese der planaren bis submontanen Stufe	YVS2	versiegelte, einspurige Straße (auch gepflasterte Straße)
WGFnF32	Feldgehölz mit Robinie, strukturarm	WVGB11	Brombeergestrüpp auf kalkarmem Untergrund, nicht verbuscht
WGGhF	Gebüsch frischer Standorte	YVW4	geschotterter Weg
OUSA21	krautiger Saum kalkarmer, nährstoffarmer bis mäßig nährstoffreicher, feuchter bis frischer Standorte	WGRG11	Baumgruppe aus überwiegend einheimischen Baumarten, sehr alter Baumbestand oder struktureicher Bestand
OURF22	frischer Ruderalstandort mit dichter, meist ausdauernder Vegetation, krautreich	WGR	Einzelbäume, Baumreihen und Baumgruppen
Biotoptypen, welche an zwei der drei Verkehrsträger häufig auftreten			
WGFhF1	Feldgehölz frischer Standorte, strukturreich	OURF21	frischer Ruderalstandort mit dichter, meist ausdauernder Vegetation, grasreich
OUSR2	krautiger Saum nährstoffreicher, feuchter bis frischer Standorte	OABSa	Ackerbrache auf Sandboden
OAAL3	konventionell intensiv bewirtschafteter Acker auf Löß-, Lehm- oder Tonboden	WGO21	Streuobstbestand aus Bäumen mittleren Alters mit extensiv genutztem Grünland im Unterwuchs
YVW1	versiegelter Weg	YVW6	unbefestigter Weg
WGFnF31	Feldgehölz mit Robinie, strukturreich	OUSR32	krautige Flur nährstoffreicher, feuchter bis frischer Standorte, von Brennessel dominiert
OURF23	frischer Ruderalstandort mit dichter, meist ausdauernder Vegetation, verbuscht	OTHSM1	weitgehend unverbuschte submediterrane Halbtrockenrasen auf silikatischem Boden, gemäht

Da diese Biotoptypen in der Normallandschaft teils nur eine untergeordnete Rolle spielen, besitzen die Verkehrsnebenflächen zudem einen gewissen ökologischen Wert. Dieser zeigte sich auch bei der Betrachtung der relativen Häufigkeit der vergebenen ökologischen Wertstufen auf Verkehrsnebenflächen im Vergleich zur umgebenden Normallandschaft (Abbildung 4). So zeigten in den Verkehrsnebenflächen die Biotoptypen mittlerer Wertigkeit (3) die größte relative Häufigkeit, während in der sie begleiten-

den Normallandschaft (Begleitlandschaft) die Wertstufe 2 (geringer Wert) die höchsten Flächenanteile belegte. In den Feinkartierungen 1:500, in denen auch sehr schmal-lineare Verkehrsnebenflächen kartiert und bewertet wurden, relativierte sich dieser Unterschied, sodass sich die tendenziell höhere Wertigkeit der Verkehrsnebenflächen im Vergleich zur Begleitlandschaft auf solche Flächen von mehr als 10 Meter Breite beschränkt. Eine besondere Rolle spielten hierbei zudem die Auwaldgebiete entlang des Mains.

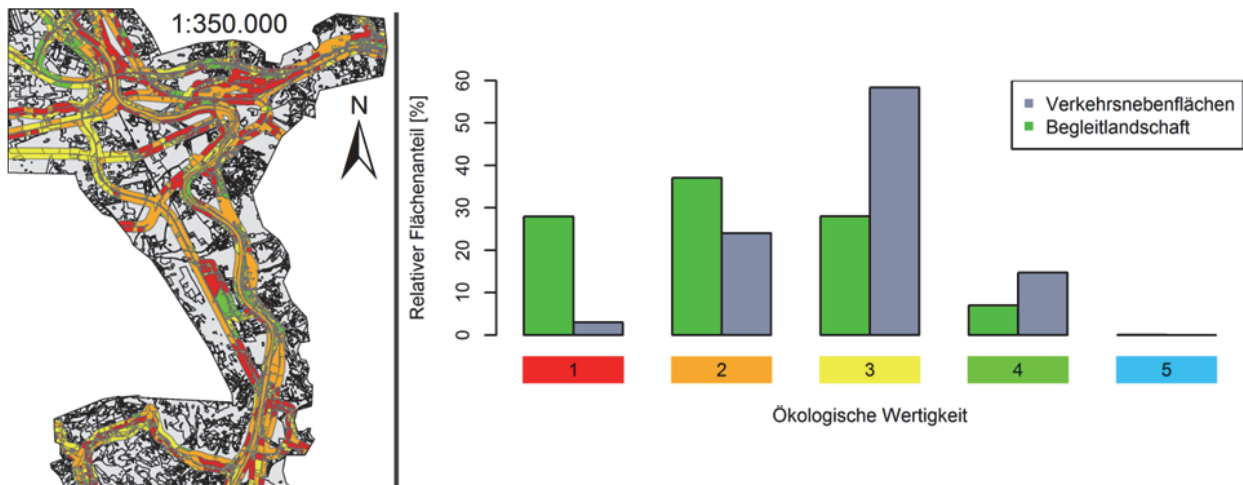


Abbildung 4: Biotopwertigkeit von Verkehrsnebenflächen und ihrer Begleitlandschaft. Links: Übersichtskarte des Untersuchungsraumes. Die Wertigkeit wurde gutachterlich bestimmt in 500 Meter breiten Korridoren um die Hauptverkehrswege, die einzelnen Biotope wurden entweder den Verkehrsnebenflächen oder der Begleitlandschaft zugeordnet. Rechts: Einstufung der Biotope auf Verkehrsnebenflächen und Begleitlandschaft nach Flächenanteilen. Wertstufe 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch (Kartengrundlage: OpenStreetMap).

Die Betrachtung der Anzahl der Übergänge zwischen Biotoptypen (Grenzliniendichte) als Maß für die strukturelle Lebensraumvielfalt entlang der 125-Meter Transekte zeigte, dass durch die sich mit steigender Entfernung vom Verkehrsweg schnell ändernden Standortbedingungen (Feuchtigkeit, Nutzung, Schadstoffe etc.) innerhalb der Verkehrsnebenflächen ein bis zu dreieinhalbmal höheres Strukturereichtum herrscht als in der umgebenden Normallandschaft (Abbildung 5), d. h. nahe der Verkehrsträger ist die Anzahl der vorkommenden Biotoptypen höher als in der umgebenden Landschaft.

Beachtlich ist hier die Ähnlichkeit dieses Maßes an allen drei Verkehrsträgern. Etwa 40-50 Meter vom Verkehrsträger entfernt scheint dieser Effekt verkehrswegebedingter Strukturanreicherung zu versiegen, die umgebende Landschaft ist damit homogener.

Die Ähnlichkeit der Biotopzusammensetzung an den drei Verkehrsträgern untereinander zeigte, dass diese am stärksten etwa 30 Meter (Wasserstraße), bzw. etwa 50 Meter (Straße, Schiene) vom Verkehrsweg auftritt, also in der Regel außerhalb der von der jeweiligen Verkehrsverwaltung unterhaltenen Flächen (Abbildung 6). Dies lässt vermuten, dass das höchste ökologische Vernetzungspotenzial nicht im unmittelbaren Verkehrsbegleitgrün liegt, aber noch

innerhalb der durch den Verkehrsweg in ihrer Nutzung beeinflussten Begleitlandschaft.

Entlang der 125-Meter Transekte wurden jeweils in 1, 5, 25 und 125 Meter Entfernung auf Flächen (Plots) von 4 m² Größe die Artenzusammensetzung der Vegetation be-

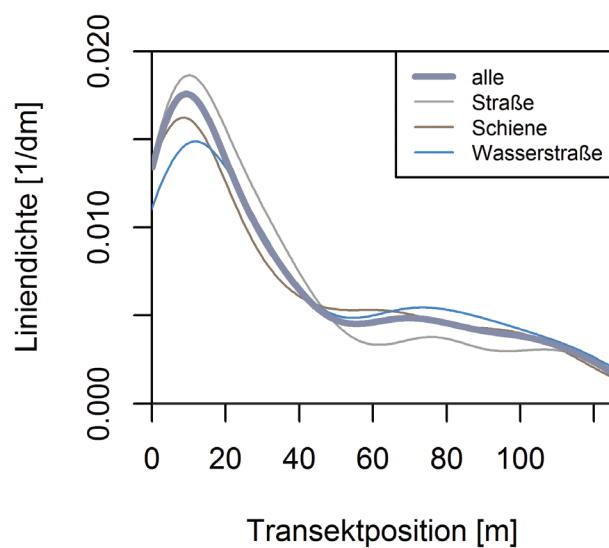


Abbildung 5: Grenzliniendichte zwischen Biotoptypen als Maß für die strukturelle Lebensraumvielfalt in Abhängigkeit von der Entfernung zu Verkehrswegen.

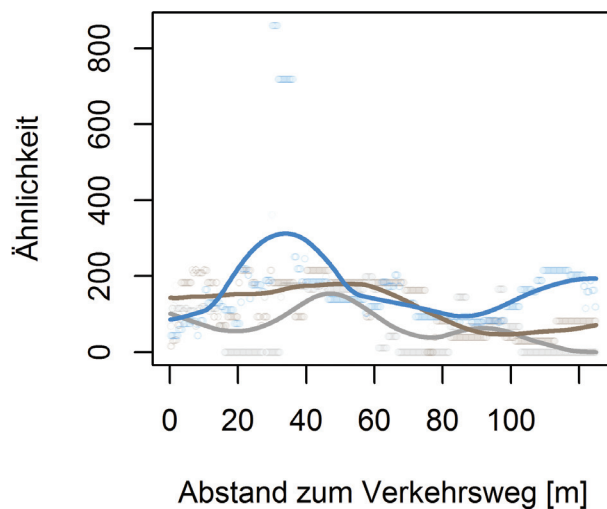


Abbildung 6: Ähnlichkeit der Biotopzusammensetzung an Straßen, Schienen und Wasserstraßen untereinander in Abhängigkeit zur Distanz des Biotops zum Verkehrsweg. Farben vgl. Abbildung 5.

stimmt (in Gehölzen auf je 40 m²). Während die Artenzusammensetzung in 25 und 125 Metern Entfernung relativ unabhängig vom Verkehrsweg war (Kiefernwald, Maisacker etc.), zeigte sich auf den verkehrsnahen Flächen eine für den jeweiligen Verkehrsträger charakteristische Artenzusammensetzung, wobei auch hier, wie bei den Biotoptypen, deutliche Überschneidungen zwischen den Verkehrsträgern beobachtet wurden (Abbildung 7).

Die Straßenebenenflächen fungierten hierbei als eine Art Mittler zwischen den eher feuchtegeprägten Beständen an Wasserstraßen und den eher trockengeprägten Beständen an Schienen.

Es wurden insgesamt 390 Pflanzenarten nachgewiesen. Betrachtet man nur die Arten, welche regelmäßig (in mehr als 10 % der Flächen) und in großer Zahl (mit im Schnitt mehr als 10 % Bedeckung dieser Flächen⁵) an mindestens einem der drei Verkehrsträger vorkamen, so waren von diesen 39 Arten nur drei Arten an allen drei Verkehrsträgern häufig vertreten. Sechs weitere Arten kommen zumindest an

⁵ Jeweils 10 % Bedeckung von 10 % aller untersuchten Flächen bedeutet mindestens 1 % Gesamtbedeckung aller Verkehrsnebenflächen des jeweiligen Verkehrsträgers. Was zunächst wenig klingt, bedeutet in der Praxis jedoch einen hohen Teil am Gesamtbewuchs dieser Flächen, der eine vitale Vernetzung der Arten an diesem Verkehrsträger vermuten lässt.

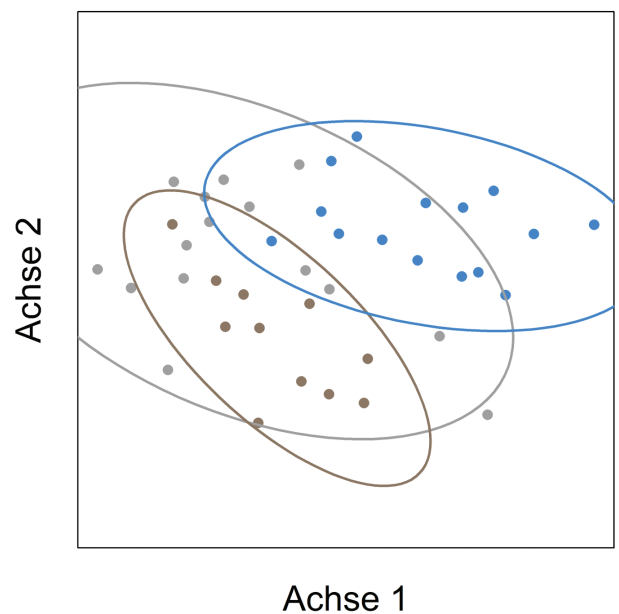


Abbildung 7: Ähnlichkeit der Artenzusammensetzung in Probeflächen (Punkte) an Straße (grau), Schiene (braun) und Wasserstraße (blau) bestimmt durch nichtmetrische multidimensionale Skalierung (NMDS). Je näher Punkte beieinander liegen, umso ähnlicher sind sie in ihrer Zusammensetzung an Pflanzenarten.

zwei der Verkehrsträger regelmäßig und in hoher Zahl vor (Abbildung 8).

Das bedeutet, dass etwa jede vierte der verbreiteten Arten an mehr als einem Verkehrsträger in sehr bedeutendem Umfang vorkommt. Es handelt sich hierbei um auch sonst weit verbreitete Generalisten: Echte Brombeere, Blutro-

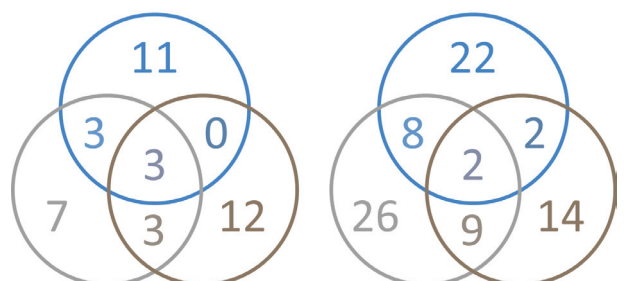


Abbildung 8: Anzahl gemeinsamer und exklusiver Pflanzenarten im Untersuchungsraum Aschaffenburg, welche jeweils in mehr als 10 % der Vegetationsaufnahmen nachgewiesen wurden. Links: Arten mit hoher Bedeckung der Flächen, rechts Arten mit geringer Bedeckung der Flächen.

ter Hartriegel und sieben verbreitete Gräser (Tabelle 2). Betrachtet man zusätzlich die Arten, die regelmäßig, aber in geringerer Zahl (<10 % Bedeckung der Probeflächen) vorkommen, so kommen insgesamt 21 verkehrsträgerüber-

greifend relevante Arten hinzu, welche ebenfalls rund ein Viertel dieser Arten repräsentieren (Abbildung 8). Hierbei handelt es sich meist um weit verbreitete Wiesenarten (Tabelle 2).

Tabelle 2: Häufig auf Verkehrsnebenflächen nachgewiesene Arten mit hohen (≥ 1 %) und geringen (<1 %) Flächenanteilen an der Gesamtfläche der Verkehrsnebenflächen des jeweiligen Verkehrsträgers. Häufige Arten mit sehr unterschiedlichen Flächenanteilen an den verschiedenen Verkehrsträgern sind unterstrichen (Vorkommen an zwei Verkehrsträgern) bzw. fett gedruckt (Vorkommen an allen Verkehrsträgern). Gebietsfremde Arten sind mit einem Stern* markiert.

Arten mit hoher Flächendeckung	Arten mit geringer Flächendeckung
An Bundeswasserstraßen	An Bundeswasserstraßen
Giersch, Schwarz-Erle, Esche, Hopfen, Kratzbeere, Bruch-Weide, Fahl-Weide, Weide (Art undifferenziert), <u>Schwarzer Holunder</u> , <u>Glattblatt-Aster*</u> , Große Brennnessel	<u>Feld-Ahorn</u> , Wald-Zwenke, Zaunwinde, Knolliger Kälberkropf, Hasel, Eingriffeliger Weißdorn, Pfaffenhütchen, Acker-Flügelknöterich, Rot-Schwingel , Echtes Mädesüß, Kletten-Labkraut, Drüsiges Springkraut*, Walnuss, <u>Schilf</u> , Schmalblättriges Rispengras , Sumpf-Rispengras, <u>Vogel-Kirsche</u> , Scharfer Hahnenfuß, Hunds-Rose, Echte Brombeere , Gewöhnlicher Schneeball, Vogel-Wicke
An Bundeswasserstraßen und Schienen	An Bundeswasserstraßen und Schienen
–	Gewöhnliche Nelkenwurz, Spitz-Wegerich
An Schienen	An Schienen
Besenginster, <u>Acker-Schachtelhalm</u> , Zypressen-Wolfsmilch, Rot-Buche, Efeu, <u>Ausdauerndes Weidelgras</u> , <u>Schilf</u> , Wald-Kiefer, <u>Vogel-Kirsche</u> , Trauben-Eiche, Stiel-Eiche, Sal-Weide	Wiesen-Schafgarbe, Gemüse-Spargel, Behaarte Segge, Draht-Schmiele, Kleinblütiges Weidenröschen, Wolliges Honiggras, Wald-Sauerklee, Schwarzer Holunder, Kleiner Wiesenknopf, Grüne Borstenhirse, Kanadische Goldrute*, Rainfarn, Gewöhnlicher Klettenkerbel, Hasen-Klee
An Schienen und Straßen	An Schienen und Straßen
Rot-Schwingel , Schmalblättriges Rispengras , Echte Brombeere	Kanadisches Berufkraut*, Kleinköpfiger Pippau, Wilde Möhre, Weicher Storchschnabel, Gewöhnliches Leinkraut, Schlehe, Wiesen-Löwenzahn, Weiß-Klee, Große Brennnessel
An Straßen	An Straßen
<u>Feld-Ahorn</u> , <u>Wiesen-Schafgarbe</u> , Kriech-Quecke, <u>Wolliges Honiggras</u> , Liguster, Spitz-Wegerich , <u>Rainfarn</u>	Rotes Straußgras, Riesen-Straußgras, Gewöhnlicher Beifuß, Weiche Trespe, Wiesen-Flockenblume, Wegwarte, Acker-Kratzdistel, Wiesen-Pippau, <u>Acker-Schachtelhalm</u> , Einjähriger Feinstrahl*, Wiesen-Schwingel, Gewöhnlicher Hohlzahn, Ferkelkraut, <u>Ausdauerndes Weidelgras</u> , Gewöhnlicher Hornklee, Bitterkraut, Straußblütiger Sauerampfer, Herbst-Löwenzahn, Raukenblättriges Greiskraut, Schmalblättriges Greiskraut, Jakobs-Greiskraut, Fuchsrote Borstenhirse, Rauhe Gänsedistel, Wiesen-Goldhafer, Rauhaarige Wicke, Platterbsen-Wicke
An Straßen und Bundeswasserstraßen	An Straßen und Bundeswasserstraßen
Behaarte Segge , Blutroter Hartriegel, Gewöhnliches Rispengras	Kleiner Odermennig, Gundermann, Wiesen-Platterbse, Rohr-Glanzgras, Wiesen-Rispengras, Vogelknöterich, Kriechendes Fingerkraut, Rot-Klee
An allen Verkehrsträgern	An allen Verkehrsträgern
Glatthafer, Knäuelgras, Rohr-Schwingel	Kletten-Labkraut, Stink-Storchschnabel

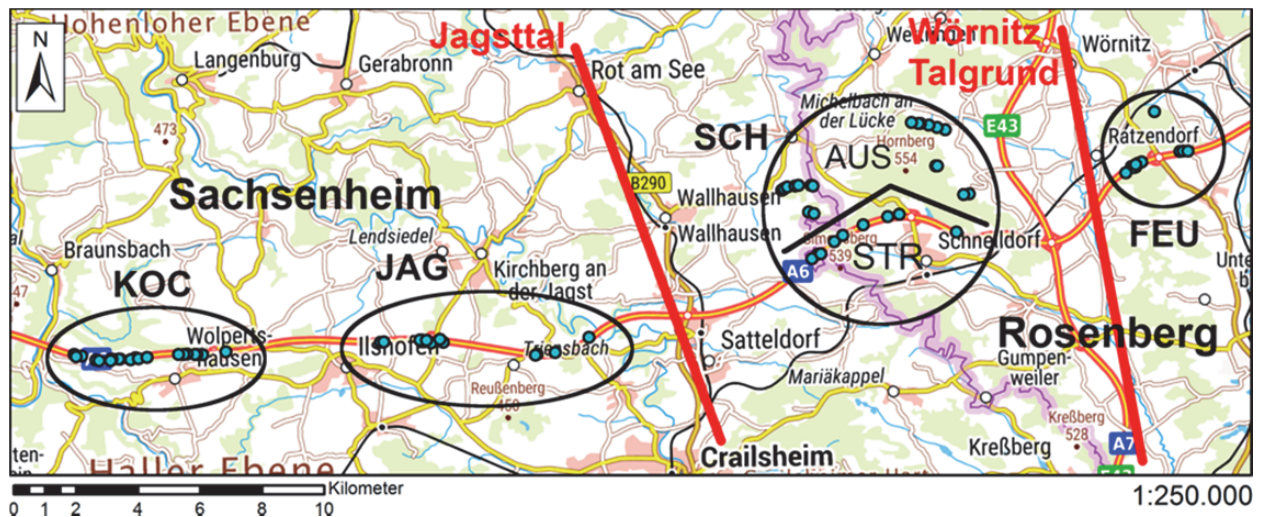


Abbildung 9: Genetische Gruppen der Haselmaus im Untersuchungsraum entlang der BAB 6. Die zwei Hauptgruppen Sachsenheim und Rosenberg unterteilen sich westlich in die Kochertal- (KOC) und Jagsttal-Gruppe (JAG) und östlich in die Schnelldorf- (SCH) und die Feuchtwangen-Gruppe (FEU). SCH beinhaltet straßenferne (AUS) und straßennahe (STR) Populationen (Kartengrundlage: OpenStreetMap).

Ein Drittel der in Tabelle 2 aufgeführten Arten ist zudem empfindlich gegenüber hohen Nährstofffrachten, profitiert also von der fehlenden Düngung der Flächen (in der Tabelle nicht dargestellt).

Im Untersuchungsraum Aschaffenburg wurden die Vorkommen von sechs verschiedenen Tiergruppen (Amphibien, Laufkäfer, Reptilien, Spinnen, Tagfalter, Vögel) auf Verkehrsnebenflächen und auf Referenzflächen erfasst. Die Ergebnisse waren weniger eindeutig als bei Biotoptypen und Vegetation. Die für so ein großes Untersuchungsgebiet recht geringen Probenzahlen lassen nur begrenzt Aussagen zum ökologischen Vernetzungspotenzial der Verkehrsnebenflächen zu. Hier müssen weitere Daten aus dem Untersuchungsraum Hildesheim abgewartet werden (2020). Eine Ausnahme bildeten die Spinnen, für die eine Vernetzungsfunktion für Offenlandarten entlang der Verkehrswege in Waldgebieten nachgewiesen wurde. Für Waldarten stellen diese Wege jedoch weiterhin Ausbreitungshindernisse dar. Allerdings konnte für diese Arten gezeigt werden, dass die inselhaft auftretenden Gehölze an den Verkehrswegen im Offenland zwischen Äckern und Weiden durchaus als Trittsteinhabitate eine Vernetzungsfunktion erfüllen.

Die genetischen Analysen lassen auf eine gute Lebensraumvernetzung bei den untersuchten Tierpopulationen

schließen. Fehlende Unterschiede in der genetischen Differenzierung zwischen den 20 untersuchten Populationen (10 x straßennah, 10 x straßenfern) des Hauhechel-Bläulings weisen darauf hin, dass ein permanenter Austausch von Individuen zwischen Populationen über die Landschaft erfolgt. Die bisherigen genetischen Analysen für die Haselmaus (Proben aus 2017, N = 107) zeigen, dass die Unterschiede in der genetischen Differenzierung zwischen Populationen an der Autobahn (STR, Abbildung 9) und angrenzenden Waldflächen (AUS) deutlich geringer sind als die Unterschiede zwischen räumlichen Gruppen entlang der A6 (Tabelle 3).

In Ost-West-Ausrichtung entlang der A6 ließen sich zwei genetische Hauptgruppen ableiten, die durch das Jagsttal getrennt sind (Abbildung 9). Die westliche Sachsenheim-Gruppe unterteilte sich in die westliche Kochertal-Gruppe (KOC) und die östliche Jagsttal-Gruppe (JAG). Die genetische Differenzierung der beiden Gruppen war allerdings gering (Tabelle 3). KOC grenzt östlich an das Kochertal an und ist sowohl nördlich als auch südlich von bewaldeten, an das Kochertal angebundene Seitentälern geprägt. JAG liegt in einer größtenteils waldfreien Agrarlandschaft mit nur vereinzelt kleinen und stark isolierten Gehölzvorkommen. Die einzigen durchgängigen Gehölzstrukturen bilden die Straßenbegleitgehölze entlang der A6. So könnte

Tabelle 3: Genetische Differenzierung (F_{ST}) zwischen den verschiedenen Untergruppen, eingeteilt in starke ($F_{ST} > 0,15$), moderate ($F_{ST} 0,14-0,10$) und geringe Differenzierung ($F_{ST} < 0,10$). (FEU = Feuchtwangen-, JAG = Jagsttal-, KOC = Kochertal-Gruppe)

F_{ST}	SCH	FEU	JAG
FEU	0,119	-	-
JAG	0,132	0,266	-
KOC	0,118	0,241	0,087

JAG eine Population sein, die sich entlang der Autobahn-gehölze von KOC ausgebreitet und mit der Zeit genetisch differenziert hat (sog. isolation-by-distance). Um dies endgültig zu beurteilen, müssen die verbleibenden Proben aus 2018 noch ausgewertet werden.

Die östlich des Jagsttals liegende Rosenberg-Gruppe unterteilte sich ebenfalls in zwei Untergruppen (SCH, FEU), die sich im Bereich des Autobahnkreuzes Feuchtwangen/Craillsheim trennen ließen. Die A7 verläuft hier in einer Offenlandschneise um den Fluss Wörnitz, die anhand historischer Belege bis vor 1890 zurückdatiert werden kann. Diese mindestens 1,5 km breite Schneise unterbricht die westlich und östlich der Wörnitz gelegenen Wälder durchgängig und stellt eine robuste Barriere für die Haselmaus dar. Die genetische Differenzierung ist somit mit großer Wahrscheinlichkeit auf die historische Landnutzung zurückzuführen und nicht auf eine Barrierewirkung der A7. Ob Populationen nördlich und südlich der A6 genetisch differenziert sind, werden die verbleibenden Proben aus 2018 zeigen.

2.1.4.2 Verkehrsnebenflächen als Lebensraum für geschützte und planungsrelevante Arten

Häfen bilden ein dichtes Netzwerk aus verschiedenen Verkehrsträgern, welche traditionellerweise eine Reihe von Lebensräumen für spezialisierte Arten bereitstellen (Trockenlebensräume, Pionier- und Ruderalvegetation auf Vorhaltflächen, Spülfelder etc.). Für den Hamburger Hafen wurde eine neue Biotoptypenkarte des Gesamtgebietes erstellt und mit einer entsprechenden Kartierung aus dem Jahr 1985 verglichen, um die Wirkung des sich hier vollziehenden Strukturwandels auf die vorhandenen Lebensräume abzuschätzen. Dieser Strukturwandel äußert sich zum Beispiel in der Abkehr von Neuanlagen von Spülfeldern,

der zunehmenden Bebauung von Brachflächen und der zunehmenden Flächenversiegelung allgemein, außerdem in der grundlegenden Verbesserung des Emissionsschutzes beim Umschlag von Getreide, Saatgut und Futtermitteln sowie in der Zunahme gärtnerisch betreuter Grünflächen.

Die Analyse (Abbildung 10) zeigte vor allem den fast vollständigen Verlust potenziell wertvoller Sandtrockenrasen, welche Lebensraum für verschiedene spezialisierte Arten bieten können sowie einen deutlichen Verlust an Pioniergehölzen. Auf der anderen Seite war eine starke Zunahme versiegelter Flächen zu konstatieren. Weiter zeigte sich ein Trend hin zu mehr gepflegten Parkanlagen und nährstoffreichen Ruderalstandorten. Der nur scheinbar enorme Anstieg an Röhrichten ist darauf zurückzuführen, dass diese in der Kartierung 1985 meist nur als Linienstrukturen erfasst wurden, für die keine belastbare Schätzung der damaligen Flächengröße möglich ist.

Aussagen über die Rolle der Verkehrsnebenflächen für geschützte und planungsrelevante Arten ließen sich anhand der Untersuchungen in Aschaffenburg treffen. Insgesamt wurden im Gebiet 390 Pflanzenarten nachgewiesen, davon 40 gebietsfremde Arten (Neophyten), von denen wiederum 15 Arten als invasiv eingestuft sind (Nehring et al. 2013). In Tabelle 4 sind die in den Probeflächen nachgewiesenen mittleren Anzahlen an Pflanzenarten gesamt, an invasiven Neophyten sowie an geschützten Arten und Arten mit Rote-Liste-Status aufgeführt.

Bei der Betrachtung der Transektplots fiel auf, dass der Artenreichtum mit steigender Entfernung zum Verkehrsweg deutlich abnahm und die Verkehrsnebenflächen (1 und 5 m-Plots) auch bei der Ausstattung mit geschützten und gefährdeten Arten nach Roten Listen tendenziell besser abschnitten. Im Vergleich zu ähnlichen Lebensräumen ab-

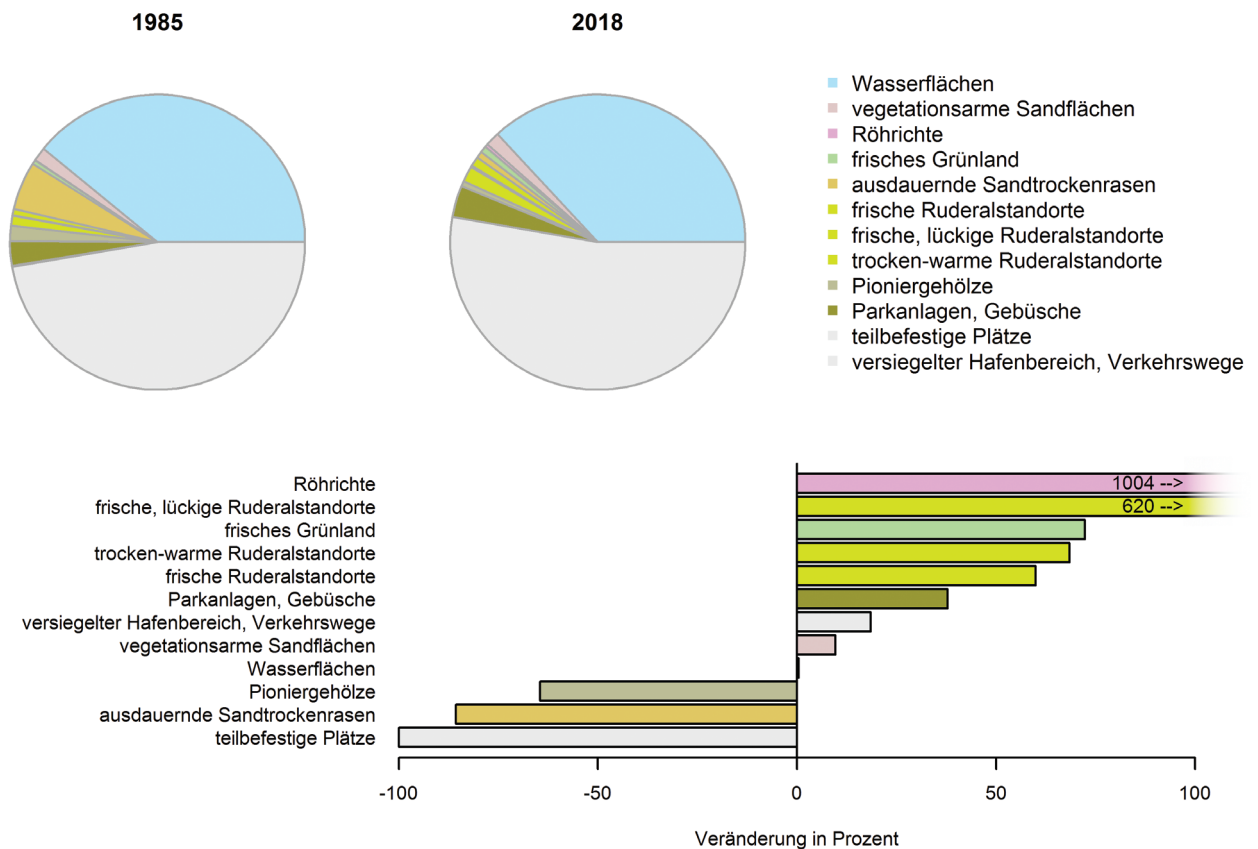


Abbildung 10: Veränderung der Biotoptypenzusammensetzung im Hamburger Hafen zwischen 1985 und 2018. Oben: absolute Flächenanteile in den Jahren 1985 und 2018. Unten: relative prozentuale Veränderung der einzelnen Biotopeinheiten.

seits der Verkehrswege (A-Plots) waren diese zwar artenärmer, aber übertrafen sie im Reichtum von Arten der Roten Liste. Die Suche nach besonders artenreichen Beständen erbrachte keine sichtbaren Unterschiede in der Gesamtartenzahl zwischen Plots auf Verkehrsnebenflächen (V-Plots) und verkehrsfernen Referenzplots (B-Plots), jedoch schnitten die V-Plots bei den übrigen Qualitätskriterien stets etwas schlechter ab als die besten Gebiete in der freien Landschaft. Die Unterschiede zwischen den Verkehrsträgern waren bei diesen Qualitätskriterien insgesamt relativ gering mit einer Tendenz zu artenärmeren und dafür etwas mehr mit invasiven Arten durchsetzten Vegetationsbeständen an Bahnlinien im Vergleich zu Straßen und Bundeswasserstraßen. Auffällig waren einerseits das verstärkte Auftreten von gebietsfremden Pflanzenarten in den artenreichsten Flächen der Verkehrsnebenflächen und andererseits das ähnlich starke Auftreten solcher in den zufällig ausgewählten Vergleichsbiotopen abseits der Verkehrswege. Eine ge-

nauere Analyse der Gründe für dieses unerwartete Muster steht noch aus.

Bei den faunistischen Untersuchungen waren die Ergebnisse verkehrsträgerübergreifend wiederum weniger eindeutig und aufgrund der teilweise nur geringen Probenzahl nicht endgültig. Hier müssen ebenfalls die Ergebnisse aus dem Untersuchungsraum Hildesheim abgewartet werden. Für einzelne Artengruppen konnte jedoch eine besondere Bedeutung von Verkehrsnebenflächen dargestellt werden. Zum Beispiel konnte für Regenrückhaltebecken an Autobahnen – selbst für solche technischer Bauart – eine Laichhabitatfunktion für verschiedene Amphibienarten nachgewiesen werden. Bahnlinien zeigten eine Funktion als Verbindungskorridore für verschiedene streng geschützte Reptilienarten (Schlingnatter, Zauneidechse, Mauereidechse). Dass das ökologische Potenzial der Verkehrsnebenflächen für Tagfalter noch lange nicht ausgereizt ist, zeigten

Tabelle 4: Übersicht über mittlere gesamte Artenzahlen, mittlere Artenzahlen und Deckung invasiver gebietsfremder Arten und mittlerer Anzahl an Arten mit Schutz- oder Rote-Liste-Status in den einzelnen Untersuchungsflächen (Plots). Unterschieden werden die Plots in zufällig platzierten Transekten in 1, 5, 25 und 125 Meter Entfernung zum Verkehrsweg, sowie folgende Referenzplots: A-Plots (zufällig platzierte verkehrsferne Plots in Vergleichsbiotopen, die Verkehrsnebenflächen ähnlich sind), V-Plots (besonders artenreiche Plots auf Verkehrsnebenflächen) und B-Plots (besonders artenreiche Plots, verkehrsfern). Die Farben beziehen sich auf die Ränge 1 (dunkelgrün) bis 7 (rot) des Wertes in der jeweiligen Spalte.

Plots	Arten gesamt	Neophyten, invasiv		Schutzstatus	Rote-Liste-Status*			Ø Rang	Rang
	Ø Anzahl	Ø Anzahl	Ø Deckung %	Ø Anzahl	Ø Anzahl Region	Ø Anzahl Bayern	Ø Anzahl Deutschland		
1 m	14,5	0,4	3,8	0,00	0,21	0,21	0,03	3,71	2
5 m	13,5	0,3	3,9	0,03	0,15	0,18	0,01	3,86	4
25 m	11,1	0,3	3,5	0,00	0,07	0,10	0,06	4,00	5
125 m	10,6	0,3	4,8	0,00	0,08	0,11	0,00	5,00	7
Transekt- plots gesamt	12,5	0,3	4,0	0,01	0,13	0,15	0,03	4,14	4,5
A-Plots	17,5	0,7	0,09	0,09	0,14	0,14	0,05	4,43	6
V-Plots	19,4	0,7	0,00	0,00	0,23	0,23	0,04	3,71	2
B-Plots	19,4	0,4	0,38	0,38	0,56	0,56	0,25	1,43	1
Referenz- plots gesamt	18,4	0,6	0,16	0,16	0,31	0,31	0,11	3,19	3

* Rote-Liste-Status mit den Gefährdungsklassen 1 bis 3, G (Gefährdung anzunehmen) und R (sehr selten).

Positivbeispiele extensiv gepflegter Offenlandbereiche entlang des Mains und in Innenohren an Autobahnkreuzungen im Vergleich zu den restlichen Verkehrsnebenflächen. Die gängige Praxis des Mulchens ohne Abtransport des Materials wurde als wichtiges Hemmnis bei der Entwicklung artenreicherer Tagfalterbestände auf Verkehrsnebenflächen vermutet. Gebietsfremde Arten spielten bei keiner der sechs untersuchten Tiergruppen eine Rolle. Es wurden im Gebiet nur drei Arten nachgewiesen (Kanadagans, Nilgans, Fasan), welche zudem keinerlei Bindung an die Verkehrsträger erkennen ließen.

Dass Verkehrsnebenflächen aufgrund ihrer Eignung als Lebensraum für geschützte oder planungsrelevante Arten eine indirekte Fallenwirkung ausüben, ließen die bisherigen Ergebnisse für keine der drei an Straßen genauer untersuchten Arten vermuten. Haselmäuse wurden entlang der A6 sowohl in Waldrand- als auch in Heckensituatio-

nen sehr viel häufiger vorgefunden als in der umgebenden Landschaft (Abbildung 11). Die meisten Nachweise erfolgten in straßennahen Hecken, während in straßenfernen Hecken in 2017 keine und in 2018 nur Einzelfunde (N = 14) gelangen. Strukturelle Unterschiede in den Habitaten bieten hier eine mögliche Erklärung: Hecken entlang der A6 waren generell länger und breiter als solche in der freien Landschaft. Weitere Analysen (Deckung, Lückigkeit) stehen noch aus. Auch Waldrandhabitats unterschieden sich strukturell zwischen straßennaher und -ferner Lage. Waldränder entlang der A6 waren weniger lückig, hatten aber einen geringeren Kronenschluss. Prädationsdruck und Anzahl der Gehölzarten unterschieden sich nicht zwischen straßennahen und -fernen Waldhabitaten.

Bei der Mönchsgrasmücke belegen die Erfassungen zum Zeitpunkt der Revierbesetzung, dass straßenferne Waldrandflächen zuerst und straßennahe Hecken zuletzt besetzt

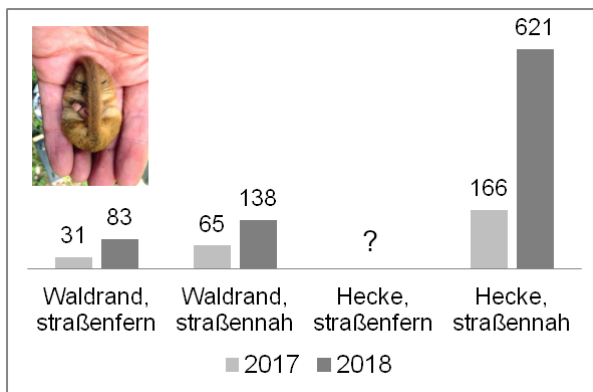


Abbildung 11: Geschätzte Populationsgrößen der Haselmaus basierend auf der Fang-Wiederfang-Methode. In der Kategorie "Hecke, straßenfern" konnten aufgrund der geringen Nachweise (N = 14) keine Populationsgrößen kalkuliert werden (Foto: Patrick Jochum, ANUVA Stadt- und Umweltplanung GmbH).

werden. Somit lässt sich festhalten, dass nach bisherigem Kenntnisstand keine indirekte Fallenwirkung für die Mönchsgrasmücke vorliegt, da von Straßenebenenflächen keine direkte Lockwirkung ausgeht. Erst wenn die bevorzugten Brutreviere besetzt sind, weichen die Mönchsgrasmücken auf straßennahe Flächen aus. Auch die Tatsache, dass keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Habitatkategorien im Hinblick auf Nestprädation bzw. Bruterfolg gefunden wurden, lässt vermuten, dass Straßenebenenflächen keine indirekte Falle darstellen. Die Revierkartierung der gesamten Avifauna bestätigt, dass Straßenebenenflächen für viele Vogelarten keine Lockwirkung ausüben. Die Frage, wie viele Brutpaare tatsächlich verbleiben und wie erfolgreich sie sich reproduzieren können, lässt sich jedoch auf Basis der vorliegenden Daten nicht abschließend beantworten.

Hauhechel-Bläuling-Individuen auf Straßenbegleitflächen hatten tendenziell eine kürzere Lebensdauer. Es ist allerdings fraglich, ob es trotz einer ggf. erhöhten Mortalität durch den Verkehr zu negativen Auswirkungen auf die Population kommen kann, da sich Schmetterlinge schon in den ersten Tagen nach dem Schlupf reproduzieren und damit zum Erhalt der lokalen Population beitragen. Trotz der Unterschiede in der mittleren Lebensdauer ist deshalb eine indirekte Fallenwirkung nach dem bisherigen Kenntnisstand für diese Art unwahrscheinlich.

Eine besondere Form der Fallenwirkung besteht potenziell für Vögel⁶, welche Oberleitungsmasten und -seile, wie sie an Bahnlinien typisch sind und nun auch im Rahmen des Mobilitätswandels an Autobahnen erprobt werden, häufig als Ansitz verwenden. Bei Überbrückung der sich an den Oberleitungen befindlichen Isolatoren kann es hier zu betäubenden oder sogar tödlichen Stromschlägen kommen. Solche Kurzschlüsse können zu Funktionsausfällen des betroffenen Streckenabschnitts führen. Bei der Bahn werden daher an Streckenabschnitten, an denen es vermehrt zu Kurzschlussereignissen kommt, von der Deutsche Bahn AG (DB) bereits sog. "Vogel- und Kleintierabweiser" nachgerüstet (Abbildung 12), um das Stromschlagrisiko für Vögel und Kleinsäuger zu minimieren. Die Wirkungsweise dieser Armaturen beruht auf mechanischer Abwehr in Verbindung mit elektrostatischer Entladung bei Berührung. Dort, wo solche Armaturen eingesetzt werden, ist die Anzahl der Kurzschlussereignisse seitdem signifikant zurückgegangen. Die Wirksamkeit der Armaturen bezogen auf den tatsächlichen Schutz von Vögeln wird jedoch von Naturschutzverbänden angezweifelt und deshalb zurzeit im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks untersucht. Hierzu werden im Hochspannungslabor verschiedene Bedingungen der Isolatoren und der Umgebung simuliert (z. B. Feuchtigkeit, Verschmutzung, Eisansatz), um die ganze Bandbreite möglicher im Freiland vorkommender Szenarien umfänglich abzudecken. Da keine Tierversuche durchgeführt werden, wird der Körperwiderstand von Vögeln durch vogeltypische Modellwiderstände simuliert. Die Ergebnisse werden Ende April 2020 vorliegen.

Auch bei wiederkehrenden Instandhaltungsmaßnahmen, die für den Erhalt der Funktionstüchtigkeit der Verkehrsinfrastruktur notwendig sind, kommt es immer wieder zu artenschutzrechtlichen Konflikten. Eine Tierart, bei der vergleichsweise häufig die Belange des Artenschutzes zu berücksichtigen sind, ist die Zauneidechse, eine nach Anhang IV der FFH-Richtlinie streng geschützte Art, die häufig im Bereich der Verkehrsträger und Verkehrsnebenflächen anzutreffen ist. Die Ergebnisse zu den Auswirkungen einer Schotterreinigung auf Zauneidechsenpopulation verdeutlichen, dass ein Eingriff durch Instandhaltungsmaß-

⁶ Besondere Relevanz erhält dieses Thema aus dem besonderen Schutzstatus sämtlicher europäischer Vogelarten, welcher sich aus § 7 BNatSchG ergibt.

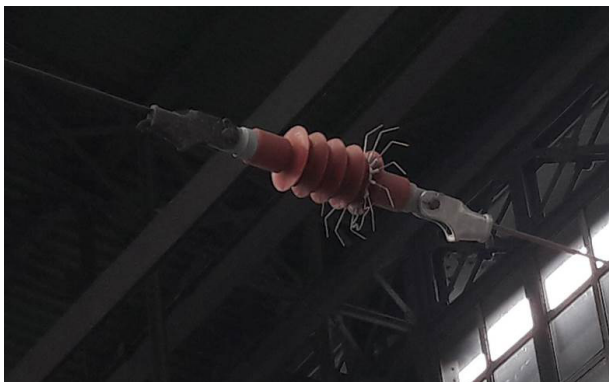


Abbildung 12: An einem Isolator der Bahnüberleitung angebrachter "Vogel- und Kleintierabweiser" (Foto: Marion Leiblein-Wild, DZSF/ EBA).

nahmen nicht zu einer unmittelbaren Auslöschung der Population führen muss. Vor der Instandhaltungsmaßnahme konnten insgesamt 68 Nachweise von Zauneidechsen erbracht werden. Nach der Maßnahme waren es insgesamt 257 Nachweise, davon 60 % Schlüpflinge.

Ein tatsächlicher Anstieg der Population konnte hieraus jedoch nicht abgeleitet werden. Vielmehr ist der hohe Anteil an Jungtieren nach der Maßnahme mit dem Schlüpfen dieser Individuen nach Durchführung der Maßnahme zu erklären. Das zahlreiche Vorhandensein diesjähriger Schlüpflinge zeigt jedoch, dass sich die Eidechsengelege nicht bzw. nicht ausschließlich im Schotterbereich befanden und durch die Maßnahme nicht bzw. höchstens teilweise beeinträchtigt wurden. Auch über die übrigen Altersklassen (Adulte, Juvenile) gemittelt wurde nach der Maßnahme eine größere Anzahl an Individuen nachgewiesen. Dies kann zum Teil auf die für Eidechsenichtungen günstigeren Witterungsbedingungen nach der Maßnahme zurückzuführen sein, belegt aber gleichzeitig, dass die Population durch die Maßnahme nicht unmittelbar ausgelöscht wurde. Ein Vergleich mit Vorjahres-Daten bei ähnlichen Witterungsverhältnissen zeigte zudem eine deutlich höhere Aktivität der Zauneidechsen in dem Jahr nach der Instandhaltung.

Die Mehrzahl der nachgewiesenen Zauneidechsen hielt sich sowohl vor als auch nach der Maßnahme vor allem im Randbereich neben der Bahnanlage auf. Die Randberei-

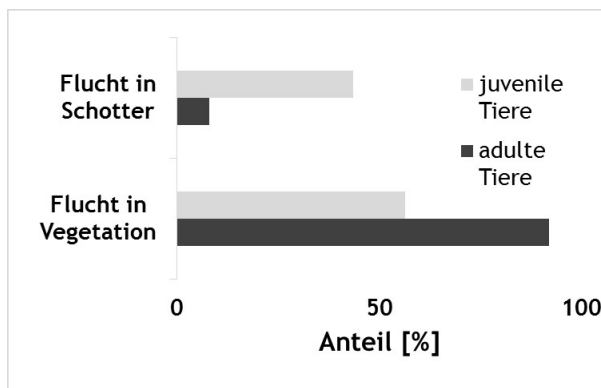


Abbildung 13: Fluchtverhalten von adulten und juvenilen Zauneidechsen während der Begehungen im Gelände entlang des untersuchten Streckenabschnitts.

che haben daher vermutlich einen großen Einfluss auf die Überlebenswahrscheinlichkeit der Population, da Individuen bei entsprechend gut ausgestalteten Randbereichen eine Ausweichmöglichkeit zur Verfügung haben. Videoaufnahmen zeigten, dass sich unmittelbar vor und während des Einsatzes der Maschine keine Zauneidechsen in dem Bereich der Instandhaltung aufhielten bzw. dass keine flüchtenden Tiere erfasst wurden.

Wahrscheinlich wird die Flucht der Eidechsen durch die zahlreichen Vorbereitungen im Vorfeld der Maßnahme und die damit verbundenen Störungen durch Arbeiter und Vibrationen entlang der Gleise schon sehr früh ausgelöst. Während der Begehungen durch die Kartierer erhobene Zählraten zeigen, dass die adulten Tiere fast ausschließlich in die Vegetation beidseitig des Bahndamms flüchteten, während die juvenilen Tiere deutlich häufiger auch in den Schotter selbst flüchteten (Abbildung 13), was vermutlich mit der geringeren Größe der juvenilen Individuen zu erklären ist. Hierdurch könnte sich ein höheres Gefährdungspotenzial der Juvenilen durch die Schotterreinigung ergeben. Eine stichprobenartige Nachuntersuchung des Schotterabriebs ergab keine Funde von verletzten oder getöteten Tieren, wobei jedoch nur ein geringer Teil des Materials untersucht werden konnte. Eine unverzügliche Nutzung des gereinigten Schotterbereiches durch Zauneidechsen nach Arbeiten im Gleis- und Schotterbereich zeigte, dass der Lebensraum auch nach der Instandhaltungsmaßnahme wieder angenommen wurde. Um die Übertragbarkeit der

Ergebnisse aus dieser Studie auf andere Fallkonstellationen (z. B. Zeitpunkt, Art der Maßnahme) zu ermitteln sowie die langfristige Populationswirksamkeit der in dieser Studie untersuchten Population zu erfassen, müssen weitere Untersuchungen erfolgen.

2.1.5 Diskussion und Ausblick

Verkehrswege sind gemeinhin als Wanderungshindernisse bekannt, welche die Landschaft zerschneiden und somit die Entwicklung vieler Arten stören oder sogar gefährden können. Während dies für die als Wasserstraßen genutzten Flusssysteme als natürliche Wirkung anerkannt und für die später hinzugefügten Kanäle noch eher akzeptiert wird, steht die Zerschneidungswirkung an Schienen und ganz besonders an Straßen in Biodiversitätsdiskussionen oft im Zentrum der Kritik. Nationale und internationale Abkommen wie das Bundesprogramm "Wiedervernetzung" (BMU 2012) oder das aus Vogelschutz-Richtlinie (Richtlinie 2009/147/EG) und Fauna-Flora-Habitat (FFH) Richtlinie (Richtlinie 92/43/EWG) zusammengesetzte EU-weite Netz von Schutzgebieten Natura 2000 versuchen folgerichtig, dieser Fragmentierung entgegenzuwirken und Lebensräume wieder miteinander zu verbinden, sodass die negativen Auswirkungen auf die Biodiversität minimiert werden. Dass die den Verkehrswegen anliegenden Grünflächen selbst auch Habitat- und Lebensraumvernetzungsfunktionen übernehmen können, wird dabei jedoch oft übersehen und konnte im Rahmen des Schwerpunktthemas 201 des BMVI-ExpertenNetzwerks nun auch *verkehrsträgerübergreifend* für Straße, Schiene und Wasserstraße gezeigt werden.

Verkehrsnebenflächen als Lebensraumnetz in der Landschaft

Die vorliegenden Ergebnisse aus der ersten Phase des BMVI-ExpertenNetzwerks belegen, dass die Verkehrsnebenflächen an Straßen, Schienen und Wasserstraßen Gemeinsamkeiten in der Biotopzusammensetzung und gewisse Ähnlichkeiten in der Zusammensetzung der dort vorkommenden Arten aufweisen. Somit besteht hier ein grundsätzliches Potenzial für die verkehrsträgerübergreifende Vernetzung von Biodiversität. Ein verkehrsträgerübergreifendes Management, für dessen Entwicklung nun

die Grundlagen geschaffen worden sind, kann zukünftig einen wichtigen Beitrag leisten bei der Erfüllung der durch die einschlägigen Konventionen vorgegebenen internationalen Verpflichtungen sowie als aktive Maßnahme zum in § 2 BNatSchG vorgeschriebenen Beitrag des Bundes und der Länder zur Verwirklichung der Ziele des Naturschutzes.

Durch die einheitliche Datenerfassung auf den Verkehrsnebenflächen im Untersuchungsraum Aschaffenburg wurde deutlich, dass Überschneidungen in häufig vorkommenden Biotoptypen eine Lebensraumvernetzung begünstigen. So können vor allem Feldgehölze, Hecken, extensiv bis mäßig intensiv bewirtschaftetes Grünland und die verschiedenen Saumstrukturen, welche alle häufig an allen Verkehrsträgern vorkommen, einen zusammenhängenden Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten darstellen. Obwohl solche Biotope in verkehrsfernen Referenzflächen in der Regel einen besseren ökologischen Zustand aufwiesen, spielen diese in der Normallandschaft häufig eher eine untergeordnete Rolle und kommen meist isoliert vor. Grund hierfür ist der dort herrschende hohe Nutzungsdruck durch Landwirtschaft, Gartenbau sowie städtische und industrielle Versiegelung. Das zusammenhängende Netzwerk der Grünflächen an Verkehrswegen unterliegt nur einer geringen Beeinträchtigung durch Pflegemaßnahmen und Begehung. Beeinträchtigungen durch z. B. Düngemittel erfolgen beinahe ausschließlich aus Anliegerflächen. Aus diesen geringeren Beeinträchtigungen erwächst ein besonderes ökologisches Potenzial der Verkehrsnebenflächen, welches zukünftig vermehrt erschlossen werden kann. An die Stelle der zuvor genannten Beeinträchtigungen treten jedoch verkehrsbedingte Emissionen wie Lärm, Abgase, Abrieb oder Taumittel, welche als Gründe für die schlechtere naturschutzfachliche Gesamtausstattung aufzuführen sind. Zugleich scheint aber die höhere Vielfalt an Biotoptypen in einem Korridor von etwa 40-50 Metern um den Verkehrsweg im Vergleich zur umgebenden Landschaft auch kleinräumig strukturelle Diversität für viele Tier- und Pflanzenarten zu schaffen. In diesem Korridor liegen die Verkehrsnebenflächen, aber in der Regel auch bereits Flächen anderer Nutzer. Von den Verkehrsnebenflächen kann somit sogar ein gewisser Gründereffekt wirksam werden, wenn durch das Vorhandensein eines Verkehrsweges Strukturen entstehen, welche in der umliegenden, intensiv genutzten Landschaft nicht vorhanden sind.

Obwohl die Ergebnisse für viele Tierarten noch nicht abschließend zu beurteilen sind, verdeutlichen die genetischen Analysen von Haselmäusen und Tagfaltern sowie die Ergebnisse aus Aschaffenburg, dass eine Vernetzung der Populationen entlang der Verkehrswege und eine Vernetzung zwischen Verkehrsnebenflächen und der umliegenden Landschaft besteht und somit ein spürbarer Beitrag zur Arterhaltung geleistet werden kann. Durchgängige Gehölzstrukturen, wie sie oft an Verkehrswegen zu finden sind, bieten für manche Arten eine der wenigen verbleibenden Lebensräume. Eine Förderung dieser Lebensräume und ihrer Vernetzung könnte damit zur Erreichung der Ziele des Bundesprogramms Wiedervernetzung (BMU 2012) beitragen und entspricht auch dem Geiste, indem die Strategie der Bundesregierung zur vorbildlichen Berücksichtigung von Biodiversitätsbelangen für alle Flächen des Bundes (StrÖff, Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland 2016) verabschiedet wurde. In unseren Untersuchungen wurde beispielsweise die EU-weit streng geschützte Haselmaus häufiger auf Straßenebenflächen angetroffen als in der umgebenden Landschaft, obwohl die Gründe hierfür nicht abschließend geklärt werden konnten. Die ergänzende Betrachtung der genetischen Daten erlaubte zudem, auch langfristige Prozesse aufzudecken, die sich nicht oder nur bedingt und unter sehr hohem Aufwand mit herkömmlichen ökologischen Methoden detektieren lassen. Die bisherigen Ergebnisse deuteten auf eine geringe genetische Differenzierung und somit eine gute Vernetzung der Haselmauspopulationen entlang des untersuchten Autobahnabschnittes hin. Landschaftliche Strukturen wie das Jagsttal oder die Offenlandschneise entlang der Wörnitz stellten hingegen die prägenden Ausbreitungsbarrieren dar. Kelm et al. (2015) zeigten, dass Autobahnen hingegen häufig von Haselmäusen überquert werden. Eigene Ergebnisse zu diesem Aspekt werden Ende 2019 erwartet. Weiterhin bestätigten die bisherigen Ergebnisse für die untersuchten Tierarten eine gute Vernetzung zwischen Populationen auf Straßenebenflächen und der umliegenden Landschaft. Die weitere Erschließung genetischer Methoden zur Erfassung des Vernetzungspotenzials für relevante Artengruppen ist für die zweite Phase des BMVI-Expertenetzwerks geplant.

Aus der Tatsache, dass sowohl bei den Biotoptypenkartierungen als auch bei den gefundenen Pflanzenarten bedeutende Überschneidungen in der Ausstattung der Verkehrs-

nebenflächen an den drei Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasserstraße vorgefundenen wurden, lässt sich unmittelbar ableiten, dass hier eine verkehrsträgerübergreifende Zusammenarbeit bei Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität und strukturellen Lebensraumvielfalt sinnvoll wäre. Auch das Management invasiver Arten ist ein integraler Teil einer verkehrsträgerübergreifenden Zusammenarbeit. Eine Förderung der Lebensraumvernetzung innerhalb des Verkehrswegenetzes bringt unter Umständen die Gefahr der weiteren Ausbreitung invasiver Arten, da diese häufig auf Verkehrsnebenflächen vorkommen und sich entlang der Verkehrswege ausbreiten. Nicht wenige dieser Arten kommen jetzt schon regelmäßig an mehreren Verkehrsträgern vor (z. B. Japanischer Staudenknöterich). Eine Bekämpfung an nur einem Verkehrsträger ist nicht zielführend, wenn verschiedene Verkehrswege parallel zueinander verlaufen. Die enge Zusammenarbeit mit SPT 202 wird auch in der zweiten Phase des BMVI-Expertenetzwerks wichtiger Bestandteil sein, um ein verkehrsträgerübergreifendes Managementkonzept zur Förderung der Biodiversität zu erstellen.

Auch wenn im operationellen Betrieb eine umfassende verkehrsträgerübergreifende Zusammenarbeit – ggf. auch unter Einbeziehung benachbarter Nutzer – zunächst schwer umzusetzen scheint, sollte zumindest das Bewusstsein auf allen Ebenen der beteiligten Behörden entwickelt werden, dass eine Berücksichtigung und gegebenenfalls Einbeziehung der Flächen und Expertise der anderen Verkehrsträger bei der Planung und Umsetzung eigener biodiversitätsfördernder Maßnahmen spürbare Synergien freisetzen könnte, sowohl finanziell als auch bei der naturschutzfachlichen Wirksamkeit. Die Durchsicht der verschiedenen vorliegenden Leitfäden und Arbeitshilfen zur Unterhaltungspflege von Verkehrsnebenflächen der drei Verkehrsträger zeigte, dass hierfür schon eine sehr große Zahl verkehrsträgerübergreifend nutzbarer Maßnahmen bekannt ist, auch wenn diese bisher nicht übergreifend angewandt werden. Einschränkungen ergeben sich hier vor allem aus den unterschiedlichen verkehrsträgerspezifischen Rechtsgrundlagen wie der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) an Bundeswasserstraßen oder dem Allgemeinen Eisenbahngesetz (AEG) bei der Schiene. Ein Abgleich der eigenen, hieraus erwachsenen Handlungskultur mit den anderen Verkehrsträgern, erscheint perspektivisch in allen Fällen sinnvoll.

Verkehrsnebenflächen als Lebensraum für geschützte und planungsrelevante Arten

Die Ergebnisse der ersten Phase zeigten, dass Verkehrsnebenflächen und z. T. auch die Verkehrsanlagen selbst mitunter einen geeigneten Lebensraum für geschützte oder planungsrelevante Arten bieten. Für keine der untersuchten Arten konnte eine indirekte Fallenwirkung festgestellt werden. Straßennebenflächen schienen keine Lockwirkung auf Vögel hinsichtlich potenzieller Bruthabitate auszuüben, da vergleichbare Habitate in der freien Landschaft bevorzugt besetzt wurden. Erst als die bevorzugten verkehrsfernen Habitate besetzt wurden, wichen die Mönchgrasmücken auf Verkehrsnebenflächen aus. Anpassungen im Gesang der Männchen deuteten allerdings darauf hin, dass die Verkehrswege die Tiere beeinflussen können. Diese schienen aber nicht nur von der Lage (straßennah/-fern), sondern auch von der Revierdichte abhängig zu sein. Negative Effekte auf den Bruterfolg oder eine gesteigerte Prädationsrate auf straßennahen Flächen sind nach den bisherigen Erkenntnissen nicht anzunehmen. Verkehrsnebenflächen könnten somit als zusätzliche Bruthabitate für bestimmte Arten fungieren.

Auch für die streng geschützte Haselmaus und den Hauhechel-Bläuling, dessen Bestände zurzeit stark rückläufig sind, ließen die genetischen Daten auf keine negativen Auswirkungen auf Populationsebene schließen. Die tendenziell kürzere Lebensdauer bei Individuen des Tagfalters auf Straßennebenflächen deutet allerdings auf eine Beeinflussung des Verkehrs hin. Schmetterlinge, wie viele andere flugfähige Insekten, reproduzieren sich schon in den ersten Tagen, nachdem sie geschlüpft sind. Populationswirksame Auswirkungen sind daher fraglich. Eine Aufwertung dieser Flächen, die durch ein verkehrsträgerübergreifendes Management zusätzlich die Vernetzung untereinander verbessern könnte, besitzt damit ein großes Potenzial, solchen schützenswerten Arten wertvolle Habitate zur Verfügung zu stellen, und könnte damit zur Erreichung der Ziele der Strategie zur vorbildlichen Berücksichtigung von Biodiversitätsbelangen auf allen Flächen des Bundes (StrÖff) und der Convention on Biological Diversity (CBD), der sich die Bundesregierung verpflichtet hat, beitragen. So werden in vielen Standorten in Deutschland derzeit Verkehrsnebenflächen durch spezielle Einsatz von Blühstreifen zur Förderung der Insekten aufgewertet (z. B. das Projekt "Bienen-

Highway" in Bayern). Inwieweit sich solche Aufwertungen von Verkehrswegen wirklich auf die (Insekten-)Fauna auswirken, bleibt allerdings abzuwarten. Die Ergebnisse des Untersuchungsraumes Hildesheim und die in der zweiten Phase des BMVI-Expertennetzwerks geplanten faunistischen Erfassungen in weiteren Untersuchungsräumen werden zur Beurteilung der Auswirkungen von Verkehrswegen auf die Fauna eine wichtige Rolle spielen.

Bei den Biotoptypen und Pflanzenarten, denen im Untersuchungsraum Aschaffenburg ein besonderes verkehrsträgerübergreifendes Vernetzungspotenzial zugeordnet werden konnte, handelt es sich vorwiegend um naturschutzfachlich mittelwertige häufige Strukturen (Feldgehölze, Grasland und Säume) und überwiegend weitverbreitete Pflanzenarten. Ihr Erhalt und ihre Förderung stellen jedoch eine ebenso integrale Komponente des Erhalts der Biodiversität der "Normallandschaft" dar, wie die meist stärker im Fokus stehenden Maßnahmen zum Schutz seltener und bedrohter Arten oder Lebensräume in Schutzgebieten. Nicht zu übersehen ist, dass im Untersuchungsraum Aschaffenburg neben den "Allerweltsarten" die im Gebiet nachgewiesenen gefährdeten Arten häufiger in den verkehrsnahen Flächen auftraten als in der Normallandschaft. Der hohe Strukturreichtum der Verkehrsnebenflächen schien zudem die verkehrsbedingt nicht optimalen Standortbedingungen soweit kompensieren zu können, dass in den besten Flächen (V-Plots) im Mittel nicht weniger Pflanzenarten pro Fläche gefunden wurden als in den artenreichsten verkehrsfernen Referenzflächen. Erhalt und Förderung der Biodiversität auf Verkehrsnebenflächen scheint also entscheidend von deren fachgerechten Anlage und Unterhaltung abzuhängen.

Über die Auswirkungen der regelmäßig notwendigen Pflege- und Instandhaltungsmaßnahmen auf die an den Verkehrswegen lebenden Tiere ist bisher wenig bekannt (BMVI 2017). Nicht selten führen die bei Bau- und Instandhaltung angewandten Maßnahmen bei einem Vorkommen von geschützten oder planungsrelevanten Arten zu Konflikten mit Naturschutzbehörden, wodurch sich Verzögerungen im Betriebsablauf und erhöhte Kosten für die Betreiber ergeben. Das Vorkommen solcher Arten mit besonderem Schutzstatus birgt ein hohes Konfliktpotenzial, da bei nahezu allen Bauvorhaben und Instandhaltungsmaßnahmen die Belange des Artenschutzes mit zu berücksichtigen

sind. Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich aus fehlenden Kenntnissen darüber, ob und inwieweit diese Vorhaben solche Arten negativ beeinträchtigen. Am Beispiel der Zauneidechse konnte gezeigt werden, dass sogar ein stark invasiver Eingriff durch eine Instandhaltungsmaßnahme die Population nicht auslöschen konnte. Da bereits geringe Störungen bei den Tieren ein Fluchtverhalten auslösten, wichen die Tiere wahrscheinlich in die angrenzenden Flächen aus. Solche fundierten Untersuchungen über die Auswirkungen von Pflege- und Instandhaltungsmaßnahmen haben eine hohe Relevanz für die Praxis. So können und konnten bereits die Erkenntnisse aus dem hierdurchgeführten Projekt direkt von der DB bei der Kommunikation mit Naturschutzbehörden genutzt werden, um damit Verzögerungen bei solchen Maßnahmen zu vermeiden, Kosten zu sparen und frühzeitig Planungssicherheit zu schaffen.

In den vorliegenden Praxisleitfäden zur Grünpflege an Straße, Schienen und Wasserstraße finden sich zudem viele, teilweise rechtlich verbindliche Maßnahmen für die naturverträgliche und damit biodiversitätsförderliche Unterhaltung von Verkehrsnebenflächen. Sie sind sogar größtenteils verkehrsträgerübergreifend anwendbar und stehen nicht grundsätzlich im direkten Konflikt mit den sicherheitstechnischen oder wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der einzelnen Verkehrsträger, oder sie sind diesen sogar förderlich. Große Potenziale der Förderung von Biodiversität und struktureller Lebensraumvielfalt ergeben sich beispielsweise aus einer räumlich und zeitlich gestaffelten Durchführung von Pflegearbeiten, um den dort vorkommenden Tierarten die Flucht in gleichwertige Nachbarbiotope zu ermöglichen, das Zulassen beobachten der Unterhaltung von Gehölzbeständen sowie der Verzicht des Mulchens von Flächen zugunsten der Mahd mit zeitlich versetzter Abnahme des Mähguts. In der 2. Phase des BMVI-Expertennetzwerks ab 2020 wird ein, die bisher gewonnenen Erkenntnisse berücksichtigendes, prototypisches verkehrsträgerübergreifendes Managementkonzept erprobt. Die Zustimmung der zuständigen durchführenden Stellen vorausgesetzt, sind hierfür die beiden Untersuchungsräume in Aschaffenburg und Hildesheim vorgesehen.

Durch die Anlage bzw. das Zulassen von biodiversitätsrelevanten Lebensräumen oder Strukturen wie Totholz oder kleinen Feuchtbiotopen ließe sich die Bedeutung der

Verkehrsnebenflächen als Lebensraum für seltenere und geschützte Arten, aber auch für die "Allerweltsflora und -fauna" spürbar erweitern. Wie für den Hamburger Hafen dargestellt, sind Biotoptypen mit eigendynamischer Entwicklung wie Sandtrockenrasen oder Pioniergehölze selten geworden. Gründe hierfür sind neben dem stetig anhaltenden Strukturwandel, der Tendenz hin zu stärker versiegelten und gärtnerisch gepflegten Flächen, dem Nähr- und Schadstoffeintrag auch eine Unterhaltungskultur, die das Auftreten geschützter und anderer planungsrelevanter Arten auf Verkehrsnebenflächen nicht fördert. Aus vielen Gesprächen mit verschiedenen Akteuren wurde ersichtlich, dass eine Rechtsgrundlage geschaffen werden sollte, um weiterreichende biodiversitätsfördernde Maßnahmen auf Verkehrsnebenflächen planerisch überhaupt erst zu ermöglichen, ohne andere gesetzliche Vorgaben, insbesondere zum Erhalt der Verkehrssicherheit, zu verletzen. Dieser unter dem Begriff "Natur auf Zeit" vereinigte Themenkomplex ist – in Ermangelung eines gültigen Rechtsrahmens – bisher in keinem der vorliegenden Arbeitshilfen und Praxisleitfäden zur Grünpflege berücksichtigt und wird in der zweiten Phase des BMVI-Expertennetzwerks (2020–2025) eine besondere Rolle auch bei der Weiterentwicklung des verkehrsträgerübergreifenden Managementkonzepts zur Biodiversitätsförderung spielen. Hierbei sollen insbesondere die Betroffenheit und Anwendbarkeit einer möglichen zu schaffenden Natur-auf-Zeit-Regelung auf Verkehrsnebenflächen ermittelt werden.

Bedeutung und Nutzen für die Verkehrsverwaltung

Wissen: Die Ergebnisse des Schwerpunktthemas 201 betonen das ökologische Potenzial von Verkehrsnebenflächen für viele Tier- und Pflanzenarten. Insbesondere zeigen sie deutlich, dass die verkehrsbegleitenden Grünflächen (Ersatz-)Lebensraum- und Vernetzungsfunktionen übernehmen können, obwohl die bekannten negativen ökologischen Wirkungen der Verkehrswege, vor allem im Bereich der Landschaftszerschneidung, weiter Bestand haben. Wichtige Zielbiotope zur Lebensraumvernetzung wurden identifiziert und es wurde gezeigt, dass die ökologische Attraktivität dieser Flächen nicht unbedingt eine Fallenwirkung für verschiedene geschützte oder planungsrelevante Arten entfaltet. Zudem zeigte sich, dass selbst stark invasive, für den Erhalt der Funktionsfähigkeit und Sicherheit der Verkehrswege notwendige Unterhaltungsmaßnahmen

keine unmittelbar detektierbaren Auswirkungen auf Populationen haben müssen. Dieses Wissen kann als wichtige Argumentationshilfe zur Herstellung des Benehmens oder Einvernehmens mit dem Naturschutz genutzt werden und schafft damit zusätzliche Planungssicherheit bei der zügigen Umsetzung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen.

Können: Die Ergebnisse zum Status Quo der Verkehrsnebenflächen zeigen, dass das schon vorhandene Können in der Unterhaltung, wie es in den verschiedenen Leitfäden und Arbeitshilfen dokumentiert ist, bei richtiger Anwendung fähig ist, einen wertvollen Beitrag zum Erhalt der Biodiversität zu liefern. Ein gezielt ausgerichtetes Unterhaltungshandeln ist also heute schon in der Lage, ökologische Werte zu schaffen. Es zeigte sich jedoch auch, dass hier noch viel Potenzial zur Verbesserung besteht, da es noch große Unterschiede in der Qualität der einzelnen Flächen gibt.

Handeln: Die Untersuchungen machen zudem deutlich, dass es, der Unterschiedlichkeit der drei Verkehrsträger zum Trotz, gut nutzbare Gemeinsamkeiten zwischen den auf Verkehrsnebenflächen an Straßen, Schienen und Wasserstraßen vorkommenden Grünflächen gibt. Der Vergleich der vorhandenen Leitfäden für die Unterhaltung dieser Flächen zeigt, dass es eine große Menge geeigneter Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität gibt, die verkehrsträgerübergreifend angewandt werden können. Das Wissen darum ist bei den einzelnen Verkehrsträgern jedoch ungleich verteilt. Dies gilt auch für mögliche Kostenersparnisse, die sich aus einem reduzierten Unterhaltungsaufwand ergeben können. Es obliegt deshalb den Verkehrsverwaltungen, Möglichkeiten der Förderung von Biodiversität und struktureller Lebensraumvielfalt zu nutzen und diese nicht isoliert für jeweils einen Verkehrsträger durchzuführen, sondern sie im gesamtlandschaftlichen Kontext des zur Verfügung stehenden Verkehrsnetzes zu erschließen.

2.1.6 Verwertung der Ergebnisse

Fundierte Untersuchungen über die Auswirkungen von Pflege- und Instandhaltungsmaßnahmen haben eine hohe Relevanz für die Praxis. So können und konnten bereits die Erkenntnisse aus dem Schlussbericht "Auswirkungen von

Instandhaltungsmaßnahmen im Gleisbett der Bahn auf Zaun- und Mauereidechsen-Populationen" direkt bei der Kommunikation mit Naturschutzbehörden (z. B. Untere Naturschutzbehörde Tuttlingen) als Bewertungsgrundlage bei der Festsetzung der Auflagen zur Durchführung einer Schotterreinigung herangezogen werden.

Die Ergebnisse der Biodiversitätskartierungen im Untersuchungsraum Aschaffenburg konnten für die Planungen zum Neubau der Staustufe Obernau genutzt werden.

Projektberichte:

Einige Forschungsvorhaben liegen bereits als Abschluss- bzw. Zwischenberichte vor. Diese und die zur Zeit in Vorbereitung befindlichen Berichte werden sukzessive online verfügbar gemacht, um so für die Anwender in Behörden, Politik, Wissenschaft und der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stehen.

ANUVA Stadt- und Umweltplanung KG (2018): Minderung der indirekten Fallenwirkung für Tiere in Straßenseitenräumen. Zwischenbericht. 107 Seiten.

Baader Konzept GmbH (2018): Biodiversität und Ausbreitung gebietsfremder Arten auf Verkehrsnebenflächen. Das Potenzial von Verkehrsnebenflächen zur Förderung der Biodiversität und ihre Rolle bei der Ausbreitung gebietsfremder Arten – Untersuchungsraum Aschaffenburg. Teilbericht Arbeitspaket 1: Biotopypenkartierungen. 150 Seiten.

Baader Konzept GmbH (2018): Biodiversität und Ausbreitung gebietsfremder Arten auf Verkehrsnebenflächen. Das Potenzial von Verkehrsnebenflächen zur Förderung der Biodiversität und ihre Rolle bei der Ausbreitung gebietsfremder Arten – Untersuchungsraum Aschaffenburg. Teilbericht Arbeitspaket 2: Erfassung der pflanzlichen Biodiversität. 209 Seiten.

Baader Konzept GmbH (2019): Biodiversität und Ausbreitung gebietsfremder Arten auf Verkehrsnebenflächen. Das Potenzial von Verkehrsnebenflächen zur Förderung der Biodiversität und ihre Rolle bei der Ausbreitung gebietsfremder Arten – Untersuchungsraum Aschaffenburg. Teilbericht Arbeitspaket 3: Faunistische Erhebungen. 347 Seiten.

Baader Konzept GmbH (2019): Biodiversität und Ausbreitung gebietsfremder Arten auf Verkehrsnebenflächen. Das Potenzial von Verkehrsnebenflächen zur Förderung der Biodiversität und ihre Rolle bei der Ausbreitung gebietsfremder Arten – Untersuchungsraum Aschaffenburg. Gesamtbericht. 95 Seiten.

DZSF/EBA (2018): Abschlussbericht: Auswirkungen von Instandhaltungsmaßnahmen im Gleisbett der Bahn auf Zaun- und Mauereidechsen-Populationen, Bonn. Download unter: https://www.dzsf.bund.de/Shared-Docs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/EBA_Forschungsbericht_2018-10.html

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

Esser, D.S.; Nagel, K.O.; Bartels, P.; Leiblein-Wild, M.; Sundermeier, A. (2018): Ecological permeability along and across traffic routes in an intermodal transport environment IENE 2018 International Conference – Abstract book, ISBN 978-91-639-8714-4.

Bartels, P. (2019): Umgang mit Problemarten auf Verkehrsnebenflächen. FGSV Landschaftstagung, Tagungsband.

Wissenschaftliche Beiträge zu Fachkonferenzen:

Die Ergebnisse der Forschungsvorhaben wurden sowohl national als auch international auf einer Reihe von Fachtagungen und Workshops präsentiert. Beispiele hierfür sind: Infra Eco Network Europe (IENE) 2018, FGSV Landschaftstagung 2019, DB Fachtagung Naturschutz 2017 und 2019 und Road Expo Mongolia 2019.

2.2 Entwicklung praxisorientierter und präventiver Strategien zur Kontrolle und Minimierung der Beeinträchtigung durch Neobiota (SPT 202)

Dr. Pia Bartels (BASt), Dr. Katja Broeg (BSH), Dr. Daniel Esser (BfG), Dr. Nicole Heibeck (BfG), Dr. Marion Leiblein-Wild (DZSF/EBA, SPT-Koordinatorin), Dr. Andreas Sundermeier (BfG), Mariusz Zabrocki (BSH)

2.2.1 Motivation

Neobiota sind gebietsfremde Arten, die durch menschliches Zutun in Gegenden eingebracht werden, die sie aus eigener Kraft nicht erreichen würden. Neobiota-Arten, die Probleme verursachen, zählen zu den sogenannten "invasiven Arten" (IAS). Die Ausbreitung von IAS gilt als eine der größten Gefahren für die einheimische Biodiversität (Tilman et al. 2017). Zudem beeinträchtigen einige dieser Arten die menschliche Gesundheit (Pyšek & Richardson 2010) oder verursachen wirtschaftliche Schäden. Insgesamt führen invasive Arten zu Kosten von mehreren Milliarden Euro pro Jahr innerhalb der EU (Kettunen et al. 2009). Aufgrund der globalisierungsbedingt zunehmenden Handelsströme und des Klimawandels wird zukünftig mit einer Zunahme der durch IAS verursachten Probleme gerechnet (Kleinbauer et al. 2010, Lenda et al. 2014, van Valkenburg et al. 2014, Early et al. 2016).

Die Verhinderung der Einschleppung und Verbreitung von IAS und ihre Bekämpfung bzw. die Minderung der damit verbundenen Gefahren ist Gegenstand internationaler Vereinbarungen, z. B. der Biodiversitätskonvention (CBD 1992) oder der Internationalen Seerechtskonvention (UN 2013). Auch ist die Bekämpfung von IAS Teil der nationalen Biodiversitätsstrategie (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2007) und in der Gesetzgebung verankert. Zu nennen sind hier insbesondere die EU-Verordnung Nr. 1143/2014 (EU-IAS), das im September 2017 geänderte Bundesnaturschutzgesetz (§ 40 BNatSchG) sowie das Ballastwasser-Übereinkommen (das internationale Übereinkommen von 2004 zur Kontrolle und Behandlung von Ballastwasser und Sedimenten von Schiffen).

IAS und deren negative Auswirkungen sind also ein gesamtgesellschaftliches Problem, bei dessen Bewältigung sektorenübergreifend zusammengearbeitet werden muss. Den Verkehrsträgern kommt hierbei eine besondere Rolle zu, da sie Einschleppungs- und Verbreitungsvektoren für verschiedene Arten sein können (Hulme et al. 2009). Darüber hinaus stellen Verkehrswege und -nebenflächen potenzielle Ansiedlungsräume und Ausbreitungspfade für viele IAS dar.

2.2.2 Ziele

Der Kenntnisstand zu Neobiota und hier insbesondere zu invasiven Arten im Relevanz- und Verantwortungsbereich der Verkehrsträger war zu Beginn des BMVI-Expertenetzwerks lückenhaft und sehr heterogen bezogen auf die einzelnen Verkehrsträger. Die meisten invasiven Arten sind jedoch nicht auf einen einzelnen Verkehrsträger beschränkt, sondern finden entweder im direkten Umfeld von mehreren Verkehrsträgern geeignete Lebensbedingungen vor oder können während des Transports von Gütern und Passagieren von einem auf den anderen Verkehrsträger wechseln. Ein Beispiel für eine für den Verkehrssektor relevante Art ist die Asiatische Tigermücke, die ein Gesundheitsrisiko für die Bevölkerung darstellen kann und die durch Lkw, die Rollende Landstraße⁷ und private Pkw nach Deutschland eingebracht wird. Eine ganzheitliche Betrachtung, die alle Verkehrsträger und deren Schnittstellen einbezieht, ist daher dringend notwendig.

Das Ziel der Forschungstätigkeiten in diesem Schwerpunktthema ist es daher, das für den Verkehrssektor notwendige Wissen zu generieren, um die Einwanderung problematischer Neobiota präventiv zu vermeiden und bereits vorhandene invasive Arten effektiv und effizient zu beseitigen bzw. zu kontrollieren.

Gemäß der Roadmap 2030 des Themenfeldes 2 (BMVI-Expertenetzwerk 2018) wurden für SPT 202 für die erste Phase des BMVI-Expertenetzwerks folgende Ziele festgelegt:

⁷ Transportsystem für den begleiteten kombinierten Verkehr auf der Schiene, bei dem komplette Lastwagen bzw. Sattelzüge per Bahn befördert werden.

- I. **Identifizierung der für die Verkehrsträger relevanten Artengruppen und Pfade der Einfuhr und Ausbreitung**
- II. **Bereitstellung verkehrsträgerübergreifender Managementoptionen zur Minimierung der Auswirkungen bereits eingeschleppter Arten**
- III. **Modellierung der potenziellen Ausbreitung von invasiven Neobiota durch Verkehrsträger**
- IV. **Entwicklung eines Konzepts zur rechtzeitigen Erkennung sowie präventiven Minimierung des Eintrags von invasiven Neobiota durch verschiedene Verkehrsträger**

2.2.3 Herangehensweise und Teilprojekte

Um die unter Kapitel 2.2.2 genannten Ziele zu erreichen, wurden in der 1. Phase des BMVI-Expertenetzwerks verschiedene Teilprojekte durchgeführt. Dabei wurden terrestrische, limnische und marine Lebensräume betrachtet. Das verwendete Methodenspektrum war breit gefächert und reichte von Literatur- und Datenbankanalysen über empirische Untersuchungen, Umfragen bei Anwendern und Nutzern bis hin zur Neuentwicklung von Prognose-Tools.

Insgesamt wurden die folgenden Teilprojekte bearbeitet:

2.2.3.1 Projekt 1: Modellierung der Einfuhr und Verbreitung von invasiven Arten durch und entlang von Verkehrsträgern

Im Rahmen dieser Studie wurde ein R-basiertes Computermodell (CASPIAN) entwickelt, welches die Ausbreitung und Etablierung von Neobiota über die Verkehrsträger deutschlandweit simuliert. Das Modell berücksichtigt alle relevanten Ausbreitungsmechanismen, die mit dem Verkehr assoziiert sind. Dies beinhaltet i) die Nutzung von Infrastrukturelementen als Wanderkorridore, ii) die Ausbreitung über die Anheftung an Transportmittel wie Personenkraftwagen, Lastkraftwagen, Züge und Schiffe, iii) die Ausbreitung durch Fahrtwind und iv) die Ausbreitung mit Gütern in Containern und Paletten. Das Modell ermöglicht sowohl

die Simulation der Ausbreitung einzelner Arten als auch die Quantifizierung und Darstellung der generellen Hauptrou-ten der Ausbreitung und Schwerpunkte der Vorkommen in Deutschland. Letzteres wird durch die Berechnung aller wahrscheinlichen Routen der Ausbreitung für verschiedene Verkehrsträger möglich.

2.2.3.2 Projekt 2: Umfragen zu vorhandenen Neobiota sowie IAS und durch diese verursachten Problemen im Bereich der Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasserstraße)

Innerhalb dieses Projekts wurden Informationen zum Vorkommen von IAS, etwaigen Schäden und bereits angewendete Managementmaßnahmen in einer Reihe von Umfragen (Fragebögen, LimeSurvey, LamaPoll) für die Verkehrsträger Straße, Schiene sowie See- und Binnenwasserstraßen bei den zuständigen Betriebsdiensten und weiteren relevanten Nutzergruppen erhoben. Die Umfragebögen wurden deutschlandweit an alle Straßen- und Autobahnmeistereien, Regionalbereiche der DB und Außenbezirke der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltungen des Bundes (WSV) sowie an zahlreiche Hafenbehörden und Vereine (Wassersport) versandt und bezogen sich auf das Vorkommen von ausgewählten IAS an Bundesfernstraßen, Schienen sowie See- und Binnenwasserstraßen und die durch solche Arten verursachten Probleme, Auswirkungen und Management-Erfordernisse für die Verkehrsträger. Die Ergebnisse schließen im Vorwege identifizierte Wissenslücken in den jeweiligen Bereichen und dienen als wichtige Grundlage für die Bewertung und Entwicklung vorhandener und zukünftiger Maßnahmen zur Kontrolle von IAS im Verkehrssektor.

2.2.3.3 Projekt 3: Untersuchung des Bioaufwuchses (Biofouling) verschiedener Schiffs- und Bootstypen

Ziel der Studie war es, die bislang in Deutschland noch wenig erforschte Rolle des Biofoulings im Binnenschifffahrtsbereich für die Einschleppung und Verbreitung von IAS zu ermitteln. Dafür wurden Binnenschiffe unterschiedlicher Größe und Funktion in verschiedenen Werften an Rhein, Main, Mosel und Neckar auf ihren Bewuchs untersucht. Außerdem wurden 121 Sportboote in Binnen- und Küsten-

gewässern der Ostsee hinsichtlich ihres Bewuchses und des individuellen Pflege- und Nutzungsregimes (zeitgleiche Befragung des Schiffseigners) untersucht. Parallel dazu wurden in ausgewählten Marinas Bewuchsplatten ausgebracht, um einen Überblick über die Unterschiede im Bewuchsdruck zwischen Süß- und Brackwasser zu bekommen.

2.2.3.4 Projekt 4: Untersuchung der Bedeutung von Ballastwasser als potenzieller Pfad in der Binnenschifffahrt

Im Gegensatz zur Seeschifffahrt, in der die signifikante Rolle von Ballastwasser als Pfad für die Einschleppung und Ausbreitung von Neobiota intensiv untersucht und nachgewiesen wurde (z. B. Lenz 1996, Gollasch 2002, Flagella & Abdulla 2005, Hewitt et al. 2009, Sylvester, Kalaci et al. 2011, Gittenberger, Wesdorp et al. 2017), wurde bislang im Bereich der Binnenschifffahrt die Rolle des Ballastwassers für die potenzielle Verbreitung von Arten in deutschen Wasserstraßen nicht betrachtet. Darüber hinaus gibt es generell keine Daten über die Verwendung von Ballastwasser in der Binnenschifffahrt. Die erste Einschätzung der Ballastwassernutzung und des Potenzials von Berufsschiffen in der Binnenschifffahrt als Vektor für die Ausbreitung nicht-einheimischer Arten wurde mittels eines Fragebogens, der in sechs Sprachen übersetzt und an sieben Schleusen ausgelegt wurde, erfasst.

2.2.3.5 Projekt 5: Hafenuntersuchungen zur Erfassung von Neobiota nach regional abgestimmtem Protokoll

Mit dem Ballastwasser der internationalen Seeschifffahrt wurden problematische Wasserorganismen und Pathogene weltweit in neue Ökosysteme eingebracht. Verhindert werden soll dies durch die Umsetzung des Ballastwasser-Übereinkommens (BWÜ), welches auch die Möglichkeit von Befreiungen von der Ballastwasserbehandlung vorsieht, wenn durch eine Risikoanalyse die Unbedenklichkeit von Reisen zwischen zwei Häfen nachgewiesen wird. Die Risikobewertung umfasst u. a. die Durchführung von Hafenuntersuchungen, sog. "Port Surveys", nach der regional abgestimmten Joint Harmonized Procedure (JHP). Nach diesem Protokoll wurden erstmalig Untersuchungen in vier deutschen Häfen (Hamburg, Kiel, Cuxhaven und Jade-WeserPort) durchgeführt und eine Liste von nicht-einhei-

mischen Arten erstellt. Diese dient auch zur Identifizierung von Hotspots der Einschleppung und der Verbreitung von Neobiota im Übergangsbereich von Meer-, Brack- und Süßwasser. Daneben fand die praktische Überprüfung und die Erarbeitung von Vorschlägen zur Verbesserungen des JHP-Protokolls statt.

2.2.3.6 Projekt 6: Risikobewertung der für die Schiene kritischen invasiven Arten sowie Entwicklung einer Methodik zur Erfassung des Invasionspotenzials für (terrestrische) Verkehrsträger

Ziel dieser Studie war es, diejenigen invasiven und potenziell invasiven Arten zu ermitteln, die für den Verkehrsträger Schiene, speziell in Deutschland, bereits relevant sind oder in Zukunft relevant werden können. Hierfür wurde eine Methodik entwickelt, mit deren Hilfe das Invasionspotenzial eingewanderter Arten für den Verkehrsträger Schiene relativ leicht ermittelt werden kann. Die Methodik basiert auf fünf Kriterien und wurde auf 123 invasive Arten angewendet. Als Ergebnisse liegen für alle Arten nun umfangreiche Datenblätter vor, aus denen das schienenspezifische Invasionsrisiko hervorgeht. Für alle IAS, für die ein sehr hohes Invasionsrisiko ermittelt wurde, enthalten die Datenblätter zusätzliche Angaben zu verbundenen Risiken für die menschliche Gesundheit, zu möglichen ökonomischen Schäden sowie zu möglichen Bekämpfungsmaßnahmen. Die Methodik kann für die anderen Verkehrsträger angepasst werden.

2.2.3.7 Projekt 7: Aufbau eines Neobiota-Informationssystems (NIS-DE)

Im Rahmen der unter Punkt 2.2.1 genannten gesetzlichen Vorgaben, die nicht-einheimische Arten (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (EU-MSRL)), gefährliche Wasserorganismen und Pathogene (BWÜ) und IAS (EU-IAS) betreffen, und den damit verbundenen Anforderungen, werden bereits heute große Datenmengen in Form von Monitoringdaten und Artenlisten generiert. Diese werden aufgrund der unterschiedlichen Zuständigkeiten (verschiedene Länderministerien, Bundesministerien und -behörden

und ihre jeweiligen nachgeordneten Behörden) bislang allerdings dezentral abgelegt. Der Informationsfluss vom Erfasser bis zum Endnutzer ist oftmals unterschiedlich und lückenhaft, in vielen Fällen fehlt er gänzlich. Eine Bearbeitung von Anfragen ist zeitaufwendig und bindet Ressourcen. Die wesentlichen Ziele des Neobiota-Informationssystems (NIS-DE) sind die Zusammenführung von Daten, die Entwicklung von automatisierten Arbeitsschritten, die automatisierte Erstellung von definierten Produkten und ein direkter Informationsfluss bei Neueinschleppungen.

2.2.3.8 Projekt 8: Bewertung des Einschleppungs- und Vermehrungspotenzials der Asiatischen Tigermücke (*Aedes albopictus*) an Bahnhöfen und Umschlagpunkten in Deutschland

Die Asiatische Tigermücke ist eine gesundheitsrelevante invasive Stechmückenart, die in den letzten Jahren vornehmlich in der Umgebung von Bahnhöfen und Autobahnraststätten aufgetreten ist. Im Rahmen dieses Projektes werden verschiedene Bahnhofstypen und Umschlagpunkte auf das Vorhandensein potenzieller Stechmücken-Brutstätten untersucht. Darauf aufbauend werden das Einschleppungspotenzial im Bereich der Bahnanlagen und des kombinierten Verkehrs eingeschätzt sowie Maßnahmen zur Vermeidung der weiteren Einschleppung entwickelt. Das Projekt ist zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch nicht abgeschlossen (Laufzeit bis April 2020), weshalb die Ergebnisse erst zu einem späteren Zeitpunkt präsentiert werden.

2.2.3.9 Projekt 9: Vorkommen von Neobiota im Bereich der Verkehrsnebenflächen

In diesem Projekt wurden verkehrsträgerübergreifend Daten zu Vorkommen und Häufigkeit von Neophyten (gebietsfremde Pflanzenarten) in zwei Untersuchungsräumen (Aschaffenburg und Hildesheim) erhoben. Das Projekt ist eng mit den Fragestellungen von SPT 201 verknüpft und wird daher in Kapitel 2.1.3.1 dieses Berichts vorgestellt. Die Projektergebnisse zu Neophyten sind in Kap. 2.1.4.2 dieses Berichts zu finden.

2.2.4 Ergebnisse

2.2.4.1 Aktuell vorhandene und potenziell relevante Neobiota bei den Verkehrsträgern

Im terrestrischen Bereich bestätigen die Ergebnisse der Umfragebögen für die jeweiligen Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße (Projekt 2), dass die in Deutschland als invasiv bzw. potenziell invasiv eingestuften Arten (Nehring et al. 2013) auch entlang der Verkehrsträger regelmäßig vorkommen. Dabei verursachen allerdings nur einige dieser Arten Probleme für die Betriebsdienste. Die terrestrischen "Hauptproblemarten" für alle drei Verkehrsträger sind laut Umfrage die Herkulesstaude und der Japanische Staudenknöterich (Abbildung 14). Die Herkulesstaude verursacht hauptsächlich gesundheitliche Probleme, da sie schwere Verbrennungen auslösen kann. Der Staudenknöterich verursacht laut Umfrageergebnis an den Bundesfernstraßen und an Bahnlinien vorwiegend Sichtbehinderungen und einen erhöhten Pflegeaufwand. An der Schiene führt er zusätzlich zu Bauwerksschäden. An den Bundeswasserstraßen führten die Teilnehmer vor allem Erosionsschäden und eine Verdrängung der heimischen Flora auf. An Bahnlinien verursachen Robinie, Götterbaum und

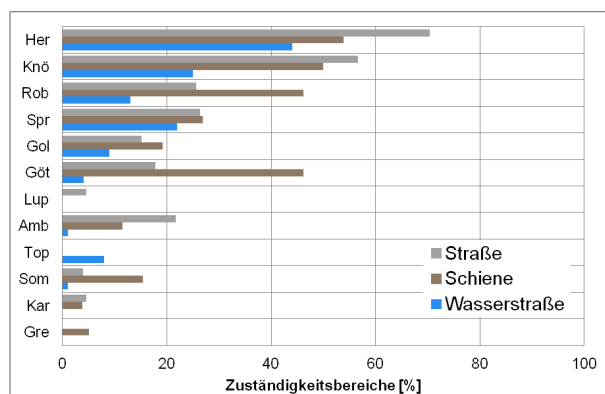


Abbildung 14: Anteil der Zuständigkeitsbereiche, in denen die aufgeführten Arten Probleme verursachen. Robinie, Götterbaum, Beifuß-Ambrosie und Sommerflieder wurden von den Teilnehmern der WSV zusätzlich als problemverursachende Arten aufgeführt. Her = Herkulesstaude, Knö = Staudenknöterich, Rob = Robinie, Spr = Indisches Springkraut, Gol = Goldrute, Göt = Götterbaum, Lup = Lupine, Amb = Beifuß-Ambrosie, Top = Topinambur, Som = Sommerflieder, Kar = Kartoffelrose, Gre = Schmalblättriges Greiskraut. Straße: N = 304, Schiene: N = 26, Wasserstraße: N = 96.

Sommerflieder in deutlich mehr Zuständigkeitsbereichen Probleme (erhöhter Pflegeaufwand, Sichtbehinderungen, Bauwerksschäden) als bei den anderen Verkehrsträgern. Die Beifuß-Ambrosie führt vor allem an Bundesfernstraßen häufig zu gesundheitlichen Problemen.

Im aquatischen Bereich (Projekt 2) zeigt sich, dass für alle der 23 vorgegebenen Arten von Problemen berichtet wurde, allerdings zum Teil nur von einzelnen Befragten. Am häufigsten wurden neben dem Schiffsbohrwurm die bekannten Krebsarten Signalkrebs und Kamber-Krebs sowie Wasserpest und Bisamratte genannt (Abbildung 15). Bei den Problemen handelte es sich primär um ökologische Störungen.

In allen untersuchten Häfen (Hamburg, Kiel, Cuxhaven und JadeWeserPort) wurden auch sogenannte "Target Species" gefunden, die bekannt dafür sind, Schäden zu verursachen und somit relevant sind für die Risikobewertung im Rahmen von Befreiungen vom BWÜ (Projekt 5). Alle vier Häfen können somit als "Hotspots" für Einschleppung und Verbreitung von problematischen Arten angesehen werden. Darüber hinaus konnte durch die verkehrsträgerübergreifende Zusammenarbeit im BMVI-Expertennetzwerk in Zusammenhang mit der Entdeckung des Röhrenwurmes *Laonome xeprovala sp. nov.* (Bick et al. 2018), der sowohl im Hamburger Hafen (2017) als auch in der Mosel (2019) erstmalig entdeckt wurde, ein direkter Nachweis dafür gefunden werden, dass Verbreitungen über den Schifffahrtsweg vom See- in den Binnenverkehr stattfinden können.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Thematik der invasiven Arten in Zukunft im Verkehrsträgerbereich noch mehr an Bedeutung gewinnen wird. Neben den aktuell schon (häufig) vorkommenden invasiven Arten existiert eine Vielzahl von als invasiv eingestuften Arten, die in Deutschland noch nicht oder nur vereinzelt vorkommen. Im Rahmen von Projekt 6 zeigte sich, dass von 123 als invasiv eingestuftem Arten gut die Hälfte ein sehr hohes oder hohes Invasionsrisiko für die Schiene besitzt (Abbildung 16). Da prognostiziert wird, dass die meisten IAS vom Klimawandel profitieren, ist davon auszugehen, dass der zu erwartende Invasionsdruck auf den Verkehrssektor noch weiter ansteigen wird.

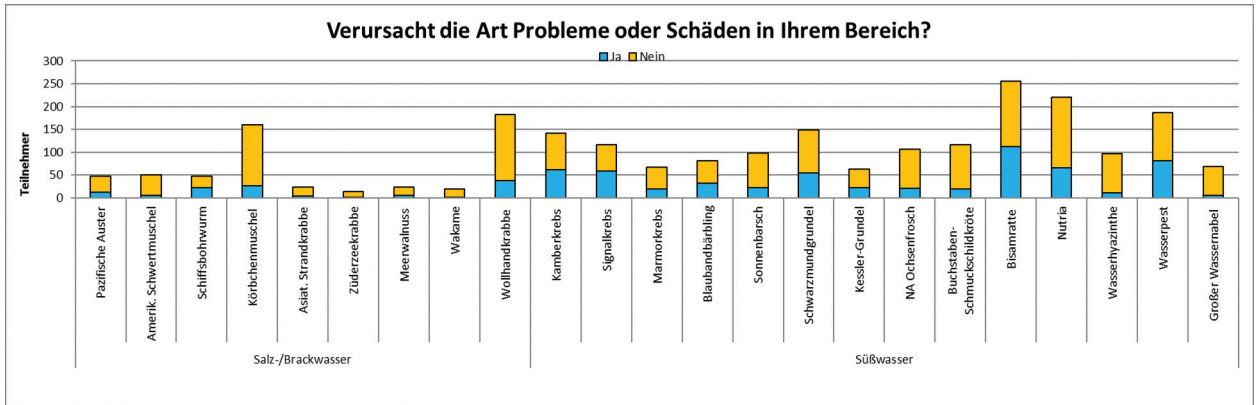


Abbildung 15: Prozentualer Anteil der Teilnehmer, die von durch Neobiota verursachten Problemen und/oder Schäden berichten. An der Umfrage "Invasive Arten und ihre Auswirkungen auf Wirtschaft, Gesundheit und Natur" haben insgesamt 292 Personen teilgenommen. Etwa 65% (n=190) der Befragten hatten einen beruflichen Bezug zum Thema Neobiota.

2.2.4.2 Potenzielle Ausbreitung von invasiven Neobiota durch Verkehrsträger

Bislang ist das Wissen um die Mechanismen der Einfuhr und Ausbreitung von IAS im Verkehrsträgerbereich zum Teil noch lückenhaft. Mit den in der 1. Phase des BMVI-Expertenetzwerk durchgeführten Untersuchungen konnten einige offene Fragen beantwortet und das Wissen um mögliche Pfade im Verkehrsträgerbereich und deren Relevanz erweitert werden.

Bei der Untersuchung des Bioaufwuchses von Berufsschiffen (Projekt 3) wurden viele bekannte und in Bundeswasserstraßen weit verbreitete Neobiota vorgefunden, z. B. *Dreissena rostriformis bugensis*, *Chelicorophium curvispinum*, *Chelicorophium robustum*, *Dikerogammarus haemobaphes*, *Dikerogammarus villosus*, *Echinogammarus ischnus*, *Jaera sarsi* und *Orchestia cavimana*. Von einer Ausbreitung dieser Arten durch den Bewuchs von Binnenschiffen ist daher auszugehen. Die Untersuchungen zeigten auch, dass lange Liegezeiten und ein unzureichen-

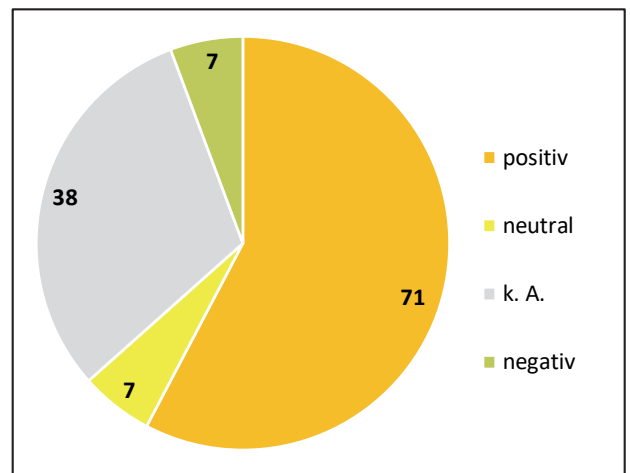
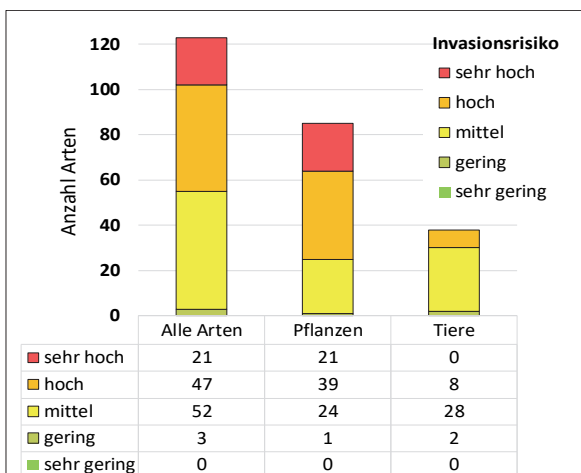


Abbildung 16: Links: Gesamtbewertung des Invasionsrisikos für alle IAS und ausgewählte Artengruppen für die Schiene; rechts: Anzahl der IAS, auf die sich laut Prognosen der Klimawandel positiv, neutral oder negativ auswirkt. k.A. keine Angaben.

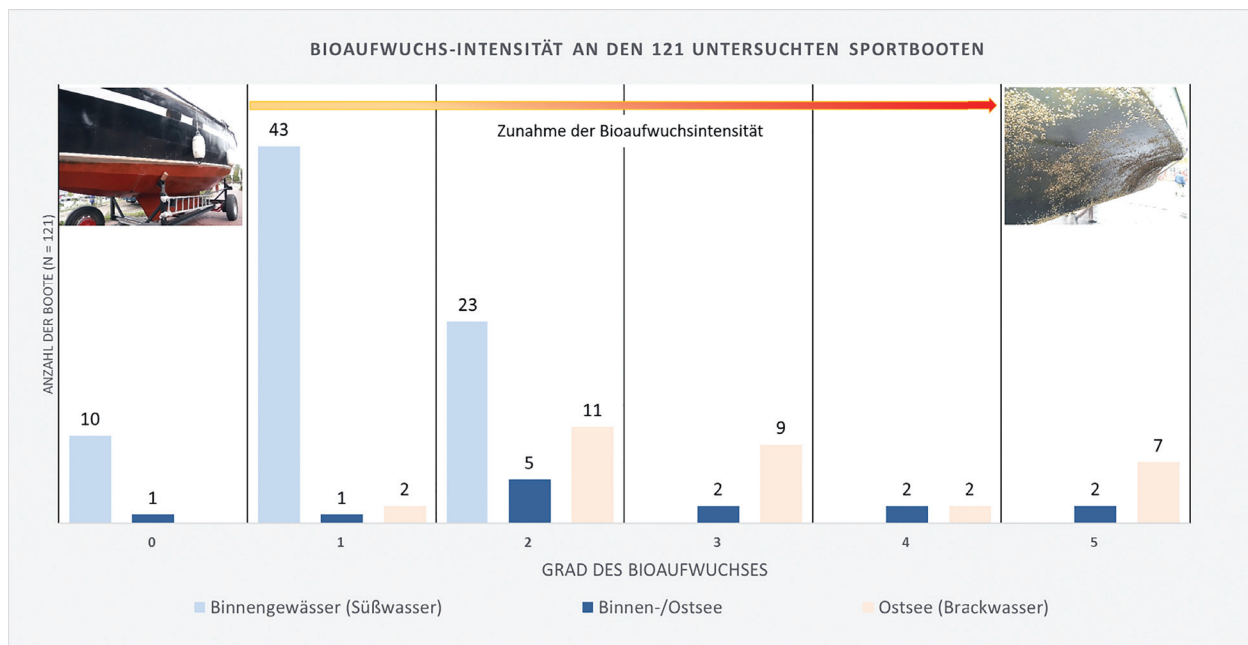


Abbildung 17: Dichte des vorgefundenen Bioaufwuchses auf 121 untersuchten Sportbooten gemessen in der sechsstufigen Biofouling-Skala nach Floerl et al. (2005). Die Sportboote wurden untersucht in Häfen an Main, Mosel, Main-Donau-Kanal (Binnengewässer (Süßwasser)) und im Ostseeraum (Foto: Mariusz Zabrocki, BSH).

des Biofouling-Management (Reinigung/Antifouling) den Bewuchs und somit das Risiko der Verbreitung der Arten in der Binnen- und Freizeitschifffahrt verstärken.

Bei der Untersuchung der Sportboote zeigte sich zudem, dass Boote, die nur im Süßwasser unterwegs waren, generell eine geringere Biofouling-Belastung (< 5 %) aufwiesen als Sportboote an der Ostsee (Abbildung 17). Bei den Sportbootbesitzern gaben durchschnittlich 90 % an, ihre Boote einmal im Jahr zur Winterpause zu reinigen. Der Großteil der befragten Bootsbesitzer (95 %) hatte sich allerdings noch nicht mit der Thematik Neobiota/invasive Arten beschäftigt.

Die Auswertung der Fragebögen (N=292) zur Verwendung von Ballastwasser im Binnenbereich (Projekt 4) ergab, dass Ballastwasservorgänge in der Binnenschifffahrt stattfinden. Etwa 65 % der Teilnehmer haben die Frage, ob sie Ballastwasser nutzen, mit "Ja" beantwortet (Abbildung 18). Schiffe, die Kanäle passieren, nutzen hierbei deutlich häufiger Ballastwasser (Abbildung 18). Je nach Schleuse gaben bis zu 91 % der Befragten an, Ballastwasser zu nutzen. Orte, an denen

Ballastwasserabgabe stattfindet, stellen somit potenzielle Hotspots des Eintrages von Neobiota dar.

Zur Prognose möglicher Ausbreitungsrouten und Ausbreitungsgeschwindigkeit von IAS speziell durch die Verkehrsträger wurde im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks eine erste Version eines Ausbreitungsmodells (CASPIAN) zur Modellierung der Ausbreitung von IAS durch die Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserstraße erstellt (Projekt 1). Das Modell basiert auf der Programmiersprache "R" und berücksichtigt wesentliche Ausbreitungsmechanismen, die mit dem Verkehr assoziiert sind.

Das kalibrierte Modell erlaubt die Berechnung der Ausbreitungswahrscheinlichkeit von jedem Punkt in Deutschland zu jedem anderen Punkt über die entsprechenden Verkehrsträger. Das Modell ermöglicht sowohl die Simulation der Ausbreitung einzelner Arten als auch die Quantifizierung und Darstellung der generellen Haupttrouten der Ausbreitung und Schwerpunkte der Vorkommen in Deutschland (Abbildung 19). Letzteres wird durch die Berechnung aller wahrscheinlichen Routen der Ausbreitung für ver-

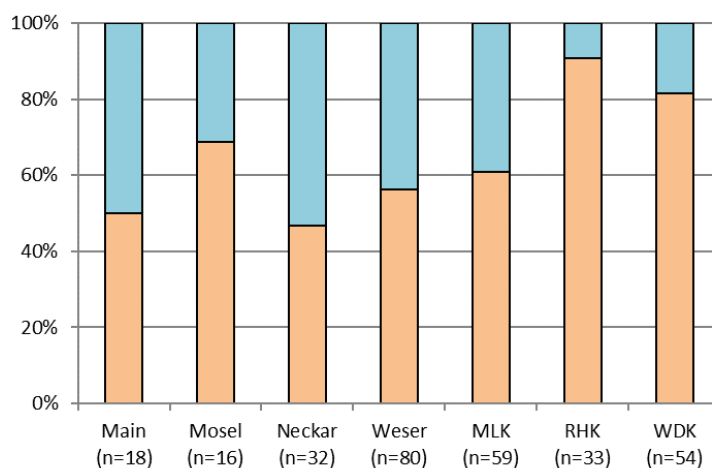
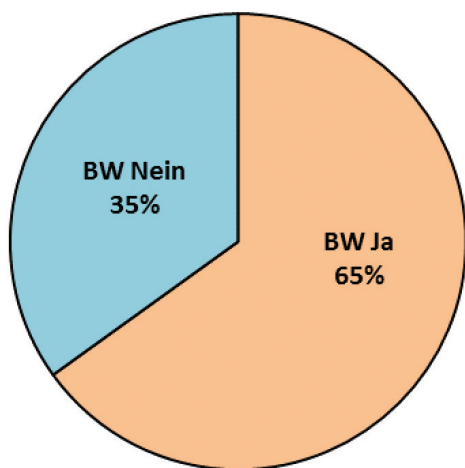


Abbildung 18: Links: Ein Großteil der Binnenschiffe nutzt Ballastwasser im Alltagsbetrieb. Rechts: Ergebnisse aufgeteilt nach Wasserstraße. MLK = Mittellandkanal, RHK = Rhein-Herne-Kanal, WDK = Wesel-Datteln-Kanal.

schiedene Verkehrsträger möglich. Die Modellergebnisse wurden in einer Analyse der kürzesten Routen verwendet, um die häufigsten Ausbreitungsrouten innerhalb Deutschlands über verschiedene Transportnetzwerke und von verschiedenen Startpunkten zu ermitteln.

Im Rahmen der Studie wurden auch mögliche Umschlagpunkte ermittelt, d. h. die geografischen Orte, an denen Arten potenziell die Möglichkeit haben, den Verkehrsträger zu wechseln. Es zeigte sich, dass schon allein für die beiden Verkehrsträger Straße und Schiene insgesamt 327.806 Umschlagpunkte vorhanden sind, also eine Vielzahl an Möglichkeiten, an denen der Wechsel von IAS von einem auf den anderen Verkehrsträger erfolgen kann.

2.2.3.4 Möglichkeiten der Früherkennung und Prognose zur Prävention der Einfuhr und Verbreitung von IAS durch Verkehrsträger

Insgesamt wurden in der 1. Phase des BMVI-Expertenetzwerks wertvolle Grundsteine gelegt für den Aufbau eines Frühwarnsystems und die verkehrsträgerübergreifende Entwicklung von Strategien und Maßnahmen zur Prävention.

Mithilfe der entwickelten Methodik zur Einschätzung des Invasionsrisikos von IAS für den Verkehrsträger Schiene (Projekt 6) wurde eine gute Möglichkeit geschaffen, um das

artspezifische Invasionsrisiko von IAS abzuschätzen. Die Methodik wurde zunächst für die Schiene entwickelt, sie kann jedoch durch Anpassung einzelner Bewertungskriterien auf andere Verkehrsträger übertragen werden. Die Bewertung des Invasionsrisikos erfolgt anhand von fünf zentralen Bewertungskriterien (I. Verbreitung und Vorkommen in Mitteleuropa, II. aktuelle und prognostizierte Ausbreitungstendenzen in Mitteleuropa, III. Vorkommen in für den Verkehrsträger Schiene relevanten Lebensräumen, IV. artspezifisches Reproduktionspotenzial und V. Verwendung von für den Verkehrsträger Schiene relevanten Ausbreitungspfaden und Ausbreitungsvektoren). Sie ist daher gut geeignet, um relativ schnell eine Einschätzung treffen zu können. Dies ist insbesondere dann hilfreich, wenn das Invasionsrisiko von bislang in Deutschland noch nicht oder nur selten vorkommenden Arten eingeschätzt werden soll oder bei der Abstimmung von Listungsvorschlägen zur EU-Liste.

Das im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks entwickelte Neobiota-Informationssystem NIS-DE (Projekt 7) wird mit Blick auf die gesetzlichen Anforderungen (Umsetzung des BWÜ, der EU-Meeressstrategie-Rahmenrichtlinie (EU-MSRL) und der EU-Verordnung zu Invasiven Arten (EU-IAS)) sowie auf die damit verbundenen Bedürfnisse der Endnutzer angepasst. Eines der ersten Produkte ist eine Web-Anwendung für einen Datenimport, mit der die eingehenden Umweltdaten automatisch auf Konsistenz und

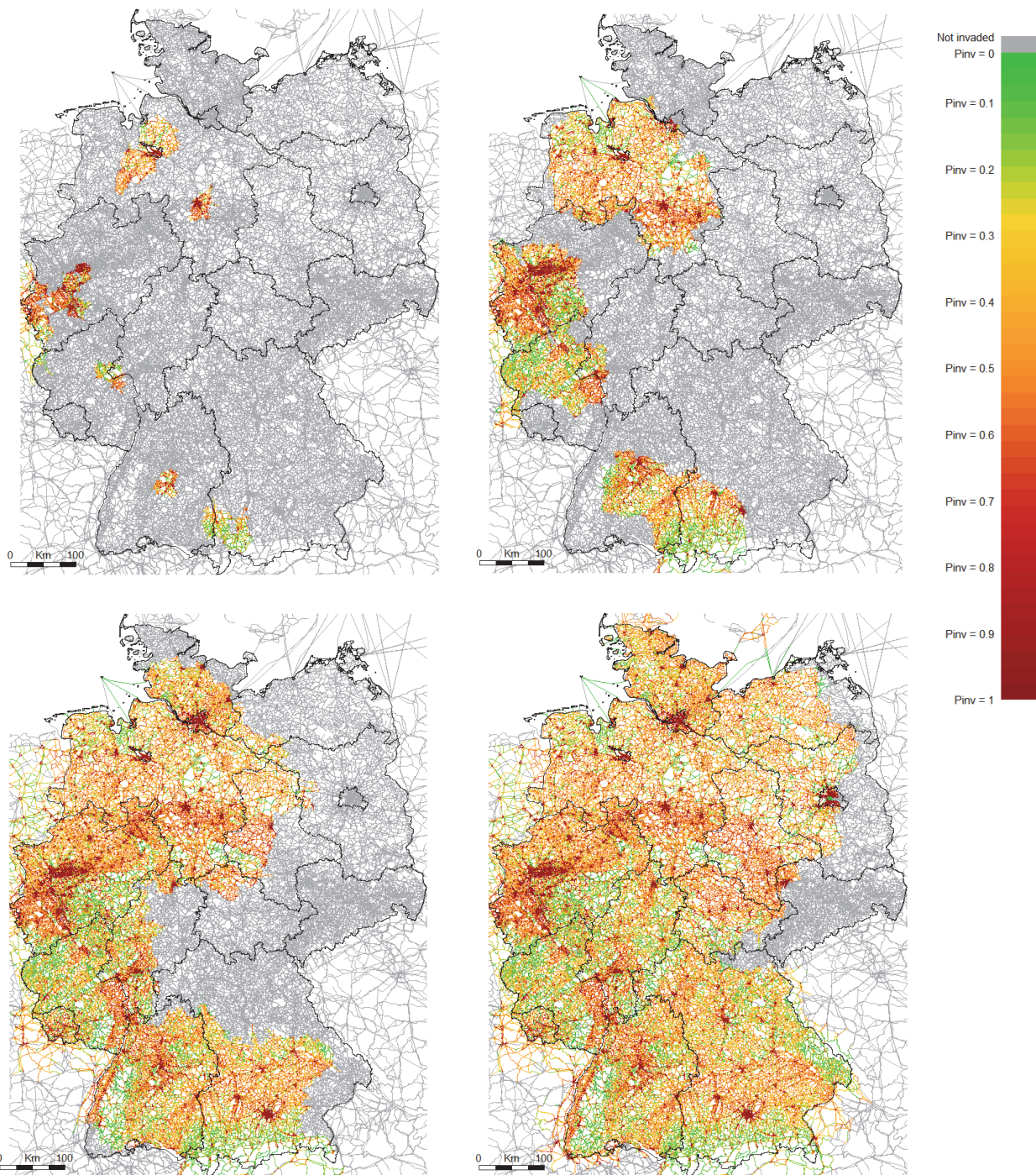


Abbildung 19: Beispielhafte Simulation der Ausbreitung von *Senecio inaequidens* durch die Verkehrsträger Straße und Schiene nach 4 Monaten (oben links), 5 Jahren (oben rechts), 10 Jahren (unten links) und 14 Jahren (unten rechts); P_{inv} = Invasionswahrscheinlichkeit (Kartengrundlage: OpenStreetMap).

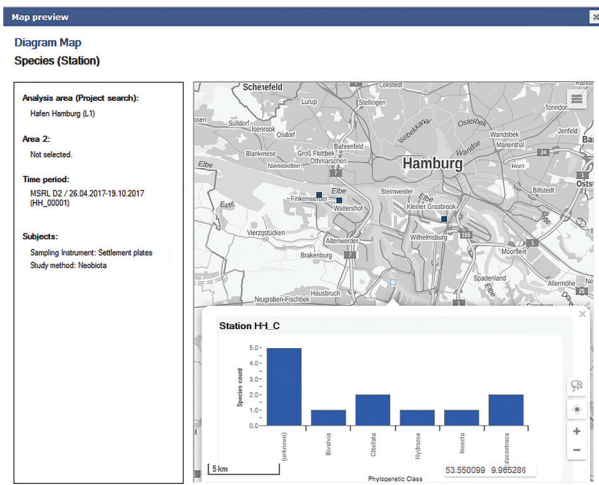


Abbildung 20: Beispiel für eine Stationskarte von Hamburg mit Zahlen zur invasiven Arten und deren Verteilung auf verschiedene Artengruppen. Diese kann als Grundlage zur Optimierung von Monitoringvorhaben dienen (Kartengrundlage: OpenStreetMap).

Plausibilität geprüft werden. Im Anschluss erfolgt die Prüfung durch die Fachexperten und der Import der qualitätsgeprüften Daten in eine räumliche Datenbank, welche mit anderen Fachinformationssystemen im BSH vernetzt ist. Die Vernetzung spielt eine wichtige Rolle, um zum Beispiel die Wechselwirkung von marinen Lebewesen mit Umweltparametern (z. B. Salinität, Temperatur, Bodenbeschaffenheit) zu untersuchen. Der Zugriff auf die Daten für die Fachanwender erfolgt über eine eigens entwickelte Web-App. Außerdem werden Kartendienste für die Öffentlichkeit über das GeoSeaPortal⁸ bereitgestellt. Bisher wurden insgesamt zehn Produkte und Anwendungen definiert (z. B. Stationskarten mit zeitlichen Verläufen für ausgewählte Arten), die insbesondere für Behörden in der Bearbeitung von Anfragen hilfreich sein können. Damit die gewünschten Produkte gezielt und schnell generiert werden können, wurden Filtermöglichkeiten erstellt.

Unter "Preview" kann ein Produkt vorab angezeigt werden. Beispielsweise wurde so eine Stationskarte für den Hamburger Hafen generiert mit Informationen zu den dort vorgefundenen invasiven Arten (Abbildung 20). Neben einer Kartendarstellung können auch Diagramme angezeigt werden. Entsprechen die Produkte den gewünschten Vorstel-

lungen, so können diese als Zip-Dateien heruntergeladen und für den vorgesehenen Zweck verwendet werden.

Das im Projekt 1 entwickelte Modell CASPIAN ist ein wichtiger erster Schritt zur streckendeckenden Prognose der weiteren Ausbreitung von IAS durch die Verkehrsträger, nachdem eine Art in Deutschland in Erscheinung getreten ist. So ist es möglich, Aussagen zu der weiteren Verbreitung ausgehend von den Fundpunkten zu treffen sowie eine zeitliche Komponente zu liefern. Allerdings bedarf es weiterer Forschung, um das Modell zu verbessern und direkt anwendbar zu machen.

2.2.4.4 Vorhandene und mögliche Maßnahmen zur Kontrolle bereits verbreiteter Neophyten

Mithilfe der Umfragen konnte deutlich herausgearbeitet werden, inwieweit IAS schon jetzt eine deutliche Belastung für die verschiedenen Verkehrsträger darstellen. Im Großteil der Zuständigkeitsbereiche aller Verkehrsträger wurden schon einmal gebietsfremde Pflanzen (Neophyten) bekämpft. Insgesamt gaben 86,2 % der Straßen- und Autobahnmeistereien, 67,9 % der Regionalbereiche der DB und 72,9 % der Außenbezirke der WSV an, schon einmal Bekämpfungsmaßnahmen gegen Neophyten eingesetzt zu haben.

In den Umfragen wurden die Teilnehmer gebeten, detaillierte Informationen über die in ihren Zuständigkeitsbereichen schon angewandten Maßnahmen aufzuführen. Es sollten konkrete Maßnahmen und die Art, die bekämpft wurde, und der Erfolg der jeweiligen Maßnahmen in fünf vorgegebenen Kategorien eingeschätzt werden. Insgesamt wurden von den Teilnehmern 547 Maßnahmen an der Straße, 56 an der Schiene und 178 an der Wasserstraße aufgeführt. Dabei waren die am häufigsten aufgeführten Arten bei allen Verkehrsträgern die Herkulesstaude und der Staudenknöterich: 237 Maßnahmen an der Straße, 18 an der Schiene und 82 an der Wasserstraße dienten der Bekämpfung der Herkulesstaude und 120 Maßnahmen an der Straße, 17 an der Schiene und 43 an der Wasserstraße wurden zur Bekämpfung des Staudenknöterichs eingesetzt. Die dritthäufigsten Arten unterschieden sich zwischen den Verkehrsträgern: An der Straße wurde die Beifuß-Ambrosie (40 Maßnahmen), an der Schiene die Robinie (9 Maßnah-

⁸ <https://www.geoseaportal.de>

men) und an der Wasserstraße das Springkraut (18 Maßnahmen) angegeben.

Angewandte Maßnahmen unterschieden sich zwischen den Verkehrsträgern: Die an der Straße und Wasserstraße am häufigsten angewandten Maßnahmen waren die Mahd (Straße: 161, Wasserstraße: 47) und das Ausgraben (Straße: 100, Wasserstraße: 42), während diese Maßnahmen an der Schiene nur vereinzelt angegeben wurden (3/2). An der Schiene wurde der Rückschnitt am häufigsten angewandt (13), der bei den anderen Verkehrsträgern nur vereinzelt genannt wurde (Straße: 25, Wasserstraße: 8). Herbizide wurden häufig an der Straße (86) und Schiene (11) eingesetzt. Hierzu sind bei beiden Verkehrsträgern Genehmigungen durch die jeweils zuständigen Behörden Voraussetzung. An der Wasserstraße ist der Einsatz von Herbiziden nicht erlaubt.

Die Wirksamkeit der angewandten Maßnahmen stellt sich bei allen Verkehrsträgern ähnlich dar: Weniger als 10 % der Maßnahmen, an den Bahnlinien weit weniger, führen laut Umfrage zu einer vollständigen und dauerhaften Beseitigung der Neophytenbestände (Abbildung 21). Allerdings sind über die Hälfte der Maßnahmen als bedingt erfolgreich zu bewerten, da sie zumindest eine weitere Ausbreitung der Bestände verhindern oder, weitaus häufiger, verlangsamen. Demgegenüber bleiben ca. 1/5 der Maßnahmen an der Straße und Schiene, an der Wasserstraße ca. 1/4 ohne Erfolg.

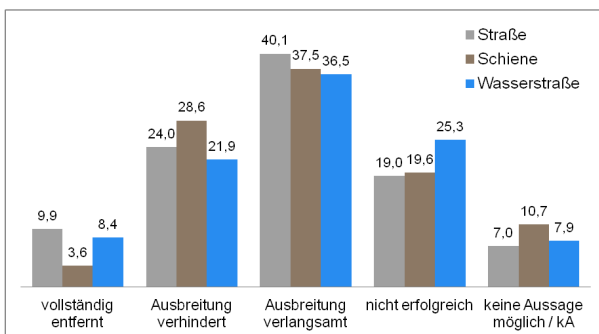


Abbildung 21: Wirksamkeit der Bekämpfungsmaßnahmen, dargestellt als Anteil der Maßnahmen, die zu einer vollständigen und dauerhaften Beseitigung, zu einer verhinderten oder verlangsamt Ausbreitung führen, nicht erfolgreich sind und wo die Wirksamkeit der Maßnahmen von den Teilnehmern nicht abgeschätzt werden konnte oder angegeben wurde (kA). Straße: N = 547, Schiene: N = 56, Wasserstraße: N = 178.

49,3 bzw. 40,7 % der Teilnehmer der Straßen- und Autobahnmeistereien bzw. der DB fühlen sich nicht ausreichend über das Thema Neophyten informiert und 79,2 % der WSV-Teilnehmer wünschen sich Informationen zu Neophyten. Auch in den Kommentaren der Teilnehmer der Straßen- und Autobahnmeistereien wurde immer wieder darauf hingewiesen, dass es an Informationsmaterial und Wissen über die Arten und die Wirkung verschiedener Maßnahmen fehlt. Die Bereitstellung von leicht verständlichen Infoblättern oder Handlungsempfehlungen und/oder eine (bessere) Zusammenarbeit mit den zuständigen Umweltbehörden wurden von einigen Teilnehmern gefordert. Diese Ergebnisse verdeutlichen den dringenden Bedarf, den Zuständigkeitsbereichen der verschiedenen Verkehrsträger Handlungsanweisungen und Informationen zur Verfügung zu stellen.

Der Wunsch nach gezielten Informationen und zentralen Diensten wurde auch in den im aquatischen Bereich durchgeführten Umfragen deutlich.

2.2.5 Diskussion und Ausblick

Insgesamt konnte in der ersten Phase des BMVI-Experten-netzwerks für alle vier adressierten Ziele eine solide Datenbasis und damit wesentliche Grundlagen für konkrete Anwendungen geschaffen werden.

Projekt 1: Modellierung der Einfuhr und Verbreitung von invasiven Arten durch und entlang von Verkehrsträgern

Mit dem Prototyp des Modells CASPIAN wurde eine wichtige Möglichkeit geschaffen, erstmalig die Ausbreitung von IAS durch Verkehrsträger zu prognostizieren. Hiermit wurde das Fundament für wichtige weitere Schritte zum Verständnis der Ausbreitung und Etablierung von IAS gelegt. Ein solches Vorhaben ist weltweit einzigartig und es ist davon auszugehen, dass dieses Engagement über die Grenzen Deutschlands hinaus Beachtung finden wird. Die freie Verfügbarkeit des Modells bietet die große Möglichkeit, dass andere Arbeitsgruppen das Modell anwenden, testen und verbessern. Dies würde auch die Vorhersagekraft des Modells für Deutschland verbessern.

Die größte Herausforderung bei der Modell-Erstellung bestand in der Verfügbarkeit der Daten des Vorkommens einzelner Arten im terrestrischen Bereich. Im Gegensatz dazu lagen im aquatischen Bereich umfangreiche Datensätze vor, die sehr gut für das Projektvorhaben genutzt werden konnten. Als ein weiteres Defizit stellten sich das fehlende Verständnis und die fehlende Datengrundlage der Ausbreitung von Arten über Verkehr und Verkehrsträger dar. So ist zwar generell bekannt, dass Arten über z. B. Anheftung an Fahrzeugen verbreitet werden können, aber es gibt so gut wie keine Studien über die Anzahl und Reichweite angehefteter Organismen. Für viele Ausbreitungswege wie z. B. Schienenverkehr oder Schifffahrt liegen kaum Studien vor und das Verständnis für die Rolle des Transports ist nur gering. Hier bieten sich für das BMVI-Expertennetzwerk zahlreiche Möglichkeiten, das Verständnis für die im Verkehr ablaufenden Prozesse, die zur Ausbreitung von IAS führen, zu erweitern.

In der 2. Phase des BMVI-Expertennetzwerks (2020–2025) soll das Modell verbessert und erweitert werden, z. B. durch die Implementierung weiterer Ausbreitungswege, die direkte Anknüpfung des Seeverkehrs, für den bereits ein eigenes Modell besteht, die Anwendung von Zukunftsszenarien oder die Erweiterung auf größere räumliche Skalen.

Projekt 2: Umfragen zu vorhandenen Neobiota und IAS und durch diese verursachten Problemen im Bereich der Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasserstraße)

Für die drei Problemarten Herkulesstaude, Staudenknöterich und Sommerflieder belaufen sich die Bekämpfungskosten in anderen EU-Ländern auf Summen im zwei bis dreistelligen Millionenbereich (Gren et al. 2009, Williams et al. 2010). Für Deutschland sind Zahlen für entstehende Schäden durch invasive Arten und für deren Bekämpfung im Verkehrssektor weitgehend unbekannt. Es wurde allerdings deutlich, dass ein Großteil der Zuständigkeitsbereiche solche Arten bereits aktiv bekämpft – eine Belastung für die Betriebsdienste, die zusätzlich Personal und Ressourcen beansprucht. Die Ergebnisse zur Wirksamkeit der schon zur Bekämpfung angewandten Maßnahmen (v. a. gegen den Staudenknöterich) sind allerdings ernüchternd und machen die Notwendigkeit weiterer Forschungsaktivitäten deutlich. Alternative Methoden zum Einsatz von

Herbiziden müssen entwickelt werden, um den derzeit schon weit verbreiteten Problemarten Einhalt zu bieten. Außerdem sollten Zielgruppen (Betriebsdienste, Behörden, Verwaltungen, Angler etc.) intensiver informiert und aufgeklärt werden, ein Wunsch, der von vielen Teilnehmern der Umfragen geäußert wurde. Eine frühe Bekämpfung von Beständen kann in vielen Fällen noch zu einer vollständigen und dauerhaften Beseitigung führen und damit ein langwieriges, kosten- und personalintensives Management verhindern. Die Erstellung von Schulungs- und Informationsmaterial für die Betriebsdienste, Verwaltungen und Interessengruppen sind für die 2. Phase des BMVI-Expertennetzwerks (2020–2025) geplant. Ein Projekt zur Entwicklung von alternativen Bekämpfungsmethoden des Staudenknöterichs und zur Vermeidung der Ausbreitung durch Erdgut ist bereits in der Vorbereitung. Die Ergebnisse sollen damit wesentlich zur Arbeits- und Kostenentlastung bei der Unterhaltung bestehender und der Planung zukünftiger Infrastruktureinrichtungen beitragen.

Auch bei der im aquatischen Bereich durchgeführten Umfrage wurde die Notwendigkeit weiterer Forschungsaktivitäten deutlich. Unter ökonomischer Betrachtung (Kosten-Nutzen-Analysen) ist über die negativen Auswirkungen der invasiven Arten und den daraus resultierenden ökonomischen Schäden im aquatischen Bereich nur wenig bekannt. Auch hier wurde der Wunsch nach mehr Informationen und Hilfestellungen deutlich aufgezeigt. Vor allem die Zielgruppen (Behörden, Verwaltung, Angler etc.) sollten intensiver informiert und aufgeklärt werden.

Projekt 3: Untersuchung des Bioaufwuchses (Biofouling) verschiedener Schiffs- und Bootstypen

Mit den Teilprojekten zum Schiffsbewuchs wurde unabhängig von Schiffstyp bzw. Bootstyp die Verbreitung von nicht-einheimischen und invasiven Arten durch Biofouling belegt. Die häufigsten Neobiota gehörten den Gruppen der Krebse (Crustacea) und Muscheln (Bivalvia) an. Für die Ausbildung von Bioaufwuchs sind drei Faktoren bedeutsam: 1. Bewuchsdruck, 2. Nutzungsregime sowie 3. Nutzerverhalten.

Segel- und Motorboote sind an der Ostsee im Vergleich zu Binnengewässern einem höheren Bewuchsdruck ausgesetzt. Fehler in der Handhabung von Antifouling-Farben

und/oder lange Liegezeiten führen zu einer deutlichen Verstärkung der Bildung von Biofouling. Eine Kombination zwischen den o. g. Faktoren (hoher Bewuchsdruck, wenig Einsatzzeit und Wissenslücken im Bereich der Farben) begünstigt die Entwicklung von sehr starkem Bioaufwuchs.

Obwohl Sportboote im Süßwasser einem geringeren Bewuchsdruck ausgesetzt sind und in der Regel jährlich gereinigt werden, werden häufig biozidhaltige Farben verwendet. Oftmals sind es die gleichen Produkte wie in der Ostsee. Es stellt sich die Frage, ob dies überhaupt notwendig ist. Mit gezielten Versuchen könnte dieser Fragenstellung nachgegangen werden. Möglicherweise kann dadurch der Eintrag von Bioziden in Binnengewässer reduziert werden. Die Neobiota-Arten Süßwasser-Röhrenkrebs (*Chelicorophium curvispinum*) und Keulenpolyp (*Cordylophora caspia*) kommen unabhängig von der Bewuchsintensität, auch auf einen Biofilm, stets im Süßwasser vor. Es zeigt deutlich, dass auch Sportboote, die kaum Bioaufwuchs aufweisen, für die Verbreitung von nicht-einheimischen Arten infrage kommen.

Projekt 4: Untersuchung der Bedeutung von Ballastwasser als potenzieller Pfad in der Binnenschifffahrt

Die Ergebnisse der Umfrage bestätigen die Vermutung, dass nicht nur in der See-, sondern auch in der Binnenschifffahrt Ballastwasservorgänge stattfinden. Insbesondere in den Kanälen wird beispielsweise Ballastwasser benötigt, um unter Brücken hindurchzufahren. Weitere Untersuchungen mit dem Ziel, die Bedeutung des Ballastwassers in der Binnenschifffahrt als Verbreitungsvektor zu quantifizieren, sind in der nächsten Phase des BMVI-Expertennetzwerks geplant. Es ist vorgesehen, die Ballastwassertanks auf das Vorkommen von schädlichen Organismen zu beproben.

Projekt 5: Hafenuntersuchungen zur Erfassung von Neobiota nach regional abgestimmtem Protokoll

Die Durchführung der Hafenuntersuchungen hat erstmalig in dieser Vollständigkeit in deutschen Häfen stattgefunden. Das regional abgestimmte HELCOM-OSPAR "Port Survey Protocol" ist ein umfangreiches und kostspieliges Monitoring mit dem Ziel, möglichst alle nicht-einheimischen

Arten zu erfassen. Die Untersuchung hat deutlich gezeigt, dass dies mit einer einmaligen Kartierung nicht möglich ist. Die in Hamburg vorkommenden invasiven Grundelarten (Schwarzmundgrundel, Kessler-Grundel) sind gelistete "Target Species", die im Ostseeraum noch nicht überall verbreitet sind. Mit der Hafenuntersuchung wurden diese Arten nicht kartiert. Für eine robuste Risikobewertung ist es daher notwendig, weitere Daten wie z. B. aus dem EU-MSRL-Monitoring heranzuziehen.

Die Ergebnisse haben zudem deutlich gezeigt, dass noch ein erheblicher Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Planktonbestimmung besteht. Im Plankton wurden erstaunlich wenige Neobiota nachgewiesen, obwohl Untersuchungen von Gittenberger (2014) im Hafen von Rotterdam zahlreiche nicht-einheimische Arten im Plankton festgestellt haben. Eine mögliche Erklärung könnten Fehler in der Bestimmung der Art sein. Aus diesem Grund wird der Einsatz genetischer Methoden zur Verbesserung der Artenidentifizierung in der nächsten Phase des BMVI-Expertennetzwerks geprüft.

Projekt 6: Risikobewertung der für die Schiene kritischen invasiven Arten sowie Entwicklung einer Methodik zur Erfassung des Invasionspotenzials für (terrestrische) Verkehrsträger

Durch die Entwicklung der Methodik liegt nun ein Werkzeug vor, mit dessen Hilfe das schienenspezifische Invasionspotenzial von terrestrischen Tier- und Pflanzenarten relativ leicht eingeschätzt werden kann. Da die Methodik auf wenigen Kriterien beruht, ermöglicht sie eine schnelle Einschätzung. Dies ist insbesondere dann hilfreich, wenn im Zuge der Erweiterung der EU-Liste neue Arten vorgeschlagen werden, für die auch seitens des BMVI eine Stellungnahme abgegeben werden soll. Die Anpassung der Methodik auf die anderen Verkehrsträger wäre ein möglicher Ansatz für die 2. Phase des BMVI-Expertennetzwerks. Die umfangreichen Steckbriefe, die für 123 terrestrische IAS erstellt wurden, werden seitens der Anwender häufig nachgefragt und sind eine wertvolle Informationsquelle für deren Arbeit, da sie neben einer allgemeinen Einschätzung auch mögliche Gefährdungen und Managementoptionen aufzeigen und weiterführende Literaturhinweise enthalten.

Projekt 7: Aufbau eines Neobiota-Informationssystems (NIS-DE)

Die Entwicklung des Neobiota-Informationssystems (NIS-DE) ermöglicht durch zahlreiche Web-Anwendungen die Realisierung maßgeschneiderter Lösungen für Administrationen und bildet den Grundstein zur Früherkennung von invasiven Arten. Eine im System hinterlegte Gesamt-Artenliste von einheimischen und nicht-einheimischen Arten in der Nord- und Ostsee fungiert hierbei als Referenz. Während des Uploads von neuen Umweltdaten und dazugehörigen Artenlisten gleicht ein Programm die Daten mit im System hinterlegten Informationen ab (Plausibilitätsprüfung). Dabei werden die Arten mit der im System hinterlegten Referenzliste abgeglichen. Stellt die Prüfung eine für das System unbekannt Art fest, so wird nach erfolgter Plausibilitätsprüfung seitens des Systems eine automatisierte Nachricht an einen Expertenkreis verschickt. Der Expertenkreis entscheidet über den Status der "neuen Art". Für den Fall, dass es sich um eine nicht-einheimische bzw. invasive Art handelt, wird der Eintrag im System hinterlegt und eine weitere Nachricht mit den wichtigsten Informationen an weitere Gruppen/Fachkreise/Gremien verschickt. Auf diese einfache Art und Weise werden alle beteiligten Personen des Neobiota-Fachbereichs über die Ankunft neuer Arten informiert. Potenzielle Maßnahmen können so schneller erfolgen. An der Umsetzung wird zurzeit gearbeitet.

Für die nächste Phase des BMVI-Expertennetzwerks ist die Erweiterung um einen weiteren Verkehrsträger (vorzugsweise Binnenwasserstraßen) vorgesehen.

Zusammenfassende Beurteilung der Ergebnisse der ersten Phase

Die Ergebnisse der Phase 1 des BMVI-Expertennetzwerks verdeutlichen, dass invasive und potenziell invasive Arten derzeit eine erhöhte Belastung für die Betriebsdienste der jeweiligen Verkehrsträger darstellen und dass ein dringender Bedarf besteht, Maßnahmen für ein effektives und kosteneffizientes Management zu entwickeln. Da viele Arten bei allen terrestrischen Verkehrsträgern gleichermaßen Probleme verursachen und die Binnenschifffahrt ähnlichen Herausforderungen gegenübersteht, wie sie der See-

schifffahrt schon seit einigen Jahren bekannt sind, ist ein verkehrsträgerübergreifender Ansatz sinnvoll. Die Grundlagen hierfür wurden in der ersten Phase geschaffen. Vor allem die Entwicklung des Neobiota-Informationssystems und des Modells zur Einfuhr und Ausbreitung von invasiven Arten entlang der Verkehrsträger leisten hier einen wichtigen Beitrag, präventiv die Einbringung von solchen Arten zu verhindern bzw. zu reduzieren, um damit zukünftig eine umweltgerechte Infrastruktur zu unterhalten.

2.2.6 Verwertung der Ergebnisse

Die im Rahmen der Projekte gewonnen Erkenntnisse konnten in vielfältiger Weise genutzt werden und waren sowohl für die Administrationen als auch für das BMVI eine wichtige und nützliche Informationsquelle.

Es erfolgte durch die im BMVI-Expertennetzwerk tätigen Personen regelmäßig die fachliche Beratung vom BMVI im Zuge der Erstellung der Durchführungsverordnungen zur "Verordnung (EU) Nr. 1143/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über die Prävention und das Management der Einbringung und Ausbreitung invasiver gebietsfremder Arten" (EU-VO 1143) sowie der Abstimmung der BMVI-Positionen bei den Vorschlägen zu neuen Listenkandidaten. Dank der in Projekt 6 entwickelten Methodik kann für terrestrische Verkehrsträger, insbesondere die Schiene, eine standardisierte und schnelle Bewertung des Invasionspotentials erfolgen. Die in diesem Projekt bereits erstellten umfangreichen Steckbriefe für 123 terrestrische IAS werden seitens der Anwender häufig nachgefragt und sind eine wertvolle Informationsquelle für deren Arbeit, da sie neben einer allgemeinen Einschätzung auch mögliche Gefährdungen und Managementoptionen aufzeigen und weiterführende Literaturhinweise enthalten.

Auf EU-Ebene werden relevante Aspekte aus den Forschungsvorhaben durch die Mitgliedschaft des DZSF/EBA in der WG-IAS bereits bei den Listungsvorschlägen zu neuen EU-Kandidaten eingespeist und können so berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere wichtig, wenn für die Verkehrsträger kritische Arten in der Diskussion sind. Beispielsweise konnte auf diese Weise die vom EBA befürwortete Listung zweier in Deutschland noch nicht vorkom-

mender Gräser-Arten, deren Anwesenheit im Schienenbereich eine erhöhte Böschungsbrandgefahr zur Folge hätte, mit vorangetrieben werden. Wichtige Informationen konnten auch auf Ebene der Regionalen Meeresschutzkonventionen HELCOM und OSPAR im Rahmen der Überarbeitung der "Joint Harmonized Procedure" (HELCOM/OSPAR 2013) eingebracht werden. Darüber hinaus können die gewonnenen Ergebnisse anlässlich von harmonisierten Biofouling-Managementstrategien für den Ostseebereich im Rahmen des laufenden Interreg Projektes COMPLETE berücksichtigt werden. Der anstehende Review-Prozess der Biofouling-Guidelines der International Maritime Organization (IMO) kann ebenfalls durch die Ergebnisse aus dem BMVI-Expertennetzwerk unterstützt werden.

Projektberichte:

Zu den einzelnen Forschungsvorhaben liegen Abschlussberichte vor bzw. werden zum Teil aktuell noch erstellt. Diese werden sukzessive online verfügbar gemacht, um so für die Anwender, die Behörden, die Politik und die wissenschaftliche Community verfügbar zu sein.

DZSF/EBA (2018): Abschlussbericht: Ermittlung und Risikobewertung der für den Verkehrsträger Schiene kritischen invasiven Arten, Bonn. Download unter: https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/EBA-Forschungsbericht_2018-11.html?nn=2208196

DZSF/EBA (2019): Abschlussbericht: Modellierung der Einfuhr und Verbreitung von invasiven Arten durch Verkehrsträger, Bonn.

IfAÖ-Institut für Angewandte Ökosystemforschung GmbH (2018): Assessment of Non-Indigenous Species (NIS) in the Ports of Hamburg and Kiel. 141 Seiten. Download unter: https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Forschung_und_Entwicklung/Projekte/BMVI-Expertennetzwerk/expertennetzwerk_node.html.

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

Bartels, P. (2019) Herausforderungen durch problematische Arten: ein Überblick über die aktuelle Situation auf Straßenbegleitgrün. Tagungsband FGSV Straßenkolloquium.

Bartels, P. (2019) Umgang mit Problemarten auf Verkehrsnebenflächen – Tagungsband FGSV Landschaftstagung 2019.

Bartels, P.; Esser, D. S.; Heibeck, N.; Leiblein-Wild, M. (2019): "Management von Verkehrsbegleitflächen – Förderung der Biodiversität und Umgang mit gebietsfremden Arten" – 1. Kolloquium Straßenbau in der Praxis, Tagungsband.

Leiblein-Wild, M.; Bartels, P.; Below, M.; Esser, D.S.; Michael, S.; Tackenberg, O. (2018): Estimating the invasion risk to the German railway system for 123 invasive alien species. – IENE 2018 International Conference – Abstract book, ISBN 978-91-639-8714-4.

Heibeck (ehem. Schwartz), N. (2017): Blinde Passagiere auf Binnenschiffen. – DGL Tagungsband, ISBN 978-3-9818302-2-4.

Wissenschaftliche Beiträge zu Fachkonferenzen:

Die Ergebnisse der Forschungsvorhaben wurden sowohl national als auch international auf einer Reihe von Fachtagungen und Workshops präsentiert. Beispiele hierfür sind: IENE 2018, 7. und 8. Fachtagung Naturschutz der Deutschen Bahn, Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Limnologie (DGL), 2. Fachtagung zur EU-VO 1143/2014, Landschaftstagung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Kolloquium "Straßenbau in der Praxis" der Technischen Akademie Esslingen (TAE), und Rotterdam Biofouling Workshop.

2.3 Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser und Boden (SPT 203)

Dr. Anja Baum (BASt), Dr. Beate Bänsch-Baltruschat (BfG), Dr. Susanne Biermann-Hoeller (DFS), Dr. Sebastian Buchinger (BfG), Michael Cox (BAG), Volker Dietze (DWD), Bentje Frerkes (BASt), Dr. Stefan Gilge (DWD), Wiebke Kathmann (BfG), Dr. Torben Kirchgeorg (BSH), Dr. Birgit Kocher (BASt), Dr. Sabrina Michael (DZSF/EBA), Dr. Georg Reifferscheid (BfG), Cyrus Schmellekamp (BASt, SPT-Koordinator), Dr. Stefan Schmolke (BSH), Dr. Michael Schröder (BAW), Dr. Svenja Sommer (BfG), Dr. Friederike Stock (BfG), Kombiz Sultani (BASt), Dr. Patrick Wagner (BfG), Carolin Walz (BAW)

2.3.1 Motivation

Eine gut ausgebaute Verkehrsinfrastruktur verbunden mit einer ausgeprägten Mobilität ist eine essenzielle Voraussetzung für wirtschaftliches Wachstum, Wohlstand und Lebensqualität in Deutschland. Die Mobilität beschreibt im Allgemeinen die Beweglichkeit von Lebewesen, Gegenständen und seit dem Computerzeitalter auch die Beweglichkeit von Daten. In den letzten Jahren sind die mit der Mobilität verbundenen Belastungen für die Gesundheit, die Umwelt und nicht zuletzt das Klima verstärkt in den Fokus des gesellschaftlichen Bewusstseins gerückt.

Bisher wird der Transport von Personen und Gütern überwiegend durch die Verbrennung fossiler Energieträger ermöglicht, auch wenn dies für den Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr in unterschiedlichen Ausprägungen gilt. Dabei variiert – auch vor dem Hintergrund unterschiedlicher regulatorischer Anforderungen – die Zusammensetzung der Kraftstoffe deutlich zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln. So ist im Bereich der Seeschifffahrt ein deutlich höherer Schwefelanteil im Kraftstoff zulässig als bei anderen Verkehrsträgern, was zu höheren Schwefelemissionen führt. Durch die Verbrennung fossiler Energieträger in Motoren werden gesundheits- und umweltschädliche Stoffe (gasförmig und partikulär) sowie Treibhausgase in die Luft emittiert und mittelbar durch chemische Umwandlungen und Deposition auch

in die Umweltkompartimente Wasser und Boden eingetragen. Zusätzliche Stoffe gelangen durch Abriebprozesse an Reifen, Bremsen, Kupplungen, Fahrdrähten sowie Straßenoberflächen und Gleiskörpern oder den Einsatz von Unkrautbekämpfungsmitteln bei der Instandhaltung der Infrastruktur in alle drei Umweltkompartimente: Luft, Wasser und Boden. Insbesondere in Ballungsgebieten, in denen ein dichtes Verkehrsnetz und hohe Fahrleistungen zusammenkommen, können durch verkehrsbedingte Emissionen die zum Schutz der menschlichen Gesundheit festgelegten Schadstoffgrenzwerte für z. B. Feinstaubpartikel (PM₁₀) oder Stickstoffdioxid (NO₂) überschritten werden.

In den letzten Jahrzehnten wurden bereits durch gezielte Maßnahmen auf dem Gebiet der Luftreinhaltung deutliche Verbesserungen der Luftqualität, insbesondere in den Ballungsgebieten bzw. an hoch belasteten Verkehrstrecken, erzielt. Dennoch haben die Modernisierung der Fahrzeugflotten und Motoren sowie andere Minderungsmaßnahmen wie Umweltzonen nicht zu den erhofften Immissionsrückgängen zur Einhaltung von Grenzwerten an allen Messstellen in urbanen Gebieten geführt.

Die Prognosen zum Bundesverkehrswegeplan 2030 (BMVI 2016) gehen von einer weiteren Zunahme der Zahl der Verkehrsleistungen in den nächsten Jahrzehnten, insbesondere im Güterverkehrsbereich und im Flugverkehr aus. Damit ist zu erwarten, dass eine Einhaltung aktueller Luftschadstoffgrenzwerte in hochbelasteten Ballungsgebieten kurz- und mittelfristig nur dann erreicht werden kann, wenn effiziente und verkehrsträgerübergreifende Maßnahmen zur Emissionsminderung ergriffen werden.

Um Einschränkungen der Mobilität mit negativen Auswirkungen auf den Wirtschaftsstandort Deutschland zu vermeiden, müssen insbesondere verkehrsträgerübergreifende Lösungen gefunden werden, die auch künftig ein hohes Maß an Mobilität bei gleichzeitig deutlich reduzierten Umwelt- und Gesundheitsbelastungen ermöglichen.

2.3.2 Ziele

Um das Ziel einer deutlich reduzierten Umweltbelastung bei gleichzeitig steigenden Mobilitätsansprüchen von Be-

völkerung und Wirtschaft zu erreichen, sind die dem BMVI nachgeordneten Forschungseinrichtungen und Behörden gefordert, verkehrsträgerübergreifende Lösungen aufzuzeigen.

Dafür sind zunächst die maßgebenden verkehrsbedingten Schadstoffquellen zu identifizieren und zu quantifizieren, damit in einem zweiten Schritt erfolgversprechende verkehrsträgerübergreifende Maßnahmen zur Reduzierung von Schadstoffemissionen im gesamten Verkehrssektor erarbeitet werden können. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen dienen perspektivisch der Maßnahmenplanung für den Verkehr auf den Bundesverkehrswegen, d. h. den Bundesfernstraßen, den Wasserstraßen, dem Schienenverkehr (im Netz der Deutschen Bahn) sowie dem Flugverkehr auf deutschem Bundesgebiet. Mit den Erkenntnissen soll eine Reduzierung der Schadstoffbelastung in Ballungsräumen ermöglicht werden.

2.3.3 Herangehensweise und Handlungsfelder

Unter Beachtung der technischen Ausstattung der verschiedenen Forschungseinrichtungen und Behörden des BMVI-Expertennetzwerks wurden zur Erreichung des Zieles unterschiedliche Teilprojekte verfolgt. Die Teilprojekte wurden thematisch zu folgenden Handlungsfeldern zusammengefasst:

- a) Identifizieren und Schließen von Kenntnislücken zu Emissionen und Immissionen,
- b) Ermittlung der Wirkungen emittierter Schadstoffe auf Mensch und Umwelt und
- c) Entwicklung von Maßnahmen zur Minderung stofflicher Belastungen,

Die Ergebnisse der Handlungsfelder bzw. der Teilprojekte sind wichtige Elemente einer Gesamtbetrachtung verkehrsbedingter stofflicher Emissionen und Immissionen und ermöglichen die Entwicklung umfassender und verkehrsträgerübergreifender Handlungsmaßnahmen in der zweiten Phase des BMVI-Expertennetzwerks.

2.3.3.1 Handlungsfeld a) Identifizieren und Schließen von Kenntnislücken der Emissionen und Immissionen

Der aktuelle Kenntnisstand zu verkehrsbedingten Emissionen und den verkehrsträgeranteiligen Schadstoffeinträgen in die verschiedenen Umweltkompartimente ist noch sehr heterogen. Im direkten Vergleich der Verkehrsträger ist der Wissensstand zum Kraftfahrzeugbereich aufgrund seiner mengenmäßigen Präsenz, strikter gesetzlicher Vorgaben sowie umfassender Monitoringprogramme relativ gut. Beispielsweise liegen für Kfz-bedingte Emissionen bereits umfassende Verfahren zur Berechnung der Emissionen vor (z. B. Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, HBEFA (Keller et al. 2017)). Wissenslücken bestehen jedoch noch bei spezifischen Detailfragen. Die Emissionen anderer Verkehrsträger rücken erst allmählich in den Fokus, sodass bei ihnen weitaus größere Kenntnislücken auszumachen sind. In Teilprojekten wurden auf Basis der identifizierten Wissenslücken verschiedene Fragestellungen untersucht. Diese und die verwendeten Herangehensweisen werden nachfolgend aufgeführt.

1) Im Rahmen des Projekts "**NO_x-Belastungen an Bundesfernstraßen unter Berücksichtigung der Schadstoffklassen des Schwerverkehrs**" sollte ermittelt werden, welche Erkenntnisse aus der Verschneidung von Schadstoffmessdaten und Informationen aus den Mautdaten gewonnen werden können. Dazu wurden aus anonymisierten Mautdaten vorliegende Informationen über Lkw-Verkehrsströme genutzt, um detaillierte, d. h. zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Lkw-Verkehr und der momentanen Luftschadstoffbelastung im Umfeld einer betrachteten Bundesfernstraße zu gewinnen.

Der Verkehr auf den Bundesfernstraßen setzt sich überwiegend aus Pkw und Lkw zusammen, wobei der Anteil des Schwerverkehrs je nach Strecke über 25 % liegen kann. Verkehrsaufkommen und -zusammensetzung haben dabei Einfluss auf die momentane Luftbelastung an Straßen. Zwar legen die abgesenkten Emissionsgrenzwerte für Neufahrzeuge sinkende Realemissionen nahe, ein möglicher schadstoffmindernder Effekt wird jedoch möglicherweise durch den steigenden Verkehr kompensiert. Wie hoch der Beitrag des Lkw-Verkehrs zur lokalen Luftschadstoffbelas-

tung im Umfeld der Straße ist, kann nicht genau ermittelt werden, da mittels Immissionsmessungen nur die Gesamtbelastung der jeweiligen Luftschadstoffe an Straßen erfasst werden kann.

Seit Jahresbeginn 2005 wird in Deutschland eine streckenbezogene Gebühr für Lkw auf Autobahnen erhoben. Die Mautpflicht gilt für Lkw ab einem zulässigen Gesamtgewicht von mindestens 7,5 t (12 t bis zum 30.09.2015) grundsätzlich auf allen Bundesautobahnen und Bundesstraßen (bis 30.06.2018 nur auf einzelnen Bundesstraßen). Im Zuge der Mauterhebung durch die Betreibergesellschaft Toll Collect werden digitale Prozessdaten unter anderem über die Fahrten der mautpflichtigen Lkw generiert, dem BAG zur Verfügung gestellt und dort weiter aufbereitet. Die mautpflichtigen Fahrten können unter anderem nach Schadstoffklassen der Lkw differenziert werden. In dem Projekt wurden die Daten der Luftschadstoffmessungen der BASt an der BAB 4 zwischen der Autobahnabfahrt 19 – Bergisch Gladbach-Bensberg und der Abfahrt 20 – Bergisch Gladbach-Moitzfeld mit den Informationen aus den Lkw-Mautdaten des BAG des entsprechenden Abschnittes verknüpft, um den Schadstoffbeitrag von Lkw an Bundesfernstraßen genauer zu untersuchen. Die BAB 4 verläuft im Bereich der Luftschadstoffmessstation von West nach Ost. Die Messstation selbst befindet sich bei Streckenkilometer 92,7 ca. 15 m südlich der BAB 4. Die Immissionsmessungen der BASt umfassen u. a. die Parameter NO_2 , NO , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ und O_3 . Ergänzt werden die Immissionsmessungen durch meteorologische Messungen der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der Temperatur, die ca. 300 m nördlich der Messstation auf dem Dach der BASt vorgenommen werden. Für die Auswertung wurden insbesondere Messwerte berücksichtigt, bezüglich derer die Messstation aus dem Bereich über die BAB 4 zwischen 250 ° und 70 ° (Südwest bis Nordost) angeströmt wurde. Die Daten von BASt und BAG wurden für die Untersuchung über den Zeitraum von Januar bis September 2018 miteinander verknüpft und ausgewertet. Weitere Auswertungen sind für die zweite Phase des BMVI-Expertenetzwerks geplant.

2) Die Partikelemissionen aus dem Straßenverkehr basieren nicht ausschließlich auf Verbrennungsprozessen, sie beinhalten zusätzlich Abriebpartikel, die durch Abnutzung von Bremsen, Reifen und Fahrbahnoberfläche erzeugt werden. Darüber hinaus können Korrosion an Fahrwerk und

Karosserie sowie Verwitterung von Verkehrsinfrastrukturen zu mechanisch generierten Abriebpartikeln in der Luft beitragen. Aufgrund technischer Verbesserungen, z. B. Partikelfilter für Dieselmotoren, wird eine Verringerung der Emissionen von Verbrennungspartikeln erwartet, wenn die genutzten Technologien vorschriftsmäßig betrieben werden. Für die Abriebpartikel ist aber eine ähnliche Entwicklung nicht erkennbar.

Ziel des Vorhabens "**Monitoring verkehrsbedingter Abriebpartikel an Bundesautobahnen**" ist die kontinuierliche Messung und Überwachung des Beitrags von verkehrsbedingten Abriebpartikeln im Hinblick auf die Gesamtbelastung durch den Verkehr. Darüber hinaus sollen die möglichen Einflüsse und Auswirkungen der sich verändernden meteorologischen Bedingungen im Zuge des weltweiten Klimawandels (z. B. globale Erwärmung) auf die zukünftige Entwicklung verkehrsbedingter Abriebpartikel untersucht werden.

Daher hat zum Thema verkehrsbedingter Abriebpartikel in der Luft im Hinblick auf die Gesamtbelastung durch den Verkehr, das BMVI-Expertenetzwerk, in Zusammenarbeit mit den Universitäten Straßburg (F), Freiburg (D) und Pennsylvania (USA), ein Langzeit-Monitoring-Programm für die Partikelprobenahme und -analyse an hoch frequentierten Bundesautobahnen in Deutschland initiiert.

Für das Monitoring wurde die Einzelpartikelanalyse mittels konzertierter Durchlicht- und Elektronenmikroskopie an groben Umgebungsaerosolen von zwei stark frequentierten Autobahnen sowie einer innerstädtischen Bundesstraße durchgeführt. Die ausgewählten Straßen unterscheiden sich in Verkehrsmodus, Verkehrsgeschwindigkeit und Verkehrsflotte.

3) Im Rahmen des Projektes "**Verkehrsbedingte Abriebe**" wird der Eintrag von Mikropartikeln synthetischer Polymere (MP) durch Abriebe, die durch die verschiedenen Verkehrsträger verursacht werden, in die Umweltkompartimente Boden und Wasser untersucht. Der Schwerpunkt liegt auf den Transportvorgängen. Potenzielle Eintragsquellen von MP stellen die Abriebe von Reifen, Bremsen und Farbanstrichen dar. Nicht betrachtet werden die MP-Abriebe, die durch die Abnutzung von Bauwerken und Infrastruktur entstehen. Zur Quantifizierung des Eintrags und

Verbleibs von MP durch verkehrsbedingte Abriebe wurden Daten aus der wissenschaftlichen und der sogenannten grauen Literatur sowie Informationen von Verbänden ausgewertet und eigene Berechnungen durchgeführt. Die jährlich in Deutschland anfallenden Emissionen des Reifenabriebs differenziert nach Fahrzeugtypen und – soweit möglich – Straßentypen (Innerorts- und Außerortsstraßen, Autobahnen) wurden mithilfe von Emissionsfaktoren nach DELTARES & TNO (2016) und Gebbe et al. (1997) sowie auf Basis der jährlichen Verkehrsleistungen (Bäumer et al. 2017a, Bäumer et al. 2017b) berechnet.

4) Um die Verwertbarkeit der bundesländereigenen Feinstaub- und Gewässermesswerte hinsichtlich der Aussagekraft für die Emissionsbelastung aus dem Schienenverkehr zu überprüfen, wurden in dem Projekt **"Identifizierung und Charakterisierung der Schadstoffbelastung aus dem Schienenverkehr"** die Standorte entsprechender Messstationen (n = 1.386 Feinstaub, n = 413 Glyphosat/Aminomethylphosphonsäure) der einzelnen Bundesländer recherchiert und in ein Geografisches Informationssystem (GIS) überführt. Durch räumlichen Verschnitt mit dem Schienennetz des Bundes wurden die Stationen, die eine mögliche Abbildung bahnspezifischer Emissionen zulassen (Abstand ≤ 100 m Feinstaub, ≤ 200 m Glyphosat/Aminomethylphosphonsäure), identifiziert und die entsprechenden Messdaten von den verschiedenen Bundesländern bezogen. Die georeferenzierte Darstellung erfolgte hinsichtlich bestehender umweltspezifischer Grenzwerte bzw. ermittelter Durchschnittswerte (bundesweit) und der in Schienennähe gemessenen Belastungsniveaus. Die Aufbereitung der Daten dient zum einen der Überprüfung und Evaluierung der aktuellen/bestehenden Datengrundlagen sowie der Identifizierung des möglichen Forschungs- und Untersuchungsbedarfs.

Ergänzend zur Auswertung der bestehenden Datenbasis erfolgten erste orientierende zeitlich hochaufgelöste Feinstaubmessungen an bahnspezifischen Emissionsquellen wie Baustellen, an der freien Strecke, an Bahnübergängen oder Bahnhöfen. Als Messparameter wurden die umweltbedingten Massenfraktionen PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_4 , PM_{10} und TSP sowie die Partikelanzahl bestimmt.

5) Im Projekt **"Betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschifffahrt"** wurden zur Quantifizierung

der Binnenschiffsemissionen für eine anschließende Bewertung von Minderungsmaßnahmen zwei Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz fokussiert den Einzelfahrer, während der Schwerpunkt des zweiten Ansatzes auf der Emissionsbetrachtung ganzer Flotten liegt.

Im ersten Ansatz kann für ausgewählte Strecken bei gegebenen Wasserstands- und Strömungsverhältnissen auf Basis der Schiffsfahrdynamik der damit in Verbindung stehende Leistungs- und Treibstoffbedarf modelliert werden. Auf der Grundlage des somit ermittelten Treibstoffverbrauchs und der Motorlast werden in diesem Ansatz die Emissionen über motorspezifische Faktoren und perspektivisch auch über stöchiometrische Analysen berechnet. Dies ermöglicht die Simulation und nachfolgend die Bewertung von Maßnahmen zur Emissionsminderung für individuell betrachtete Schiffstypen und Schiffsparameter an ausgewählten Streckenabschnitten. Zur Kalibrierung und Verifizierung der Modellierung werden *Onboard*-Messungen der Schiffsbewegung, der Strömung und der Betriebskenn- und Emissionswerte benötigt, die im Rahmen dieses Projektes im Realbetrieb eines Großmotorgüterschiffs durchgeführt wurden. Die sogenannten *Real-Driving-Emissions* wurden am Abgasendrohr des Hauptmotors sowohl in der Berg- als auch in der Talfahrt gemessen. Mit einer Messfrequenz von 0,1 Hz wurden dabei Kohlenstoffoxide (CO , CO_2), Stickstoffoxide (NO , NO_2), Schwefeldioxid (SO_2), Partikelanzahl (PN), Kohlenwasserstoffe (HC) und Ruß (EC) gemessen. Über mindestens zehn Minuten wurden mehrere Proben sowohl von Staub (PM) als auch von der Partikelgrößenverteilung des Staubs genommen und anschließend im Labor analysiert.

Der zweite Ansatz verfolgt die Quantifizierung und Bewertung von Emissionsminderungsmaßnahmen auf Basis von Flottenbetrachtungen für größere Streckenabschnitte und längere Zeiträume. Im Gegensatz zum Vorgehen der LuWaS-Modellierung (z. B. in LANUV, 2016) liegt der Schwerpunkt hier, wie beim ersten Ansatz, auf der Simulation veränderter Rand- und Rahmenbedingungen zur Bewertung von Emissionsminderungsmaßnahmen. Zwar werden bei dem zweiten Ansatz, wie im LuWaS-Verfahren, Emissionsfaktoren und statistische Kennzahlen zu Schiffsklassen und zur Motorisierung verwendet, Daten zu Strömung, Schiffsgeschwindigkeit und Passage-Dauer der betrachteten Strecke werden aber für einzelne Schiffe

der modellierten Flotte individuell betrachtet. Für eine detaillierte Methodenbeschreibung und deren Übereinstimmung mit und Abgrenzung zu LuWaS sei auf Walz (2019) verwiesen. Für die Entwicklung der Methode wurde auf verfügbare AIS-Daten (Automatic Identification System) aus dem Jahr 2013 für zwei Streckenabschnitte des Niederrheins zurückgegriffen. AIS-Daten ermöglichen statistische Auswertungen des Schiffverkehrs, z. B. die Auswertung der Flottenstruktur, Schiffsgeschwindigkeiten und Passagedauer der beobachteten Streckenabschnitte.

6) Für das Projekt "Modellanalyse Schadstoffemissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen" (siehe Handlungsfeld c) erfolgte die **"Auswertung vorhandener Schiffsverkehrsdaten"** für die Untersuchungsgebiete Duisburg und Frankfurt. AIS-Daten, die eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste Quantifizierung des Schiffsverkehrs ermöglichen, standen im erforderlichen räumlichen und zeitlichen Umfang (Großräume Duisburg und Frankfurt, Bezugsjahr 2016) nicht zur Verfügung, da die von Schiffen ausgesandten AIS-Signale nicht routinemäßig gespeichert werden. Dementsprechend mussten für die Ermittlung der schiffahrtsbedingten Emissionen im Rahmen des genannten Projektes andere, weniger aufgelöste Daten herangezogen werden. Neben AIS-Daten ermöglichen Daten von einzelnen Schleusen und Auswertungen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes und des Statistischen Bundesamtes, die in Form von jährlichen Berichten veröffentlicht werden (hierbei verwendet: WSD 2010, GDWS 2016, DESTATIS 2010, DESTATIS 2016), Aussagen zur Schifffahrt auf Bundeswasserstraßen. Zusätzlich ist die Netzumlegung auf die Wasserstraßen als Teil der Verkehrsprognose Bestandteil des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) 2030 mittlerweile unter der Bezeichnung TraVis⁹ (Transportmengenvisualisierung) bekannt. Diese potenziellen Datenquellen wurden ausgewertet. Die Ergebnisse der Analyse dienten als Eingangsdaten für die Modellierung des oben erwähnten Projektes.

Für das Untersuchungsgebiet Hamburg des oben genannten Projektes wurden in Absprache mit der Stadt Hamburg die Emissionsdaten zum Schiffsverkehr der Hamburg Port Authority (HPA) übernommen (siehe auch Luftreinhalteplan Hamburg 2015. Durch die unterschiedliche Ermitt-

lung der Emissionsdaten für die Regionen Duisburg und Frankfurt a. M. im Vergleich zu Hamburg ergibt sich eine Unschärfe in den zu erwartenden Ergebnissen, so dass die Modellrechnungen von Duisburg und Frankfurt nicht absolut vergleichbar sind mit der Modellrechnung für Hamburg. Genauere Hinweise sind dem Schlussbericht Mitte 2020 zu entnehmen.

2.3.3.2 Handlungsfeld b) Wirkungen emittierter Schadstoffe auf Mensch und Umwelt

Insbesondere die Erkenntnisse zu Reifenabrieben und deren Eintragspfaden und Senken in der Umwelt sowie deren human- und ökotoxikologische Wirkungen werden aktuell international diskutiert. Die Daten zu der allgemeinen und aktuellen Diskussion stammen aus internationalen Untersuchungen und müssen hinsichtlich nationaler Randbedingungen untersucht werden. Insbesondere zu den Wirkungen von Reifenpartikeln auf Ökosysteme sind Detailfragen noch zu klären, um gezieltere Aussagen zu geeigneten Maßnahmen zu ermöglichen.

Weiterführend zu dem Projekt "Verkehrsbedingte Abriebe" wurden Daten zu möglichen ökotoxikologischen Wirkungen von Reifenabrieben durch Literaturrecherchen gesichtet und zusammengefasst. Zur Ergänzung der in der Literatur verfügbaren ökotoxikologischen Daten wurde im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks ein Projekt zur vergleichenden "Charakterisierung biologischer Wirkprofile von Reifenabrieben" (ökotoxikologischer Fingerabdruck) durchgeführt. Vergleichende Untersuchungen hinsichtlich dieser Problematik für den Verkehrsträger "Schiene" (Abrieb Verbundstoffbremssohlen, Fahrdracht) sind in der 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerkes vorgesehen.

Hierfür wurde in Analogie zu bereits veröffentlichten Studien im Sinne einer Produktcharakterisierung Gummi von Reifenlaufflächen unterschiedlicher Hersteller, Reifentypen sowie Abnutzungsgrade in kleine Partikel gerieben, um Material von Reifenabrieb zu simulieren. Durch die anschließende Extraktion mit organischen Lösemitteln wurde ein Worst-Case-Szenario des Austritts potenziell schädlicher Substanzen abgebildet. Die gewonnenen Extrakte wurden sowohl chemisch-analytisch mittels Gaschromatografie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC/MS) als auch mittels verschiedener spezifischer biologischer Testverfahren

⁹ online frei unter <https://travis.baw.de> zugänglich

charakterisiert. Hierbei lag u. a. aufgrund der Literaturlage ein Fokus auf der Bestimmung östrogenen Potenziale der Extrakte.

In einem weiteren Forschungsprojekt wurden die Abwässer aus Abgasentschwefelungsanlagen in der Seeschiffahrt ökotoxikologisch unter Berücksichtigung technischer Entwicklungen und sich verändernder gesetzlicher Rahmenbedingungen untersucht. Im Zuge neuer Regularien der IMO zur Begrenzung der Schwefelemission durch die Seeschiffahrt wird ein Schwefelgehalt von < 0,5 % weltweit ab 2020 im Kraftstoff vorgeschrieben. In Emissionskontrollgebieten wie der Nord- und Ostsee gilt bereits seit 2015 ein Grenzwert von < 0,1%. Alternativ kann ein Abgasreinigungssystem (Scrubber) zur Reduktion von SO_x-Emissionen eingesetzt werden. Im Fall der Abgasreinigung werden potenzielle Schadstoffe wie Schwermetalle, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) und andere organische Verbrennungsprodukte in die Meeresumwelt eingetragen. Im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks wurde vor diesem Hintergrund eine vergleichende Charakterisierung ökotoxikologischer Wirkprofile von Zulauf (vor der Abgaswäsche), Ablauf (in die marine Umwelt emittiertes Abwasser) sowie von Proben entlang der Abwasserbehandlung auf Schiffen mit unterschiedlicher technischer Auslegung der Abgasreinigung (closed-loop und open-loop) durchgeführt.

2.3.3.3 Handlungsfeld c) Maßnahmen zur Machbarkeit und Minderung stofflicher Belastungen

Um optimierte Maßnahmenempfehlungen zur Minderung von Schadstoffbelastungen zu ermöglichen, wurden in der Untersuchung **"Modellanalyse Schadstoffimmissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen"** verschiedene Szenarien für unterschiedliche Zeithorizonte in drei ausgewählten Ballungsräumen betrachtet.

In dem Vorhaben werden für die Großräume Hamburg, Frankfurt/Main und Duisburg Rhein/Ruhr, in denen alle Verkehrsträger zugegen sind, verkehrsträgerübergreifende Emissions- und Immissionsmodellierungen vorgenommen. Anhand dieser Modellberechnungen und Szenarien können u. a. die maßgeblichen Schadstoffquellen besser identifiziert werden. Zudem wird untersucht, wie sich eine

zukünftige Emissions- und Immissionsentwicklung aufgrund von unterschiedlichen potenziellen Minderungsmaßnahmen auf die Luftqualität in den ausgewählten Gebieten auswirkt. Die Modell-Szenarien betrachten dazu unterschiedliche Entwicklungen (optimierte Verkehrsflüsse; technische Entwicklungen/Verbesserungen in der Motorentechnik für Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr; Nutzung alternativer Kraftstoffe; Einführung bzw. Ausweitung der E-Mobilität; Verhaltensänderungen). Ebenso werden für die Modellierungen deutschlandweit die Hintergrundbelastungen aus Landwirtschaft, Industrie, Privathaushalten und Verkehr berücksichtigt. Zur Validierung werden, soweit vorhanden, öffentlich zugängliche Daten der Landesumweltämter herangezogen. Durch die unterschiedliche Ermittlung der Emissionsdaten für die Regionen Duisburg und Frankfurt a. M. im Vergleich zu Hamburg ergibt sich eine Unschärfe in den zu erwartenden Ergebnissen, so dass die Modellrechnungen von Duisburg und Frankfurt nicht absolut vergleichbar sind mit der Modellrechnung für Hamburg. Genauere Hinweise sind dem Schlussbericht Mitte 2020 zu entnehmen.

Im Rahmen der verkehrsbedingten Emissions- und Immissionsmodellierung werden insbesondere die Entwicklung der Luftschadstoffe (NO₂, NO, NO_x, PM₁₀, PM_{2,5}, SO₂, O₃, CO, HC) sowie zusätzlich von CO₂ in den Fokus der Betrachtung genommen. Der atmosphärische Transformationsprozess (d. h. Ausbreitung und chemische Umwandlung) der Emissionen von Luft-, Land- und Wasserfahrzeugen zu den lokalen Schadstoffimmissionen wird möglichst realitätsnah durch ein Chemie-Transport-Modell abgebildet. Der Betrachtungszeitraum für die Modell-Szenarien umfasst einen Jahreszyklus, da sich die meteorologischen Verhältnisse im Verlauf der Jahreszeiten deutlich verändern, was einen erheblichen Einfluss auf die Luftschadstoffkonzentrationen hat. Als Basisjahr wurde das Jahr 2016 festgelegt. Ausgehend von dem Basisjahr werden die Szenarien für 2025 und 2030 u. a. hinsichtlich der Verkehrsentwicklung berechnet.

Die Verkehrsdaten für die Modellierung der verkehrsbedingten Emissionen wurden in Absprache mit den Landesumweltämtern von Hessen, Nordrhein-Westfalen und Hamburg sowie den Flughafenbetreibern und der DB von den jeweiligen Behörden oder Institutionen übernommen.

Zur Berechnung der verkehrsbedingten Emissionen wurde für den Straßenverkehr auf die HBEFA-Emissionsfaktoren-Datenbank Version 3.3 zurückgegriffen, für den Schienenverkehr wurde das Bahn-Emissionskataster Schienenverkehr der DB genutzt und für den Flugverkehr wurden von den jeweiligen Flughafenbetreibern entsprechende Emissionsangaben geliefert. Für den Schiffsverkehr wurde für die Gebiete Duisburg und Frankfurt das Modell LuWas in einer Konfiguration, die für das Schiffsemissionskataster NRW (siehe LANUV Fachbericht 67) entwickelt wurde, verwendet. Für das Gebiet Hamburg wurden in Absprache mit dem BUE und der Hamburg Port Authority (HPA) die Daten der HPA übernommen.

2.3.4 Ergebnisse

Die komplexen Fragestellungen zeigen, dass eine verkehrsträgerübergreifende Betrachtung zu den verschiedenen Umweltkompartimenten notwendig ist. Im Folgenden wird die Systematik gemäß der Handlungsfelder beibehalten und in kurzen Zügen werden die Ergebnisse zum Kenntnisstand der Emissionen der Beiträge der Verkehrsträger dargestellt. Detaillierte Ergebnisse sind den jeweiligen Schlussberichten der Projekte (siehe Abschnitt 2.3.6) zu entnehmen.

2.3.4.1 Handlungsfeld a)

1) In den vorläufigen Auswertungen zu der Verknüpfung der Daten von BAG und BASt zu den **"NO_x-Belastungen an Bundesfernstraßen unter Berücksichtigung der Schadstoffklassen des Schwerverkehrs"** wurde der Zusammenhang zwischen den Parametern Windrichtung, Anzahl der Kfz, Anzahl der Lkw und dem Anteil der verschiedenen Schadstoffklassen sowie der Konzentration von NO und NO₂ analysiert.

Allgemein zeigen die Daten an dem untersuchten Verkehrsabschnitt, dass die Tagesganglinien des Pkw-Verkehrs montags bis freitags in Fahrtrichtung West eine ausgeprägte Morgenspitze und in Fahrtrichtung Ost eine ausgeprägte Nachmittagspitze aufweisen. Samstags und sonntags sind diese morgendlichen bzw. nachmittäglichen Spitzen, hervorgerufen durch den Berufsverkehr, nicht erkennbar.

In Fahrtrichtung West (Ost) wurden samstags im Tagesmittel bis zu 18 % (17 %) und sonntags im Tagesmittel bis zu 24 % (29 %) weniger Pkw im Vergleich zum Pkw-Verkehr montags bis freitags auf der BAB 4 für den Untersuchungszeitraum Januar und September 2018 gezählt. Sowohl in Fahrtrichtung West als auch in Fahrtrichtung Ost weisen die Tagesganglinien des Lkw-Verkehrs montags bis freitags zwischen ca. 9 und 14 Uhr die höchsten Werte auf. Im Tagesmittel wurden in Fahrtrichtung West (Ost) samstags bis zu 81 % (82 %) und sonntags bis zu 95 % (93 %) weniger Lkw im Vergleich zum Lkw-Verkehr werktags gezählt.

Zudem zeigen die Daten des BAG, dass die Lkw-Flotte im Untersuchungszeitraum und -gebiet schon zu mehr als 70 % mit Fahrzeugen der besten Schadstoffklasse S6 (S6 = Euro VI) durchsetzt ist. Aufgrund der Auswertung der zu nutzenden kumulierten Stundenwerte, sowohl für die Anzahl der aufkommenden Lkw als auch ihrer Schadstoffklasse, ist eine Auswertung hinsichtlich des Schadstoffbeitrags von Lkw mit schlechterer Schadstoffklasse nicht möglich. Eine genauere Auswertung als die der kumulierten Stundenwerte war im Rahmen des Projekts nicht möglich.

Die Auswertung der gemessenen NO- und NO₂-Konzentrationen zeigt, dass die meteorologischen Bedingungen – und hierbei vor allem die Berücksichtigung der Windrichtung – eine wichtige Rolle spielen. Kanalisationseffekte im Bereich der Kölner Bucht sorgen im Bereich der Messstation für eine vorherrschende Windrichtung aus Südost (100 ° bis 140 °). Orografisch bedingt gibt es ein zweites, jedoch seltener auftretendes Häufigkeitsmaximum bei Wind aus nordwestlicher Richtung (280 ° bis 320 °).

Während bei Wind aus Nordost bis Südwest (70 ° bis 250 °) daher vor allem die Hintergrundbelastung mit NO₂-Werten zwischen 22 µg/m³ und 23 µg/m³ montags bis freitags, 21 µg/m³ samstags und 18 µg/m³ sonntags im Tagesmittel gemessen wird, liegt die NO₂-Belastung bei Wind aus Südwest bis Nordost (250 ° bis 70 °) montags bis freitags zwischen 47 µg/m³ und 52 µg/m³, samstags bei 43 µg/m³ und sonntags bei 39 µg/m³ im Tagesmittel. Zur Berücksichtigung des Einflusses der lokalen Straßenverkehrsquellen werden für die weiteren Untersuchungen daher nur die Zeiträume mit Wind aus Südwest bis Nordost (250 ° bis 70 °) betrachtet.

Eine erste Analyse der verknüpften Daten lässt darauf schließen, dass sich der Einfluss der Zusatzbelastung durch den Lkw-Verkehr auf die NO- und die NO₂-Konzentrationen deutlich bemerkbar macht. Samstags liegen im Mittel 8 bis 17 % und sonntags 17 bis 25 % niedrigere NO₂-Konzentrationen im Vergleich zu den Tagesmittelwerten an Werktagen vor.

2) Es hat sich bei den bisherigen Untersuchungen zum **"Monitoring verkehrsbedingter Abriebpartikel an Bundesautobahnen"** der "Super-coarse" Partikelfraktion zwischen 10 und 80 µm (PM10-80) gezeigt, dass an beiden Autobahnen sowie an der Bundesstraße mehr als 90 Vol.-% der Partikel (PM10-80) aus dem Abrieb von Reifen, der Straßenoberfläche und dem Bremssystem stammen (Sommer et al., 2018). Kupplungsverschleißpartikel konnten, wie bereits in Studien der vergangenen Jahre, nicht festgestellt

werden. Die restlichen ~10 % der Partikel konnten biogenen Materialien (z. B. Pflanzenabrieb) und Bodenmineralen zugeordnet werden. Die Mehrzahl der Abriebpartikel unterschied sich in Größe, Zusammensetzung und Struktur (Abbildung 22) je nach den an diesem Straßenabschnitt typischen Geschwindigkeitsprofilen, der Flottenzusammensetzung sowie des Level of Service (LoS, "Verkehrsauslastung"). Die groben Reifenabriebe z. B. wiesen eine Verkrustung durch kleinere Partikel aus diversen anderen Quellen auf, die mit einer Verdichtung des Verkehrsflusses zunahm. Dies führte bis zu einer vollständigen Verkrustung unter Stop-and-go-Bedingungen. Daher bestehen die Reifenabriebpartikel nicht nur aus ihrem ursprünglichen Gummikern mit seinen verschiedenen Additiven (z. B. Al, Ti, Fe, Zn, Cd, Sb oder Pb), sondern auch aus potenziell gefährlichen Metallen und Metalloiden (z. B. Al, Fe, Cu, Sb oder Ba), die z. B. aus den Bremsbelägen abgerieben wer-

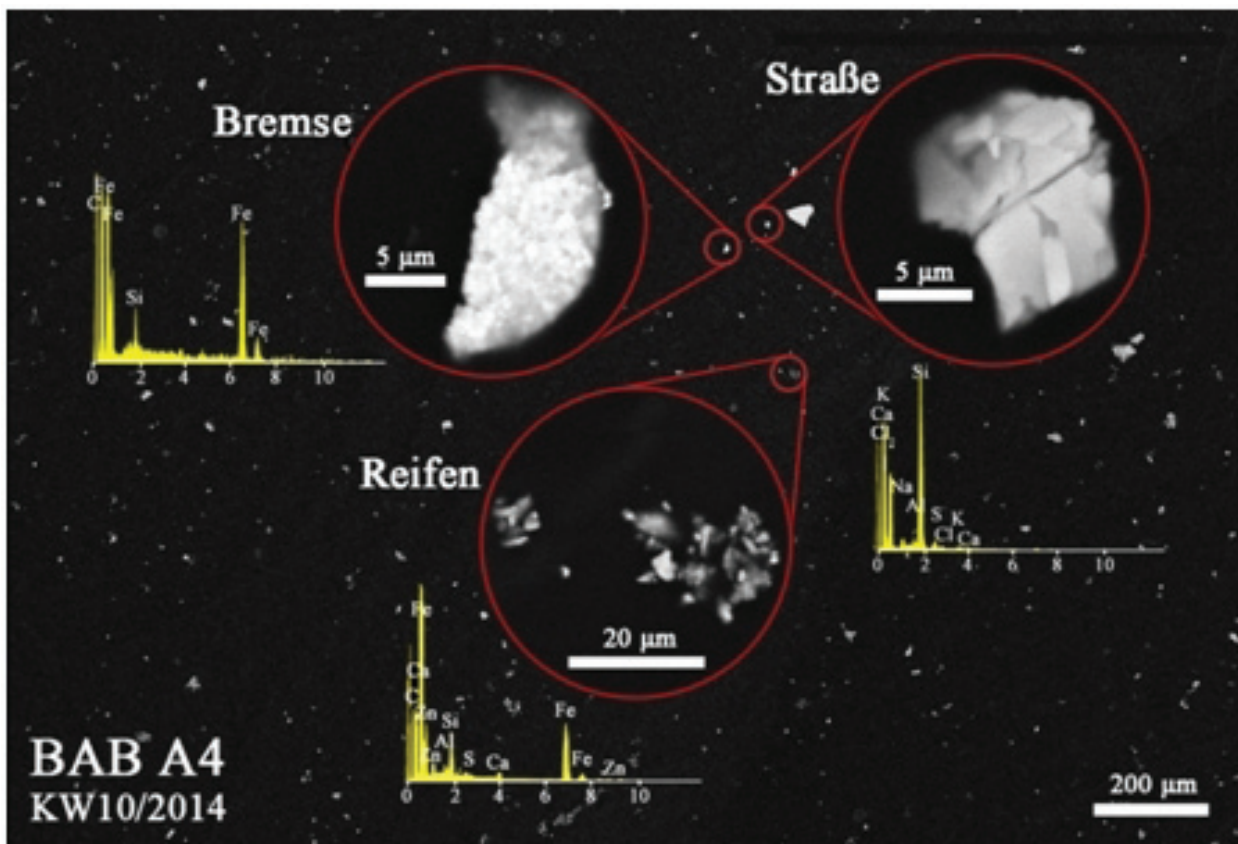


Abbildung 22: Beispiel verkehrsbedingter Abriebpartikel unter dem Rasterelektronenmikroskop mit Röntgenspektroskopie für eine detaillierte chemisch-mineralische Einzelpartikelanalyse (Foto: DWD).

den. Ein anderes Beispiel ist die Zunahme des Anteils der Bremsabriebpartikel bei Verkehrssituationen mit einer erhöhten Anzahl an Bremsmanövern.

3) Im Rahmen des Projektes "**Verkehrsbedingte Abriebe**" wird aufgezeigt, dass Reifenabrieb eine der größten Quellen für die Emission von partikulärem Kunststoff in die Umwelt darstellt. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche sowie langjähriger Forschungsarbeiten der BASt und Praxiserfahrungen aus der Niederschlagsentwässerung die jährlichen Emissionen des Reifenabriebs in Deutschland berechnet und deren Einträge über alle relevanten Pfade in Wasser und Boden abgeschätzt, um eine verlässliche Aussage über den potenziellen Eintrag von Reifenabrieb in Oberflächengewässer zu gewinnen.

Der Polymeranteil der Reifenlaufflächen beträgt ca. 50 Massenprozent. Die Entstehung des Reifenabriebs wird durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmt, deren Einfluss auf Abriebmenge und -eigenschaften bisher nicht im Detail quantifiziert ist. Beim Abriebprozess verbindet sich das Reifenmaterial inseparabel mit Bestandteilen der Straßenoberfläche und weiteren feinen Abrieben. Dadurch treten eine signifikante Erhöhung der Dichte von 1,2 auf 1,5 bis 2,2 g/cm³ sowie eine Änderung der chemischen Zusammensetzung ein, die das Umweltverhalten sehr stark beeinflussen.

Nach unserer Berechnung werden in Deutschland je nach angesetzten Parametern jährlich 75.000 bis 98.000 t Abrieb von Reifenlaufflächen durch den Straßenverkehr freigesetzt. Hiervon werden etwa 57.300 bis 65.400 t/a in den straßennahen Boden eingetragen. Von den gesamten Verkehrsflächen ergibt sich ein jährlicher Eintrag von ca. 8.700 bis 19.800 t/a in Oberflächengewässer in Deutschland. Derzeit liegen keine Ergebnisse aus Feldstudien an deutschen Fließgewässern vor, die unsere Berechnung absichern. Zum Abbau des Polymeranteils im Freiland liegen nur sehr wenige Informationen vor. Modellierungen an französischen und niederländischen Tieflandflüssen deuten darauf hin, dass annähernd 100 % bzw. 90 % des Reifenabriebs im Flusssystem verbleiben könnten. Übertragen auf Deutschland würde dies bei vergleichbaren hydrologischen Bedingungen einen Eintrag von maximal 2000 t/a

Reifenabrieb bzw. maximal 1000 t/a Polymeren aus Reifen in die marine Umwelt bedeuten.

Hier besteht großer Forschungsbedarf, da bisher weder Feldstudien noch Modellierungen zum Transport und Abbau von Reifenabrieb für Fließgewässer in Deutschland vorliegen.

4) Die georeferenzierte Darstellung der möglichen Schadstoffemissionen aus dem Schienenverkehr identifiziert ein deutliches Informations- und Datendefizit. Für den Parameter "Feinstaub" befinden sich unter den identifizierten Messstationen der Bundesländer noch 31 aktive Stationen (Stand 2017) und sieben weitere, die im Laufe der letzten fünf Jahre deaktiviert wurden und sich innerhalb des 100 m-Abstands zum Schienennetz befinden. Eine weitere Reduktion der Stichprobengrößen erfolgt durch Variationen im Messprogramm und der technischen Ausstattung der Messstationen. Insgesamt beläuft sich die Stichprobengröße auf 17 bis 22 Messstandorte für PM₁₀ und 10 bis 13 Messstandorte für PM_{2,5} in den dargestellten Jahren 2013 bis 2017. In den Bundesländern Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Thüringen befindet sich keine Feinstaub-Messstation in einer Entfernung von bis zu 100 m zum Eisenbahnnetz. Im Allgemeinen zeigt die georeferenzierte Auswertung der Landesmessstellendaten für den Parameter Feinstaub in den Jahren 2013 bis 2017 keine Überschreitung der Grenzwerte von PM₁₀ und PM_{2,5} in der Nähe zum Eisenbahnnetz des Bundes (Abbildung 23).

Für den Bereich des Gewässerschutzes wurde der Belastungsgrad mit dem Wirkstoff Glyphosat und seinem Metaboliten AMPA (Aminomethylphosphonsäure) an schienennahen Landesmessstellen für Grund- und Oberflächengewässer (≤ 200 m) untersucht. Aufgrund der unterschiedlichen Parameterspektren und Beprobungsintervalle der Bundesländer konnten im Untersuchungszeitraum von 2010 bis 2016 für den Bereich Grundwasser 13 bis 46 und für Oberflächengewässer 12 bis 19 Messstellen identifiziert werden.

Nach Angaben des Umweltbundesamtes (2016) liegen die höchsten gemessenen Konzentrationen in deutschen Oberflächengewässern bei 4,7 µg/l für Glyphosat und unter 4 µg/l für AMPA. Im Rahmen einer europaweiten Pflanzenschutzmittel (PSM)-Belastungsstudie des Grund-

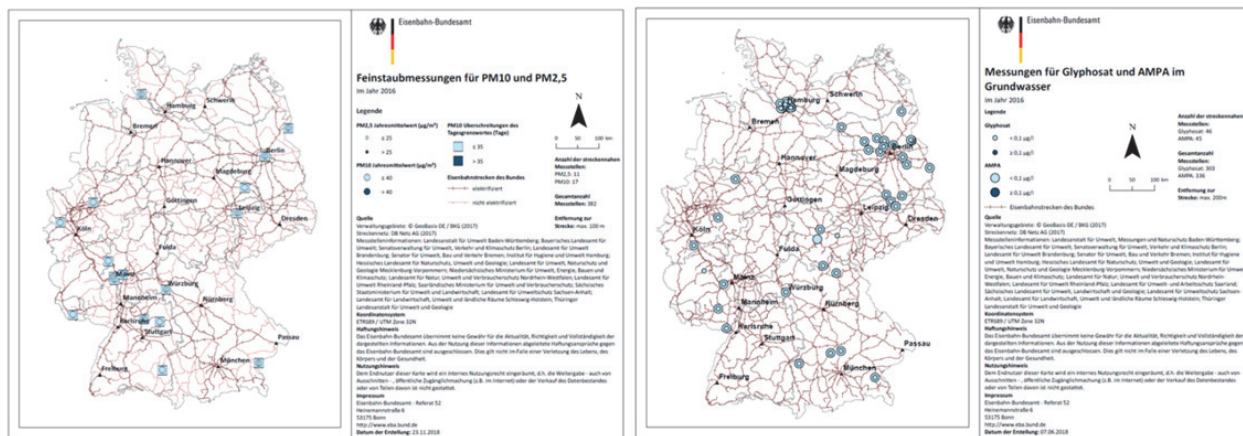


Abbildung 23: Exemplarische georeferenzierte Darstellung der Feinstaub und Glyphosat-/AMPA-Emissionen aus dem Messnetz der Bundesländer entlang von Schienenwegen für das Jahr 2016.

wassers wurde an 66.662 Messstellen Glyphosat und an 51.652 Messstandorten AMPA nachgewiesen. Der Anteil der Messstandorte, die den gesetzlich festgelegten Grenzwert für PSM-Wirkstoffe und relevante Metaboliten von $0,1 \mu\text{g/l}$ im Grundwasser überschritten, lag bei $< 1 \%$.

Im Rahmen des Projektes "Identifizierung und Charakterisierung der Schadstoffbelastung aus dem Schienenverkehr" konnten keine Überschreitungen des Grenzwertes von $0,1 \mu\text{g/l}$ (Glyphosat und/oder AMPA) im Grundwasser nachgewiesen werden (Abbildung 23). Für schienennahe Oberflächengewässer-Messstellen konnten in den Jahren 2011, 2012, 2015 und 2016 an 1 bis 3 Messstellen (Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Mecklenburg-Vorpommern) nur für den Metaboliten AMPA Konzentrationen bis zu $5,3 \mu\text{g/l}$ identifiziert werden. Die gemessenen Konzentrationen für Glyphosat lagen alle unter $0,1 \mu\text{g/l}$. Einen verbindlichen Grenzwert für Oberflächengewässer nach Oberflächengewässerverordnung (OGewV) gibt es derzeit sowohl für Glyphosat als auch für AMPA nicht. Eine Zuordnung der PSM/Metabolit-Konzentrationen zu Vegetationskontrollmaßnahmen des Schienenverkehrs ist für die entsprechenden Standorte nicht gegeben.

Die georeferenzierte Darstellung von umweltrelevanten Emissionen entlang von Schienenwegen verdeutlicht die geringe Datenbasis und Studienausrichtung hinsichtlich Umweltbelastung und Schienenverkehr, die Schwierigkeiten der Quellzuordnung und Elimination von anthropoge-

nen Störfaktoren sowie die geringe Verwertungsmöglichkeit der aktuellen Landesmessstellen für die Beurteilung der schienenbezogenen Schadstoffemissionen.

Aufgrund der Identifizierung des bestehenden Wissens- und Datendefizits wurde 2019 vom BMVI das Projekt "Einstufung von Niederschlagswasser auf Streckengleisen – Quantifizierung und Charakterisierung der Abflussmenge und chemischen Zusammensetzung von Niederschlagswasser" (Laufzeit: 2019 bis 2022) gestartet, in dessen Rahmen fünf Dauermessstellen an Schienenwegen etabliert und die Schadstoffausbreitung modelliert werden. Ergänzend dazu wurde im "Bundesforschungsprogramm Schiene" (BMVI 2019) die Etablierung eines Luftschadstoff-Monitoringprogramms für den Schienenverkehr verankert. Somit konnte ein aktiver Wissenstransfer hinsichtlich der Bedarfsanalyse und Handlungsempfehlungen durch das BMVI-Expertenetzwerk realisiert werden.

Zur Charakterisierung der Feinstaubbelastung an unterschiedlichen Emissionsquellen aus dem Schienenverkehr wurden erste orientierende Messungen durchgeführt. Insbesondere die urbane Partikelbelastung bzw. die Feinstaubbelastung in Ballungsgebieten ist gekennzeichnet durch eine hohe kleinräumige Variabilität sowie eine große Anzahl verschiedenartiger Schadstoffquellen, deren Konzentration und Spektrum neben der Entfernung und Orientierung zum Emittenten auch von der umgebenden Infrastruktur und den Ventilationsmöglichkeiten abhängt.

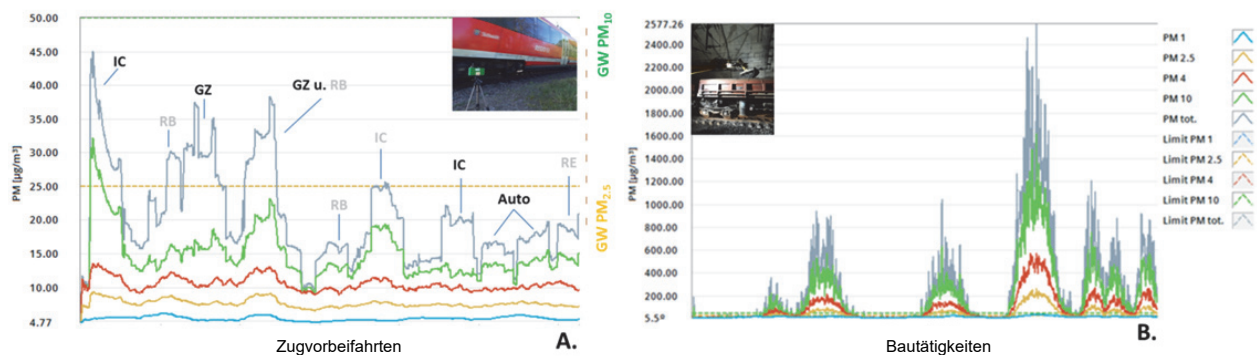


Abbildung 24: Exemplarische Feinstaubmessungen an einem Bahnübergang (A.) und bei Bautätigkeiten im Eisenbahntunnel bei Schotterverladungen (B.); A: Messabstand zum Gleis 5m; Messhöhe 1,5m; Messstandort Bonn; schwarz: Vorderes Gleis; grau: Hinteres Gleis; GW: Grenzwert; IC: Intercity; GZ: Güterzug; RB: Regionalbahn; RE: Regionalexpress (Foto: DZFS/EBA).

Somit weisen Messstandorte innerhalb eines Tunnels (Abbildung 24 B.) oder eines Bahnhofes sowohl eine stark reduzierte Luftdurchmischung als auch eine Akkumulation von Luftschadstoffen auf. Einflussgrößen wie Aufwirbelungen durch den Fahrtwind oder Bautätigkeiten erhöhen die Feinstaubbelastung zusätzlich. Emissionsmessungen in und an Baustellen wiesen eine 20- bis 50-fach höhere Feinstaubbelastung (Partikel > 10 µm) im Vergleich zu Messungen an gut belüfteten Standorten der freien Strecke auf.

Obwohl das von den Bundesländern und dem Umweltbundesamt betriebene Messnetz aus einer hohen Anzahl Messstationen besteht, ist eine kleinräumige Schadstoff-Expositionsabschätzung für den Bereich des Schienenverkehrs nicht bzw. nur unzureichend möglich. Daher sind auch über 2020 hinaus weitere orientierende Messungen zur Feinstaubbelastung durch den Schienenverkehr im BMVI-Expertenetzwerk geplant.

5) Die Messungen von *Real-Driving-Emissions* eines Großmotorgüterschiffs auf dem Rhein im Projekt "**Betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschifffahrt**" zeigen, dass der leistungsspezifische Massenstrom an Emissionen bei geringerer Last tendenziell höher ist, wobei das Maximum von CO zwischen 30 und 40 % und das Minimum von NO_x zwischen 60 und 72 % vorliegt (Abbildung 25). Dieselbe Tendenz wurde für den Ausstoß von Partikeln (PM) beobachtet (ohne Abbildung). Diese Messwerte dienen zusammen mit noch ausstehenden Ergebnissen geplanter Onboard-Messungen sowie weiteren aufgezeich-

neten Motor-Betriebsparameter und Strömungsmesswerten der Kalibrierung und Verifizierung des Motorenmodells und damit der Modellierung von Einzelfahrer-Emissionen. Ergebnisse der Emissionsabschätzung auf Basis von fahrdynamischen und Motorenmodellierungen liegen derzeit noch nicht vor.

Auf Basis des zweiten Berechnungsansatzes wurden Flottenemissionen entlang zweier Abschnitte des Niederrheins bei Düsseldorf (Rhein-km 720 bis 756) und Voerde (Rhein-km 791 bis 815) für die Zeiträume 14.05.2013 bis 29.06.2013 (Abschnitt Düsseldorf) bzw. 11.07.2013 bis 12.08.2013 (Abschnitt Voerde) modelliert und über die jeweiligen Strecken und Zeiträume normiert (Tabelle 5). Demnach liegen die Emissionen aller modellierten Abgase und Partikel am Abschnitt Voerde über jenen des Abschnitts Düsseldorf. Dies ist auf ein höheres Verkehrsaufkommen am Abschnitt Voerde (ohne Abbildung) zurückzuführen.

6) Anhand der "**Auswertung vorhandener Schiffsverkehrsdaten**" für die Untersuchungsgebiete Duisburg und Frankfurt des Projekts "**Modellanalyse Schadstoffemissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen**" (siehe Handlungsfeld c) wurde eine Vorgehensweise entwickelt, den Schiffsverkehr (u. a. Schiffsanzahl, Flottenstruktur, Beladungsgrad, Fahrgeschwindigkeiten) innerhalb der Untersuchungsgebiete und über einen Zeitraum von einem Jahr (hier Bezugsjahr 2016) quantifizieren zu können. Denn es hat sich zu Beginn des Projekts gezeigt, dass derzeit keine Datenquelle verfügbar ist, die alle

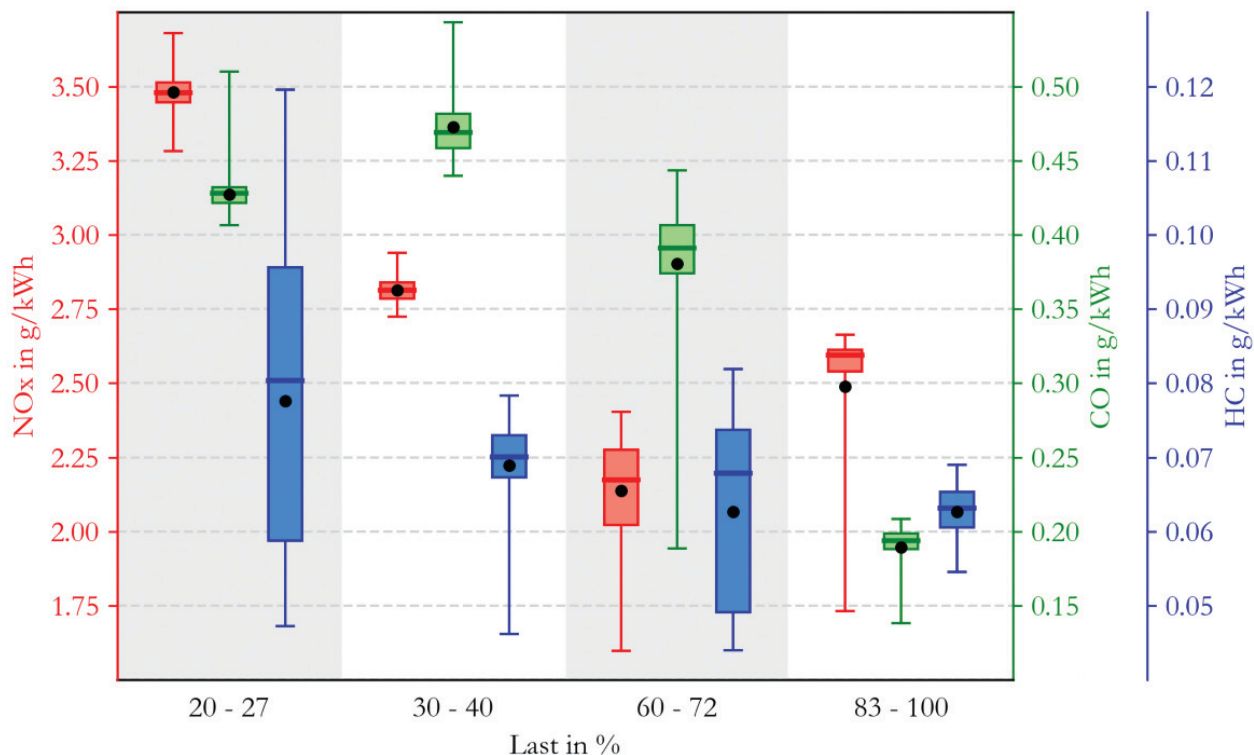


Abbildung 25: Statistische Auswertung von Real-Driving-Emissions eines Großmotorgüterschiffs nach Maximum, oberem Quartil, Median, Mittelwert, unterem Quartil und Minimum der jeweils gemessenen Emissionen.

für eine Modellierung der schiffahrtsbedingten Luftschadstoffemissionen notwendigen Eingangsdaten hinsichtlich des Schiffsverkehrs abdeckt. Schleusenangaben liefern zwar umfangreiche Daten sowohl über beladene als auch nicht beladene Schiffe, jedoch ist der Rhein zwischen Iffezheim bei Karlsruhe und der Grenze zu den Niederlanden freifließend, sodass gerade für die am stärksten befahrenen Wasserstraßenabschnitte im deutschen Binnenland keine Schleusendaten existieren. Auf der anderen Seite enthält TraVis Schiffsverkehrszahlen für das gesamte deutsche Binnenwasserstraßennetz für den Ist-Zustand 2010 und das Prognosejahr 2030, allerdings ausschließlich für beladene Schiffe. Im Ergebnis ist zur Quantifizierung des Schiffsverkehrs in den Großräumen Duisburg und Frankfurt also eine Kombination verschiedener Datenquellen, aus denen jeweils unterschiedliche Angaben entnommen werden können, erforderlich. Folgende Daten ergänzen einander:

- TraVis-Daten: Anzahl und Flottenstruktur beladener Schiffe auf dem Rhein getrennt nach Berg- und Talfahrern für das Jahr 2010,
- Schleusendaten: Anzahl und Flottenstruktur beladener sowie Anzahl leerer Güterschiffe auf den westdeutschen Kanälen, der Ruhr sowie dem Main, getrennt nach Berg- und Talfahrern für das Jahr 2016; beförderte Gütermengen sowie Tragfähigkeitssummen der Schiffe, getrennt nach Berg- und Talfahrern für das Jahr 2016; Angaben zu Fahrgast(kabinen)schiffen auf Kanälen und staugeregelten Flüssen (wegen teilweise pauschaler Abrechnung der Schifffahrtsgebühren jedoch im Einzelfall zu prüfen),
- WSV-Verkehrsberichte (WSD 2010 und GDWS 2016) bzw. DESTATIS Güterverkehrsstatistik (DESTATIS 2010 und DESTATIS 2016): Entwicklung der Anzahl beladener Schiffe zwischen den Jahren 2010 (Bezugsjahr von TraVis) und 2016 (Bezugsjahr für die Modellierung) zur Korrektur der TraVis-Angaben; beförderte Gütermengen auf dem Rhein im Jahr 2016.

Tabelle 5: Berechneter Emissionsausstoß von Binnenschiffen über wenige Wochen auf Basis von AIS-Daten in t.

Rhein-km		720 - 756	791 - 815	Rhein-km		720 - 756	791 - 815
CO	kg/(d • km)	17,1	20,4	CO ₂	kg/(d • km)	7.339,5	8.762,6
	t	28,9	16,1		t	12.418,4	6.939,9
NO _x	kg/(d • km)	132,0	157,7	NO ₂	kg/(d • km)	13,2	15,8
	t	223,0	124,9		t	22,3	12,5
HC	kg/(d • km)	5,5	6,5	SO ₂	kg/(d • km)	2,3	2,7
	t	9,2	5,2		t	3,8	2,2
PM*)	kg/(d • km)	2,8	3,4	Ruß	kg/(d • km)	1,1	1,4
	t	4,8	2,7		t	1,9	1,1

Allerdings offenbart die Analyse der vorhandenen Daten, dass selbst eine Verknüpfung der Datenquellen nicht alle notwendigen Eingangsparameter für die Modellierung schifffahrtsbedingter Luftschadstoffemissionen bereitstellen kann, sodass darüber hinaus Annahmen getroffen werden müssen. Dies betrifft zum Beispiel in Bezug auf Güterschiffe den mittleren Beladungsgrad und die Anzahl an Leerfahrten sowie die Anzahl an Fahrgastkabinenschiffen (Flusskreuzfahrten) auf dem Nieder- und Mittelrhein. Für einige Schiffsverkehrsparameter sind ohne AIS-Daten Annahmen zu vage, sodass z. B. Anzahl und Fahrstrecken des regionalen Fahrgastschiffbetriebes auf dem Rhein im Projekt nicht berücksichtigt werden können. Zudem wurden einige Unsicherheiten in den Daten ersichtlich: Beispielsweise gibt TraVis für den Rhein-Abschnitt an der deutsch-niederländischen Grenze eine Gesamtzahl von etwa 88.000 beladenen Schiffen für das Jahr 2010 aus, wohingegen der WSV-Verkehrsbericht der Wasser- und Schifffahrtsdirektion West für das gleiche Jahr nahezu 108.000 beladene Schiffe am Grenzübergang Emmerich ausweist. Die Abweichung konnte im Rahmen dieses Projektes nicht geklärt werden.

2.3.4.2 Handlungsfeld b)

In den bislang veröffentlichten Wirkungsstudien zur Ökotoxizität von Reifenabrieben wurden die Auswirkungen von Eluaten aus Reifenabrieben auf verschiedene Wasserorganismen wie Wasserflöhe, Insekten, Fische, Algen und Bakterien untersucht (Wagner et al. 2018). Als Testmaterialien wurden Reifenverschleiß, gemahlene Reifenmaterialien und abgenutzte Reifen verwendet, deren Zusammensetzung

sich von Reifenabrieben auf Straßen unterscheidet (siehe Kreider et al. 2010). Die Konzentrationen der akuten toxischen Wirkung liegen im Bereich von 25 mg bis 100 g Reifenpartikel pro Liter, wobei letzterer Wert ein extremes Szenario darstellt. Mögliche Gründe für den großen Konzentrationsbereich, in dem Wirkungen beobachtet wurden, sind Unterschiede in den Rezepturen des Reifenmaterials, im Versuchsaufbau und in der Empfindlichkeit der Arten. Eluate von Reifenpartikeln zeigen über akuttoxische Wirkungen hinaus subletale Effekte wie Teratogenität, Mutagenität und östrogene Effekte (Wik und Dave, 2009). In den durchgeführten Studien lagen die Konzentrationen von Reifenpartikeln in den Testlösungen meist deutlich höher als die Konzentrationen an Reifenabrieb, die bisher in Oberflächengewässern gemessen wurden (Wagner et al., 2018). Wie oben dargestellt, lag aufgrund der Literaturlage bei dem Projekt des BMVI-Expertenetzwerks **"Charakterisierung biologischer Wirkprofile von Reifenabrieben"** ein Fokus auf der Bestimmung östrogenen Potenziale der Extrakte. Die auf diese Weise durchgeführte Charakterisierung konnte zeigen, dass sich klare Unterschiede zwischen den verschiedenen Reifen ergeben: Sowohl Reifen unterschiedlicher Hersteller als auch die verschiedenen getesteten Reifentypen desselben Herstellers weisen unterschiedlich hohe östrogene Potenziale auf. Insgesamt variieren die Befunde etwa um den Faktor 20 mit einem Maximalwert von 100 ng/l Estradioläquivalente. Es wurden auch Neureifen identifiziert, die – wenn überhaupt – nur ein vergleichsweise geringes östrogenes Potenzial aufwiesen und damit hinsichtlich dieser in der Umwelt potenziell schädlichen Wirkungsweise ein geringeres Risiko darstellen.

Die ökotoxikologische Bewertung von Abwässern aus **Abgasentschwefelungsanlagen in der Seeschifffahrt** ist auf Einträge in die marine Umwelt fokussiert, da für Binnenwasserstraßen, die dem CDNI unterliegen, ein Einleitungsverbot für entsprechende Abwässer besteht. Grundsätzlich sind zwei technisch verschiedene Ausführungen der Gaswäsche auf Seeschiffen zu unterscheiden: das "Open-Loop"- und das "Closed-Loop"-Verfahren. Beim Closed-Loop-Verfahren wird im Unterschied zum Open-Loop das Prozesswasser nach einer Aufbereitung im Kreislauf geführt, was zu deutlich geringeren Volumina an Waschwasser führt, die aber potenziell aufgrund der geringeren Verdünnung stärker belastet sind. Bisher veröffentlichte Daten zur Umweltauswirkung von Scrubber-Systemen sind auf Open-Loop-Systeme beschränkt.

Das Ziel des Teilprojekts bestand daher in der vergleichenden chemischen und ökotoxikologischen Bewertung von Waschwassereinleitungen aus den beiden verschiedenen Scrubber-Systemen, um mögliche Umweltauswirkungen vergleichend zu bewerten und – falls möglich – Optimierungspotenziale für deren Minimierung zu identifizieren. Es konnte gezeigt werden, dass sich die beiden Scrubber-Systeme in ihren potenziellen Auswirkungen auf die marine Umwelt deutlich unterscheiden. In allen getesteten Waschwässern aus dem Closed-Loop-System wurden starke akut toxische Effekte, dioxinähnliche Wirksamkeit und mutagene Aktivität beobachtet. Beispielsweise wirken Abwässer aus der Closed-Loop-Behandlung in den untersuchten Proben z. T. noch in bis zu 130-facher Verdünnung wachstumshemmend auf marine Algen. Die angewandte Behandlung der Closed-Loop-Abwässer ist zur effektiven Minderung dieser Effekte unzureichend. Darüber hinaus enthalten die Abwässer mit hoher Wahrscheinlichkeit potenziell schädliche Substanzen (z. B. Nitroarene und aromatische Amine), für die bislang durch die Leitfäden für Abgasreinigungssysteme keine Grenzwerte definiert wurden (International Maritime Organization 2015). Aufgrund nicht eindeutiger Ergebnisse kann die Mehrheit der Abwasserproben aus dem Open-Loop-System nicht abschließend hinsichtlich des mutagenen Potenzials beurteilt werden. Dioxinähnliche Wirksamkeit konnte jedoch auch in den Abwässern des Open-Loop-Systems gemessen werden. Diese fiel im Vergleich zum Closed-Loop-System zwar deutlich geringer aus, für eine Abschätzung möglicher Umweltauswirkungen sollten jedoch Frachten unter Berücksichtigung

der abgegebenen Abwassermenge betrachtet werden. Der Schiffsverkehr ist in der Regel auf feste und damit stark frequentierte Strecken beschränkt. Für diese Bereiche könnte dies einen kontinuierlichen Eintrag von Waschwasser und damit eine Anreicherung von Schadstoffen wie polyzyklisch aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) und Schwermetalle bedeuten. Basierend auf Modellberechnungen der unterschiedlichen Abwassermengen werden im Fall des Open-Loop-Systems im Vergleich zum Closed-Loop-System höhere Frachten dioxinähnlich wirkender Substanzen emittiert, da Open-Loop-Systeme deutliche höhere Waschwassermengen produzieren.

2.3.4.3 Handlungsfeld c)

In der **"Modellanalyse Schadstoffimmissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen"** werden die Ballungsräume mit einer Gittergröße von 500 m räumlich aufgelöst. Die betrachtete Detailgenauigkeit ist daher nicht zu vergleichen mit entsprechenden Modellrechnungen für konkrete Luftreinhaltepläne, bezüglich derer eine andere Fragestellung betrachtet und die Schadstoffbelastung einzelner Straßenzüge modelliert bzw. berechnet werden. Im Vordergrund des Projektes des BMVI-ExpertenNetzwerks steht der Beitrag des jeweiligen Verkehrsträgers (im Wesentlichen auf Bundesverkehrsweegen) an der regionalen Schadstoffbelastung, um hinreichend genaue Aussagen für Maßnahmenempfehlungen zu generieren.

Die vorläufigen Ergebnisse, zunächst zu den Berechnungen der Emissionen der verschiedenen Verkehrsträger in den drei Ballungsräumen Hamburg, Duisburg und Frankfurt a. M. werden für das Basisjahr 2016 in Abbildung 26 grafisch dargestellt. In der Ermittlung der Emissionsanteile wurden See- und Binnenschifffahrt nicht getrennt dargestellt. Sie zeigt, dass in allen drei Ballungsräumen die Hauptlast der Emissionen der Verkehrsträger sowohl für NO_x als auch für PM_{10} zu mehr als 50 % durch den Straßenverkehr eingetragen wird. In Duisburg und Frankfurt liegen die Emissionen des Verkehrsträgers Straße für NO_x anteilig sogar bei 70 %. In Hamburg hat die Seeschifffahrt, bedingt durch den Hafen, einen deutlichen Beitrag von bis zu 40 % an den NO_x -Emissionen. Im Raum Duisburg trägt sie durch den Binnenhafen in Duisburg und den starken Verkehr auf den Wasserwegen, insbesondere auf dem Niederrhein, zu

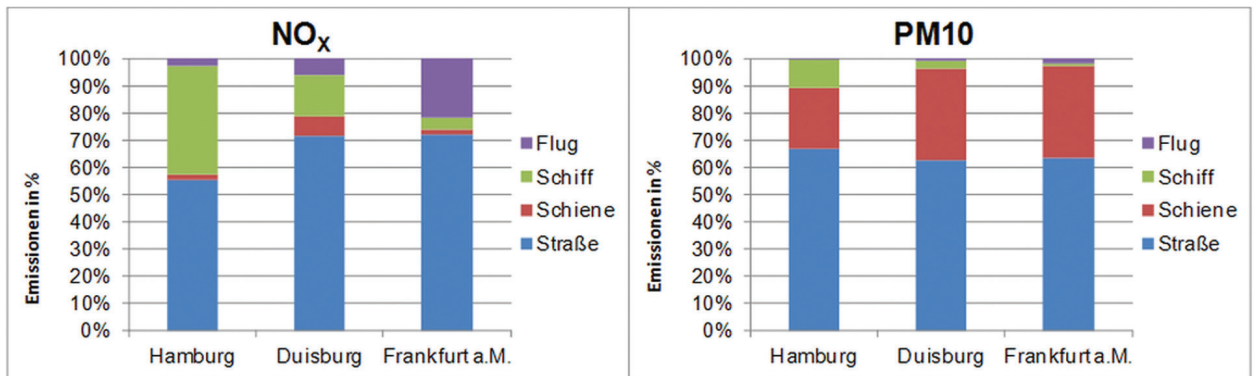


Abbildung 26: Emissionsanteile der Verkehrsträger für 2016 in den drei Ballungsräumen Hamburg, Duisburg und Frankfurt a. M.

den NO_x-Emissionen mit einem Anteil von über 10 % bei. In Frankfurt hat der Flughafen einen Anteil von ca. 20 % an den NO_x-Emissionen. Die Auswertung zeigt auch, dass unmittelbar nach dem Verkehrsträger Straße in allen drei Ballungsräumen die Schiene als zweite große Quelle für Feinstaub insbesondere aus Abrieben und Aufwirbelung, hier im Speziellen für PM₁₀, verantwortlich ist. In Duisburg und Frankfurt liegt der Anteil der PM₁₀-Emissionen der Schiene entsprechend der Modellierung für das Jahr 2016 bei bis zu 30 %. Ausführliche Informationen zur Datenermittlung, zur Vorgehensweise, zu den Berechnungsmodellen und den Ergebnissen zu den Immissionsberechnungen sowie den Modellszenarien für 2025 und 2030 werden im Schlussbericht des Projektes dargestellt.

2.3.5 Diskussion und Ausblick

In dem Schwerpunktthema konnte mit den Auswertungen bereits gezeigt werden, dass durch die intensive Zusammenarbeit der nachgeordneten Behörden des BMVI im Expertennetzwerk Ergebnisse erzielt werden können, die in diesem Umfang verkehrsträgerübergreifend noch nicht erfasst wurden. Dies hängt im Wesentlichen mit den technischen Möglichkeiten und den jeweiligen Zuständigkeitsbereichen zusammen.

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse zu den verschiedenen Kompartimenten und Handlungsfeldern eine umfassende Gesamtbetrachtung der Thematik zu den Emissionen und Immissionen der Verkehrsträger nicht wiedergeben. Wei-

terführende Untersuchungen sind für eine aussagekräftige Gesamtbetrachtung unbedingt erforderlich.

Die Auswertung der Daten zu den Schadstoffklassen der Lkw im Rahmen der Untersuchung **"NO_x-Belastungen an Bundesfernstraßen unter Berücksichtigung der Schadstoffklassen des Schwerverkehrs"** zeigt, dass der Anteil der Lkw mit Schadstoffklasse S6 (S6 = Euro VI) im Jahr 2018 (Januar bis September) schon über 70 % an der Untersuchungsstelle betrug. Dennoch macht sich die NO_x-Belastung durch den Lkw-Anteil auf BAB an ortsnahen Luftschadstoffmessstationen deutlich bemerkbar.

Ergänzend wurde im Rahmen des **"Monitorings verkehrsbedingter Abriebpartikel an Bundesautobahnen"** dargestellt, dass Abriebe an Straßen einen großen Beitrag zu den "Super coarse"-Partikeln der Fraktion PM₁₀₋₈₀ leisten. Ob ein nennenswerter Weitertransport dieser Partikel in die angrenzende Umwelt stattfindet oder ob sie aufgrund ihrer hohen Masse sehr schnell deponieren und zum größten Teil in den Versickerungs- und Filteranlagen abgeschieden werden, muss in weiteren Studien untersucht werden. Darüber hinaus soll nach der "super coarse" nun auch die feine Partikelfraktion zwischen 2,5 und 10 µm (PM_{2,5-10}), der sogenannten "coarse mode", auf den in ihr enthaltenen Anteil an Abrieben untersucht werden. Weitere Untersuchungen zur eventuellen Zunahme von Abrieben aufgrund des Klimawandels (zunehmende Hitzeperioden) oder des etwaigen Weitertransportes in die Umwelt sind notwendig.

Die Wirkungen von Abriebpartikeln wurden in der Untersuchung zur **"Charakterisierung biologischer Wirkprofile"**

von Reifenabrieben" weiter ausgearbeitet. Diese Ergebnisse liefern Anhaltspunkte zum Optimierungspotenzial der Zusammensetzung von Reifen. Eine vergleichende Produktcharakterisierung hinsichtlich (öko-)toxikologischer Effekte kann einen Ansatzpunkt zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Reifenmaterial darstellen.

Reifenabrieb stellt eine der größten Quellen für die Emission von partikulärem Kunststoff in die Umwelt dar. Nach den Berechnungen werden in Deutschland jährlich maximal 98.000 t Abrieb von Reifenaufläichen durch den Straßenverkehr freigesetzt. Hiervon werden etwa bis zu 74.000 t/a in den straßennahen Boden und ca. bis zu 15.000 t/a in Oberflächengewässereingetragen. Bislang ist unklar, welche Mengen aus Fließgewässern in Deutschland in die marine Umwelt gelangen. Aber auch im Schienenverkehr gewinnt die Problematik der Abriebe (Fahrdrakt, Rad- oder Bremsabriebe) immer mehr an Bedeutung.

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere bzgl. der Ermittlung genauerer aktueller Emissionsfaktoren für verkehrsbedingte Abriebe unter realen Umweltbedingungen, u. a. für den partikulären Reifenabrieb (für verschiedene Straßenbeläge und Fahrzeugtypen), bzgl. Feldstudien (Konzentrationen von Abrieben in Umweltmedien, Bestimmung des Abbaus der Polymeranteile in Boden und Oberflächengewässern sowie Umweltwirkungen von Reifen- oder Bremsabrieben (auch im Schienenverkehr)). Weiterhin fehlen bisher Modellierungen zu Transport, Abbau und Verbleib von Abrieben (Reifen, Räder, Bremsen oder Fahrdrakt) für Fließgewässer und Böden in Deutschland.

Um den Eintrag von Reifenabrieb in die Umwelt zu minimieren, stellen die Anpassung der Behandlung von Straßenoberflächenwasser an den Stand der Technik (auch im Bestand), die Ertüchtigung des Straßenbetriebsdienstes und die Anpassung der Behandlung von kommunalem Niederschlagswasser an den Stand der Technik (auch im Bestand) geeignete Maßnahmen dar.

Die obigen Maßnahmen stehen derzeit bereits aus Gründen des Gewässerschutzes an. Parallel zur Schließung obiger Kenntnislücken können auf Basis der Rechercheergebnisse und physikalischer Grundgesetze die folgen-

den Maßnahmen zur Minimierung der Freisetzung von Abrieben in die Umwelt vorgeschlagen werden: die frühzeitige Beseitigung von Straßenschäden und die sukzessive Optimierung von Fahrbahnoberflächen, die Förderung abriebarmer Fahrzeugkonzepte (z. B. durch Gewichtsreduktion) und abriebarmer Verkehrsbedingungen (z. B. flüssiger Verkehr und Vermeidung unproduktiven Verkehrs) sowie die Optimierung von Reifen- oder Bremsmaterialrezepturen bzgl. höherer Haltbarkeit, Abriebresistenz und Umweltverträglichkeit.

Die **Ermittlung schifffahrtsinduzierter Luftschadstoffemissionen** konnte über eine Modellierung für die Flotte an zwei Wasserstraßenabschnitten des Niederrheins auf Basis von 33- bzw. 47-tägigen AIS-Beobachtungen, Kennzahlen und Faktoren erfolgreich durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Modellierung stimmen in der Größenordnung mit den schifffahrtsinduzierten Luftschadstoffemissionen, die auf Basis der LuWaS-Modellierung (LANUV, 2016) gewonnen wurden, überein. Die Mittelwerte der Emissionen beider Abschnitte liegen im Durchschnitt 1,7-fach über jenen den LuWaS-Ergebnisse. Eine detaillierte Klärung dieser Differenzen war jedoch nicht Gegenstand des Projekts "Betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschiffahrt". Für die Bewertung von Optimierungsmaßnahmen ist eine Modellierung auf Basis rein statistischer Mittelwerte, z. B. von Schiffsbewegungen bzw. Strömungsgeschwindigkeiten, ungeeignet. Eine exakte Quantifizierung des Schiffsverkehrs ist eine wesentliche Grundvoraussetzung zur Berechnung der schifffahrtsbedingten Luftschadstoffemissionen und damit der Bewertung von Optimierungsmaßnahmen. Dies kann durch umfangreiche Auswertungen von AIS-Daten, eine Weiterentwicklung der Methode und eine Verbesserung der Datenbasis gewährleistet werden. Die Emissionsmodellierung auf Basis von Fahrdynamik und Leistungsbedarf von Einzelfahrern konnte bisher zu keinem Abschluss geführt werden. Die dargestellten Ergebnisse stellen somit nur vorläufige Ergebnisse dar, die in den kommenden Jahren weiter vertieft und ausgearbeitet werden. An dieser Stelle sei jedoch betont, dass es sich bei den dokumentierten Ergebnissen der Onboard-Messungen um Real-Driving Emissionen handelt, d. h. Emissionen realer Betriebsbedingungen, die für die Kalibrierung und Verifizierung der hierbei angestrebten

Modellierungsmethode essenziell sind. Diese Messungen unterliegen weder einem allgemeingültigen Standard, noch dienen sie der Untersuchung und Prüfung zur Einhaltung normativer und gesetzlicher Grenzwerte (z. B. gem. ISO 8178-4, 2007). Dennoch entspricht die hierbei angewendete Methode des Kaminzugverfahrens der üblichen Herangehensweise solcher Real-Driving Emissionsmessungen.

Auch die Wirkungen der Schadstoffe auf die marine Umwelt wurden bei der verkehrsträgerübergreifenden Betrachtung untersucht. Die Ergebnisse der **"Umwelttoxikobewertung von Abgasentschwefelungsanlagen in der Seeschifffahrt"** zeigen Ansatzpunkte für verbesserte Abläufe im Schiffsbetrieb sowie für Einleitbedingungen der Waschwässer auf. Beispielsweise führte die Aufbereitung der Waschwässer im Closed-Loop-Betrieb nicht immer zu einer Reduzierung ökotoxikologischer Effekte. Zur Ableitung konkreter Empfehlungen für eine Verbesserung, z. B. durch den Einsatz unbedenklicher Fällungsmittel, müssten weitere Untersuchungen zur Verbreiterung der Datenbasis stattfinden. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen zudem, dass Biotests ein integrales Instrument bei der Bewertung der Toxizität komplexer Abwässer vor der Freisetzung in die Umwelt sowie bei der Überwachung der Oberflächen- und Meerwasserqualität sein sollten. Die Internationale Seeschifffahrts-Organisation (IMO) überarbeitet derzeit die Richtlinien für Abgasentschwefelungsanlagen und zieht dazu auch die Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen heran.

In der verkehrsträgerübergreifenden **"Modellanalyse Schadstoffimmissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen"** zeigt sich bis jetzt, dass für jeden betrachteten Ballungsraum, bei dem es zu Luftschadstoffgrenzwertüberschreitungen kommt, eine genaue Quellzuordnung der Emittenten durchgeführt werden sollte, da regional einzelne nicht straßengebundene Verkehrsträger einen erheblichen Anteil an bestimmten Immissionen aufweisen können. Der Straßenverkehr ist jedoch in allen drei betrachteten Ballungsräumen für einen Anteil von über 50 % sowohl an den NO_x-Emissionen als auch an den Feinstaub-Emissionen verantwortlich. Der Anteil der jeweiligen Verkehrsträger an der Schadstoffbelastung in Ballungsräumen sowie modellierte Ergebnisse von

Maßnahmen zur Minderung von Schadstoffbelastungen sind erst nach Abschluss des Projektes (1. Halbjahr 2020) verfügbar.

Allgemeingültige Aussagen für Ballungsgebiete sind aus den bisherigen Ergebnissen nicht ableitbar, da jeweils regionale Randbedingungen in die Modellrechnungen einbezogen werden müssen. Für weiterführende Modellierungen werden räumlich und zeitlich höher aufgelöste Eingangsdaten, insbesondere im Bereich der Binnenschifffahrt, benötigt, um insgesamt eine Verbesserung der Genauigkeit der Ergebnisse zu erzielen.

Die Ergebnisse der Modellanalyse lassen aber auch darauf schließen, dass zukünftig eine verkehrsträgerübergreifende Infrastrukturplanung ganzheitlich durchgeführt werden sollte, um extreme Schadstoffbelastungen einzelner Verkehrsträger möglichst zu vermeiden. In einem weiterführenden Projekt in der 2. Phase des BMVI-Expertennetzwerk (2020-2025) wird insbesondere der Einfluss der Seeschifffahrt auf die Luftqualität und Deposition von Schadstoffen im Küstenraum der Nord- und Ostsee untersucht. Als Grundlage dienen hoch aufgelöste Daten der tatsächlichen Schiffsbewegungen. Zusätzlich soll der Einfluss zukünftiger gesetzlicher Regelungen und der Einfluss weiterer Emissionsminderungsmaßnahmen untersucht werden.

2.3.6 Verwertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse im SPT 203 weisen eine unterschiedliche Verwertungsreife auf. Die erarbeiteten Erkenntnisse im Bereich der Binnenschifffahrt werden zunächst in weiterführenden Berechnungsmodellen weiterverwendet. Die Erkenntnisse zu den Abrieben und Abgasentschwefelungsanlagen werden in entsprechende Richtlinien und Regelwerke durch die beteiligten Forschungsbehörden eingebracht und die noch zu erwartenden Ergebnisse aus der Modellanalyse sollen dazu führen, dass eine verkehrsträgerübergreifende Datenbank mit möglichen Schadstoffminderungsmaßnahmen aufgebaut wird, die durch betroffene Städte und Kommunen sowie von Planern und Ingenieurbüros abgerufen werden kann.

Veröffentlichungen

- Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Stock, F., Reifferscheid, G.: Tyre wear particles – a calculation of generation, transport and release to water and soil with special regard to German roads (in Vorbereitung für peer review Journal).
- Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Stock, F., Reifferscheid, G.: Tyre and road wear particles (TRWP) – a review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment (in Vorbereitung für peer review Journal).
- Kathman et al. Potential adverse biological effects of scrubber water discharges from ships – A comparative toxicity assessment, in Vorbereitung.
- Kathman et al. Potential adverse biological effects of tire wear particles, in Vorbereitung.
- Sommer, F., Dietze, V., Baum, A., Sauer, J., Gilge, S., Maschowski, C., Gieré, R.: "Tire abrasion as a major source of microplastics in the environment", *Aerosol and Air Quality Research*, doi: 10.4209/aaqr.2018.03.0099, Taiwan, 2018.
- Tian, Z., Dietze, V., Sommer, F., Baum, A., Kaminski, U., Sauer, J., Maschowski, C., Stille, P., Cen, K., Gieré, R.: "Coarse-Particle Passive-Sampler Measurements and Single-Particle Analysis by Transmitted Light Microscopy at High Frequented Motorways", *Aerosol and Air Quality Research*, doi: 10.4209/aaqr.2017.02.0064, Taiwan, 2017.
- Sauer, J., Dietze, V., Sommer, F., Baum, A., Kaminski, U., Maschowski, C., Stille, P., Gieré, R.: "Erste Ergebnisse der Feldstudie Grobstaub-Partikel an Bundesautobahnen", Tagungsband "Kolloquium Luftqualität an Straßen 2017", Bergisch Gladbach, 2017.
- Tian, Z., Dietze, V., Baum, A., Kaminski, U., Sauer, J., Stille, P., Maschowski, Ch., Cen, K., Gieré, R.: "Particulate matter (PM) sampling with subsequent transmitted-light microscope (TLM) single-particle analysis and mass concentration calculation at highly frequented motorways in Germany", Tagungsband "Kolloquium Luftqualität an Straßen 2015", Bergisch Gladbach, 2015.
- Walz, C. (2018): Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser und Boden – Betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschiff-

fahrt, http://www.baw.de/DE/service_wissen/publikationen/forschung_xpress/forschung_xpress.html, 102/2018, Zugriff am 08.08.2019.

- Walz, C. (2019): Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser und Boden – Betriebliche und technische Optimierungen in der Binnenschiffahrt, http://www.baw.de/DE/service_wissen/publikationen/forschung_xpress/forschung_xpress.html, vsl. 53/2019.

2.4 Bau- und bauwerksbedingte Emissionen/ Immissionen in Wasser und Boden (SPT 204)

Roland Baier (BAW), Anna Maria Bell (BfG), Simon Brand (BfG), Dr. Sebastian Buchinger (BfG), Dr. Christian Dietrich (BfG), Inken Heidke (BfG), Dr. Benjamin Horstmann (BAST), Dr. Torben Kirchgeorg (BSH), Dr. Birgit Kocher (BAST), Dr. Sabrina Michael (DZSF/EBA), Dr. Matthias Schmid (BAW), Dr. Stefan Schmolke (BSH), Dr. Thomas Ternes (BfG, SPT-Koordinator), Markus von der Au (BfG), Dr. Ingo Weinberg (BSH)

2.4.1 Motivation

Bauwerke wie z. B. Brücken, Schleusentore oder Offshore-Windenergieanlagen sind betriebsbedingt starken mechanischen, thermischen, chemischen und biologischen Beanspruchungen ausgesetzt. Die verwendeten Baustoffe unterliegen dabei unterschiedlichsten Witterungseinflüssen. Dies gilt für alle Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasserstraße und Luft). Die dadurch ausgelösten Verwitterungsprozesse können neben einer verminderten Beständigkeit auch zu einer verstärkten Freisetzung von anorganischen und organischen (Schad-)Stoffen sowie zur Bildung von neuen Stoffen, sogenannten Transformationsprodukten (TP), führen.

Im Rahmen der novellierten EU-Bauprodukteverordnung (EU-BauPVO) wird explizit gefordert, dass die aus den Bauprodukten herzustellenden Bauwerke die am Verwendungsort geltenden Anforderungen an Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz erfüllen. Dies betrifft unter anderem die Freisetzung gefährlicher Stoffe in Grundwasser,

Meeresgewässer, Oberflächengewässer oder Boden (BWR3). Im Hinblick auf Bauprodukte und Umwelt sind somit zu jeder Phase des Lebenszyklus von Bauprodukten/Bauwerken (Planung/Genehmigung – Bauphase – Unterhaltung – Rückbau) Einflüsse zu vermeiden, die sich übermäßig stark auf die Umweltqualität oder das Klima auswirken. Einige im Verkehrssektor verwendete Materialien, wie z. B. die beschriebenen Korrosionsschutzsysteme, sind allerdings nicht durch die BauPVO geregelt. Umso wichtiger ist die Entwicklung von Bewertungssystemen für diese Materialien. Grundlage hierfür können die "Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser" des Deutschen Instituts für Bautechnik (MVV TB 2017, Deutsches Institut für Bautechnik 2011) und der Bericht des CEN-TC 351 zum Stand der Methodenentwicklung sein. Vorsorge-, Prüf- oder Grenzwerte sind für viele Substanzen je nach Umweltmedium in unterschiedlichen Regelungen bereits enthalten, andere müssen noch erarbeitet werden. Im Hinblick auf die Korrosionsschutzsysteme muss geprüft werden, inwieweit die oben genannten Bewertungsansätze angewendet und ggf. angepasst werden müssen.

Für dieses Projekt wurden exemplarisch Korrosionsschutzsysteme für Stahlkonstruktionen untersucht. Alle Verkehrsträger verwenden hier größtenteils Produkte auf Basis von Epoxidharzen (EP) oder Stoffe aus der Klasse der Polyurethane (PUR), sodass die jeweiligen Fragestellungen übertragbar sind. Standardmäßig werden diese polymerbasierten Beschichtungen eingesetzt, um Metallstrukturen von Bauwerken vor korrosiven Einwirkungen zu schützen. Sie werden üblicherweise in mehreren Arbeitsgängen aufgebracht. Je nach Exposition kann die Gesamtschichtdicke bis zu 600 µm betragen. Das Polymernetzwerk entsteht bei der Reaktion und Aushärtung der Produkte. Hierbei werden im Regelfall Grund-, Zwischen- und Deckbeschichtungen im Herstellungswerk aufgebracht. Bei exponierten Bauwerken wird aus optischen Gründen die finale Deckbeschichtung meist erst nach Fertigstellung bzw. Einbau des Bauwerks vor Ort aufgebracht. Beschichtungen von Bauteilen für den Offshore-Bereich werden vollständig an Land appliziert und erst ausgehärtet verschifft. Beigemischte anorganische Funktionspigmente sind häufig Zinkstaub in der Grundierung und/oder Eisenglimmer in den Zwischenschichten und der Deckschicht.

Im wässrigen Medium wird als Strategie der kathodische Korrosionsschutz verwendet. Beim Fremdstromverfahren wird mit einer externen Gleichstromquelle und einer inerten Anode das Bauwerk auf ein negatives Potenzial gebracht, wodurch die Korrosion dort verhindert wird. Eine technisch einfachere und daher weit verbreitete Alternative ist der Einsatz von galvanischen Anoden. Diese bestehen aus unedlen Metallen – je nach Einsatzort zumeist Zink-, Aluminium- oder Magnesiumlegierungen – die sich zum Schutz des Bauwerks auflösen, wodurch kontinuierlich Metalle in die Umwelt freigesetzt werden. Außer bei klassischen Stahlwasserbauwerken wie Schleusen und Wehren werden galvanische Anoden auch an Offshore-Anlagen verwendet. Durch den zunehmenden Ausbau der Offshore-Windenergie stehen das Thema der korrosionschutzbedingten Emissionen und deren Auswirkungen auf die Meeresumwelt bereits durch diverse Presseartikel und eine Bundestagsanfrage (Drucksache 18/5478 aus 2015) im Fokus der Öffentlichkeit.

Neben den Aspekten der Umweltverträglichkeit spielt insbesondere bei den Korrosionsschutzbeschichtungen die Haltbarkeit im Rahmen einer nachhaltigen Baustrategie eine wichtige Rolle. Generell sind moderne, z. B. nach TL/TP-KOR-Stahlbauten zertifizierte Beschichtungssysteme hochwertig, langlebig, robust und schadensfrei. Dennoch



Abbildung 27: Schadensfall aus dem Wiederlagerbereich der Borkerstraßenbrücke Nr. 449 am DattelN-Hamm-Kanal mit abgängiger blauer Polyurethandekbeschichtung (Foto: Roland Baier, BAW).

wurden in den letzten 15 Jahren bei allen Verkehrsträgern vereinzelt schwerwiegende Beschichtungsschäden registriert, welche aufwendig saniert werden mussten. Diese nachträglichen Instandsetzungsmaßnahmen der Korrosionsschutzbeschichtung waren in einigen Fällen nur zum Teil erfolgreich, da sich die neu aufgebrachte Deckbeschichtung nach einigen Jahren erneut ablöste (siehe Abbildung 27). Viele Prozesse, die zur Enthaftung führen können, sind bekannt. In jüngster Vergangenheit wurde jedoch davon berichtet, dass witterungsbedingte, chemische Veränderungen der Epoxidharzbeschichtungen ebenfalls zu Enthaftungen führen können. Es ist noch ungeklärt, welche Auswirkungen die chemischen Veränderungen bei Freisetzung in die Umwelt haben. Die Aufklärung der an der Enthaftung der Beschichtungen beteiligten Prozesse und Abbauprodukte ist für eine nachhaltige technische Lösung des Problems von entscheidender Bedeutung. Genauso wichtig ist die Untersuchung und Bewertung der ökotoxikologischen Wirkungen dieser zum Teil gut wasserlöslichen Abbauprodukte.

Inwieweit die freigesetzten (Schad-)Stoffe die Qualität von Wasser, Boden oder Luft beeinflussen, ist bei vielen Baustoffen nicht ausreichend bekannt, weil kaum fundierte Untersuchungen vorliegen. Die Umsetzung der vorhandenen Ergebnisse in praxistaugliche Bewertungsvorgaben ist bisher nicht gegeben. Reine Emissionswerte für einzelne Baustoffe sind nicht ausreichend. Zur Bewertung möglicher Auswirkungen sind auch Expositionsszenarien nötig, die spezifische Bauweisen der verschiedenen Verkehrsträger unter typischen Umgebungsbedingungen berücksichtigen. Beispielsweise sind bei Offshore-Vorhaben für Anpassungen an die spezifischen Bedingungen der Meeresumwelt besondere bauwerksbedingte Emissionen zu erwarten.

Es besteht daher dringender Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Dieser umfasst neben Untersuchungen zur Beständigkeit der Bauprodukte bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen auch die Identifizierung von Stoffen und deren Transformationsprodukten, die unter den jeweils herrschenden gewässer- und bodenchemischen Bedingungen aus Bauprodukten freigesetzt bzw. gebildet werden, sowie deren ökotoxikologischen Auswirkungen auf reale aquatische und terrestrische Ökosysteme. Eine vollständige und nachhaltige Lebenszyklusbetrachtung von Bauprodukten beinhaltet daher die Zusammenfüh-

rung von Beständigkeitsuntersuchungen der Bauwerke und Abschätzungen zu möglichen Umweltauswirkungen durch die freigesetzten Stoffe.

Informationen zur Umweltverträglichkeit von Baumaterialien sind bislang nur vereinzelt verfügbar. Behörden, Planer und Baufirmen müssen die entsprechenden Daten für verschiedene Produkte oft aus unterschiedlichen Quellen zusammentragen. Neben der Identifizierung und Charakterisierung möglicher Umweltauswirkungen von Baustoffen gewinnt daher auch die Darstellung, Interpretation und Bereitstellung dieser Daten und Untersuchungen mittels eines geeigneten Informationssystems immer mehr an Bedeutung.

2.4.2 Ziele

Als Werkzeug zur Auswahl umweltgerechter Baustoffe sollten die Grundlagen für ein Baustoffinformationssystem und eine webbasierte Rechercheplattform zu bau- und bauwerksbedingten Emissionen und Immissionen erarbeitet werden. Hiermit soll zukünftig die Auswahl von Baustoffen und Bauprodukten behördenübergreifend erleichtert und damit die Umweltverträglichkeit bei Bauvorhaben erhöht werden. Zu diesem Zweck sollten zunächst potenzielle Anwender identifiziert und deren Informationsbedarf und Anforderungen an ein solches System erfasst werden.

Die Datengrundlage dieses Informationssystems sollen Herstellerangaben und Literaturdaten, aber auch eigene Untersuchungen der Oberbehörden bilden. Daher ist die Untersuchung ausgewählter verkehrsträgerübergreifender Baustoffe bzw. Bauprodukte hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit und Beständigkeit ein weiteres wichtiges Ziel. Der Fokus lag hierbei auf Korrosionsschutzbeschichtungen für Stahlbauten und galvanischen Anoden als kathodischer Korrosionsschutz.

Auch die Beständigkeit der Baustoffe bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen in Labor- und Feldversuchen sollte untersucht werden. Dabei entstehende oder in die Umwelt freigesetzte Stoffe sollten identifiziert und hinsichtlich möglicher Umweltauswirkungen auf aquatische und terrestrische Ökosysteme geprüft werden. Hierbei sind die Art und Menge von Stoffen zu berücksichtigen, die unter

den jeweils herrschenden gewässer- und bodenchemischen Bedingungen aus Baustoffen freigesetzt werden, und die Effekte, die aufgrund dieser freigesetzten Stoffe beobachtet werden können. Im Vordergrund standen insbesondere die Bewertung der potenziellen Freisetzung von Metalloiden aus galvanischen Anoden und von organischen Schadstoffen aus Korrosionsschutzbeschichtungen sowie die ökotoxikologische Bewertung der freigesetzten Stoffe oder Stoffgemische. Die Formulierung von Freisetzungsszenarien soll zudem die Übertragung der Laborergebnisse auf relevante Freilandsituationen ermöglichen.

2.4.3 Herangehensweise

Um praxisnahe Aussagen zur Beständigkeit der Produkte, zur Freisetzung und Bildung von Stoffen und deren Transformationsprodukten sowie den damit verbundenen (öko-)toxikologischen Auswirkungen treffen zu können, wurde eine Kombination von Labor- und Felduntersuchungen gewählt.

In Laborstudien wurden die Prozesse aufgeklärt, welche zur verminderten Beständigkeit von Bauprodukten und zur Freisetzung oder Bildung von (Schad-)Stoffen führen, sowie deren (öko-)toxikologische Wirkungen auf verschiedene Wasserorganismen erfasst (Teilprojekte "Chemische und ökotoxikologische Untersuchung von Korrosionsschutzbeschichtungen" und "Chemische und Ökotoxikologische Untersuchung von galvanischen Anoden").

In Feldforschungen erfolgte eine anwendungsnahe Betrachtung der auftretenden Prozesse im marinen Bereich (Teilprojekt "Feldforschungen zu Metallemissionen aus galvanischen Anoden in Offshore-Windparks") sowie Beprobungen in Binnengewässern.

Weiterhin wurde durch den Vergleich verschiedener Abschätzungsszenarien, die in der nationalen und internationalen Gesetzgebung bezüglich der Freisetzung von gefährlichen Stoffen aus Baustoffen Anwendung finden, ein Vorgehen zur Erstellung eines Bewertungsverfahrens für freigesetzte Stoffe erarbeitet (Teilprojekt "Vorgehen zur Erstellung eines Bewertungsverfahrens für freigesetzte Stoffe"). Damit können über Modellbetrachtungen die im Sickerwasser, Kontaktgrundwasser oder Gewässer zu

erwartenden Stoffkonzentrationen für bestimmte Randbedingungen ermittelt werden. Basierend auf den Resultaten der Feld- und Modellstudien sollten dann weitere Laborstudien angestoßen bzw. das Design der Laborstudien derart verändert werden, dass die in der Umwelt auftretenden Prozesse beschreibbar und damit auch vorhersagbar werden. Hierbei wurden auch die auf den jeweiligen Verwendungszweck abgestimmten bautechnischen (physikalischen) Eigenschaften berücksichtigt, um einen möglichst integralen Bewertungsansatz von Baustoffen hinsichtlich der Anwendung und der (öko-)toxikologischen Auswirkung zu erhalten.

Einen wesentlichen Aspekt des Schwerpunktthemas bildete die Entwicklung einer Informationsplattform zu bau- und bauwerksbedingten Emissionen und Immissionen (Teilprojekt "Bedarfs- und Stakeholderanalyse zur Etablierung eines Informationssystems zur Bewertung der Umwelteigenschaften von Baustoffen"). Für die Nutzer der Plattform sollten Bewertungskriterien wie (Öko-)Toxizität, Expositions- und Freisetzungsszenarien sowie stoffspezifische Ausbreitungspotenziale verständlich und objektiv dargestellt werden. Informationen zur Beständigkeit und der damit verbundenen Einsatzdauer der Baustoffe und Bauprodukte sind weitere Kriterien des Informationssystems, da mit zunehmender Lebensdauer nicht nur die Gesamtkosten sinken (Rückgang der Sanierungszyklen), sondern auch die Umweltverträglichkeit steigt.

2.4.4 Ergebnisse

2.4.4.1 Chemische und ökotoxikologische Untersuchung von Korrosionsschutzbeschichtungen

Sieben häufig in Deutschland eingesetzte Beschichtungssysteme im Stahlhoch- und Wasserbau wurden hinsichtlich der Auslaugung von (Schad-)Stoffen und möglicher daraus resultierender ökotoxikologischer Effekte untersucht. Als praxisnahes Testsystem konnte hierbei erfolgreich der sogenannte Dynamische Oberflächenauslaugtest (DSLIT) nach DIN CEN/TS 16637-2 für den Einsatz an Beschichtungssystemen adaptiert werden. Dieser Test beinhaltet die sequenzielle Elution von Baustoffen in mehreren Schritten über

einen Zeitraum von 64 Tagen, sodass der zeitliche Verlauf der Stofffreisetzung beobachtet und modelliert werden kann.

Hierfür wurden Stahlplatten mit Korrosionsschutz auf Epoxid- bzw. Polyurethanbasis beschichtet, sowohl als Einzelbeschichtung wie auch in unterschiedlichen Schichtabfolgen. Die chemische Analyse der Eluate mittels LC-MS (Flüssigchromatografie-Massenspektrometrie) zeigte hier, dass aus der Grundbeschichtung weitaus mehr Stoffe freigesetzt wurden als aus der Zwischen- oder Deckbeschichtung. Auch zeigte sich, dass für das Elutionsverhalten immer die oberste Schicht maßgeblich für die Anzahl der detektierten Stoffe ist.

Die parallel dazu durchgeführten ökotoxikologischen Tests bestätigen dies: Im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Beschichtungen zeigte eine der getesteten Grundbeschichtungen signifikante algentoxische Effekte, welche sich auf den freigesetzten Inhaltsstoff Zink zurückführen lassen. Mit Auftragung einer Deckbeschichtung, die die Emission des Zinks verhindert, traten die algentoxischen Effekte nicht auf. Für alle anderen Systeme wurden im Rahmen der Untersuchungen hauptsächlich bakterientoxische und östrogene Wirkungen festgestellt. Die Stärke dieser Wirkungen nahm mit der Dauer der Auslaugung zu. Die bakterientoxische Wirkung korrelierte stark mit dem ebenfalls gemessenen gelösten Kohlenstoff (DOC) in der Probe. Die Konzentration des DOC nahm ebenfalls mit der Dauer der Auslaugung zu. Als Hauptverursacher dieser Effekte in epoxidbasierten Beschichtungssystemen wurde die Substanz 4-*tert*-Butylphenol identifiziert, welche heutzutage bei einigen Herstellern noch als Härter bei der Polymerisation eingesetzt wird. Im Falle der polyurethanbasierten Deckbeschichtungen wurde für 4-Toluensulfonamid die Konzentration, bei der keine unerwünschten Nebenwirkungen auf die Umwelt zu erwarten sind (Predicted No-Effect Concentration - PNEC), von 0,15 mg/L für Süßwasser in den Eluatens regelmäßig überschritten. Im Hinblick auf die eingesetzten ökotoxikologischen Testverfahren waren die untersuchten Beschichtungen auf Polyurethanharzbasis jedoch weniger auffällig als Beschichtungen auf Epoxidharzbasis. Insgesamt konnte das Bewertungskonzept des Deutschen Instituts für Bautechnik (2011) erfolgreich auf die Beschichtungssysteme angewendet werden.

Hinsichtlich der Enthaftungsproblematik von Polyurethan-(PUR)-Deckbeschichtungen auf bewitterten Epoxidharz-(EP)-Zwischenbeschichtungen konnte mithilfe von TOF-SIMS (Sekundärionen-Massenspektrometrie) und ICP-MS (Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma) eine Ursache für mögliche Enthaftungen aufgeklärt werden. Bei exponierten Bauwerken ist die Zwischenbeschichtung oft mehrere Monate der Witterung ausgesetzt, bis die finale Deckbeschichtung aufgetragen wird. Durch die Bewitterung der UV-labilen EP-Zwischenbeschichtungen kann es zur photoinduzierten Degradation des organischen Anteils der EP-Beschichtung kommen (Abbildung 28), wodurch anorganische Pigmente auf der Oberfläche freigelegt werden. Gleichzeitig entstehen polare chemische Gruppen an den verbleibenden organischen Resten. Diese gebildete hydrophile Oberflächenschicht kann dafür sorgen, dass eine chemische Bindung zwischen der EP-Zwischenbeschichtung und der PUR-Deckbeschichtung erschwert und dadurch die Haftung vermindert wird. Das Abwaschen der bewitterten Oberfläche mit alkalischen Waschlösungen, wie von den Herstellern empfohlen, kann zwar wasserlösliche Abbauprodukte, nicht jedoch oligomere Bestandteile oder entstandene polare funktionelle Gruppen entfernen. Abrasive Reinigungsschritte können zwar alle Abbauprodukte entfernen und gewährleisten hierdurch eine verbesserte Haftung der PUR-Deckbeschichtung auf der "frischen" Oberfläche, vermindern jedoch insgesamt die Schichtdicke der Beschichtung und sind zudem recht aufwendig, da das abgestrahlte Material aufgefangen werden muss, damit es nicht in die Umwelt gelangt.

Zur abschließenden Bewertung der möglichen Umweltauswirkungen bedarf es der Ableitung einer mathemati-

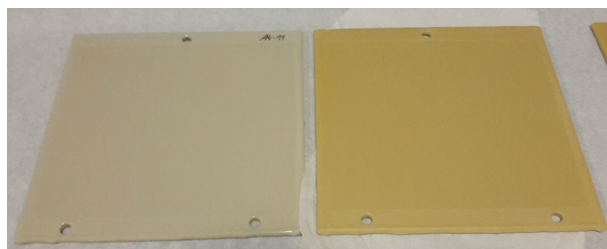


Abbildung 28: Mit Epoxidharz beschichtete Stahlplatten vor (links) und nach UV-Bewitterung (rechts). Deutlich zu erkennen ist die durch Degradation des organischen Anteils und Freisetzung organischer Pigmente bedingte Farbänderung (Foto: Simon Brand, BfG).

schen Funktion, die es ermöglicht, gewonnene Laborergebnisse auf eine reale Umweltsituation zu übertragen (siehe Abschnitt 2.4.4.4 "Vorgehen zur Erstellung eines Bewertungsverfahrens für freigesetzte Stoffe"). Außerdem sollten zukünftige Untersuchungen auf eine breitere Palette von Produkten und Materialien (z. B. Fluorpolymere, Polyesterharze) ausgedehnt werden, um ein vollständiges Bild der Emissionen von Stahlbeschichtungen zu erhalten. Darüber hinaus wären Ergebnisse zu Organismen höherer Trophieebenen wie Daphnien und Fischen wünschenswert. Dabei sind je nach Einsatzort des Produkts limnische oder marine Testsysteme einzusetzen.

2.4.4.2 Chemische und ökotoxikologische Untersuchung von galvanischen Anoden

Für eine grundlegende Einschätzung der Umweltverträglichkeit wurden galvanische Anoden auf ihren (Schwer-) Metallgehalt hin untersucht. Hierfür wurden neue Aufschlussverfahren entwickelt, um die Anodenmaterialien für ein entsprechendes Multielementscreening mittels ICP-MS vorzubereiten. Die Analysen ergaben, dass 26 Metalle nachgewiesen werden konnten. Neben den Hauptbestandteilen wie Aluminium (> 940 g/kg), Zink (30–60 g/kg) und Indium (0,1–0,2 g/kg) wurden auch weitere (Schwer-) Metalle in relevanten Konzentrationen nachgewiesen, wie z. B. Blei (0,01 g/kg), Cadmium (0,0002–0,007 g/kg), Gallium (0,1 g/kg) und Kupfer (0,01 g/kg). Bis auf eine Ausnahme im Eisengehalt stimmten die Analyseergebnisse mit den Herstellerangaben überein. Damit ist festzuhalten, dass die umweltkritischen Schwermetalle (u. a. Pb, Cd, Cu) während ihres Einsatzes auch in die marine Umwelt gelangen können. Die in der Meeresumwelt ansonsten in sehr geringen Konzentrationen vorkommenden Elemente Indium und Gallium können prinzipiell als sog. Tracer genutzt werden, um die Emissionen von galvanischen Anoden der Offshore-Anlagen von anderen Quellen und dem natürlichen Hintergrund unterscheiden zu können.

Das mögliche ökotoxikologische Gefährdungspotenzial durch die Verwendung galvanischer Anoden in der Meeresumwelt wurde in einem Worst-Case-Expositionsszenario untersucht. Dazu wurden die Kieselalge *Phaedactylum tricoratum*, das Bakterium *Aliivibrio fischeri* und der Schlickkrebse *Corophium volutator* gegenüber in Lösung gebrachten galvanischen Anoden und Lösungen der

Hauptbestandteile Aluminium und Zink unter natürlichen pH-Bedingungen in Meerwasser exponiert. Weder das untersuchte Material einer galvanischen Anode noch deren Hauptbestandteile Aluminium und Zink zeigten signifikante Effekte auf die eingesetzten marinen Bakterien. Im Gegensatz dazu hatten die gelöste Anode und das Aluminium eine vergleichbare Abnahme des Kieselalgen-Wachstums mit einer durchschnittlichen Hemmung von rund 28 % bzw. 26 % zur Folge. Die halbmaximale Effektkonzentration für Zink wurde mit 5,7 mg/L bestimmt. Eine entsprechende Konzentration an Zink wird jedoch bei sachgemäßem Betrieb einer galvanischen Anode nicht freigesetzt. Auf die Schlickkrebse, die ebenfalls in Gegenwart von Sediment untersucht wurden, hatte das untersuchte Anodenmaterial keine toxischen Effekte. Ausschließlich die einzelnen Elemente zeigten in den höchsten getesteten Konzentrationen eine signifikante Erhöhung der Mortalität. Aluminium erreichte bei der Exposition ohne Sediment eine maximale Mortalität von rund 18 %. Zink hatte insgesamt die höchsten Effekte mit einer Mortalität von rund 53 % in den Experimenten mit Sediment und 30 % ohne Sediment.

Neben der Erfassung toxischer Effekte wurden für den Bereich der anorganischen Analytik von Spuren- und Massenelementen verschiedene Techniken etabliert und verwendet, um die Belastung mit Metallen an dem Modellorganismus *C. volutator* zu ermitteln. Zunächst wurde der Gesamtgehalt der Metalle in Schlickkrebse durch Mikrowellendruckaufschluss und anschließender ICP-MS-Messung bestimmt. Die Anreicherung erfolgte bei allen untersuchten Elementen dosisabhängig. Das Verhältnis der aufgenommenen Metalle spiegelte dabei das Metallverhältnis der galvanischen Anode wider und weist darauf hin, dass die Metallaufnahme nicht selektiv, d. h. durch keinen spezifischen Mechanismus, erfolgt. Eine Erhöhung der Metallgehalte in den Organismen konnte außerdem ausschließlich in den Experimenten ohne Sediment beobachtet werden. Eine Erklärung hierfür liefert ein anschließend durchgeführtes Bioimaging mit Laserablation-ICP-MS. Hierbei wurden histologische Schnitte einzelner Organismen angefertigt und die Verteilung der Metalle darauf ortsaufgelöst analysiert. Es zeigte sich, dass es sich insbesondere beim Anoden-Hauptbestandteil Aluminium nicht um eine Erhöhung der Gehalte in den Organismen, sondern um eine Anlagerung an das Exoskelett der Schlickkrebse handelt.

Die Ergebnisse der ökotoxikologischen Untersuchungen weisen nicht auf eine akute Umweltgefährdung durch die Verwendung von galvanischen Anoden in der Meeresumwelt hin. Auf der Basis der bestehenden Ergebnisse sind toxische Effekte auf Algen in unmittelbarer Nähe der Anoden jedoch nicht auszuschließen. Die Bindung von Aluminium an das Chitin des Exoskeletts der untersuchten Schlickkrebse könnte den Eintrag von Aluminium in die Nahrungskette erleichtern. Dieser Aspekt müsste in Labor und Feldstudien weiter untersucht werden, um mögliche nachteilige Spätfolgen der Nutzung galvanischer Anoden in der marinen Umwelt einschätzen zu können.

2.4.4.3 Feldforschungen zu Metallemissionen aus galvanischen Anoden in Offshore-Windparks

Der Schwerpunkt der Untersuchungen in diesem Teilprojekt lag auf den Metallemissionen aus galvanischen Anoden, welche als Korrosionsschutzsysteme für Offshore-Anlagen verwendet werden. Hierzu wurden Untersuchungen in und im Umfeld von verschiedenen Offshore-Windparks in der Nordsee geplant und durchgeführt (Abbildung 29).

Im ersten Schritt wurde im Rahmen einer Literaturstudie untersucht, welche Korrosionsschutzsysteme in Offshore-Windparks zum Einsatz kommen und welche möglichen Emissionen mit diesen Systemen verbunden sind. Eine

Übersicht der eingesetzten Systeme und die möglichen Emissionen in die marine Umwelt wurden in einem Review zusammengefasst und veröffentlicht (Kirchgeorg et al. 2018). Die Ergebnisse der Literaturstudie verdeutlichen, dass im Wesentlichen drei Korrosionsschutzsysteme im Bereich der Offshore-Windenergie zum Einsatz kommen. Dies sind galvanische Anoden auf Aluminium-Zink-Indium-Basis, Korrosionsschutzbeschichtungen auf Polyurethan- und Epoxidharzbasis sowie Fremdstromsysteme. Die Kenntnisse der möglichen Emissionen dieser Systeme sind dabei sehr unterschiedlich. Galvanische Anoden emittieren im Laufe des Anlagenbetriebs kontinuierlich Metalle in die Meeresumwelt, insbesondere die Hauptbestandteile Aluminium und Zink, sowie viele weitere Elemente, die als Legierungsbestandteile oder als produktionsbedingte Verunreinigungen in den Anoden enthalten sind.

Stoffliche Emissionen aus den Beschichtungen sind dagegen bisher schwer quantifizierbar, erste Erkenntnisse hierzu wurden im Rahmen dieses Projekts in Laboruntersuchungen gewonnen (siehe Abschnitt 2.4.4.1 "Untersuchung von Korrosionsschutzbeschichtungen"). Aufgrund der analytischen Herausforderungen beschränkten sich die Felduntersuchungen in dieser Phase des Projekts auf die Emissionen aus galvanischen Anoden. Als Ausgangslage der zu untersuchenden Metalle dienen die Ergebnisse der Untersuchungen des Anodenmaterials (siehe Abschnitt 2.4.4.2 "Chemische und ökotoxikologische Untersuchung von galvanischen Anoden").



Abbildung 29 Probenahme auf See. Links: Kastengreifer für Sedimentprobenahme, rechts: Kranwasserschöpfer für Wasserproben (Foto: Torben Kirchgeorg, BSH).

In jährlichen Probenahmekampagnen (2017–2019) mit dem Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff Atair des BSH wurden in und im Umfeld von acht Windparks, drei für zukünftige Windparks ausgewiesenen Flächen sowie Konverterplattformen in der Deutschen Bucht beprobt. Insgesamt wurden dabei 192 Wasserproben und 173 Sedimentproben genommen.

Für die Untersuchung korrosionsschutzbedingter Emissionen in die Wasserphase stehen bisher die Proben aus den zwei erfolgreich durchgeführten Probenahmekampagnen zur Verfügung. Die Untersuchungen der Wasserproben zeigen bei bestimmten Elementen lokale Konzentrationserhöhungen (z. B. für Cd 11–23 ng/L, für Pb 7–17 ng/L und für Zn 600–2200 ng/L) in einzelnen Windparkclustern, die jedoch weiter untersucht werden müssen. Die Erhöhungen fielen jedoch insgesamt recht gering aus und lagen weitgehend innerhalb der bekannten Variabilität der Nordsee (Cd 15–25 ng/L, Pb 5–100 ng/L und Zn 500–2000 ng/L).

Die als Tracer für galvanische Anoden identifizierten Elemente Gallium und Indium konnten bisher noch nicht in der Nordsee nachgewiesen werden und liegen damit unter den Bestimmungsgrenzen von 10 ng/L (Ga) bzw. unter 0,05 ng/L (In). Dies kann z. B. mit geringen freigesetzten Konzentrationen oder der schnellen Verdünnung bzw. guten Durchmischung der Wasserkörper zusammenhängen. Für die zukünftige Interpretation der Daten wird es wichtig sein, den Ursprung der untersuchten Wasserkörper zu betrachten. Hierzu steht mittlerweile ein Strömungsmodell zur Verfügung, mit dem die Herkunft und der Verbleib der Wasserkörper modelliert werden kann.

Die Analyse der Sedimentproben zeigt bisher ebenfalls bei bestimmten Elementen lokale Konzentrationserhöhungen (z. B. für Cd 0,2–0,5 mg/kg, für Pb 80–270 mg/kg und für Zn 200–500 mg/kg) in einzelnen Windparkclustern, was auf lokale Anreicherungen hindeuten kann. Auch beim Sediment lagen die gemessenen Konzentrationen innerhalb der bekannten Variabilität der Nordseesedimente (Cd 0,2–1,2 mg/kg, Pb 70–180 mg/kg und Zn 170–640 mg/kg) mit Ausnahme von Blei, das in wenigen Proben erhöht nachgewiesen wurde. Für die als Tracer identifizierten Elemente Indium und Gallium wurden erstmals Elementkonzentrationen in Nordseesedimenten bestimmt (Ga 15–22 mg/kg, In 0,08–0,14 mg/kg).

Um die kleinskaligen Konzentrationserhöhungen aus dem Umfeld der Windparks besser einordnen und bewerten zu können, werden die Ergebnisse mit den vorhandenen großflächigen Verteilungsdaten der Meeresumweltüberwachung des BSH abgeglichen. Aktuell werden zusätzlich weitere Proben aufbereitet, um zu überprüfen, ob sich neben den bereits identifizierten räumlichen Trends auch zeitliche Variationen nachweisen lassen.

2.4.4.4 Vorgehen zur Erstellung eines Bewertungsverfahrens für freigesetzte Stoffe

Für Baukörper, die in die Umwelt eingebaut werden, sind im Anhang I der Verordnung (EU) Nr. 305/2011, auch EU-Bauprodukteverordnung (EU-BauPVO 2011), Grundanforderungen festgelegt, u. a. sollte die "Freisetzung gefährlicher Stoffe in Grundwasser, Meerestwasser, Oberflächengewässer oder Boden" betrachtet werden. Für die Bewertung von freigesetzten regulierten Stoffen aus Baukörpern müssen das Emissionsverhalten sowie der Transportweg innerhalb des Umweltmediums bis zum Ort der Einhaltung des Vorsorgewertes bekannt sein. Harmonisierte Prüfnormen für die Bewertung der Freisetzung von umweltrelevanten Stoffen werden aktuell im Gremium TC 351 des Europäischen Komitees für Normung (CEN) erarbeitet.

Die Methodik zur Abschätzung der Immission in die Umwelt und die Bewertung der Auswirkungen sind allerdings europäisch nicht geregelt, daher wird dort auf die nationale Gesetzgebung am Ort der Verwendung verwiesen. Diese wurde für alle Mitgliedsstaaten ausgewertet. Aktuell betrachten jedoch nur zwei europäische Staaten (Deutschland und Niederlande) die Freisetzung von gefährlichen Stoffen aus Baustoffen in Grundwasser und Boden in ihren Regelwerken (Besluit bodemkwaliteit 2007, MVV TB 2017). Die dort angewandten Abschätzungsszenarien unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Herleitung und der betrachteten Systemelemente und -grenzen sowie der zugrundeliegenden Vorsorgewerte auf der Immissionsseite. Durch einen Vergleich dieser Methoden lassen sich für den Tief- und Ingenieurbau im Infrastrukturbereich angepasste Szenarien zur Ermittlung der räumlichen Erstreckung von Wertüberschreitungen bestimmen. Mithilfe dieser Szenarien können Emissionsmaximalwerte abgeleitet werden.

Emissionswerte lassen sich durch verschiedene genormte Freisetzungsverfahren bestimmen, hierbei können diverse Baumaterialien, Einbauszenarien und Zeitskalen zur Anwendung kommen. Auf der Immissionsseite sind für viele Substanzen Vorsorgewerte im deutschen Umweltrecht festgelegt, siehe Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV 2017), Grundwasserverordnung (GrwV 2017) und Oberflächengewässerverordnung (OGewV 2016), bei deren Einhaltung der Schutz der Umweltmedien Boden (Grundwasser- und Ungesättigte-Zone) und Oberflächenwasser gewährleistet ist. Ein Vergleich der aus Elutionstests ermittelten Emissionswerte mit den Immissionswerten ist aber nicht direkt möglich – hierfür bedarf es einer Übertragungsfunktion, die den Substanztransport (Advektion und Dispersion), die Transformation der eluierten Substanzen und die Sorption der Substanzen im Boden auf dem Weg von der Emissionsquelle bis zum Beurteilungsort beschreibt (Abbildung 30). Unter Berücksichtigung von realitätsnahen Anwendungsbedingungen kann damit die räumliche Erstreckung der Bereiche mit erhöhten Werten und Maximalwerte für die Emission abgeleitet werden.

In den Niederlanden wurden Emissionsgrenzwerte für diverse Baustoffe abgeleitet (Besluit bodemkwaliteit 2007, Regeling bodemkwaliteit 2007, Verschoor et al. 2008, Verschoor et al. 2006). In Deutschland führten Arbeiten des

Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) zur Ableitung von Anforderungswerten (Brameshuber et al. 2012, Deutsches Institut für Bautechnik 2011, Hohberg 2003), die dann Eingang in die Musterverwaltungsvorschrift – Technische Baubestimmungen fanden (MVV TB 2017). Außerdem beschreiben Arbeiten im Auftrag des Umweltbundesamtes, die als Grundlage für die geplante Ersatzbaustoffverordnung dienen, die Ableitung von "maximal zulässigen Quelltermkonzentrationen" für den Einsatz von Ersatzbaustoffen (Susset et al. 2017, Susset et al. 2018). Allen Konzepten ist gemein, dass ein Quelle-Pfad-Ziel-Ansatz verwendet wird, bei dem zwischen Quellterm und Transportterm differenziert wird. Variationen und Verallgemeinerungen sind in den verschiedenen Konzepten auf mehreren Ebenen durchgeführt und angewendet worden, um sowohl realitätsnahe Bedingungen zu simulieren, als auch die Komplexität der Systems zu beschränken (siehe Tabelle 6). Dadurch wird es möglich, verschiedene Einbaubedingungen zusammengefasst zu betrachten.

Die vorhandenen Ableitungskonzepte beinhalten eine große Anzahl von möglichen Anwendungsfällen von Baustoffen in Boden und Grundwasser, allerdings werden infrastrukturenspezifische Bedingungen sowie bestimmte Baustoffe wie Korrosionsschutzsysteme mit diesen Konzepten nicht berücksichtigt. Die Bauwerke erstrecken sich

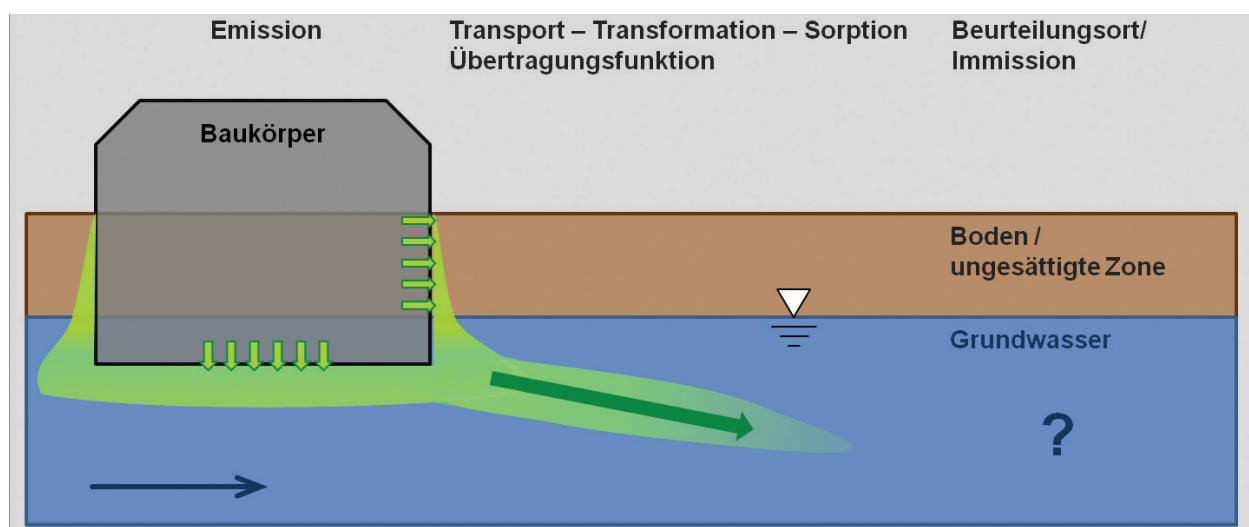


Abbildung 30: Schematische Darstellung des Quelle-Pfad-Ziel-Schemas für die Ableitung von Emissionsmaximalwerten zur Einhaltung der Immissionswerte am Ort der Beurteilung unter Berücksichtigung einer Übertragungsfunktion.

Tabelle 6: Bestehende Regelwerke/Vorschläge zur Ableitung von Maximalwerten für Emissionen aus Baustoffen.

Systemelement	BesluitBodemkwaliteit/ Regelingbodemkwaliteit (NL, Ministerie van Infra- structuur en Waterstaat)	Musterverwaltungsvor- schrift- Technische Baube- stimmungen (DIBt)	Kriterien zur Beurteilung des Einbaus mineralischer Er- satzbaustoffe (Umweltbundesamt)
Baukörper	monolithische Baustoffe granulare Baustoffe isoliert granulare Baustoffe	Festbeton Gesteinskörnungen Schaumglasschotter	granulare, mineralische Ersatzbaustoffe
Methode zur Bestimmung der Emission	NEN 7375 NEN 7373 NEN 7385 NEN 7371	DIN 12457-4 CEN/TS 16637-2	DIN 19528
Einbauort (im Szenario)	Ungesättigte Bodenzone (Grundwasserabstand 1m)	Grundwasserzone	Ungesättigte Bodenzone (Grundwasserabstand < 1m und > 1m)
Betrachtungszeitraum	100 Jahre	6 Monate	200 Jahre
Ort der Beurteilung	Ungesättigte Bodenzone (Schichtdicke 1m) Grundwasserzone (Schichtdicke 1m) Oberflächenwasser ^a	Grundwasserzone	Ungesättigte Bodenzone (Schichtdicke 1m) Grenzfläche zur Grund- wasserschicht (Sickerwasser)
Substanzen	Metalle Salzionen	Metalle Salzionen Organika	Metalle Salzionen Organika
Bodenarten	Sandboden (Grundwasserabstand 1–2m)	Sandboden Durchlässigkeitsbeiwert: 10 ⁻⁴ Grundwassergefälle: 10 ⁻³ Porosität: 0,1	Sandboden Lehm/Schluff/Ton-Boden
Datenbasis zur Einhaltung des Immissionswerts	MTR-Wert auf Basis des HCS ^b	GFS-Werte (LAWA 2004)	GFS-Werte (LAWA 2016) Bezugsmaßstäbec

a: Gilt nicht für isoliert granulare Baustoffe (IBC-Baustoffe, isolatie-, beheers- en controle-bouwstoffen)

b: Maximal tolerierbares Risiko, ermittelt durch den Wert (HC5), bei dem 95 % der betrachteten Spezies als geschützt gelten (Struijs et al. 1997)

c: Für einige Schwermetalle werden Bezugsmaßstäbe festgelegt, da die Elutionswerte von einigen natürlichen Böden schon die GFS-Werte überschreiten (Susset et al. 2018)

nicht nur kleinflächig, sondern häufig auch linear in einer naturnahen Umgebung. Dabei sind sie regional und lokal stark variierenden Böden sowie Feuchte- und Temperaturschwankungen ausgesetzt, woraus sich unterschiedliche Anwendungsbedingungen und Beurteilungsräume ergeben. Daher ist die Entwicklung spezifischer Szenarien und Übertragungsfunktionen notwendig.

2.4.4.5 Bedarfs- und Stakeholderanalyse zur Etablierung eines Informationssystems zur Bewertung der Umwelteigenschaften von Baustoffen

Im Rahmen des Projektes wurden der Bedarf, die Umsetzbarkeit und Akzeptanz sowie die fachlichen Themenschwerpunkte für den Aufbau einer solchen Plattform mit möglichen Anwendern und Stakeholdern evaluiert. Die Anforderungs- und Bedarfsanalyse beinhaltete eine mehr-

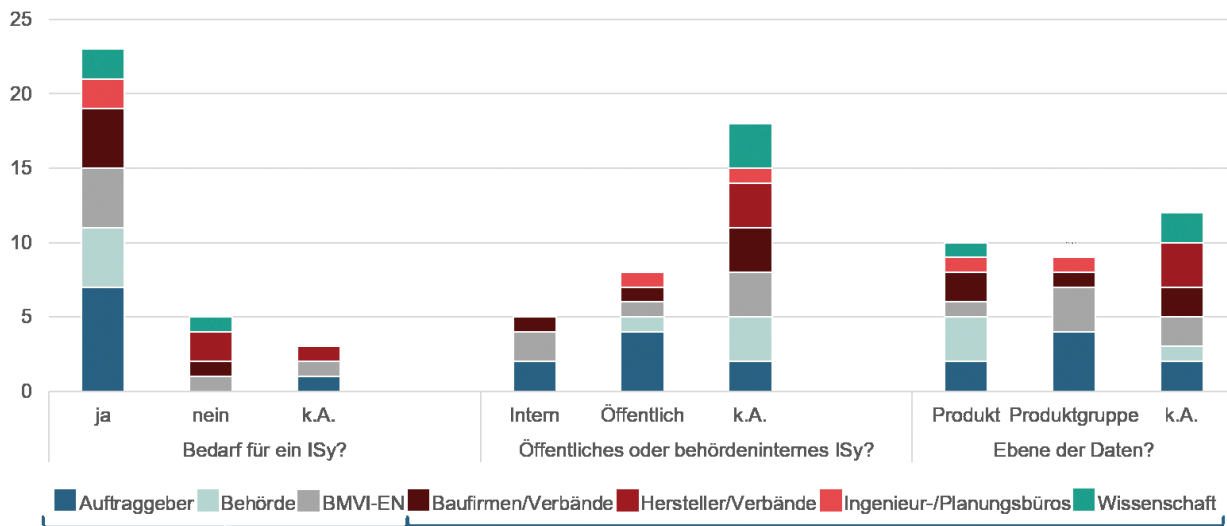


Abbildung 31: Exemplarische Ergebnisse der Stakeholderbefragung zur allgemeinen Einschätzung des Bedarfs und der Anforderungen an ein Informationssystem (ISy) zur Bewertung der Umwelteigenschaften für Baustoffe.

sprachige Literatur- und Desktop-Recherche (Fokus Europa und USA) sowie eine inhaltliche, rechtliche und technische Bewertung bestehender Plattformen anhand komplexer Anforderungskriterien. In den Recherchen konnten 53 bestehende Informationsplattformen für den Bereich Wissenschaft und Wirtschaft in Bezug auf Baustoffe sowie chemische Stoffbewertung identifiziert werden, wovon nur sechs Plattformen die Grundkriterien, z. B. Berücksichtigung von Umwelteigenschaften, erfüllten. Allgemein konnte kein bestehendes Informationssystem zur objektiven und verständlichen Bewertung der Umwelteigenschaften von Baustoffen (Tiefbau) identifiziert werden, welches den Anforderungen und inhaltlichen Zielvorgaben des BMVI-Expertennetzwerks entspricht. Im Rahmen einer nachgeschalteten Anwender- und Stakeholderanalyse wurden mehr als 45 potenzielle Stakeholder/Nutzer aus den Bereichen öffentliche Behörden (Verwaltung), privatwirtschaftliche Organisationen und Verbände sowie der Wissenschaft hinsichtlich des Bedarfs, der Struktur und der Inhalte einer solchen Plattform interviewt (Abbildung 31).

Ausgehend von den Ergebnissen der Anforderungs- und Stakeholderanalyse wurde die Struktur des Informationssystems abgeleitet und ein entsprechendes Lastenbuch für die Etablierung und einer in der zweiten Phase des BMVI-Expertennetzwerks möglichen Programmierung erstellt.

Detaillierte Angaben, z. B. zum Vorgehen, der Methodik sowie der entwickelten Struktur (Prototyp), können dem Abschlussbericht des Forschungsprojektes (DZSF/EBA 2020) entnommen werden.

2.4.5 Diskussion und Ausblick

2.4.5.1 Diskussion

Die Untersuchungen der Stahlbaubeschichtungen zeigten, dass unter ungünstigen Bedingungen eluierbare Stoffe und Transformationsprodukte entstehen können, die im Labortest ökotoxikologische Wirkungen hervorrufen. Derzeit werden biologische Testmethoden nur in Einzelfällen auf Bauprodukte angewendet, die ökologische Sicherheit wird hauptsächlich auf Grundlage der Zusammensetzung bewertet. Gefährdungen können jedoch nicht allein durch die Betrachtung der Zusammensetzung ausgeschlossen werden. Auf der Grundlage der gesammelten Erfahrungen wird für eine Bewertungsstrategie für Stahlbaubeschichtungen eine Anpassung des allgemeinen Bewertungskonzepts für Bauprodukte empfohlen, um eine gesicherte Bewertung kosteneffizient durchführen zu können. Es wird vorgeschlagen, die ökotoxikologischen Untersuchungen auf die Probe mit der längsten Kontaktzeit oder eine Probe

aus einem (z. B. vierwöchigen) Tanktest ohne sequenziellen Wasseraustausch zu beschränken, da die Wirkungen auf die Testorganismen mit der Auslaugdauer zunehmen. Mit dieser Herangehensweise besteht nicht die Gefahr, Effekte zu unterschätzen und das zeitaufwendige Herstellen der Eluate mit dem DSLT-Test könnte zugunsten einer erweiterten biologischen Testpalette reduziert werden.

Die Beurteilung von Korrosionsschutzbeschichtungssystemen stellt eine besondere Herausforderung dar, da die eingesetzten Ausgangsstoffe bei der Aushärtung stark verändert werden, sodass ihr Schadpotenzial für die Umwelt sinkt, aber gleichzeitig während des Polymerisationsprozesses Verbindungen neu gebildet werden. Für die Bewertung von Polymerprodukten im Allgemeinen und Beschichtungsmaterialien im Besonderen wird daher die obligatorische Untersuchung der ökotoxikologischen Wirkungen empfohlen, um kumulative Auswirkungen aller in die Umwelt freigesetzten Verbindungen, die strukturell in der Regel völlig unbekannt und daher als Einzelsubstanz auch nicht bewertbar sind, erfassen zu können.

Die Ergebnisse der ökotoxikologischen Untersuchungen weisen nicht auf eine akute Umweltgefährdung durch die Verwendung von galvanischen Anoden in der Meeresumwelt hin. Ob eventuell sensitivere Algenarten bei höheren Metallkonzentrationen in direkter Nähe der Anode gefährdet sind oder ein Eintrag des Aluminiums in die Nahrungskette durch Bindung an das Chitin der Krebstiere möglich ist, müsste in Labor- und Feldstudien weiter untersucht werden, um mögliche nachteilige Spätfolgen der Nutzung galvanischer Anoden in der marinen Umwelt auszuschließen. Zur weiteren und abschließenden Bewertung der Emissionen aus Korrosionsschutzsystemen im marinen Bereich sind weitere Kampagnen und Methodenentwicklungen notwendig. Jährliche Probenahmen in und im Umfeld der Windparks sollten durchgeführt werden, um mögliche Veränderungen der marinen Umwelt frühzeitig zu identifizieren. Zudem werden derzeit weitere Probenahmestrategien zur Langzeitbewertung und zum Monitoring getestet (z. B. Passivsammler, Nutzung von Schwebstofffallen, Analyse von Bewuchsproben von den Fundamentoberflächen). Des Weiteren sollen in zukünftigen Untersuchungen die organischen Substanzen berücksichtigt werden, welche in den Laboruntersuchungen zu Korrosionsschutzbeschichtungen freigesetzt und identifiziert worden sind.

Die Ergebnisse können dann als Beurteilungsgrundlage für die weiteren Genehmigungsprozesse des BSH im Rahmen der Offshore-Windenergie einbezogen werden. Ebenso dienen sie als Informationsquelle für verschiedene Behörden für die Umsetzung der Meeresstrategierahmenrichtlinie (MSRL) sowie für die Arbeiten im Rahmen der internationalen Meeresschutzkonventionen OSPAR und HELCOM.

Für die Übertragung der Laborergebnisse auf reale Verhältnisse in Boden und Grundwasser sind Übertragungsfunktionen notwendig, die Dauer und Reichweite der Wirkung beschreiben und somit eine realistische Bewertung der Emission von Baustoffen im Infrastrukturbereich ermöglichen. Diese ersetzen nicht ein Umweltmonitoring, ermöglichen aber Aussagen für die Planung von Bau- und Erhaltungsmaßnahmen. Dazu müssen spezifische Szenarien für Boden, Grundwasser und Oberflächengewässer festgelegt werden, die die Besonderheiten solcher Bauwerke, die Anwendungsbedingungen der Baustoffe und die geforderten Beurteilungsräume berücksichtigen. Für granulare Bauprodukte stehen schon geeignete Ableitungskonzepte für Boden und Grundwasser zur Verfügung. Für monolithische Baustoffe sowie Beschichtungen und Folien in der ungesättigten Bodenzone werden diese erarbeitet. Für infrastrukturenspezifische Baustoffe sollten die Labortestverfahren und die Übertragungsfunktionen in das Zulassungsverfahren integriert werden.

Die Alterung der Zwischenschicht durch Bewitterung – insbesondere durch UV-Strahlung – konnte als eine mögliche Ursache für Enthaltungen ermittelt und die damit einhergehenden Prozesse weitgehend aufgeklärt werden. Durch Umwelteinflüsse verursachte Enthaltungen entstehen nicht bei Einhaltung der in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen für Ingenieurbauten (ZTV-ING 4-3) enthaltenen Regelungen. Bei der Formulierung von Beschichtungsstoffen könnte durch den Zusatz von photostabileren Komponenten der Alterung entgegengewirkt werden.

Aus einer internationalen Internet- und Literaturrecherche ging hervor, dass zurzeit kein Informationssystem existiert, das die Bewertung der Umwelteigenschaften von Bauprodukten im Tiefbau ausreichend adressiert und die Auswahl von umweltgerechten Baustoffen für Ingenieurbauten erleichtert. Eine national durchgeführte Stakeholderanalyse bestätigt den Bedarf nach einem solchen System. Darin

wurden auch Rahmenbedingungen für ein behördeninternes und ein öffentliches System sowie die jeweilige Darstellungsform und erforderliche Tiefe der Informationsdarbietung in der Datenbank erarbeitet. Fortlaufende Arbeiten zum Emissionsverhalten von Substanzen aus Baustoffen, deren Verhalten und Verbleib in der Umwelt sowie deren toxikologischer Wirkung stellen eine wichtige Datengrundlage für diese Datenbank dar. Die Identifizierung der meistverwendeten Baustoffe im Infrastrukturbereich sowie deren Mengen ist eine entscheidende Grundlage für den Aufbau eines Stoffstrominformationssystems für den Infrastrukturbau. Langfristig können hiermit die Baustoffe/Bauwerke in ihrer Position als Emittenten von umweltrelevanten Substanzen über den gesamten Lebenszyklus erfasst und bewertet und somit die Umweltverträglichkeit von Bauvorhaben erhöht werden.

2.4.5.2 Zusammenfassung und Ausblick

- Aus Korrosionsschutzsystemen können unter ungünstigen Bedingungen eluierbare Stoffe und Transformationsprodukte freigesetzt werden, die im Labortest ökotoxikologische Wirkungen hervorrufen. Für die Bewertung von Polymerprodukten im Allgemeinen und Beschichtungsmaterialien im Besonderen wird die obligatorische Untersuchung der ökotoxikologischen Wirkungen empfohlen.
- Für ein spezifisches Bewertungskonzept für Stahlbaubeschichtungen wird empfohlen, die sequenzielle Herstellung der Eluate über 64 Tage durch einen einfachen Tanktest in Kombination mit einer erweiterten biologischen Testpalette zu ersetzen, um eine gesicherte Bewertung kosteneffizient durchführen zu können.
- Zur Übertragung dieser Laborergebnisse auf reale Freilandverhältnisse an Infrastrukturbauwerken werden Übertragungsfunktionen mit spezifischen Szenarien festgelegt, die die Besonderheiten solcher Bauwerke, die Anwendungsbedingungen der Baustoffe und die geforderten Beurteilungsräume berücksichtigen. Durch deren Integration in den Zulassungsprozess werden realistische Aussagen im Vorfeld der Planung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen möglich.
- Die Alterung der Zwischenschicht durch Bewitterung – insbesondere durch UV-Strahlung – konnte als eine mögliche Ursache für Enthaltungen ("Abblättern") ermittelt werden. Enthaltungen können durch Einhaltung des Technischen Regelwerkes (ZTV-ING 4-3) sowie zukünftig auch durch den Zusatz photostabiler Komponenten zur Beschichtung vermieden werden.
- Diese Ergebnisse belegen, dass vergleichbare Untersuchungen auch für andere Baustoffe/Baumaterialien wie Betone erforderlich sind, um deren Beständigkeit und Umweltauswirkungen abzuschätzen und verbessern zu können.
- Die Ergebnisse der ökotoxikologischen Untersuchungen weisen nicht auf eine akute Umweltgefährdung durch die Verwendung von galvanischen Anoden in der Meeresumwelt hin. Ob eventuell sensitivere Algenarten bei höheren Metallkonzentrationen in direkter Nähe der Anoden gefährdet sind oder ein Eintrag des Aluminiums in die Nahrungskette möglich ist, sollte in Labor- und Feldstudien weiter untersucht werden, um mögliche nachteilige Spätfolgen der Nutzung galvanischer Anoden auszuschließen. Weitere Probenahmen und Analytik organischer Stoffe in und im Umfeld der Windparks der Nordsee und Ostsee sollten durchgeführt werden.
- Die national durchgeführte Stakeholderanalyse bestätigt den Bedarf für eine Rechercheplattform zur Umweltverträglichkeit von Baustoffen. Es wurden Rahmenbedingungen für ein behördeninternes und ein öffentliches System sowie die jeweilige Darstellungsform und erforderliche Tiefe der Informationsdarbietung in der Datenbank erarbeitet. Der Entwurf eines Prototyps der zugrunde liegenden Datenbank bildet die Grundlage einer Programmierung der Rechercheplattform in der zweiten Phase des BMVI-Experten Netzwerks.
- Die Identifizierung der meistverwendeten Baustoffe im Infrastrukturbereich sowie deren Mengen und Eigenschaften bildet eine entscheidende Grundlage für den Aufbau eines Stoffstrominformationssystems für den Infrastrukturbau.

2.4.6 Verwertung der Ergebnisse

Die im SPT 204 erzielten Erkenntnisse und Ergebnisse werden in erster Linie im Geschäftsbereich des BMVI und den Oberbehörden genutzt. Gleichzeitig werden sie über internationale Veröffentlichungen der wissenschaftlichen Diskussion zur Verfügung gestellt.

So werden Labor- und Rechercheergebnisse zusammen mit der "Bedarfs- und Stakeholderanalyse für ein Baustoff-Informationssystem" genutzt, um in der zweiten Phase des BMVI-Expertennetzwerks eine IT-gestützte Rechercheplattform als Werkzeug zur Auswahl umweltgerechter Baustoffe zu programmieren und Inhalte dafür bereitzustellen. Auf diese Weise werden die bereits in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlichten Ergebnisse einem anwendungsnahen Publikum zugänglich gemacht und erhöhen Qualität und Umweltverträglichkeit des Infrastrukturbaus.

Die Kompetenz und Sprachfähigkeit der Oberbehörden wird durch die eigenen Beiträge zum allgemeinen Wissensstand über Emissionen und Immissionen von Stoffen aus Baumaterialien erhöht. Die Ergebnisse der ökotoxikologischen Felduntersuchungen fließen in die zukünftige Planung und Auswertung der Monitoringprogramme der Behörden ein.

Projektberichte

DZSF/EBA (2020): Forschungsbericht 3, Bedarfs- und Stakeholderanalyse zur Etablierung eines Informationssystems zur Bewertung der Umwelteigenschaften von Baustoffen.

Wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften

Bell, A.M., Baier, R., Kocher, B., Reifferscheid, G., Ternes, T. and Buchinger, S. (in Vorbereitung) Ecotoxicological characterization of aquatic emissions from steel coatings.

Bell, A.M., von der Au, M., Schmid, M., Bauer, O.B., Karst, U., Ternes, T., Reifferscheid, G., Buchinger, S. and Meermann, B. (in Vorbereitung) Environmental impact

assessment of galvanic anodes in the marine environment.

Brand, S., Schlusener, M.P., Albrecht, D., Kunkel, U., Strobel, C., Grummt, T. and Ternes, T.A. (2018) Quaternary (triphenyl-) phosphonium compounds: Environmental behavior and toxicity. *Water Research* 136, 207-219.

Brand, S., Veith, L., Baier, R., Dietrich, C., Schmid, M., Ternes, T.A. (in Vorbereitung) New Methodical Approaches for the Investigation of Weathered Epoxy Resins used for Corrosion Protection of Steel Constructions.

Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Hornig, M., Baier, R., Schmid, M.J. and Brockmeyer, B. (2018) Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. *Marine pollution bulletin* 136, 257-268.

Luft A., Bröder K., Kunkel U., Schulz M., Dietrich C., Baier R., Heining P., Ternes T. (2017) Nontarget Analysis via LC-QTOF-MS to Assess the Release of Organic Substances from Polyurethane Coating. *Environmental Science & Technology* 51, 9979-9988.

2.5 Minderungsmöglichkeiten von verkehrsbedingten Geräuschemissionen und Lärmimmissionen in Luft (SPT 205)

Michael Chudalla (BASt, SPT-Koordinator), Dr. Fabio Strigari (BASt), Dr. Patrick Wagner (BfG)

2.5.1 Motivation

Mobilität ist in unserer Gesellschaft ein hohes Gut. Die Bewahrung bzw. der Ausbau eines Verkehrsnetzes, das für alle zugänglich und nutzbar ist, sowie die Sicherstellung eines reibungslosen Austauschs von Waren und Dienstleistungen sind mit vielen Herausforderungen verbunden – auf ökonomischer, ökologischer und sozialer Ebene. Die Entwicklung zu einem nachhaltigen Verkehrssektor rückt immer mehr in den Vordergrund und sollte insbesondere die Minimierung der mit dem Verkehr verbundenen Belastungen für Mensch und Umwelt im Blick haben. An zweiter Stelle – direkt hinter den Luftschadstoffen – stehen hierbei die verkehrsbedingten Geräuschemissionen und Lärmimmiss-

sionen, die nach aktuellem Stand der Forschung relevante gesundheitliche Auswirkungen mit sich bringen können.

Die wachsende Mobilität führt zu steigenden verkehrsbedingten Geräuschemissionen. Zwar wirken technologische Verbesserungen und die regelmäßige Überarbeitung von Rechtsnormen und Richtlinien auf eine Minderung der Lärmbelastung hin. Diese positiven Effekte durch verbesserten Lärmschutz werden jedoch teilweise durch steigende Verkehrszahlen und immer dichtere Verkehrsnetze aufgehoben. Aufgrund absoluter Pegelerhöhungen und der Zunahme der Lärmereignisse steigt letztlich auch der Lärmpegel. Die Lärmimmissionen (d. h. der auf den Menschen einwirkende Lärm) können sich für den Menschen in z. B. Konzentrationsstörungen, Schlafstörungen und Herz-/Kreislaufkrankungen und für die Solidargemeinschaft in Kosten für das Gesundheitswesen äußern. Die erhöhte Sensibilität für Umweltbelange wie Lärm einerseits und die Gesamtlärmproblematik andererseits spiegeln sich in der steigenden Anzahl an Forschungsvorhaben auf diesen Gebieten wider. Stellvertretend hierfür sei an dieser Stelle auf die NORAH- und WHO-Studien verwiesen (Guski et al. 2015, WHO 2011, WHO 2018). In der WHO-Studie (WHO 2018) wurden auf Basis der neuesten Ergebnisse der Lärmwirkungsforschung Leitlinienwerte für die Lärmbelastung aus verschiedenen Quellen empfohlen. Der hierbei ange-setzte Gesundheitsbegriff umfasst neben der Abwesenheit von Krankheiten auch die Abwesenheit von Beeinträchtigungen, Belästigungen und Störungen sowie die Sicherung des Wohlbefindens.

Obwohl sich der Großteil der Menschen in Deutschland durch zwei oder mehr Verkehrslärmquellen belästigt fühlt (Umweltbundesamt 2019), werden die Lärmimmissionen in der Regel für jeden Verkehrsträger einzeln berechnet. Gemeinsame verkehrsträgerübergreifende Untersuchungen werden einzelfallbezogen durchgeführt (z. B. **bei Bundesfernstraßen und Schienenwegen in der Baulast des Bundes**).

In einer Kumulations- oder Gesamtlärmsituation gestaltet sich die Lärmbewertung beliebig komplex. Die Geräusche der einzelnen Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasserstraße und Luft) unterscheiden sich stark in ihrem zeitlichen Verlauf und ihrer spektralen Zusammensetzung. Weiter können die von den einzelnen Quellen abgestrahlten Schall-

anteile auf ihrem Ausbreitungsweg durch die Topografie und die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen beeinflusst werden. Die Beeinflussung kann höhere oder niedrigere Immissionspegel mit sich bringen und die Frequenzzusammensetzung des Schallspektrums verändern. Die Schaffung technischer Regelungen auf wissenschaftlicher Basis zur Berücksichtigung dieser Aspekte stellt einen wichtigen Schritt zur Verbesserung des Lärmschutzes für die Bevölkerung dar.

2.5.2 Ziele

Das übergeordnete Ziel im SPT 205 bestand darin, neue Potenziale zur Reduzierung von verkehrsbedingten Geräuschemissionen und Lärmimmissionen und insbesondere verkehrsträgerübergreifende Ansätze im Lärmschutz zu erschließen. Ausgehend von den zentralen Leitfragen *"Wie lassen sich verkehrsträgerübergreifende Ansätze zur Verbesserung des Lärmschutzes nutzen?"* und *"Kann eine erweiterte Modellierung der Schallausbreitung zur Erhöhung des Schutzniveaus beitragen?"*, wurden zwei wesentliche Forschungsziele identifiziert (siehe auch Abbildung 32). Zur Beantwortung dieser Fragen wurden Möglichkeiten für eine Bewertung komplexer Lärmszenarien mit mehr als einem Verkehrsträger im Detail untersucht und die Ableitung effektiver und kosteneffizienter gemeinsamer Schutzmaßnahmen auf der Grundlage von Lärmimmissionsberechnungen analysiert. Ziel war es, ein **praktikables Verfahren für eine Gesamtlärmbetrachtung** zu erarbeiten. Am Ende steht ein konkreter Leitfaden für optimierte Lärmschutzentscheidungen, die nicht nur auf die Minderung einer einzelnen Quelle abzielen.

Die Berechnung von Lärmpegeln an einem bestimmten Immissionsort ist stark vom gewählten Schallausbreitungsmodell abhängig. Europaweit unterscheiden sich diese Modelle insbesondere hinsichtlich ihres physikalischen Detailgrades. Die Einbeziehung verkehrsunabhängiger Einflüsse ist hierbei von besonderem Interesse, da diese alle Verkehrsträger betreffen. Ein zweiter Forschungsschwerpunkt hatte daher zum Ziel, die **Berücksichtigung meteorologischer Faktoren** auf die Schallausbreitung zu erproben. Dass das Wetter die Schallausbreitung begünstigen und zu unerwarteten lokalen Pegelerhöhungen führen kann, ist weithin bekannt. Die primäre Zielsetzung hierbei

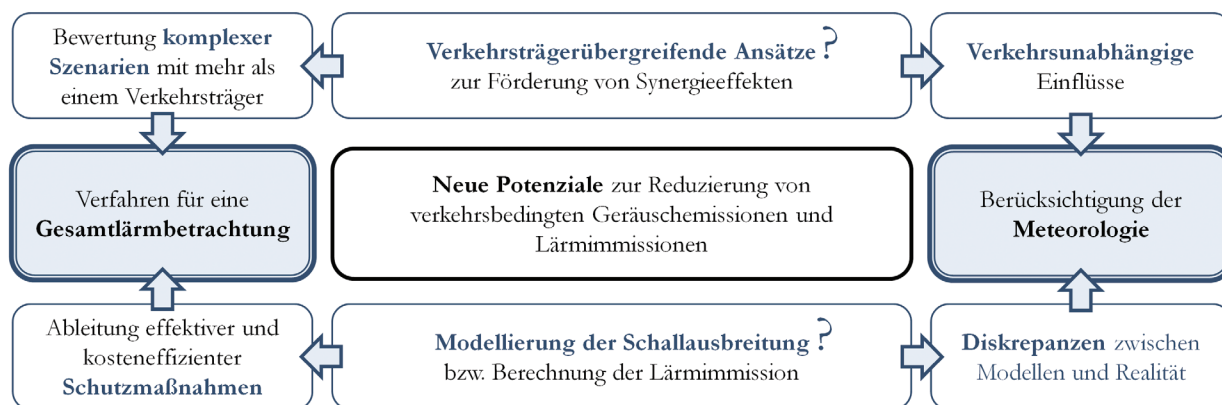


Abbildung 32: Forschungsziele in SPT 205.

war vielmehr zu analysieren, in welchen Fällen vereinfachte Berechnungsvorschriften ausreichen und wann auf ein physikalisches Modell zurückgegriffen werden sollte, um wetterbedingte Minderungen der akustischen Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen abzubilden oder Diskrepanzen zu tatsächlichen Lärmimmissionen erklären zu können. Für solche Einzelfälle soll eine meteorologische Korrektur sicherstellen, dass die Lärmbelastung korrekt bewertet wird.

Innovative Ansätze und Betrachtungsweisen sind wichtige Werkzeuge, um den steigenden Ansprüchen im Lärmschutz gerecht zu werden. Im Rahmen der beiden Forschungsvorhaben **Lärmkumulation** und **Lärmwetter** (Abschnitt 2.5.3) wurden die wissenschaftlichen Grundlagen für eine Realisierung einer Gesamtlärmbetrachtung und einer meteorologischen Korrektur des Immissionspegels geschaffen. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen (Abschnitt 2.5.4) kann eine anwenderorientierte Umsetzung der Verfahren zukünftig die Weiterentwicklung hin zu einem ausweiteten bzw. effektiveren Lärmschutz mit antreiben.

2.5.3 Herangehensweise und Teilprojekte

2.5.3.1 Lärmkumulation

Ausgangslage

Eine Umfrage des Umweltbundesamtes ergab, dass sich 82 % der Bevölkerung von mindestens einer Verkehrslärmquelle und 50 % von mindestens zwei Verkehrslärmquellen belästigt fühlen (Umweltbundesamt 2019). Über die Hälfte der Bevölkerung fühlt sich also von der Gesamtlärmproblematik betroffen.

Nach der EU-Umgebungs-lärmrichtlinie (EU 2002) werden bei der Lärmkartierung die unterschiedlichen Quellen getrennt voneinander berechnet. Eine Gesamtbewertung ist nicht vorgesehen. Zuständig für die Lärmkartierung und Lärmaktionsplanung in Ballungsräumen, an Hauptverkehrsstrecken und Großflughäfen sind die Gemeinden oder zuständigen Landesbehörden. Das Eisenbahn-Bundesamt kartiert die Hauptstrecken der bundeseigenen Bahnstrecken. Nichtbundeseigene Bahnstrecken sind von der jeweiligen Landesbehörde zu betrachten. Eine Kartierung von Binnen- oder Seeschiffahrtslärm ist nach EU-Umgebungs-lärmrichtlinie nicht vorgesehen. Diese strikte Aufteilung führt dazu, dass eine Gesamtlärmkartierung nicht ohne Weiteres durchgeführt werden kann. Um eine Gesamtlärmbetrachtung durchführen zu können, sind qualitätsgesicherte Eingangsdaten aller beteiligten Verkehrsträger notwendig.

Für eine Gesamtlärmbetrachtung sind die Geräusche der einzelnen Verkehrsträger in einer Gesamtlärmkarte zusammenzuführen. Dabei ist zu beachten, dass die unterschiedlichen Frequenzzusammensetzungen und zeitlichen Charakteristika der Verkehrsgeräusche von verschiedenen Additionsverfahren unterschiedlich abgebildet werden. Ein Geräusch verändert sich aufgrund physikalischer Effekte und meteorologischer Einflüsse auf seinem Weg vom Emissionsort zum Immissionsort. Die Frequenzzusammensetzung wird auf dem Ausbreitungsweg aufgrund von Dämpfung, Beugung und Brechung verändert. Beispielsweise werden hohe Frequenzen durch Hindernisse besser abgeschirmt und durch die Luft stärker absorbiert als niedrige Frequenzen. Die vom Menschen empfundene Lärmbelastung kann nur zu ca. einem Drittel durch den Mittelungspegel erklärt werden. Die restlichen zwei Drittel werden durch andere akustische Größen (z. B. Maximalpegel, Einwirkdauer etc.) und sogar nichtakustische Einflüsse (z. B. Umgebung, persönliche Befindlichkeiten etc.) bestimmt (Schreckenber 2018). Eine Gesamtlärmbetrachtung setzt nicht nur eine physikalisch korrekte Ermittlung des Gesamtpegels voraus, sondern sollte auch dessen Wirkung auf den Menschen berücksichtigen.

Zur Eindämmung von Belastungsschwerpunkten sind effektive Maßnahmen gefragt. Die Auswahl einer geeigneten Maßnahme (oder Maßnahmenkombination) an einem bestimmten Ort setzt eine exakte Effektivitätsbestimmung voraus. Sie erfolgt auf Basis der in einem Immissionsgebiet erreichbaren Gesamtpegelreduzierung (ggf. auch unter Berücksichtigung der Lärmwirkung). Natürlich spielen wirtschaftliche Gründe bei der Wahl der Maßnahmen eine große Rolle. Daher muss der Effektivitätsbewertung eine Kosten-Nutzen-Analyse folgen, die auch volkswirtschaftliche Belange berücksichtigt. Die Auswahl geeigneter Maßnahmen sollte unter Berücksichtigung der Effektivität und unter Berücksichtigung der konstruktiven und finanziellen Machbarkeit (Effizienz) erfolgen.

Es existiert kein geregelttes Verfahren, um die durch mehrere Verkehrsträger belasteten Gebiete zu ermitteln und entsprechende Maßnahmen abzuleiten. So werden derzeit Gebiete, in denen eine Gesamtlärmbetroffenheit herrscht, einzelfallbezogen behandelt. In diesen Fällen sind die Ermittlung der Betroffenheit und die Wahl der Maßnahmen

stark von den beteiligten Akteuren und deren Motivation abhängig.

Untersuchungsansätze und Vorgehensweise

Das Forschungsvorhaben Lärmkumulation (Eggers et al. 2019) beleuchtete die Gesamtlärmproblematik, mit besonderem Fokus auf die Bewertungsmethodik, die Maßnahmenfindung und die Identifikation relevanter Einflussparameter. Die einzelnen Arbeitsschritte zur Erarbeitung einer generellen Betrachtungsweise waren von folgenden Fragen motiviert:

- Wo und unter welchen Bedingungen tritt Lärmkumulation auf?
- Wie soll der Gesamtpegel aus den einzelnen Immissionsanteilen berechnet werden?
- Wie sollen Pegelüberschreitungen und die Anzahl Lärmbetroffener bewertet werden?
- Wann ist die Einbeziehung der Lärmwirkung notwendig?
- Welche gemeinsamen Maßnahmen sind zur Erreichung der Schutzziele sinnvoll?
- Wie können die entstehenden Kosten verursachergerecht aufgeteilt werden?

Darüber hinaus findet eine detaillierte Auseinandersetzung mit vergleichbaren Arbeiten, insbesondere mit dem UBA-Bericht "Modell zur Gesamtlärmbewertung" (Liepert, Lang et al. 2019), statt. Im vorliegenden Expertennetzwerkbericht soll aufgrund des begrenzten Umfangs jedoch nicht ausführlicher darauf eingegangen werden.

Ein Blick auf die Landkarte lässt aufgrund der großen Anzahl an Verkehrswegen vermuten, dass an Kreuzungspunkten und Parallellagen scheinbar weiträumige Kumulationsgebiete vorliegen. Um Gebiete, in denen Lärmkumulation physikalisch wirklich vorkommen kann, einzugrenzen, wurden praktische und theoretische Untersuchungen durchgeführt. In einer theoretischen Betrachtung wurden, ausgehend von zwei gleich lauten, parallelen bzw. sich in unterschiedlichen Winkeln kreuzenden Quellen, die Lage und die Ausdehnung entstehender Kumulationsgebiete untersucht. Auf Basis der Berechnungen wurden Gebiete

definiert, in denen sich Maßnahmen auf den Gesamtlärmpegel auswirken, und zwar unabhängig davon, an welcher Lärmquelle sie angreifen. Diese Gebiete sollen im Folgenden als "echte Kumulationsgebiete" bezeichnet werden und die hierbei wirksamen Maßnahmen als "gemeinsame Maßnahmen". Im praktischen Teil wurde in einer Analyse von amtlichen Lärmkartierungen und Lärmaktionsplanungen in den Großräumen Hamburg, Rhein/Ruhr und Rhein/Main nach realen mehrfachbelasteten Gebieten gesucht. In weiterführenden Analysen wurden durch optische Überlagerungen und die Zusammenführung von Daten Bereiche identifiziert, in denen es zu einer Lärmbelastung durch mindestens zwei Verkehrsträger kommt.

Die in den Lärmkartierungen und Lärmaktionsplänen gefundenen Kumulationsgebiete wurden klassifiziert, im Sinne der Untersuchung angepasst und auf Modellgebiete übertragen. Diese Modellgebiete umfassen sowohl dichte als auch lockere Bebauung. Ebenso wurden verschiedene Anordnungen der Lärmquellen gewählt (parallel, in verschiedenen Winkeln kreuzend). Die Emissionen der Verkehrsträger wurden so gewählt, dass eine realistische, möglichst große und auf die Verkehrsträger gleichmäßig verteilte Betroffenheit entsteht. In diesen repräsentativen Lärmsituationen wurde die Maßnahmenfindung erprobt, indem verschiedene Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen angesetzt wurden und jeweils die Effektivität (Reduktion der Betroffenheit) und die Effizienz (Kosten-Nutzen-Verhältnis) analysiert wurde.

Die Annahmen, die am Emissionsort, auf dem Ausbreitungsweg und an den Immissionsorten getroffen werden, haben einen Einfluss auf die Berechnung des Gesamtpegels. Die einfachste Annahme am Emissionsort ist die Entstehung eines frequenzunabhängigen Pegels als Einzahlwert. Physikalisch exakter, aber auch aufwendiger, ist die Berücksichtigung der verschiedenen Frequenzanteile. Eine frequenzabhängige Betrachtung hat einen großen Einfluss auf die physikalischen Effekte, die auf dem Ausbreitungsweg abgebildet werden, und damit auf die Ermittlung des Gesamtpegels. Am Immissionsort zeigt sich dann die gesamte Spannweite an Möglichkeiten, denn hierbei kann ein frequenzabhängig bestimmter Gesamtpegel noch "wirkungsgerecht" – inklusive der Lärmwirkung auf den Menschen – addiert werden.

Die Ermittlung eines Gesamtpegels geht also über das Maß einer reinen Berechnung hinaus – hin zu einer gleichzeitigen Bewertung der Geräusche, welche die Geräuschzusammensetzungen in unterschiedlicher Ausprägung berücksichtigen kann. Während bei einer energetischen Addition als Eingangsdaten die Schallemissionen der Quellen ausreichen, müssen für eine wirkungsgerechte Ermittlung des Gesamtpegels weitere Daten, z. B. die Anzahl an Betroffenen, die genaue zeitliche und spektrale Zusammensetzung der Signale, evtl. sogar Umfrageergebnisse, vorliegen. Die Frage nach dem ausreichenden bzw. notwendigen Detailgrad der Gesamtpegelermittlung wurde anhand von Test-szenarien ermittelt.

Der zeitliche Verlauf und die Frequenzzusammensetzung jedes Vorbeifahrt-Ereignisses können sich stark voneinander unterscheiden. Die Geräusche setzen sich aus verschiedenen Komponenten zusammen (Antrieb, Reifen/Fahrbahn, Aerodynamik etc.), deren Dauer größtenteils von der Geschwindigkeit und der Länge des Fahr- bzw. Flugzeugs abhängt. Während Flug-, Schiffs- und Schienenverkehr in der Regel Einzelereignisse darstellen, kann beim Straßenverkehr an vielbefahrenen Strecken auch eine kontinuierliche Emission vorherrschen. Diese Geräuschcharakteristika spiegeln sich in einer verkehrsträgerspezifischen Lärmwirkung wider. Einen Versuch, dies abzubilden, liefern die Expositions-Wirkungsbeziehungen für Belästigung und Schlafstörung in der VDI-Richtlinie 3722 Blatt 2 (VDI 3722-2 2013), die im Projekt näher untersucht wurden.

Schiffsverkehrslärm ist allerdings nicht in den VDI 3722-2 enthalten. Neben einer vergleichsweise geringen Bedeutung dieser Lärmquelle gegenüber den anderen Verkehrslärmarten ist der schiffahrtsbedingte Schall bislang auch nur unzureichend quantifiziert. Sowohl hinsichtlich der Schallemissionen als auch der Lärmwirkung ist ein Mangel an Studien zu Schiffsgeräuschen festzustellen. Existierende Erhebungen sind zumeist bereits mehr als 10 Jahre alt. Um die Flottenerneuerung bei Schiffen abbilden zu können, werden in einer laufenden Untersuchung der BfG Schallleistungspegel von fahrenden Binnenschiffen auf dem Rhein bei Koblenz durch Messung der Vorbeifahrtpegel gemäß (DIN 45642 2004) ermittelt.

Die oben aufgeführten Schritte münden in einen Leitfaden, der eine zielgerichtete und strukturierte Vorgehensweise

zur verkehrsträgerübergreifenden Gesamtlärmermittlung und Maßnahmenfindung vorgibt. Dieser ist flexibel in der Wahl der Eingangsdaten und lässt dem Anwender die Möglichkeit, die Berechnungs- und Bewertungsmethoden offen an den konkreten Anwendungsfall anzupassen. Um dies zu erreichen, werden praktische Hilfsmittel und anschauliche Darstellungsarten zur Verfügung gestellt. Somit kann ein auf den jeweiligen Einzelfall zugeschnittenes und angemessenes Verfahren gewährleistet werden.

2.5.3.2 Lärmwetter

Ausgangslage

Die Schallausbreitung zwischen einer Emissionsquelle und einem Immissionsort ist ein komplexer physikalischer Vorgang, der durch die Absorption, Reflexion und Refraktion von Schallwellen bestimmt wird. Diese Prozesse finden auf dem Ausbreitungsweg in der Regel in Kombination statt und hängen von diversen Einflussfaktoren ab. Für kurze Distanzen noch ohne Relevanz, beginnen die atmosphärischen Bedingungen (Wetter), ab ca. 50 bis 100 m an Bedeutung zu gewinnen. Will man also die Ausprägung von Lärmimmissionen vollständig verstehen und ein physikalisch korrektes Bild erhalten, so ist die Meteorologie grundsätzlich einzubeziehen. Auch weil Wetterbedingungen sich schnell ändern bzw. sich tags und nachts wesentlich unterscheiden können, hat die Meteorologie einen komplexen und zeitlich variablen Einfluss auf die Schallausbreitung (Abbildung 33).

Die meteorologischen Effekte liegen im Wesentlichen in der Höhenabhängigkeit der Temperatur, des Windfeldes (Stärke und Richtung) sowie der Luftfeuchte begründet. Variieren diese Größen mit der Höhe, entsteht ein vertikaler Schallgeschwindigkeitsgradient, sodass eine Brechung der Schallstrahlen zum Boden hin oder vom Boden weg stattfindet (siehe Abbildung 33). Durch diesen Umstand können bei nächtlichen Inversionswetterlagen – d. h., bodennahe Luftschichten sind kühler als die darüber liegenden – auch weit entfernte Lärmquellen, die tagsüber kaum hörbar sind, plötzlich als störend wahrgenommen werden. Beispielsweise sind in einer Entfernung von 1 km zu einer Straße Pegelschwankungen von bis zu 25 dB möglich (VDI 2714 1988). Meteorologische Einflüsse führen also durch Krümmung der Schallstrahlen zu schallausbreitungsgünstigen oder

-ungünstigen Situationen und in der Folge fällt die Lärmimmission an einem Ort größer bzw. kleiner aus als bei unbeeinflusster (sog. neutraler oder homogener) Schallausbreitung. Derartige wetterinduzierte Pegelschwankungen finden sich in der Regel in den gebräuchlichen Langzeitmittelungspegeln nicht wieder, da es sich meist um kurze temporäre Änderungen handelt. Zum Beispiel kann sich im Jahresmittel ein erhöhter Schalleintrag westlich einer Lärmquelle ergeben, obwohl es wetterbedingt Zeiträume gibt, in denen die Immissionsbelastung im Osten der Quelle deutlich ansteigt (Wilsdorf et al. 2010). Darüber hinaus kann auch die akustische Wirksamkeit von Schallschutzmaßnahmen betroffen sein: Wird beispielsweise der Schall über Hindernisse hinweg getragen und dahinter in Richtung Boden gebrochen, so verkleinert sich der Schallschattenbereich hinter einer Lärmschutzwand und damit auch das Schutzniveau. Gleichzeitig verursachen Hindernisse im Ausbreitungsweg Änderungen des lokalen Windfeldes, wodurch ebenfalls indirekt das Schallfeld modifiziert wird. Auch dann können entsprechende Minderungen oder Verstärkungen der akustischen Wirksamkeit der Lärmschutzwand auftreten (Heimann et al. 2002).

Will man nun die Lärmexposition durch die unterschiedlichen Verkehrslärmquellen berechnen und bewerten, so lässt sich prinzipiell ein vollumfängliches Schallausbreitungsmodell heranziehen, das alle Effekte der atmosphärischen Akustik berücksichtigt. Jedoch sind derartige

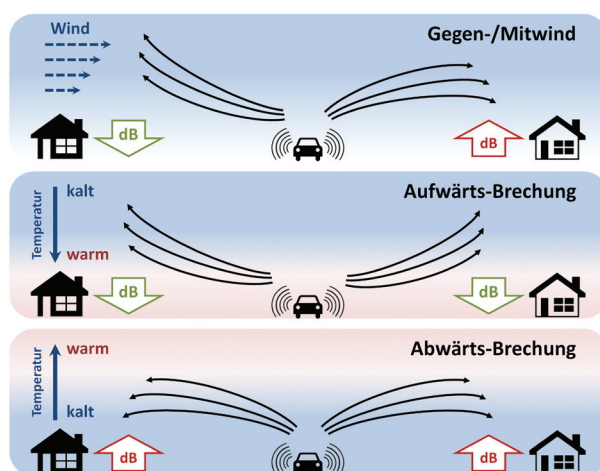


Abbildung 33: Schematische Darstellung des Einflusses von Wind und Temperatur auf die Schallausbreitung.

Modelle von hoher Komplexität, eine einfache Nachvollziehbarkeit der Nutzung ist erschwert und die Rechenzeiten sind signifikant höher als bei vereinfachten ingenieurtechnischen Berechnungsmodellen. Des Weiteren setzt die Nutzung eines detaillierten meteorologischen Modells voraus, dass entsprechend genaue Eingangsdaten vorliegen, was im Allgemeinen nicht der Fall ist. In der Folge kann dann eine Genauigkeit suggeriert werden, die aufgrund einer unsicheren Datenlage tatsächlich nicht gegeben ist. Die Balance zwischen diesen Aspekten (d. h. Detailgrad, physikalische Genauigkeit, Nachvollziehbarkeit, Anwendbarkeit und Rechenzeit) zu finden ist ein wichtiger Teil der Entwicklung eines qualitativ hochwertigen Schallausbreitungsmodells.

In der Praxis basieren Lärberechnungsverfahren auf vereinfachten Modellen, komplexe physikalische Zusammenhänge werden meist über überschlägige Korrekturfaktoren (z. B. Pegelzuschläge) einbezogen. In Deutschland werden in den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen Mitwindbedingungen und/oder Temperaturinversion angenommen (RLS-90 1992¹⁰). Weitere meteorologische Betrachtungen finden nicht statt. Die für die Lärmkartierung im Rahmen der EU-Umgebungslärmrichtlinie (EU 2002) anzuwendende Berechnungsmethode BUB für bodennahe Quellen (BUB 2019) geht bereits anders vor. Hierin wird die Immission – wie in der französischen NMPB-Routes-2008 (Sétra 2009) – für schallausbreitungsgünstige und homogene Schallausbreitungsbedingungen berechnet und gewichtet aufaddiert. Die Gewichtung erfolgt dann jedoch lediglich pauschal für den Tag, den Abend und die Nacht, unabhängig von den örtlichen Gegebenheiten.

Obwohl derartige vereinfachte Ansätze die Immissionspegel in den meisten Fällen (zum Vorteil der Lärmbetroffenen) überschätzen, kann es in komplexeren Situationen oder stark wetterabhängigen Szenarien zu Fehleinschätzungen kommen, da pauschale Korrekturfaktoren nicht ausreichen, um einflussreiche meteorologische Besonderheiten abzubilden. In Europa existieren bereits Berechnungsmodelle, die eine spezifischere Berücksichtigung der

Meteorologie erlauben. Der jeweils mögliche Detailgrad variiert von Modell zu Modell. Zu nennen sind hierbei insbesondere die NMPB-Routes-2008 aus Frankreich (Sétra 2009), die Nord2000 aus Skandinavien (Kragh et al. 2006) und das EU-Projekt Harmonoise (Nota et al. 2005).

Untersuchungsansätze und Vorgehensweise

Im Rahmen einer umfassenden Voruntersuchung (Strigari et al. 2018) wurden die meteorologischen Schallausbreitungsmodelle NMPB-Routes-2008 und Harmonoise einander gegenübergestellt und mit den deutschen RLS-90, die keine explizite Behandlung des Wetters vorsehen, verglichen. Die Analyse umfasste zum einen den theoretischen Vergleich der grundlegenden physikalischen Beschreibung der Schallausbreitung und die Implementierung der Meteorologie. Zum anderen wurden für ein einfaches TestszENARIO die Immissionspegel für verschiedene Wetterbedingungen berechnet und miteinander verglichen. Auf Basis dieser Berechnungsergebnisse wurde im Anschluss die Frage diskutiert, ob bei starken Wettereinflüssen ein vereinfachtes Berechnungsmodell ohne meteorologisches Modul ausreicht, um die Lärmimmission abzuschätzen, und in welchen Fällen eine echte explizite Berücksichtigung des Wetters stattfinden sollte.

Den Kern des Teilprojekts Lärmwetter bildet eine Machbarkeitsstudie (Liepert et al. 2019), die zum Ziel hatte, die Anwendbarkeit komplexer meteorologischer Schallausbreitungsmodelle und daraus resultierender wetterkorrigierter Immissionspegel zu erproben und zu verifizieren. Konkret sollte für ein Untersuchungsgebiet eine exemplarische Datenbank zur Berechnung von Lärmsituationen unter Einbeziehung von Geräuschemissions- und Wetterdaten aufgebaut werden, sodass Zusammenhänge zwischen definierten Wetterprofilen und Immissionspegeln aufgezeigt werden können. Die Arbeitsschritte des Vorhabens gliedern sich wie folgt:

- In einer umfassenden Literaturstudie wurde zusammengetragen, welche genormten Berechnungsmethoden und physikalischen Schallausbreitungsmodelle die Möglichkeit bieten, Wettereinflüsse bei der Schallausbreitung zu modellieren. Es wurden sowohl Standardverfahren als auch strahlen- oder wellenbasierte Schallausbreitungsmodelle analysiert. Die Implemen-

¹⁰Die RLS-90 befinden sich derzeit in Überarbeitung. Das Schallausbreitungsmodell der neuen RLS und insbesondere die Berücksichtigung der Meteorologie sind jedoch von der Aktualisierung nicht betroffen.

tierung der Meteorologie und die jeweils erforderlichen Eingabeparameter wurden einander gegenübergestellt. Ferner wurde erörtert, inwieweit der aktuelle Stand der Wissenschaft wiedergeben wird bzw. in welchem Maße Vereinfachungen vorgenommen werden. Die Betrachtungen in diesem Arbeitsschritt erlauben eine Klassifizierung der Verfahren und münden in einer Dokumentation der wichtigsten meteorologischen Kenngrößen.

- Mit dem Ziel, die quantitativen Unterschiede in den Immissionsberechnungen für verschiedene Berechnungsmodelle und meteorologische Einflüsse zu erfassen, wurden Testszenarien für einfache konstruierte Verkehrssituationen erstellt. Die Testszenarien sind so gewählt, dass der Einfluss sonstiger relevanter Faktoren (Boden, Abschirmung und Reflexionen) möglichst vernachlässigbar ist. Ergänzend wurde eine weitere realitätsnahe Testumgebung betrachtet, die das Untersuchungsgebiet der Messkampagne (siehe unten) abbildet. Dieses beinhaltet lockere Bebauung, unterschiedlichen Bewuchs sowie Orografie. Die Schallausbreitung bzw. Immissionspegel wurden für jedes Testszenario mit einer repräsentativen Auswahl von Modellen berechnet. Sowohl standardisierte Wetterbedingungen (z. B. leichte Mitwindbedingungen) als auch nichttriviale meteorologische Randbedingungen wurden angesetzt.
- In einer dreimonatigen Messkampagne wurden die bisherigen theoretischen Betrachtungen in einer realen Umgebung untersucht. Die Analyse verfolgte zweierlei Ziele: (a) Eine Konsistenzprüfung zwischen Immissionsmessung und -berechnung sollte durchgeführt werden. Das heißt, an ausgewählten Orten wurden Immissionsmessungen durchgeführt und unter Einbeziehung der meteorologischen Daten die entsprechenden Quellemissionen berechnet. Umgekehrt wurden aus Straßenverkehrszählungen und Wetterdaten die entsprechenden Immissionspegel berechnet. (b) Reproduzierbare Zusammenhänge zwischen definierten Wetterprofilen und lokalen Immissionspegelerhöhungen sollten aufgezeigt werden. Die Messungen fanden im Zeitraum zwischen September und Dezember statt, sodass eine Vielzahl unterschiedlicher Wettersituationen aufgenommen werden konnte.

- Basierend auf den Ergebnissen der Messkampagne sollte für das Untersuchungsgebiet exemplarisch eine Test-Datenbank realisiert werden, die auf Geräuschemissionsdaten, detaillierten Wetterdaten sowie daraus errechneten Lärmimmissionen zurückgreift, sodass Lärmsituationen wetterkorrigiert dargestellt werden können. Die Geräuschemissionsdaten werden aus den Daten der Verkehrszählstelle (Gesamtanzahl der Fahrzeuge, Schwerverkehrsanteil und Geschwindigkeiten) ermittelt. Die meteorologischen Informationen werden von der nächstgelegenen Wetterstation des DWD, aus Modellprognosen und über die projekteigenen meteorologischen In-situ-Messungen an den Messorten bezogen.

Die Untersuchungsergebnisse münden in einen Methodenvorschlag, der eine Vorgehensweise für ambivalente und stark wetterbeeinflusste Lärmsituationen liefert. Diese Handlungsempfehlung umfasst die Identifikation kritischer Wettersituationen, die adäquate Beschreibung der Schallausbreitung sowie die Erfassung akustischer Auswirkungen (Pegeldämpfungen auf dem Ausbreitungsweg, Pegelerhöhungen am Immissionsort). In der Praxis können die daraus folgenden wetterkorrigierten Schallausbreitungsberechnungen als praktikable Ergänzung zum gängigen Langzeitmittelungspegel fungieren und eine Hilfestellung für effiziente und optimierte Lärmschutzentscheidungen liefern.

2.5.4 Ergebnisse

2.5.4.1 Lärmkumulation

Unter einer schalltechnischen Kumulation werden gleichzeitig auf einen Ort einwirkende Geräusche verstanden, die dort im Vergleich zu den einzelnen Geräuschen zu einem neuen Höreindruck mit in der Regel höherem Gesamtpegel führen. Umgekehrt können auch mindestens zwei Verkehrsträger auf einen Ort zur selben Zeit einwirken, ohne eine kumulative Situation darzustellen, da ein Verkehrsträger "dominant" ist. Der dominante Verkehrsträger bestimmt in diesem Fall maßgeblich den Gesamtpegel. Er überdeckt die anderen Quellen dergestalt, dass von diesen sowohl messtechnisch als auch aural kein Beitrag wahrzunehmen ist. Zusätzlich lässt sich Kumulation noch um

nicht zeitgleich stattfindende Geräusche erweitern. Dieser Fall tritt auf, wenn beispielsweise bei Vorbeifahrt eines Zuges eine Dominanz dieses Geräusches eintritt, jedoch in den Pausen zwischen verschiedenen Zugvorbeifahrten eine nahe Straße hörbar ist.

Identifikation von Kumulationsgebieten

Die Kumulationsgebiete sind von der Position der Immissionsorte, von den Emissionspegeln und auch von der räumlichen Anordnung der Quellen abhängig. Für unterschiedliche Quellanteile kann ermittelt werden, in welchem Maße die an den Einzelquellen angreifenden Maßnahmen einen Einfluss auf den Gesamtpegel haben. Beispielsweise führen effektive Maßnahmen bei ungünstigen Quellanteilen zu keiner Reduzierung bzw. schwach wirkende Maßnahmen, die aber an der richtigen Stelle angreifen, zu einer hörbaren Reduzierung des Gesamtpegels.

In Abbildung 34 sind die Quellanteile des Straßenverkehrs am Gesamtpegel farblich dargestellt. Die Differenz zu 100 % ist der Anteil der Schiene. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass in den von hellrot, gelb und hellblau gekennzeichneten Gebieten Maßnahmen zu einer wesentlichen Gesamtpegelreduzierung führen, unabhängig davon, an welcher Quelle sie angreifen. In den blauen bzw. roten Gebieten führen nur Maßnahmen, die auf den dort dominanten Verkehrsträger wirken (Schiene bzw. Straße), zu einer nennenswerten Minderung des Gesamtpegels.

Basierend auf diesen Ergebnissen wird festgelegt, dass ein Kumulationsgebiet dann vorliegt, wenn jede Quelle zu mindestens 35 % zum Gesamtpegel beiträgt. Dies entspricht einer Pegeldifferenz zwischen den beiden Einzelpegeln von ~ 3 dB. Fällt eine Quelle unter die 35 %, beginnt die andere Quelle zu dominieren, und bei einer Maßnahmenfindung ist zunächst die Einwirkung dieser dominanten Quelle zu verringern. Die Untersuchungen zeigen, dass die Ausdehnung eines Kumulationsgebietes stark vom Kreuzungswinkel bzw. vom Abstand zweier paralleler Quellen abhängt. Bei gleich lauten Quellen befindet sich das Kumulationsgebiet auf der Winkelhalbierenden bzw. in der Mitte zwischen den parallelen Quellen. Je spitzer der Kreuzungswinkel bzw. je weiter entfernt die Quellen voneinander liegen, desto ausgedehnter fällt das Kumulationsgebiet aus. Natürlich spielen Bebauungen und topografische Gegebenheiten eine große Rolle. Abschirmungseffekte können leicht zur Dominanz einer Quelle führen. Die in dieser theoretischen Betrachtung ermittelten Ergebnisse konnten durch eine exemplarische Lärmberechnung für die Stadt Köln nachvollzogen werden. Diese Berechnung wurde anhand von Daten der Straße, des Flugverkehrs und der Straßenbahn durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Kombination aus zwei Lärmquellen in einer relevanten Häufigkeit auftritt. Eine Kumulation aus drei Lärmquellen kommt wesentlich seltener vor, ist jedoch nicht ausgeschlossen.

Methoden zur Gesamtlärmpegelermittlung

Die Wahl der Methode zur Gesamtlärmermittlung setzt bereits vor der eigentlichen Aufsummierung der Schall-

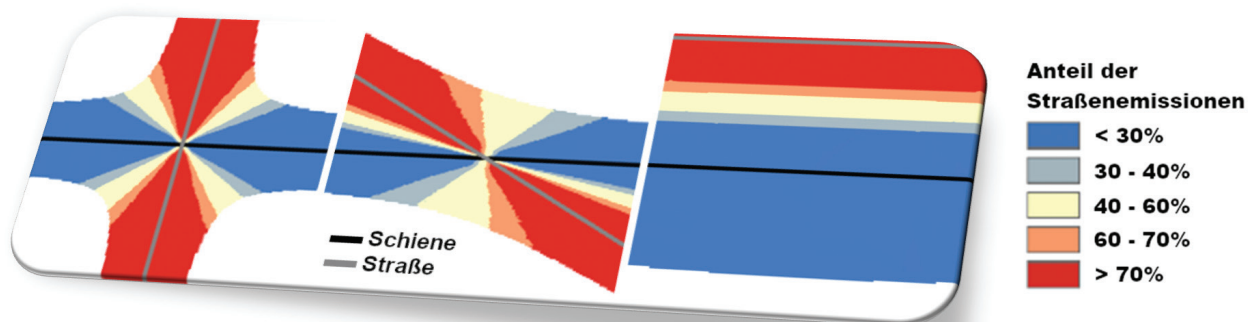


Abbildung 34: Gebiete mit Dominanz (blau und rot) bzw. Kumulationsgebiete (hellblau, gelb, hellrot) bei sich kreuzenden bzw. parallel verlaufenden Verkehrsführungen der Verkehrsträger Straße und Schiene; aus Eggers et al. (2019).

anteile an. An der Quelle stellt sich die Frage, ob das sich ausbreitende Geräusch als "Einzahlpegel" (also frequenzunabhängig) oder als Frequenzspektrum betrachtet werden soll. Auf dem Ausbreitungsweg beeinflussen physikalische Effekte diesen Einzahlpegel durch Dämpfung des Schalls in der Luft, Brechung in der Atmosphäre, Reflexion am Boden und Beugung um Hindernisse. Diese Effekte können in einem Einzahlpegel nur über pauschale Korrekturen berücksichtigt werden. Geht man von der Frequenzzusammensetzung eines Geräusches aus, ist eine genauere Modellierung möglich. Auch kann beispielsweise die Tonhaltigkeit erkannt und in einer Bewertung berücksichtigt werden. In einer frequenzunabhängigen Geräuschartstehung und Ausbreitung würden diese Informationen verloren gehen. Wie in Abschnitt 2.5.3.1 beschrieben, weisen die Geräuschemissionen der verschiedenen Verkehrsträger unterschiedliche Frequenzspektren auf.

Abbildung 35 zeigt beispielhaft, dass vom Schiffsverkehr im Vergleich zum Straßen- und Schienenverkehr ein deutlich größerer tieffrequenter Anteil ausgeht. Insofern sind Methoden, welche die Frequenzspektren der verkehrsbedingten Schallquellen berücksichtigen, bei der Gesamtlärmmittlung prinzipiell zu bevorzugen.

Die einfachste Methode, Schallpegel zu summieren, ist die energetische Addition. Bei der energetischen Addition werden die Schalldrücke (in Pascal [Pa]) der entsprechenden Pegel (in Dezibel [dB]) addiert und aus dem berechneten

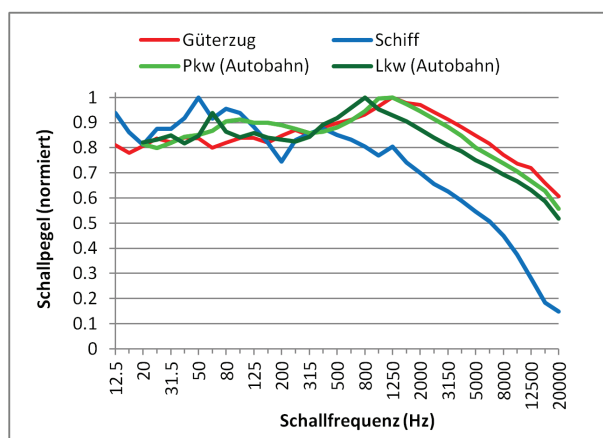


Abbildung 35: Vergleich der Anteile von tiefen und hohen Tönen an den Geräuschemissionen verschiedener Verkehrsträger.

ten Gesamtschalldruck wieder ein Pegel ermittelt. Diese energetische Addition kann sowohl auf frequenzunabhängige Einzahlpegel angewendet werden als auch bei der Betrachtung von Geräuschen auf die einzelnen Anteile der Frequenzspektren. Vergleicht man die energetische Addition von frequenzunabhängiger mit spektraler Ausbreitung, stellt man fest, dass die Ergebnisse der ermittelten Gesamtpegel mehr oder weniger stark voneinander abweichen können. Die Höhe der Abweichung ist vor allem von der Entfernung zwischen Emissions- und Immissionsort und der Anzahl und Größe von Hindernissen auf dem Ausbreitungsweg abhängig. Bei kurzen Distanzen ohne Hindernisse kann eine frequenzunabhängige Ausbreitung und Addition zu einer ausreichenden Ergebnisqualität führen, wohingegen die unterschiedliche Ausbreitung verschiedener Frequenzanteile bei größer werdenden Entfernungen und komplexeren Geometrien einen immer größeren Einfluss auf den Lärmpegel am Immissionsort erlangen kann. Denn die o. g. physikalischen Effekte, die auf kurze Distanzen noch zu vernachlässigen sind, schlagen dann immer mehr zu Buche. Es erfolgen sogenannte "Verfärbungseffekte", welche die Frequenzzusammensetzung verschieben, sodass sich ein Geräusch je nach Lage höher- oder niederfrequenter anhören kann. Dieser Effekt kann in der Folge durch quellspezifische Charakteristika noch verstärkt werden.

Die energetische Addition kann darüber hinaus auf bestimmte Bedürfnisse angepasst werden oder spezielle Begebenheiten berücksichtigen. Somit können auch in diesem einfachen Additionsverfahren Gewichtungen vorgenommen werden. Über Anpassungswerte können Boni (Pegelabzüge) oder Malusse (Lästigkeitszuschläge) vergeben werden. Dies ist die einfachste Art, eine Bewertung über den reinen Pegelwert hinaus zu vergeben. Bei der energetischen Addition bestimmen die hohen Pegel den Summenpegel. Soll eine einheitliche Gewichtung unabhängig von den absoluten Pegeln erfolgen, können auch die relativen Überschreitungen eines Schwellenwertes (z. B. eines Schutzzieles) aufaddiert werden.

Die (VDI 3722-2 2013) beschreibt ein Verfahren zur wirkungsgerechten Pegeladdition von Straßen-, Schienen- und Flugverkehrslärm. Dieses Verfahren beruht auf Befragungen zur Belästigung und Schlafstörung durch die genannten Verkehrsträger.

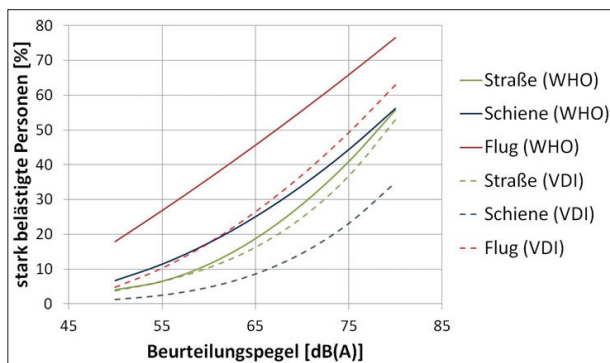


Abbildung 36: Belästigungskurven der verschiedenen Verkehrsträger nach VDI 3722-2 (gestrichelt) und WHO (durchgezogen); aus Eggers et al. (2019).

Die hinterlegten Expositions-Wirkungsbeziehungen ermöglichen eine Umrechnung eines gemessenen oder berechneten Lärmpegels eines Verkehrsträgers in den Lärmpegel eines anderen Verkehrsträgers, bei dem die äquivalente Wirkung auf den Menschen ausgelöst wird. Diese Abhängigkeiten sind in Abbildung 36 als gestrichelte Kurven für die Belästigung der verschiedenen Verkehrsträger beispielhaft dargestellt. Da diese Beziehungen auf Studien der 60er- bis 80er-Jahre beruhen, hat die WHO sie in ihrer aktuellen Untersuchung aktualisiert (durchgezogene Linien in Abbildung 36) (WHO 2018). Hierbei wurden bei den Schienen- und Flugverkehrsgeräuschen starke Abweichungen hin zu höheren Lästigkeiten festgestellt. Die Wirkung des Straßenverkehrslärms blieb in etwa auf demselben Niveau.

In einer für die Stadt Düsseldorf durchgeführten Studie (Reichert 2016) zur Gesamtlärbetrachtung wurden die energetische Addition und die wirkungsgerechte Addition nach VDI 3722-2 gegenübergestellt und mit Befragungen in der Bevölkerung abgeglichen. Hierbei stellte sich heraus, dass die Bestimmung von Lärmschwerpunkten im Wesentlichen von der Methode unabhängig war. In ländlicheren Gegenden sind größere Abweichungen zwischen den beiden Additionsmethoden zu erwarten, da im Vergleich zur Stadt höhere Geschwindigkeiten und wesentlich geringere Grundlärmpegel vorherrschen. Dies liegt zum einen in den Expositions-Wirkungsbeziehungen begründet, zum anderen darin, dass Lärmereignisse in leisen Umgebungen eine höhere Belästigungswirkung erzielen können. Zu ähnlichen Ergebnissen kam eine BAST-eigene Voruntersuchung

(Chudalla et al. 2018). Für eine einfache Parallellage und verschiedene Maßnahmenkombinationen wurde ein Vergleich der energetischen, spektralen und wirkungsgerechten Addition angestellt. Es zeigte sich, dass die Einbeziehung der Lärmwirkung zwar die prognostizierte absolute Pegelminderung beeinflusst, die relative Priorisierung der Maßnahmen aber kaum mit der gewählten Methode variiert.

Wie weiter oben erläutert, hat die Wahl des Additionsverfahrens einen Einfluss auf die Feststellung einer Kumulation oder Dominanz und damit auch auf die Maßnahmenfindung. Die Fragen nach den "richtigen" Methoden zur Berechnung der Schallausbreitung, der Addition von Pegeln und der Bewertung von Signalen aus verschiedenen Quellen konnten im Forschungsvorhaben nicht allgemeingültig beantwortet werden. Durch die vorgestellten Methoden wird ein breiter Bereich aufgespannt, in dem eine Abwägung zwischen Aufwand und Präzision getroffen werden muss. Die Wahl eines Additionsverfahrens kann also nicht allgemeingültig vorgeschrieben werden, sondern ist von den jeweiligen unterschiedlich ausgeprägten Befindlichkeiten abhängig. Für eine routinemäßige Berechnung ist die energetische Addition ausreichend. Liegen gehäuft Beschwerden vor, scheint die wirkungsgerechte Addition sinnvoll.

Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass nicht die Wahl der Berechnungsmethode die Wirksamkeit von Maßnahmen bestimmt. Sie kann ggf. nur genauer beschrieben werden. Auch auf Grundlage frequenzunabhängiger Pegelwerte und einfacher energetischer Addition können mit dem unten beschriebenen Leitfaden wirkungsvolle Maßnahmen gefunden werden.

Maßnahmenfindung und -bewertung

Maßnahmen, die erst am Immissionsort wirken (passiver Lärmschutz, z. B. Schallschutzfenster), stellen in der Regel die letzte verbleibende Schutzmöglichkeit dar. Im Rahmen des Projekts werden nur emissionsseitige Maßnahmen bzw. Maßnahmen auf dem Ausbreitungsweg (aktiver Lärmschutz) betrachtet. Für den Flug- und Schiffsverkehr entfallen offensichtlich Maßnahmen auf dem Ausbreitungsweg. Denn beim Schiffsverkehr sind beispielsweise Lärmschutzwände aufgrund der großen Entfernung zum Fahrzeug

und der eher niederfrequenten Frequenzanteile wirkungslos. Hierbei können nur an den Entstehungsmechanismen direkt am Antriebsaggregat Verbesserungen für Immissionsgebiete erzielt werden. Beim Flugverkehr betreffen die realisierbaren aktiven Maßnahmen die Flugverfahren oder eine Kontingentierung der Flugbewegungen und der damit verbundenen Lärmbelastung. Für den erdgebundenen Verkehr sollen – neben den bekannten Maßnahmen auf dem Ausbreitungsweg (Lärmschutzwände, -wälle, Einhausungen) – insbesondere die emissionswirksamen Maßnahmen genannt werden (Umweltbundesamt 2015, 2017a, 2017b):

- Lärmindernder Fahrbahnbelag (bis -5 dB)
- Besonders überwacht Gleis, Schienenstegdämpfer, Schienenstegabschirmung (ca. -3 dB)
- Geschwindigkeitsbegrenzung (-1 bis -3 dB)

Diese haben den Vorteil, in vollem Umfang auf das gesamte Immissionsgebiet zu wirken. Dagegen wirken Maßnahmen auf dem Ausbreitungsweg je nach Lage des Immissionsortes besser oder weniger gut.

Nach der Ermittlung von Immissionspegeln und der Feststellung von Pegelüberschreitungen müssen Maßnahmen gefunden werden, welche die Einhaltung eines festgelegten Schutzzieles ermöglichen. Auch die Wahl einer Maßnahme bzw. eines Maßnahmenpaketes unterliegt einer Abwägung zwischen erzieltm Nutzen (Effektivität) und resultierenden Kosten (Effizienz). Beispielhaft erwähnt werden sollen hierbei die Methoden zur Ermittlung eines Nutzen-Kosten-Verhältnisses der (Förderrichtlinie Lärmsanierung Schiene 2018), des Umweltbundesamtes (Liepert, Lang et al. 2019), die Schutzfallmethode nach der Variantenuntersuchung Niedersachsen (NLStBV 2018) sowie das Lästigkeitsmaß nach der DEGES-Methode (LfU 2005). Diese setzen pauschale volkswirtschaftliche Kosten an, die den Bau und den Erhalt der Lärmschutzmaßnahmen abdecken sollen. Es können darüber hinaus, z. B. in der Förderrichtlinie Lärmsanierung Schiene, in Teilbereichen auch besondere Anforderungen gestellt werden, die eine Berücksichtigung des über die reine Pegelminderung hinausgehenden Nutzens erlauben. Detaillierter berücksichtigt das "Schweizer Modell" (Bichsel et al. 2006) die volkswirtschaftlichen Kosten. Hierbei werden z. B. auch Gesundheitskosten und Auswirkungen auf Immobilienpreise berücksichtigt.

Verfahren zur Lärminderung bei Kumulation

Das Verfahren zur Lärminderung bei Kumulation ist zweistufig aufgebaut. In der ersten Stufe wird geprüft, ob eine Kumulationssituation vorliegt und ob weitere Voraussetzungen für die Anwendung des Verfahrens erfüllt sind. Wurde diese erste Stufe erfolgreich durchlaufen (siehe Abbildung 37) wird mit dem Prüfverfahren für die beiden verbleibenden Quellen (Straße und Schiene) begonnen (siehe Abbildung 38).

Zur Durchführung der zweiten Stufe des Leitfadens ist eine umfassende Auflistung von verkehrsträgerspezifischen Maßnahmen zur Lärminderung mit zu erwartenden Pegelminderungen angefertigt worden. Es wurden Werkzeuge zur grafischen Darstellung der Pegelverteilungen von Kumulationssituationen und der Veranschaulichung von Maßnahmenwirksamkeiten entwickelt.

Diese stellen übersichtliche Möglichkeiten dar, Ausgangssituationen und Maßnahmenwirksamkeiten schnell zu bewerten und Lösungen zu erarbeiten. Am Ende stehen Vorschläge für eine abschließende Bewertung der gefundenen Maßnahmenpakete. Diese Bewertung kann rein auf Basis der Effektivität getroffen werden oder unter Einbe-

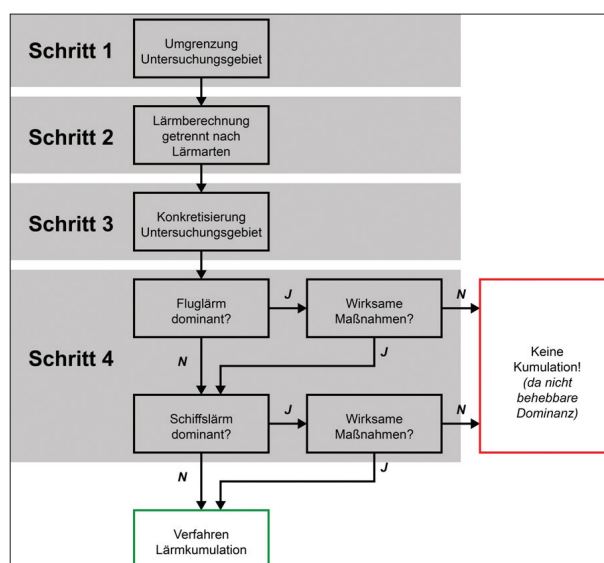


Abbildung 37: Erste Stufe des Verfahrens zur Lärminderung bei Kumulation; aus Eggers et al. (2019).

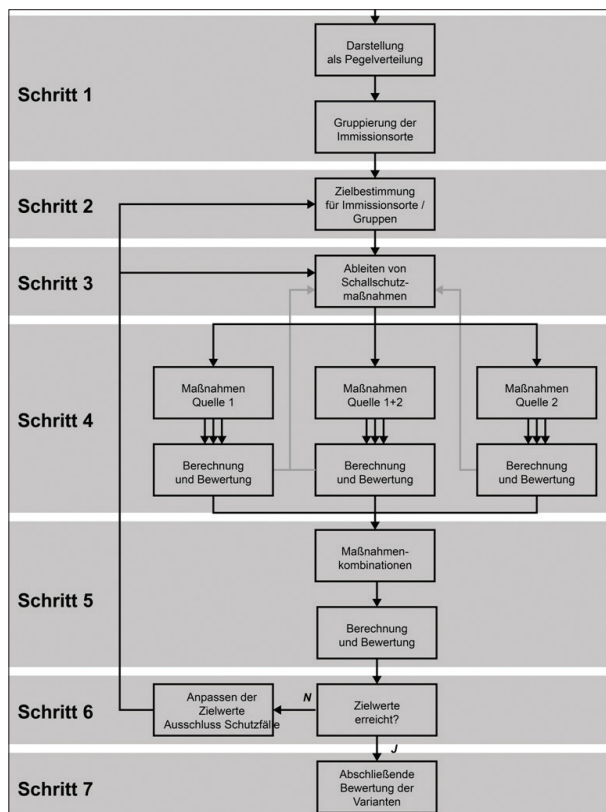


Abbildung 38: Zweite Stufe des Verfahrens zur Lärminderung bei Kumulation; aus Eggers et al. (2019).

ziehung volkswirtschaftlicher Einflüsse, die den Aufwand zur Ermittlung eines Ergebnisses natürlich in die Höhe treiben. Somit ist es auch hier angezeigt, je nach Ausgangslage zwischen einfachen und aufwendigen Verfahren für die Bewertung der Maßnahmen zu wählen.

Detailliert wird in der ersten Stufe die Abgrenzung des Untersuchungsgebietes vorgenommen und anschließend die Berechnung der verkehrsträgerspezifischen Immissionspegel durchgeführt. Daraufhin wird vorab die Kumulation des luft- und wassergebundenen Verkehrs separat betrachtet. Die weiter oben beschriebenen Kriterien zur Abgrenzung von Kumulations- bzw. Dominanzbereichen fließen hierbei unmittelbar ein: Flug- oder Schiffsverkehrslärm spielen entweder eine untergeordnete oder eine dominante Rolle, aber es kommt meist nicht zu einer "echten" Kumulation von Pegeln derselben Größenordnung. Es sind keine gemeinsamen Maßnahmen (außer passiven Maß-

nahmen) zwischen einem dieser Verkehrsträger und einem erdgebundenen Verkehrsträger umsetzbar. Sollte einer der Verkehrsträger dominant sein, müssen vordringlich Maßnahmen zur Beseitigung dieses Lärmproblems gefunden werden.

Sind keine Maßnahmen möglich, besteht keine Kumulationssituation, sondern ein Dominanzproblem und das Verfahren ist beendet. Liegt keine Dominanz vor oder werden wirksame Maßnahmen gefunden, geht das Verfahren in die zweite Stufe ("Verfahren Lärmkumulation") über. Zu Beginn der zweiten Stufe werden die ermittelten Immissionspegel in einem Pegelverteilungs-Diagramm als Differenz zum gewählten Schwellenwert dargestellt. Anhand des Diagramms erfolgt die Zielbestimmung (d. h. die durch Maßnahmen anzustrebende Pegelminderung) für die Immissionsgebiete. Für Details zum Pegelverteilungs-Diagramm, dessen Interpretation und Anwendung sei hierbei auf den Schlussbericht verwiesen (Eggers et al. 2019). In einem sich wiederholenden Prozess werden nun Schallschutzmaßnahmen angesetzt und auf ihre Wirksamkeit geprüft. Dies erfolgt durch Darstellung der jeweiligen Pegelminderungen, der voraussichtlichen Pegelverteilung nach umgesetzter Maßnahme und beispielsweise der Lärmkennziffer (Böninghausen et al. 1988), die ein Maß für die Betroffenheit repräsentiert. Sind die gängigen Maßnahmen durchgespielt, werden bei Bedarf Maßnahmenkombinationen berechnet und bewertet. Nun erfolgt die Abfrage, ob der Zielwert erreicht werden konnte. Ist dies nicht der Fall, kann die Zielbestimmung überprüft (und ggf. angepasst) oder weitere Maßnahmen können analysiert werden. Sind die Zielwerte erreicht worden, erfolgt eine abschließende Bewertung der Varianten anhand eines geeigneten Verfahrens zur Maßnahmenbewertung (siehe oben) auf Grundlage der Effektivität und Effizienz.

Mit dem Verfahren zur Lärminderung bei Lärmkumulation wurde eine strukturierte Vorgehensweise inkl. geeigneter Darstellungs- und Bewertungswerkzeuge geschaffen, mit der auch komplexe Situationen adäquat und vergleichbar geprüft werden können. In der Lärmaktionsplanung warten Anwender auf ein derartiges transparentes Verfahren, um mit einem durch Fachleute entwickelten Vorgehen zu überzeugen und die Akzeptanz bei den Betroffenen zu steigern.

2.5.4.2 Lärmwetter

Berücksichtigung der Meteorologie in Schallausbreitungsmodellen

Im nationalen und internationalen Umfeld existiert eine Vielzahl an wissenschaftlichen Publikationen, technischen Berichten und daraus folgenden Regelwerken, die ausgehend von einer bodennahen Schallemission (z. B. Straßen- und Schienenlärm) die Schallausbreitung zu einem Immissionsort hin beschreiben. Die betrachteten Verfahren sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Der mögliche Detailgrad für die Modellierung meteorologischer Einflüsse bestimmt hierbei die Zuordnung in eines der folgenden Cluster:

- (I) Regelwerke **ohne** explizite Berücksichtigung meteorologisch unterschiedlicher Parameter
- (II) Regelwerke **mit eingeschränkter** Berücksichtigung unterschiedlicher meteorologischer Parameter
- (III) Regelwerke **mit** Berücksichtigung unterschiedlicher meteorologischer Parameter

Im Cluster (I) finden sich Regelwerke oder Methoden, die keine explizite Eingabe meteorologischer Größen erlauben, sondern pauschal von bestimmten – meist schallausbreitungsgünstigen – meteorologischen Bedingungen ausgehen (RLS 90 1992, VDI 2714 1988, DIN ISO 9613-2 1999, RVS 04.02.11 2006, Heutschi 2004, CRTN 1988). Teilweise werden zwar auch Korrekturfaktoren verwendet, diese sind jedoch pauschalisiert festgelegt und nicht individuell anpassbar.

Ins Cluster (II) fallen die französische NMPB-Routes-2008 (Sétra 2009) und die Methode CNOSSOS-EU bzw. BUB (EU 2015, BUB 2019), die im Rahmen der EU-Umgebungs-lärmrichtlinie 2002/49/EG eingeführt wurden. Die Meteorologie basiert in beiden Fällen auf der Unterscheidung zwischen schallausbreitungsgünstigen und homogenen (neutralen) Ausbreitungsbedingungen. Beide Situationen werden getrennt voneinander berechnet und gewichtet überlagert. Die Gewichtung erfolgt mittels Auftrittswahrscheinlichkeiten für schallausbreitungsgünstige Bedingungen, die z. B. aus Wetterstatistiken für die betroffene Region abgeleitet werden können. Für Abschätzungen "auf der

sicheren Seite" sind auch pauschale Annahmen, bspw. für tags/abends/nachts, möglich.

Harmonoise (Nota et al. 2005) und Nord2000 (Kragh et al. 2006) bilden das Cluster (III) und bieten von den hierbei betrachteten Methoden den größten meteorologischen Umfang. Beide Verfahren verfolgen eine physikalische Herangehensweise und erlauben die präzise Eingabe der meteorologischen Parameter. Intern werden davon ausgehend 5 Wind- und 5 Stabilitätsklassen genutzt, um die wetterbeeinflusste Schallausbreitung abbilden zu können. Jede Stabilitätsklasse repräsentiert hierbei eine bestimmte vertikale Temperaturschichtung. Unabhängig davon, welches Cluster man betrachtet: Die Berechnungsergebnisse der hier vorgestellten Regelwerke und ingenieurstechnischen Modelle stellen immer Näherungen dar. Die physikalisch korrekte Modellierung der Schallausbreitung wird nur möglich, wenn man sich komplexer numerischer Verfahren bedient (d. h. wellen- oder partikelbasierte Modelle). In der Alltagspraxis sind diese Modelle jedoch nicht praktikabel, da die Eingabedaten i. A. nicht in der notwendigen Detailtiefe vorliegen und die Berechnungen sehr zeitintensiv sind sowie ein hohes Maß an Fachwissen erfordern.

Notwendigkeit einer expliziten Meteorologie-Betrachtung

Exemplarisch wurde in einer einfachen Voruntersuchung jeweils ein Vertreter aus den Clustern (I), (II) und (III) betrachtet. Verglichen wurden die RLS-90 mit den Methoden der NMPB-Routes-2008 und Harmonoise, um die wetterbedingten Unterschiede in Lärmimmissionsberechnungen zu identifizieren und herauszuarbeiten, welche Effekte bei pauschaler Meteorologie-Betrachtung ggf. nicht abgebildet werden. Als Testgebiet wurde der umliegende Bereich der BAST in einer stark vereinfachten Form (u. a. kein Gelände-modell, vereinfachte Gebäudehöhen) gewählt. Im Süden des Geländes verläuft die BAB 4 mit einem DTV von ca. 75.000 Fahrzeugen pro 24 Stunden, die als einzige (dominante) Lärmquelle im Testgebiet wirkt. Es ist bekannt, dass die Schallausbreitung von der Autobahn zu den umliegenden Gebäuden starken meteorologischen Einflüssen unterliegt. Um die drei Modelle miteinander vergleichen zu können, wurden die Quellemissionen jeweils so gesetzt, dass der Immissionspegel in unmittelbarer Nähe zur Quelle in allen drei Berechnungen gleich ist. Weitere Details, die

Tabelle 7: Übersicht der betrachteten Regelwerke zur Beschreibung der Schallausbreitung und der jeweiligen meteorologischen Parameter und Anpassbarkeit. Die Einfärbung der Titel bildet die Einordnung in die oben genannten Cluster (I), (II) und (III) ab.

	Temperatur	Luftfeuchte	Windrichtung	Windgeschw.	Bodeneigenschaften	vert. Temperaturgradient	atmosph. Schichtung
RLS-90, VDI 2714 und ISO 9613-2	10 °C	70 % r. F.	Mitwind	1 bsi 5 m/s	teilw. unterscheidbar	Inversion	k. A.
RVS 04.02.11	k. A.	k. A.	Mitwind	k. A.	absorbierend/reflekt.	Inversion	k. A.
SonRoad	8 °C	76 % r. F.	Mitwind	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
CRTN	k. A.	k. A.	kein Wind	k. A.	Reflexion & Unstetigkeit	kein Gradient	k. A.
CNOSSOS-EU/BUB	15 °C anpassbar	70 % r. F. anpassbar	k. A.	k. A.	Bodenparameter anpassbar	schallgünstig bis homogen	k. A.
NMPB 2008	15 °C anpassbar	70 % r. F. anpassbar	schallgünstig bis homogen	nein	Bodenparameter anpassbar	schallgünstig bis homogen	k. A.
Harmonoise	10 °C anpassbar	70 % r. F. anpassbar	5 Windklassen	5 Windklassen	Bodenparameter anpassbar	k. A.	5 Stabilitätsklassen
Nord2000	20 °C, teilw. anpassbar	k. A.	5 Windklassen	5 Windklassen	k. A.	k. A.	5 Stabilitätsklassen

berechneten Lärmkarten sowie eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse sind der Veröffentlichung (Strigari et al. 2018) zu entnehmen.

Während die Berechnung gemäß RLS-90 keine Anpassung der Meteorologie erlaubt, sondern generell eine Mitwind- und/oder Temperaturinversion abbildet, wurden die meteorologischen Randbedingungen in den anderen beiden Modellen von "stark schallausbreitungsgünstig" (*worst case*, in alle Richtungen) über "moderat schallausbreitungsgünstig" (in eine spezifische Richtung) bis hin zur "homogenen Ausbreitung" variiert. Es zeigte sich, dass die mit den RLS-90 berechneten Immissionen geringer als im *worst case* ausfallen, aber – wie von den RLS-90 beabsichtigt – die "moderat schallausbreitungsgünstige" Situation adäquat wiedergegeben wird. In den schallausbreitungsgünstigen Varianten waren Bereiche mit erhöhter Lärmbelastung zu finden, insbesondere in engen Gebäudekorridoren und an entfernteren Immissionsorten.

Aus diesen ersten Ergebnissen ließ sich folgern, dass eine exakte Modellierung der Meteorologie für allgemeine Fälle nicht zwingend erforderlich sein muss; pauschale und eher schallausbreitungsgünstige Eigenschaften stellen eine

sinnvolle und sichere Abschätzung nach oben dar. Jedoch können durchaus kritische Einzelfälle mit unerwarteten kurzzeitigen Pegelerhöhungen entstehen, in denen eine genaue meteorologische Beschreibung ein wichtiges Mittel darstellt, um effektive Schutzmaßnahmen realisieren zu können.

Auswirkungen unterschiedlicher Ausbreitungsmodelle

In Testaufgaben (TA) mit einfachen Geometrien wurde das Verhalten unterschiedlicher Modelle bei unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen näher beleuchtet und interpretiert: Straße auf ebenem Gelände (TA 2); Straße auf ebenem Gelände mit Abschirmung (TA 3) und zwei sich kreuzende Straßen auf ebenem Gelände (TA 4). Wie in der oben beschriebenen Voruntersuchung wurde die Emission der Straße so gewählt, dass in 25 m Entfernung in allen Rechnungen identische Immissionspegel entstehen. Die Immission ist als Pegelabnahme bzgl. dieses Referenzpunktes dargestellt und wurde für Abstände bis zu 2500 m von der Straßenmitte berechnet. Es wurden auch realitätsnahe, komplexere TA berechnet, die jedoch aufgrund des limitier-

ten Umfangs hierbei nicht betrachtet werden sollen, siehe (Liepert et al. 2019).

Abbildung 39 zeigt, dass die Pegelabnahme mit steigender Entfernung bei Mitwind-Bedingungen deutlich unterschiedlich ausfällt, je nachdem, welche Methode man anwendet. Die Gründe hierfür liegen zum einen in einer nicht einheitlichen Definition der Mitwind-Bedingungen, zum anderen wird insbesondere die Dämpfung durch Luftabsorption von Modell zu Modell unterschiedlich angesetzt. In der Berechnung mit Abschirmung (TA 3) zeigt sich außerdem, dass bei höheren Entfernungen (ab ca. 1500 m) der Einfluss der Abschirmung gering ist, wenn die Modelle die nach unten gebrochene Schallausbreitung bei Mitwind berücksichtigen. Für die Kreuzungssituation (nicht abgebildet) sind besondere meteorologisch bedingte Effekte nicht erkennbar, da in diesem Fall der Lärm aus zwei Richtungen auf die Immissionspunkte einwirkt. Somit wird die Mitwindausbreitung schon ab ca. 500 m vom Querwind dominant überlagert.

Der Unterschied zwischen der schallausbreitungsgünstigen ($C_0 = 0$) und homogenen Rechnung ($C_0 = 2$) in der ISO 9613-2 fällt eher klein aus. In den Verfahren mit eingeschränkter Berücksichtigung der Meteorologie (BUB und NMPB) tritt dieser Unterschied viel deutlicher zutage: In großen Entfernungen ergibt sich in den homogenen Rechnungen eine zusätzliche Pegelabnahme von bis zu 20 dB

im Vergleich zu den schallausbreitungsgünstigen Varianten. Bei letzteren sorgt die Annahme nach unten gebeugter Schallstrahlen auch dafür, dass die akustische Wirksamkeit einer Abschirmung im Nahbereich (< 500 m) gemindert wird (nicht abgebildet). Mit dem Modell der Nord2000 wurden weitere Varianten berechnet (nicht abgebildet), indem einerseits die Windgeschwindigkeit konstant gehalten und die Stabilitätsklasse sowie Windrichtung geändert wurden. Andererseits wurden Windgeschwindigkeit und Windrichtung bei konstanter Stabilitätsklasse variiert. Hierbei stellte sich heraus, dass die Auswirkungen verschiedener Temperaturgradienten, Windstärken und -richtungen durch Nord2000 konsistent wiedergegeben werden können; bspw. eine starke Beugung nach unten bei stabiler Wetterlage. Generell war festzustellen, dass die Immissionspegel sensibler auf eine Änderung der Windparameter reagieren.

Messtechnische Erfassung von Wettereinflüssen auf die Schallausbreitung

Während der dreimonatigen Messkampagne wurden zwei Dauermessstationen (DMS) betrieben. An beiden DMS wurden gleichzeitig der Schallpegel und die Meteorologieparameter (u. a. Temperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Luftdruck, relative Luftfeuchte) aufgenommen. Die DMS waren in ca. 200 m Entfernung zur Straße positioniert. Die hierbei erfasste Meteorologie wurde – in Kombination mit Daten der nächstgelegenen Wetterstation des

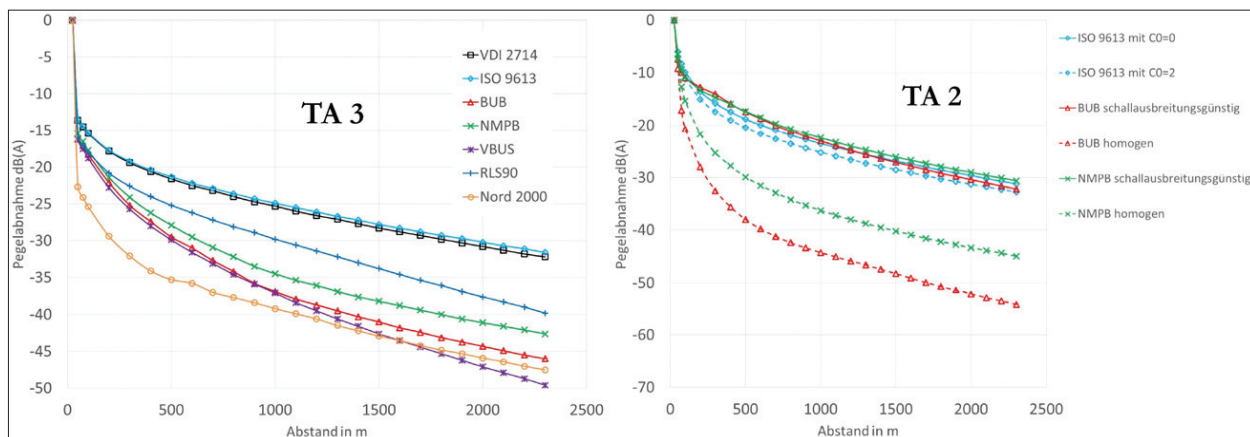


Abbildung 39: Pegelabnahme in Abhängigkeit vom Abstand für unterschiedliche Regelwerke; TA 3 bei Mitwind-Bedingungen (links), TA 2 bei schallausbreitungsgünstigen und homogenen Bedingungen (rechts); aus Liepert et al. (2019).

DWD – zur Modellierung der Schallausbreitung im gesamten Messgebiet herangezogen. Zusätzlich fanden an bestimmten Tagen Intensivmessungen der Schallimmission mit bis zu sechs weiteren Mikrofonen in unterschiedlichen Abständen statt. Diese Intensivmessungen hatten zum Ziel, besondere Wettersituationen genauer zu erfassen. Im Messzeitraum fanden sich Spätsommertage, stürmische Nächte und auch winterliche Bedingungen.

Die Gesamtheit der erfassten Daten (zeitaufgelöste, frequenz aufgelöste und gemittelte Schallpegel, meteorologische Daten aus Verkehrsdaten) ist nun miteinander in Beziehung zu setzen, um etwaige Korrelationen identifizieren zu können. In einer ersten Voranalyse ließ sich feststellen, dass sich beispielsweise sowohl die Auswirkungen des Berufsverkehrs als auch Änderungen in der Luftschichtung deutlich in den Pegelverläufen niederschlagen. Die aufgenommenen Daten im Untersuchungsgebiet zeigen, dass der Einfluss der Stabilitätsklasse mit zunehmender Windgeschwindigkeit abnimmt und der Einfluss der Windrichtung mit zunehmender Stabilität nachlässt. Starker Mitwind in Kombination mit einer stabilen Schichtung führt zu den lautesten Immissionspegeln, während die geringsten Pegel bei starkem Gegenwind und labiler Schichtung auftreten. Die umfassende Auswertung der Messkampagne war zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Berichtes noch nicht abgeschlossen. Detaillierte Ergebnisse werden in der Veröffentlichung des Projektabschlussberichtes (geplant für Mitte 2020) nachzulesen sein.

Datenbank und Methodenvorschlag

Nach Abschluss der Auswertungen wird die Realisierung der Datenbank (siehe Abschnitt 2.5.3.2) beginnen. Die hierfür notwendigen Schritte umfassen die Bereitstellung und Aufbereitung aller notwendigen Daten, die zeitliche Synchronisierung der gemessenen Daten aus unterschiedlichen Messstationen bzw. Quellen und die Umsetzung der in der vorangegangenen Auswertung identifizierten Zusammenhänge und Korrelationen in eine wetterkorrigierte Berechnung der Immissionspegel. Da der Aufbau der Datenbank auf den konkreten Ergebnissen der Auswertung beruht, sei auch an dieser Stelle auf die Veröffentlichung des Projektabschlussberichtes (geplant für Mitte 2020) verwiesen.

Die bisherigen Projektergebnisse deuten auf einen nicht vernachlässigbaren Einfluss des Wetters auf die Schallausbreitung in bestimmten Situationen hin. Unter welchen Bedingungen eine pauschale Abschätzung ausreicht, wann eine meteorologische Korrektur erforderlich wird und mit welchem Maß korrigiert werden muss, wird zum Abschluss des Projektes in einem Methodenvorschlag zusammengefasst. Der Methodenvorschlag in Kombination mit der ersten exemplarischen Umsetzung einer Datenbank stellt dann ein systematisches und erprobtes Verfahren dar, um auch lokale wetterbedingte Besonderheiten in der Lärmberechnung berücksichtigen zu können. Eine derartige Hilfestellung bzw. Ergänzung zum üblichen Langzeitmittelungspegel schafft auch eine größere Transparenz und Nachvollziehbarkeit und erhöht die Akzeptanz von Immissionsprognosen in der Öffentlichkeit.

2.5.5 Diskussion und Ausblick

Mit den Untersuchungen im SPT 205 konnten zwei wichtige Ansatzpunkte für einen umfassenderen und verkehrsträgerübergreifenden Lärmschutz ausgebaut werden. Im Teilprojekt Lärmkumulation wurde mit dem Leitfaden "Verfahren zur Lärminderung bei Kumulation" ein praktikables Werkzeug für die Gesamtlärmbetrachtung erarbeitet. Es kann nun bei der Umsetzung von Lärmschutzprojekten herangezogen werden, wenn mehr als ein Verursacher zu einer Lärmsituation beiträgt. Auch der im Teilprojekt Lärmwetter erarbeitete Methodenvorschlag zur Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse auf die Schallausbreitung verspricht eine neuartige Hilfestellung, um Diskrepanzen zwischen Berechnungsmodellen und tatsächlicher Lärmbelastung aufzulösen.

Die bisherigen Lücken im Umgang mit Gesamtlärm und Meteorologie liegen nicht in fehlenden technischen Werkzeugen begründet, sondern vielmehr in der Fülle an Berechnungsmöglichkeiten und unklaren bzw. nicht vorhandenen politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen. Um die wissenschaftlich-technischen Empfehlungen letztendlich in die Praxis zu übertragen, bedarf es dieses gesetzlichen Rahmens. Gerade weil die Themen Lärm und Lärmschutz so facettenreich sind, entstehen Interessenskonflikte zwischen den involvierten Akteuren (vom Verursacher bis zu den Betroffenen), die das Finden einer zufriedenstellen-

den Lösung oft in die Ferne rücken lassen. Hinzu kommen unterschiedliche Sichtweisen auf der Fachebene, z. B. im Falle von Gesamtlärm, hinsichtlich der Frage, wie Lärm aus verschiedenen Quellen "korrekt" zu addieren oder wie die Bewertung einer Schutzmaßnahme durchzuführen ist.

Beide Teilprojekte haben gezeigt, dass die Anwendung der bestehenden Verfahren in den meisten Fällen ausreichend ist, es jedoch in schwierigen Einzelfällen notwendig sein kann, eine aufwendigere Betrachtung anzustellen, um die Lärmbelastung angemessen abzubilden. Liegt eine komplexe Lärmkumulation vor oder bestimmen Wettereinflüsse die Entstehung hoher Immissionspegel, können mittels der konkreten Handlungsempfehlungen nun Feinheiten justiert und auf den jeweiligen Spezialfall angepasst werden. Insbesondere aus Perspektive der Anwender (d. h. der zuständigen Behörde oder ggf. Ingenieurbüros) helfen die hier vorgestellten Ergebnisse dabei, Unsicherheiten im Umgang mit problematischen Lärmszenarien aufgrund fehlender etablierter Methoden zu überwinden. Auch aus Sicht der Bevölkerung ist eine geregelte und transparente Vorgehensweise bei Lärmschutzplanungen von hohem Wert; wissenschaftlich fundierte Entscheidungen gehen in der Regel mit einer deutlich höheren Akzeptanz in der Öffentlichkeit einher.

In der 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerks sollen die Erkenntnisse aus den beiden Teilprojekten vertieft und weiterhin offene Fragestellungen angegangen werden. Einen wichtigen Aspekt hierbei wird die Praxiserprobung darstellen. Erste Erfahrungen bei der Anwendung der Verfahren auf konkrete Situationen sollen gesammelt werden, z. B. inwieweit eine Konkretisierung des Verfahrens zur Lärminderung bei Kumulation hinsichtlich der Additions- und Bewertungsmethoden zielführend ist. Auch der Wissenstransfer in relevante Bereiche soll gefördert werden. Des Weiteren wird die Maßnahmenseite stärker beleuchtet werden; sowohl innovative technische Lärmschutzmaßnahmen, die Berücksichtigung psychoakustischer Einflüsse als auch nutzerseitige Minderungsmaßnahmen bergen noch großes Potenzial für die Erweiterung des Maßnahmenspektrums. Letztere sind Maßnahmen, die auf eine Beeinflussung des Nutzerverhaltens der Verkehrsteilnehmer abzielen, z. B. Verkehrsbeeinflussung oder Sensibilisierung hinsichtlich gesundheitlicher Auswirkungen von Lärm. Ein weiterer Themenkomplex wird sich mit der Identifikation

der temporären Änderung der Lärmimmission durch Baumaßnahmen und Bewertungsmöglichkeiten für derartige zeitlich begrenzte Lärmbelastungen beschäftigen.

2.5.6 Verwertung der Ergebnisse

Projektberichte:

Die Resultate des SPT 205 sind in Form des Leitfadens "Verfahren zur Lärminderung bei Kumulation" und einer Handlungsempfehlung zum Umgang mit stark wetterbeeinflussten Lärmsituationen realisiert. Die technischen und fachlichen Details sowie Anwendungsbeispiele finden sich für das Forschungsvorhaben Lärmkumulation im Schlussbericht (Eggers et al. 2019). Im Falle des Forschungsvorhabens Lärmwetter bezieht sich der hierbei dargestellte Stand auf den 3. Zwischenbericht (Liepert et al. 2019). Die Veröffentlichung des Schlussberichts wird Mitte 2020 erfolgen und auch die Umsetzung der exemplarischen Datenbank zur Berechnung von wetterkorrigierten Immissionspegeln beinhalten.

Wissenschaftliche Beiträge zu Fachkonferenzen:

Die Ergebnisse aus den Projektverläufen sowie die Untersuchungen zur Anwendung verschiedener Additionsmethoden bei Kumulation und zur Notwendigkeit einer expliziten Meteorologie-Betrachtung wurden im Rahmen (internationaler Konferenzen und Vernetzungstreffen vorgestellt und veröffentlicht. Beispiele hierfür sind: Traffic Research Arena (TRA) 2018 in Wien, Jahrestagung für Akustik DAGA 2018 und 2019 in München bzw. Rostock, Deutsch-Französische Zusammenarbeit 2018 in Bergisch Gladbach und Kolloquium Straßenbau in der Praxis 2019 in Esslingen.

Damit die im SPT 205 erarbeiteten Methoden zukünftig zur Anwendung kommen, ist die Förderung des Wissenstransfers von großer Bedeutung. Nach Abschluss der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks ist daher weiterhin der Austausch mit relevanten Akteuren und potenziellen Anwendern zu suchen, sodass erste konkrete Kumulationsfälle und meteorologisch beeinflusste Lärmsituationen mit den Methoden bearbeitet werden. Auf Basis dieser Praxiserfahrung kann eine zielgerichtete und effiziente Anpassung und Weiterentwicklung der Verfahren erfolgen.

3 Fazit und Ausblick

Die Auswirkungen von Verkehr und Verkehrsinfrastruktur auf die Umwelt wurden hinsichtlich der "Struktur- und Biodiversität" sowie der "Stofflichen und nicht-stofflichen Wirkungen" in fünf Schwerpunktthemen bearbeitet. Obwohl thematisch sehr heterogen, hat der verkehrsträgerübergreifende Ansatz bei allen Schwerpunktthemen neue und wichtige Ergebnisse geliefert, die nun in der nächsten Phase des BMVI-Expertenetzwerks validiert und gemeinsam, unter Berücksichtigung der Ansprüche und Möglichkeiten der Nutzer, umgesetzt werden sollen, wie z. B. das Biodiversitätsmanagement der Verkehrsnebenflächen, die Kontrolle invasiver Arten, die Einführung einer verkehrsträgerübergreifenden Maßnahmen Datenbank, aktualisierte Handlungsanweisungen für Stahlbaubeschichtungen sowie der Leitfaden zur Gesamtlärbetrachtung.

3.1 Wesentlicher Erkenntnisgewinn

Die vorliegenden Ergebnisse belegen, dass die Verkehrsnebenflächen an Straßen, Schienen und Wasserstraßen Gemeinsamkeiten in der Biotopzusammensetzung und gewisse Ähnlichkeiten in der Zusammensetzung der dort vorkommenden Arten aufweisen und hier somit ein grundsätzliches Potenzial für die verkehrsträgerübergreifende Vernetzung von Biodiversität besteht. Diese Vernetzung gilt für Habitate sowie Tier- und Pflanzenarten gleichermaßen. Der Vergleich der vorhandenen bei den Verkehrsträgern vorliegenden Leitfäden für die Unterhaltung dieser Flächen zeigt, dass es eine Fülle geeigneter Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität gibt, die verkehrsträgerübergreifend angewandt werden können. Ein verkehrsträgerübergreifendes Management, für dessen Entwicklung nun die Grundlagen geschaffen wurden, kann zukünftig einen wichtigen Beitrag bei der Erfüllung der durch die einschlägigen Konventionen vorgegebenen internationalen Verpflichtungen leisten.

Es wurde gezeigt, dass invasive Neobiota potenziell durch alle Verkehrsträger als Vektoren verbreitet werden. Für Binnenschiffe/Sportboote wurde dies in situ nachgewiesen. Vor allem die Entwicklung des Neobiota-Informationssystems und des Modells zur Einfuhr und Ausbreitung von invasiven Arten entlang der Verkehrsträger sowie eine Methode zur Risikobewertung leisten hier einen wichtigen

Beitrag, um bereits präventiv die Einbringung von solchen Arten zu verhindern bzw. zu reduzieren. Umfragen bei den Infrastrukturbetreibern sowie Literaturlauswertungen ergaben ferner bereits jetzt eine erhöhte Belastung für die Betriebsdienste der jeweiligen Verkehrsträger infolge des Managements bereits etablierter Neobiota. Diese dürfte sich erhöhen, wenn die Einfuhr und Ausbreitung von invasiven Neobiota nicht präventiv gestoppt bzw. minimiert wird. Die Ergebnisse belegen den dringenden Bedarf, verkehrsträgerübergreifende Maßnahmen für ein effektives und kosteneffizientes Management zu entwickeln. Die Grundlagen hierfür wurden in der ersten Phase geschaffen.

Bezüglich der verkehrsträgerübergreifenden Erfassung stofflicher Belastung (Luftschadstoffe, Abrieb) im SPT 203 "Minderung verkehrsbedingter stofflicher Belastungen in Luft, Wasser, Boden" wurden Detailbetrachtungen in intensiver Zusammenarbeit der nachgeordneten Behörden des BMVI durchgeführt, z. B. durch In-situ-Messungen an einzelnen Verkehrsträgern (LKW, Binnenschiffe, Untersuchungen zum Reifenabrieb) sowie in der verkehrsträgerübergreifenden Modellanalyse zu Schadstoffimmissionen in drei Ballungsräumen. Die Zusammenfassung der Ergebnisse zu den verschiedenen Kompartimenten und Handlungsfeldern im SPT 203 stellt eine erste Gesamtbetrachtung der Thematik zu den Emissionen und Immissionen der Verkehrsträger dar.

Durch die Untersuchungen zu bau- und bauwerksbedingten Emissionen wurde gezeigt, dass aus Korrosionsschutz eluierbare Stoffe und Transformationsprodukte im Labortest ökotoxikologische Wirkungen hervorrufen können. Durch deren Integration in den Zulassungsprozess werden realistische Aussagen im Vorfeld der Planung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen möglich. Die national durchgeführte Stakeholderanalyse bestätigt den Bedarf für eine Rechercheplattform zur Umweltverträglichkeit von Baustoffen. Die Identifizierung der meistverwendeten Baustoffe im Infrastrukturbereich sowie deren Mengen und Eigenschaften bildet eine entscheidende Grundlage für den Aufbau eines Stoffstrominformationssystems für den Infrastrukturbau.

Mit den Untersuchungen zum Thema Schallimmissionen konnten zwei wichtige Ansatzpunkte für einen umfas-

senderen und verkehrsträgerübergreifenden Lärmschutz ausgebaut werden. Im Teilprojekt Lärmkumulation wurde mit dem Leitfaden "Verfahren zur Lärminderung bei Kumulation" ein praktikables Werkzeug für die Gesamtlärbetrachtung erarbeitet. Es kann nun bei der Umsetzung von Lärmschutzprojekten herangezogen werden, wenn mehr als ein Verursacher zu einer Lärmsituation beiträgt. Auch der im Teilprojekt Lärmwetter erarbeitete Methodenvorschlag zur Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse auf die Schallausbreitung verspricht eine neuartige Hilfestellung, um Diskrepanzen zwischen Berechnungsmodellen und tatsächlicher Lärmbelastung aufzulösen.

3.2 Offene Forschungsfragen

Im thematisch sehr heterogenen Themenfeld 2 lassen sich hier offene Forschungsfragen nicht in wenigen Sätzen formulieren, wurden jedoch in den Kapiteln zu den fünf SPT adressiert. Diese Forschungsfragen ergeben sich aus dem verkehrsträger- und behördenübergreifenden Ansatz des strategischen Plans und der Roadmap 2030 des Themenfelds 2. Sie werden in der nächsten Bearbeitungsphase in Angriff genommen. Bei allen Schwerpunktthemen sind Arbeiten zur Vertiefung der bisherigen Ergebnisse (weitere Datenerhebung, Aufbau von Modellen und Informationssystemen etc.), zur Validierung der vorgeschlagenen Maßnahmen sowie zur Überführung derselben in die Praxis z. B. in Pilotprojekten geplant. Daneben ist noch Raum für neue Projekte und für die Implementierung innovativer Methoden, die zeigen, dass das BMVI-Expertenetzwerk sich auf dem neuesten Stand der wissenschaftlichen Forschung befindet.

3.3 Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase ab 2020

Im Rahmen der Biodiversität sollen Methoden zur schnellen und kostengünstigen Biodiversitätserfassung entwickelt sowie Standards für den Artenschutz gesetzt werden, auch werden Aspekte des temporären Naturschutzes ("Natur auf Zeit") betrachtet. Daneben ist der Aufbau eines Konnektivitätsmodells geplant. Beim Thema Neobiota sollen Methoden zur schnellen und kostengünstigen Erfassung und zum erfolgreichen verkehrsträgerangepassten Management von verkehrsträgerrelevanten invasiven Arten erarbeitet werden. Das Prognose-Modell von Einfuhr und Ausbreitung invasiver Arten sowie das Neobiota-Informationssystem werden weiterentwickelt. Ferner ist eine Intensivierung des fachlichen Austausches mit anderen mit dem Thema invasive Arten befassten Institutionen, vorgesehen.

Bezüglich stofflicher Emissionen/Immissionen sind mobile Schadstoffmessungen im Längs- und Querprofil an den Verkehrsträgern geplant. Zudem sollen die Auswirkungen des Klimawandels bei der Modellierung von Immissionen und Emissionen berücksichtigt werden. Darüber hinaus wird eine verkehrsträgerübergreifende Datenbank zu Maßnahmen zur Minderung der Emissionen und Immissionen aufgebaut. Im Rahmen der bau- und bauwerksbedingten Emissionen soll die Erfassung der stofflichen Freisetzung um weitere Bauprodukte sowie der betrachteten Substanzen erweitert und durch Freilanduntersuchungen ergänzt werden. Des Weiteren wird ein Informationssystem für Baustoffe entwickelt, welches Nutzern den aktuellen Wissensstand über Umweltverhalten und Beständigkeit von Baumaterialien einfach und kondensiert zugänglich macht. Informationen über die verschiedenen Baustoffgruppen werden kontinuierlich aktualisiert. Bezüglich der Minderung verkehrsbedingter Geräuschemissionen und Lärmimmissionen sollen die bisher entwickelten Methoden zur verkehrsträgerübergreifenden Lärmbewertung und Maßnahmenfindung weiterentwickelt werden.

4 Literatur

- Bäumer, M., Hautzinger, H., Pfeiffer, M., Stock, W., Lenz, B., Kuhnimhof, T. und Köhler, K. (2017a) Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung. in: Straßenwesen, B.f. (Ed.). Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Verkehrstechnik. IVT Research GmbH, Mannheim. Institut für Verkehrsforschung DLR, Berlin, Bergisch-Gladbach.
- Bäumer, M., Hautzinger, H., Pfeiffer, M., Stock, W., Lenz, B., Kuhnimhof, T. und Köhler, K. (2017b) Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko. in: Straßenwesen, B.f. (Ed.). Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Verkehrstechnik. IVT Research GmbH, Mannheim. Institut für Verkehrsforschung DLR, Berlin, Bergisch-Gladbach.
- BBodSchV (2017) Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 4 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Berlin.
- Bell, A.M., Baier, R., Kocher, B., Reifferscheid, G., Ternes, T. and Buchinger, S. (in Vorbereitung-a) Ecotoxicological characterization of aquatic emissions from steel coatings.
- Bell, A.M., Brand, S., Ternes, T., Reifferscheid, G. and Buchinger, S. (2019) Ecotoxicological assessment of the environmental impact of anti-corrosion coatings, 29. Annual Meeting Society of Environmental Toxicology and Chemistry Europe, Helsinki.
- Bell, A.M., Molt, C., Dietrich, C., Ternes, T., Reifferscheid, G. and Buchinger, S. (2017a) Ecotoxicological assessment of the environmental impact of anti-corrosion coatings, Young Water Researchers Symposium, Aachen.
- Bell, A.M., Molt, C., Dietrich, C., Ternes, T., Reifferscheid, G. and Buchinger, S. (2018) Ökotoxikologische Bewertung von Korrosionsschutzbeschichtungen, 23. Jahrestagung der Society of Environmental Toxicology and Chemistry GLB, Münster.
- Bell, A.M., von der Au, M., Meermann, B., Ternes, T., Reifferscheid, G. and Buchinger, S. (2017b) Ökotoxikologische Bewertung von galvanischen Aluminium-Anoden, 22. Jahrestagung Society of Environmental Toxicology and Chemistry GLB, Neustadt.
- Bell, A.M., von der Au, M., Schmid, M., Bauer, O.B., Karst, U., Ternes, T., Reifferscheid, G., Buchinger, S. and Meermann, B. (in Vorbereitung-b) Environmental impact assessment of galvanic anodes in the marine environment.
- Besluit bodemkwaliteit (2007) Besluit van 22 november 2007, houdende regels inzake de kwaliteit van de bodem (Besluit bodemkwaliteit), Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Haag.
- Besseling, E., Quik, J.T.K., Sun, M. and Koelmans, A.A. (2017) Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study. *Environmental Pollution* 220, 540-548.
- BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (2018) Biotoptypenschlüssel für die Biotoptypenkartierung an Bundeswasserstraßen und angrenzender Gebiete, Koblenz.

- Bichsel, M. und Muff, W. (2006) Wirtschaftliche Tragbarkeit und Verhältnismäßigkeit von Lärmschutzmaßnahmen – Optimierung der Interessenabwägung, Ergänzung BUWAL-Schriftenreihe Umwelt Nr. 301, Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/publikationen-studien/publikationen/tragbarkeit-und-verhaeltnismaessigkeit-von-laermschutzmassnahmen.html> [29.07.2019]
- Bick, A., Bastrop, R., Kotta, J., Meißner, K., Meyer, M., and V. Syomin (2018) Description of a new species of Sabellidae (Polychaeta, Annelida) from fresh and brackish waters in Europe, with some remarks on the branchial crown of *Laonome*. *Zootaxa*. 4483(2), 349-364.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2012) Bundesprogramm Wiedervernetzung.
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016) Bundesverkehrswegeplan 2030.
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017) Analyse biodiversitätsfördernder Maßnahmen im Verkehr. Endbericht des Forschungsprojekts FE 97.0361/2015 des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn: 222.
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018) Forschungsstrategie des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln, Berlin/Bonn
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018) Forschungsstrategie des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln, Berlin/Bonn
- BMVI-Expertennetzwerk (2018) Forschungsstrategie des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Bonn. https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Publikationen/Medien/Forschungsstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Bönnighausen, G. und Popp, C. (1988) LärmKennZiffer-Methode – Methode zur Beurteilung lärmbedingter Konfliktpotenziale in der städtebaulichen Planung, Baubehörde der Freien und Hansestadt Hamburg (Hrsg.).
- Bramshuber, W., Lin, X. and Vollpracht, A. (2012) Literaturrecherche zur Auslaugkinetik von zementgebundenen Baustoffen. Forschungsbericht, RWTH Aachen.
- Brand, S., Bell, A. M., Buchinger, S., Dietrich, C., Wick, A. und Ternes, T.A. (2019a) Wirkungsbezogene Analytik an Eluatens bewitterter und unbewitterter Korrosionsschutzbeschichtungen im Stahlhoch- und Wasserbau, Jahrestagung der Wasserchemischen Gesellschaft 2019, Erfurt.
- Brand, S., Schlüsener, M.P., Albrecht, D., Kunkel, U., Strobel, C., Grummt, T. and Ternes, T.A. (2018) Quaternary (triphenyl-) phosphonium compounds: Environmental behavior and toxicity. *Water Research* 136, 207-219.
- Brand, S., Schlüsener, M.P., Albrecht, D., Kunkel, U., Strobel, C., Grummt, T. und Ternes, T.A. (2018) Quartäre (Triphenyl-) Phosphoniumverbindungen – Verhalten in der Umwelt und Toxizität, Jahrestagung der Wasserchemischen Gesellschaft 2018, Papenburg.
- Brand, S., Schlüsener, M.P., Kunkel, U., T. and Ternes, T.A. (2019b) Quaternary phosphonium compounds: new toxic compounds present in sediment and suspended matter, 11th International SedNet Conference, Dubrovnik.

- Brand, S., Veith, L., Baier, R., Dietrich, C., Schmid, M. and Ternes, T.A. (in Vorbereitung) New Methodical Approaches for the Investigation of Weathered Epoxy Resins used for Corrosion Protection of Steel Constructions.
- Brombach, H., Weiss, G. and Fuchs, S. (2005) A new database on urban runoff pollution: comparison of separate and combined sewer systems. *Water Science and Technology* 51, 119-128.
- BUB (2018) Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) (BUB), in: *Bundesanzeiger AT* 28.12.2018 B7.
- Bundesforschungsprogramm Schiene, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/E/bundesforschungsprogramm-schiene.html>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007) Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt. Kabinettsbeschluss vom 7. November 2007. 4. Auflage 2015. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nationale_strategie_biologische_vielfalt_2015_bf.pdf
- Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2016) Strategie der Bundesregierung zur vorbildlichen Berücksichtigung von Biodiversitätsbelangen für alle Flächen des Bundes (StrÖff).
- Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2018) Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, Aktualisierung 2018. Berlin. www.deutsche-nachhaltigkeitsstrategie.de
- CBD (1992) The Convention on Biological Diversity. UN Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro. https://treaties.un.org/doc/Treaties/1992/06/19920605%2008-44%20PM/Ch_XXVII_08p.pdf [08.11.2017].
- Chudalla, M., Strigari, F. and Bartolomaeus, W. (2018) Comprehensive noise assessment in complex situations with more than one mode of transport, in: *Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018*; und: Lärmbewertung bei mehreren Verkehrsträgern, in: *Fortschritte der Akustik – DAGA 2018*, S. 818-820.
- Chudalla, M., Strigari, F., Egger, S. und Heidebrunn, F. (2019) Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen, in: *Fortschritte der Akustik – DAGA 2019*, S. 732-735.
- Corbett, J. J. and Robinson, A.L. (2001) Measurements of NO_x Emissions and In-Service Duty Cycle from a Towboat Operating on the Inland River System. *Environmental Science and Technology* (35), 1343-1349.
- CRTN (1988) Calculation of Road Traffic Noise, Department of Transport, Welsh Office 1988.
- Dall'Osto, M., Beddows, D.C.S., Gietl, J.K., Olatunbosun, O.A., Yang, X.G. and Harrison, R.M. (2014) Characteristics of tyre dust in polluted air: Studies by single particle mass spectrometry (ATOFMS). *Atmospheric Environment* 94, 224-230.
- DELTA RES, TNO (2016) Emissieschattingen Diffuse bronnen Emissieregistratie. Bandenslijtage wegverkeer. in: WVL, R. (Ed.).
- DESTATIS (2010) Fachserie. 8, Verkehr. 4, Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt 2010, ZDB-ID 2973046-6, 2011.
- DESTATIS (2016) Fachserie. 8, Verkehr. 4, Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt 2016, ZDB-ID 2973046-6, 2017.

- DESTATIS (2019) Fachserie. 8, Verkehr. 4, Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt 2019, PDF; https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Publikationen/Downloads-Schiff-fahrt/binnenschifffahrt-monat-2080400191084.pdf;jsessionid=5C2D8234E59DA3042469B2205ADD77A2.internet742?__blob=publicationFile
- Deutsches Institut für Bautechnik (2011) Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser, Berlin.
- DIN 45642 (2004) Messung von Verkehrsgeräuschen, Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI.
- DIN ISO 9613-2 (1999) Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (ISO 9613-2:1996), Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI.
- Early, R., Bethany A., Bradley, B.A., Dukes, J.S., Lawler, J.J., Olden, J.D., Blumenthal D.M., Gonzalez, P., Grosholz, E.D., Ibanez, I., Miller, L.P., Sorte, C.J.B. and Tatem, A.J. (2016) Global threats from invasive alien species in the twenty-first century and national response capacities. *Nature communications*, 7: 1-9.
- Eggers, S., Heidebrunn, F., Cortes, N. und Popp, C. (in Vorbereitung) Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen, Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 02.0400/2016/IRB.
- Eggers, S., Heidebrunn, F., Cortes, N. und Popp, C. (2019) Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen, Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 02.0400/2016/IRB.
- Eisentraut, P., Dümichen, E., Ruhl, A.S., Jekel, M., Albrecht, M., Gehde, M., Braun, U. (2018) Two Birds with One Stone—Fast and Simultaneous Analysis of Microplastics: Microparticles Derived from Thermoplastics and Tire Wear. *Environmental Science & Technology Letters* 5, 608-613.
- EU – Europäische Union (2002) Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm.
- EU – Europäische Union (2015) Richtlinie 2015/996 der Kommission vom 19. Mai 2015 zur Festlegung gemeinsamer Lärmbewertungsmethoden gem. der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates.
- EU-BauPVO (2011) Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union.
- Flagella, M.M. and Abdulla, A.A. (2005) Ship ballast water as a main vector of marine introductions in the Mediterranean Sea. *WMU Journal of Maritime Affairs* 4: 95-104.
- Floerl, O., Graeme J.I. and Hayden B.J. (2005) A Risk-Based Predictive Tool to Prevent Accidental Introductions of Nonindigenous Marine Species. *Environmental Management* 35: 765-778.

- Förderrichtlinie Lärmsanierung Schiene, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018) Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Lärmsanierung an bestehenden Schienenwegen, überarbeitete Fassung 2018, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/laermvorsorge-und-laermsanierung.html> [29.07.2019].
- Fu, M., Ding, Y., G, Y., Yu, L., Yi, H., Ye, W. and Liang, B. (2013) Real-world emissions of inland ships on the Grand Canal, China. *Atmospheric Environment* (81), 222-229.
- GDWS (2016) Verkehrsbericht 2016, Hrsg.: Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, https://www.gdws.wsv.bund.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/Verkehrsbericht_2016.html
- Gebbe, M. und Hartung, B. (1997) Quantifizierung des Reifenabriebs von Kraftfahrzeugen in Berlin. in: i.A. der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, U.u.T. (Ed.). Technische Universität Berlin. Institut für Straßen- und Schienenverkehr. ISS – Fahrzeugtechnik, Berlin.
- Gittenberger, A., Rensing, M., Niemantsverdriet, P., Schrieken N. and Stegenga, H. (2014) Port of Rotterdam survey and monitoring non-native species conform HELCOM/OSPAR protocol. GiMaRIS report 2014_31.
- Gittenberger, A., Rensing, M. and Wesdorp, K.H. (2017) Non-indigenous marine species in the Netherlands. GiMaRIS report 2017_13.
- Gollasch, S. (2002) The importance of ship fouling as a vector of species introductions into the North Sea. *Biofouling* 18, 105-121.
- Gray, A.D., Wertz, H., Leads, R.R. and Weinstein, J.E. (2018) Microplastic in two South Carolina Estuaries: Occurrence, distribution, and composition. *Marine Pollution Bulletin* 128, 223-233.
- Gren, I.-M., Isacs, L. and Carlsson, M. (2009) Costs of Alien Invasive Species in Sweden. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 38 (6): 135-140.
- GrwV (2017) Grundwasserverordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. Mai 2017 (BGBl. I S. 1044) geändert worden ist, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Berlin.
- Guski, R. und Schreckenber, D. (2015) NORAH – Noise-related annoyance, cognition and health, <https://www.norah-studie.de> [26.07.2019]. Endbericht erschienen als: Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld, Bd.7, Gesamtbeurteilung des Forschungsprojekts NORAH (2015).
- Handbuch für Emissionsfaktoren, <https://www.hbefa.net/d/>
- Heimann, D. und Blumrich, R. (2002) Anwendungsbeispiele numerischer Schallausbreitungssimulationen mit konsistenter Berücksichtigung der Atmosphäre und des Bodens, in: *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, Jg. 49, Nr. 3, S. 91-97.
- HELCOM/OSPAR (2013) Joint HELCOM/OSPAR Guidelines for the Contracting Parties of OSPAR and HELCOM on the granting of exemptions under International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, Regulation A-4. Annex 1: Detailed description of the Port Survey Protocol, 18 – 28.

- Heutschi, K. (2004) SonRoad – Berechnungsmodell für Strassenlärm, in: Schriftenreihe Umwelt Nr. 366, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), www.laerm.ch/dokumente/SonRoad_d.pdf [29.07.2019].
- Hewitt, C.L, Gollasch, S. and Minchin, D. (2009) The Vessel as a Vector – Biofouling, Ballast Water and Sediments. In: Rilov and Crooks (Hrsg): *Biological Invasions in Marine Ecosystems*, Ecological Studies 204, 641 S.
- Hohberg, I. (2003) Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen. Dissertation, RWTH Aachen.
- Hulme, P.E., Bacher P., Kenis M., Klotz S., Kühn I., Minchin, D., Nentwig, W., Olenin, S., Panov, V., Pergl, J., Pysek, P., Roques, A., Sol, D., Solarz, W. and Vilà, M. (2018) Grasping at the routes of biological invasions: a framework for integrating pathways into policy. *Journal of Applied Ecology* 45, 403-414.
- International Maritime Organisation (2015) Marine Environment Protection Committee Resolution 259(68)/Corr.2, 2015 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems. <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/MEPC.259%2868%29.pdf> [08.10.2019].
- ISO 8178-4 (2007) Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Steady-state test cycles for different engine applications.
- Jobling, S. and Tyler, C.R. (2006) Introduction: the ecological relevance of chemically induced endocrine disruption in wildlife. *Environmental Health Perspectives* 114, 7e8.
- Kayhanian, M., McKenzie, E.R., Leatherbarrow, J.E. and Young, T.M. (2012) Characteristics of road sediment fractionated particles captured from paved surfaces, surface run-off and detention basins. *Science of the Total Environment* 439, 172-186.
- Kelm, J., A. Lange, B. Schulz, M. Götttsche, T. Steffens and Reck, H.J.F.Z. (2015) "How often does a strictly arboreal mammal voluntarily cross roads? New insights into the behaviour of the hazel dormouse in roadside habitats." *Folia Zoologica* 64(4), 342-349.
- Kettunen, M., Genovesi, P., Gollasch, S., Pagad, S., Starfinger, U., ten Brink, P. and Shine, C. (2009) Technical support to EU strategy on invasive species (IAS) – Assessment of the impacts of IAS in Europe and the EU: Final report for the European Commission, Institute for European Environmental Policy (IEEP).
- Kirchgeorg, T., Weinberg, I. and Brockmeyer, B. (2017) Chemical emissions from offshore wind farms: a new source for chemical pollution in the marine environment, 16th EuCheMS International Conference on Chemistry and the Environment, Oslo.
- Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Hornig, M., Baier, R., Schmid, M.J. and Brockmeyer, B. (2018) Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. *Marine pollution bulletin* 136, 257–268.
- Kleinbauer, I., Dullinger, S., Klingenstein, F., May, R., Nehring S. und Essl, F. (2010) Ausbreitungspotenzial ausgewählter neophytischer Gefäßpflanzen unter Klimawandel in Deutschland und Österreich. *BfN-Skripten* 275, 76 S.

- Klockner, P., Reemtsma, T., Eisentraut, P., Braun, U., Ruhl, A.S. and Wagner, S. (2019) Tire and road wear particles in road environment – Quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation. *Chemosphere* 222, 714-721.
- Kole, P.J., Lohr, A.J., Van Belleghem, F. and Ragas, A.M.J. (2017) Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14, 31.
- Kragh, J., Jonasson, H. and Plovsing, B. (2006) User's Guide Nord2000 Road, http://webaux.cedex.es/ egra/EGRA-ingles/I-Documentacion/National_Methods/Users_Guide_Nord2000_Road.pdf [26.07.2019]
- Kreider, M.L., Panko, J.M., McAtee, B.L., Sweet, L.I. and Finley, B.L. (2010) Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies. *Science of the Total Environment* 408, 652-659.
- Kumata, H., Sanada, Y., Takada, H. and Ueno, T. (2000) Historical trends of N-cyclohexyl-2-benzothiazolamine, 2-(4-morpholinyl)benzothiazole, and other anthropogenic contaminants in the urban reservoir sediment core. *Environmental Science & Technology* 34, 246-253.
- Kumata, H., Yamada, J., Masuda, K., Takada, H., Sato, Y., Sakurai, T. and Fujiwara, K. (2002) Benzothiazolamines as tire-derived molecular markers: Sorptive behavior in street runoff and application to source apportioning. *Environmental Science & Technology* 36, 702-708.
- Kurtenbach, R., Vaupel, K., Kleffmann, J., Klenk, U., Schmidt, E. und Wiesen, P. (2016) Emissions of NO, NO₂ and PM from inland shipping. *Atmospheric Chemistry and Physics* (16), 14285–14295.
- Landesamt für Natur Umwelt- und Verbraucherschutz, Nordrhein-Westfalen (2016) LANUV-Fachbericht 67, 2016
- LAWA, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2004) Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Düsseldorf.
- LAWA, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2016) Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser: Aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016, Stuttgart.
- Lenda, M., Skórka, P., Knops, J.M.H., Moroń, D., Sutherland, W.J. and Kuszewska, K. (2014) Effect of the Internet Commerce on Dispersal Modes of Invasive Alien Species. *PLoS One* 9 (6). e99786. doi: 10.1371/journal.pone.0099786.
- LfU (2005) Studie zur Kostenverhältnismäßigkeit von Schallschutzmaßnahmen, Heft 176/2005, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.)
- Liepert, M., Lang, J. und Möhler, U. (2019) Modell zur Gesamtlärbewertung – Abschlussbericht Forschungskennzahl 3715 55 1030, Texte 60/2019, Umweltbundesamt (Hrsg.), <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/modell-zur-gesamtlarbewertung> [29.07.2019].
- Liepert, M., Skowronek, V., Eberlei, G., Schady, A. und Elsen, K. (2019) Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen unter Einbeziehung von Geräuschemissionsdaten des Verkehrsträgers Straße und meteorologischer Daten, 2. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt FE 02.0416/2017/IRB.

- Lorentz, H., Schmidt, W., Düring, I. und Nagel, T. (2016) Emissionskataster für den Schiffsverkehr in NRW 2012 – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, Nordrhein-Westfalen, Fachbericht 67.
- Marine Environment Protection Committee (2009) Guidelines on Exhaust Gas Cleaning Systems.
- MVV TB (2017) Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.
- Nehring, S., Kowarik, I., Rabitsch, W. und Essl, F. (Hrsg.) (2013) Naturschutzfachliche Invasivitätsbewertungen für in Deutschland wild lebende gebietsfremde Gefäßpflanzen. BfN-Skripten 352, 202 S.
- Ni, H.-G., Lu, F.-H., Luo, X.-L., Tian, H.-Y. and Zeng, E.Y. (2008) Occurrence, phase distribution, and mass loadings of benzothiazoles in riverine runoff of the Pearl River Delta, China. *Environmental Science & Technology* 42, 1892-1897.
- Nizzetto, L., Bussi, G., Futter, M.N., Butterfield, D. and Whitehead, P.G. (2016) A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments. *Environmental Science-Processes & Impacts* 18, 1050-1059.
- NLStBV (2018) Muster für die Variantenuntersuchung von aktiven Lärmschutzmaßnahmen, Fassung 2018-03, Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr (Hrsg.)
- Nota, R., Barelds, R. and van Maercke, D. (2005) Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine tuning, Technical Report HAR32TR-040922-DGMR20.
- OGewV (2016) Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Berlin.
- Panko, J.M., Chu, J., Kreider, M.L. and Unice, K.M. (2013) Measurement of airborne concentrations of tire and road wear particles in urban and rural areas of France, Japan, and the United States. *Atmospheric Environment* 72, 192-199.
- Panko, J.M., Hitchcock, K.M., Fuller, G.W. and Green, D. (2019) Evaluation of Tire Wear Contribution to PM_{2.5} in Urban Environments. *Atmosphere* 10.
- Park, I., Kim, H. and Lee, S. (2018) Characteristics of tire wear particles generated in a laboratory simulation of tire/road contact conditions. *Journal of Aerosol Science* 124, 30-40.
- Pillot, D., Guiot, B., Le Cottier, P., Perret, P. and Tassel, P. (2016) Exhaust emissions from in-service inland waterways vessels. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering* (6)4, 205-225.
- Pyšek, P. and Richardson, D.M. (2010) Invasive Species, Environmental Change and Management, and Health. *Annual Review of Environment and Resources* 35, 25-55 (2010).
- Reck, H. und Müller, K. (2018) "Straßenbegleitgrün und biologische Vielfalt: Potenziale und Realität." *Straßenverkehrstechnik* 7.2018, 469-480.
- Regeling bodemkwaliteit (2007) Regeling van 13 december 2007, nr. DJZ2007124397, houdende regels voor de uitvoering van de kwaliteit van de bodem, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Haag.

- Reichert, S. (2016) Betrachtung des Gesamtlärms – eine Hilfe für eine effektive Lärmaktionsplanung? Untersuchung am Beispiel des Ballungsraums Düsseldorf, Abschlussbericht, <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/laerm/geraeusche/eg-richtlinie-umgebungslaerm> [29.07.2019].
- Richtlinie 2009/147/EG des europäischen Parlaments und Rates vom 30. November 2009 über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten.
- Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen.
- RLS-90 (1992) Bundesminister für Verkehr, Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen, Ausgabe 1990, berichtigter Nachdruck 1992.
- Rogge, W.F., Medeiros, P.M. and Simoneit, B.R.T. (2012) Organic Compounds in Dust from Rural and Urban Paved and Unpaved Roads Taken During the San Joaquin Valley Fugitive Dust Characterization Study. *Environmental Engineering Science* 29, 1-13.
- Roskosch, A., Patric Heidecke, P., Bannick, C.-G., Brandt, S., Bernicke, M., Dienemann, C., Gast, M., Hofmeier, M., Kabbe, C., Schwirn, K., Vogel, I., Völker, D. und Wiechmann, B. (2018) Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. in: Umweltbundesamt (Ed.), Dessau-Roßlau.
- RVS 04.02.11 (2006) Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV) (Hrsg.), Umweltschutz, Lärm und Luftschadstoffe – Berechnung von Schallemissionen und Lärmschutz – vom 1. März.
- Schreckenberg, D. (2018) Sind Belästigte immer auch Belastete? Vortrag beim Lärm Kongress 2018 – Mehr Schwung für den Lärmschutz.
- Sétra report (2009) Noise propagation computation method including meteorological effects (NMPB-2008).
- Sherrington, C., Darrah, C., Hann, S., Cole, G. and Corbin, M. (2016) Study to support the development of measures to combat a range of marine litter sources. Report for European Commission DG Environment.
- Sommer, F., Dietze, V., Baum, A., Sauer, J., Gilge, S., Maschowski, C. and Giere, R. (2018) Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. *Aerosol and Air Quality Research* 18, 2014-2028.
- Strigari, F., Chudalla M. and Bartolomaeus W. (2018) Calculation of weather-corrected traffic noise immission levels on the basis of emission data and meteorological quantities, in: Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018 und Fortschritte der Akustik – DAGA 2018, S. 277-280.
- Struijs, J., van de Meent, D., Peijnenburg, W.J.G.M., van den Hoop, M.A.G.T. and Crommentuijn, T. (1997) Added Risk Approach to Derive Maximum Permissible Concentrations for Heavy Metals: How to Take Natural Background Levels into Account. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 37, 112-118.
- Susset, B., Grathwohl, P., Finkel, M., Oest, J. und Betz, A. (2017) Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralischer Abfälle in/auf Böden, Teil I: Stofffreisetzungverhalten mineralischer Abfälle, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

- Susset, B., Maier, U., Finke, M. und Grathwohl, P. (2018) Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Sylvester F., Kalaci, O., Leung, B., Lacoursiere-Roussel, A., Murray, C.C., Choi, F. M., Bravo, M.A., Thomas W., Therriault, T.W. and Mac Isaac, H.J. (2011) Hull fouling as an invasion vector: can simple models explain a complex problem? *Journal of applied ecology* 48, 415-423.
- Tilman, D., Clark, M., Williams, D. R., Kimmel, K., Polasky, S. and Packer, C. (2017) Future threats to biodiversity and pathways to their prevention. *Nature* 546, 73–81 (2017).
- Ulrich Quass, U., John, A.C., Beyer, M. und Lindermann, J. (2008) Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrbahnabrieb an den PM10-Emissionen von Straßen. in: BAST (Ed.). *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Verkehrstechnik*, Bergisch-Gladbach.
- Umweltbundesamt (2015) Handbuch Lärmaktionspläne – Handlungsempfehlungen für eine lärmindernde Verkehrsplanung, Texte 81/2015, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/handbuch-laermaktionsplaene-handlungsempfehlungen> [11.12.2019].
- Umweltbundesamt (2017a) Wirkungen von Tempo 30 an Hauptverkehrsstraßen, Broschüre, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/wirkungen-von-tempo-30-an-hauptverkehrsstrassen> [11.12.2019].
- Umweltbundesamt (2017b) Strategien zur effektiven Minderung des Schienengüterverkehrslärms, Texte 19/2017, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/strategien-zur-effektiven-minderung-des> [11.12.2019].
- Umweltbundesamt (2019) Umweltbewusstsein in Deutschland 2018 – Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/laermwirkung/laermbelaestigung> [09.12.2019].
- Unice, K.M., Weeber, M.P., Abramson, M.M., Reid, R.C.D., van Gils, J.A.G., Markus, A.A., Vethaak, A.D. and Panko, J.M. (2018) Characterizing export of land-based microplastics to the estuary – Part I: Application of integrated geospatial microplastic transport models to assess tire and road wear particles in the Seine watershed. *Science of The Total Environment*.
- United Nations (UNO, 1992) Convention of Biological Biodiversity. 28 S. <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-en.pdf>
- United Nations (UNO, 2013) Seerechübereinkommen der Vereinten Nationen, 1982 (Artikel 196).
- van der Gon, H. D. and J. Hulskotte (2010) Methodologies for estimating shipping emissions in the Netherlands - A documentation of currently used emission factors and data on related activity. BOP reports of the Netherlands Environmental Assessment Agency.
- van Valkenburg, J., Brunel, S., Brundu, G., Ehret, P., Follak, S. and Uludag, A. (2014) Is terrestrial plant import from East Asia into countries in the EPPO region a potential pathway for new emerging invasive alien plants? *EPPO Bulletin* 44, 195-204.

- VDI 2714 (1988) Schallausbreitung im Freien, Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI (Hrsg.).
- VDI 3722-2 (2013) Wirkung von Verkehrsgeräuschen – Blatt 2: Kenngrößen beim Einwirken mehrerer Quellenarten, Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI (Hrsg.).
- Verschoor, A.J., Lijzen, J.P.A., van den Broek, H.H., Cleven, R.F.M.J., Comans, R.N.J. and Dijkstra, J.J. (2008) Revision of the Dutch Building Materials Decree: alternative emission limit values for inorganic components in granular building materials, pp. 2-4, 9th international symposium on environmental geotechnology and global sustainable development, Hong Kong.
- Verschoor, A.J., Lijzen, J.P.A., van den Broek, H.H., Cleven, R.F.M.J., Comans, R.N.J., Dijkstra, J.J. and Vermij, P.H.M. (2006) Kritische emissiewaarden voor bouwstoffen: Milieuhygiënische onderbouwing en consequenties voor bouwmaterialen, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM, Bilthoven.
- von der Au, M., Bell, A.M., Buchinger, S., Ternes, T.A., Bauer, O.B., Ternes, T., Karst, U. and Meermann, B. (2018) Investigation of metal uptake by *Corophium volutator* from sacrificial anodes in off-shore corrosion protection via LA-ICP-MS, First Workshop on Laser Bioimaging Mass Spectrometry in Münster, Münster.
- von der Au, M., Bell, A.M., Buchinger, S., Ternes, T.A., Bauer, O.B., Ternes, T., Karst, U. and Meermann, B. (2019a) Investigation of galvanic anode metal uptake in individual marine organisms (*Corophium volutator*) via complementary ETV-ICP-MS/LA-ICP-MS, European Winter Conference on Plasma Spectrochemistry, Pau.
- von der Au, M., Karbach, H., Bell, A.M., Buchinger, S., Bauer, O.B., Ternes, T., Karst, U. und Meermann, B. (2019b) Untersuchung der Freisetzung von Metallen aus galvanischen Anoden und ihre Aufnahme durch *Corophium volutator* mittel ETV-ICP-MS/LA-ICP-MS, Anakon, Münster.
- Wagner, S., Hüffer, T., Klöckner, P., Wehrhahn, M., Hofmann, T. and Reemtsma, T. (2018) Tire wear particles in the aquatic environment – A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects. *Water Research* 139, 83-100.
- Weinbruch, S., Worringer, A., Ebert, M., Scheuven, D., Kandler, K., Pfeffer, U. and Bruckmann, P. (2014) A quantitative estimation of the exhaust, abrasion and resuspension components of particulate traffic emissions using electron microscopy. *Atmospheric Environment* 99, 175-182.
- WHO – World Health Organization (2011) Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe, <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2011/burden-of-disease-from-environmental-noise.-quantification-of-healthy-life-years-lost-in-europe> [26.07.2019].
- WHO – World Health Organization (2018) Environmental Noise Guidelines for the European Region, <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2018/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018> [26.07.2019].
- Wik, A. and Dave, G. (2009) Occurrence and effects of tire wear particles in the environment – A critical review and an initial risk assessment. *Environmental Pollution* 157, 1-11.

Williams, F., Eschen, R., Harris, A., Djeddour, D., Pratt, C., Shaw, R.S., Varia, S., Lamontagne-Godwin, J., Thomas, S.E. and Murphy, S.T. (2010) The Economic Cost of Invasive Non-Native Species on Great Britain. CABI Report. Report number: CAB/001/09. 199 S.

Wilsdorf, M., Ziemann, A. und Raabe A. (2010) Einfluss der Atmosphäre bei Prognose und Messung der Schallimmission, in: Fortschritte der Akustik – DAGA 2010, S. 509-510.

WSD (2010) Verkehrsbericht 2010 Wasser- und Schifffahrtsdirektion West, Hrsg.; Wasser- und Schifffahrtsdirektion West, https://www.gdws.wsv.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Verkehrsberichte/West/Bericht_2010.pdf

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Internet: www.bmvi.de
E-Mail: poststelle@bmvi.bund.de

Verfasser

Dr. Franz Schöll und Dr. Ute Feiler
für die mitarbeitenden Kolleginnen und Kollegen von dem Bundesamt für Güterverkehr (BAG), der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), der Deutschen Flugsicherung (DFS), dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und dem Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (DZSF/EBA)

Stand

September 2020, 3. Auflage

Gestaltung | Druck

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Referat Z 32, Druckvorstufe | Hausdruckerei

Bildnachweis

Titelseite:
Oben links: Kruwt/Fotolia
Oben rechts: Kara/Fotolia
Unten links: narvikk/GettyImages
Unten rechts: helmutvogler/Fotolia
Abbildungsverzeichnis

Diese Broschüre ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit der Bundesregierung.
Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt.

BMVI-Expertennetzwerk (2020) Verkehr und Infrastruktur umweltgerecht gestalten.
Ergebnisbericht des Themenfeldes 2 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019,
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. DOI: 10.5675/ExpNBMVI2020.2020.13

