

TEXTE

228/2020

Wissenschaftliche Kenntnisse zum Treibstoffschnellablass: Datenauswertung und numerische Berechnungen

Abschlussbericht Band I

TEXTE 228/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl FKZ 3717 51 102 0

FB000384/ANH,1

Wissenschaftliche Kenntnisse zum Treibstoffschnellablass: Datenauswertung und numerische Berechnungen

Abschlussbericht Band I

von

Uwe Hiester, Florian Ludwig
reconsite GmbH, Fellbach

Philipp Joswig, Annika Felgner
Joswig Ingenieure GmbH, Karlsruhe

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

reconsite GmbH
Auberlenstraße 13
70734 Fellbach

Joswig Ingenieure GmbH
Viktoriastraße 8
76133 Karlsruhe

Abschlussdatum:

August 2020

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Frank Wetzel

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Wissenschaftliche Kenntnisse zum Treibstoffschnellablass: Datenauswertung und numerische Berechnungen

Ein Treibstoffschnellablass (TSA) ist eine Notfallmaßnahme im Flugverkehr zur Gewährleistung der sicheren Landung. In der vorliegenden Studie wurden zunächst der aktuelle Sach- und Kenntnisstand bei TSA sowie Zahlen und Fakten zusammengestellt. Basierend auf den Daten sowie durchgeführten Modellberechnungen wurden daraufhin die Auswirkungen von TSA auf die Umweltkompartimente bodennahe Luft, (Grund-) Wasser und Boden sowie auf die menschliche Gesundheit untersucht.

Beim TSA wird das Kerosin über Hochleistungsdüsen in großer Höhe zu einem feinen Tröpfchen-Nebel verteilt. Während des Absinkens der Tröpfchen in der Atmosphäre bis zum Erdboden finden komplexe Verdunstungs- und Verlagerungsprozesse statt. Durch die Verdunstung ändert sich die chemische Zusammensetzung der Tröpfchen. Das verbliebene Gemisch wird im Folgenden als Präzipitat bezeichnet. Die Prozesse, welche nach dem TSA ablaufen, wurden in Modellberechnungen für 4 definierte Szenarien unter möglichst ungünstigen Annahmen nachberechnet. Gemäß den Modellberechnungen treffen bei einer Lufttemperatur am Erdboden von 20 °C ca. 4 % des Präzipitats mit einer maximalen Konzentration von 0,006 g/m² auf der Erdoberfläche auf. Analog können bei einer Lufttemperatur von -10 °C am Erdboden 59 % des Präzipitats mit einer maximalen Konzentration von ca. 0,16 g/m² den Erdboden erreichen.

Die Risiken von TSA für die Umweltkompartimente Boden und Grundwasser können als geringfügig, bzw. vernachlässigbar gewertet werden. Für die Umweltkompartimente bodennahe Luft und Wasser sowie in Bezug auf die menschliche Gesundheit sind die möglichen Risiken eines TSA mit dem derzeitigen Wissenstand noch nicht in allen Details abschließend bewertbar. Maßgeblich hierfür ist, dass die Präzipitat-Inhaltsstoffe kaum in Regelwerken Einzug gefunden haben (mittelflüchtige Kohlenwasserstoffe). Um diese Risiken zu mindern wurden Handlungsempfehlungen zum TSA vorgeschlagen und weitere Untersuchungen empfohlen.

Abstract: Scientific findings concerning fuel dumping

Fuel dumping is an emergency measure in aviation to ensure a safe landing of the aircraft. In the present study, the current state of knowledge concerning fuel dumping as well as facts and figures was compiled. Based on the data and model calculations carried out, the effects of fuel dumping on the environmental compartments of ground-level air, (ground-) water and soil, and on human health were then examined.

During fuel dumping, the kerosene is spread at high altitudes into a fine droplet mist via high-performance nozzles. As the droplets sink through the atmosphere to the ground, complex evaporation and displacement processes take place. Evaporation changes the chemical composition of the droplets. The remaining mixture is referred to below as a precipitate. The processes that take place after fuel dumping were simulated in model calculations for 4 defined scenarios under the most unfavourable assumptions. According to the model calculations, approx. 4% of the precipitate with a maximum concentration of 0.006 g/m² reaches the ground at a ground-level temperature of 20° C. Similarly, at a ground-level temperature of -10° C, about 59% of the precipitate can reach the ground with a maximum concentration of approx. 0.16 g/m².

The risks of fuel dumping for the environmental compartments of soil and groundwater can be assessed as minor or negligible. For the environmental compartments ground-level air and water, and in relation to human health, the possible risks of fuel dumping cannot yet be fully assessed with the current level of knowledge. The decisive factor here is that the precipitate components have hardly found their way into regulations (medium-volatile hydrocarbons). In

order to reduce these risks, recommendations for action on fuel dumping were proposed and further investigations were recommended.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis	14
Einheiten	15
Umrechnung Meter/Fuß	15
Begriffe und Prozesse kurz erklärt:	17
Zusammenfassung.....	20
Summary	26
1 Veranlassung, Zielsetzung und Vorgehensweise der Studie	31
1.1 Veranlassung.....	31
1.2 Zielsetzung	31
1.3 Vorgehensweise	31
2 Aktueller Sach- und Kenntnisstand zu Treibstoffschnellablässen im Flugverkehr.....	33
2.1 Einführende Beschreibung der Vorgänge beim TSA	33
2.2 Notwendigkeit für einen Treibstoffschnellablass und betroffene Flugzeugtypen	34
2.3 Alternative Verfahren für Notfallsituationen im Flugverkehr – Vor- und Nachteile	35
2.4 Rechtliche Grundlagen.....	37
2.5 Regelwerke zum Treibstoffschnellablass	38
2.5.1 Regelungen für die Durchführung von Treibstoffschnellablässen (operativer Bereich)	38
2.5.2 Regelungen für die Informationsweitergabe bei erfolgten Treibstoffschnellablässen	38
2.6 Prozesse beim Treibstoffschnellablass	39
2.6.1 Flugbetriebliche Abläufe beim TSA.....	39
2.6.2 Physikalisch-chemische Prozesse beim TSA	40
2.7 Bisherige Depositionsbetrachtungen.....	41
3 Kerosin und seine Bestandteile	44
3.1 Beschreibung des Stoffgemisches Kerosin.....	44
3.1.1 Herstellung und Arten von Kerosingemischen	44
3.1.2 Chemische Zusammensetzung von Kerosin.....	46
3.2 Eigenschaften der Kerosin-Bestandteile	47
4 Kerosin-Emission und -deposition aufgrund von Treibstoffschnellablässen: Daten und Fakten .	50
4.1 Erfassung von Treibstoffschnellablässen	50
4.2 Auswertung von Flugbewegungen und TSA von 2002 bis Juni 2018.....	51
4.2.1 TSA-Vorkommnisse in Bezug auf jährliche Flugbewegungen in Deutschland	51
4.2.2 Ablasshöhe beim TSA.....	53
4.2.3 Abschätzung klimatischer Randbedingungen bei TSA	55
4.2.4 Regionale Verteilung von TSA in Deutschland	57

4.2.5	Verteilung der TSA auf Flugzeugtypen.....	57
5	Konzept und Aufbau der Numerischen Modellierungen von Treibstoffschnellablässen	60
5.1	Auswertung der Literatur.....	60
5.2	Ziele der Modellberechnungen.....	60
5.3	Konzept des Modellaufbaus.....	61
5.4	Aufbau des Modells	62
5.4.1	Ein- und Ausgabedaten	62
5.4.2	Erläuterung 1. Hauptkomponente: Tröpfchenmodell	63
5.4.3	Erläuterung 2. Hauptkomponente: Dispersionsmodell	66
5.4.4	Modellannahmen und -limitierungen.....	68
5.4.5	Anmerkung zur Modell-Kerosinzusammensetzung für Jet A-1	69
5.5	Nachberechnungen der dokumentierten Modellergebnisse nach Clewell und Pfeiffer	69
6	Anwendung der Numerischen Modellierungen von TSA: Szenarienbetrachtung	71
6.1	Festlegung von Szenarien und deren Eingangsparametern	71
6.2	Modellergebnisse.....	75
6.2.1	Zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Modellergebnisse	75
6.2.2	Modellergebnisse im Detail	78
6.2.3	Vergleichende Modellberechnungen	82
6.3	Interpretation der Ergebnisse der vier Szenarien.....	85
7	Human- und ökotoxikologische Bewertung des Präzipitats.....	87
7.1	Bewertungsgrundlagen.....	87
7.1.1	Gefährdungspotenzial und Exposition.....	87
7.1.2	Grundlagen zur Abschätzung des Gefährdungspotentials	88
7.1.3	In die Bewertung einbezogene Substanzen.....	88
7.2	Auswirkungen auf Umweltkompartimente und toxikologische Relevanz.....	89
7.2.1	Bodennahe Luft.....	89
7.2.2	Boden	93
7.2.3	(Grund-)Wasser.....	95
7.2.4	Ökotoxikologische Relevanz von Kerosin und Kerosin-Inhaltsstoffen.....	102
7.2.5	Humantoxikologische Relevanz von Kerosin und Kerosin-Inhaltsstoffen	103
8	Handlungsempfehlungen zur weiteren Vorgehensweise	106
8.1	Flugbetriebliche Handlungsempfehlungen.....	106
8.1.1	Maßnahmen zur Erweiterung der flugbetrieblichen Handlungsoptionen zur Vermeidung und Verringerung der negativen Umweltwirkungen von TSA	106
8.2	Kommunikative Handlungsempfehlungen	106
8.3	Juristische Handlungsempfehlungen	107
8.4	Grundlagenwissenschaftliche Fragestellungen	107
9	Literaturverzeichnis.....	110

A	Treibstoffablässe 2002 – Juni 2018 über Deutschland	120
A.1	Jährliche TSA-Anzahl und abgelassene Kerosinmenge je Bundesland	120
A.2	Summe der abgelassenen Kerosinmenge je Bundesland	129
B	Zusammenfassende toxikologische Einordnung von Kerosininhaltstoffen	130
C	Technische Dokumentation zu den Modellberechnungen mit Hilfe der Software MATLAB.....	134
C.1	Gewähltes Konzept für die Modellierung	134
C.1.1	Übersicht über die 2 Hauptkomponenten des Modells	134
C.1.2	Modellannahmen.....	134
C.2	Aufbau der 1. Hauptkomponente: Tröpfchenmodell	136
C.2.1	Diskretisierung	138
C.2.2	Berechnung der Umgebungsbedingungen in der Atmosphäre	138
C.2.3	Berechnung der Tröpfcheneigenschaften	139
C.2.4	Berechnung des Massenverlusts durch Verdunstung	141
C.2.5	Berechnung der Temperaturänderung des Tröpfchens	143
C.3	Aufbau der Hauptkomponente 2: Advektions- und Dispersionsmodell	145
C.3.1	Advektionsmodell	145
C.3.2	Dispersionsmodell.....	146
C.4	Verwendete Parameterbezeichnungen	149
C.5	Verwendete Indexbezeichnung	152
C.6	Quellenverzeichnis	153
D	Stoffdatenblätter der Hauptinhaltsstoffe von Kerosin	154
D.1	Aliphatische Kohlenwasserstoffe (C5 – C16)	154
D.2	Cyclische Kohlenwasserstoffe	166
D.3	Additive	170
D.4	Weitere Stoffdaten	188
D.5	Kerosin Jet A 1.....	201

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Flugbetriebliche Abläufe beim Treibstoffschnellablass (schematisch).....	40
Abbildung 2:	Schematischer Informationsfluss bei Treibstoffschnellablässen: das graue Feld kennzeichnet den operativen Bereich während des TSA, die weiteren Institutionen sind entsprechend nachgeschaltet.....	50
Abbildung 3:	Jährliche Flugbewegungen und Treibstoffschnellablässe (TSA Anzahl (oben), TSA Masse Kerosin (unten)) im Zeitraum 2002 – 2017; für das Jahr 2003 liegen lediglich Daten für das 2. Halbjahr vor. Die Daten für das Jahr 2018 lagen bei Berichtslegung nicht vor.....	52
Abbildung 4:	Verteilung der Treibstoffablässe in Abhängigkeit von der Höhe (Zeitraum 2002 – Juni 2018).....	53
Abbildung 5:	Abgelassene Treibstoffmenge in Abhängigkeit von der mittleren Ablasshöhe (Zeitraum 2002 – Juni 2018)	54
Abbildung 6:	Summe TSA-Masse in Abhängigkeit von der mittleren Ablasshöhe (Zeitraum 2002 – Juni 2018)	54
Abbildung 7:	Jahreszeitliche Treibstoffschnellablässe über Deutschland (Frühjahr (März - Mai), Sommer (Juni - August), Herbst (Sept. - Nov.), Winter (Dez. - Feb.)), Anzahl der Ablässe [-].....	56
Abbildung 8:	Häufigkeit der Treibstoffschnellablässe in den einzelnen Bundesländern.....	57
Abbildung 9:	Treibstoffschnellablässe nach Flugzeugtyp (Häufigkeit, Zeitraum 2002 - 2018)	58
Abbildung 10:	Treibstoffschnellablässe nach Flugzeugtyp (abgelassene Menge, Zeitraum 2002 - 2018).....	59
Abbildung 11:	Vereinfachter Aufbau des TSA-Modells mit den wichtigsten Eingangsdaten (links) und Ausgabedaten (rechts)	63
Abbildung 12:	Ergebnisse des Tröpfchenmodells für die 4 Szenarien: Berechnete verbleibende Tröpfchenmasse durch die Verdunstung und Höhe in Abhängigkeit der Zeit	78
Abbildung 13:	Ergebnisse für die 4 Szenarien für 1 g abgelassenes Kerosin: Anfängliche Zusammensetzung des Kerosins und Zusammensetzung des Präzipitats bei Erreichen des Bodens (nach teilweiser Verdunstung während des Falls)	79
Abbildung 14:	Ergebnisse des Dispersionsmodells für das Szenario Jahresmitteltemperatur: Berechnete Präzipitat-Konzentration am Boden (zu beachten ist, dass x-Achse und y-Achse unterschiedlich skaliert sind).....	80
Abbildung 15:	Präzipitat-Konzentration am Boden im Querschnitt zur Flugachse für das Szenario Jahresmitteltemperatur. Konzentrationsangaben in dieser Studie beziehen sich	

	üblicherweise auf das Maximum (Scheitelpunkt) dieser Verteilungskurve aus dem Dispersionsmodell	81
Abbildung 16:	Einfluss unterschiedlicher Ablasshöhe auf den Anteil des Präzipitats, welcher den Boden erreicht nach (Clewett III, 1983)	83
Abbildung 17:	Einfluss der Ablasshöhe beim TSA auf den Massenanteil des sich niederschlagenden Präzipitats am Beispiel des Szenario „Frostpunkt“	84
Abbildung 18:	Treibstoffschnellablässe über Baden-Württemberg (BW)	121
Abbildung 19:	Treibstoffschnellablässe über Bayern (B)	121
Abbildung 20:	Treibstoffschnellablässe über Berlin (BE)	122
Abbildung 21:	Treibstoffschnellablässe über Brandenburg (BB)	122
Abbildung 22:	Treibstoffschnellablässe über Bremen (HB)	123
Abbildung 23:	Treibstoffschnellablässe über Hamburg (HH)	123
Abbildung 24:	Treibstoffschnellablässe über Hessen (HE)	124
Abbildung 25:	Treibstoffschnellablässe über Mecklenburg-Vorpommern (MV)	124
Abbildung 26:	Treibstoffschnellablässe über Niedersachsen (NI)	125
Abbildung 27:	Treibstoffschnellablässe über Nordrhein-Westfalen (NW)	125
Abbildung 28:	Treibstoffschnellablässe über Rheinland-Pfalz (RP)	126
Abbildung 29:	Treibstoffschnellablässe über Saarland (SL)	126
Abbildung 30:	Treibstoffschnellablässe über Sachsen (SN)	127
Abbildung 31:	Treibstoffschnellablässe über Sachsen-Anhalt (ST)	127
Abbildung 32:	Treibstoffschnellablässe über Schleswig-Holstein (SH)	128
Abbildung 33:	Treibstoffschnellablässe über Thüringen (TH)	128
Abbildung 34:	Summe der zwischen 2002 und Juni 2018 abgelassenen Kerosinmenge bezogen auf die Landesfläche [Tonnen Kerosin pro km ²]	129
Abbildung 35:	Vereinfachtes Flussdiagramm der Berechnungsschritte des Tröpfchenmodells	137
Abbildung 36:	Sicherheitsdatenblatt Pentan	154
Abbildung 37:	Sicherheitsdatenblatt Hexan	155
Abbildung 38:	Sicherheitsdatenblatt Heptan	156
Abbildung 39:	Sicherheitsdatenblatt Octan	157
Abbildung 40:	Sicherheitsdatenblatt Nonan	158
Abbildung 41:	Sicherheitsdatenblatt Decan	159
Abbildung 42:	Sicherheitsdatenblatt Undecan	160
Abbildung 43:	Sicherheitsdatenblatt Dodecan	161
Abbildung 44:	Sicherheitsdatenblatt Tridecan	162
Abbildung 45:	Sicherheitsdatenblatt Tetradecan	163
Abbildung 46:	Sicherheitsdatenblatt Pentadecan	164
Abbildung 47:	Sicherheitsdatenblatt Hexadecan	165
Abbildung 48:	Sicherheitsdatenblatt Cyclohexan	166

Abbildung 49:	Sicherheitsdatenblatt Cycloheptan	167
Abbildung 50:	Sicherheitsdatenblatt Cyclooctan.....	168
Abbildung 51:	Sicherheitsdatenblatt Cyclododecan.....	169
Abbildung 52:	Sicherheitsdatenblatt 2,2'-Methylenbis (4-methyl-6-tert-buthylphenol) Cycloheptan	170
Abbildung 53:	Sicherheitsdatenblatt 2,3,6-Trimethylphenol	171
Abbildung 54:	Sicherheitsdatenblatt 2,3,6-Trimethylphenol	172
Abbildung 55:	Sicherheitsdatenblatt 2,3,6-Tri-tert-butylphenol.....	173
Abbildung 56:	Sicherheitsdatenblatt 2,4-Di-tert-butylphenol.....	174
Abbildung 57:	Sicherheitsdatenblatt 2,6-Diisopropylphenol	175
Abbildung 58:	Sicherheitsdatenblatt 2,6-Di-tert-buthylphenol.....	176
Abbildung 59:	Sicherheitsdatenblatt 2,6-Di-tert-buthyl-p-kresol.....	177
Abbildung 60:	Sicherheitsdatenblatt 2-Isopropyl-phenol.....	178
Abbildung 61:	Sicherheitsdatenblatt 2-Propanol	179
Abbildung 62:	Sicherheitsdatenblatt 3-Isopropylphenol.....	180
Abbildung 63:	Sicherheitsdatenblatt 4-Isopropyl-phenol.....	181
Abbildung 64:	Sicherheitsdatenblatt 6-tert-Buthyl-2,4-xylenol	182
Abbildung 65:	Sicherheitsdatenblatt Diethylenglykolmonomethylether.....	183
Abbildung 66:	Sicherheitsdatenblatt Dodecylbenzolsulfonsäure.....	184
Abbildung 67:	Sicherheitsdatenblatt Fettsäuren	185
Abbildung 68:	Sicherheitsdatenblatt alpha,alpha'-Propylendinitrilodi-o-kresol	186
Abbildung 69:	Sicherheitsdatenblatt Naphtha (Petroleum)	187
Abbildung 70:	Sicherheitsdatenblatt Kohlenwasserstoffgemische	188
Abbildung 71:	Sicherheitsdatenblatt Naphthalin	189
Abbildung 72:	Sicherheitsdatenblatt Paraffine (Erdöl), normale C5-20	190
Abbildung 73:	Sicherheitsdatenblatt Toluol	191
Abbildung 74:	Sicherheitsdatenblatt Benzol	192
Abbildung 75:	Sicherheitsdatenblatt Anthracen	193
Abbildung 76:	Sicherheitsdatenblatt Fluoranthren	194
Abbildung 77:	Sicherheitsdatenblatt Fluoren.....	195
Abbildung 78:	Sicherheitsdatenblatt 1,3,5-Trimehtylbenzol.....	196
Abbildung 79:	Sicherheitsdatenblatt Phenanthren	197
Abbildung 80:	Sicherheitsdatenblatt Pyren	198
Abbildung 81:	Sicherheitsdatenblatt Xylol, Isomerengemisch	199
Abbildung 82:	Sicherheitsdatenblatt Fluoren.....	200
Abbildung 83:	Sicherheitsdatenblatt Jet A-1	201

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Maximale Start- und Landegewichte unterschiedlicher Flugzeugtypen	35
Tabelle 2:	Länderspezifische Arten unterschiedlicher Kerosin-Mischungen	45

Tabelle 3:	Jahreszeitliche TSA: Anzahl der TSA-Ereignisse [%] und Anteil der Kerosin-Masse [%]	56
Tabelle 4:	Treibstoffzusammensetzung des Modellgemischs (Jet-A1)	65
Tabelle 5:	Modell-Eingangsparemeter für die 4 berechneten Szenarien	72
Tabelle 6:	Übersicht Ergebnisse der 4 Szenarien	76
Tabelle 7:	Vergleichende Modellberechnungen zum Einfluss der Ablasshöhe auf den Präzipitat-Niederschlag am Boden am Beispiel des Frostpunkt-Szenarios (0°C)	82
Tabelle 8:	Bewertungskriterien potenzieller Belastungen durch Kohlenwasserstoffe im Umweltkompartiment Luft.....	90
Tabelle 9:	Bewertungskriterien potenzieller Belastungen durch Kohlenwasserstoffe im Umweltkompartiment Boden	94
Tabelle 10:	Bezugsgrößen zur Bewertung potenzieller Belastungen durch Kohlenwasserstoffe im Umweltkompartiment Grundwasser	97
Tabelle 11:	Wassergefährdungsklassen von Kerosin-Inhaltsstoffen gemäß AwSV (2017)	130
Tabelle 12:	MAK-Werte für Kerosin-Inhaltsstoffe (Auswahl).....	131
Tabelle 13:	Wassergefährdung durch Kerosin-Inhaltsstoffe gemäß EU-GHS-Verordnung (2006)	132
Tabelle 14:	Letalitätsdosis Ratte (LD ₅₀) für Hauptkomponenten von Kerosingemischen.	133

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
AIP	aeronautical informational publication
AMM	airplane maintenance manual
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
AGW	Arbeitsplatzgrenzwert
BAF	Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung
BDL	Bundesverband der deutschen Luftverkehrswirtschaft
BMAS	Bundesministerium für Arbeit und Soziales
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BTEX	aromatischen Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und die Xylole
CO₂	Kohlendioxid
DFS	Deutsche Flugsicherung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EPA	Environmental Protection Agency (Umweltschutzbehörde)
EU	Europäische Union
FL	Flight Level (Flughöhe [feet] / 10)
FSDurchführungsV	Verordnung über die Durchführung der Flugsicherung
HLfU	Hessische Landesanstalt für Umwelt
ICAO	International Civil Aviation Organization
KW	Kohlenwasserstoffe
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LBA	Luftfahrtbundesamt
LufABW	Luftfahrtamt der Bundeswehr
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
MDLW	maximum design landing weight (bautechnisch bedingtes maximales Landegewicht bzw. Masse)
MTOW	maximum take-off weight (Höchstabfluggewicht, offiz.: Höchstabflugmasse)
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
O₃	Ozon
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
TR	Technische Regeln

Abkürzung	Bezeichnung
TSA	Treibstoffschnellablass
UBA	Umweltbundesamt
UV-Strahlung	Ultraviolette Strahlung
UQN	Umweltqualitätsnorm
WGK	Wassergefährdungsklasse
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Einheiten

Einheit	Beschreibung
ft	feet (Fuß)
g	Gramm
km	Kilometer
km ²	Quadratkilometer
m	Meter
mg	Milligramm
km	Kilometer
km ²	Quadratkilometer
m	Meter
mg	Milligramm
ppm	Parts per Million
t	Tonne
µg	Mikrogramm
µm	Mikrometer

Umrechnung Fuß /Meter

Fuß [ft]	Meter [m]
5.000	1.524
6.000	1.829
7.500	2.286
10.000	3.048

Fuß [ft]	Meter [m]
13.000	3.962
16.000	4.877
18.000	5.486
20.000	6.096
25.000	7.620
30.000	9.144

Umrechnung Meter /Fuß

Meter [m]	Fuß [ft]
1.500	4.921
2.000	6.562
2.500	8.202
3.000	9.843
4.000	13.123
5.000	16.404
6.000	19.685
7.000	22.966
8.000	26.247
9.000	29.528

Begriffe und Prozesse kurz erklärt:

Was ist ein Treibstoffschnellablass (TSA)?

Ein Treibstoffschnellablass (TSA) ist ein Notverfahren während eines Fluges, bei dem unverbranntes Kerosin über Hochleistungsdüsen aus dem Flugzeug abgelassen und zu einem feinen Nebel versprüht wird.

Warum erfolgt ein Treibstoffschnellablass?

Das Notverfahren TSA wird aus Gründen der Flugsicherheit während eines Fluges im Notfall durchgeführt, um das Flugzeuggewicht zu reduzieren und somit eine sichere Kontrolle und Landung des Luftfahrzeugs zu ermöglichen.

Beim Abheben eines Langstreckenflugzeugs wirken in der Regel geringere Kräfte auf das Fahrwerk als beim Aufsetzen auf die Landebahn. Ein beim Start vollgetanktes Flugzeug ist schwerer als bei seiner Landung, da auf dem Flugweg ein Großteil des mitgeführten Kerosins verbraucht wird. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen wird eine möglichst hohe Auslastung des Flugzeugs angestrebt und daher ein Startgewicht (maximum take-off weight, MTOW) zugelassen, das über dem zulässigen Landegewicht (maximum design landing weight, MDLW) liegt. So kann zusätzliches Strukturgewicht eingespart werden. Dies hilft bei jedem Flug den Treibstoffverbrauch und somit den CO₂-Ausstoß zu senken.

Tritt während des Flugs ein unvorhergesehener Notfall (z.B. ein medizinischer Notfall an Bord, ein technischer Defekt o. ä.) ein, in dem ein Luftfahrzeug vor Unterschreitung des maximalen Landegewichts landen muss, erfolgt oft ein Treibstoffschnellablass.

Dabei wird durch Ablassen von Kerosin das Gewicht des Flugzeuges auf das maximale Landegewicht verringert. Damit vermindert man das Risiko, dass das Luftfahrzeug und die Insassen bei der Landung zu Schaden kommen.

In den Notfällen, in denen extremer Zeitdruck herrscht (z.B. ein Feuer an Bord) wird auf das Ablassen von Treibstoff verzichtet, um die Überlebenschance der Insassen zu erhöhen. In diesen Grenzfällen geht der Luftfahrzeugkommandant bewusst das Risiko ein, dass das Luftfahrzeug bei der Landung beschädigt oder zerstört wird.

Was ist Kerosin?

Kerosin ist ein Stoffgemisch aus mehreren hundert Einzelsubstanzen. Kerosin wird als Flugkraftstoff durch seine technischen Eigenschaften definiert. Die Zusammensetzung unterliegt Schwankungen, die auch auf Varianzen in der Zusammensetzung des Rohstoffs Erdöl und den Raffinerungsprozess zurückzuführen sind. Das Gemisch besteht aus kurz- und mittelkettigen Kohlenwasserstoffen (Alkane, Cycloalkane, Aromaten, Alkene) sowie Additiven wie Frostschutz- und Korrosionsschutzmitteln oder Anti-Statik-Additiven. Diese Einzelstoffe besitzen sehr unterschiedliche Stoffeigenschaften (Siedepunkt, Flüchtigkeit, u.a.).

Auch die unterschiedlichen nationalen Normen führen zu einer großen Bandbreite unterschiedlicher Kerosinzusammensetzungen (US-amerikanische, britische, russische, osteuropäische oder chinesische Treibstoffnormen). Hieraus resultiert eine Vielzahl an unterschiedlichen Gemischen, die je nach Einsatzort und Art der Nutzung (zivil oder militärisch) eingesetzt werden.

Wie läuft ein Treibstoffschnellablass ab?

Wird während eines Fluges ein Notfall festgestellt, der zu einer außerplanmäßigen Landung zwingt, werden Maßnahmen ergriffen, um das Problem zu lösen. Nach Abhandlung der Notverfahren sucht der Luftfahrzeugkommandant im Austausch mit der Besatzung strukturiert nach einer Lösung für das aufgetretene Problem. Hierbei werden verschiedene Lösungsmöglichkeiten geprüft. Es wird sich für das Vorgehen entschieden, welches unter den gegebenen Umständen als sicherstes Vorgehen erscheint.

Beinhaltet die Lösung einen TSA, wird dem Luftfahrzeugkommandanten von der deutschen Flugsicherung (DFS) ein bestimmtes Gebiet und eine bestimmte Höhe zugewiesen. Dadurch wird von der deutschen Flugsicherung sichergestellt, dass der sonstige Luftverkehr nicht mehr als unbedingt erforderlich behindert wird. Die Entscheidung der DFS berücksichtigt auch eine Vielzahl von Parametern wie Wetter, Länge der Landebahnen eines möglichen Ausweichflughafens, Art des Anfluges etc. Über die Menge des abzulassenden Treibstoffs entscheidet allein der Luftfahrzeugkommandant.

Der Treibstoffablass erfolgt technisch über ein Verfahren (non-normal procedure), welches von den Flugzeugherstellern in den jeweiligen Handbüchern festgelegt ist.

Nach Beendigung des Treibstoffschnellablasses informiert der Luftfahrzeugkommandant den Fluglotsen und verfasst nach der Landung eine Meldung an die Fluggesellschaft. Die Meldung wird durch die Fluggesellschaft an das Luftfahrtbundesamt weitergeleitet. Das Luftfahrtbundesamt macht diese Daten auf seiner Homepage für die Öffentlichkeit zugänglich.

Wie viel Treibstoff muss im Notfall abgelassen werden?

Um das Gewicht des Flugzeugs auf das maximale Landegewicht oder darunter zu reduzieren, kann Kerosin verfliegen oder abgelassen werden. Die Menge des abgelassenen Treibstoffs richtet sich danach, wie weit das maximale Landegewicht beim Erreichen des geplanten (Not-) Landeplatzes überschritten wäre. Stellt sich ein solcher Notfall unmittelbar nach dem Start (mit vollen Treibstofftanks) ein, so ist die abzulassende Treibstoffmenge eher groß und kann mehrere Dutzend Tonnen betragen. Wurde bereits ein gewisser Anteil an Treibstoff verfliegen, so muss in der Notfallsituation lediglich ein geringerer Anteil abgelassen werden (wenige Tonnen), um das maximale Landegewicht zu erreichen.

Wo werden Treibstoffschnellablässe durchgeführt?

Es gibt für Treibstoffschnellablässe keine ausgewiesenen Gebiete. Die Durchführung eines TSA über Deutschland erfolgt in enger Abstimmung zwischen dem verantwortlichen Luftfahrzeugkommandanten und dem Fluglotsen der deutschen Flugsicherung. Der Fluglotse weist dem Luftfahrzeugkommandanten einen Luftraum zu, in dem der TSA durchgeführt werden kann. Ein TSA erfolgt häufig in wenig frequentierten Lufträumen in der Nähe stark frequentierter Flugkorridore bei großen Luftverkehrs-Drehkreuzen.

Ein TSA wird nach Möglichkeit in Lufträumen mit wenig Flugverkehr durchgeführt, um einen möglichst großen Abstand zu benachbarten Flugzeugen einzuhalten. Dies erfolgt mit der Maßgabe, diesen Vorgang mit einem größtmöglichen Maß an Sicherheit durchzuführen und den übrigen Flugverkehr geringstmöglich einzuschränken oder zu gefährden.

Gibt es Alternativen zum Treibstoffschnellablass?

Es obliegt dem Luftfahrzeugkommandanten, sich für ein Vorgehen zur sichersten Beherrschung der Notfallsituation zu entscheiden. Er entscheidet eigenständig, entweder das Gesamtgewicht des Flugzeugs vor der Landung zu reduzieren oder eine Landung mit Übergewicht durchzuführen. Das Gesamtgewicht des Flugzeugs kann durch das Ablassen von Treibstoff oder durch Verfliegen des Treibstoffs reduziert werden. Bei jeder dieser Alternativen ist eine Vielzahl von Faktoren und Sicherheitsüberlegungen zu berücksichtigen.

Es wird sich für das Vorgehen entschieden, das in der jeweiligen Situation vom Luftfahrzeugkommandanten als das sicherste Verfahren erachtet wird.

Was wird mit einem numerischen Modell berechnet?

Mit Hilfe eines numerischen Modells lassen sich in einer Computersimulation grundsätzlich Prozesse aus der Realität abbilden, nachvollziehen und Vorhersagen berechnen. Ein Modell hilft, grundlegende physikalische Prozesse besser zu verstehen und ist ein wichtiges Werkzeug bei der Entscheidungsfindung in komplexen Sachverhalten. Das numerische Modell, das im Rahmen der Untersuchungen zum Treibstoffschnellablass entwickelt wurde, bildet die komplexen physikalischen Prozesse und Wechselwirkungen ab. Es besteht aus zwei Bausteinen:

- aus dem Tröpfchenmodell, welches die Verdunstung eines einzelnen Kerosin-Tröpfchens vom Ablass bis zur Ankunft an der Erdoberfläche berechnet
- und aus dem Dispersionsmodell, welches die Fläche und die Konzentrationsverteilung des Kerosin-Präzipitats am Boden berechnet

Ein Modell ist grundsätzlich nie ein vollständiges Abbild der Realität – es vereinfacht die Realität auf die im Modell relevanten Prozesse und Interaktionen. Die Güte eines numerischen Modells hängt vom Prozessverständnis, vom Detaillierungsgrad und von den zur Modellüberprüfung zur Verfügung stehenden Daten ab.

Zusammenfassung

Treibstoffschnellablässe (TSA) finden im dicht genutzten Luftverkehrsraum über Deutschland eine regelmäßige Anwendung als Notfallmaßnahme während eines Fluges. Hierbei werden pro Jahr bislang mehrere hundert Tonnen Kerosin unverbrannt in die Atmosphäre freigesetzt, um im Notfall das Flugzeuggewicht zu reduzieren und somit eine sichere Kontrolle und Landung des Luftfahrzeugs zu ermöglichen.

Gemäß dem bisherigen Wissensstand verdunstet ein Großteil des abgelassenen Treibstoffs in der Atmosphäre, ein Teil des abgelassenen Treibstoffgemisches kann die Erdoberfläche erreichen. Seitens der Bevölkerung und politischen Amtsträgern bestehen Unsicherheiten über die Wirkung des Treibstoffschnellablasses auf die Umwelt sowie auf die menschliche Gesundheit.

Die Projektbearbeitung und die Erstellung des vorliegenden Berichts wurden mit der Zielsetzung durchgeführt, den Umfang und die Auswirkungen von Treibstoffablässen auf Grundlage des aktuellen Wissenstandes zu bewerten. Dazu wurden im Rahmen dieser Studie folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- ▶ Literatursauswertung und Stakeholderbefragungen,
- ▶ Darstellung des aktuellen Sach- und Kenntnisstands bei TSA,
- ▶ Beschreibung der Zusammensetzung des Kerosin-Treibstoffgemisches,
- ▶ Angabe des Ausmaßes des TSA in Deutschland,
- ▶ Berechnungen der Deposition von Kerosinbestandteilen (Modellierung),
- ▶ Bewertung möglicher Auswirkungen auf die Umweltkompartimente bodennahe Luft, Boden und (Grund-)Wasser auf Grundlage der Modellergebnisse,
- ▶ Einstufung der human- und ökotoxikologischen Relevanz von Kerosin und Kerosinbestandteilen,
- ▶ Analyse der rechtlichen und flugbetrieblichen Situation beim Fuel Dumping: diese wurden in einem separaten Band II (Prof. Dr. Giemulla, et al., 2020) dokumentiert.

Langstreckenflugzeuge haben technische Möglichkeiten zum Ablassen von unverbranntem Treibstoff während des Fluges (Treibstoffschnellablass / Fuel Dumping / Fuel Jettison), um aus Gründen der Flugsicherheit eine sichere Kontrolle und Landung des Luftfahrzeugs zu ermöglichen. Durch das Ablassen von Kerosin wird vor einer Not- oder Sicherheitslandung das Gewicht des Luftfahrzeugs auf oder unter das maximal zulässige Landegewicht (MDLW) abgesenkt. Das maximale Landegewicht MDLW liegt insbesondere bei Langstreckenflugzeugen deutlich unter dem höchst zulässigen Startgewicht (MTOW). Die Festlegung voneinander abweichender Start- und Landegewichte erfolgt konstruktionstechnisch aus Gründen des Leichtbaus zur Erhöhung der Ladekapazität und aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten (Reduktion des Kerosinverbrauchs beim Flugbetrieb). Somit lässt sich zusätzliches Strukturgewicht bei der Flugzeugkonstruktion einsparen, was ansonsten bei jedem Flug zu höherem Treibstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß führen würde.

Gründe der Flugsicherheit stellen Situationen dar, die eine schnellstmögliche unplanmäßige Landung erfordern, obwohl noch große Treibstoffmengen an Bord vorhanden sind wie z. B. kurz nach dem Start. Für das Ablassen von Treibstoff muss grundsätzlich eine Notfallsituation vorliegen. Das Ermessen und die Bewertung einer Notfallsituation sowie die Entscheidungskompetenz, einen Treibstoffschnellablass durchzuführen, liegen ausschließlich beim Luftfahrzeugkommandanten (Letztentscheidungsrecht bzw. nautische Gewalt, siehe hierzu (Prof. Dr. Giemulla, et al., 2020)). Im Notfall werden dem Luftfahrzeugkommandanten, nach seiner getroffenen Entscheidung für einen TSA, von der Flugsicherung ein Gebiet, eine Mindestflughöhe sowie ein bestimmter Kurs für den Treibstoffschnellablass zugewiesen.

Als Alternativen zum TSA kommen das Verfliegen von Treibstoff mit größtmöglicher Leistung der Triebwerke zur Reduzierung des Gesamtgewichts des Flugzeugs oder eine Landung mit Übergewicht in Betracht. Jedes dieser Verfahren sowie der TSA hat Vor- und Nachteile, bzw. ist für unterschiedliche Notfallsituationen besser geeignet. Der Luftfahrzeugkommandant ist in jedem Fall angehalten sich für das Verfahren bzw. Vorgehen zu entscheiden, welches von ihm in der jeweiligen Notfallsituation als das sicherste Verfahren erachtet wird.

Im Zeitraum 2002-2017 wurden von der deutschen Flugsicherung jährlich zwischen 2,6 Millionen und 3,2 Millionen Flugbewegungen registriert. Die Anzahl der Treibstoffschnellablässe lag im gleichen Zeitraum zwischen 13 und 47 Ereignissen pro Jahr. In den letzten 5 Jahren dieses Zeitraums, 2013-2017, wurden durchschnittlich 20 TSA pro Jahr durchgeführt. Die pro TSA durchschnittlich abgelassene Kerosinmenge 2013-2017 liegt bei ca. 27 Tonnen.

Gespräche mit Experten und Prozessbeteiligten beim TSA haben gezeigt, dass bei einem TSA die Gesamtmenge an abgelassenem Kerosin und die Anfangs- und Endhöhe beim TSA dokumentiert und gemeldet werden. Eine Erfassung von Wetterdaten, Kerosinzusammensetzung oder exakt verfolgter Strecke erfolgt in diesen Meldungen nicht.

Die TSA wurden im Hinblick auf verschiedene Randbedingungen wie die Flughöhe und die Verteilung auf die einzelnen Bundesländer ausgewertet. Die mittlere Flughöhe aller TSA liegt bei 16.500 Fuß, nur 11 % aller TSA erfolgten unter 10.000 Fuß. Die 4 Bundesländer, in denen TSA am häufigsten durchgeführt wurden, sind Bayern und Rheinland-Pfalz, gefolgt von Hessen und Nordrhein-Westfalen.

Kerosin ist ein Stoffgemisch aus mehreren hundert Einzelsubstanzen und wird als Flugkraftstoff durch seine technischen Eigenschaften definiert. Das Gemisch besteht aus kurz- und mittelkettigen sowie aromatischen Kohlenwasserstoffen, darüber hinaus aus Additiven wie Frostschutz- und Korrosionsschutzmitteln oder Anti-Statik-Additiven. Die Zusammensetzung unterliegt Schwankungen, die unter anderem auf Varianzen in der Zusammensetzung des Rohstoffs Erdöl sowie den Raffinierungsprozess zurückzuführen sind.

Beim Treibstoffschnellablass wird das Kerosin über Hochleistungsdüsen in feinste Tröpfchen vernebelt. Ein Ablassvorgang dauert in Abhängigkeit der abgelassenen Kerosinmenge meist ca. 5 – 30 Minuten. Da sich das Flugzeug in diesem Zeitraum mit einer Geschwindigkeit von mindestens 450 km/h weiterbewegt, ergibt sich in vielen Fällen eine Strecke von ca. 40 – 220 Kilometern, die das Luftverkehrsfahrzeug bei einem Treibstoffschnellablass zurücklegt.

Bei der Verdüsung des Kerosins erfolgt eine disperse räumliche Verteilung des abgelassenen Kerosins. Entlang der Fallstrecke der Tröpfchen bis zur Erdoberfläche findet eine zusätzliche Verlagerung und Weiterverteilung (Dispersion) statt, welche maßgeblich durch die Windverhältnisse beeinflusst wird.

Ein Tröpfchen eines Treibstoff-Aerosols ändert bereits unmittelbar nach dem TSA durch Verdunstung seiner flüchtigen Bestandteile seine chemische Zusammensetzung. Dieser

komplexe Vorgang hängt von vielen Parametern ab und ist ein fortlaufender Prozess. Auf seiner Flugbahn verdunstet ein Tröpfchen eines Treibstoff-Aerosols teilweise oder ganz. Wenn es nur teilweise verdunstet, erreichen die verbleibenden Kerosin-Restbestandteile des Tröpfchens die Erdoberfläche. Das verbleibende Gemisch der Kerosin-Restbestandteile wird in der vorliegenden Studie als Präzipitat bezeichnet.

Das Verhalten des Kerosins bzw. des Präzipitats in der Atmosphäre hängt von vielen Faktoren wie Wind, Temperatur, Treibstoffzusammensetzung und dem initialen Tröpfchendurchmesser ab.

Zur Bewertung der Präzipitat-Deposition am Erdboden wurde ein Berechnungsmodell entwickelt. Das Modell basiert auf in der Literatur beschriebenen Ansätzen und besteht aus den beiden Hauptkomponenten Tröpfchenmodell und Dispersionsmodell. Mit Hilfe des Modellansatzes wurden die bisher nur aus der Literatur bekannten Ansätze zur Berechnung des Treibstoffverhaltens nach einem Treibstoffschnellablass numerisch nachvollzogen, plausibilisiert und für definierte Berechnungsszenarien angewendet und detailliert ausgewertet.

Nachdem sich die Lufttemperatur an der Erdoberfläche als eine der maßgeblichen Einflussgrößen auf das Modellergebnis herausgestellt hat, wurden vier relevante Modell-Szenarien unter möglichst ungünstigen Annahmen (worst-case-Ansatz) definiert. Die wesentlichen Ergebnisse der vier Modell-Szenarien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- a) im **Sommer-Szenario** (mit einer mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche von 20 °C) erreichen **4 %** des Präzipitats die Erdoberfläche. Die berechnete maximale Präzipitat-Konzentration an der Erdoberfläche beträgt **0,006 g/m²**.
- b) im **Jahresmitteltemperatur-Szenario** (mit einer mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche von 10 °C) erreichen **12 %** des Präzipitats die Erdoberfläche. Die berechnete maximale Präzipitat-Konzentration an der Erdoberfläche beträgt **0,026 g/m²**.
- c) im **Frostpunkt-Szenario** (mit einer mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche von 0 °C) erreichen **32 %** des Präzipitats die Erdoberfläche. Die berechnete maximale Präzipitat-Konzentration an der Erdoberfläche beträgt **0,081 g/m²**.
- d) im **Winter-Szenario** (mit einer mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche von -10 °C) erreichen **59 %** des Präzipitats die Erdoberfläche. Die berechnete maximale Präzipitat-Konzentration an der Erdoberfläche beträgt mit **0,159 g/m²**.

Für die Bewertung der in dieser Studie betrachteten Umweltkompartimente Boden, bodennahe Luft und (Grund-)Wasser, sowie die öko- und humantoxikologische Relevanz wurde zunächst eine Recherche geeigneter Bewertungsgrundlagen (z. B. Grenzwerte, Geringfügigkeitsschwellenwerte) durchgeführt. Derzeit liegen für die oben genannten Umweltkompartimente keine eigenen Bewertungsgrundlagen für Präzipitat vor.

Ersatzweise wurde daher die Eignung bzw. Anwendbarkeit von allgemeingültigen Bewertungsgrundlagen bzw. Bewertungsgrundlagen aus anderen Bereichen geprüft.

Beurteilung für das Umweltkompartiment bodennahe Luft

Eine zielgerichtete Bewertung potenzieller Belastungen in der bodennahen Luft durch Präzipitat nach TSA ist mit dem derzeitigen Wissensstand nicht in vollem Umfang möglich.

Als einziges vom Grundsatz her anwendbares Bewertungskriterium für die Beurteilung von möglichen Präzipitatbestandteilen in der bodennahen Luft wurde der Immissions-Jahreswert gemäß 39. BImSchV recherchiert. Für die in der 39. BImSchV aufgeführten chemischen Substanzen liegt gemäß den Modellergebnissen keine nachweisbare Exposition in der Luft in

Bodennähe dar. Für die anderen berechneten Präzipitat-Bestandteile, die gemäß den Modellergebnissen in bodennaher Luft ankommen, liegen keine geeigneten Bewertungsgrundlagen vor.

Beurteilung für das Umweltkompartiment Boden

Eine Gefährdung des Oberbodens durch TSA liegt unter Zugrundelegung der Ergebnisse der Modellberechnungen sowie der recherchierten Bewertungskriterien (BBodSchG/V, LAGA, „Holland“-Liste) nicht vor.

Beurteilung für das Umweltkompartiment (Grund-)Wasser

Wassergefährdungsklassen

Grundsätzlich kann bei einem TSA über Wasserflächen der Eintrag von wassergefährdenden Stoffen nicht ausgeschlossen werden.

Oberflächengewässer

Für eine zielgerichtete Bewertung potenzieller Belastungen von Oberflächengewässern durch Präzipitat nach TSA existiert derzeit keine geeignete Bewertungsgrundlage. Daher ist eine abschließende Bewertung mit dem derzeitigen Wissensstand nicht in vollem Umfang möglich.

Grundwasser

Gemäß den Modellergebnissen und deren Umrechnung ist auch bei einer konservativen Betrachtung von keiner Überschreitung von Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA durch Präzipitat im Grundwasser auszugehen. Es liegt somit keine Gefährdung des Grundwassers durch Präzipitat vor.

Öko- und Humantoxikologische Relevanz von Kerosin und Kerosin-Inhaltsstoffen

Auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse können die umwelt- und humantoxikologischen Risiken eines TSA derzeit noch nicht abschließend bewertet werden. Maßgeblich hierfür ist, dass die Präzipitat-Inhaltsstoffe kaum in Regelwerken Einzug gefunden haben (mittelflüchtige Kohlenwasserstoffe). Zumindest liegt gemäß den Berechnungsergebnissen keine akute humantoxische Wirkung durch leichtflüchtige Substanzen (C8-C10) des Präzipitats vor.

Handlungsempfehlungen

Auf Grundlage aller bisherigen Ergebnisse werden folgende Handlungsempfehlungen aufgeführt:

Flugbetriebliche Handlungsempfehlungen

- ▶ Erhöhung der Mindestflughöhe bei TSA auf 10.000 ft,
- ▶ Zuweisung von abwechselnden Lufträumen zur Durchführung von TSA, um räumliche Häufung von TSA-Ereignissen zu vermeiden.

Kommunikative Handlungsempfehlungen

Viele Vorbehalte in der Öffentlichkeit gegenüber TSA scheinen unter anderem durch die in der Vergangenheit üblichen Informationsprozedere bedingt. Daher wird aus den Erkenntnissen dieser Studie empfohlen, den Informationsfluss nach einem TSA in die Öffentlichkeit zu verbessern und zeitlich zu verkürzen. Kurzfristige Information an die Öffentlichkeit nach erfolgten TSA sollten über ein öffentlich zugängiges Informationsportal unmittelbar, d.h. innerhalb weniger Stunden, erfolgen, um die Transparenz nach einem TSA gegenüber der Bevölkerung zu erhöhen.

Juristische Handlungsempfehlungen

Um mögliche Umweltwirkungen des TSA nach Möglichkeit zu vermeiden oder zumindest zu verringern, wird in Band II vorgeschlagen, die Betriebsanweisung Flugverkehrsdienste - BA-FVD 665.2 um folgende Formulierung (unten kursiv) zu ergänzen: „665.2 Der Treibstoffschnellablass soll möglichst abseits großer Städte und in Lufträumen mit geringer Flugverkehrsdichte erfolgen. *Die Flugsicherung hat zu diesem Zweck nach Möglichkeit alternierende Lufträume zuzuweisen.*“

Erweiterung der Bewertungsgrundlagen

Zur besseren Beurteilung potenzieller Auswirkungen auf die Umweltkompartimente sollte die Bewertungsgrundlage wie folgt erweitert werden:

- ▶ Definition der wesentlichen Einzelstoff- und /oder Summenparameter des Präzipitats,
- ▶ Festlegung konkreter Bemessungs- oder Beurteilungswerte (ggf. ökologisch oder humantoxikologisch begründete Grenzwerte) für relevante Kerosin-Inhaltsstoffe für die Umweltkompartimente „bodennahe Luft“ und „Wasser“,
- ▶ Festlegung von Umrechnungsfaktoren, um potenzielle (numerisch ermittelte) Flächendepositionen [mg/m^2] in die jeweiligen Medieneinheiten „Luft“ [mg/m^3], „Wasser“ [$\mu\text{g}/\text{l}$] und „Boden“ [mg/kg] umzurechnen.

Grundlagenwissenschaftliche Fragestellungen

Falls technische Versuche oder Feldversuche geplant werden sollten, empfehlen wir zunächst mit dem bestehenden Modell aus dieser Studie die relevanten Parameter im Rahmen einer Sensitivitätsstudie detailliert zu identifizieren und die jeweiligen Wertebereiche der sensitiven Parameter – die später ggf. messtechnisch erfasst werden sollen – vorab zu ermitteln. Dazu müssten zusätzliche Daten erhoben werden, wie

- ▶ Detaillierte Flugdaten,
- ▶ Meteorologische Daten, basierend auf den Flugdaten,
- ▶ Ablassrate des Kerosins (t/min), mindestens durchschnittlicher Wert während eines TSA-Vorgangs.

Mit Hilfe der zusätzlichen Daten empfehlen wir das bestehende Modell zu erweitern und zusätzliche Modellberechnungen durchzuführen, wie z.B.:

- ▶ Berechnung, Abschätzungen von Einzelereignissen von TSA anhand der tatsächlichen Flugroute und Wetterbedingungen,
- ▶ Berechnung der Tröpfchenverdunstung anderer Treibstoffzusammensetzungen,
- ▶ Durchführung einer modellgestützten Sensitivitätsstudie zur Vorplanung von technischen Versuchen und Feldversuchen.

Nur wenn sich aus den zuvor dargestellten Maßnahmen ergeben sollte, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass im Hinblick auf die human- und ökotoxische Bewertung relevante Präzipitat-Konzentrationen an der Erdoberfläche ankommen, kann es in einem

weiteren Schritt sinnvoll sein, ein technisch mögliches und finanziell verhältnismäßiges Messprogramm zu konzipieren.

Summary

Fuel dumping is used regularly in the densely used air traffic area above Germany as an emergency measure during a flight. Up to now, several hundred tons of kerosene have been released into the atmosphere unburned each year in order to reduce the weight of the aircraft in an emergency and thus to enable safe control and landing of the aircraft.

According to current knowledge, a large part of the dumped fuel evaporates in the atmosphere, a part of the dumped fuel mixture can reach the surface of the earth. There is uncertainty among the population and political officials about the effects of fuel dumping on the environment and on human health.

The project work and the preparation of this report were carried out with the aim of evaluating the scope and effects of fuel dumping based on the current state of knowledge. The following work steps were carried out as part of this study:

- ▶ Literature evaluation and stakeholder surveys,
- ▶ Presentation of the current status and knowledge of fuel dumping,
- ▶ Description of the composition of the kerosene mixture,
- ▶ Indication of the extent of fuel dumping in Germany,
- ▶ Calculations of the deposition of kerosene components (modeling),
- ▶ Assessment of possible effects on the environmental compartments ground-level air, soil and (ground-) water based on the model results,
- ▶ Classification of the human and ecotoxicological relevance of kerosene and kerosene components,
- ▶ Analysis of the legal and operational situation in fuel dumping: these were documented in a separate volume II (Prof. Dr. Giemulla, et al., 2020).

Long-haul aircraft have technical options for the dumping of unburned fuel during the flight (Fuel Dumping / Fuel Jettison) in order to enable safe control and landing of the aircraft for reasons of flight safety. By dumping kerosene, the weight of the aircraft is reduced to or below the maximum permitted landing weight (MDLW) before an emergency or safety landing. The maximum landing weight MDLW is significantly below the maximum take-off weight (MTOW), especially for long-haul aircraft. Deviating take-off and landing weights are made in terms of construction technology for reasons of lightweight construction to increase the loading capacity and for economic reasons (reduction of kerosene consumption during flight operations). This saves additional structural weight in aircraft construction, which would otherwise lead to higher fuel consumption and CO₂ emissions on every flight.

Flight safety reasons are situations that require the fastest possible unscheduled landing, even though there are still large amounts of fuel on board, such as shortly after take-off. An emergency situation must exist for the execution of fuel dumping. The assessment of an emergency situation and the decision-making powers to carry out a fuel dumping lie exclusively with the aircraft commander (nautical decision-making powers, see (Prof. Dr. Giemulla, et al., 2020)). In an emergency, air traffic control will assign an area, a minimum flight altitude and a

specific course for the fuel dumping to the aircraft commander after he has made a decision for a fuel dumping.

As alternatives to fuel dumping, spending fuel with the greatest possible engine power to reduce the overall weight of the aircraft or overweight landing can be considered. Each of these methods and fuel dumping has advantages and disadvantages, or is more suitable for different emergency situations. In any case, the aircraft commander is required to decide on the procedure which he considers to be the safest procedure in the respective emergency situation.

Between 2002 and 2017, German air traffic control registered between 2.6 million and 3.2 million flight movements per year. The number of fuel dumping ranged between 13 and 47 events per year in the same period. In the last 5 years of this period, 2013-2017, an average of 20 fuel dumpings were carried out per year. The average amount of kerosene discharged per fuel dumping 2013-2017 is around 27 tons.

Discussions with experts and those involved in the process of fuel dumping have shown that in the case of fuel dumping, the total amount of kerosene dumped and the start and end altitudes are documented and reported. These reports do not record weather data, kerosene composition or the exact route.

The fuel dumpings were evaluated with regard to various boundary conditions such as the flight altitude and the distribution across the individual federal states. The mean flight altitude of all fuel dumping is 16,500 feet, only 11% of all fuel dumping took place below 10,000 feet. The 4 federal states in which fuel dumping was carried out most often are Bavaria and Rhineland-Palatinate, followed by Hesse and North Rhine-Westphalia.

Kerosene is a mixture of several hundred individual substances and is defined as aviation fuel by its technical properties. The mixture consists of short-chain and medium-chain as well as aromatic hydrocarbons as well as additives such as anti-freeze and anti-corrosion agents or anti-static additives. The composition is subject to fluctuations, among other things, due to variances in the composition of the raw material petroleum and the refining process.

During fuel dumping, the kerosene is spread into very fine droplets by high-performance nozzles. A dumping process usually takes about 5 to 30 minutes, depending on the total amount of kerosene dumped. Since the aircraft continues to move at a speed of at least 450 km / h during this period, there is in many cases a distance of approx. 40 - 220 kilometres, which the aircraft travels during a fuel dumping event.

When the kerosene is spread, a disperse spatial distribution of the drained kerosene takes place. Along the way of droplets towards the earth's surface there is an additional shift and redistribution (dispersion), which are significantly influenced by the wind conditions.

A droplet of a fuel aerosol changes its chemical composition immediately after fuel dumping due to the evaporation of its volatile components. This complex process depends on many parameters and is an ongoing process. A droplet of a fuel aerosol evaporates partially or completely in its trajectory. If it evaporates only partially, the remaining kerosene components of the droplet reach the earth's surface. The remaining mixture of the kerosene residues is referred to as a precipitate in the present study.

The behaviour of the kerosene or the precipitate in the atmosphere depends on many factors such as wind, temperature, fuel composition and the initial droplet diameter.

A calculation model was developed to assess the deposition of precipitate on the ground. The model is based on approaches described in the literature and consists of the two main components, droplet model and dispersion model. With the help of the model calculations, the

approaches previously known from the literature for calculating the fuel behaviour after fuel dumping were numerically reconstructed, checked for plausibility and used for defined calculation scenarios and evaluated in detail.

After the air temperature on the earth's surface was identified as one of the most important factors influencing the model result, four relevant model scenarios were defined under the most unfavourable conditions (worst-case approach). The main results of the four model scenarios can be summarized as follows:

- a) in the **summer scenario** (with an average air temperature at the earth's surface of 20 ° C) **4%** of the precipitate reaches the earth's surface. The calculated maximum precipitate concentration on the earth's surface is **0.006 g / m²**.
- b) in the **annual mean temperature scenario** (with an average air temperature at the earth's surface of 10 ° C), **12%** of the precipitate reaches the earth's surface. The calculated maximum precipitate concentration on the earth's surface is **0.026 g / m²**.
- c) in the **frost point scenario** (with an average air temperature on the earth's surface of 0 ° C) **32%** of the precipitate reaches the earth's surface. The calculated maximum precipitate concentration on the earth's surface is **0.081 g / m²**.
- d) in the **winter scenario** (with an average air temperature on the earth's surface of -10 ° C) **59%** of the precipitate reaches the earth's surface. The calculated maximum precipitate concentration on the earth's surface is **0.159 g / m²**.

For the assessment of the environmental compartments of soil, ground-level air and (ground-) water, as well as the ecological and human toxicological relevance, a search of suitable assessment criteria (e.g. limit values, insignificance threshold values) was first carried out. There are currently no assessment criteria explicitly valid for precipitate for the above-mentioned environmental compartments.

As a substitute, the suitability or applicability of generally applicable assessment criteria or assessment criteria from other areas was therefore examined.

Assessment for the environmental compartment ground-level air

A targeted assessment of potential pollution in the ground-level air by precipitate after fuel dumping is not fully possible with the current state of knowledge.

As the only assessment criterion that can be used in principle for the assessment of possible precipitate components in the air near the ground, the annual immission value was researched in accordance with the 39th BImSchV. However, according to the model results, there is no detectable exposure in the air near the ground for the chemical substances listed in the 39th BImSchV. For the other calculated precipitate components, which arrive in the ground-level air according to the model results, there is no assessment criterion.

Assessment for the environmental compartment soil

There is no risk to the topsoil from fuel dumping on the basis of the results of the model calculations and the researched evaluation criteria (BBodSchG / V, LAGA, "Holland" list).

Assessment for the environmental compartment (ground) water

Water hazard classes

In principle, the input of water-polluting substances cannot be ruled out in the case of fuel dumping over water surfaces.

Surface water

There is currently no suitable assessment basis for a targeted assessment of potential pollution of surface waters by precipitate after fuel dumping. Therefore, a final assessment based on the current level of knowledge is not fully possible.

Groundwater

According to the model results and their conversion, even when viewed conservatively, the LAWA's de minor threshold values cannot be exceeded due to precipitation in the groundwater. There is therefore no risk to the groundwater from precipitate.

Ecological and human-toxicological relevance of kerosene and kerosene components

Based on the results so far, the environmental and human toxicological risks of fuel dumping cannot yet be finally assessed. The decisive factor here is that the precipitate components have hardly found their way into regulations (medium-volatile hydrocarbons). At least according to the calculation results, there is no acute human toxicity from volatile substances (C8-C10) of the precipitate.

Recommendations

Based on all results to date, the following recommendations for action are listed:

Recommendations for flight operations

- ▶ In case of ground frost ($<0^{\circ}\text{C}$): increase the minimum flight altitude for fuel dumping to 10,000 ft,
- ▶ Allocation of alternate airspaces to carry out TSA to avoid spatial accumulation of fuel dumping events.

Communicative recommendations for action

Many public reservations about fuel dumping seem to be due, among other things, to the information procedures common in the past. Therefore, based on the findings of this study, it is recommended that the flow of information to the public after fuel dumping should be improved and shortened in time. Short-term information to the public after fuel dumping should be made immediately via a publicly accessible information portal, i.e. within a few hours to increase the transparency after a fuel dumping.

Legal recommendations for action

In order to avoid or at least reduce the possible environmental effects of fuel dumping as far as possible, Volume II suggests that the Operating Instructions Air Traffic Services - BA-FVD 665.2 be supplemented with the following wording (in italic font) respectively: "The fuel dumping should take place as far away as possible from large cities and in air spaces with low air traffic density. *For this purpose, air traffic control must assign alternating airspaces where possible.*"

Extension of assessment criteria

In order to better assess potential effects on the environmental compartments, the assessment basis should be expanded as follows:

- ▶ Definition of the essential individual substance and / or sum parameters of the precipitate

- ▶ Specification of specific design or assessment values (if necessary, ecologically or human-toxicologically justified limit values) for relevant kerosene components for the environmental compartments "ground-level air" and "water",
- ▶ Definition of conversion factors in order to convert potential (numerically determined) area depositions [mg / m^2] into the respective media units "air" [mg / m^3], "water" [$\mu\text{g} / \text{l}$] and "soil" [mg / kg],

Basic scientific questions

If technical tests or field tests should be planned, we first recommend using the existing model from this study to identify the relevant parameters in detail as part of a sensitivity study and to determine in advance the respective value ranges of the sensitive parameters - which may later be recorded using measurement technology. To do this, additional data would have to be collected, such as

- ▶ Detailed flight data,
- ▶ Meteorological data, based on the flight data,
- ▶ Kerosene discharge rate (t / min), at least average value during a fuel dumping process.

With the help of the additional data, we recommend expanding the existing model and performing additional model calculations, such as:

- ▶ Calculation of individual events of fuel dumping based on the actual flight route and weather conditions,
- ▶ Calculation of the droplet evaporation of other fuel compositions,
- ▶ Carrying out a model-based sensitivity study for the preliminary planning of technical tests and field tests.

Only if it can be seen from the measures outlined above that it cannot be ruled out that relevant precipitate concentrations arrive at the earth's surface with regard to the human and ecotoxic assessment, it can make sense in a further step, to plan a measurement program, which is technically possible and financially proportionate.

1 Veranlassung, Zielsetzung und Vorgehensweise der Studie

1.1 Veranlassung

Ein Treibstoffschnellablass (TSA / Fuel Dumping / Fuel Jettison) ist ein Notverfahren während eines Fluges, bei dem unverbranntes Kerosin über Hochleistungsdüsen aus dem Flugzeug abgelassen und zu einem feinen Nebel versprüht wird. Das Notverfahren TSA wird vom Luftfahrzeugkommandanten aus Gründen der Flugsicherheit durchgeführt, um das Flugzeuggewicht zu reduzieren und somit eine sichere Kontrolle und Landung des Luftfahrzeugs zu ermöglichen. Das Notverfahren TSA wird sowohl in der zivilen als auch militärischen Luftfahrt verwendet.

Gemäß dem bisherigen Wissensstand verdunstet ein Großteil des abgelassenen Treibstoffs in der Atmosphäre, ein Teil des abgelassenen Treibstoffgemisches kann die Erdoberfläche erreichen. Seitens der Bevölkerung und politischen Amtsträgern bestehen Unsicherheiten über die Wirkung des Treibstoffschnellablasses auf die Umwelt sowie auf die menschliche Gesundheit.

1.2 Zielsetzung

Die Projektbearbeitung und die Erstellung des vorliegenden Berichts wurden mit der Zielsetzung durchgeführt, den Umfang und die Auswirkungen von Treibstoffablässen auf Grundlage des aktuellen Wissenstandes zu bewerten.

Zur Zusammenstellung des aktuellen Wissensstandes wurden die Erkenntnisse aus der nationalen und internationalen Literatur zum TSA und deren Auswirkungen herangezogen.

Folgende Aspekte wurden untersucht:

- a) Aktueller Sach- und Kenntnisstand bei TSA,
- b) Zusammensetzung des Treibstoffgemisches,
- c) Angabe des Ausmaßes des Treibstoffschnellablasses in Deutschland,
- d) Berechnungen der Deposition von Kerosinbestandteilen (Modellierung),
- e) Bewertung möglicher Auswirkungen auf die Umweltkompartimente Bodennahe Luft, Boden und (Grund-)Wasser,
- f) Bewertung der human- und ökotoxikologischen Relevanz von Kerosin und Kerosinbestandteilen,
- g) Analyse der rechtlichen und flugbetrieblichen Situation beim Fuel Dumping.

1.3 Vorgehensweise

Der Bericht zielt auf eine entsprechend detaillierte Aufbereitung dieser Thematik und gliedert sich in unterschiedliche Ebenen.

- Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden mehr als 120 Studien, Veröffentlichungen, Regelwerke u.a. recherchiert, zusammengestellt und ausgewertet. Hierbei wurde der Fokus

insbesondere auf die Bereiche flugbetriebliche Regelungen, gesetzliche Vorgaben, Struktur der Zuständigkeiten, Kerosinzusammensetzung, öko- und humantoxikologisches Gefährdungspotenzial sowie numerische Modellierungen gerichtet. Zudem wurde das mediale Presseecho auf aktuelle TSA-Ereignisse verfolgt.

- ▶ Basierend auf der Literaturstudie der verfügbaren Berichte, Veröffentlichungen und Daten erfolgte die Evaluierung und Bewertung der sich ergebenden Fragestellungen. Hierzu zählte die Zusammenstellung, Validierung und statistische raum-zeitliche Aufbereitung und Auswertung von Treibstoffschnellablässen in Deutschland sowie die gesonderte Betrachtung von regional überdurchschnittlich betroffenen Gebieten mit einer Gewichtung nach Bundesländern.
- ▶ Um das Verhalten von Kerosin nach dem TSA zu untersuchen, wurde ein numerisches Modell erstellt. Als Grundlage hierzu dienten vorausgegangene Arbeiten und frühere Betrachtungen zu den physikalischen und chemischen Abläufen beim Treibstoffschnellablass, z. B. (Clewell III, 1980) (Clewell III, 1983) (Pfeiffer, 1994) (Todd, 1995). Entlang des Flugweges eines Treibstoff-Tröpfchens kommt es zu einer selektiven Verdunstung einzelner Kerosinbestandteile, so dass am Boden ankommende Reste des ursprünglichen Kerosins eine andere chemische Zusammensetzung aufweisen. Diese Kerosin-Restbestandteile werden in der vorliegenden Studie als Präzipitat bezeichnet. Zudem kommt es zu einer starken flächigen Verteilung des Präzipitats am Boden (oft über mehrere 10 km²). Das Modell bildet diese wesentlichen Prozesse ab und dient dazu, die am Boden ankommenden Präzipitat-Konzentrationen und deren flächige Verteilung zu berechnen.
- ▶ Die Modellberechnungen bilden die Grundlage für die Bewertung der am Boden ankommenden Präzipitat -Konzentrationen eines oder mehrerer Treibstoffschnellablässe. Betrachtet wurden dabei die Umweltkompartimente „bodennahe Luft“, „Boden“ und „(Grund-) Wasser“.
- ▶ Aus dem Gesamtbild wurden abschließend Rückschlüsse dahingehend abgeleitet, ob und in welchem Maße die aktuelle Verfahrensweise bei Treibstoffschnellablässen eine öko- bzw. humantoxikologische Gefährdung ausgehend von den vorgenannten Umweltkompartimenten darstellt. Einschränkungen bei der Bewertung konkreter öko- oder humantoxikologischer Auswirkungen aufgrund von Treibstoffschnellablässen ergaben sich aus dem Mangel an relevanten Studien oder Berichten zu dieser Thematik. In anderen Bereichen (z. B. Bodenschutz, Luftreinhaltung) angewendete Bewertungskriterien (z. B. Grenzwerte) lassen sich nur eingeschränkt auf TSA übertragen.
- ▶ Die flugbetriebliche Situation beim TSA wurde dargestellt. Die Analyse der rechtlichen Situation beim TSA erfolgt in einem ergänzenden fachjuristischen Bericht, in dem die internationale, supranationale und nationale rechtliche Situation bewertet wird (Prof. Dr. Giumulla, et al., 2020).

2 Aktueller Sach- und Kenntnisstand zu Treibstoffschnellablässen im Flugverkehr

2.1 Einführende Beschreibung der Vorgänge beim TSA

Langstreckenflugzeuge haben technische Möglichkeiten zum Ablassen von unverbranntem Treibstoff während des Fluges (Treibstoffschnellablass / Fuel Dumping / Fuel Jettison), um aus Gründen der Flugsicherheit eine sichere Kontrolle und Landung des Luftfahrzeugs zu ermöglichen. Durch das Ablassen von Kerosin wird vor einer Not- oder Sicherheitslandung das Gewicht des Luftfahrzeugs auf oder unter das maximal zulässige Landegewicht (MDLW) abgesenkt. Das maximale Landegewicht MDLW liegt insbesondere bei Langstreckenflugzeugen deutlich unter dem höchst zulässigen Startgewicht (MTOW).

Gründe der Flugsicherheit stellen Situationen dar, die eine schnellstmögliche unplanmäßige Landung erfordern, obwohl noch große Treibstoffmengen an Bord vorhanden sind wie z. B. kurz nach dem Start. Für das Ablassen von Treibstoff muss grundsätzlich eine Notfallsituation vorliegen. Das Ermessen und die Bewertung einer Notfallsituation sowie die Entscheidungskompetenz, einen Treibstoffschnellablass durchzuführen, liegen ausschließlich beim Luftfahrzeugkommandanten (Letztentscheidungsrecht bzw. nautische Gewalt, siehe hierzu (Prof. Dr. Giemulla, et al., 2020)). Im Zeitraum 2010 bis 2016 kam es in Deutschland in der zivilen Luftfahrt zu durchschnittlich 18 Notablässen pro Jahr sowie zu drei bis vier Notablässen in der militärischen Luftfahrt, siehe auch Abbildung 3 (Deutscher Bundestag, 2016; Deutscher Bundestag, 2016).

Im Notfall werden dem Luftfahrzeugkommandanten, nach seiner getroffenen Entscheidung für einen TSA, von der Flugsicherung ein Gebiet, eine Mindestflughöhe sowie ein bestimmter Kurs für den Treibstoffschnellablass zugewiesen. In Deutschland sind für Treibstoffschnellablässe keine expliziten Gebiete ausgewiesen. Der Bereich, in dem ein betroffenes Luftfahrzeug einen Treibstoffschnellablass durchführen darf, wird im Bedarfsfall durch die Flugsicherung festgelegt. Nach den Regelungen der ICAO (International Civil Aviation Organization ICAO, 2016) sollte das Gebiet für den Treibstoffschnellablass (Dumping Area) möglichst dünn besiedelt sein und Schutzzonen soweit wie möglich ausschließen. Im deutschen Luftraum werden Notfallsituationen, die einen Treibstoffschnellablass erfordern, der Deutschen Flugsicherung (DFS) gemeldet, die diese zentral in einer Datenbank erfasst.

Kerosin ist ein Stoffgemisch aus zahlreichen unterschiedlichen Stoffen mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften. Das beim Treibstoffschnellablass freigesetzte Kerosin wird durch Hochleistungspumpen und die Fluggeschwindigkeit zu einem feinen Nebel (Aerosol) verwirbelt. Ein Großteil dieser Treibstoff-Tröpfchen verdunstet und wird in der Atmosphäre durch photochemische Prozesse abgebaut. Der Abbau erfolgt hier durch energiereiche UV-Strahlung im Wesentlichen zu Wasser und Kohlendioxid.

Ein Tröpfchen eines Treibstoff-Aerosols ändert bereits unmittelbar nach dem TSA durch Verdunstung seiner flüchtigen Bestandteile seine chemische Zusammensetzung. Dieser komplexe Vorgang hängt von vielen Parametern ab und ist ein fortlaufender Prozess. Auf seiner Flugbahn verdunstet ein Tröpfchen eines Treibstoff-Aerosols teilweise oder ganz. Wenn es nur teilweise verdunstet, erreichen die verbleibenden Kerosin-Restbestandteile des Tröpfchens die Erdoberfläche. Das verbleibende Gemisch der Kerosin-Restbestandteile wird in der vorliegenden Studie als Präzipitat bezeichnet.

Nach bisherigem Kenntnisstand wurde davon ausgegangen, dass sich ein geringer Anteil des abgelassenen Treibstoffs auf der Erdoberfläche niederschlägt. Ausschlaggebend für die Größe

dieses Anteils an der Gesamtmenge eines Treibstoffschnellablasses waren bei den bisherigen Bewertungen u. a. die Faktoren Flughöhe, Windgeschwindigkeit und Bodentemperatur. Abgesehen von älteren Feldstudien von (Cross, et al., 1973) sowie von (Clewett III, 1980) zur Bestimmung der Tröpfchengrößen und Depositionsmengen auf der Erdoberfläche konnten keine weiteren experimentellen Felduntersuchungen zu Treibstoffschnellablässen eruiert werden.

Zur Simulation der Kraftstoffverbreitung in der Atmosphäre und der Quantifizierung potenzieller durch den Treibstoffschnellablass hervorgerufener Beeinträchtigungen von Umweltkompartimenten wurden in der Vergangenheit mehrere numerische Modellansätze entwickelt. Mit Hilfe der Modellansätze erfolgte eine Quantifizierung potenzieller durch den Treibstoffschnellablass am Boden ankommender Restkonzentrationen der nicht verdunsteten Bestandteile (Präzipitat).

Über die Auswirkungen von Treibstoffschnellablässen auf die unterschiedlichen Umweltkompartimente liegen wenig differenzierte und teilweise unvollständige oder lückenhafte Kenntnisse vor, insbesondere hinsichtlich möglicher humantoxikologischer und ökotoxikologischer Auswirkungen.

2.2 Notwendigkeit für einen Treibstoffschnellablass und betroffene Flugzeugtypen

Notwendigkeit für einen TSA

Das Notverfahren TSA wird aus Gründen der Flugsicherheit während eines Fluges im Notfall durchgeführt, um das Flugzeuggewicht zu reduzieren und somit eine sichere Kontrolle und Landung des Luftfahrzeugs zu ermöglichen.

Tritt während eines Fluges ein unvorhergesehener Notfall ein, in dem ein Luftfahrzeug vor Erreichen des maximalen Landegewichts landen muss (z.B. ein medizinischer Notfall an Bord, ein technischer Defekt o. ä.), dann ist es erforderlich, das Gewicht des Flugzeugs auf das maximale Landegewicht oder darunter zu reduzieren. Damit vermeidet man das Risiko, dass das Luftfahrzeug und die Insassen bei der Landung zu Schaden kommen.

Betroffene Flugzeugtypen

Ein Treibstoffschnellablass kann ausschließlich bei Luftfahrzeugen erfolgen, die eine bautechnische Vorrichtung zum Treibstoffschnellablass aufweisen und deren zulässiges Startgewicht MTOW größer ist als das zulässige Landegewicht MDLW. Die Festlegung voneinander abweichender Start- und Landegewichte erfolgt konstruktionstechnisch aus Gründen des Leichtbaus zur Erhöhung der Ladekapazität und aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten (Reduktion des Kerosinverbrauchs beim Flugbetrieb). Somit lässt sich zusätzliches Strukturgewicht bei der Flugzeugkonstruktion einsparen, was ansonsten bei jedem Flug zu höherem Treibstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß führen würde.

Technische Vorrichtungen zum TSA sind vor allem bei größeren 4-strahligen Flugzeugen vorhanden, deren zulässiges Startgewicht MTOW größer ist als das zulässige Landegewicht MDLW (z. B. Airbus A340, A380; Boeing 747, 777; McDonnell-Douglas MD11). Militärische TSA erfolgen zudem aus Kampffjets (z.B. F4).

Die zulässigen Start- und maximalen Landegewichte MTOW und MDLW verschiedener Flugzeugtypen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Bei Kurz- und Mittelstreckenflugzeugen liegt das maximale Startgewicht MTOW in der Regel nicht über dem maximal zulässigen Landegewicht MDLW. Im Notfall ist hier kein Treibstoffablass zur Gewichtsreduzierung erforderlich und die betreffenden Flugzeuge sind daher technisch nicht für einen Treibstoffschnellablass ausgerüstet.

Tabelle 1: Maximale Start- und Landegewichte unterschiedlicher Flugzeugtypen

Flugzeugtyp	Max. Startgewicht MTOW [t]	Max. Landegewicht MDLW [t]	Differenz [t]
Airbus A380	560	386	174
Boeing 747-400	413	296	117
Boeing 747-8	448	312	136
Boeing 747-357	372	285,8	86,2
Airbus A340-600	368	259	109
Airbus A340-300	276,5	192	84,5
MD11	283,7	199	84,7

(Quellen: www.airbus.com (abgerufen 13.09.2018); www.flugzeuginfo.net (abgerufen 13.09.2018); www.modernairliners.com (abgerufen 13.09.2018); Landtag RP, 2017; swissair Untersuchungsbericht, 1994 – Werte in Tonnen gerundet)

2.3 Alternative Verfahren für Notfallsituationen im Flugverkehr – Vor- und Nachteile

Um im Flugverkehr auf technische oder humanitäre Notfälle, die eine unmittelbare Landung erfordern, reagieren zu können, wurden international anerkannte Standardverfahren für Notfälle entwickelt. Hierzu zählen

- ▶ die Durchführung eines Treibstoffschnellablasses zur Reduzierung des Gesamtgewichts des Flugzeugs,
- ▶ das Verfliegen von Treibstoff mit größtmöglicher Leistung der Triebwerke zur Reduzierung des Gesamtgewichts des Flugzeugs oder
- ▶ eine Landung mit Übergewicht.

Die Abwägung und Entscheidung für eines der Verfahren liegen in der alleinigen Verantwortung des Luftfahrzeugkommandanten (Letztentscheidungsrecht bzw. nautische Gewalt, siehe hierzu Wissenschaftliche Kenntnisse zum TSA Band II (Prof. Dr. Giemulla, et al., 2020)). Er ist angehalten, sich für das Verfahren bzw. Vorgehen zu entscheiden, welches von ihm in der jeweiligen Notfallsituation als das sicherste Verfahren erachtet wird. Der Sicherheitsaspekt steht somit bei der Verfahrenswahl an erster Stelle. Weitere Kriterien wie ökonomische oder ökologische Faktoren sind der Entscheidungsfindung nachgeordnet.

Viele Flugzeughersteller, Fluggesellschaften und Pilotenvereinigungen stellen Handlungshilfen und Leitfäden für Notfallsituationen zur Verfügung, die die Entscheidung für ein Notfallverfahren erleichtern sollen, wobei alle relevanten Faktoren der jeweiligen Situation berücksichtigt werden (FAA 1972; Boeing 2006, 2007; Vereniging Nederlandse Verkeersvliegers 2010; Airbus 2018; FAA / EASA 2018).

In jedem Fall entstehen verfahrensbedingte Kosten. Das Verfliegen von Treibstoff oder ein Treibstoffschnellablass zur Reduzierung des Landegewichtes führen zu erhöhten Betriebsmittelkosten und zeitgesteuerten Betriebskosten. Eine Landung mit Übergewicht erfordert eine technische Sonderinspektion nach der Landung mit den damit verbundenen Kosten.

Landung mit Übergewicht

Treten im Flugbetrieb unerwartete Störungen auf, die ein sofortiges Landen des Flugfahrzeugs erfordern, könnten Verzögerungen durch einen Treibstoffschnellablass oder durch Verfliegen des Treibstoffs die Situation noch verschlechtern. In diesen Fällen wird sich der Luftfahrzeugkommandant eher für eine Landung mit Übergewicht als das sicherste Vorgehen entscheiden.

Die Federal Aviation Administration (FAA, 1972) beschreibt Situationen, in denen sich der Luftfahrzeugkommandant üblicherweise für eine Landung mit Übergewicht entscheiden könnte:

- ▶ Fehlfunktionen, die das Luftfahrzeug fluguntauglich machen,
- ▶ mechanische oder sonstige Einschränkungen oder Kombination daraus, bei denen eine schnelle Landung das Risiko weiterer zusätzlicher Probleme verringert, die zu einer zusätzlichen Gefährdung der Sicherheit führen könnten,
- ▶ Brand an Bord,
- ▶ schwere Erkrankung der Besatzung oder eines Passagiers, die sofortige ärztliche Hilfe erfordert.

Die technischen Anforderungen an die Stabilität einer Flugzeugkonstruktion werden durch die EASA Certification Specification CS-25 und die FAA Federal Aviation Regulations (FAR) Part 25 festgelegt. Diese schließen auch „hard landings“, also außergewöhnlich harte Landungen mit bis zu 6 Fuß Sinkgeschwindigkeit pro Sekunde bei MTOW bzw. mit bis zu 10 Fuß Sinkgeschwindigkeit pro Sekunde bei MDLW, mit ein. Die Sinkgeschwindigkeit bei regulären Landungen beträgt 2 bis 3 Fuß pro Sekunde.

Es können jedoch auch Notfälle auftreten, in denen eine Landung mit Übergewicht nicht favorisiert wird. Dies ist z. B. unter folgenden Randbedingungen der Fall:

- ▶ einseitiger Ausfall der Triebwerke,
- ▶ ein Systemausfall an Bord,
- ▶ eingeschränkte Funktionalität des Bremssystems,
- ▶ eingeschränkte Funktionalität des Fahrwerks,
- ▶ mangelnde Verfügbarkeit einer ausreichend langen Landebahn.

Landungen mit Übergewicht werden von wichtigen Flugzeugherstellern als ein sicher zu beherrschendes Verfahren erachtet (Boeing 2007; Airbus 2018), da die Flugzeugkonstruktionen aufgrund der FAR Part 25 bei mechanischen Beanspruchungen Sicherheitsreserven aufweisen (konservative Bemessung).

Flugzeughersteller sehen nach Landungen mit Übergewicht, unabhängig von der Sinkgeschwindigkeit (weiche oder harte Landung), eine Sonderinspektion des Flugzeugs vor (gemäß AMM - airplane maintenance manual). Diese Inspektionen sind in der Regel in mehrere Phasen gestuft. Es erfolgt zunächst immer eine Kontrolle von Anzeichen struktureller Beanspruchungen oder Deformationen (Erst-Check). Bei eindeutigen Anzeichen solcher Beanspruchungen erfolgen tiefergehende Untersuchungen der Flugzeugkonstruktion. Der Zeitaufwand für einen Erst-Check des Flugzeugs beträgt gemäß Herstellerangaben 2 bis 4 Arbeitsstunden und liegt damit in der Regel deutlich unter dem erforderlichen Zeitaufwand zur Behebung eines technischen Problems, welches zur Notfallsituation geführt hat.

Treibstoffschnellablass

Wie bereits oben beschrieben, ist der Treibstoffschnellablass ein ausschließlich für die Sicherheit im Flugverkehr notwendiges und international anerkanntes Standardverfahren, das nur in seltenen Notfällen während eines Fluges zum Einsatz kommt.

Es gibt Fluggesellschaften, die einen Treibstoffschnellablass während eines Feuers an Bord für kritisch halten. Flugfahrzeughersteller Boeing (2007) hält dagegen einen Treibstoffschnellablass während eines Feuers innerhalb oder außerhalb des Flugzeugs für uneingeschränkt durchführbar.

Verfliegen von Treibstoff

Das Verfliegen von Treibstoff zur Reduzierung des Gesamtgewichtes ist nur dann eine Option, wenn das auftretende Problem nicht unmittelbar eine sofortige Landung erfordert (BDL 2018). Je nach Flugzeugtyp und Beladung dauert das Verfliegen der gleichen Menge Kerosin etwa 15 bis 30 Mal länger als ein Treibstoffschnellablass der gleichen Menge Kerosin.

2.4 Rechtliche Grundlagen

Im Rahmen der Projektbearbeitung hat sich die Notwendigkeit einer ergänzenden fachjuristischen Bearbeitung der bestehenden internationalen, supranationalen und nationalen rechtlichen Situation abgezeichnet. Diese ist Gegenstand von Band II (Prof. Dr. Giemulla, et al., 2020): Eine wesentliche Aussage zur rechtlichen Grundlage von TSA lautet hier:

„Nach den Standards der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation und den in Deutschland geltenden Vorschriften der Europäischen Union hat der Luftfahrzeugkommandant aufgrund seiner nautischen Entscheidungsgewalt die alleinige Befugnis, über die Notwendigkeit einer Sicherheitslandung und damit über einen hierfür eventuell erforderlichen Treibstoffschnellablass (TSA) zu entscheiden. In einem solchen Fall ist es die Aufgabe der Flugsicherung, dem Luftfahrzeugkommandanten einen Luftraum zuzuweisen, in dem der TSA erfolgen kann.“

2.5 Regelwerke zum Treibstoffschnellablass

2.5.1 Regelungen für die Durchführung von Treibstoffschnellablässen (operativer Bereich)

Die Entscheidung zur Durchführung eines Treibstoffschnellablasses liegt in der alleinigen Entscheidungsgewalt des Luftfahrzeugkommandanten. Die Entscheidung, **wie** ein TSA durchzuführen ist, liegt jedoch bei der Flugsicherung (EU-VO 923/2012, SERA.2115; FSDurchführungsVO und BA-FVD), die dem Luftfahrzeugkommandanten für den TSA einen Luftraum zuweist (Prof. Dr. Giemulla, et al., 2020). Zur vertiefenden Betrachtung der flugrechtlichen Zusammenhänge siehe Ausführungen in (Prof. Dr. Giemulla, et al., 2020).

Die Anforderungen an die Durchführung von Treibstoffschnellablässen sind im Chicagoer Abkommen von 1956 als Richtlinien und Empfehlungen beschrieben und werden durch das Dokument 4444 spezifiziert (ICAO 2016). Auf nationaler Ebene werden diese Grundsätze als AIP (aeronautical information publication) aufgegriffen und durch Arbeitsanweisungen (Betriebsanweisung Flugverkehrsdienste; BA-FVD) geregelt. Die Empfehlungen der ICAO hinsichtlich Mindestflughöhe, Fluggeschwindigkeit, Abstand zum Flugverkehr und weiteren Randbedingungen wurden in die BA-FVD übernommen. Diese basiert auf der Grundlage des §25 FSDurchführungsV in Verbindung mit BA-FVD 665: Verfahrens- und Staffelungsanweisungen bei TSA. Das Regelwerk hat Rechtsverordnungscharakter.

Die im Flugbetrieb angewendete Betriebsanweisung (§ 25 FSDurchführungsV i. V. m. BA-FVD 665) gibt folgende Rahmenbedingungen für die Durchführung des Treibstoffschnellablasses vor:

- ▶ Durchführung TSA möglichst abseits großer Städte,
- ▶ Vermeiden von TSA in Wolken und in Gebieten, in denen Gewitter auftreten oder erwartet werden (ICAO 4444).
- ▶ Durchführung in Lufträumen mit geringer Flugverkehrsdichte,
- ▶ Zuweisung einer Flughöhe über Grund nicht unterhalb von 6.000 ft (ca. 1.800 m)
- ▶ räumlicher Mindestabstand zu benachbarten Luftfahrzeugen,
- ▶ Mindestzeitfenster für den nachfolgenden Flugverkehr,
- ▶ Information des unkontrollierten Luftverkehrs unterhalb von 10.000 ft (ca. 3.000 m),
- ▶ Dokumentation von Zeitraum, Flughöhe, Beginn und Ende sowie abgelassene Menge beim TSA.

Seit 2002 erfolgen in der flugbetrieblichen Praxis Treibstoffschnellablässe zumeist oberhalb von 13.000 ft (rund 75 % der TSA (Abbildung 4), rund 87 % der abgelassenen Kerosinmenge (Abbildung 6)). Der für den Fluglotsen dahinterstehende praktische Hintergrund ist, dass bei einem TSA bei oder oberhalb von 13.000 ft der vertikale Mindestabstand von 3.000 ft nicht den ungesicherten Luftraum unterhalb von 10.000 ft tangiert.

2.5.2 Regelungen für die Informationsweitergabe bei erfolgten Treibstoffschnellablässen

Generell werden Treibstoffschnellablässe durch die DFS zentral koordiniert und dokumentiert. Die Daten werden halbjährlich an das Bundesverkehrsministerium weitergeleitet. Das

Bundesverkehrsministerium ist zuständig für die informative Beantwortung von Bundestags- und Landtagsanfragen sowie Anfragen von Interessenverbänden und Bürgern. Zusätzlich macht das Luftfahrtbundesamt Daten zu TSA auf seiner Homepage der Öffentlichkeit zugänglich.

Die Grundlage für Ereignismeldungen ist in Artikel 4 der Verordnung (EU) Nr. 376/2014 in Verbindung mit Anhang III, Nr. 3 (4) der Durchführungsverordnung (EU) 2015/2018 zu finden. Artikel 6 (3) und 15(2) der Verordnung (EU) Nr. 376/2014, schließt die Nutzung der Daten für andere als Sicherheitszwecke aus.

2.6 Prozesse beim Treibstoffschnellablass

2.6.1 Flugbetriebliche Abläufe beim TSA

Tritt ein unvorhergesehener Fall während des Fluges ein, der zur Landung zwingt, bevor das Flugzeug durch Treibstoffverbrauch das maximale Landungsgewicht erreicht hat, so wird ggf. das Notfallmanöver des Treibstoffschnellablasses notwendig.

Nach Abhandlung der Notverfahren sucht der Luftfahrzeugkommandant im Austausch mit der Besatzung strukturiert nach einer Lösung für das aufgetretene Problem. Nur wenn die Lösung für einen Notfall eine Landung unter Zeitdruck beinhaltet, wird ein Teil des Treibstoffes abgelassen, um das maximale Landegewicht zu unterschreiten. Dies geschieht wiederum über ein Verfahren, welches vom Flugzeughersteller in den Handbüchern festgelegt ist (non-normal procedure).

Beabsichtigt ein Luftfahrzeugkommandant einen Treibstoffschnellablass durchzuführen, so muss er den für den betreffenden Luftraum zuständigen Lotsen, in Deutschland betrifft dies in der Regel die Lotsen der DFS, über diesen Notfall zu informieren (vgl. Abbildung 1). In dieser Notfallsituation hat der Luftfahrzeugkommandant die Verantwortung über die Prozesse vor Ort und die alleinige Entscheidungsbefugnis zur Durchführung eines Treibstoffschnellablasses. Er entscheidet über die Menge des abzulassenden Treibstoffes (um ein technisch zulässiges Landegewicht zu erreichen). Von der Flugsicherung wird ein bestimmter Luftraum zugewiesen (Gebiet, Höhe), um den sonstigen Luftverkehr nicht mehr als unbedingt erforderlich zu behindern. Die Entscheidung berücksichtigt auch eine Vielzahl von Parametern wie Wetter, Länge der Landebahnen eines möglichen Ausweichflughafens, Art des Anfluges etc. Der Fluglotse verantwortet die Prozesse im Luftraum, die der Sicherung des Flugverkehrs dienen.

Nach der Erstmeldung des Notfalls leitet die Flugsicherung den Luftfahrzeugkommandanten an und stimmt sich mit diesem über den weiteren Verlauf zur Handhabung des Notfalls ab. Dies kann gemäß Auskunft der DFS folgende Punkte betreffen:

- ▶ Wo sind die Verkehrsströme?
- ▶ Welcher Luftraum ist gegenwärtig wenig frequentiert?
- ▶ Welches ist das angestrebte Flugziel?
- ▶ Wird beabsichtigt, vor der Landung eher noch Strecke zu fliegen?

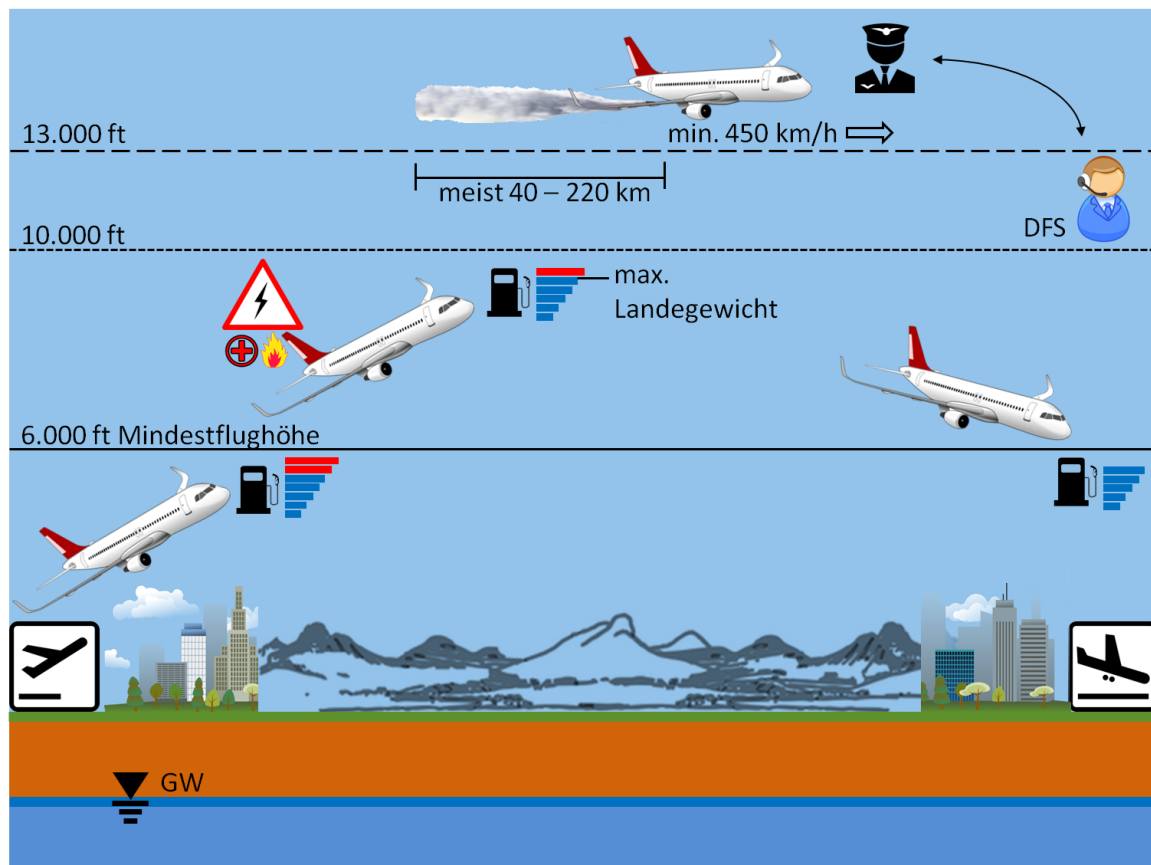
Vor der Durchführung eines TSA teilt der Luftfahrzeugkommandant dem Lotsen soweit wie möglich Angaben über den voraussichtlichen Zeitraum, die Flughöhe, Beginn und Ende des Treibstoffschnellablasses sowie die Menge des abzulassenden Treibstoffes mit. Der Lotse ist dann bestrebt, den für den TSA in Betracht kommenden Luftraum für den erforderlichen Zeitraum

freizuhalten (in der Regel 15 min). Während des TSA steht es dem Luftfahrzeugkommandanten frei, den Funkverkehr zur Flugsicherung ruhen zu lassen, um sich in der kritischen Situation auf die Prozesse des TSA zu konzentrieren.

Nach Beendigung des TSA teilt der Luftfahrzeugkommandant dem Lotsen die Verlaufsdaten des TSA mit. In den Tagesberichten der DFS sind dann Angaben zu Rufzeichen und Luftfahrzeugmuster, Flughöhe, Gebiet (Beginn und Ende), Zeitraum, soweit möglich Menge des abgelassenen Treibstoffs, Startflugplatz, Zielflugplatz und falls erforderlich Ausweichflugplatz einzutragen.

Während des Treibstoffablasses ist vom betroffenen Luftfahrzeug eine Warnmeldung auszusenden, um unkontrollierten Verkehr vom betroffenen Gebiet fernzuhalten. Nach Beendigung des Treibstoffschnellablasses sollte darüber informiert werden, dass der normale Betrieb wieder aufgenommen werden kann (Quelle: Betriebsanweisung Flugverkehrsdienste Auszug Notverfahren Treibstoffschnellablass 665).

Abbildung 1: Flugbetriebliche Abläufe beim Treibstoffschnellablass (schematisch)



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconstite – Joswig Ingenieure)

2.6.2 Physikalisch-chemische Prozesse beim TSA

Beim Treibstoffschnellablass wird das Kerosin über Hochleistungsdüsen in feinste Tröpfchen vernebelt. Ein Ablassvorgang dauert in Abhängigkeit der abgelassenen Gesamt-Kerosinmenge meist ca. 5 – 30 Minuten. Da sich das Flugzeug in diesem Zeitraum mit einer Geschwindigkeit von mindestens 450 km/h weiterbewegt, ergibt sich in vielen Fällen eine Strecke von

ca. 40 – 220 Kilometern, die das Luftverkehrsfahrzeug bei einem Treibstoffschnellablass zurücklegt.

Das in feinsten Tröpfchen abgelassene Kerosin bildet einen Nebel in Abhängigkeit der Randbedingungen (z. B. Lufttemperatur, Treibstoffzusammensetzung der Einzelkomponenten, initialer Tröpfchendurchmesser zu Beginn des Treibstoffschnellablasses etc.) und insbesondere in Abhängigkeit der Flüchtigkeit bzw. C-Kettenlänge der Einzelstoffe des Kerosins.

Das Kerosingemisch (Zusammensetzung siehe Kapitel 3) ändert sich sofort nach dem Verdüsen, da Komponenten des Gemisches verdunsten. Kurzkettige Komponenten mit höherem Dampfdruck (also geringerem Siedepunkt) verdunsten dabei leichter als längerkettige Komponenten. Es kommt zu einer Entmischung des ursprünglichen Kerosingemisches. Dieser Prozess setzt bereits unmittelbar nach der Verdüsung des Treibstoffs ein. In der Atmosphäre werden die verdunsteten Kerosin-Komponenten durch die ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung) und unter Beteiligung von (OH^-) -Ionen in CO_2 (Kohlendioxid), H_2O (Wasser) sowie O_3 (Ozon) umgewandelt.

Das einzelne Tröpfchen des abgelassenen Treibstoffs bzw. Präzipitats bewegt sich aufgrund der Schwerkraft in Richtung Erdoberfläche. Der Fallbewegung des Tröpfchens wirkt der Luftwiderstand entgegen. Größere Tröpfchen fallen daher schneller als kleinere Tröpfchen. Der durchschnittliche Tröpfchendurchmesser zu Beginn des TSA beträgt $270\ \mu m$ (Clewell III, 1980).

Bei der Verdüsung des Kerosins erfolgt eine disperse räumliche Verteilung des abgelassenen Kerosins. Entlang der Fallstrecke der Tröpfchen bis zur Erdoberfläche findet eine zusätzliche Weiterverteilung (Dispersion) statt. Die Dispersion wird u.a. durch Wind beeinflusst.

Innerhalb der Atmosphäre kann es zur Agglomeration der Kerosinkomponenten mit anderen Atmosphärenbestandteilen kommen (z. B. Wassertropfen oder Staubpartikeln). Fallende Regentropfen könnten die Fallbewegung des Präzipitats in Richtung Erdoberfläche beschleunigen und das Depositionsrisiko erhöhen. Unter anderem aus diesem Grunde wird in der flugbetrieblichen Praxis davon abgesehen, im Bereich von Wolken TSA durchzuführen.

2.7 Bisherige Depositionsbetrachtungen

Zu Betrachtungen möglicher Kerosindepositionen durch TSA wurden seit etwa der Mitte des vergangenen Jahrhunderts Studien durchgeführt. Aufgrund der Komplexität der Prozesse wurde insbesondere versucht, die Prozesse mit Hilfe mathematischer Modelle abzubilden und mögliche Depositionen auf der Erdoberfläche mit Hilfe numerischer Modelle zu quantifizieren.

Nachstehend wird eine Auswahl relevanter Arbeiten vorgestellt.

Modellbetrachtungen

1959 wurde ein erstes Berechnungsverfahren beschrieben (Lowell, 1959) und bis in die 80er und 90er Jahre weiterentwickelt (Clewell III, 1980; Clewell III, 1983; Pfeiffer, 1994; Todd, 1995). Numerische Modellverfahren, bei denen tatsächliche Feldexperimente mit Treibstoffschnellablässen durchgeführt und mit Hilfe der Datenauswertungen schrittweise Modelle weiterentwickelt wurden, wurden im Wesentlichen nur von (Cross, et al., 1973) sowie von (Clewell III, 1980) verfolgt. Seit den 1980er Jahren wurden diese Berechnungsansätze, bestehend aus einem Tröpfchen- und einem Dispersionsmodell, nicht mehr grundlegend weiterentwickelt. Allein Quackenbush et al. (1994) verwendete einen etwas anderen Modellansatz, indem er ein bestehendes Modell zur Planung der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln für die Modellierung von TSA weiterentwickelte. Dieser Ansatz erscheint aber nicht vorteilhafter als anderen genannten Ansätze (z. B. (Clewell III, 1980)), da in

Quackenbush et al. (1994) viele Prozesse eine Rolle spielen, welche nicht ohne Weiteres auf TSA übertragen werden können (z. B. andere Flugzeugtypen und andere Flughöhen).

Im Rahmen dieser Studie dienten die Modellansätze nach Clewell III (1983) und Pfeiffer (1994) als Grundlage für die Entwicklung eines eigenständigen Modells für die Berechnung der nach einem TSA ablaufenden Prozesse.

TÜV-Bericht 1992

Eine weitere Informationsquelle zu Depositionsbetrachtungen stammt vom TÜV Rheinland (1992). Er kommt in seinen vereinfachenden analytischen Abschätzungen zu dem Ergebnis, dass bei Abschätzung über die gesamte Luftsäule zwischen Ablasshöhe des TSA und der Erdoberfläche eine gemittelte Summenkonzentration von maximal 0,2 Milligramm Kerosin pro Kubikmeter in der Luft entsteht. Diese Luftkonzentration bewirkt laut TÜV-Bericht eine vernachlässigbare Kontamination im Boden.

Eine Entmischung des Kerosingemisches nach der Verdüsung durch Verdunstung, welche aus thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten unweigerlich erfolgt, wurde bei dieser Bewertung nicht berücksichtigt. Diese Veröffentlichung wird in zahlreichen Bundestags- und Landtagsanfragen sowie in aktuellen technischen Stellungnahmen zitiert.

Studie Flughafenerweiterung Berlin Schönefeld 2014

Eine weitere Studie, die vom Ministerium für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr des Landes Brandenburg erstellt wurde, ist der Planfeststellungsbeschluss (13. August 2014) für den Ausbau des Verkehrsflughafens Schönefeld (Az.: 44/1-6441/1/101). Hierin wird dargelegt, dass beim Treibstoffschnellablass das Kerosin mit Hochleistungspumpen in kleinste Tröpfchen verwirbelt und von den Turbulenzen hinter dem Flugzeug zu einem feinen Nebel verteilt wird. Bei einer angenommenen Fluggeschwindigkeit von 450 km/h und einer Gesamtablassrate mittels Schnellablassventilen von 1.600 Kilogramm Kerosin pro Minute sowie einer unterstellten Verteilungsbreite von einem Kilometer hinter dem Flugzeug errechnet sich eine mittlere Verdünnung des abgelassenen Treibstoffs auf 0,21 Gramm je Quadratmeter. Der weitaus größte Teil des Nebels sinkt jedoch nicht zu Boden, sondern verdunstet noch in den höheren Luftschichten und verbleibt in der Atmosphäre, bis er durch die Strahlungsenergie der Sonne in Wasser und Kohlendioxid umgewandelt wird.

Stellungnahme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

In einer Stellungnahme des DLR zu den Risiken von abgelassenem Kerosin für Gesundheit und Umwelt werden u.a. die Prozesse in der Atmosphäre nach TSA beschrieben. Hierbei werden Fallbewegung/-geschwindigkeit sowie Entmischung und Verwirbelung des abgelassenen Treibstoffs beschrieben. Es wird hervorgehoben, dass die Verlagerungsprozesse in der Atmosphäre sowie die dort stattfindende photochemische Umsetzung von Kerosin zu Wasser und Kohlendioxid der Deposition an der Erdoberfläche entgegenwirken. Für die numerische Simulation von Treibstoffdepositionen werden als besonders sensitive Parameter die Flughöhe, die Außentemperatur sowie die Zusammensetzung des Kerosingemisches (Anteil an leichtflüchtigen Komponenten) genannt. Es wird empfohlen, zur genauen (empirischen) Quantifizierung der am Boden ankommenden Reststoffe großmaßstäbliche Feldmessungen durchzuführen (Mitteilung Prof. Sausen, DLR 2018).

Stellungnahme der Lufthansa 2017 / Untersuchungsbericht swissair 1994

Die Lufthansa AG als größte deutsche Fluggesellschaft bezieht im Rahmen einer Anhörung durch den Ausschuss für Wirtschaft und Verkehr des Landtages von Rheinland-Pfalz zu den Risiken von abgelassenem Kerosin Stellung. Dabei verweist sie auf einen Untersuchungsbericht ihrer

Tochtergesellschaft swissair aus dem Jahr 1994. Hierin kommt die swissair zu dem Schluss, dass gemäß eines Berechnungsmodells bei niedrigen Bodentemperaturen Kerosintröpfchen die Erdoberfläche erreichen könnten. Es wird aber aufgrund einer großräumigen, flächigen Verteilung einer potenziellen Flächenbelastung darauf geschlossen, dass hierdurch keine Umweltschäden verursacht werden. Auf die Rolle eines Abbaus, potenzielle Depositionen im Boden durch bakteriellen Stoffwechsel und photochemische Reaktionen wird hingewiesen (siehe hierzu auch Hoffmann, 2001).

Luftfahrt aktuell 5/2018

In einer aktuellen Veröffentlichung des Bundesverbandes der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL, 2018) wird der Vorgang von Treibstoffschnellablässen im Luftverkehr beschrieben. Der BDL kommt zu dem Schluss, dass durch die Zerstäubung des Kerosins bei hoher Fluggeschwindigkeit das abgelassene Kerosin zu einem feinen Nebel zerstäubt wird und dieser durch die Strahlungsenergie der Sonne in Wasser und Kohlendioxid umgewandelt wird.

Zusammenfassende aktuelle Fachmeinungen 2018

Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedenste Prozessbeteiligte beim TSA interviewt (Stakeholderbefragung). Die Erkenntnisse gingen in die weitere Bearbeitung ein.

Allgemein wurde darauf verwiesen, dass die Gewichtsreduzierung der Flugzeuge zur Optimierung eines treibstoffsparenden, umweltschonenden Flugbetriebs im Verlauf der Entwicklung zu leichteren Flugzeugkonstruktionen führte. Um Landungen auch von voll betankten und damit sehr schweren Flugzeugen kurz nach deren Start zu ermöglichen, wäre ein statisches Aufrüsten (Verbesserung der Stabilität des Fahrwerks und damit des gesamten Flugzeugs) nötig. Dies würde ein höheres Gesamtgewicht des Flugzeugs im regulären Flugbetrieb und damit stets einen höheren Kerosinverbrauch und CO₂-Ausstoß im Regelflugbetrieb bedingen. Experten sehen daher den Schritt zurück zu schwereren Flugzeugen aus ökonomischer und ökologischer Sicht als nicht sinnvoll an.

Es wird von mehreren Seiten darauf hingewiesen, dass Kerosin als Treibstoff über seine technischen Eigenschaften definiert wird. Die Zusammensetzung der Anteile der Hauptkomponenten variiert in Abhängigkeit vom Produktionsprozess und des Kerosintyps (z. B. JP-4, JP-5 oder JP-8, zivile Luftfahrt Jet A-1). Je nach Einsatzzweck und klimatischen Bedingungen werden Additive beigelegt, deren Anteil und Zusammensetzung ebenfalls variieren. Die hieraus resultierenden physikalischen Eigenschaften gälte es bei Depositionsbetrachtungen zu beachten.

Die flugbetriebliche Praxis mit der Durchführung eines TSA, wenn eine vorzeitige Landung des Flugzeugs zwingend erforderlich ist, hat sich auf nationaler und internationaler Ebene bewährt. Aus Sicht der DFS, führender deutscher Fluggesellschaften und Pilotensprechern ist das Verfahren für den Flugbetrieb ein solides Notfallverfahren (non-normal procedure).

Eine Erhöhung der Transparenz wird grundsätzlich von allen angefragten Experten begrüßt. Das Bundesverkehrsministerium ist zuständig für die informative Beantwortung von Bundestags- und Landtagsanfragen sowie Anfragen von Interessenverbänden und Bürgern. Zusätzlich veröffentlicht das Luftfahrtbundesamt Daten zu TSA auf seiner Homepage.

3 Kerosin und seine Bestandteile

3.1 Beschreibung des Stoffgemisches Kerosin

3.1.1 Herstellung und Arten von Kerosingemischen

Kerosin ist ein Stoffgemisch aus mehreren hundert Einzelsubstanzen und wird als Flugkraftstoff durch seine technischen Eigenschaften definiert.

Das Gemisch besteht aus kurz- und mittelkettigen sowie aromatischen Kohlenwasserstoffen sowie Additiven wie Frostschutz- und Korrosionsschutzmitteln oder Anti-Statik-Additiven. Die meisten Kerosingemische sind, abgesehen von den Additiven, in ihrer chemischen Zusammensetzung dem Petroleum ähnlich (engl. Kerosene).

Die Zusammensetzung unterliegt Schwankungen, die unter anderem auf Varianzen in der Zusammensetzung des Rohstoffs Erdöl sowie den Raffinierungsprozess zurückzuführen sind. Der Raffinierungsprozess wiederum ist abhängig von den Möglichkeiten der Anlagen am Raffineriestandort und den Spezifikationsanforderungen an den Treibstoff (Peters, 2015; International Agency for Research on Cancer (IARC), 1989), welche in Abhängigkeit des Flugzeugtyps, nationaler Normen und der klimatischen Bedingungen variieren können. Auch die unterschiedlichen nationalen Normen führen aufgrund der besonderen klimatischen Anforderungen in den Einsatzbereichen zu einer großen Bandbreite unterschiedlicher Kerosinzusammensetzungen. Hierzu zählen u.a. US-amerikanische, britische, russische, osteuropäische oder chinesische Treibstoffnormen (www.shell.com, aufgerufen am 17.09.2018).

Kerosin wird im Raffinerieprozess aus Rohöl gewonnen. Das Rohöl durchläuft zunächst eine Entsalzung und wird dann einer atmosphärischen Destillation zugeführt. Diesel und Kerosin entstammen der Mitteldestillatfraktion der Destillationskolonne. Die Kettenlängen von Kerosin liegen im Bereich von C9-C17 (Peters, 2015). Gemäß Stoffdatenblatt Jet A-1 (siehe Anhang D.5) liegt die Länge der Kohlenstoffketten einem Bereich von C9-C16. Beim Raffinieren von Rohöl können unterschiedliche Crackverfahren, wie das Visbreaken und das Hydrocracking, zum Einsatz kommen (Peters, 2015).

Je nach Bedarf des Anwendungsbereichs als Flugzeugtreibstoff kann die Zusammensetzung von Kerosin variieren. So wurden beispielsweise spezielle Arten von Kerosin für Flugzeuge auf Flugzeugträgern (JP-5) oder für Überschallflugzeuge (JP-7) entwickelt. Darüber hinaus gab es seit Beginn der Entwicklung von Kerosin auch regionale Unterschiede in dessen Zusammensetzung (International Agency for Research on Cancer (IARC), 1989). Eine Auswahl länderspezifischer Kerosinarten ist in Tabelle 2 zusammengestellt.

Die am häufigsten eingesetzten Treibstoffgemische sind:

Jet A-1: In der zivilen Luftfahrt (mit Ausnahme der USA) wird heutzutage fast ausschließlich Jet A-1 verwendet.

Jet A: Diese Kerosinspezifikation wird in der zivilen Luftfahrt gegenwärtig ausschließlich in den USA verwendet. Es hat einen etwas niedrigeren Gefrierpunkt als Jet A-1.

Jet B: In Regionen mit niedrigen Temperaturen wie z. B. Sibirien, Alaska, Nordkanada wird Jet B eingesetzt. Dieses Kerosingemisch enthält anteilig eine Benzinkomponente, um einen sehr geringen Gefrierpunkt des Gemisches zu erzielen.

JP-4: *Dieses Gemisch wurde bis in die 1990er Jahre im zivilen und militärischen Luftverkehr eingesetzt. Es hat einen hohen Anteil an leichtflüchtigen kurzkettigen Kohlenwasserstoffen und wird heutzutage nur noch vereinzelt im militärischen Bereich eingesetzt.*

JP-8: JP-8 ist das militärische Äquivalent zu Jet A-1. Es besteht aus weniger leichtflüchtigen mittelkettigen Kohlenwasserstoffen (> C8) und ist daher im Umgang sicherer zu handhaben als JP-4.

Tabelle 2: Länderspezifische Arten unterschiedlicher Kerosin-Mischungen

Bezeichnung	Anmerkungen	Weitere Bezeichnungen	Gefrierpunkt (°C)	Flamm- punkt (°C)	Verbreitung
Jet A-1	Kommerzieller Turbinenkraftstoff	-	- 47	38	außerhalb U.S.A.
Jet A	Kommerzieller Turbinenkraftstoff	-	- 40	38	U.S.A.
Avtur	Britische Militärspezifikation ähnlich zu Jet A-1	NATO F-35; NATO F-34 (in Kanada)	- 47	38	Großbritannien
JP-1	Vorgänger von Jet A	-	- 60	-	Nicht mehr auf dem Markt
JP-4	Militärturbinenkraftstoff; wide cut: 100 -270 °C; 4000 ppmw S (abgelöst durch JP-8)	NATO F-40; zivil (Jet B); AVTAG/FSII	- 58	-	U.S.A.
JP-5	Kerosin mit hohem Flammpunkt	NATO F-44; AVCAT High Flash	- 46	60	U.S.A. (Militärkraftstoff)
JP-7	Erhöhter Energieinhalt; 43,5 kJ/kg; Wide cut: 182-288 °C; 1000 ppmw S	-	- 43,3	60	U.S.A. (Militärkraftstoff)
JP-8	Primärer Militär-Turbinenkraftstoff	NATO F-34/ F-35	- 47	38	U.S.A.
TS-1	150-250 °C; 2500 ppmw S	Premium: 2000 ppmw S	- 60	28	Russland
T-1	150-280 °C; 1000 ppmw S	-	- 60	30	Russland
T-2	145-280 °C; 2500 ppmw S	-	- 60	-	Russland
No 3 Jet Fuel	-	-	- 47	38	China
Flyfotogen 75	1000 ppmw S	-	- 50	38	Schweden

(Quelle: Peters, 2015), („S“ steht für Schwefel)

3.1.2 Chemische Zusammensetzung von Kerosin

Die Bestandteile von Kerosin sind im Stoffdatenblatt (Anhang D) nicht detailliert in ihrer chemischen Zusammensetzung spezifiziert. Stattdessen werden das Siedeverhalten und damit die technischen Gemischeigenschaften in engen Grenzen vorgegeben. Die Wahl der entsprechenden Kerosinmischung erfolgt nach den technischen (und ggf. klimatischen) Anforderungen.

Kerosin besteht aus einer Mischung aus Alkanen, Cycloalkanen (den Naphthenen), Aromaten und Alkenen (früher Olefinen). Die exakte Zusammensetzung hängt sehr stark vom Rohöl und dessen Herkunft ab (Rachner, 1998). Jet A enthält fast ausschließlich Verbindungen mit 10 bis 16 Kohlenstoffatomen (C10 – C16), wobei der Hauptanteil mit 19,5 Massen- % als C12-Verbindung vorliegt. Andere Kerosinmischungen, z. B. JP-4, enthalten auch kürzerkettige, leichterflüchtige Kohlenwasserstoffmoleküle. Im Folgenden sind die Hauptbestandteile zusammengestellt, welche die Verbrennungseigenschaften von Kerosingemischen ausmachen.

Ein typischer Gehalt für Jet A liegt bei 37 Massen-% Alkanen, 47 Massen-% Cycloalkanen, 15 Massen-% Aromaten und 1 Massen-% Alkenen. Es werden verschiedene Quellen mit einer Bandbreite von 35,4–78 Massen- % Alkane, 9,8–60,3 Massen- % Cycloalkane und 2,5–22 Massen- % Aromaten angeführt (Rachner, 1998). Im Rahmen der Studie durchgeführte Recherchen ergaben Spannweiten für Alkane und Cycloalkane von jeweils 20-60 Massen- %, für Aromaten von 12-20 Massen- % und für Alkene von 1 Massen- %. In Stoffdatenblättern zu Jet A-1 (Shell Global, 2018) finden sich Angaben zur Varianz der Anteile an Alkanen und Cycloalkanen von 0-50 Massen- % und von Aromaten von 10-20 Massen- %. In den Produktspezifikationen für Jet A-1 von Total (2008) wird ein maximaler Aromatenanteil von 26,5 Volumen- % angegeben.

Um die Treibstoffe für unterschiedliche klimatische und technische Einsatzbereiche zu konditionieren, werden dem Treibstoffgemisch in geringer Menge von 0,1-0,2-Massen-% Additive zugegeben. Diese Additive in Flugtreibstoffen lassen sich in die folgenden fünf Gruppen einteilen (Peters, 2015; Mediationsverfahren Flughafen Frankfurt / Main, 2000):

- Antioxidantien,
- Metalldeaktivatoren,
- Leitfähigkeitsadditive (Antistatische Additive),
- Korrosionsinhibitoren und
- Anti-Icingmittel.

Jet A-1 enthält als Additive hauptsächlich Antioxidantien und ein Leitfähigkeitsadditiv. Ein Zusatz der anderen Additivtypen stellt eher die Ausnahme dar (Mediationsverfahren Flughafen Frankfurt / Main, 2000).

Die Additive der **Antioxidantien** bestehen vornehmlich aus 2,6-Ditertiär-butylphenol, 2,6-Ditertiär-butyl-4-methylphenol und 2,4-Dimethyl-6-tertiär-butylphenol sowie aus Mischungen, in denen diese drei Stoffe enthalten sind (Mediationsverfahren Flughafen Frankfurt / Main, 2000).

Als **Metalldeaktivator** kommt lediglich NN'-disalicylidene-1,2-propane-diamine zum Einsatz (Mediationsverfahren Flughafen Frankfurt / Main, 2000).

Als **antistatisches Additiv** wird derzeit Stadis 450 verwendet, welches im Wesentlichen aus Toluol, Isopropylalkohol, DBSA, Petroleum und untergeordnet weiteren Komponenten besteht.

Als **Korrosionsinhibitoren** werden zur Zeit Produkte wie Hitec 580, Hitec 4745 (langkettige Fettsäuren) sowie Nalco 5403 eingesetzt (Gemisch aus 2,4-Dimethyl-6tertiär-buthylphenol und 4-Methyl-2,6-ditertiär-buthylphenol).

3.2 Eigenschaften der Kerosin-Bestandteile

Nachstehend werden die in Kerosingemischen vertretenen Hauptkomponenten hinsichtlich der Wichtigsten chemischen und physikalischen Stoffeigenschaften beschrieben. Darüber hinaus sind für die häufigsten Stoffe Wasser- und Gesundheitsrisiken und -einstufungen dargestellt. Ergänzende Angaben zu den Stoffeigenschaften finden sich in Anhang D.

Alkane (frühere Bezeichnung: Paraffine)

Alkane sind eine Untergruppe der aliphatischen Kohlenwasserstoffe und weisen die allgemeine Summenformel C_nH_{2n+2} auf. Alkane bilden eine homologe Reihe von Verbindungen, in der sich zwei benachbarte Glieder der Reihe durch die Gruppe $-CH_2-$ unterscheiden. Ähnlichkeiten untereinander bestehen hinsichtlich der chemischen Reaktionsfähigkeit, während die physikalischen Eigenschaften variieren.

Die ersten vier Alkane der homologen Reihe sind gasförmig, die weiteren bis C16 flüssig, und die Homologen ab C17 sind fest. Die in Kerosingemischen enthaltenen Alkane liegen in flüssiger Form vor.

Die gasförmigen und festen Alkane sind fast geruchlos, die Flüssigkeiten weisen meist typischen Benzingeruch auf. Die Alkane sind nicht mit Wasser mischbar. Sie lösen sich in Ether und Ethanol; dabei nimmt die Löslichkeit jedoch mit steigender Molmasse bzw. C-Kettenlänge ab. Alkane sind brennbar, die niedermolekularen gasförmigen und flüssigen Verbindungen sind leichter entflammbar als die höheren Homologen und bilden außerdem mit Luft oder Sauerstoff explosive Mischungen. Die vollständige Verbrennung führt zu Kohlendioxid und Wasser (Spektrum, 2018).

Wassergefährdung: Das Gewässergefährdungspotenzial nimmt mit zunehmender Kettenlänge ab. Pentan und Hexan werden in die Wassergefährdungsklasse (WGK) 2, Heptan bis Nonan in die WGK 1 eingestuft. Ab Decan erfolgt in den recherchierten Stoffdatenbanken keine WGK-Einstufung.

Gesundheitsgefährdung: Alkane sind gesundheitsgefährdend. Das Gefährdungspotenzial nimmt mit zunehmender C-Kettenlänge ab (Pentan, Heptan und Octan: Kategorie 3 (Organtoxizität), Hexan und Nonan: Kategorie 2 (Reizwirkung auf Haut), Decan und längerkettig: Kategorie 1 (Aspirationsgefahr)).

Propan, Butan, Pentan, Hexan, Heptan und Oktan und einige weitere Alkane sind Gefahrstoffe, ihr MAK-Wert ist aber relativ hoch angesetzt. Für Pentan beträgt er 3.000 mg/m^3 , für Hexan nur 180 mg/m^3 . Pentan, Hexan, Heptan und Octan sind darüber hinaus umweltgefährlich und höhere Alkane sind meist nur noch reizend eingestuft oder gar keine Gefahrstoffe mehr (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 2018).

Weiteres Gefahrenpotenzial: Alkane können aufgrund ihrer Brennbarkeit eine Gefahr darstellen; mit zunehmenden Kohlenstoffanteilen steigt allerdings auch der Flammpunkt.

Cycloalkane (frühere Bezeichnung: Cycloparaffine)

Cycloalkane, auch gesättigte cyclische Kohlenwasserstoffe, weisen die allgemeine Summenformel C_nH_{2n} auf. Sie bilden eine homologe Reihe von Verbindungen unterschiedlicher

Ringgröße, beginnend mit Cyclopropan. Besondere Bedeutung haben Cyclopentan und Cyclohexan als Kohlenstoffgerüste in natürlich vorkommenden Ringsystemen, z. B. Terpene oder Steroide, bzw. in technisch wichtigen Produkten, z. B. Naphthene.

Die Cycloalkane zeigen Ähnlichkeiten mit den Alkanen, jedoch unterscheiden sich die Cycloalkane untereinander sehr stark hinsichtlich ihrer Stabilität in Abhängigkeit von der Ringgröße. Die Cycloalkane werden daher eingeteilt in kleine Ringe (3 bzw. 4 C-Atome) mit geringer Stabilität und Bildungstendenz, normale Ringe (5 bis 7 C-Atome mit relativ großer Stabilität und Bildungstendenz, mittlere Ringe (8 bis 11 C-Atome), vergleichbar mit den kleinen Ringen, und große Ringe (12 und mehr C-Atome), die hohe Stabilität und Bildungstendenz aufweisen. Monocyclische unsubstituierte Alkane mit drei oder vier Kohlenstoffatomen sind unter Normalbedingungen gasförmig, ab fünf Kohlenstoffatomen sind sie flüssig (Spektrum, 2018).

Wassergefährdung: Das Gewässergefährdungspotenzial nimmt mit zunehmender Anzahl der C-Atome ab. Cyclohexan wird in die WGK 1 eingestuft, für Cycloheptan und Cyclooctan erfolgt in den recherchierten Stoffdatenbanken keine WGK-Einstufung.

Gesundheitsgefährdung: Cycloalkane sind gesundheitsgefährdend. Das Gefährdungspotenzial nimmt mit zunehmender Anzahl der C-Atome ab (Cyclohexan, Cycloheptan und Cyclooctan Kategorie 1 (Aspirationsgefahr), Cyclododecan in den recherchierten Stoffdatenbanken keine Einstufung).

Weiteres Gefahrenpotenzial: Cycloalkane sind leicht entzündlich (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 2018).

Aromaten

Aromaten sind planare, cyclische Moleküle (Ringsystem, in vielen Fällen Benzolring) mit konjugierten Doppelbindungen. Aromaten sind mehrfach ungesättigte Verbindungen, die gegenüber der Addition an der Doppelbindung relativ reaktionsträge sind und die stattdessen relativ leicht direkt an einer Doppelbindung eine Substitution eingehen. Die Grundstruktur bilden Ringe, die entweder aus Fünfringen (Furan) oder Sechsringen (Benzol) aufgebaut sind, die jeweils mit weiteren Fünf- oder Sechsringen kondensieren können.

Beispiele aromatischer Verbindungen sind Benzol, Toluol, Xylol oder Mesithylen (aromatische Kohlenwasserstoffe) sowie Naphthalin, Azulen oder Anthracen (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe). Darüber hinaus gibt es Benzolderivate (z. B. Phenol) oder Heteroaromaten (z. B. Furan).

Aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX-Aromaten) weisen hohe Flüchtigkeiten auf und sind mobil im Boden und Grundwasser. Daher reichern sie sich in der Bodenluft an. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe weisen geringe Wasserlöslichkeiten und geringere Flüchtigkeiten auf. Die niedrigmolekularen Zwei- und Dreiring-Verbindungen (Naphthalin, Acenaphthen, Acenaphthylen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen) haben eine Wasserlöslichkeit im mg/l-Bereich (Ausnahme Anthracen). Ihre Flüchtigkeit ist deutlich größer als die der höhermolekularen Vierring-Verbindungen (Fluoranthren, Pyren, Benzo[a]anthracen, Chrysen), deren Wasserlöslichkeit im µg/l-Bereich liegt. Die Wasserlöslichkeit der übrigen hochmolekularen Verbindungen (5-6 Ringe) ist noch geringer.

Wassergefährdung: Benzol ist stark wassergefährdend (WGK 3), Xylol und Toluol sind wassergefährdend (WGK 2).

Bei den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen werden Anthracen, Fluoranthen und Naphthalin in die WGK 2 (wassergefährdend), Benzo(a)pyren, Benzo(b)fluoranthen und Benzo(k)fluoranthen in die WGK 3 (stark wassergefährdend) eingestuft.

Gesundheitsgefährdung: Benzol ist im Gegensatz zu den anderen BTEX-Aromaten sowohl blutschädigend als auch krebserregend. Benzol wirkt bei längerem Einatmen als starkes Gift, das zu Schwindel, Erbrechen und Bewusstlosigkeit führen kann (Kategorie 4 akute Toxizität). Die Flüssigkeit wird auch durch die Haut aufgenommen und verursacht auch auf diesem Wege schwere Vergiftungen. Chronische Vergiftungen rufen Schädigungen des Knochenmarks, der Leber und der Nieren sowie Leukämie hervor.

Xylole sind leichtentzündlich und giftig (Kategorie 4 akute Toxizität). Sie wirken gesundheitsschädigend bei Aufnahme über die Haut und die Atemwege. Sie können zum Beispiel Kopfschmerzen, Gedächtnis- und Orientierungsstörungen, Schwindel und Atemnot hervorrufen.

Toluol ist leichtentzündlich und gesundheitsschädlich (Kategorie 1 Aspirationsgefahr). Toluol verursacht Nerven-, Nieren- und möglicherweise auch Leberschäden. Toluol ist fortpflanzungsgefährdend sowie fruchtschädigend. Die Inhalation von Toluoldämpfen kann zu unspezifischen Symptomen wie Müdigkeit, Unwohlsein, Empfindungsstörungen, Störungen der Bewegungskoordination und Bewusstseinsverlust führen.

Die Schädlichkeit der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe beruht hauptsächlich auf ihren genotoxischen (karzinogenen und mutagenen) Eigenschaften u.a. gegenüber aquatischen Organismen (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 2018).

Alkene (frühere Bezeichnung: Olefine)

Alkene sind aliphatische Kohlenwasserstoffe mit einer Kohlenstoff-Doppelbindung. Alkene bilden eine homologe Reihe mit der allgemeinen Summenformel C_nH_{2n} beginnend mit Ethen.

Alkene haben ähnliche Eigenschaften wie die Alkane. Ihre Dichte ist geringer als die von Wasser und sie sind nicht mit Wasser mischbar. In Alkoholen oder Ether lösen sie sich hingegen gut. Bei Raumtemperatur sind Ethen, Propen und Buten gasförmig, die höheren unverzweigten Alkene sind flüchtige Flüssigkeiten. Ab sechzehn Kohlenstoff-Atomen sind Alkene fest.

Wassergefährdung: Hexen ist schwach wassergefährdend (WGK 1), Hepten und Octen sind wassergefährdend (WGK 2).

Gesundheitsgefährdung: Alkene sind gesundheitsgefährdend (Kategorie 1 Aspirationsgefahr) und Kategorie 2 (Reizwirkung auf Haut).

Additive

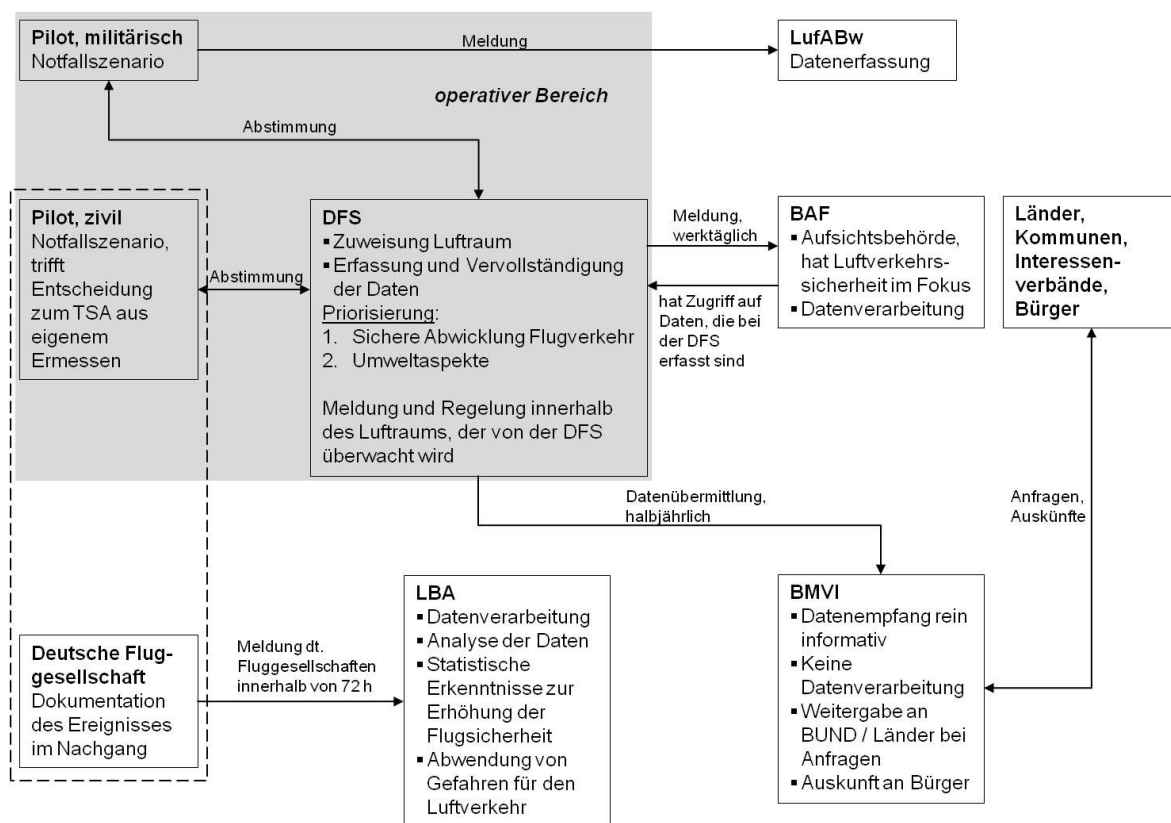
Die dem Kerosin zugesetzten Additive werden aus sehr unterschiedlichen technischen Gründen eingesetzt und umfassen verschiedenste Stoffgruppen. Der Übersichtlichkeit halber wird für detaillierte Angaben zu den Stoffeigenschaften auf Anhang 2 verwiesen.

4 Kerosin-Emission und -deposition aufgrund von Treibstoffschnellablässen: Daten und Fakten

4.1 Erfassung von Treibstoffschnellablässen

Treibstoffschnellablässe werden der deutschen Flugsicherung (DFS) vom Luftfahrzeugkommandanten gemeldet. Diese Daten werden halbjährlich dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) von der DFS übergeben. Hierbei werden je TSA Datum, Flugzeugtyp, betroffene Region bzw. Bundesland, Flughöhe und abgelassene Kerosinmenge dokumentiert. Das Luftfahrtbundesamt veröffentlicht zudem Daten zu TSA auf seiner Homepage.

Abbildung 2: Schematischer Informationsfluss bei Treibstoffschnellablässen: das graue Feld kennzeichnet den operativen Bereich während des TSA, die weiteren Institutionen sind entsprechend nachgeschaltet



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reonsite – Joswig Ingenieure)

Nicht bei der DFS dokumentiert sind u.a. Daten wie die Sorte des getankten Kerosins, Datum und Ort der Betankung, standortspezifische Zusammensetzung des Kerosins, Uhrzeit des TSA, Dauer des TSA, Wetterdaten in der Ablasshöhe und am Boden des überflogenen Gebiets (Temperatur, Windrichtung, Wetterlage u.ä.).

Der Treibstoffschnellablass wird zwischen dem Luftfahrzeugkommandanten (zivil oder militärisch) und der DFS kommuniziert und abgestimmt. Weitere Institutionen sind nicht in den operativen Bereich eingebunden (Abbildung 2). Militärpiloten der Bundesluftwaffe melden das Ereignis zusätzlich dem Luftfahrtamt der Bundeswehr.

Ein Ereignis wird im Nachgang werktäglich von der DFS an das BAF zur sicherheitstechnischen Auswertung gemeldet. Deutsche Fluggesellschaften sind verpflichtet, innerhalb von 72 Stunden nach einem Ereignis dieses gegenüber dem LBA zu melden. Dort werden die Daten detailliert ausgewertet und Maßnahmen zur Gefahrenabwehr geprüft. Das BMVI erhält halbjährlich von der DFS eine Liste der erfolgten TSA. Dort werden Bundestags- und Landtagsanfragen sowie weitere Anfragen von Interessenverbänden und Bürgern bearbeitet (Abbildung 2).

Erfolgt ein Treibstoffschnellablass über zwei Bundesländern oder international, beispielsweise beginnend in Österreich mit Anflug auf München, wird die abgelassene Treibstoffmenge bei der Erstellung der Sammelmeldung paritätisch auf die betroffenen Gebiete aufgeteilt. Eine detaillierte Dokumentation, über welchem Gebiet wie viel Kerosin exakt abgelassen wurde, erfolgt beim Notfallmanagement des havarierten Luftverkehrsfahrzeugs in Anbetracht der Komplexität des Vorgangs nicht.

4.2 Auswertung von Flugbewegungen und TSA von 2002 bis Juni 2018

Im Zeitraum 2002 – Juni 2018 wurden 452 TSA dokumentiert. Für das 2. Halbjahr 2003 lagen für diese Studie keine Daten vor.

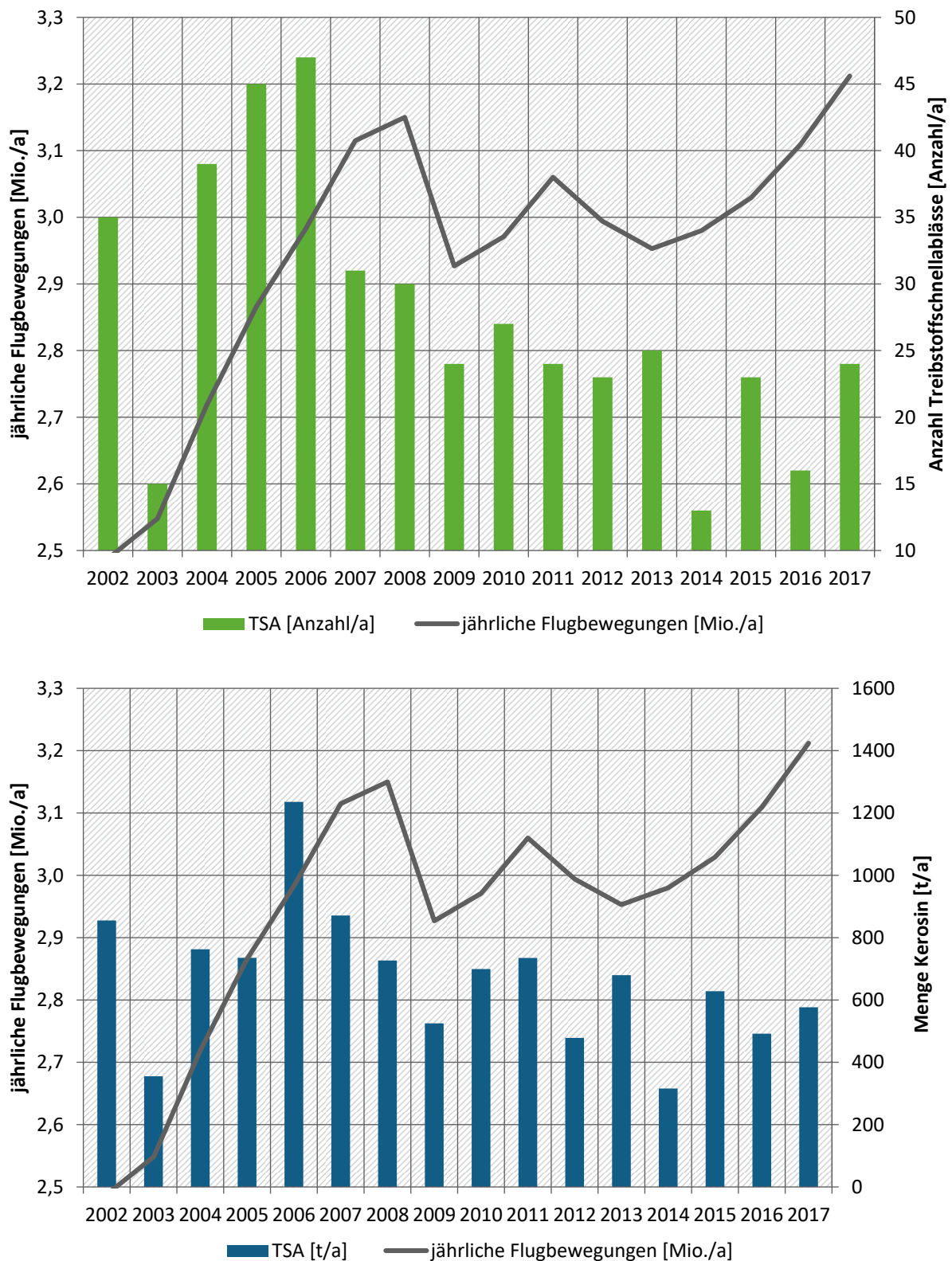
Bei insgesamt 35 TSA war die abgelassene Kerosinmenge nicht erfasst, was 7,7 % aller dokumentierten TSA entspricht. Basierend auf den Daten aus dem Zeitraum 2002 bis Juni 2018 wurden die vollständig dokumentierten Ereignisse ausgewertet.

4.2.1 TSA-Vorkommnisse in Bezug auf jährliche Flugbewegungen in Deutschland

Die von der DFS überwachten Flugbewegungen über Deutschland stiegen von 2002 bis 2008 um 25 % von jährlich 2,49 Millionen auf über 3,15 Millionen (Deutsche Flugsicherung (DFS), 2018), siehe Abbildung 3. Nach einem Rückgang der Flugbewegungen im Jahr 2009 um rund 7 % (223.000 Flugbewegungen, maßgeblich in Folge der Konjunkturabkühlung in Folge der Finanzkrise) und einer Stagnation etwa bis 2015 stiegen die Flugbewegungen über Deutschland (2017 über 3,21 Millionen.).

Im Zeitraum 2002 – 2006 war eine Zunahme von Treibstoffschnellablässen zu verzeichnen. In diesem Zeitraum wurden gemittelt bei jährlich 36 TSA in der Summe rund 789 Tonnen Kerosin pro Jahr über Deutschland abgelassen (siehe Abbildung 3). Im nachfolgenden 5-Jahres-Zeitraum 2007-2011 erfolgten durchschnittlich 27 TSA jährlich. Die gemittelte jährliche Kerosinmenge betrug rund 713 Tonnen. Im Zeitraum 2012-2016 betrug die Anzahl der jährlichen TSA durchschnittlich 20 mit einem gemittelten, jährlichen Gesamtablass von 516 Tonnen Kerosin. Gegenüber dem Zeitraum 2002 – 2006 entspricht dies einem Rückgang der jährlichen TSA um 45 % und einem Rückgang der jährlich abgelassenen Kerosinmenge von 35 %. In den gleichen Vergleichszeiträumen stieg die Anzahl der überwachten Flugbewegungen um rund 11 % (2002-2006: 2,7 Mio., 2012-2016: 3,0 Mio.). Hierbei sind die Flugstrecken und Flugzeugtypen nicht differenziert.

Abbildung 3: Jährliche Flugbewegungen und Treibstoffschnellablässe (TSA Anzahl (oben), TSA Masse Kerosin (unten)) im Zeitraum 2002 –2017; für das Jahr 2003 liegen lediglich Daten für das 2. Halbjahr vor. Die Daten für das Jahr 2018 lagen bei Berichtslegung nicht vor



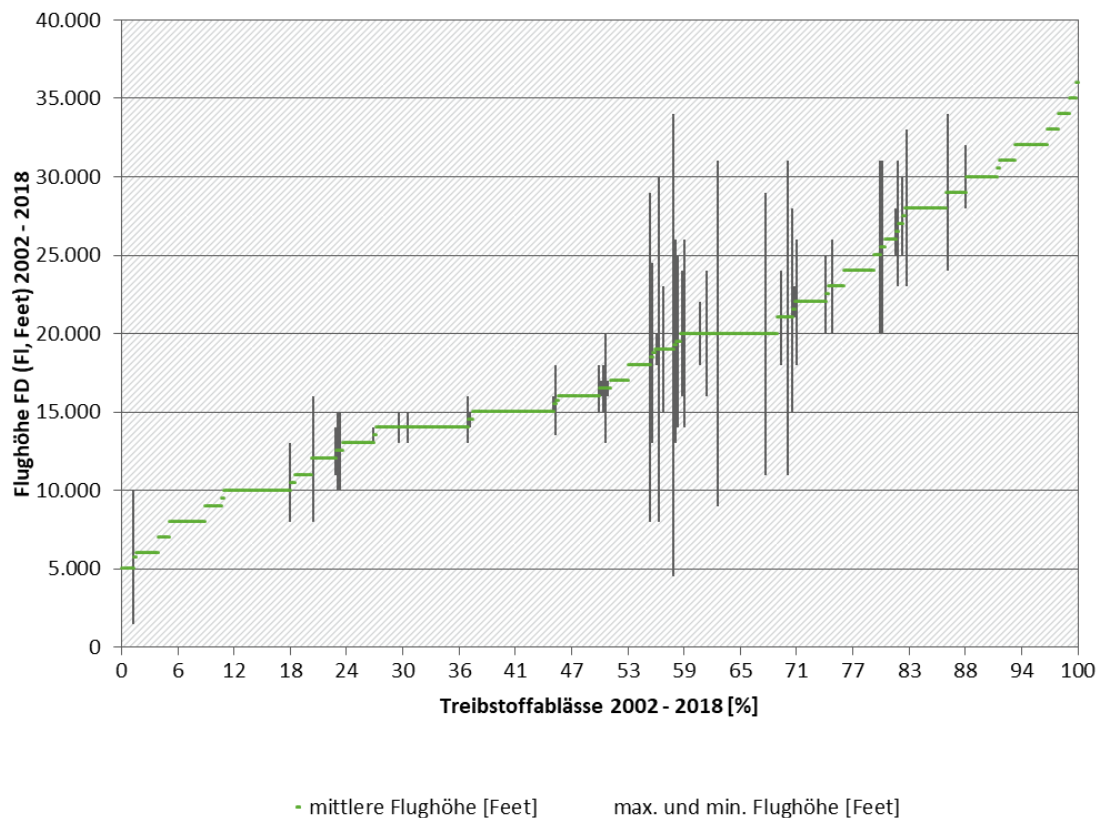
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

4.2.2 Ablasshöhe beim TSA

Im nächsten Schritt wurden die TSA-Daten hinsichtlich der Ablasshöhe (über Erdoberfläche) ausgewertet. Hierzu wurden alle dokumentierten Treibstoffschnellablässe nach der dokumentierten Flughöhe sortiert. Einige TSA erfolgen während Steig- oder Sinkflügen. Die minimalen und maximalen Flughöhen sind in der Abbildung als vertikale rote Striche dargestellt, die mittlere Flughöhe als blaue Punkte.

Die mittlere Flughöhe aller TSA liegt bei 16.500 Fuß. Die Hälfte aller TSA erfolgt zwischen 13.000 und 23.000 Fuß. Nur 11 % aller TSA erfolgten unter 10.000 Fuß, 25 % unter 13.000 Fuß. 15 % aller TSA erfolgt bei 28.000 Fuß oder darüber.

Abbildung 4: Verteilung der Treibstoffablässe in Abhängigkeit von der Höhe (Zeitraum 2002 – Juni 2018)



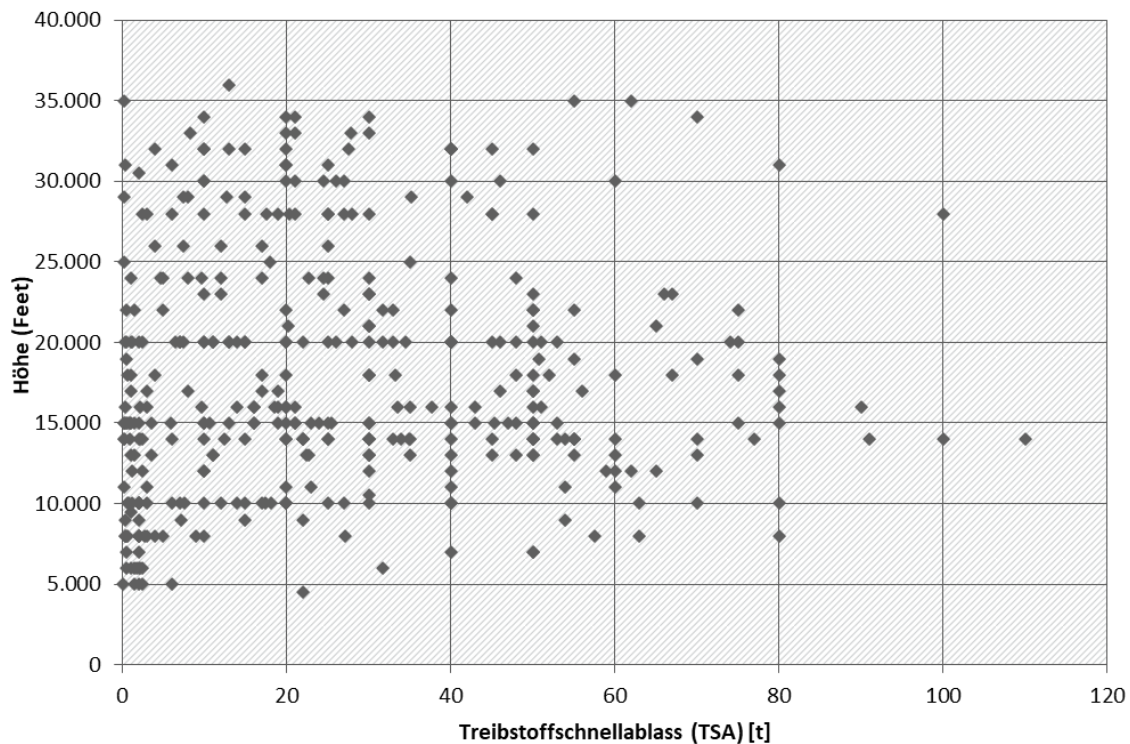
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reonsite – Joswig Ingenieure)

Die abgelassene Treibstoffmenge je TSA variiert von wenigen 100 Litern bis hin zu singulären Ereignissen mit mehr als 80 Tonnen Kerosinablass. Durchschnittlich wurden im Zeitraum 2012 bis Juni 2018 26 Tonnen Kerosin je TSA abgelassen (Abbildung 5).

Vergleicht man die abgelassene Kerosinmenge je TSA mit der mittleren Flughöhe, ergibt die Punkteschar keine klare Korrelation (Abbildung 5).

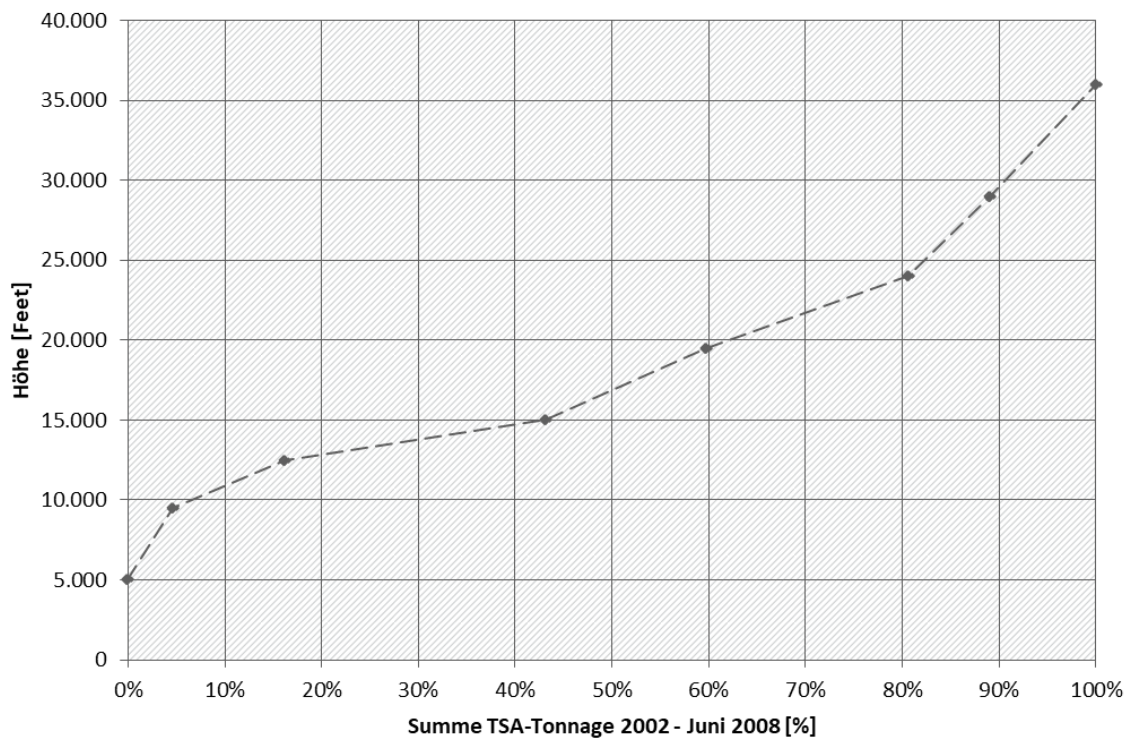
In Abbildung 6 ist die TSA-Menge über die mittlere Flughöhe aufsummiert. Hierbei zeigt sich, dass unterhalb von 10.000 Fuß im Auswertungszeitraum in Summe bis zu 4,7 % der Kerosinmenge abgelassen, unterhalb von 13.000 Fuß rund 17 % abgelassen wurden. Oberhalb von 15.000 Fuß wurden rund 57 % der Kerosinmenge abgelassen, oberhalb von 20.000 Fuß rund 39 % und oberhalb von 24.000 Fuß rund 20 %.

Abbildung 5: Abgelassene Treibstoffmenge in Abhängigkeit von der mittleren Ablasshöhe (Zeitraum 2002 – Juni 2018)



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 6: Summe TSA-Masse in Abhängigkeit von der mittleren Ablasshöhe (Zeitraum 2002 – Juni 2018)



Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

4.2.3 Abschätzung klimatischer Randbedingungen bei TSA

Die während eines TSA vorherrschende Lufttemperatur im Bereich der Ablasshöhe bis hin zum Boden wirkt sich nach dem Ablassvorgang stark auf die Verdunstung der einzelnen Kerosinkomponenten aus. Die Lufttemperatur ist daher ein wesentlicher Parameter für die ggf. am Boden ankommende Präzipitatsmenge, siehe Kapitel 5.

Daher erfolgen Auswertungen zur tages- und jahreszeitlichen Zuordnung von TSA seit 2002.

In den Daten für diese Auswertungen ist der Tag eines TSA, nicht aber die Tageszeit oder die Dauer dokumentiert. Die Zuordnung klimatischer Faktoren wie der Lufttemperatur zu den einzelnen TSA ist daher nur vereinfacht möglich.

Es kann zumeist davon ausgegangen werden, dass vornehmlich Luftfahrzeuge, die kurz nach einem Start einen Notfall haben, ein TSA durchführen (volle Tanks für einen Langstreckenflug). In Deutschland gilt vielerorts für Starts und Landungen ein Nachtflugverbot. Die Regelungen sind für die einzelnen Flughäfen individuell und daher heterogen. Grundsätzlich erfolgen jedoch nachts relativ wenige Starts und Landungen, bzw. insgesamt wenige Flugbewegungen. Entsprechend ist zu erwarten, dass es im ersten Tagesviertel, also etwa zwischen Mitternacht und sechs Uhr morgens, zu nahezu keinen TSA kommt. Dieses erscheint positiv, da es sich hierbei üblicherweise um die kühlsste Tageszeit handelt.

Für eine jahreszeitliche Differenzierung wurden die Treibstoffschnellablässe dem meteorologischen Kalender zugeordnet:

- Winter: Dezember - Februar
- Frühjahr: März - Mai
- Sommer: Juni - August
- Herbst: September - November

Diese Zuordnung erfolgte sowohl für die Anzahl der TSA-Ereignisse als auch für den Anteil der Kerosinmenge im Auswertungszeitraum. Auswertungen erfolgten für den Gesamtzeitraum 2002 - Juni 2018, sowie differenziert für die drei Zeitabschnitte 2002 - 2006, 2007 - 2011 und 2012 - 2018 (siehe Tabelle 3 und Abbildung 7).

Im Gesamtzeitraum 2002 - Juni 2018 stellen sich die TSA in den Jahreszeiten annähernd gleich verteilt dar, sowohl im Hinblick auf die Anzahl der TSA-Ereignisse als auch auf die Kerosinmenge.

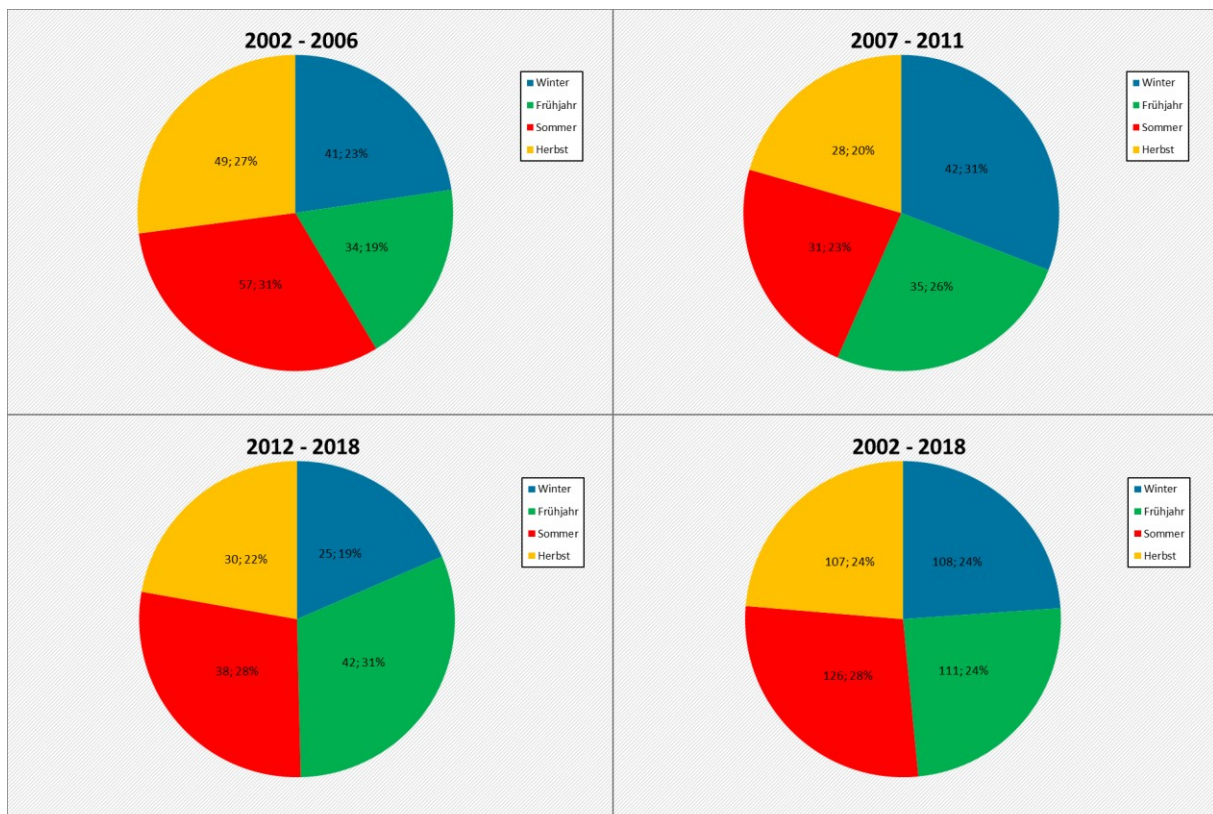
Wenngleich in einzelnen Zeitabschnitten unterschiedliche Jahreszeiten zu dominieren scheinen (2002 - 2006: Sommer, 2007 - 2011: Winter, 2012 - 2018: Frühling-Sommer-Herbst), ließ sich hieraus keine jahreszeitliche Kausalität zu TSA ableiten.

Tabelle 3: Jahreszeitliche TSA: Anzahl der TSA-Ereignisse [%] und Anteil der Kerosin-Masse [%]

	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst
2002 – 2006	23 19	19 21	31 30	27 30
2007 – 2011	31 31	26 29	23 19	20 21
2012 – 2018	19 17	31 27	28 28	22 28
2002 – 2018	24 22	24 25	28 26	24 27

(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 7: Jahreszeitliche Treibstoffschnellablässe über Deutschland (Frühjahr (März - Mai), Sommer (Juni - August), Herbst (Sept. - Nov.), Winter (Dez. - Feb.)), Anzahl der Ablässe [-].



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

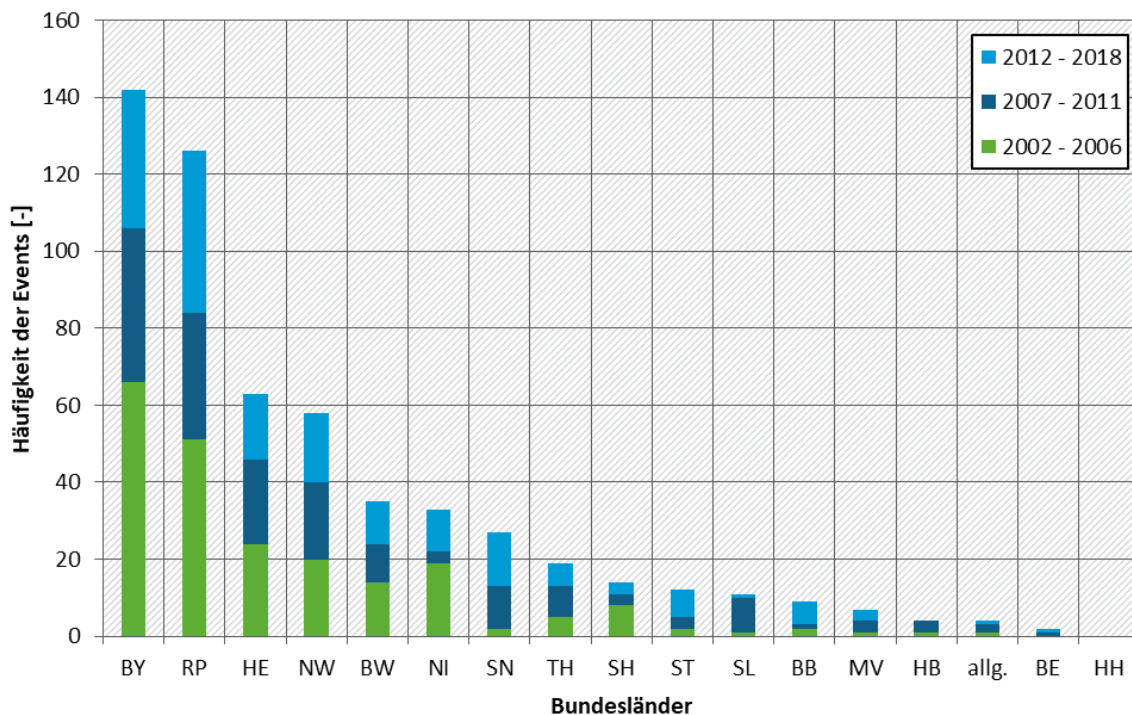
4.2.4 Regionale Verteilung von TSA in Deutschland

Eine nach Bundesländern differenzierte Auswertung und Darstellung der TSA-Häufigkeit im Zeitraum 2002-2018 ist in Abbildung 8 zusammengestellt. Die 4 Bundesländer mit den meisten TSA sind Bayern (BY), Rheinland-Pfalz (RP), Hessen (HE) und Nordrhein-Westfalen (NW).

Die meisten TSA erfolgen nach dem Abflug von den Flughäfen mit internationalem und transkontinentalem Flugverkehr, da fast ausschließlich bei Langstreckenflugzeugen ein TSA technisch möglich ist und zudem die Flugzeuge kurz nach dem Start durch das noch nicht verflogene Kerosin so schwer sind, dass ein TSA als Notfallmaßnahme in Betracht kommt.

Hierzu zählen maßgeblich Frankfurt/Main (Hessen), München (Bayern), Köln-Bonn (Nordrhein-Westfalen) und als zentrales militärisches Drehkreuz der amerikanischen Streitkräfte in Europa Ramstein (Rheinland-Pfalz).

Abbildung 8: Häufigkeit der Treibstoffschnellablässe in den einzelnen Bundesländern



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reonsite - Joswig Ingenieure)

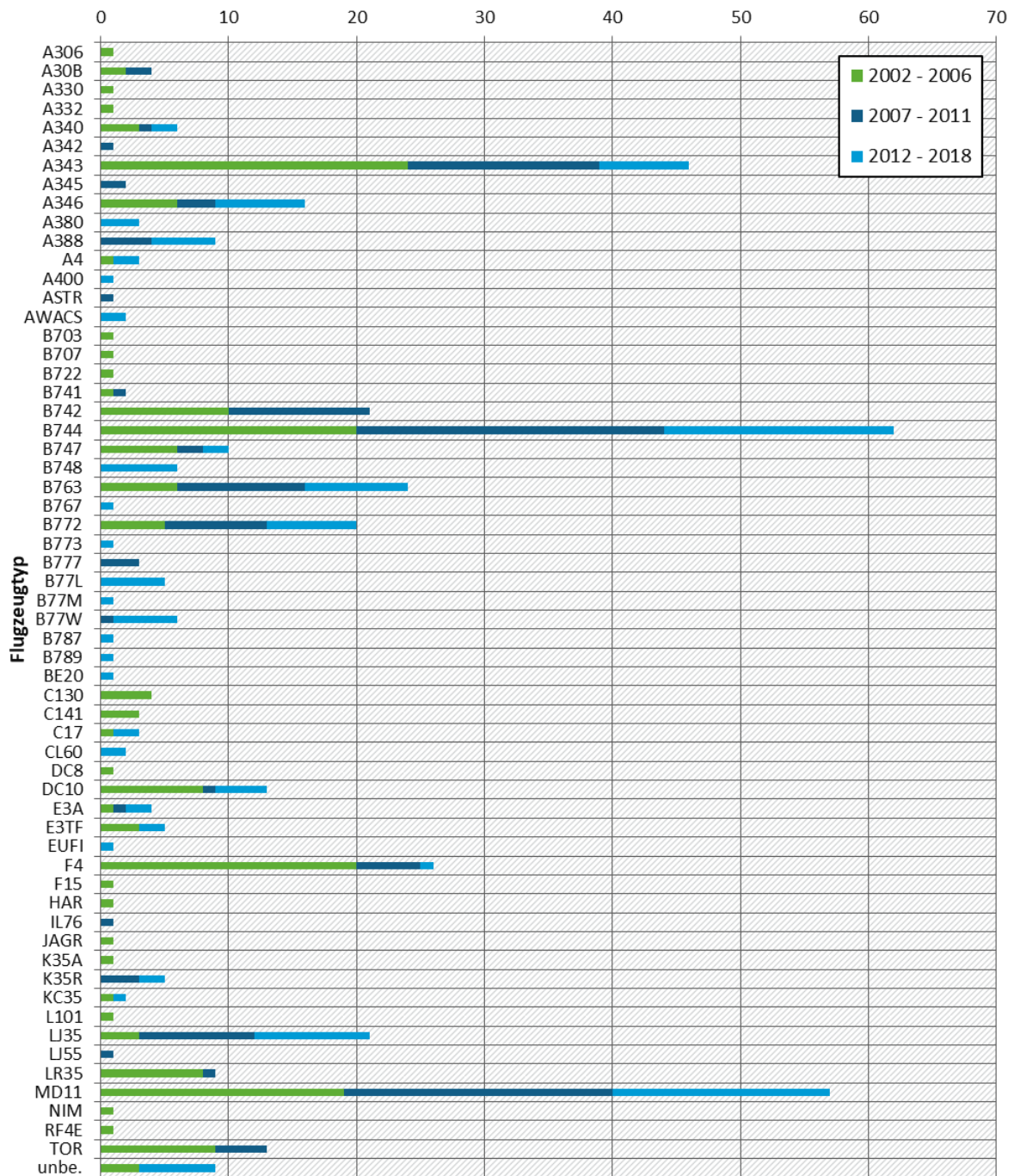
4.2.5 Verteilung der TSA auf Flugzeugtypen

Die Verteilung der TSA-Ereignisse auf unterschiedliche Flugzeugtypen ist in Abbildung 9, die abgelassene Kerosinmenge pro Flugzeugtyp in Abbildung 10, jeweils für den Zeitraum 2002 - 2018, dargestellt.

Sowohl bei der Häufigkeit der TSA als auch bei der abgelassenen Kerosinmenge dominieren die Flugzeugtypen B744 (Boeing), MD11 (McDouglas) und A343 (Airbus). Eine Recherche, welchen Marktanteil diese Flugzeugtypen in den jeweiligen Zeitabschnitten hatten, ist nicht Gegenstand dieser Studie.

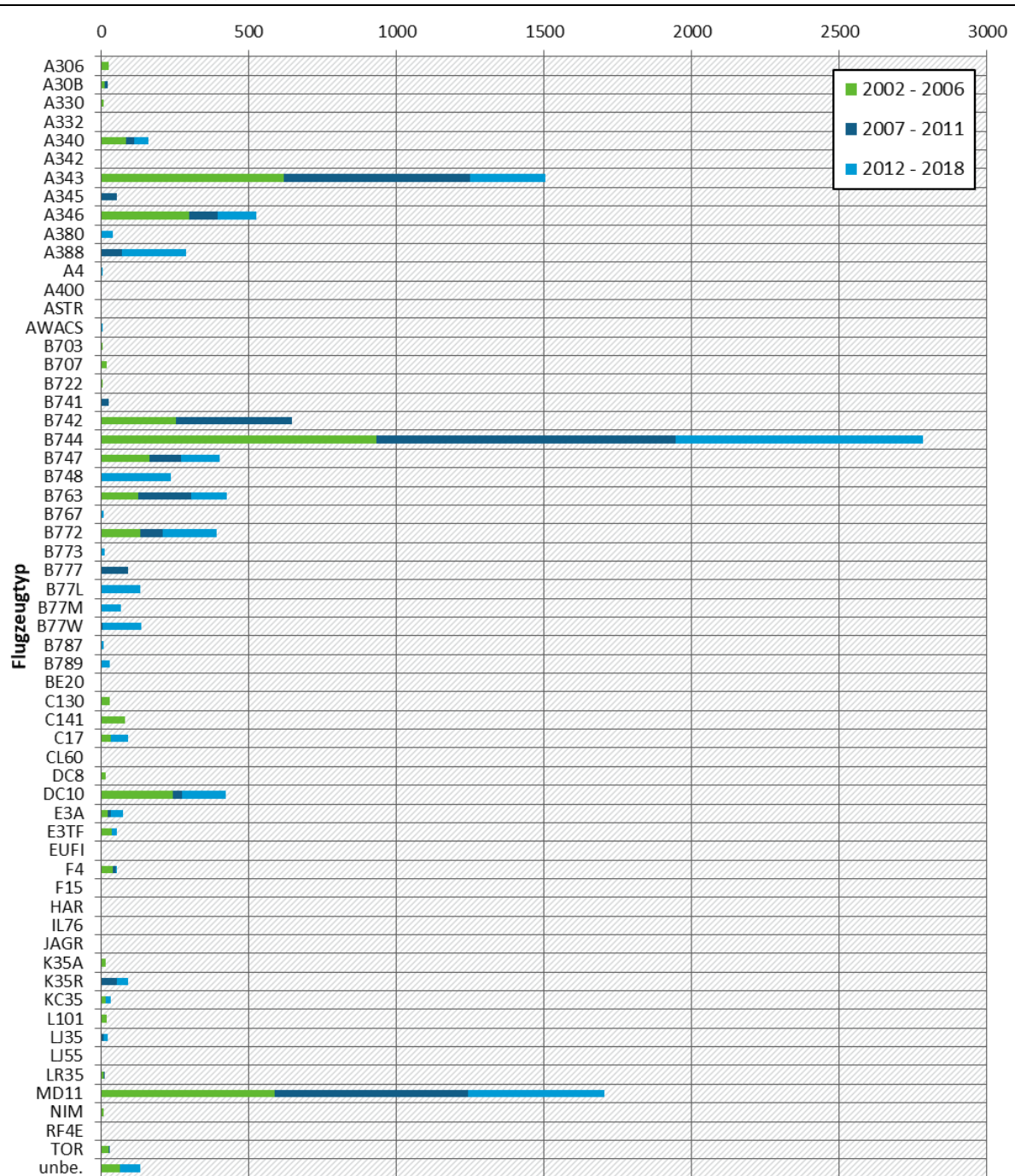
Der Rückgang der TSA durch den militärischen Kampfjet F4 ab 2006 ist auf die Außer-Dienst-Stellung dieses Flugzeugtyps zurückzuführen. Die vom Flugzeugtyp F4 abgelassenen Kerosinmengen sind bei der Gesamtbetrachtung der Kerosinablässe über Deutschland nahezu vernachlässigbar (Abbildung 10).

Abbildung 9: Treibstoffschnellablässe nach Flugzeugtyp (Häufigkeit, Zeitraum 2002 - 2018)



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 10: Treibstoffschnellablässe nach Flugzeugtyp (abgelassene Menge, Zeitraum 2002 - 2018)



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

5 Konzept und Aufbau der Numerischen Modellierungen von Treibstoffschnellablässen

5.1 Auswertung der Literatur

Zur Auswahl eines geeigneten Berechnungsansatzes zur Modellierung von Treibstoffschnellablässen wurden im ersten Schritt eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt und mehr als 20 Veröffentlichungen zur Modellierung von TSA ausgewertet. 1959 wurde ein erstes Berechnungsverfahren beschrieben (Lowell, 1959) und bis in die 80er und 90er Jahre weiterentwickelt (Clewell III, 1980) (Clewell III, 1983) (Pfeiffer, 1994) (Todd, 1995).

Numerische Modelle, bei denen Datenauswertungen von Feldexperimenten mit TSA durchgeführt wurden und schrittweise in die Modellentwicklung einfließen, liegen im Wesentlichen nur bei zwei Studien vor:

- ▶ (Cross und Picknett, 1973),
- ▶ (Clewell III, 1980)

Die ausgewerteten Studien berechnen die Verdunstungs- und Verteilungsprozesse jeweils mit 2 Modellkomponenten: einem Tröpfchen- sowie einem Advektions- und Dispersionsmodell (im Folgenden kurz Dispersionsmodell genannt). Bei dem Tröpfchenmodell werden Verdunstung und Falldauer eines einzelnen Treibstoff-Tröpfchens ab dem Zeitpunkt der Emission beim Treibstoffschnellablass berechnet. Hierbei ist, neben der Tröpfchenoberfläche, die Temperaturverteilung in der Atmosphäre ein wichtiger Parameter. Bei dem Dispersionsmodell erfolgt eine Abschätzung der flächigen Konzentrationsverteilung am Boden entlang der Flugstrecke des TSA-Vorgangs. Hierbei sind die Ablasshöhe sowie die Windgeschwindigkeit und -richtung und damit die daraus resultierende advektive und disperse Verteilung der Tröpfchen wichtige Parameter.

Seit den 1980er Jahren wurden diese Berechnungsansätze nicht mehr grundlegend weiterentwickelt oder durch praktische Versuchsreihen weitergehend plausibilisiert. Nach Durchsicht der bestehenden Literatur zu Berechnungsansätzen von TSA liefern diese eine ausreichende Grundlage für das Nachvollziehen der Prozesse. Für eine direkte Nachberechnung für verschiedene Szenarien wurde auf dieser Basis ein eigenständiges Modell erstellt.

5.2 Ziele der Modellberechnungen

Unter Berücksichtigung früherer Modellbetrachtungen, z. B. (Clewell III, 1980; Clewell III, 1983; Pfeiffer, 1994; Todd, 1995) zu den physikalischen und fluiddynamischen Abläufen nach dem Treibstoffschnellablass wurde im Zuge dieses Projektes ein eigenständiges numerisches Modell mit Hilfe der Software Matlab erstellt.

Die Ziele der Modellberechnungen sind:

- ▶ Nachberechnung und Bestätigung der bestehenden Modellansätze (entspricht quasi einer Validierung der Modelle aus den Literaturangaben),
- ▶ Anwendung des Modells auf 4 definierte TSA-Szenarien sowie Durchführung weiterer, vergleichender Modellberechnungen.

► Verwendung der Modellergebnisse für die weitere Bewertung von TSA

Die mit dem Modell berechneten Konzentrationen bilden die Grundlage für die Bewertung der am Boden ankommenden Präzipitat-Konzentrationen nach Treibstoffschnellablässen für die Umweltkompartimente bodennahe Luft, Boden, (Grund-)Wasser sowie die öko- und humantoxikologische Relevanz anhand belastbarer und reproduzierbarer Modellergebnisse.

Das Modell wurde in der vorliegenden Studie nicht für real stattgefundene TSA-Einzelereignisse angewendet, sondern es wurden insgesamt 4 Szenarien für die Modellberechnungen definiert (s. Kapitel 6.1). Darüber hinaus wurden vergleichende Modellberechnungen durchgeführt (s. Kapitel 6.2.3). Die Eingangsdaten der 4 Szenarien wurden, auch aufgrund der Datenlage, soweit möglich konservativ festgelegt, um bei der späteren Bewertung auf der sicheren Seite zu sein (Dies entspricht dem worst-case-Ansatz, Details dazu s. Kapitel 6.1). Die Auswertung der Modellergebnisse erfolgt in Kapitel 6.2.

Bevor auf die Berechnungsszenarien weiter eingegangen wird, erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln zunächst eine nähere Beschreibung des Modells an sich.

5.3 Konzept des Modellaufbaus

Das im Rahmen dieser Studie entwickelte Modell besteht aus zwei Hauptkomponenten, welche auf in der Literatur beschriebenen Berechnungsansätzen basieren:

► Hauptkomponente 1: Tröpfchenmodell

(basierend auf (Clewell III, 1980)): Im Tröpfchenmodell werden schrittweise der Weg und die Verdunstung eines beim Treibstoffschnellablass abgegebenen einzelnen Kerosintröpfchens durch die Atmosphäre berechnet. Die Berechnung erfolgt in Abhängigkeit von Randbedingungen wie der Ablasshöhe, der Zusammensetzung des Treibstoffgemisches aus den Einzelkomponenten, dem initialen Tröpfchendurchmesser, der Geschwindigkeit des Flugzeugs und der Lufttemperatur. Als Ergebnis des Tröpfchenmodells wird die am Boden ankommende Zusammensetzung der nicht verdunsteten Kerosinbestandteile (Präzipitat) ausgegeben.

► Hauptkomponente 2: Dispersionsmodell

(basierend auf (Pfeiffer, 1994)): Mit Hilfe eines Advektions- und Dispersionsmodells (kurz Dispersionsmodell) werden die Ergebnisse aus dem Tröpfchenmodell von einem Tröpfchen auf die gesamte abgelassene Kerosinmenge und deren flächige Verteilung umgerechnet. Dabei wird auf Basis eines statistischen Ansatzes (Gauß'sche Normalverteilung) die räumliche Konzentrationsverteilung des Treibstoffgemischs modelliert, welche den Boden erreicht.

Auch wenn die bestehenden numerischen Berechnungsansätze aus heutiger Sicht und im Vergleich zu 3d-physikalisch-fluiddynamischen Aerosol-Modellen einfach erscheinen, stellen sie doch eine verlässliche, auf physikalischen Gesetzen und empirisch gefundenen Zusammenhängen basierende Berechnungsgrundlage dar. Selbst für diese einfachen numerischen Ansätze sind zahlreiche Eingangs-Parameter sowie die jeweilige Bandbreite der entsprechenden Wertebereiche zu definieren oder - wenn keine Daten vorliegen - innerhalb sinnvoller Wertebereiche abzuschätzen.

Der Aufbau eines eigenständigen Modells (statt der Verwendung der in der Literatur beschriebenen Modell-Ergebnisse) bietet folgende Vorteile:

- Berechnung von definierten TSA-Szenarien, Auswertung der Modellergebnisse und anschauliche Darstellung der Ergebnisse,
- Effiziente Durchführung verschiedener Berechnungen,
- Möglichkeit zur Durchführung von Sensitivitätsbetrachtungen, um die Auswirkungen einzelner Eingangsparameter auf das Ergebnis zu überprüfen,
- nach Vorlage ausreichender Eingangsdaten ist auch die Berechnung der Verdunstung von Treibstoffen mit einer anderen chemischen Zusammensetzung möglich,
- Das eigenständige Modell kann - nach Vorlage entsprechender Daten und Entwicklung des Prozessverständnisses - um weitere Teilprozesse ergänzt werden oder die berechneten Teilprozesse in detaillierter Form in das Modell implementiert werden (nicht Bestandteil des vorliegenden Berichtes).

Die beiden Hauptkomponenten des Modells - das Tröpfchenmodell und das Dispersionsmodell - werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

5.4 Aufbau des Modells

Die nachfolgende Beschreibung der beiden Hauptkomponenten des Modells ist zum besseren Verständnis vergleichsweise einfach gehalten. Es werden die für das Verständnis des Modells wichtigen Zusammenhänge textlich erläutert. Physikalische Details werden nur beschrieben, soweit sie für das Grundverständnis des Modells erforderlich sind.

Die Details der Berechnungen, sowie deren mathematische und physikalische Herleitungen sind in der technischen Modelldokumentation (siehe Anhang C) beigefügt. Hier sind alle verwendeten Gleichungen und Modellansätze detailliert beschrieben.

5.4.1 Ein- und Ausgabedaten

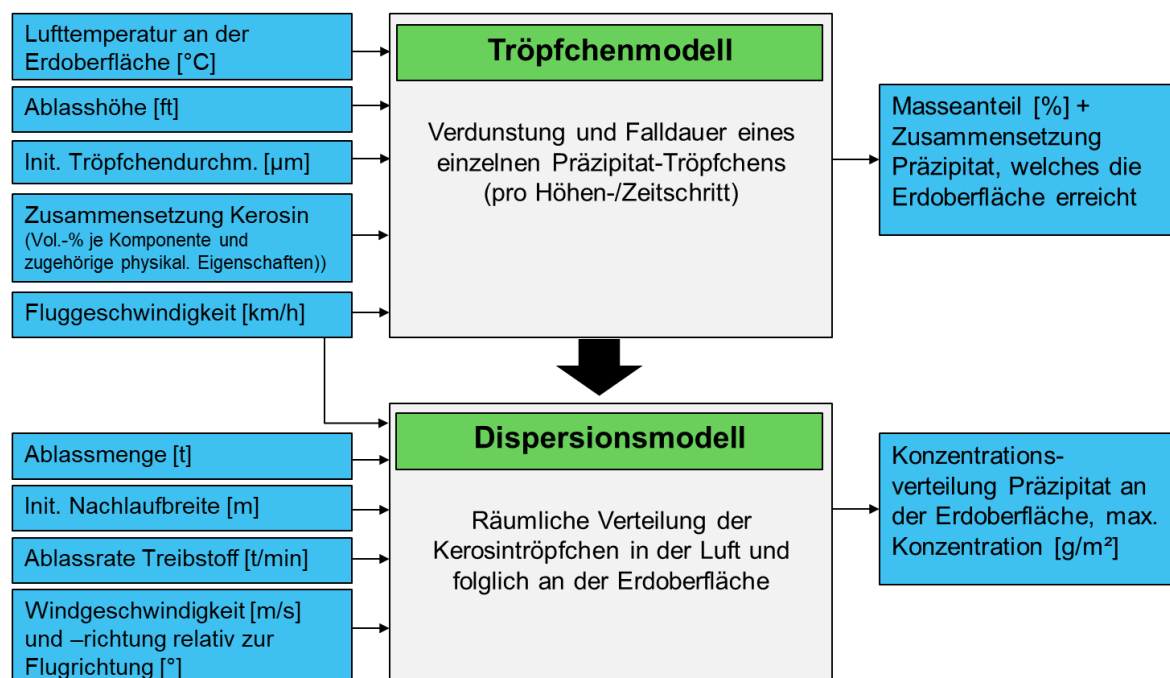
Die wichtigsten Eingabedaten des TSA-Modells sind in Abbildung 11 auf der linken Seite, die wichtigsten Ausgabedaten (Modellergebnisse) auf der rechten dargestellt.

Die für die in der vorliegenden Studie durchgeführten Berechnung verwendeten Eingangsdaten sind in Kapitel 6.1 dargestellt. Anhand der konkreten Szenarien werden die Eingangsdaten dort auch näher beschrieben.

Die wesentlichen Ausgabedaten (Ergebnisse) des TSA-Modells sind (vgl. Abbildung 11):

- Zusammensetzung der bei Erreichen der Erdoberfläche noch nicht verdunsteten Kerosinbestandteile (Präzipitat) sowie deren Masse- bzw. Volumen-% in Bezug auf die ursprüngliche Kerosinzusammensetzung (Ergebnis des Tröpfchenmodells),
- Flächige Verteilung des Präzipitats bei Erreichen der Erdoberfläche in g/m^2 (Ergebnis des Dispersionsmodells).

Abbildung 11: Vereinfachter Aufbau des TSA-Modells mit den wichtigsten Eingangsdaten (links) und Ausgabedaten (rechts)



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

5.4.2 Erläuterung 1. Hauptkomponente: Tröpfchenmodell

Im Tröpfchenmodell wurden der Durchmesser und die stoffliche Zusammensetzung eines Kerosintröpfchens beim Fall durch die Atmosphäre nach einem Treibstoffschnellablass mit dem Modell rechnerisch nachvollzogen. Das Tröpfchenmodell basiert maßgeblich auf einer Veröffentlichung von Clewell (Clewell III, 1980).

Als Modellgemisch wurden 27 repräsentative Einzelbestandteile eines Treibstoffgemisches ausgewählt. Die verwendete Treibstoffzusammensetzung ist in

Tabelle 4 zusammen mit den jeweiligen für die Modellberechnungen verwendeten physikalischen Eigenschaften dargestellt. Für jeden Einzelbestandteil wurde dessen jeweilige Verdunstung in Abhängigkeit u.a. von der höhenabhängigen Umgebungstemperatur und der Oberfläche des Tröpfchens während des Falls zur Erdoberfläche berechnet.

Folgende wesentlichen Prozesse, die beim Fall eines Tröpfchens durch die Atmosphäre stattfinden, wurden im Modell berücksichtigt:

- ▶ Freier Fall des Tröpfchens, u.a. unter Berücksichtigung des Luftwiderstandes und der sich jeweils ändernden Tröpfchengröße aufgrund des Verdunstungsprozesses,
- ▶ Verdunstung: ein Teil der Treibstoff-Einzelbestandteile verdunstet, bevor diese die Erdoberfläche erreichen. Die Berechnung der Verdunstung ist ein vielschichtiger Prozess, da jeder Einzelbestandteil unterschiedlich schnell in Abhängigkeit der Lufttemperatur und weiterer Randbedingungen verdunstet. Wenngleich die Verdunstung bei höheren Lufttemperaturen deutlich schneller abläuft, findet auch bei geringen Temperaturen (um 0°C) noch eine Verdunstung einiger Kerosinbestandteile statt.

Tabelle 4: Treibstoffzusammensetzung des Modellgemischs (Jet-A1)

Bestandteil	Volumenanteil [%]	Molekülmasse [g/mol]	Siedetemperatur [°C]	Dichte bei 20°C [kg/m³]
C8 Paraffine	0,30	114,2	117,95	700
C8 Cycloparaffine	0,20	112,2	123,95	780
C8 Aromaten	0,10	106,2	138,95	870
C9 Paraffine	2,40	128,3	141,95	720
C9 Cycloparaffine	1,50	126,2	153,95	800
C9 Aromaten	1,00	120,2	164,95	880
C10 Paraffine	5,60	142,3	159,95	860
C10 Cycloparaffine	3,50	140,3	170,95	800
C10 Aromaten	2,30	134,2	176,95	750
C11 Paraffine	8,70	156,3	195,95	740
C11 Cycloparaffine	3,30	154,3	195,95	800
Dicycloparaffine	3,10	152,3	200,95	890
C11 Aromaten	3,60	148,2	204,95	860
C12 Paraffine	10,80	170,3	215,95	750
C12 Cycloparaffine	8,00	166,3	220,95	880
C12 Aromaten	4,60	162,3	215,95	860
C13 Paraffine	11,50	184,4	234,95	760
C13 Cycloparaffine	8,50	182,4	224,95	800
C13 Aromaten	4,90	176,3	233,95	870
C14 Paraffine	5,90	198,4	253,95	760
C14 Cycloparaffine	4,40	192,4	289,95	940
C14 Aromaten	2,50	186,3	294,95	1030
C15 Paraffine	1,40	212,4	270,95	770
C15 Cycloparaffine	1,00	206,4	299,95	900
C15 Aromaten	0,60	200,4	304,95	950
C16 Kohlenwasserstoffe	0,20	226,4	286,95	770
Residuale Kohlenwasserstoffe	0,10	202,3	392,95	1270

Quelle: (Clewell III, 1983)

Direkt in den ersten Sekunden nach dem Treibstoffschnellablass finden einige physikalische Prozesse vergleichsweise schnell statt, z. B. die Verdunstung von besonders flüchtigen Einzelbestandteilen. Die stoffliche Zusammensetzung des freigesetzten Kerosin-Tröpfchens ändert sich somit derartig schnell, dass es sich bei dem Tröpfchen schon kurz nach dem Eintritt in die Atmosphäre nicht mehr um Kerosin, sondern um Präzipitat (also ein chemisches Gemisch aus den noch nicht verdunsteten Kerosin-Restbestandteilen des freigesetzten Kerosin-Tröpfchens) handelt. Um diese Prozesse im Modell möglichst präzise abzubilden, berechnet das Modell den Weg des Tröpfchens in sehr kleinen Zeitschritten (anfänglich in Millisekunden).

Für jeden Zeitschritt werden im Tröpfchenmodell nacheinander folgende Berechnungsschritte ausgeführt:

1. Im ersten Berechnungsschritt werden für jeden Zeitschritt die atmosphärischen Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur, Luftdruck, Dichte der Luft, dynamische Viskosität der Luft) errechnet. Hierfür wurde eine lineare Temperaturabnahme mit der Höhe von $-6,5 \text{ K/km}$ (entsprechend der ICAO-Standardatmosphäre) angenommen. Wenn an der Erdoberfläche beispielsweise eine Temperatur von 10 °C herrscht, liegt die Temperatur in einer Höhe von 5.000 ft (1.524 m) bei $0,1 \text{ °C}$.
2. Im zweiten Berechnungsschritt werden die physikalischen Tröpfcheneigenschaften wie Masse, Dichte, Volumen, Durchmesser, Temperatur und Fallgeschwindigkeit errechnet. Diese sind im 1. Zeitschritt (direkt nach dem Treibstoffschnellablass) festgelegt, für alle weiteren Zeitschritte ergeben sich die physikalischen Tröpfcheneigenschaften aus der Verdunstungsrate bzw. Abkühlungsrate des vorangegangenen Zeitschritts. Die Fallstrecke eines Tröpfchens errechnet sich dann aus dem Produkt seiner Geschwindigkeit und dem betrachteten Zeitintervall.
3. Im dritten Berechnungsschritt des Tröpfchenmodells wird die Verdunstung des Präzipitat-Tröpfchens betrachtet. Hierfür wird die Verdunstung jedes Einzelbestandteils des Präzipitat-Tröpfchens einzeln in Abhängigkeit der Temperatur und weiterer Randbedingungen berechnet.
4. Im vierten und letzten Berechnungsschritt des Tröpfchenmodells wird die Temperaturänderung, bzw. die Abkühlung des Präzipitat-Tröpfchens, mit Hilfe einer Energiebilanz berechnet. Die Temperatur, die Masse und der Ort eines Präzipitat-Tröpfchens werden für den Start des nächsten Zeitschrittes in der Berechnung aktualisiert.

5.4.3 Erläuterung 2. Hauptkomponente: Dispersionsmodell

Die Ergebnisse des Tröpfchenmodells dienen als Eingangsdaten für das Dispersionsmodell. Mit Hilfe des Dispersionsmodells wird die räumliche Verteilung des Präzipitats berechnet, welches an der Erdoberfläche ankommt. Das Dispersionsmodell basiert im Wesentlichen auf einer Veröffentlichung von (Pfeiffer, 1994). Dabei werden die horizontale Tröpfchenbewegung (Advektion) und die statistisch begründete Verteilung der Tröpfchen (Dispersion) rechnerisch überlagert:

- **Advektion:** Unter Advektion wird die horizontale Verlagerung des Präzipitat-Tröpfchens während des Falls bis zum Erreichen der Erdoberfläche verstanden. Die Berechnung der Advektion hat keinen Einfluss auf die am Boden ankommende Präzipitat-Konzentration, sondern berechnet unter Berücksichtigung der Flugzeuggeschwindigkeit sowie der mittleren Windgeschwindigkeit und Windrichtung den Ort, an dem die Präzipitat-Tröpfchenwolke den Boden erreicht.

- Dispersion: Die Dispersion beschreibt die Konzentrationsverteilung des Präzipitats innerhalb der Tröpfchenwolke. Mit Hilfe der Dispersionsberechnung findet eine vereinfachte Berechnung von Vorgängen in der Atmosphäre statt, welche schließlich zu einer Konzentrationsverteilung der Präzipitat-Wolke an der Erdoberfläche führt. Die Verteilung des an der Erdoberfläche ankommenden Präzipitats wird dabei in Form einer Gauß'schen Glockenkurve vereinfacht angesetzt. Mit Hilfe des Dispersionsmodells werden die maximalen Konzentrationen in der Mitte der Verteilungskurve und die zum Rand hin abnehmenden Konzentrationen berechnet.

Das Dispersionsmodell basiert generell auf einer vereinfachten Abschätzung der während des freien Falls in der Atmosphäre stattfindenden Vorgänge. Die Advektions- und Dispersionsvorgänge sind sehr komplex und hängen von den jeweiligen meteorologischen Bedingungen vom Boden bis hin zur Ablasshöhe ab (beispielsweise der Windgeschwindigkeit und -richtung pro Höhenschritt). Daher können bei Betrachtung eines konkreten Treibstoffschnellablasses der Ort des Auftreffens der Präzipitat-Wolke und die Konzentrationsverteilung stark von möglichen Berechnungsergebnissen abweichen.

Die Berechnung der räumlichen Verteilung der Tröpfchenwolke erfolgt, ähnlich des Vorgehens beim Tröpfchenmodell, in definierten Intervallen (Höhen). In jedem Höhen-Intervall werden folgende Berechnungsschritte ausgeführt:

1. Initialisierung und Berechnung sowie Festlegung der Startparameter und Randbedingungen aus den vorgegebenen Modellparametern: Im ersten Schritt werden die Berechnungsergebnisse des Tröpfchenmodells eingelesen. Dann werden aus den vorgegebenen Modellparametern die initiale (also zu Beginn der Berechnung) festgelegte Form der Präzipitat-Wolke berechnet. Es wird dazu ein lokales Koordinatensystem festgelegt, dessen x-Richtung in Flugrichtung und dessen y-Richtung quer zur Flugrichtung definiert wird. Die Länge der initialen Präzipitat-Wolke in Flugrichtung ergibt sich aus der Ablassrate (Tonnen Kerosin pro Minute), der insgesamt abgelassenen Kerosinmasse und der Flugzeuggeschwindigkeit. In den meisten Fällen ergibt sich daraus eine initiale Länge der Präzipitat-Wolke von 50 bis zu mehreren 100 km. Vereinfacht wird angenommen, dass die initiale Konzentrationsverteilung quer zur Flugrichtung einer Normalverteilung entspricht, deren Standardabweichung aus der festgelegten initialen Nachlaufbreite abgeleitet wird (siehe Anhang C.3.2).
2. Berechnung der Advektion: Hierbei wird die horizontale Verlagerung der Präzipitat-Tröpfchen während des Falls bis zum Erreichen der Erdoberfläche berechnet. Für die Berechnung wird die horizontale Geschwindigkeit der Präzipitat-Tröpfchen in und quer zur Flugrichtung in jedem Höhenintervall bestimmt. Die Präzipitat-Tröpfchen werden kurz nach dem Ablassen von der Fluggeschwindigkeit des Flugzeuges auf die vorherrschende Windgeschwindigkeit abgebremst. Die Falldynamik der Präzipitat -Tröpfchen wird neben der Windgeschwindigkeit von der Windrichtung, welche relativ zur Flugrichtung angegeben wird, dominiert. Das heißt, bei einer Windrichtung von 0° zur Flugrichtung entspricht die mittlere Windrichtung der Flugrichtung („Rückenwind“). Eine Windrichtung von 90° bedeutet, dass der Wind im Mittel quer zur Flugrichtung weht (Seitenwind).
3. Die Dispersionsvorgänge wurden mit einer vereinfachten Form der Fick'schen Diffusions-Gleichung berechnet. Die Modellparameter wurden aus den vorliegenden Literaturwerten (Pfeiffer, 1994) übernommen. Durch den Einfluss der Dispersion ergibt sich eine Verbreiterung der Präzipitat-Wolke im Vergleich zur initial festgelegten Nachlaufbreite zu Beginn des Treibstoffschnellablasses, sowie eine Reduktion der Maximalkonzentration in der Mitte der Tröpfchenwolke. Im Rahmen der in diesem Bericht beschriebenen

Modellberechnungen wurde ein konstanter Diffusionskoeffizient in - beziehungsweise quer - zur Flugrichtung angenommen. Das Modell erlaubt jedoch in jedem Berechnungsschritt eine Anpassung des Diffusionskoeffizienten, was in weiterführenden, komplexeren Betrachtungen (z.B. Berücksichtigung von Inversionswetterlagen) hilfreich sein kann.

4. Die jeweils getrennt berechneten Vorgänge der Advektion und Dispersion je Berechnungsintervall werden anschließend überlagert und somit letztendlich die Konzentrationsverteilung des Präzipitats am Boden berechnet. In die spätere Bewertung geht dabei die maximale Konzentration ein, welche sich in der Mitte der Präzipitat-Verteilung einstellt.

5.4.4 Modellannahmen und -limitierungen

Da es sich bei dem Modell um eine vereinfachte Abbildung der nach dem Treibstoffschnellablass ablaufenden komplexen physikalischen Prozesse handelt, müssen an einigen Stellen Vereinfachungen und Modellannahmen getroffen werden. Diesen liegt meist ein konservativer (worst-case) Ansatz zu Grunde. Die wichtigsten Modellannahmen sind folgende:

- ▶ Der Fall eines Präzipitat -Tröpfchens wird unabhängig vom Fall anderer Präzipitat-Tröpfchen betrachtet. Kollisionen, Vereinigungen und Zerteilungen von Tröpfchen werden nicht betrachtet. Interaktionen von Tröpfchen mit Regentropfen, Schneeflocken oder anderen Partikeln in der Luft werden nicht betrachtet.
- ▶ Die Form eines Treibstoff-Tröpfchens wird als ideale Kugel festgelegt,
- ▶ Mit dem Modell wird ausschließlich die flüssige Präzipitat-Masse (Flüssigphase) betrachtet. Die verdunstete Masse (Gasphase) des freigesetzten Präzipitat-Tröpfchens wird nach dem Verdunstungsprozess dem Modell bilanztechnisch entzogen und somit im Modell nicht weiter betrachtet.
- ▶ Verwirbelungseffekte unmittelbar nach dem Flugzeug (Wirbelschleppe, Wake Effects) werden im Tröpfchenmodell vernachlässigt und im Dispersionsmodell indirekt über die Annahme einer initiale Nachlaufbreite berücksichtigt.
- ▶ Initiale Konzentrationsverteilungen (d.h. unmittelbar nach dem TSA) quer zur Flugrichtung werden vereinfacht mit einer Normalverteilung dargestellt.
- ▶ Die atmosphärische Temperaturabnahme mit steigender Höhe über der Erdoberfläche wird mit einem linearen vertikalen Temperaturgradienten von 6,5 K/km abgebildet. Thermik-Effekte werden im Rahmen dieser Modellierung nicht berücksichtigt, mögliche erhöhte Temperaturkurven (z.B. Inversionswetterlagen), die zu einer erhöhten Verdunstung des Präzipitats führen würden, wurden vernachlässigt (konservativer Ansatz).
- ▶ Die Ergebnisse des Tröpfchenmodells dienen als Eingangsdaten für das Dispersionsmodell. Es findet danach keine Rückkopplung vom Dispersionsmodell zum Tröpfchenmodell statt.
- ▶ Für die Treibstoffzusammensetzung Jet A-1 wird die von Clewell (Clewell III, 1983) verwendete Modellzusammensetzung für JP-8 verwendet, da diese weitgehend identisch sind (s. auch Erläuterung im nachfolgenden Abschnitt 5.4.5).

Weitere Modellannahmen und -limitierungen sind in der Modellbeschreibung in Anhang 1 zu finden.

5.4.5 Anmerkung zur Modell-Kerosinzusammensetzung für Jet A-1

In der zivilen Luftfahrt wird größtenteils Jet A-1 als Treibstoff verwendet, welches weitgehend dem militärisch genutzten JP-8 entspricht. Die Zusammensetzung des Kerosins hat einen Einfluss auf die Verdunstung entlang des Fallweges: Je mehr leichtflüchtige Bestandteile das Kerosin enthält, desto mehr Kerosinbestandteile verdunsten, bevor das Präzipitat-Tröpfchen den Boden erreicht.

Die Zusammensetzung von Kerosin unterliegt großen Schwankungen, die sich unter anderem aus der Rohölqualität und der jahreszeitlich abhängigen Zugabe von Additiven ergeben. Somit kann sich die Kerosinzusammensetzung von Flughafen zu Flughafen deutlich unterscheiden. Es sind zwar Kriterien bezüglich der physikalisch-chemischen Eigenschaften des Kerosins vorgegeben, diese beziehen sich aber größtenteils auf das Substanzgemisch und nicht auf die Einzelkomponenten des Kerosins. Anforderungen an die prozentuale Zusammensetzung des Kerosins aus den Einzelkomponenten sind dagegen nur innerhalb größerer Spannweiten definiert. Es ist somit nötig, eine Modell-Zusammensetzung für Kerosin zu definieren, welche als Eingangsparameter für das Modell verwendet wird. Für die im Modell verwendete Zusammensetzung des Kerosins sind für jede Komponente der Volumenanteil, das Molekulargewicht (synonym für Molekülmasse), der Siedepunkt sowie die Dichte bei 20 °C erforderlich. Aufgrund der großen Schwankungen der Zusammensetzung lassen sich nach Auswertung der Literaturrecherche keine verlässlicheren Daten ableiten, als dies für die bisherigen Modelle bereits durchgeführt wurde. Im Modell wurde somit die Modell-Kerosinzusammensetzung nach (Clewell III, 1983) verwendet.

5.5 Nachberechnungen der dokumentierten Modellergebnisse nach Clewell und Pfeiffer

Mit Hilfe der Software Matlab wurden die einzelnen Ansätze, bzw. die einzelnen Berechnungsschritte der beiden Hauptkomponenten Tröpfchenmodell und Dispersionsmodell schrittweise in das Modell implementiert. Dabei wurden die Zeitschritte soweit angepasst, dass die zahlreichen Modellläufe stabil und effizient durchgeführt werden konnten.

Zuerst wurde das Tröpfchenmodell erstellt. Mit Hilfe des Tröpfchenmodells wurden zunächst die dokumentierten Ergebnisse des Tröpfchenmodells von Clewell, soweit möglich, nachberechnet und verifiziert. In einem weiteren Arbeitsschritt wurden umfassende Testberechnungen verschiedener Modellszenarien durchgeführt, um Sensitivität und numerische Limitierungen des eigenen Tröpfchenmodells zu testen. Am Ende dieser Bearbeitungsphase lag ein ausreichend geprüftes und belastbares Tröpfchenmodell vor.

Anschließend wurde das Dispersionsmodell erstellt. Da Clewell nur stark vereinfachte Abschätzungen zur Dispersion benutzte, wurde zur weiteren Abschätzung das weiter entwickelte Dispersionsmodell nach Pfeiffer angewendet und mit dem Tröpfchenmodell verknüpft. Analog zum Tröpfchenmodell wurde hier der Ansatz von Pfeiffer nachberechnet und - soweit möglich - mit den dokumentierten Ergebnissen verifiziert. Auch hier erfolgten anschließend umfassende Testberechnungen verschiedener Modellszenarien, um Sensitivität und numerische Limitierungen des eigenen Dispersionsmodells zu testen.

Abgesehen vom beschriebenen Vorgehen ist eine weitere Nachberechnung oder Modellkalibrierung mit tatsächlich gemessenen Daten in der vorliegenden Studie nicht möglich, da seit mehreren Jahrzehnten keine Feldstudien für TSA mehr durchgeführt wurden.

Im Hinblick auf den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand liegt somit am Ende dieser Bearbeitungsphase ein ausreichend geprüftes und belastbares Tröpfchen -und Dispersionsmodell für die weiteren Berechnungen vor.

6 Anwendung der Numerischen Modellierungen von TSA: Szenarienbetrachtung

6.1 Festlegung von Szenarien und deren Eingangsparametern

Nach Auswertung der Daten zu den einzelnen TSA-Ereignissen in Deutschland im Zeitraum 2002 bis 2018 (siehe Kapitel 4) wurde festgestellt, dass

- ▶ sich bei realen TSA-Ereignissen die dokumentierten Randbedingungen (v. A. Ablasshöhe) stark unterscheiden.
- ▶ einige für die Modellberechnung wichtige Informationen derzeit nicht dokumentiert werden bzw. mit vertretbarem Aufwand nicht dokumentiert werden können (genaue chem. Zusammensetzung des getankten Kerosins, genaue Lage- und Höhenkoordinaten mit Zeitangaben des Flugzeugs während des gesamten TSA-Vorgangs und evtl. an Bord aufgezeichnete Wetterdaten wie die Windgeschwindigkeit und -richtung, Fluggeschwindigkeit und Ablassrate). Somit ist auch eine Recherche/Zuordnung detaillierterer Wetterdaten zur Flugroute des Dumpingvorgangs nur eingeschränkt möglich.
- ▶ einige für die Modellberechnung relevante Eingangsdaten (v. A. initiale Tröpfchengröße bzw. Tröpfchengrößenverteilung, initiale Nachlaufbreite) in der Literatur nur unzureichend durch experimentelle Daten und Untersuchungen (v. A. Feldexperimente) belegt sind.

Bei den durchgeführten Testberechnungen wurde, wie bereits in älteren Studien z. B. (Clewell III, 1980), deutlich, dass die Lufttemperatur (abgeleitet von der Lufttemperatur am Boden) eine der wichtigsten und sensibelsten Modelleingangsgrößen darstellt, welche die Modellergebnisse (insbesondere die Verdunstung) maßgeblich beeinflusst.

Für diese Studie wurden daher in Abstimmung mit dem Auftraggeber vier Berechnungsszenarien definiert, welche sich durch die verwendete Lufttemperatur an der Erdoberfläche unterscheiden:

- a) Szenario „Sommer“ mit einer Lufttemperatur am Boden vom 20° C,
- b) Szenario „Jahresmitteltemperatur“ mit einer Lufttemperatur am Boden von 10 °C,
- c) Szenario „Frostpunkt“ mit einer Lufttemperatur am Boden von 0 °C,
- d) Szenario „Winter“ mit einer Lufttemperatur am Boden von -10 °C.

Die Eingangsdaten für das Tröpfchen- und das Dispersionsmodell für die 4 betrachteten Szenarien sind zusammenfassend in Tabelle 5 dargestellt. Dabei wird zwischen den 4 Szenarien die Temperatur am Boden variiert und die übrigen Parameter jeweils mit den gleichen Werten belegt, um die Ergebnisdarstellung übersichtlich und nachvollziehbar zu gestalten. Die Temperaturen für die 4 Szenarien betragen 20 °C für den Sommer, 10 °C für die Jahresmitteltemperatur, 0 °C für den Frostpunkt und -10 °C für den Winter.

Tabelle 5: Modell-Eingangsparameter für die 4 berechneten Szenarien

Eingangsparameter für die Modellberechnungen	Wert [-]
Ablasshöhe	5000 ft
Treibstoff	JP-8
Initialer Kerosintröpfchendurchmesser	270 μm
Windgeschwindigkeit	0,5 m/s
Windrichtung relativ zur Flugrichtung	1°
Fluggeschwindigkeit	450 km/h
Ablassrate	2,6 t/min
Abgelassene Treibstoffmenge	20 t
Sich ergebende Ablassdauer	7,7 min
Initiale Breite Nachlauf	100 m

(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconstite - Joswig Ingenieure)

Grundsätzlich wurden, abgesehen von der variierten Lufttemperatur am Boden, die übrigen Parameter eher konservativ gewählt. Die dargestellten Ergebnisse sind daher als Maximalwerte zu verstehen, deren Auftreten bei realen TSA nur bei sehr ungünstigen Randbedingungen zu erwarten ist. Die Bedeutung der einzelnen Parameter wird in den nachfolgenden Kapiteln erläutert. Der für die Berechnungen verwendete Wert für jeden Modellparameter ergibt sich aus der Auswertung der vorliegenden Daten und - falls keine Daten vorliegen - aus Literaturangaben.

Lufttemperatur am Boden

Im Ergebnis der Literaturstudie und umfangreicher interner Testberechnungen wurde die Lufttemperatur (abgeleitet von der Lufttemperatur am Boden) als sensibler Modellparameter herausgestellt. Daher wurden vier Szenarien mit unterschiedlicher Lufttemperatur am Boden definiert, welche zur Erhöhung der Anschaulichkeit wie folgt benannt wurden:

- Szenario „Sommer“ mit einer Lufttemperatur am Boden von 20 °C,
- Szenario „Jahresmitteltemperatur“ mit einer Lufttemperatur am Boden von 10 °C - dies entspricht in etwa der jährlichen Durchschnittstemperatur in Deutschland,
- Szenario „Frostpunkt“ mit einer Lufttemperatur am Boden von 0 °C,
- Szenario „Winter“ mit einer Lufttemperatur am Boden von -10 °C.

Das Winter-Szenario stellt aufgrund der angenommenen Lufttemperatur von -10 °C einen in Deutschland eher seltenen Fall dar. Für das Jahresmitteltemperatur-Szenario wurde für die Lufttemperatur am Boden ein Wert von 10 °C angenommen, der in etwa dem jährlichen Durchschnittswert für Deutschland entspricht. In Bezug auf die Lufttemperatur am Boden stellt das Jahresmitteltemperatur-Szenario somit den wahrscheinlichsten Ereignis-Fall eines TSA dar.

Ablasshöhe

Der TSA wurde im Modell auf einer Höhe von 5.000 ft simuliert (entspricht ca. 1524 m über der Erdoberfläche). Dies entspricht nach Auswertung der Daten der im Zeitraum 2002-2018 durchgeführten TSA (s. Kapitel 4.2.2) der minimalen tatsächlichen Flughöhe. In der Praxis

erfolgt ein TSA meist in größeren Höhen, was zu einer etwas höheren Verdunstung entlang des Fallweges und einer stärkeren räumlichen Verteilung (Dispersion) und somit zu geringeren Präzipitat-Konzentrationen am Boden führt.

Die Festlegung der Ablasshöhe von 5.000 ft ist somit eine konservative Modellannahme.

Initiale Zusammensetzung des modellierten Treibstoff-Gemisches

- Für die zivile Luftfahrt wird als Treibstoff fast ausschließlich Jet A-1 verwendet, dessen Zusammensetzung weitgehend dem militärisch genutzten JP-8 entspricht. Für das Modell wurde daher die Kerosinzusammensetzung von JP-8 nach (Clewett III, 1983) verwendet (siehe auch Anmerkungen hierzu in Kap. 5.4.5). Die initiale Zusammensetzung des Treibstoffgemisches für die Berechnung für diesen Bericht ist in

Tabelle 4 dargestellt.

Initialer Tröpfchendurchmesser

Alle Tröpfchen haben im Modell einen initialen Durchmesser von 270 μm . Es gibt nur wenige Studien, in denen der Tröpfchendurchmesser direkt nach dem TSA experimentell bestimmt wurde. In (Clewell III, 1980) wurde die Größenverteilung der initialen Tröpfchendurchmesser kurz nach dem Ablass experimentell gemessen, im Mittel ergab sich ein Tröpfchendurchmesser von 270 μm . Dieser initiale Tröpfchendurchmesser wurde in den meisten Studien zur Modellierung von TSA verwendet und auch für das vorliegende Modell übernommen.

Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit wurde im Modell mit einem geringen Wert von 0,5 m/s belegt. Da in der Atmosphäre praktisch nie völlige Windstille herrscht, wird die konservativ angesetzte Windgeschwindigkeit von 0,5 m/s im vorliegenden Bericht vereinfacht als „Windstille“ bezeichnet. Anzumerken bleibt, dass vor allem die atmosphärischen schichtbezogenen Windströmungen über die Höhe zu erheblichen Verteilungsprozessen führen, die mit dem gewählten Modellansatz in dieser Studie nur sehr vereinfacht abgebildet werden können.

Windrichtung relativ zur Flugrichtung

Für die Windrichtung relativ zur Flugrichtung wurde für die Modellberechnungen ein Wert von 1° für alle Szenarien festgelegt. Dies bedeutet, dass es nur eine minimale Abweichung zwischen Wind- und Flugrichtung gibt (entspricht nahezu Rückenwind). Eine Annahme von 0° (Flugrichtung entspricht Windrichtung) würde aufgrund des mathematischen Berechnungsansatzes zu unrealistischen Ergebnissen führen, da in diesem Falle keine Dispersion quer zur Flugrichtung entsteht (siehe Berechnung des Diffusionskoeffizienten in Anhang C.3.2). Bei einer Annahme eines größeren wirksamen Winkels zwischen Flug- und Windrichtung entsteht eine größere Dispersion und damit eine geringere Präzipitatkonzentration am Boden.

Fluggeschwindigkeit

Im Modell wurde die Geschwindigkeit des Flugzeugs während des TSA zu 450 km/h gesetzt (konservativer Modellansatz). Dies stellt die vorgeschriebene Mindestgeschwindigkeit für die Durchführung eines TSA dar.

Nach Auswertung der vorliegenden Unterlagen werden TSA bei Fluggeschwindigkeiten zwischen ca. 450 km/h und 700 km/h durchgeführt. Eine höhere Geschwindigkeit bedeutet stets eine Verringerung der Präzipitat-Konzentrationen, da die Präzipitat-Masse in einem größeren Gebiet verteilt wird. Eine Erhöhung der Fluggeschwindigkeit beim TSA wirkt sich im Tröpfchenmodell nicht auf die Tröpfchengröße aus.

Ablassrate des Treibstoffes während des TSA

Die Ablassrate wurde in den Modellrechnungen mit 2,6 t Kerosin pro Minute angenommen. Diese Annahme entspricht der Größenordnung der maximal möglichen Ablassraten größerer 4-strahliger Flugzeuge wie einer Boeing 747 (max. 2,4 t/min) oder einer MD11 (max. 2,6 t/min) (swissair, 1994). Die angenommene Ablassrate von 2,6 t/min stellt somit eine in Bezug auf den Großteil der recherchierten durchgeführten TSA (vgl. Kap. 4.2.5) konservative Annahme dar. (Clewell III, 1980) gibt einen Wertebereich von 0,3 - 3,0 t/min für typische Ablassraten an.

Eine Verminderung der Ablassrate beim TSA wirkt sich im Tröpfchenmodell nicht auf die Tröpfchengröße aus. Im Dispersionsmodell bewirkt eine geringere Ablassrate beim TSA (bei

gleichbleibender Fluggeschwindigkeit) eine Verringerung der abgelassenen Treibstoffmenge pro Meter und damit eine geringere Konzentration des Präzipitats am Boden.

Abgelassene Treibstoffmenge

In den Modellberechnungen wurde je Szenario eine Ablassmenge von insgesamt 20 t Kerosin angenommen. Die insgesamt abgelassene Treibstoffmenge hat in der Berechnung lediglich einen Einfluss auf die Länge des Nachlaufs in der Luft und somit auf die durch TSA betroffene Fläche am Boden. Da vereinfacht davon ausgegangen wird, dass der TSA entlang einer geraden Flugstrecke (keine Schleifen und somit kein mehrmaliges Überfliegen der gleichen Stelle) erfolgt, hat die abgelassene Treibstoffmenge keinen Einfluss auf die Konzentration des Präzipitats am Boden oder den prozentualen Anteil der Verdunstung.

Ablassdauer

Aus der Ablassrate - angegeben in Tonnen Kerosin pro Minute - und der insgesamt abgelassenen Treibstoffmenge in Tonnen ergibt sich die Dauer des Treibstoffschnellablassens (kurz Ablassdauer). Die sich ergebende Ablassdauer ist somit kein Eingangsparameter, sondern wird als berechneter Wert zum besseren Verständnis angegeben.

Initiale Nachlaufbreite

Die initiale Nachlaufbreite ergibt sich dadurch, dass das Kerosin aus Düsen, welche sich außen an den Tragflächen des Langstreckenflugzeugs befinden, abgelassen wird. Es wird eine initiale Nachlaufbreite von 100 m angenommen. Unmittelbar nach dem Ablassen erfolgt zudem durch die starke Verwirbelung (Wirbelschleppe) eine großräumige Verteilung des abgelassenen Kerosins in der Luft. Die Angabe der Nachlaufbreite bezieht sich dabei jeweils auf den Bereich, in dem sich rechnerisch ein Großteil (78 %) der Gesamt-Präzipitatsmasse befindet. Diese Definition ist notwendig, da rein mathematisch die Normalverteilung zu den Seiten hin, also die seitliche Ausdehnung quer zur Flugrichtung, nicht begrenzt ist.

Über die initiale Nachlaufbreite liegen keine verlässlichen Messwerte vor, daher wurde ein kleiner, als realistisch angesehener Wert als Eingangsparameter für das Modell angenommen, welcher auch bei vielen der dokumentierten Berechnungen in (Pfeiffer, 1994) verwendet wird.

6.2 Modellergebnisse

6.2.1 Zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Modellergebnisse

Mit Hilfe des erstellten Matlab-Modells mit den Hauptkomponenten Tröpfchenmodell und Dispersionsmodell konnten die bisher nur aus der Literatur bekannten Ansätze zur Berechnung des Treibstoffverhaltens (wichtigste Prozesse: Verdunstung, freier Fall, Dispersion) nach einem Treibstoffschnellablass numerisch nachvollzogen und plausibilisiert werden. Nachdem die Lufttemperatur an der Erdoberfläche als einer der maßgeblichen Einflussgrößen auf das Modellergebnis herausgestellt wurde, erfolgte in Kap. 6.1 die Definition von vier relevanten, temperaturabhängigen Modell-Szenarien.

Die wichtigsten Modellergebnisse der 4 berechneten Szenarien werden in diesem Kapitel erläutert. Eine Übersicht der wichtigsten Modellergebnisse ist in Tabelle 6 dargestellt. Die beiden wichtigsten Modellergebnisse für jedes Szenario sind:

- ▶ der Masse-Anteil des am Boden ankommenden Präzipitats als prozentuale Angabe der initialen Kerosinmasse (nach Verdunstung) und
- ▶ die maximale Konzentration des Präzipitats am Boden in $[\text{g}/\text{m}^2]$.

Aufgrund der Relevanz für die spätere Bewertung werden die genannten beiden Parameter in diesem Kapitel zuerst dargestellt, im nachfolgenden Kapitel 6.2.2 werden weitere Details der Berechnung vorgestellt.

Tabelle 6: Übersicht Ergebnisse der 4 Szenarien

	Sommer	Jahresmittel- temperatur	Frostpunkt	Winter
Lufttemperatur am Boden	20 °C	10 °C	0 °C	-10 °C
Massenanteil Präzipitat, welches den Boden erreicht	4 %	12 %	32 %	59 %
Flugzeit der Präzipitat-Tröpfchen	73 min	47 min	35 min	30 min
Präzipitat-Tröpfchengröße am Boden	84 µm	128 µm	183 µm	225 µm
Initiale Fadenlänge in der Luft	58 km	58 km	58 km	58 km
Max. Präzipitat-Konzentration am Boden	0,006 g/m ²	0,026 g/m ²	0,081 g/m ²	0,159 g/m ²
Fadenbreite am Boden	2,4 km	2,0 km	1,7 km	1,6 km

(Quelle: Forschungsgemeinschaft reonsite - Joswig Ingenieure)

Mit den getroffenen Annahmen bezüglich der Eingangsgrößen für die 4 Szenarien lassen sich die Ergebnisse der Modellberechnungen (Tabelle 6) wie folgt zusammenfassen:

- für den Fall des **Sommer-Szenarios** (mit einer mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche von 20 °C) erreichen **4 %** des Präzipitats die Erdoberfläche. Die übrigen 96 % verdunsten in der Atmosphäre. Das Präzipitat besteht aus feinsten Tröpfchen, welche sich über eine Fläche von über 130 km² verteilen. Die berechnete maximale Konzentration an der Erdoberfläche wurde mit **0,006 g/m²** Präzipitat berechnet.
- für den Fall des **Jahresmitteltemperatur-Szenarios** (mit einer mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche von 10 °C) erreichen **12 %** des Präzipitats die Erdoberfläche. Die übrigen 88 % verdunsten in der Atmosphäre. Das Präzipitat besteht aus feinsten Tröpfchen, welche sich über eine Fläche von mehr als 110 km² verteilen. Die berechnete maximale Konzentration an der Erdoberfläche wurde mit **0,026 g/m²** Präzipitat berechnet.
- für den Fall des **Frostpunkt-Szenarios** (mit einer mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche von 0 °C) erreichen **32 %** des Präzipitats die Erdoberfläche. Die übrigen 68 % verdunsten in der Atmosphäre. Das Präzipitat besteht aus feinsten Tröpfchen, welche sich über eine Fläche von über 90 km² verteilen. Die berechnete maximale Konzentration an der Erdoberfläche wurde mit **0,081 g/m²** Präzipitat berechnet.
- für den Fall des **Winter-Szenarios** (mit einer mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche von -10 °C) erreichen **59 %** des Präzipitats die Erdoberfläche. Die übrigen 41 % verdunsten in der Atmosphäre. Das Präzipitat besteht aus feinsten Tröpfchen, welche sich über eine Fläche von über 80 km² verteilen. Die berechnete maximale Konzentration an der Erdoberfläche wurde mit **0,159 g/m²** Präzipitat berechnet.

Zusammenfassend lässt sich daraus ableiten, dass sich erwartungsgemäß die Präzipitat-Konzentration erhöht, je geringer die Lufttemperatur ist. Dies ist im Wesentlichen auf den großen Einfluss der Temperatur auf die Verdunstung zurückzuführen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Angaben aus den ausgewerteten Literaturstudien (Clewett III, 1980; Clewett III, 1983; Pfeiffer, 1994; Todd, 1995).

Die Szenarien wurden bewusst einfach und nachvollziehbar gehalten, indem nur ein Eingangsparameter, die Lufttemperatur an der Erdoberfläche, für jedes Szenario variiert wurde. Bereits in den 4 betrachteten Szenarien ergibt sich eine sehr große Bandbreite der Ergebnisse: Im Vergleich zum Sommer-Szenario (20 °C) unterscheiden sich beim Winter-Szenario (-10 °C) die Modellergebnisse des Tröpfchenmodells um das 16-fache (4 % am Boden ankommendes Präzipitat im Sommer-Szenario im Vergleich zu 59 % im Winter-Szenario).

Wird das gesamte Modell - also Tröpfchen- und Dispersionsmodell - in die Betrachtung einbezogen unterscheiden sich die Ergebnisse um das 27-fache (0,006 g/m² ankommendes Präzipitat im Sommer-Szenario im Vergleich zu 0,159 g/m² im Winter-Szenario). Diese großen Ergebnis-Spannbreiten würden sich weiter vergrößern, wenn weitere Eingangsparameter variiert würden. Da für die Modellierung zumeist eine konservative Wahl der Eingangsparameter (worst-case-Ansatz) gewählt wurde, wären bei einer weiteren Variation der Eingangsparameter eher geringere Präzipitat-Konzentrationen an der Erdoberfläche zu erwarten. Auch wenn das Sommer- und das Winter-Szenario Extremfälle darstellen, unterstreichen die großen Ergebnis-Spannbreiten, wie unterschiedlich die Ergebnisse in Abhängigkeit der atmosphärischen Bedingungen sein können. Aus diesem Grund ist auch eine Bewertung besonders komplex, da sich bei einem individuellen Treibstoffschnellablass bei günstigen atmosphärischen Bedingungen nahezu keine Präzipitat-Konzentrationen am Boden wiederfinden können, während bei ungünstigen atmosphärischen Bedingungen ein Teil des Präzipitats den Boden erreichen kann.

Für die spätere Bewertung der Modellergebnisse ist in diesem Zusammenhang wichtig, dass das Winter-Szenario aufgrund der angenommenen Lufttemperatur von -10 °C einen in Deutschland eher seltenen Fall darstellt. Für das Jahresmitteltemperatur-Szenario wurde für die Lufttemperatur am Boden ein Wert von 10 °C angenommen, welcher in etwa dem jährlichen Durchschnittswert für Deutschland entspricht. Das Jahresmitteltemperatur-Szenario, bei dem 12 % des Präzipitats am Boden ankommen, stellt somit den wahrscheinlichsten Fall in Bezug auf die Lufttemperatur dar. Es bleibt zu berücksichtigen, dass viele der übrigen Modelleingangsparameter eher konservativ festgelegt wurden. Die dargestellten Ergebnisse sind daher eher als Maximalwerte zu interpretieren.

Einen großen Einfluss auf das Berechnungsergebnis hat beispielsweise die Windgeschwindigkeit, welche im Modell mit 0,5 m/s konservativ („Windstille“) angesetzt wurde. Anzumerken bleibt auch, dass vor allem atmosphärische schichtbezogene Windströmungen und Verwirbelungen über die Höhe zu erheblichen Verteilungsprozessen führen können, die mit dem gewählten Modellansatz in dieser Studie vernachlässigt wurden.

Ebenso wurde die Ablasshöhe, welche ebenfalls einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat, mit 5.000 ft im Modell angesetzt. Tatsächlich werden nahezu alle realen TSA-Ereignisse bei deutlich höheren Ablasshöhen durchgeführt (siehe Kapitel 4.2.2). Im Kapitel 6.2.3 wird daher der Einfluss der Ablasshöhe auf die Präzipitatkonzentration am Boden am Beispiel des Frostpunkt-Szenarios untersucht.

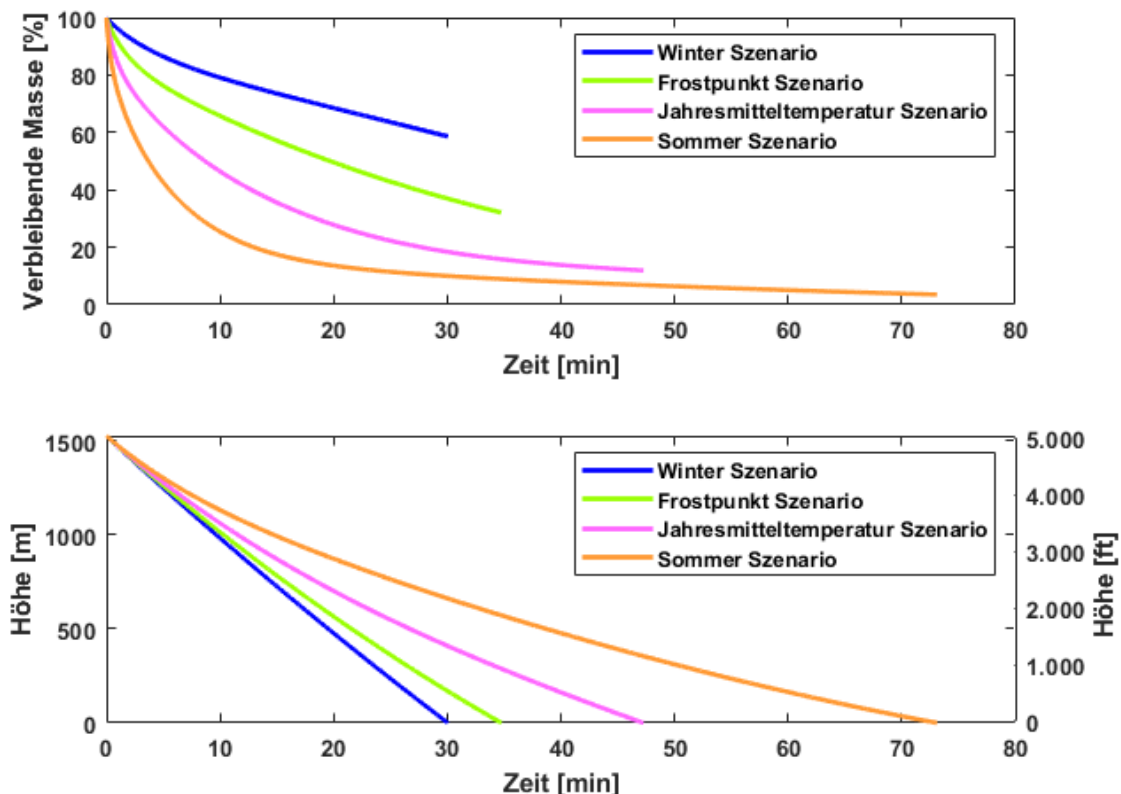
Bei einigen Parametern ist eine konservative Betrachtung nicht möglich, da zu wenige Informationen vorliegen. Beispielsweise wurde die Tröpfchengröße nur in zwei Studien experimentell bestimmt (davon nur eine Feldstudie). Da auch die initiale Nachlaufbreite nicht

genau bekannt ist wurde ein kleiner als realistisch angesehener Wert als Eingangsparameter für das Modell angenommen.

6.2.2 Modellergebnisse im Detail

Nach einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten Detailergebnisse der Modellberechnungen vorgestellt. Im ersten Schritt werden die Detailergebnisse des Tröpfchenmodells dargestellt. Mit der Modellberechnung des Tröpfchenmodells wurde dabei der Weg eines einzelnen Kerosintröpfchens durch die Atmosphäre nachberechnet. In Abbildung 12 ist der zeitliche Verlauf der Tröpfchenmasse (oberer Teil) und seiner Höhe (unterer Teil), jeweils über die Zeit, dargestellt. Während des Durchfliegens der Atmosphäre ändert das Tröpfchen seine chemische Zusammensetzung, da zuerst die leichtflüchtigen Bestandteile verdunsten. Die stoffliche Zusammensetzung des Kerosins ändert sich mit Beginn der Verdunstung, so dass den Boden ein Stoffgemisch erreicht, welches nicht mehr der ursprünglichen Kerosinzusammensetzung entspricht. Für dieses am Boden ankommende Stoffgemisch wird daher der Begriff Präzipitat verwendet. Die Zusammensetzung des Präzipitats am Boden ist in Abbildung 13 dargestellt.

Abbildung 12: Ergebnisse des Tröpfchenmodells für die 4 Szenarien: Berechnete verbleibende Tröpfchenmasse durch die Verdunstung und Höhe in Abhängigkeit der Zeit



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite-Joswig Ingenieure)

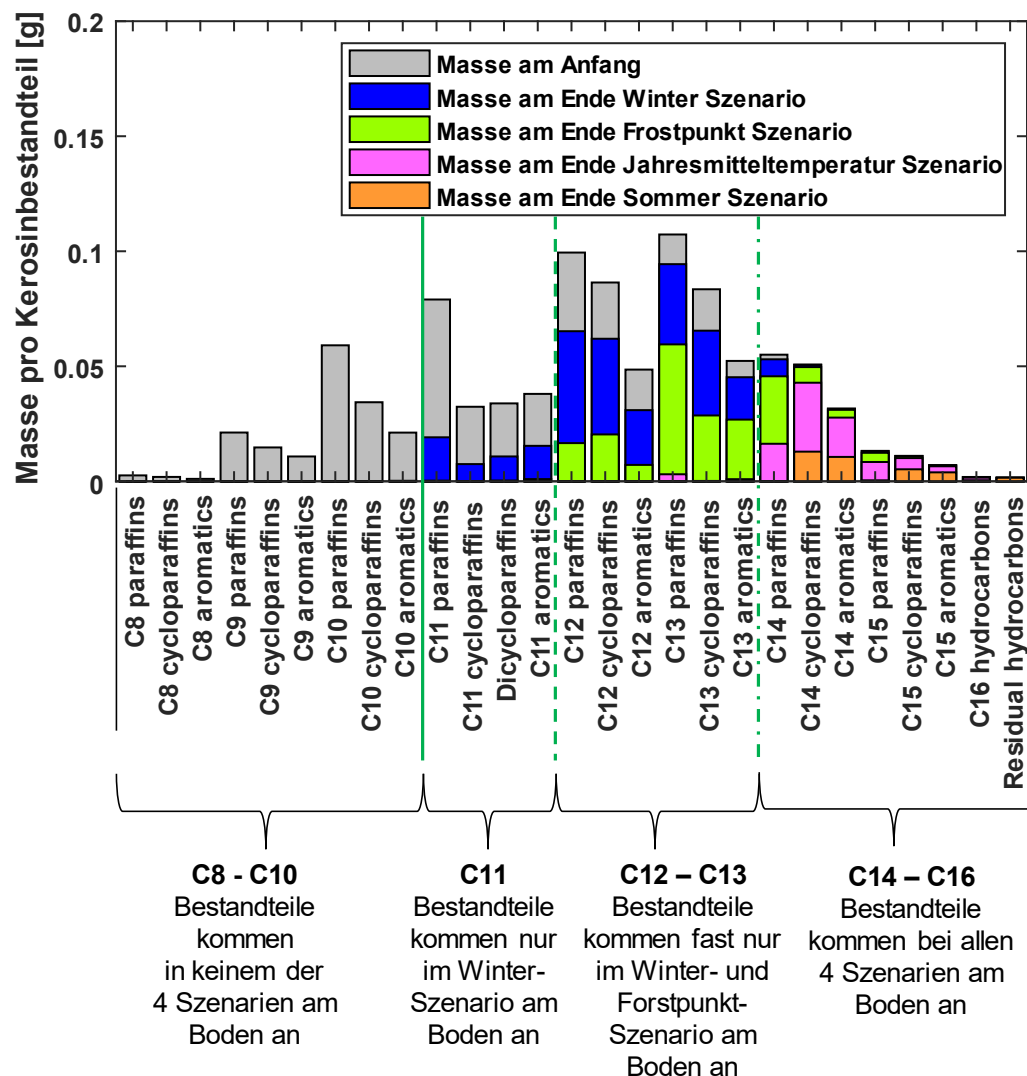
Beispielhafte Beschreibung der Modellergebnisse anhand des Jahresmitteltemperatur-Szenarios

Am Beispiel des Jahresmitteltemperatur-Szenarios mit einer Lufttemperatur am Boden von 10 °C werden die Berechnungsergebnisse in den folgenden Abschnitten schrittweise beschrieben.

Dieses Szenario stellt, aufgrund der mittleren Lufttemperatur in Deutschland, das in Bezug auf die Lufttemperatur wahrscheinlichste Szenario dar.

Bereits kurz nach dem Ablassen beginnt die Verdunstung zunächst der leichtflüchtigen Bestandteile des abgelassenen Kerosins, da das Tröpfchen beim Ablassen eine im Vergleich zur umgebenden Luft höhere Temperatur aufweist: In 5.000 ft (entspricht 1.524 m) Höhe liegt die Lufttemperatur bei 0,1 °C (wenn, wie angenommen, die Temperatur an der Erdoberfläche 10 °C beträgt). Die Temperatur des Kerosintröpfchens an der Düse beim Treibstoffschnellablass liegt bei ca. 8 °C. Dieser Wert kann aus der Umgebungstemperatur sowie der Fluggeschwindigkeit des Flugzeugs errechnet werden (siehe Anhang C.2.3). Innerhalb von wenigen Sekunden gleicht sich die Temperatur des Präzipitat-Tröpfchens der Atmosphärentemperatur an.

Abbildung 13: Ergebnisse für die 4 Szenarien für 1 g abgelassenes Kerosin: Anfängliche Zusammensetzung des Kerosins und Zusammensetzung des Präzipitats bei Erreichen des Bodens (nach teilweiser Verdunstung während des Falls)



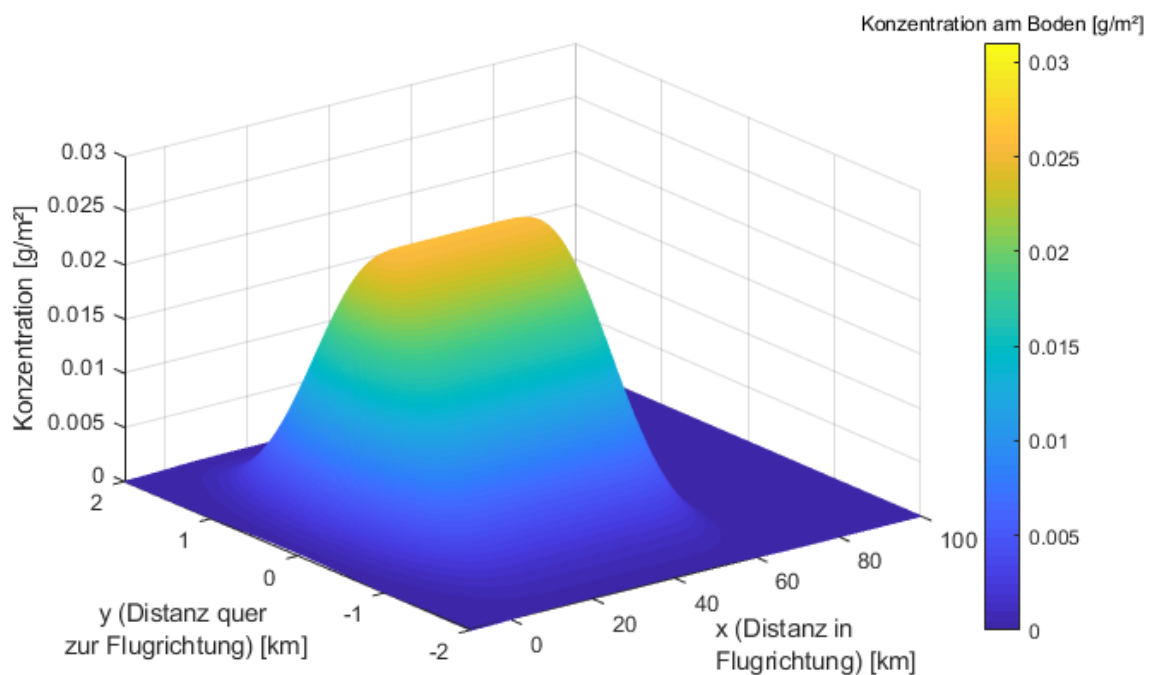
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite-Joswig Ingenieure)

Vereinfacht kann davon ausgegangen werden, dass die kurzkettigeren Kohlenstoffverbindungen meist leichter flüchtig sind im Vergleich zu langkettigeren Verbindungen. Entsprechend

verdunsten die leichtflüchtigen Bestandteile in der Modellberechnung schneller als die schwerflüchtigen.

Die Änderung der chemischen Zusammensetzung des Präzipitats im Vergleich zum ursprünglich abgelassenen Kerosin wird in Abbildung 13 veranschaulicht. Die verwendete Modellzusammensetzung von Kerosin weist Verbindungen mit 8 bis 16 Kohlenstoffatomen auf. Die Kerosin-Zusammensetzung von 1 g Kerosin ist in Abbildung 13 als graue Balken dargestellt. Nach dem Ablassen verdunsten die kurzkettigeren Verbindungen (C8 bis C12) im Jahresmitteltemperatur-Szenario vollständig, bevor sie den Boden erreichen. Am Boden hat das ankommende Präzipitat (12 % der Ursprungsmasse des abgelassenen Kerosins im Jahresmitteltemperatur-Szenario) eine andere Zusammensetzung als beim Ablassen. Die Zusammensetzung des am Boden ankommenden Präzipitats ist für das Jahresmitteltemperatur-Szenario in Abbildung 14 als pinke Balken dargestellt.

Abbildung 14: Ergebnisse des Dispersionsmodells für das Szenario Jahresmitteltemperatur: Berechnete Präzipitat-Konzentration am Boden (zu beachten ist, dass x-Achse und y-Achse unterschiedlich skaliert sind)



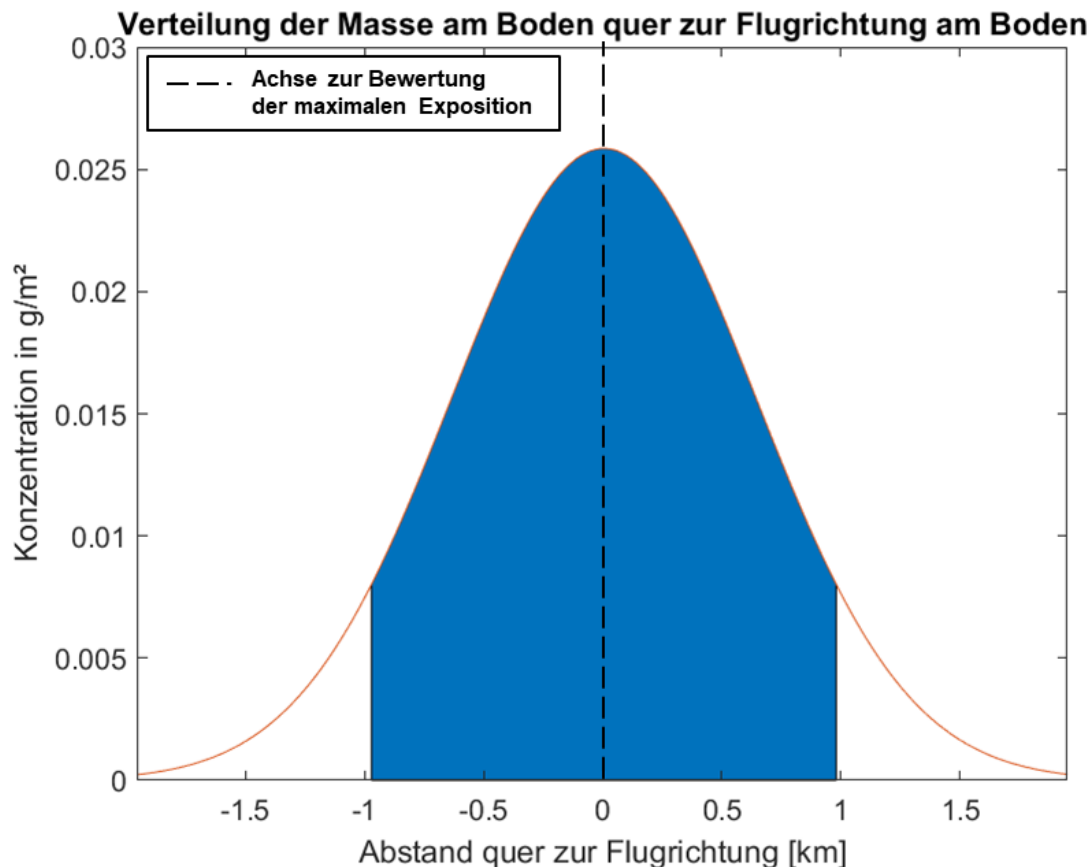
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reonsite - Joswig Ingenieure)

Nachdem der Weg eines Präzipitat-Tröpfchens durch die Atmosphäre rechnerisch verfolgt wurde, erfolgt im nächsten Schritt mit dem Dispersionsmodell eine Betrachtung der Verteilung des Präzipitats an der Erdoberfläche. Aus der

- ▶ Fluggeschwindigkeit von 450 km/h,
- ▶ Ablassrate von 2,6 t/Minute und
- ▶ Gesamt-Ablassmenge von 20 t

ergibt sich ein Ablassvorgang innerhalb einer Flugstrecke von 58 km. Weiterhin wird angenommen, dass das Flugzeug auf einer geraden Strecke fliegt und sich das Kerosin am direkt nach dem Ablassen, also in 5.000 ft Höhe auf einer initialen Nachlaufbreite von 100 m verteilt. Die Angabe der Nachlaufbreite bezieht sich dabei jeweils auf den Bereich, in dem sich ein Großteil (78 %) der Gesamt-Präzipitatmasse befindet. Diese Definition ist nötig, da rein mathematisch die Verteilung zu den Seiten hin, also die seitliche Ausdehnung quer zur Flugrichtung, unendlich ist. Die geringen Resttreibstoff-Konzentrationen in den entfernten seitlichen Bereichen sind für die spätere Bewertung nicht relevant. Während des Durchfliegens der Atmosphäre erfolgt eine weitere Verbreiterung der Präzipitat-Tröpfchenwolke durch die stattfindenden Dispersionsvorgänge. Bis zum Erreichen der Erdoberfläche hat sich die Wolke nach der Modellberechnung auf ca. 2 km verbreitert.

Abbildung 15: Präzipitat-Konzentration am Boden im Querschnitt zur Flugachse für das Szenario Jahresmitteltemperatur. Konzentrationsangaben in dieser Studie beziehen sich üblicherweise auf das Maximum (Scheitelpunkt) dieser Verteilungskurve aus dem Dispersionsmodell



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reonsite - Joswig Ingenieure)

Zum besseren Verständnis ist die Präzipitat-Konzentration am Boden in Abbildung 14 als dreidimensionales Diagramm dargestellt. In Abbildung 15 ist ein Schnitt quer zur Flugrichtung aus Abbildung 14 durch die am Boden ankommenden Konzentrationen veranschaulicht. Beim Erreichen des Bodens wurden in der Mitte der Tröpfchenwolke die höchsten Präzipitat-Konzentrationen berechnet, welche zum Rand hin abnehmen. Die Maximalkonzentration liegt

für das Jahresmitteltemperatur-Szenario bei $0,026 \text{ g/m}^2$. In ca. 1 km Entfernung zur maximalen Konzentration in der Mitte der Tröpfchenwolke liegt die Präzipitat-Konzentration bei $0,008 \text{ g/m}^2$. Innerhalb einer Breite von ca. 2 km werden demnach ca. 87 % der Gesamtmasse des Präzipitats erfasst. Nach der Berechnung ist mit den angenommenen Modellparametern eine Fläche von über 110 km von dem Treibstoffschnellablass betroffen.

6.2.3 Vergleichende Modellberechnungen

Zusätzlich zu den bisher dargestellten Ergebnissen erfolgten zwei vergleichende Modellberechnungen mit dem Tröpfchenmodell sowie dem Dispersionsmodell bei geänderten Flughöhen.

Dabei wurde das Frostpunkt-Szenario als Ausgangsszenario gewählt und die Flughöhe von ursprünglich 5.000 ft für den ersten zusätzlichen Modelllauf auf 13.000 ft, bzw. für den zweiten zusätzlichen Modelllauf auf 20.000 ft erhöht. Alle anderen Randbedingungen wurden analog zum Frostpunkt-Szenario beibehalten. Anschließend wurde für diese beiden zusätzlichen Szenarien modelltechnisch berechnet, wie sich jeweils der Anteil des am Boden ankommenden Präzipitats sowie die Maximalkonzentration am Boden ändern.

Die Ergebnisse für diese beiden vergleichenden Modellberechnungen sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Vergleichende Modellberechnungen zum Einfluss der Ablasshöhe auf den Präzipitat-Niederschlag am Boden am Beispiel des Frostpunkt-Szenarios (0°C)

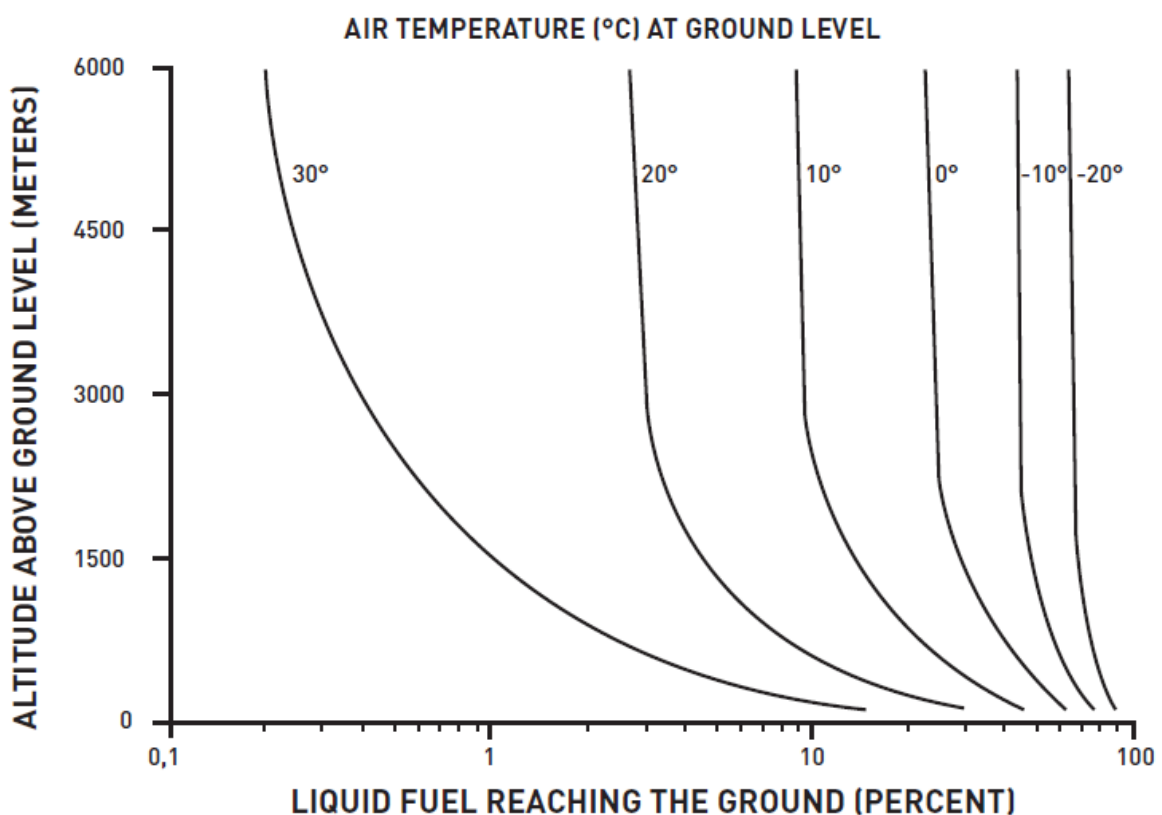
	Flughöhe 5.000 ft	Flughöhe 13.000 ft	Flughöhe 20.000 ft
Lufttemperatur am Boden	0°C	0°C	0°C
Massenanteil Präzipitat, welches den Boden erreicht	32 %	24 %	24 %
Flugzeit der Präzipitat-Tröpfchen	35 min	89 min	128 min
Präzipitat-Tröpfchengröße am Boden	$183 \mu\text{m}$	$167 \mu\text{m}$	$166 \mu\text{m}$
Initiale Fahnenlänge in der Luft beim TSA	58 km	58 km	58 km
Max. Präzipitat-Konzentration am Boden	$0,081 \text{ g/m}^2$	$0,038 \text{ g/m}^2$	$0,031 \text{ g/m}^2$
Fahnenbreite am Boden	1,7 km	2,7 km	3,2 km

(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Bei einer Flughöhe von 13.000 ft erreichen statt der ursprünglich 32 % des Präzipitats (siehe Frostpunkt-Szenario bei 5.000 ft) nur 24 % die Erdoberfläche. Aufgrund der längeren Flug- bzw. Falldauer des Tröpfchens (89 Minuten anstatt 35 Minuten) können die Dispersionseffekte über eine längere Zeit die flächige Ausbreitung der Tröpfchenwolke verstärken. Somit wird die Kontaminationsfläche am Boden größer (Fahnenbreite 2,7 km anstatt 1,7 km), die Maximalkonzentration am Boden jedoch geringer ($0,038 \text{ g/m}^2$ anstatt $0,081 \text{ g/m}^2$). Bezogen auf den Querschnitt der Bodenkonzentration des Präzipitats bewirkt eine Steigerung der Ablasshöhe beim TSA eine Dämpfung der (Maximal-)Konzentration und eine Verbreiterung der Basis.

Bei einer weiteren Erhöhung der Flughöhe im Modell auf 20.000 ft ändert sich der Anteil des am Boden ankommenden Präzipitats kaum (weiterhin 24 %, Veränderungen im Nachkommastellenbereich). Dies entspricht den Ergebnissen der Arbeit von (Clewell III, 1980), siehe auch Abbildung 16. Die Flug- bzw. Falldauer des Tröpfchens beträgt bei einer Flughöhe von 20.000 ft 128 Minuten (im Vergleich zu 35 bzw. 89 Minuten) und führt somit aufgrund der länger wirkenden Dispersionseffekte zu einer weiteren flächigen Ausbreitung der Tröpfchenwolke (Fahnenbreite 3,2 km statt 1,7 bzw. 2,7 km) und folglich zu einer geringeren Maximalkonzentration am Boden ($0,031 \text{ g/m}^2$ statt $0,038 \text{ g/m}^2$ bzw. $0,081 \text{ g/m}^2$).

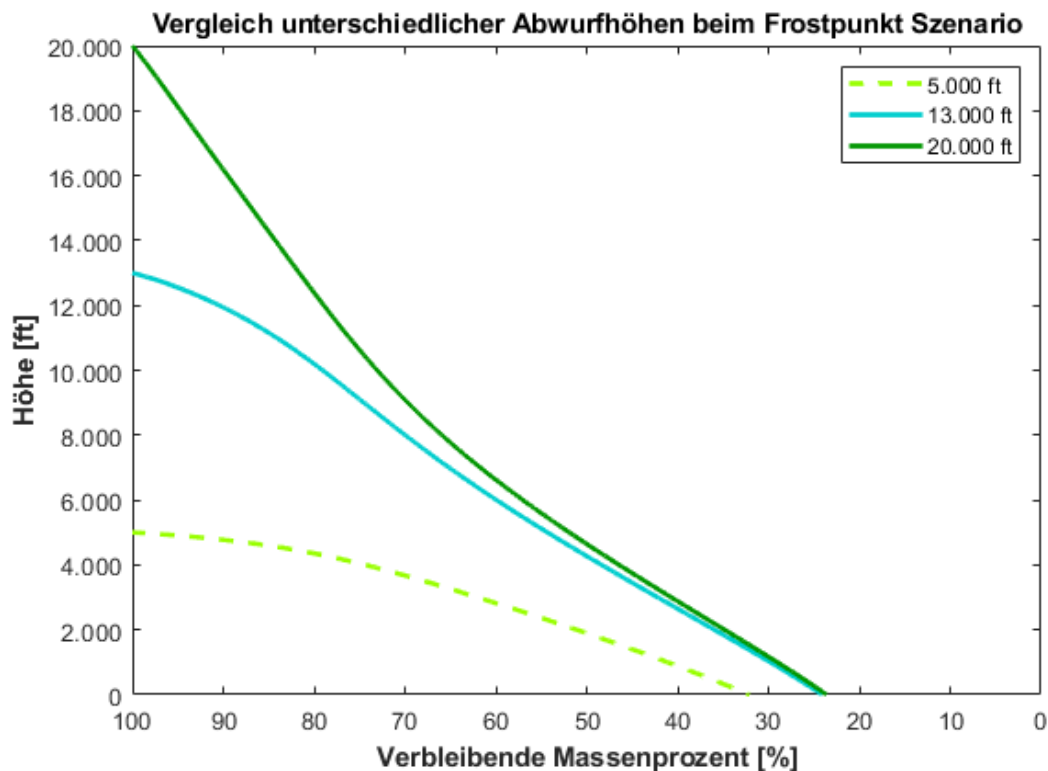
Abbildung 16: Einfluss unterschiedlicher Ablasshöhe auf den Anteil des Präzipitats, welcher den Boden erreicht nach (Clewell III, 1983)



(Quelle: Clewell III, 1983)

In Abbildung 17 ist die Entwicklung des prozentualen Anteils der Präzipitat-Masse während des Falls eines Tröpfchens aus den 3 betrachteten Flughöhen dargestellt.

Abbildung 17: Einfluss der Ablasshöhe beim TSA auf den Massenanteil des sich niederschlagenden Präzipitats am Beispiel des Szenario „Frostpunkt“



Quelle: Forschungsgemeinschaft reconstite - Joswig Ingenieure)

Besonders bei Berechnungen für diese Höhen bleibt zu berücksichtigen, dass Randbedingungen nur sehr stark vereinfacht und pauschalisiert angenommen werden können.

Windgeschwindigkeiten und -richtungen ändern sich in den einzelnen Luftschichten und können die tatsächlich vorhandenen Verteilungseffekte stark beeinflussen. Hier kann es zu Abweichungen zu den Modellergebnissen kommen.

Im Allgemeinen gilt, dass die Berechnungen, welche dem Modell zu Grunde liegen, auf einer Vielzahl von Parametern basieren, die miteinander in komplexen physikalischen Wechselbeziehungen stehen (siehe Anhang C).

Um die Sensitivität der einzelnen Parameter auf die Rechenergebnisse bewerten zu können, ist eine Sensitivitätsstudie bezüglich der Parameterbandbreite sinnvoll. Dabei können sowohl die sensitiven Parameter als auch die sensitiven Wertebereiche dieser Parameter anhand vergleichender Modellberechnungen eingegrenzt werden. Dies wäre auch eine sinnvolle Studie in Hinblick auf die Konzeption eines möglichen Messprogrammes, um herauszufinden welche Parameter in welchen Wertebereichen überhaupt sinnvollerweise gemessen werden sollten.

6.3 Interpretation der Ergebnisse der vier Szenarien

Vergleicht man die vier Szenarien mit realen TSA ergibt sich, dass die simulierte Flughöhe von 5.000 Fuß in der Praxis nahezu nicht auftritt. Da auch die übrigen Eingangsparameter der Modellberechnungen (bis auf die Lufttemperatur - diese wird in den Szenarien-Berechnungen variiert) so weit möglich konservativ angenommen wurden (siehe Kapitel 6.1), sind die Szenarien-Berechnungen insgesamt als Worst-Case Berechnungen bei vier unterschiedlichen Lufttemperaturen zu verstehen.

Wenngleich mit den üblichen Unschärfen solcher Simulationen behaftet, lassen sich die Modellergebnisse wie folgt zusammenfassen und interpretieren:

- ▶ Bei warmen Temperaturen am Boden von 20 °C erreichen bei einer Ablasshöhe von 5.000 Fuß von dem abgelassenen Kerosin 4 % als Präzipitat den Boden. Solche Temperaturen werden teilweise tagsüber auch im Frühjahr und im Herbst erreicht. Dieses Präzipitat ist maßgeblich durch längerkettige Kohlenwasserstoffe (KW) charakterisiert. Diese KW ab C14 weisen Stoffsiedepunkte über 250 °C auf. Bei noch höheren Temperaturen (Hochsommer) bzw. einer längeren Verdunstungszeit in Folge einer höheren Ablasshöhe, wie sie in der Praxis üblich ist, sowie einer realistischen Windgeschwindigkeitsverteilung in der Atmosphäre, ist eine nahezu vollständige Verdunstung des Kerosins in der Atmosphäre durchaus wahrscheinlich.
- ▶ Bei einer Jahresdurchschnittstemperatur am Boden von ca. 10 °C erreichen bei einer Ablasshöhe von 5.000 Fuß von dem abgelassenen Kerosin 12 % den Boden als Präzipitat. Dieses Präzipitat ist maßgeblich durch mittel- bis längerkettige Kohlenwasserstoffe charakterisiert. Diese KW ab C13 weisen Stoffsiedepunkte ab 235 °C auf. Bei einer längeren Verdunstungszeit in Folge einer höheren Ablasshöhe, wie sie in der Praxis üblich ist, sowie einer realistischen Windgeschwindigkeitsverteilung in der Atmosphäre, ist eine nahezu vollständige Verdunstung des Kerosins in der Atmosphäre durchaus wahrscheinlich.
- ▶ Bei einer angesetzten Temperatur am Boden von 0 °C erreichen bei einer Ablasshöhe von 5.000 Fuß von dem abgelassenen Kerosin 32 % den Boden als Präzipitat. Dieses Präzipitat ist maßgeblich durch mittel- bis längerkettige Kohlenwasserstoffe charakterisiert. Diese KW ab C12 weisen Stoffsiedepunkte ab 216 °C auf. Erwartungsgemäß zeigen Vergleichsrechnungen mit dem Modell auf einer höheren Ablasshöhe von 13.000 Fuß, dass der an der Erdoberfläche ankommende Präzipitat-Anteil um knapp ein Drittel vermindert ist (gegenüber dem Grundszenario bei einem Ablass von 5.000 Fuß). Aufgrund der längeren Verdunstungszeit in hinreichend warmen, verdunstungsrelevanten Atmosphärenschichten reduziert sich das Präzipitat auf 24 % der ursprünglichen Kerosinmasse. Bei einer weiteren Erhöhung der Ablasshöhe auf 20.000 Fuß ist hingegen keine weitere, signifikante Steigerung der Verdunstungsleistung gegeben. Die Atmosphärentemperatur zwischen 13.000 und 20.000 Fuß ist einfach zu kalt für eine deutliche Steigerung der Verdunstung. Jedoch sind vor Allem in sehr großen Höhen deutlich höhere tatsächliche Windgeschwindigkeit einzunehmen, als diese bei den konservativen Szenarienberechnungen (0,5 m/s) festgelegt wurde. Dies führt für einen Großteil der TSA-

Ereignisse vermutlich zu einer deutlich stärkeren räumlichen Verteilung des Präzipitats und damit zu geringeren Präzipitat-Konzentrationen.

- Bei einer Lufttemperatur am Boden von -10 °C erreichen bei einer Ablasshöhe von 5.000 Fuß von dem abgelassenen Kerosin 59 % den Boden als Präzipitat. Dieses Präzipitat ist maßgeblich durch mittel- bis längerkettige Kohlenwasserstoffe charakterisiert. Diese KW ab C11 weisen Stoffsiedepunkte ab 196 °C auf.
Bei einer üblichen Ablasshöhe von 13.000 Fuß vermindern sich aber auch die Präzipitat-Tröpfchen-Durchmesser in Folge einer längeren Verdunstung. Ferner wirken bei größerer Ablasshöhe dispersive Prozesse konzentrationsmindernd.

7 Human- und ökotoxikologische Bewertung des Präzipitats

7.1 Bewertungsgrundlagen

7.1.1 Gefährdungspotenzial und Exposition

Eine Bewertung toxikologischer Risiken ergibt sich aus einer gemeinsamen Betrachtung von Gefährdungspotenzial und Exposition. Hierbei wird berücksichtigt, dass chemische Stoffe sehr unterschiedliche Wirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit haben können. Das Maß von Schäden ist von der Wirkungsweise der Chemikalien abhängig.

Im Rahmen dieser Studie wurde das Gefährdungspotential aus der Fachliteratur, die Exposition aus den Berechnungen zum TSA abgeleitet.

Die Literatur zum Gefährdungspotential chemischer Stoffe gibt beispielsweise an, ob ein Stoff die Leber oder die Niere schädigen kann, das Auslösen von Krebs begünstigt oder eine Embryonalentwicklung beeinträchtigen kann. Ebenso beschrieben sind die kritischen Aufnahmewege und ab welcher Dosis eine schädliche Wirkung bei experimentellen Untersuchungen im Labor auftrat. Im Anhang D findet sich eine Zusammenstellung typischer Inhaltsstoffe im Kerosin und deren Gefährdungspotentiale.

Für die Ermittlung einer potenziellen Exposition durch TSA wurde aufgrund des konservativen Modellansatzes in den Berechnungen ein Extremfall nachgestellt (Kapitel 6.1). Hierzu wurden eine geringe Ablasshöhe von 5.000 ft beim TSA (entspricht ca. 1524 m über der Erdoberfläche) in den Berechnungen mit einer geringen Fluggeschwindigkeit des Flugzeugs beim TSA von 450 km/h, einer maximalen Ablassrate (2,6 t Kerosin pro Minute) und einer minimalen Windgeschwindigkeit von 0,5 m/s („Windstille“) kombiniert. Diese Kombination bewirkt, dass der errechnete Präzipitat-Niederschlag am Boden je nach Berechnungsszenario (und entsprechend der angenommenen Lufttemperatur am Boden, vgl. Kap. 6.3) vergleichsweise groß ist. Die Auswertung realer TSA hat gezeigt, dass rund 75 % der TSA bei über 13.000 ft erfolgen (Abbildung 4). Die Fluggeschwindigkeit beim TSA variiert in der Praxis zwischen 450 km/h und 700 km/h (Kapitel 4.2). Die rechnerisch angesetzte Ablassrate ist u.a. vom Flugzeugtyp abhängig und erfolgt in der Praxis nur bei einigen TSA mit 2,6 t/min. „Windstille“ gibt es in der Atmosphäre praktisch nicht, so dass durch diese Annahme Verdünnungseffekte durch Winde nur in sehr geringem Maße abgebildet werden.

In der Summe heißt das, dass die nachfolgend in diesem Kapitel erörterten Präzipitat-Konzentrationen in unmittelbarer Nähe zur Erdoberfläche als potentielle Obergrenze zu verstehen sind. Sie beziehen sich zudem stets auf den Scheitelpunkt der Gauß-Verteilungskurve, also ohne Abstand zur Flugachse (maximale Konzentration auf der Verteilungskurve bei $x=0$ in Abbildung 15). Die Rechenergebnisse, die als Exposition herangezogen werden, übersteigen daher in den meisten Fällen die reale Exposition erheblich (konservativer Bewertungsansatz).

Im Rahmen der Risikobeurteilung werden die Menge und räumliche Verteilung von chemischen Stoffen beurteilt. Hierzu gehören auch ihre Ausbreitungsmöglichkeiten in der Luft, im Wasser und im Boden sowie die Möglichkeit ihrer Aufnahme durch Menschen, Tiere und Pflanzen. Weitere Differenzierungen sind möglich und üblich. Beim Boden werden beispielsweise der Oberboden (oberen 10 cm) und die für verschiedenen Pflanzen nutzbare Bodenzone unterschieden. Bei der Luft (Atmosphäre) unterscheidet man zwischen hohen Luftschichten und bodennahen Luftschichten, die sich auf die menschliche Atemluft auswirken können. Beim Wasser unterscheidet man u.a. Oberflächengewässer und Grundwasser.

7.1.2 Grundlagen zur Abschätzung des Gefährdungspotentials

Werden in Europa chemische Stoffe hergestellt oder verwendet (mindestens 1 Tonne pro Jahr), werden diese gemäß der EU-Verordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe bei der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) in Helsinki registriert (REACH - Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals).

In Deutschland dient die 39. BImSchV (2018) der Beurteilung der Luftqualität. Ferner wurde mit der Neufassung der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV, 2017) der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) für einzelne Stoffe eingeführt. Dieser ersetzt die bis dahin angewendete Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK). Bis die AGW in die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) eingearbeitet sind (TRGS 900 - Arbeitsplatzgrenzwerte), werden die bisherigen MAK-Werte für die Beurteilung der Gefährdung am Arbeitsplatz weiterhin herangezogen. Auch die NIOSH (2017) benennt für eine tägliche Exposition am Arbeitsplatz Geringfügigkeitsschwellenwerte (GfS-Werte).

Die TRGS 900 gibt AGW für Kohlenwasserstoffgemische mit Benzolanteil <0,1 % (Masse) an. Die TRGS sind jedoch nicht anzuwenden auf „... komplexe kohlenwasserstoffhaltige Gemische, wie (...) Kraftstoffe (...), da diese Gemische in der Regel olefinische Kohlenwasserstoffe, kohlenwasserstofffremde Additive (mit einem Additivgehalt von mehr als 1 % (Masse) oder langkettige Kohlenwasserstoffe ($C > 14$) enthalten.“ Diese Einschränkungen treffen auf Kerosin bzw. das Präzipitat zu.

Für Boden liefert die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) Maßstäbe zur Gefahrenbeurteilung. Im Anhang 2 sind Prüfwerte und Maßnahmenwerte für bestimmte Schadstoffe und Wirkungspfade benannt. Bei der Stoffübertragung werden die Wirkungspfade Boden - Mensch (direkter Kontakt, nutzungsbezogen), Boden - Nutzpflanze (nutzungsbezogen, im Hinblick auf die Nutzpflanzenqualität) sowie Boden - Grundwasser unterschieden.

Für die Bewertung von (Grund-)Wasser wurde im Wesentlichen die LAWA (2004, mit Novellierung 2016) und die Oberflächengewässerverordnung (OGewV) herangezogen.

7.1.3 In die Bewertung einbezogene Substanzen

Unmittelbar nach einem Treibstoffschnellablass (TSA) kommt es aufgrund der unterschiedlichen Flüchtigkeit zu einer Entmischung der chemischen Kerosinkomponenten (Abbildung 13, Kapitel 6.2.2). Das Stoffgemisch Kerosin erreicht nicht in seiner ursprünglichen Zusammensetzung die bodennahen Umweltkompartimente. Hinsichtlich möglicher Umweltauswirkungen durch TSA auf die jeweiligen Umweltkompartimente wie „bodennahe Luft“, „Boden“ und „Wasser“ sowie auf Ökosysteme und den Menschen ist eine Bewertung des Präzipitats sinnvoll. Daher werden für die Bewertung die Konzentrationen jener Kerosinrestbestandteile herangezogen, welche als Präzipitat tatsächlich die Erdoberfläche erreichen.

Oftmals sind kurzkettige, leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe für öko- und humantoxische Bewertungen aufgrund ihrer höheren Mobilität kritischer als mittel- und längerkettige Kohlenwasserstoffe. Aus dem Tröpfchenmodell (Kap. 6.2.2) ergibt sich, dass verhältnismäßig leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe (KW) mit Kettenlängen von bis zu 10 Kohlenstoffatomen die Erdoberfläche nicht erreichen. Diese Aussage gilt auch für ungünstige Eingangsbedingungen in die Berechnungen, also beispielsweise einer geringen Ablasshöhe von 5.000 Fuß im Winterszenario (-10 °C) (Abbildung 13, C8-C10). Die Modellrechnungen zeigen, dass auch hierbei die leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe auf dem Weg zur Erdoberfläche verdunsten. Danach werden sie u.a. durch UV-Strahlung zu CO₂, H₂O sowie O₃ abgebaut (Kap. 2.6.2). Im

Frostpunktszenario (0 °C) ist davon auszugehen, dass auch die Kohlenwasserstoffe mit Kettenlängen von 11 Kohlenstoffatomen verdunsten und sich in der Atmosphäre abbauen. Bei höheren Temperaturen (Jahresmitteltemperatur-Szenario, 10 °C bzw. Sommer-Szenario, 20 °C) werden auch die Kohlenwasserstoffe mit 12 bzw. 13 Kohlenstoffatomen in der Atmosphäre zurückgehalten und dort analog zu den kürzerkettigen KW in Abbauprodukte umgewandelt (Kap. 2.6.2).

Im Kapitel 3.2 wurden Gefährdungspotenziale von Kerosinbestandteilen auf unterschiedliche Umweltkompartimente und auf Ökosysteme als Übersicht zusammengestellt. Diese werden im Folgenden weiter spezifiziert und die Grenzen der gegenwärtigen Bewertungsgrundlagen aufgezeigt.

7.2 Auswirkungen auf Umweltkompartimente und toxikologische Relevanz

Die berechneten Präzipitat-Konzentrationen werden für folgende Umweltkompartimente bewertet, soweit möglich:

- ▶ Bodennahe Luft,
- ▶ Boden,
- ▶ (Grund-)Wasser.

Zudem erfolgte eine Einstufung der öko- und humantoxikologischen Relevanz von Präzipitat-Bestandteilen.

7.2.1 Bodennahe Luft

Gefährdungspotential und Bewertungskriterien

Die im Rahmen dieser Studie betrachteten potenziellen Präzipitat-Konzentrationen nach TSA in der (bodennahen) Luft beziehen sich auf **Aerosol-Partikel**, also Tröpfchen. Zur Bewertung der Auswirkungen von TSA auf die Luftqualität wurden Grenzwerte für Aerosole herangezogen.

Stoffe in Gasphase werden in der Modellberechnung nicht betrachtet und fließen somit nicht in die Bewertung ein, werden jedoch ergänzend in der nachfolgenden Auflistung relevanter Bezugsgrößen mit aufgeführt. Die Stoffe in der Gasphase (d.h. der verdunstete Anteil der Präzipitat-Tröpfchen) sinken im Vergleich zu den Tröpfchen langsamer ab, verteilen sich dabei über größere Flächen und unterliegen zudem in der Atmosphäre unterschiedlichen chemischen Umwandlungsprozessen, die u. a. durch UV-Strahlung verursacht werden. Dadurch kann davon ausgegangen werden, dass die Treibstoffrückstände in der Gasphase beim Erreichen des Erdbodens deutlich geringere Konzentrationen als in der Flüssigphase (Aerosole) aufweisen.

Es wurde keine Bewertung im Hinblick auf die Feinstaub-Thematik vorgenommen: bei den vier betrachteten Szenarien und dem einheitlich angenommenen initialen Tröpfchendurchmesser von 270 µm beträgt der minimale berechnete Tröpfchendurchmesser an der Erdoberfläche 84 µm (siehe Sommer-Szenario in Tabelle 6). Somit stellt das an der Erdoberfläche ankommende Präzipitat auf Basis der Berechnungsergebnisse keinen PM-10-Feinstaub (Durchmesser < 10 µm) dar.

Es wurden Bewertungskriterien für potenzielle Belastungen durch Präzipitatbestandteile im Umweltkompartiment „bodennahe Luft“ aus folgenden Bereichen recherchiert:

- Allgemeingültige Bewertungskriterien,
- Bewertungskriterien für Anlagen,
- Bewertungskriterien am Arbeitsplatz.

Diese werden in Tabelle 8 zusammengestellt und werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Tabelle 8: Bewertungskriterien potenzieller Belastungen durch Kohlenwasserstoffe im Umweltkompartiment Luft

Parameter	Einheit	GFS-Wert	MAK / AGW-Werte	Jahres-Immissionsgrenzwert	Grundlage
Kerosin in Luft am Arbeitsplatz	mg/m ³	100			ATSDR, 2017, NIOSH
Destillate (Erdöl), mit Wasserstoff behandelte, leichte	mg/m ³ ml/m ³		5 (Aerosol) 350 (Dampf)		MAK-Werte MAK-Werte
Toluol	mg/m ³ ml/m ³		190 (Aerosol) 50 (Dampf)		AGW gem. TRGS 900 / GefStoffV, 2017? AGW gem. TRGS 900 / GefStoffV, 2017
Xylol	mg/m ³ ml/m ³		440 (Aerosol) 100 (Dampf)		AGW gem. TRGS 900 / GefStoffV, 2017 AGW gem. TRGS 900 / GefStoffV, 2017
Benzol	µg/m ³			5	39. BImSchV / TA Luft, 2002

AGW = Arbeitsplatzgrenzwert, GFS = Geringfügigkeitsschwellenwert, NIOSH = National Institute for Occupational Safety and Health (USA), TA Luft = Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft

Allgemeingültige Bewertungskriterien für kurzketttige Kohlenwasserstoffe

Für eine generelle Beurteilung der Luftqualität kann die 39. BImSchV (2018) zugrunde gelegt werden. Diese sieht für „Benzol“ als leichtflüchtige Kerosinkomponente mit hohem gesundheitlichen Gefährdungspotenzial einen Immissionsgrenzwert von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Jahresmittel vor. Die weniger leichtflüchtigen Kerosinkomponenten, die eher einen relevanten Anteil an Präzipitat-Depositionen und damit auch in der bodennahen Luft haben könnten, sind jedoch in der BImSchV nicht abgebildet.

Bewertungskriterien für Anlagen für kurzketttige Kohlenwasserstoffe

Die TA Luft (2002) dient „dem Schutz der Allgemeinheit (...) vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen und der Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, um ein hohes Schutzniveau für die Umwelt insgesamt zu erreichen.“

Sie legt als Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz Anforderungen im Rahmen der Anlagengenehmigung u. a. für Immissionen fest. Somit ist sie für die Bewertung von Immissionen, die durch TSA verursacht werden, im Gegensatz zur 39. BImSchV nicht direkt anwendbar und lediglich als Vergleichsdokument heranzuziehen. In der TA Luft wird Immission als die Massenkonzentration als Masse der luftverunreinigenden Stoffe bezogen auf das Volumen der verunreinigten Luft bzw. als Deposition als zeitbezogene Flächenbedeckung durch die Masse der luftverunreinigenden Stoffe definiert.

Für Benzol legt die TA Luft (2002), in Analogie zur 39. BImSchV, einen Immissions-Jahreswert von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahr) fest (unabhängig vom Aggregatzustand), bei dessen Einhaltung der „Schutz vor Gefahren für die menschliche Gesundheit (...) sichergestellt (ist).“

In der Novellierung der TA Luft (BMU, 2018) wird für Benzo-a-pyren (als Leitkomponente für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, PAK) ein Immissionswert von $0,5 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ zur Bemessung von Schadstoffdepositionen festgelegt. PAK-Belastungen sind für den Bodenschutz relevant und es ist davon auszugehen, dass die Luftbelastung erheblich zur Bodendeposition und damit zu Bodenbelastungen beiträgt (siehe auch Kap. 7.2.2).

Bewertungskriterien am Arbeitsplatz für kurzketttige Kohlenwasserstoffe

Mit der Neufassung der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV, 2017) wurde 2005 der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) eingeführt. Dieser ersetzt die bis dahin angewendete Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK). Bis die AGW in die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) eingearbeitet sind (TRGS 900 - Arbeitsplatzgrenzwerte), werden die bisherigen MAK-Werte für die Beurteilung der Gefährdung am **Arbeitsplatz** weiterhin herangezogen. Gruppen mit einem gesonderten Gefährdungspotential wie Schwangere und Kleinkinder sind nicht Gegenstand dieser Betrachtungen.

Für Kerosin und dessen Einzelstoffe sind MAK-Werte festgelegt (Tabelle 8, Tabelle 12). Diese gelten für Personen, die am Arbeitsplatz täglich und für längere Zeiträume Kerosin (komponenten) in Flüssig- oder Gasphase exponiert sind, siehe auch Kap. 7.2.5. Auch die NIOSH (2017) legt für Arbeitsplätze GfS-Werte für die arbeitstägliche Exposition fest.

Die TRGS 900 gibt AGW für Kohlenwasserstoffgemische mit Benzolanteil $<0,1 \%$ (Masse) an. Die TRGS sind jedoch nicht anzuwenden auf „... komplexe kohlenwasserstoffhaltige Gemische, wie (...) Kraftstoffe (...), da diese Gemische in der Regel olefinische Kohlenwasserstoffe, kohlenwasserstofffremde Additive (mit einem Additivgehalt von mehr als 1% (Masse) oder

langkettige Kohlenwasserstoffe ($C > 14$) enthalten.“ Diese Einschränkungen treffen auf Kerosin bzw. dessen Präzipitat-Gemisch zu. AGW für Aromaten (Auswahl) sind in Tabelle 8 und in Tabelle 12 zusammengestellt.

Bezugsgrößen zur Bewertung längerkettiger Kohlenwasserstoffe

Für längerkettige Kohlenwasserstoffe ab C11 wurden in den ausgewerteten Datenbanken (u.a. GESTIS, Sigma Aldrich, US-EPA, STARS, Rigoletto, molbase) keine Hinweise auf Konzentrationen gefunden, die eine Ergänzung der Tabelle 8 und Tabelle 12 ermöglichen. Das Gefährdungspotential dieser Stoffe ist daher nicht quantifizierbar.

Exposition

Wie die Berechnungen darlegen, erreicht nicht das Stoffgemisch Kerosin die Erdoberfläche bzw. die bodennahe Luftschicht, sondern ein Präzipitat in einer veränderten chemischen Zusammensetzung. Auch bei Freisetzung einer großen Masse Kerosins in geringer Höhe ist selbst im Winterszenario nicht zu erwarten, dass leichtflüchtige Stoffe wie Benzol, Toluol oder Xylol die bodennahe Luftschicht erreichen (Tabelle 12). Diese Aussage gilt für Kohlenwasserstoffe bis C10.

Für Kohlenwasserstoffe mit einer Kettenlänge von C11 (z.B. Undecan) ist im Winterszenario zu erwarten, dass diese bei minimaler Höhe beim TSA entlang der Flugachse (Abbildung 15) bodennahe Luftschichten mit Konzentrationen von 0,1-0,2 mg/m² erreichen können (Tabelle 12). Maßgeblich im Winter- und Frostpunkt-Szenario ist auch ein Niederschlag von C12- und C13-Kohlenwasserstoffen zu erwarten (meist im Bereich 2-15 mg/m²). Mit steigender Bodentemperatur verdampfen auch diese Kohlenwasserstoffe in der Atmosphäre, bevor sie die Erdoberfläche erreichen. Beim Jahresmitteltemperatur-Szenario sind Kettenlängen von C11 und C12 in Bodennähe nicht mehr Bestandteil des Präzipitats. Auch Kettenlängen der C13-Gruppe sind mit bis zu 0,7 mg/m² nur noch marginal Bestandteil des Präzipitat-Niederschlags.

Kohlenstoffmoleküle mit Kettenlängen von C14 und länger finden sich auch im Sommer-Szenario im errechneten Präzipitat an der Erdoberfläche.

Generell ist bei allen oben gemachten Angaben zu beachten, dass es sich bei den Präzipitat-Konzentrationen in den betrachteten Szenarien um Maximalkonzentrationen handelt, welche bei realen TSA-Ereignissen in einem Großteil der Fälle nicht erreicht werden (vgl. Kap. 6.3 und 7.1.1).

Beurteilung

Eine zielgerichtete Bewertung potenzieller Belastungen in der bodennahen Luft durch Präzipitat nach TSA ist mit dem derzeitigen Wissensstand nicht in vollem Umfang möglich.

Als einziges vom Grundsatz her anwendbares Bewertungskriterium für die Beurteilung von möglichen Präzipitatbestandteilen in der bodennahen Luft wurde der Immissions-Jahreswert gemäß 39. BImSchV recherchiert. Dieser liegt allerdings nur für den Einzelparameter Benzol vor, welcher gemäß der Modellberechnungen aufgrund der Verdunstung leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe entlang des Fallweges für alle 4 Modellszenarien nicht am Erdboden ankommt. Somit kann die 39. BImSchV aufgrund der fehlenden relevanten Einzelparameter nicht auf Präzipitatbestandteile angewendet werden.

Weiterhin wurde die Anwendung von Bewertungskriterien, welche ursprünglich für die Beurteilung von Luftbelastungen am Arbeitsplatz hergeleitet wurden, geprüft. Hierbei liegen Bewertungskriterien als GFS-Werte (ATSDR, 2017), AGW-Werte (TRGS 900 / GefStoffV, 2017) bzw. MAK-Werte vor. Diese gelten für Personen, die gesund und im erwerbsfähigen Alter sind, sowie am Arbeitsplatz täglich und für längere Zeiträume Kerosin(-komponenten) in Flüssig-

oder Gasphase exponiert sind. Eine direkte Übertragung auf TSA in Bezug auf das Umweltkompartiment „bodennahe Luft“ ist nicht zielführend, da von TSA auch andere Personengruppen (z. B. Schwangere, Kinder, Menschen mit Vorerkrankungen) betroffen sein können, die Exposition aber über einen deutlich kürzeren Zeitraum erfolgt. Zudem liegen die Bewertungskriterien für „Kerosin“ oder „Destillate“ vor, welche sich in ihrer chemischen Zusammensetzung von Präzipitat unterscheiden.

Zusätzlicher Aufklärungs- und ggf. Forschungsbedarf besteht unabhängig davon in der Festlegung des Bezugsfaktors zwischen numerisch ermittelten Depositionen [g/m^2] pro TSA und den Konzentrationen in der bodennahen Luft [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Es stellt sich zudem die Frage, in welchem Maße die Verdunstung von Präzipitat von (Boden-)Oberflächen zu einer Beeinflussung der Gesamtkonzentration in der bodennahen Luft beiträgt.

7.2.2 Boden

Gefährdungspotential und Bewertungskriterien

Bundesbodenschutzgesetz /Bundesbodenschutzverordnung

Das Bundesbodenschutzgesetz sieht für die Untersuchung und Bewertung von Verdachtsflächen unterschiedliche Werte und Anforderungen vor (§8 BBodSchG). Zu den relevanten Bemessungswerten gehören:

- ▶ Vorsorgewerte: Bodenwerte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung von geogenen oder großflächig siedlungsbedingten Schadstoffgehalten in der Regel davon auszugehen ist, dass die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht.
- ▶ Prüfwerte: Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung (oder Altlast) vorliegt.

Diese sind in der BBodSchV, Anhang 2 festgelegt und umfassen auch Stoffe, die in Kerosin-Stoffgemischen enthalten sein können (Tabelle 9).

LAGA und „Holland“-Liste

Die LAGA TR Boden gilt im engeren Sinne für die Verwertung von Abfallarten, u.a. 170504 „Boden und Steine“, und kann daher für die Fragestellung potenzieller Schadstoffdepositionen durch TSA lediglich zur Orientierung herangezogen werden.

Im Sinne der LAGA TR Boden (LAGA, 2004) ist Bodenmaterial ein Material aus Böden im Sinne von § 2 Abs. 1 BBodSchG und deren Ausgangssubstraten. Die Verwendung von Bodenmaterial (Einbau, flächige Ausbringung) ist gemäß LAGA nur dann zulässig, wenn „die Anforderungen des vorsorgenden Boden- und Grundwasserschutzes erfüllt werden“. Dies ist gewährleistet, „wenn (...) eine Schadstoffbelastung ausgeschlossen werden konnte oder sich aus analytischen Untersuchungen die Einstufung in die Einbauklasse 0 (Z0) ergibt.“ Hierfür sieht die LAGA für den Summenparameter „Kohlenwasserstoffe“ (C10-C40) einen Zuordnungswert von 100 mg/kg Feststoffgehalt vor. Dieser bildet stofflich näherungsweise das Gesamtspektrum an Einzelsubstanzen des Präzipitats ab.

Tabelle 9: Bewertungskriterien potenzieller Belastungen durch Kohlenwasserstoffe im Umweltkompartiment Boden

Parameter	Einheit	Zuordnungswert (LAGA) / Referenzwert „Holland-Liste“	Prüfwerte BBodSchV	Grundlage
Kohlenwasserstoffe (C10-C22)	mg/kg TS	100 (Z0)		LAGA – Technische Regel Boden, 2004
Kohlenwasserstoffe („Mineralöl“)	mg/kg TS	50		Interventions-/ Referenzwerte Niederlande, 1994 („Holland-Liste“)
Benzo(a)pyren (C20)	mg/kg TS		2	BBodSchG / V Wirkungspfad Boden – Mensch, Kinderspielflächen
Benzo(a)pyren (C20)	mg/kg TS		1	BBodSchG / V Wirkungspfad Boden – Nutzpflanze
Benzo(a)pyren (C20)	mg/kg TS		1 / 0,3	BBodSchG / V Vorsorgewerte Boden Humus > 8 % / < 8 %
PAK 16	mg/kg TS		10 / 3	BBodSchG / V Vorsorgewerte Boden Humus > 8 % / < 8 %

Die Referenz- bzw. Interventionswerte der sogenannten „Holland-Liste“ (Interventions- und Referenzwerte der Niederlande, 1994) zur Bewertung von Altlasten wurden vor Einführung der LAGA im Jahr 1997 häufig auch in Deutschland bei altlastenrelevanten Fragestellungen zugrunde gelegt. In der Vergangenheit wurde der Summenparameter „Mineralöl“ mit einem Referenzwert von 50 mg/kg bei der Bewertung potenzieller Depositionen von Kerosinbestandteilen zugrunde gelegt (TÜV Rheinland Gruppe, 1993).

Exposition

Für das Umweltkompartiment „Boden“ kann auf Grundlage des BBodSchG im Zusammenhang mit der BBodSchV eine Bewertung Kerosin-affiner Stoffkonzentrationen gemacht werden. Einschränkungen bestehen jedoch bei der Festlegung eines Umrechnungsfaktors für den Bezug von numerisch modellierten Stoffdepositionen [g/m²] auf die Vorsorge- und Prüfwerte [mg/kg TS]. Der Faktor für die Berechnung einer Stoffmasse (Präzipitat-Bestandteil) pro Einheit Bodenvolumen (bzw. Bodenmasse) ergibt sich daraus, wie tief das Präzipitat in den Boden eindringt. Über das Gewicht des durch Präzipitat beaufschlagten Bodens ergibt sich die Einheit „mg/kg“. Setzt man eine Eindringtiefe in den Boden von nur 10 cm und eine gemittelte Trockendichte für unterschiedliche Böden von 1,7 t/m³ an, ergibt sich für eine Bewertung eine Trockenmasse von rund 170 kg Boden je Quadratmeter.

Nachfolgenden Betrachtungen liegt zugrunde, dass das Präzipitat vollständig in oben benannter Bodenprobe wiederauffindbar ist, also keine weitere Verdunstung des Präzipitats am Boden und kein (mikro-) biologischer Abbau des Präzipitats erfolgt. Ferner beziehen sich die Daten auf die direkte Flugachse, in der maximal berechnete Präzipitat-Konzentration vorherrscht. Mit zunehmendem Abstand zur Flugachse nehmen die Belastungen wie erläutert ab.

Die Konzentrationen des Präzipitats der Kohlenwasserstoffe C10-C22 liegen in den Rechenszenarien Jahresmitteltemperatur und Frostpunkt bei 26-81 mg/m². Hieraus ergeben

sich rechnerisch Bodenbelastungen von 0,15 bis 0,48 mg/kg TS für die Kohlenwasserstoffe C10-C22.

Benzo(a)pyren (C20) ist nicht im Präzipitat ausgewiesen, da dieser Stoff kein Bestandteil des im Modell angesetzten Kerosingemisches ist. Die Konzentrationen kürzerkettiger C16-Aromanten im Präzipitat liegen in den Rechenszenarien Jahresmitteltemperatur und Frostpunkt bei 0,3-0,5 mg/m², woraus sich für diese rechnerische Bodenbelastungen von 0,002 bis 0,003 mg/kg TS ergeben.

Die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK 16) sind nicht explizit im Präzipitat ausgewiesen, da dieser Summenparameter ebenfalls kein Bestandteil des im Modell angesetzten Kerosingemisches ist. Vergleichend kann hier am Ehesten der Gesamtgehalt an aromatischen Kohlenwasserstoffen im Präzipitat herangezogen werden. Diese liegen in den o.g. Rechenszenarien bei 7,7-18,4 mg/m², woraus sich rechnerische Bodenbelastungen von 0,05 bis 0,11 mg/kg TS ergeben.

Beurteilung

Eine Gefährdung des Oberbodens durch TSA liegt unter Zugrundelegung der Ergebnisse der Modellberechnungen sowie der recherchierten Bewertungskriterien (BBodSchG/V, LAGA, „Holland“-Liste) nicht vor.

Die in Tabelle 9 aufgeführten chemischen Stoffe der BBodSchV (Benzo(a)pyren, PAK) sind in den Modellrechnungen nicht explizit ausgewiesen, da diese Stoffe kein Bestandteil des im Modell angesetzten Kerosingemisches sind. Die ermittelten Vergleichswerte für kürzerkettige C16-Aromanten und dem Gesamtgehalt an aromatischen Kohlenwasserstoffen liegt bei unter 1% der Prüfwerte bzw. Vorsorgewerte der BBodSchV (Tabelle 9).

Vom Stoffspektrum her besser für eine Bewertung geeignet sind die Kohlenwasserstoffe (C10-C22) gemäß LAGA, da zumindest Teile dieser Stoffgruppe gemäß den Modellberechnungen im Präzipitat vorliegen können. Die abgeschätzten maximalen Bodenkonzentrationen des Präzipitats liegen für die Berechnungsszenarien „Frostpunkt“ und „Jahresmitteltemperatur“ bei <1% des Zuordnungswerts Z0 gemäß LAGA für Kohlenwasserstoffe (C10-C22). Auch wenn die LAGA eigentlich ein anderes Anwendungsgebiet hat, so lassen sich die Werte als Vergleichswerte heranziehen und zeigen, dass durch TSA keine Gefährdung des Oberbodens vorliegt.

Eine feine Verteilung des Präzipitats und eine Ablagerung von Präzipitatanteilen oberhalb des Bodens, beispielsweise auf versiegelten Flächen (Dächern, Straßen, Parkplätzen u. ä.) und Pflanzen (Gräsern, Bäumen, Blättern u. ä.) begünstigen eine Verdunstung von Präzipitat in Bodennähe. Ein Eintrag von Präzipitat in den Boden ist damit zusätzlich vermindert, ohne dass hieraus eine signifikante Erhöhung der Belastung der bodennahen Luft ableitbar wäre. Ferner können mikrobiologische Prozesse dazu beitragen, dass in den Boden eingetragene Schadstoffe dort abgebaut und zu unschädlichen Stoffen umgesetzt werden. Eine Akkumulation von Präzipitat aus TSA im Boden und eine daraus resultierende schädliche Bodenveränderung ist daher unwahrscheinlich.

7.2.3 (Grund-)Wasser

Gefährdungspotential und Bewertungskriterien

Es wurden Bewertungskriterien für potenzielle Belastungen durch Präzipitatbestandteile im Umweltkompartiment „(Grund-) Wasser“ aus folgenden Bereichen recherchiert:

- Einstufung in Wassergefährdungsklassen,

- Oberflächengewässer: Oberflächengewässerverordnung (OGewV),
- Grundwasser: LAWA, BBodSchV.

Die Wassergefährdungsklasse (WGK) von Stoffen ist bundeseinheitlich in der AwSV (2017) verbindlich festgelegt und online in der STARS-Datenbank des UBA verfügbar. Die AwSV definiert die WGK wie folgt:

- Wassergefährdungsklasse 1: schwach wassergefährdend,
- Wassergefährdungsklasse 2: deutlich wassergefährdend,
- Wassergefährdungsklasse 3: stark wassergefährdend.

Eine vergleichbare Einstufung ergibt sich bei Betrachtung der Wassergefährdung nach EU-GHS-Verordnung (2008). Diese bündelt und vereinheitlicht die Einstufung des Gefährdungspotenzials von chemischen Stoffen, Gemischen und bestimmten spezifischen Erzeugnissen. In Bezug auf die betrachteten Kerosin-Inhaltsstoffe weist bei den längerkettigen Kohlenwasserstoffen >C10 lediglich die Gruppe der Aromaten eine Wassergefährdung mit akutem oder chronischem Gefährdungspotenzial auf (Tabelle 13). Für Alkane und Cycloalkane >C11, wie sie im Präzipitat auftreten können, finden sich hier keine Einstufungen als wassergefährdend.

Für Oberflächengewässer werden in der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) Bewertungskriterien für verschiedene Gewässertypen vorgegeben. Diese werden als Umweltqualitätsnorm, zum einen anhand eines Jahresdurchschnittswerts angegeben (JD-UQN), zum anderen als zulässige Höchstkonzentration (ZHK-UQN). Da es sich beim TSA um singuläre Ereignisse handelt, lassen sich die JD-UQN nicht direkt auf Auswirkungen von TSA anwenden, wenn von einem biologischen Abbau oder Verdünnungseffekten innerhalb kurzer Zeiträume ausgegangen wird. Die Angaben der ZHK-UQN sind hier vom Ansatz her besser geeignet.

Darüber hinaus stellt sich auch hier die Frage, welche Bestandteile des Präzipitats bewertungsrelevant sind. In der OGewV sind, jeweils für oberirdische Gewässer ohne Übergangsgewässer, UQN für die Einzelstoffe Benzol (JD-UQN: 10 µg/l, ZHK-UQN: 50 µg/l), Naphthalin (JD-UQN: 2 µg/l, ZHK-UQN: 130 µg/l) und Benzo[a]pyren (JD-UQN: 0,00017 µg/l, ZHK-UQN: 0,27 µg/l) angegeben. Für Substanzgruppen wie MKW liegen keine UQN vor.

Zur Bewertung von Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit (potenzielle oder bereits eingetretene) hat die LAWA (2004) einheitliche Bewertungskriterien entwickelt und diese 2016 um zahlreiche organische Stoffe ergänzt. Betrachtet wird der Maßstab, *„bis zu welchen Stoffkonzentrationen anthropogene, räumlich begrenzte Änderungen der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers als geringfügig erachtet werden können und ab welcher Konzentration eine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit des Grundwassers vorliegt.“* Die Novellierung von 2016 der Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) umfasst auch Stoffe, die auch im Präzipitat nach TSA enthalten sein können (Tabelle 10).

Tabelle 10: Bezugsgrößen zur Bewertung potenzieller Belastungen durch Kohlenwasserstoffe im Umweltkompartiment Grundwasser

Parameter	Einheit	GFS-Wert (LAWA)	Referenzwert („Holland“-Liste)	Prüfwerte BBodSchV	Grundlage
Kohlenwasserstoffe (GW)	µg/l	100			LAWA GFS-Bericht 2016
Benzol und alkylierte Benzole	µg/l	20			LAWA GFS-Bericht 2016
Benzol	µg/l	1			LAWA GFS-Bericht 2016
PAK gesamt (EPA 15)	µg/l	0,2			LAWA GFS-Bericht 2016
Naphthalin	µg/l	2			LAWA GFS-Bericht 2016
Benzo(a)pyren (C20)	µg/l	0,01			LAWA GFS-Bericht 2016
Mineralöl	µg/l		50		Interventions-/Referenzwerte Niederlande, 1994
Mineralölkohlenwasserstoffe MKW (C10-C39)	µg/l			200	BBodSchG / V Wirkungspfad Boden – Grundwasser
BTEX gesamt (Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol)	µg/l			20	BBodSchG / V Wirkungspfad Boden – Grundwasser
Benzol	µg/l			1	BBodSchG / V Wirkungspfad Boden – Grundwasser
PAK gesamt (EPA 15)	µg/l			0,2	BBodSchG / V Wirkungspfad Boden – Grundwasser
Naphthalin	µg/l			2	BBodSchG / V Wirkungspfad Boden – Grundwasser

Das BBodSchG legt in der BBodSchV Prüfwerte für verschiedene Kohlenwasserstoffe Einzelkonzentrationen und Summenparameter fest, bei „deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und

festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung [...] vorliegt.“ Die Werte der jeweiligen Stoffe (BTEX, Benzol, PAK (15), Naphthalin) sind für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser mit denen der Geringfügigkeitsschwellen nach LAWA (2016) vergleichbar (Tabelle 10).

Neben den beschriebenen Bewertungskriterien für das Grund- und Oberflächenwasser existieren Grenzwerte für Kohlenwasserstoff-Verbindungen im Trinkwasser. Die TrinkwV (Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (TrinkwV), 2018) regelt die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch, im engeren Sinne „Trinkwasser“. Im Sinne der TrinkwV ist „Trinkwasser (alles Wasser), ungeachtet dessen, ob das Wasser für die Bereitstellung auf Leitungswegen, in Wassertransport-Fahrzeugen, aus Trinkwasserspeichern an Bord von Land-, Wasser- oder Luftfahrzeugen oder in verschlossenen Behältnissen bestimmt ist.“ In der TrinkwV beschriebene Grenzwerte für Benzol (1 µg/l), Benzo(a)pyren (0,01 µg/l) oder Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (0,1 µg/l) beziehen sich auf die Qualität von Trinkwasser und lassen sich nicht auf die Beschaffenheit von natürlichem Grundwasser als „Rohstoff“ anwenden. Die TrinkwV ist nicht geeignet, Aussagen für Wasser als „Gewässer“ im Sinne des § 2, WHG (2018) (Oberirdische Gewässer, Grundwasser) sowie deren Wasserbeschaffenheit (§3 WHG) zu treffen.

Exposition

Einteilung der Präzipitatbestandteile in Wassergefährdungsklassen

Die Einteilung möglicher im Präzipitat enthaltener Stoffe in Wassergefährdungsklassen ist in Tabelle 11 im Anhang zusammengestellt. Die Einteilung bezieht sich auf die beiden Szenarien Frostpunkt und Jahresmitteltemperatur. Im Kerosin enthalten, aber gemäß den Modellberechnungen nicht im Präzipitat vorhanden, sind Vertreter der stark wassergefährdenden Stoffe (WGK 3) wie Nonan, Cyclodecan oder Naphthalin, sowie deutlich wassergefährdenden Stoffe (WGK 2) wie Octan, Cyclooctan, Xylol oder Trimethylbenzol (TMB) und schwach wassergefährdenden Stoffe (WGK 1) wie Decan.

Bei einer Ablasshöhe von 5.000 ft sind im Frostpunktszenario schwach wassergefährdende Stoffe (WGK 1) wie Un-, Do- und Tridecan, Cyclododecan sowie Fluoren (WGK 3) Bestandteile des Präzipitats. Mit steigenden Temperaturen verdunsten mehr Stoffe in der Atmosphäre, so dass beim Jahresmitteltemperatur-Szenario von den vorgenannten Stoffen nur noch Tridecan und C13-Aromaten im Präzipitat enthalten sind. In beiden Szenarien stets als Bestandteile des Präzipitats anzusehen sind schwach wassergefährdende Stoffe (WGK 1) wie Tetra-, Penta- und Hexadecan sowie Anthracen, Pyren und Fluoranthren (jeweils WGK 2) und Phenanthren (WGK 3).

Für Kerosinbestandteile wie Cyclononan, Cycloundecan und Azulen liegen keine Stoffdatenblätter vor. Diese Stoffe sind jedoch auch nicht Bestandteile des Präzipitats. Ebenfalls keine Stoffdatenblätter fanden sich für Präzipitatbestandteile wie Cyclotri- bis Cyclohexadecan und Phenalen.

Oberflächengewässer

Für die Betrachtung eines möglichen Eintrags von Präzipitat in ein Oberflächengewässer ist eine Umrechnung der Präzipitat-Flächenkonzentration in g/m² Bodenoberfläche in eine Konzentration in der Einheit µg/l notwendig. Setzt man eine fiktive Wassertiefe von 1 m an, so würde sich im Fall des Jahresdurchschnittstemperatur-Szenarios mit einer Präzipitat-Flächenkonzentration von 0,026 g/m² rechnerisch eine fiktive Präzipitat-Konzentration im Oberflächenwasser von 26 µg/l ergeben.

Grundwasser

Eine direkte Exposition von Präzipitat auf das Grundwasser erfolgt nicht, da das Präzipitat zunächst nur die Erdoberfläche erreicht. Eine feine Verteilung von Präzipitat und eine Ablagerung von Präzipitatanteilen oberhalb des Bodens, beispielsweise auf versiegelten Flächen (Dächern, Straßen, Parkplätzen u.ä.) und Pflanzen (Gräsern, Blättern u.ä.) begünstigen eine Verdunstung von Präzipitat in Bodennähe und mindert den zur Versickerung zur Verfügung stehenden Anteil an Präzipitat.

Nur über zeitlich nach dem TSA folgende Regenereignisse in nicht versiegelten oder gering bepflanzten Bereichen können Anteile des Präzipitats über eine zeitlich verzögerte Versickerung durch die ungesättigte Bodenzone das Grundwasser erreichen.

Eine mögliche Versickerung von Präzipitat durch Niederschlagswasser (Regenwasser) ist komplex und hängt von zahlreichen lokalen Faktoren ab:

- ▶ Beschaffung der Oberfläche,
- ▶ Bodenaufbau der ungesättigten Bodenzone,
- ▶ Grundwasserflurabstand,
- ▶ Temperatur und Regenereignisse unmittelbar nach dem TSA,
- ▶ Mikrobiologische Abbauprozesse entlang der Sickerstrecke.

Die Prozesse im Untergrund bewirken in der Praxis, dass in den Boden eingetragene Schadstoffe sowohl zeitlich verzögert (bedingt durch den Versickerungsprozess) als auch in ihrer Konzentration nur vermindert dem Grundwasser zugeführt werden. Letztes wird unter anderem durch Sorption am Bodenkorn oder Lösung im Porenwasser sowie teilweise durch mikrobiologischen Abbau der Schadstoffe im Boden bedingt. So ist z.B. bei schluffigen und tonigen Böden eine Versickerung von Präzipitat nicht zu erwarten.

Um in einem ersten Schritt ansatzweise eine Exposition von Präzipitat auf das Grundwasser abzuleiten wurde ein möglichst konservativer Ansatz zur Abschätzung gewählt:

- ▶ Beschaffung der Oberfläche: z.B. unbestellte Ackerfläche,
- ▶ Bodenaufbau der ungesättigten Bodenzone: vorwiegend sandig,
- ▶ Grundwasserflurabstand: gering (< 1 m),
- ▶ Temperatur und Regenereignisse unmittelbar nach dem TSA: Jahresmitteltemperatur, unmittelbar nach dem TSA erfolgen intensive mehrwöchige Niederschläge. Bei kälteren Temperaturen (siehe Tabelle 6: Frost- und Winterszenario) würde es zu Bodenfrost oder Schnee kommen, hier sind Versickerung in das Grundwasser vernachlässigbar, wenn auch die berechnete Präzipitatsmenge am Erdboden größer wäre.
- ▶ Sorptions- und mikrobiologische Abbauprozesse entlang der Sickerstrecke: werden vernachlässigt.

Gemäß den Modellberechnungen erreichen im Jahresmittel-Szenario $0,026 \text{ g/m}^2$, bzw. 26 mg/m^2 , Präzipitat (siehe Tabelle 6) den Erdboden. Das Präzipitat besteht im Jahresmittelszenario aus längererkettigen Kohlenstoffen (siehe Abbildung 13).

Vergleicht man die Ausgangsstoffe des Treibstoffes in Tabelle 4 mit den Modellergebnissen des Präzipitats im Jahresmittelszenario (Abbildung 13) und den Bezugsgrößen zur Grundwasserbewertung in Tabelle 10 bleibt

lediglich der Summenparameter „Kohlenwasserstoffe“ mit einem Geringfügigkeitsschwellenwert von $100 \mu\text{g/l}$ Kohlenwasserstoffe als Bewertungsgrundlage für das Grundwasser übrig. Alle anderen Parameter in Tabelle 10 sind für die gewählte Grundwasserbetrachtung nicht im Präzipitat enthalten und somit vernachlässigbar.

Unterstellt man eine vollständige Lösung des Präzipitats von 26 mg/m^2 im Niederschlagswasser, ergibt sich bei dem o.g. Ansatz eine Mindestmenge Wasser die erforderlich ist, um Geringfügigkeitsschwellenwert von $100 \mu\text{g/l}$ Kohlenwasserstoffe aus Tabelle 10 zu unterschreiten. Hierbei ergeben sich eine Mindestwassermengen von 260 l/m^2 , um den GFS-Wert der LAWA für die Grundwasserqualität zu unterschreiten. Eine Niederschlagsmenge von 260 l/m^2 ist für intensive mehrwöchige Niederschlagsperioden in Deutschland durchaus üblich. Höhere Niederschlagsmengen würden eine höhere Verdünnung bewirken, geringere Niederschläge würden den Transport durch die ungesättigte Zone mindern.

Selbst bei einer konservativen Betrachtung ist von keiner nennenswerten Exposition von Präzipitat im Grundwasser auszugehen. Berücksichtigt man zusätzlich die zahlreichen weiteren mindernden Prozesse (wie. z.B. mikrobiologischer Abbau von Kohlenwasserstoffen und Sorption von Kohlenstoffen im Bodenkorn) ist eine Exposition von Präzipitat im Grundwasser vernachlässigbar.

Beurteilung

Einordnung in Wassergefährdungsklassen

Grundsätzlich kann bei einem TSA über Wasserflächen der Eintrag von wassergefährdenden Stoffen nicht ausgeschlossen werden.

Die Aufstellung der WGK-Zuordnung ausgewählter Kerosin-Inhaltsstoffe in Tabelle 11 zeigt, dass insbesondere kurzkettige, leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe ein höheres Wassergefährdungspotenzial haben (WGK 2 + WGK 3). Die numerischen Modellierungen geben einen Hinweis darauf, dass diese Stoffe (C8 bis C10) im Präzipitat nicht enthalten sind. Die WGK der längerkettigen Aromaten (C11 bis C16) kann ebenfalls im Bereich „deutlich“ bis „stark“ wassergefährdend liegen. Der Anteil der Aromaten am Gesamtstoffgemisch „Kerosin“ beträgt ca. 10-20 % (Masse), (Stoffdatenblätter zu Jet A-1; Shell, 2018). Der Anteil der Aromaten sowie deren Konzentrationen in den numerisch modellierten Präzipitat-Zusammensetzungen ist im Analogschluss gering.

Oberflächengewässer

Eine zielgerichtete Bewertung potenzieller Belastungen in Oberflächengewässer durch Präzipitat nach TSA ist mit dem derzeitigen Wissensstand nicht in vollem Umfang möglich.

Die berechnete fiktive Präzipitat-Konzentration im Oberflächengewässer, bei einer Annahme einer Wassertiefe von 1 m, lässt sich nicht direkt mit den UQN der OGewV vergleichen, da in dieser lediglich Einzelstoffe betrachtet werden, welche im Präzipitat anhand der Modellberechnungen nicht (mehr) an der Erdoberfläche vorkommen (Benzol, Naphthalin, Benzo[a]pyren). Zudem variieren die Größe eines Gewässers, der Gewässertyp (Fließgewässer, stehendes Gewässer, Stausee u.a.), die Fließgeschwindigkeit und die horizontale und vertikale Durchmischung des Gewässers in einer großen Bandbreite. Für eine zielgerichtete Bewertung potenzieller Belastungen in Oberflächengewässer durch Präzipitat nach TSA existiert derzeit keine geeignete Bewertungsgrundlage.

Grundwasser

Wie oben ausgeführt, ist bei einer konservativen Betrachtung von keiner Überschreitung von Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA durch Präzipitat im Grundwasser auszugehen. Es liegt somit keine Gefährdung des Grundwassers durch Präzipitat vor.

7.2.4 Ökotoxikologische Relevanz von Kerosin und Kerosin-Inhaltsstoffen

In Bezug auf die ökotoxikologische Relevanz sind die möglichen Risiken eines TSA mit dem derzeitigen Wissenstand noch nicht in allen Details abschließend bewertbar.

Nachstehend sind exemplarisch Ergebnisse aus unterschiedlichen Feldstudien zu Auswirkungen von Kerosinverunreinigungen in unterschiedlichen Umweltkompartimenten beschrieben. Diese Studien erfolgten zumeist im Zusammenhang mit der Sanierung von Tanklagerschäden und stehen in keinem direkten Zusammenhang mit Studien zum TSA.

In Atlas (1993), Schlegel (2006) und Blume et al. (2010) werden Angaben gemacht zur Abbaubarkeit petrochemischer Produkte im Boden. Demnach erfolgt der Abbau von Kohlenwasserstoffen im Boden durch adaptive aerobe Bakterien und Pilze bei leicht alkalischen Bedingungen. Bei niedrigen pH-Werten sind hierbei überwiegend Pilze aktiv. Unter anaeroben Bedingungen sind N- und S-reduzierende Bakterien in der Lage, Öl abzubauen. Die relevanten Mikroorganismen sind in Feld-, Wald- und Wiesenböden weit verbreitet.

Kerosin besteht hauptsächlich aus Alkanen, Cycloalkanen und Aromaten mit 10 bis 14 C-Atomen. Alkane und Aromaten mit 10 bis 22 C-Atomen weisen eine geringe Toxizität und daher eine gute biologische Abbaubarkeit auf. Der Abbau von Alkanen wird durch die Oxidation an den C-Atomen eingeleitet. Es erfolgt die Oxidation zu Fettsäuren. Die Spaltung der Aromaten-Ringe erfolgt nach der Oxidation zu Phenolen. Im Gegensatz zu n-Alkanen (Alkanabbau) werden Cycloalkane nur von wenigen Mikroorganismen als einzige C- und N-Quelle verwertet. Hier sind beispielsweise *Acinetobacter sp.* aktiv.

Dean-Ross (1992, 1993) führte experimentelle Untersuchungen zur Stabilität von JP-4 und JP-8 in der Umwelt durch. Hierbei zeigte sich das Verdunsten leichtflüchtiger Komponenten als die Hauptursache für den Rückgang der Konzentrationen der Einzelkomponenten über die Zeit. Die Biodegradation verläuft dagegen langsamer ab, trägt aber dennoch signifikant zur Reduzierung der Konzentrationen längerkettiger Komponenten bei.

Tests mit Alfalfa (Luzerne) zeigten ein gutes Wachstum der Pflanzen sowie eine Reduktion des eingebrachten JP-8 um mehr als 90 % in weniger als fünf Monaten. Hierzu wurde eine Kontamination von 1.700 ppm JP-8 zu Beginn in der Nähe der Wurzeln eingebracht. In trockener Erde dagegen wurde JP-8 in einer Tiefe von 20 cm innerhalb von 18 Monaten nur zur Hälfte reduziert (Biodegradation of jet fuel (JP-8) in the presence of vegetation, 1999). Das Wachstum von Alfalfa wurde von JP-8 im Boden nicht beeinflusst. Als Erkenntnis der Studie wurde Bioremediation von JP-8 bei Vorhandensein von Pflanzen als eine effektive Form der Reinigung bewertet. Neben der Evaporation, die den größten Anteil an der Verflüchtigung/dem Abbau von Flugzeugtreibstoff in der terrestrischen Umwelt hat, kann Biodegradation den Umwelteinfluss von weniger leichtflüchtigen, längerkettigen Kohlenwasserstoffen reduzieren.

Eine Feldstudie zur Untersuchung von Grundwasser, welches durch JP-4 Flugzeugtreibstoff kontaminiert wurde (Handhabungsverluste) zeigte auf, dass die in situ mikrobiologische Gemeinschaft trotz einer Kontamination weiterhin aktiv war und zu einem Kraftstoffabbau beitrug. Es wurde weiterhin abgeleitet, dass die Biodegradation abhängig sein könnte von der Zusammensetzung der grundwasserökologischen Vergesellschaftung. Es wurde ferner darauf geschlossen, dass eine Zugabe von Stickstoff die Biodegradation von Kohlenwasserstoffen noch steigern könnte (Aelion, et al., 1991).

Durch die selektive Verdunstung leichtflüchtiger Kerosinkomponenten beim TSA erfolgt eine Entmischung und Anreicherung schwerer flüchtiger, längerkettiger Kohlenwasserstoffe im Präzipitat. Die numerischen Modellierungen lassen darauf schließen, dass kurzkettige Alkane, Cycloalkane und Aromaten ($C \leq 10$) mit relativ hohem Umwelt-Gefährdungspotenzial im Präzipitat nicht mehr enthalten sind. Daher sollten zur Bewertung der Auswirkungen potenzieller Depositionen durch TSA auf Ökosysteme vielmehr die relevanten (schwer flüchtigen) Einzelstoffe berücksichtigt werden.

Die genannten Studien zeigen, dass Kerosin-Verunreinigungen durch mikrobiologische Prozesse und Pflanzen abgebaut werden können. Neben der stofflichen Verwertung und Umwandlung der Kohlenwasserstoffe ist bei der Phytoremediation die Verdunstung (Evaporation) ein wichtiger Prozess. Dieser dürfte beim Präzipitat weitestgehend entfallen, da die Entmischung und Verdunstung leichterflüchtiger Kerosinbestandteile bereits in der Atmosphäre erfolgte.

7.2.5 Humantoxikologische Relevanz von Kerosin und Kerosin-Inhaltsstoffen

Für eine Bewertung humantoxikologischer Auswirkungen durch die Exposition zu Kerosinkomponenten gibt es keine einheitliche und umfassende Bewertungsgrundlage. Nachstehend werden unterschiedliche Ansätze und Literaturwerte vorgestellt und diskutiert.

MAK-Werte, Exposition am Arbeitsplatz

Für eine große Anzahl an Kerosin-Inhaltsstoffen wurden aufgrund der stoffspezifischen gesundheitsgefährdenden Eigenschaften (Gas, Dampf, Schwebstoff) MAK-Werte festgelegt (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration, Tabelle 12). Diese gelten für Personen, die am Arbeitsplatz täglich und für längere Zeiträume Kerosin(-komponenten) in Flüssig- oder Gasphase exponiert sind.

Als Maximale Arbeitsplatz-Konzentration gilt *„die höchstzulässige Konzentration eines Arbeitsstoffes ..., die nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnis auch bei wiederholter und langfristiger Exposition ... im Allgemeinen die Gesundheit der Beschäftigten nicht beeinträchtigt und diese nicht unangemessen belästigt.“* Dabei gelten die MAK-Werte für Personen, die gesund und im erwerbsfähigen Alter sind.

Auf internationaler Ebene empfiehlt die NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) einen Grenzwert von 100 mg/m^3 Kerosin in Luft (Innenluft am Arbeitsplatz) für einen durchschnittlichen Zeitraum von 10 Stunden pro Arbeitstag (Agency for Toxic Substances and Cisaese Registry (ATSDR), 2018).

Unterschiedliche Studien zeigen das Gefährdungspotenzial von Kerosinbestandteilen im täglichen Umgang bei verschiedenen Arten der Exposition auf:

Basierend auf diversen Untersuchungen werden die in Kerosin enthaltenen Stoffe Tridecan und Tetradecan als die zwei vermutlich für Hautirritationen entscheidende Hydrokarbone

angesehen. Studien zeigten, dass ein wiederholter Hautkontakt mit Flugzeugtreibstoffen zu Hautirritationen führt (Muhammad, et al., 2005).

Seit der Umstellung von JP-4 auf JP-8 Flugzeugtreibstoff in den Jahren 1991 bis 1996 bei der USAF und der U.S. Army haben die gemeldeten und/oder medizinisch diagnostizierten Beschwerdemeldungen von exponiertem Personal zugenommen. Symptome die bei selbst gemeldeten Beschwerden genannt wurden sind u.a. Schwindel, Gleichgewichtsstörung, Schwierigkeiten beim Gehen, generelle Schwäche/Erschöpfung, Schwierigkeit beim Greifen von Gegenständen, Taubheit/Kribbeln von Gliedmaßen, juckende Haut, Blasen/Hautausschläge auf Händen/Armen, chemische Allergien, Atemprobleme, Brustbeklemmung, übermäßiges Schwitzen, Konzentrationsschwierigkeiten, Vergesslichkeit. Für Menschen gibt es keine Studien zu tödlichen Vorfällen im Zusammenhang mit einer einzelnen Exposition von Flugtreibstoff.

Das National Research Council hat festgestellt, dass die Inhalation von JP-8-Ausdampfungen keine karzinogenen Risiken birgt, der Hautkontakt jedoch ein Risiko von Hautkrebs und Hautsensibilisierung bedeuten kann. Der niedrige Dampfdruck und eine langsamere Verdunstungsrate von JP-8, verglichen mit dem zuvor genutzten Flugzeugtreibstoff JP-4, sorgen für einen länger andauernden Hautkontakt und können somit zu einer gesteigerten Aussetzung der Haut führen (Chao, et al., 2005).

Tierversuche

Die letale Dosis eines Stoffes ist die Dosis, die tödlich (letal) für ein bestimmtes Lebewesen wirkt. Toxizitätsbestimmungen unterliegen vielen verschiedenen Faktoren wie beispielsweise dem allgemeinen Gesundheits- und dem Ernährungszustand von Versuchstieren. Es wird daher meist die Dosis angegeben, deren letaler Effekt sich auf 50 Prozent der beobachteten Population bezieht. Dies ist die mittlere letale Dosis LD₅₀.

Die orale Dosis bei Ratten von purem Kerosin, die bei 50 % der getesteten Population letal wirkt (LD₅₀), ist bei JP-8 größer als 5,0 g/kg. Ein Test an männlichen Ratten mit über eine Magensonde zugeführtem JP-4 deutete auf eine LD₅₀ von mehr als 8,0 g/kg hin. Die LD₅₀ bei Aufnahme über die Haut lag bei Ratten bei >2,0 g/kg. Die LD₅₀ für eingeatmetes Gasgemisch lag bei Ratten bei >3,43 mg/l. Bei einer Kombination aus Gasgemisch und Treibstoffaerosolen lag die LD₅₀ bei >4,39 mg/l. Tests an Kaninchen mit Applikation von JP-8 in Augen und auf die Haut deuten auf keine Irritation in den Augen hin. Auf der Haut reichte die Irritation nach Verabreichung von „keiner Irritation“ zu „leichter Irritation“ und wieder zurück zu „keiner Irritation“. Es wurden 0,5 ml JP-8 auf einen rasierten Hautbereich am Rücken des Kaninchens aufgetragen (Mattie, et al., 2011).

McDougal et al. (2000) führten Experimente zur Untersuchung des Eindringens und der Adsorption von JP-8 und seiner Hauptkomponenten auf der Haut von Ratten durch, um entsprechende Effekte für den Menschen abzuschätzen. Aus den Ergebnissen wurde geschlossen, dass aufgrund niedriger Eindringraten der JP-8-Inhaltsstoffe eine systematische Toxizität durch Hautresorption nicht gegeben ist.

Untersuchungen mit Xylolen zeigten auf, dass bei oraler Aufnahme die LD₅₀ - Werte bei Ratten zwischen 3,5-7,7 g/kg liegen (Ritchie, et al., 2003).

Die Untersuchungen dieser Studie zeigen, dass Stoffe mit festgelegten MAK-Werten (Octan, Xylole, Trimethylbenzol (TMB), Naphthalin, Tabelle 12), nicht Bestandteile im Präzipitat des simulierten Frostpunktszenarios sind. Für die im Präzipitat enthaltenen Inhaltsstoffe sind hingegen keine MAK-Werte festgelegt.

Bei der Bewertung der letalen Dosis für eine Ratte kann man zunächst überschlägig ein Gewicht von 200 g je Tier ansetzen. Entsprechend reduzieren sich die Werte in Tabelle 14 bei der

Umrechnung von mg/kg aus mg/Tier auf ein Fünftel. Wenngleich für einige im Präzipitat enthaltenen Inhaltsstoffe Letalitätsdosen benannt sind, liegen diese sehr weit unten den Werten je Tier.

MAK-Werte können für die humantoxikologische Bewertung einer möglichen Gefährdung durch TSA nicht rechtlich belastbar herangezogen werden. Sie gelten für langfristige und wiederholte Exposition am Arbeitsplatz. Eine potenzielle einmalige Exposition einer Person an der Erdoberfläche durch TSA wird durch das Bewertungsschema der MAK-Werte nicht abgebildet (DFG, 2015). Zudem zeigen die Expositionen, dass Stoffe mit definierten MAK-Werten nicht Bestandteile im Präzipitat des Frostpunktszenarios sind und für die Inhaltsstoffe im Präzipitat keine MAK-Werte festgelegt sind.

Bezogen auf die Letalitätsdosen einer Ratte müssten diese auch bei Exposition beim Frostpunktszenario das Präzipitat von jeweils über einhundert m² aufnehmen, um eine Letalitätsrate von 50% durch das Präzipitat aus TSA zu erreichen. Entsprechend ist aus diesen Werten keine akute Gefährdung ableitbar.

Für eine zielgerichtete Bewertung einer humantoxikologischen Relevanz durch Präzipitat nach TSA existiert derzeit keine vollumfängliche Bewertungsgrundlage, da die Präzipitat-Inhaltsstoffe nicht Gegenstand von o.g. Regelwerken sind. Zumindest liegt gemäß den Berechnungsergebnissen keine akute humantoxische Wirkung durch leichtflüchtige Substanzen (C8-C10) des Präzipitats vor (vgl. Abbildung 13).

Fazit

Auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse können die umwelt- und humantoxikologischen Risiken eines Treibstoffschnellablasses derzeit noch nicht abschließend bewertet werden. Maßgeblich hierfür ist, dass die Präzipitat-Inhaltsstoffe kaum in Regelwerken Einzug gefunden haben (mittelflüchtige Kohlenwasserstoffe). Zumindest liegt gemäß den Berechnungsergebnissen keine akute humantoxische Wirkung durch leichtflüchtige Substanzen (C8-C10) des Präzipitats vor. Die Risiken für die Umweltkompartimente Boden und Grundwasser können gemäß den gewählten Ansätzen als geringfügig, bzw. vernachlässigbar gewertet werden. Für die Umweltkompartimente Bodennahe Luft und Wasser sind die möglichen Risiken mit dem derzeitigen Wissenstand noch nicht in allen Details abschließend bewertbar.

8 Handlungsempfehlungen zur weiteren Vorgehensweise

Auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse können die umwelt- und humantoxikologischen Risiken eines Treibstoffschnellablasses derzeit noch nicht abschließend bewertet werden. Es wurden auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet.

8.1 Flugbetriebliche Handlungsempfehlungen

Folgende Maßnahmen zur Erweiterung der flugbetrieblichen Handlungsoptionen werden zur Vermeidung und Verringerung der negativen Umweltwirkungen von TSA empfohlen:

- ▶ Erhöhung der Mindestflughöhe bei TSA auf 10.000 ft,
- ▶ Zuweisung von abwechselnden Lufträumen zur Durchführung von TSA, um räumliche Häufung von TSA-Ereignissen zu vermeiden.

Bei einem TSA in einer Höhe von 5.000 ft fallen rund 87% des Präzipitats im Szenario „Jahresmitteltemperatur“ auf einer Breite von etwa zwei Kilometer auf die Erdoberfläche. Bei einem TSA der gleichen Menge in größerer Höhe verbreitert sich das Gebiet aufgrund der weiträumigeren dispersen Verteilung. Dadurch und auch in Folge der vermehrten Verdunstung verringert sich die Präzipitat-Konzentration pro m² (beide Effekte sind durch die längere Verweilzeit der Tröpfchen in der Atmosphäre bedingt). Generell begünstigt also ein TSA in größerer Höhe (über 5.000 ft) deutlich eine Verminderung der Präzipitatbelastung an der Erdoberfläche. Dieses ist bereits weitestgehend flugbetriebliche Praxis.

Zur Minderung der Exposition durch TSA werden aus den Erkenntnissen dieser Studie die Erhöhung der Mindestflughöhe empfohlen. Konkret sollte erwogen werden die Mindestflughöhe während eines TSA auf 10.000 ft zu erhöhen. Wie gezeigt bewirkt eine Änderung der Flughöhe bei TSA von 5.000 auf 13.000 ft eine Minderung des Präzipitat-Niederschlags um rund ein Drittel.

Auch wenn die Überlagerung von exakt den gleichen Routen bei mehreren aufeinanderfolgenden TSA unwahrscheinlich erscheint, kann es bedingt durch die flugbetrieblichen Randbedingungen Gebiete geben, in denen es mittel- und langfristig zu einer Häufung von TSA kommen kann. Besonders exponiert sind hierbei Gebiete mit geringer Bevölkerungsdichte, die sich in der Nähe von mehreren zivilen oder militärischen (Groß-) Flughäfen befinden. Um hier eine wiederholte Exposition zu mindern, wird aus den Erkenntnissen dieser Studie heraus empfohlen, bei verschiedenen TSA unterschiedliche Lufträume abwechselnd zuzuweisen.

8.2 Kommunikative Handlungsempfehlungen

Viele Vorbehalte in der Öffentlichkeit gegenüber TSA scheinen unter anderem durch die in der Vergangenheit üblichen Informationsprozedere bedingt. Daher wird aus den Erkenntnissen dieser Studie empfohlen, den Informationsfluss nach einem TSA in die Öffentlichkeit zu verbessern und zeitlich zu verkürzen.

Kurzfristige Information an die Öffentlichkeit nach erfolgten TSA sollten über ein öffentlich zugängiges *Informationsportal unmittelbar, d.h. innerhalb weniger Stunden*, erfolgen, um die Transparenz nach einem TSA gegenüber der Bevölkerung zu erhöhen (analog zu Koalitionsvertrag, 19. Legislaturperiode der Bundesregierung vom 12.03.2018, Z. 3737ff. „Wir wollen auf die Deutsche Flugsicherung einwirken, die Treibstoffschnellablässe zeitnah auf ihrer Internetseite zu veröffentlichen“).

Durch das Luftfahrtbundesamt werden seit 2018 Treibstoffschnellablässe im deutschen Luftraum auf der Homepage des LBA veröffentlicht. Die Darstellung erfolgt in Tabellenform und dokumentiert die Ereignisse seit Januar 2018. Es erfolgt eine Fortschreibung der Tabelle um aktuelle Treibstoffschnellablässe. Die Dokumentation der TSA umfasst Angaben zu Datum, Gebiet, Flughöhe, abgelassener Treibstoffmenge sowie zu den Gründen des TSA. Zusätzlich erfolgt eine Auskunft, ob es sich um ein Luftfahrzeug aus der zivilen oder militärischen Luftfahrt handelt. Die erfassten Informationen eines TSA-Ereignisses sollten um eine eindeutige Zuordnungsmöglichkeit (z.B. eindeutige Angabe der jeweiligen Flugnummer) erweitert werden, um gegebenenfalls Daten Dritter (Wetterdaten, z.B. vom DWD und Daten des Flugverlaufes) gezielt recherchieren zu können. Daten des Flugverlaufes (Flugdaten, bzw. Flugroute) können z.B. von Flightradar24 (<https://www.flightradar24.com>) genutzt werden.

8.3 Juristische Handlungsempfehlungen

Die juristischen Randbedingungen zum TSA wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ebenfalls untersucht. Die Ausarbeitungen zu juristischen Sachverhalten beim TSA sind daher in einem separaten Band II publiziert (Prof. Dr. Giemulla, et al., 2020).

Um mögliche Umweltwirkungen des TSA nach Möglichkeit zu vermeiden oder zumindest zu verringern, wird in Band II vorgeschlagen, die Betriebsanweisung Flugverkehrsdienste - BA-FVD 665.2 um folgende Formulierung (unten kursiv) zu ergänzen: „665.2 Der Treibstoffschnellablass soll möglichst abseits großer Städte und in Lufträumen mit geringer Flugverkehrsdichte erfolgen. *Die Flugsicherung hat zu diesem Zweck nach Möglichkeit alternierende Lufträume zuzuweisen.*“

8.4 Erweiterung der Bewertungsgrundlagen

Hinsichtlich der ökotoxikologischen und humantoxikologischen Bewertungen bleibt festzustellen, dass ein Treibstoffschnellablass als Notfallverfahren in der deutschen Umweltgesetzgebung bzw. in deren Umsetzung durch die betreffenden Verordnungen hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf Umweltkompartimente nicht explizit berücksichtigt wird. Zur besseren Beurteilung potenzieller Auswirkungen auf die Umweltkompartimente sollte die Bewertungsgrundlage wie folgt erweitert werden:

- ▶ Definition der wesentlichen Einzelstoff- und /oder Summenparameter des Präzipitats
- ▶ Festlegung konkreter Bemessungs- oder Beurteilungswerte (ggf. ökologisch oder humantoxikologisch begründete Grenzwerte) für relevante Kerosin-Inhaltsstoffe für die Umweltkompartimente „bodennahe Luft“ und „Wasser“,
- ▶ Festlegung von Umrechnungsfaktoren, um potenzielle (numerisch ermittelte) Flächendepositionen [mg/m^2] in die jeweiligen Medieneinheiten „Luft“ [mg/m^3], „Wasser“ [$\mu\text{g}/\text{l}$] und „Boden“ [mg/kg] umzurechnen.

8.5 Grundlagenwissenschaftliche Fragestellungen

Die Wahl des konservativen Ansatzes für Berechnungen und Bewertungen ist auch in der Datenlage begründet. Einerseits werden während eines TSA bisher nur ausgewählte Informationen aufgezeichnet, für die Berechnung der Präzipitatmenge relevante Informationen werden nicht ausreichend dokumentiert bzw. lassen sich mit vertretbarem Aufwand nicht bis ins letzte Detail dokumentieren (v. A. genaue chemische Zusammensetzung des getankten Kerosins, genaue Lage- und Höhenkoordinaten mit Zeitangaben des Flugzeugs während des

gesamten TSA-Vorgangs und evtl. an Bord aufgezeichnete Wetterdaten wie die Windgeschwindigkeit und -richtung, Fluggeschwindigkeit und Ablassrate).

Zudem liegen seit über 30 Jahren keine Feldforschungen für Treibstoffschnellablässe vor. Wichtige Einflussfaktoren wie die initiale Tröpfchengröße bzw. deren Verteilung sowie die initiale Nachlaufbreite bzw. die räumliche Verteilung der Tröpfchen während/kurz nach dem Ablassvorgang sind bisher nicht ausreichend experimentell belegt. Mit Hilfe von zusätzlichen Messdaten ist ein besseres Verständnis für diese komplexen Prozesse möglich und anhand von Messdaten lassen sich die Modellvorstellungen sinnvoll überprüfen, bzw. anpassen.

Falls technische Versuche oder Feldversuche geplant werden sollten, empfehlen wir zunächst mit dem bestehenden Modell aus dieser Studie die relevanten Parameter im Rahmen einer Sensitivitätsstudie detailliert zu identifizieren und die jeweiligen Wertebereiche der sensitiven Parameter - die später ggf. messtechnisch erfasst werden sollen - vorab zu ermitteln.

Mit dem Tröpfchen- und Dispersionsmodell dieser Studie liegt ein praktisches Werkzeug vor, das auch weiterhin verwendet werden kann, um das komplexe Problem des TSA zu untersuchen. Durch zusätzliche Eingangsparameter können die Modellrechnungen weiter präzisiert werden. So sollten zusätzlich zur Betriebsanweisung der Flugverkehrsdienste (BA-FVD) unserer Ansicht nachfolgende Parameter je TSA erfasst werden oder eindeutig über Drittanbieter (z. B. Flugdaten von Flightradar24, Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes) dem Flug zugeordnet werden können:

► Flugdaten:

- genaue Lage- und Höhenkoordinaten mit Zeitangaben des Flugzeugs während des gesamten TSA-Vorgangs (daraus ergibt sich auch die Fluggeschwindigkeit),

► Meteorologische Daten, basierend auf den Flugdaten:

- Großwetterlage,
- Vertikale (Temperaturprofil) und horizontale (entlang des TSA-Flugweges) Temperaturverteilung (mindestens mittleres vertikales Temperaturprofil im Bereich und zum Zeitpunkt eines TSA),
- Vertikale (Windprofil) und horizontale (entlang des TSA-Flugweges) Windgeschwindigkeit und -richtung (mindestens mittleres vertikales Profil der Windgeschwindigkeit und -richtung im Bereich und zum Zeitpunkt des TSA),
- Evtl. während des Fluges vom Flugzeug aufgezeichnete Wetterdaten (z.B. Windgeschwindigkeit) - diese beziehen sich dann ausschließlich auf die Verhältnisse in Flughöhe,

► Ablassrate des Kerosins (t/min), mindestens durchschnittlicher Wert während eines TSA-Vorgangs.

Mit Hilfe der zusätzlichen Daten empfehlen in einem ersten Schritt das bestehende Modell zu erweitern und zusätzliche Modellberechnungen durchzuführen, wie z.B.:

► Modellstudie zur detaillierten Betrachtung ausgewählter einzelner realer Treibstoffschnellablässe (z.B. in 2019 und 2020 oder zukünftig): Berechnung,

Abschätzungen von Einzelereignissen von TSA anhand der tatsächlichen Flugroute (aus Anbietern von Flugroutendaten; wie z.B. Flightradar24) und mittlerer jeweils tagesaktueller Wetterdaten.

- ▶ Optional kann mit Hilfe des vorliegenden Modells auch die Tröpfchenverdunstung anderer Treibstoffzusammensetzungen nachberechnet werden. Dafür müssen für jedes Treibstoffgemisch folgende Daten vorliegen:
 - Anzahl der Komponenten und deren jeweilige Volumenanteile in %,
 - relevante physikalische Parameter je Einzelkomponente (Siedepunkt, Mol-Masse und spezifische Dichte bei 20 °C)
- ▶ Durchführung einer modellgestützten Sensitivitätsstudie zur Vorplanung von technischen Versuchen und Feldversuchen: aus unserer Sicht ist die Planung und Durchführung eines Messprogrammes sinnvoll, wenn anhand von Messdaten und deren Auswertungen eine abschließende Bewertung der an der Erdoberfläche ankommenden Präzipitatskonzentration durchgeführt werden soll.

Ökonomisch und ökologisch wünschenswert wäre es, wenn sich o.g. messtechnische Untersuchungen zunächst im Labormaßstab realisieren ließen. Hierzu wäre zu prüfen, ob fluiddynamische Modellgesetze zur Versuchsplanung von Druckkammer- und Windkanalexperimenten genutzt werden können.

Mit den Messergebnissen können die bisherigen Modellrechnungen validiert und differenziert werden. Gegebenenfalls weiterhin vorhandenen Datenlücken sollten benannt und in Ihrer Wichtigkeit für weitere Forschungsarbeiten priorisiert werden.

Nur wenn sich aus den zuvor dargestellten Maßnahmen ergeben sollte, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass im Hinblick auf die human- und ökotoxische Bewertung relevante Präzipitat-Konzentrationen an der Erdoberfläche ankommen, kann es in einem weiteren Schritt sinnvoll sein, ein technisch mögliches und finanziell verhältnismäßiges Messprogramm zu konzipieren. Hierbei sollten die in den vorangegangenen Untersuchungen evtl. ermittelten Datenlücken durch konkrete Messdaten geschlossen werden. Die detaillierte Planung eines Messprogramms sollte in einem solchen Falle die Ausarbeitung möglicher Messverfahren, Messintervalle, und Messorte sowie die Abstimmung mit allen Beteiligten beinhalten. Ein wichtiger Bestandteil wäre auch die mögliche Nutzung von Daten Dritter (z. B. Wetterdaten des DWD), soweit diese während Routinemessungen ohnehin erhoben werden. Eine technische Umsetzung und Genehmigung eines kontrollierten Treibstoffschnellablasses wären dabei ebenfalls zu berücksichtigen. Mit Hilfe solcher erzielten Felddaten könnten die bisher getroffenen Ansätze überprüft und gegebenenfalls neue Ansätze erarbeitet werden. Dies beinhaltet auch eine Aktualisierung des TSA-Modells (oder die Entwicklung eines detaillierteren Modells). Mit Hilfe der aktualisierten Modelle können dann die Auswirkungen von Treibstoffschnellablässen abschließend besser bewertet werden.

9 Literaturverzeichnis

- Aelion, C. Marjorie und Bradley, Paul M. 1991.** Aerobic Biodegradation Potential of Subsurface Microorganisms from a Jet Fuel-Contaminated Aquifer. *Applied and Environmental Microbiology*. January 1991, S. 57-63.
- Agency for Toxic Substances and Cisaese Registry (ATSDR). 2018.** Anual Report 2017. [Online] 2018. [Zitat vom: 17.. 09. 2018.] <https://www.atsdr.cdc.gov/>.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2017.** Public Health statement JP-5, JP-8, and Jet A fuels. *ATSDR*. [Online] März 2017. [Zitat vom: 13. Februar 2018.] <https://www.atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=771&tid=150>.
- Airbus. 2018.** Treibstoffablass: international anerkanntes Standardverfahren für Notfälle. [www.publicaffairs.airbus.com](http://publicaffairs.airbus.com). [Online] 2018. [Zitat vom: 25. 09 2018.] <http://publicaffairs.airbus.com/public-affairs/german/de/>.
- Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen. 2007.** Luftfahrt und Umwelt. *Flughafenverband ADV*. [Online] 2007. [Zitat vom: 28. Dezember 2017.] http://adv.aero/wp-content/uploads/2015/12/ADV_Broschure_web.pdf.
- Arciszewska, Christine und McClatchey, John. 2001.** The importance of meteorological data for modelling air pollution using ADMS-Urban. *Meteorol. Appl.* 2001, 8, S. 345-350.
- Arkhipov, Vladimir, et al. 2014.** Dynamics and heat and mass transfer under spreading of liquid-droplet aviation fuel in the atmosphere. *EPJ Web of Conferences*. 27. August 2014, Volume 76, 01012.
- Atlas, Ronald M. 1993.** *Petroleum Microbiology*. 1st. New Yotk : Macmilan USA, 1993.
- Axel Springer SE. 2018.** Flugzeuge lassen Hunderte Tonnen Kerosin über Deutschland ab. [Online] 23. 01 2018. [Zitat vom: 13. 02 2018.] <https://www.welt.de/politik/deutschland/article172756720/Fuel-Dumping-Flugzeuge-lassen-Hunderte-Tonnen-Kerosin-ueber-Deutschland-ab.html>.
- Bayerischer Landtag. 2017.** *Schriftliche Anfrage des Abgeordneten Markus Rinderspacher SPD vom 21.06.2017*. Bayerischer Landtag. 2017. Drucksache 17/18047.
- Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr. 2017.** *Schriftliche Anfrage des Herrn Abgeordneten Markus Rinderspacher vom 21.06.2017 betreffend Belastung durch Ablassen von Kerosin über Bayern seit 2012*. Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr. München : s.n., 2017. Schreiben vom 09.08.2017.
- BDL. 2018.** Warum wird in seltenen Fällen Kerosin abgelassen? www.bdl.aero. [Online] 2018. [Zitat vom: 13. 12 2018.] <https://www.bdl.aero/de/publikation/luftfahrt-aktuell-5-2018/>.
- Bilanin, Alan, et al. 1989.** *AGDISP: The Aircraft Spray Model, Code Development and Experimental Validation*. St. Joseph : American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1989.
- Biodegradation of jet fuel (JP-8) in the presence of vegetation. Karthikeyan, R., et al. 1999.* 1999. Proceedings of the 1999 Conference on Hazardous Waste Research. S. 243-256.
- Blume, Hans-Peter, Horn, Rainer und Thiele-Bruhn, Sören. 2010.** *Handbuch des Bodenschutzes*. 4. vollst. überarb. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH, 2010. S. 757.
- BMU. 2018.** *ENTWURF: Anpassung der ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft)*. 2018. S. 108.

Boeing. 2007. Overweight Landing? Fuel Jettison? What to consider. *Aero Quarterly*. 2007, 3.07, S. 14-20.

Branscome, Jeff. 2018. Ethiopian Airlines passenger jet flies low over Stafford before making emergency landing. *fredericksburg.com*. [Online] 15. 01 2018. [Zitat vom: 07. 03 2018.] http://www.fredericksburg.com/news/local/stafford/ethiopian-airlines-passenger-jet-flies-low-over-stafford-before-making/article_a4cdda31-95cf-5fcd-95c7-26e79d650ecc.html.

Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL. 2016. Treibstoffablass (Fuel Dumping). [Online] 07. Juni 2016. [Zitat vom: 27. Dezember 2017.] <https://www.bazl.admin.ch/bazl/de/home/suche.html#treibstoffablass>.

Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). **Bund. 1999.** 1999, Bundesgesetzblatt, S. 1554.

Bundesregierung. 2018. *Koalitionsvertrag 19. Legislaturperiode*. Berlin : Bundesrepublik Deutschland, 2018. S. 175.

Bundesverband der deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL). 2018. Warum wird in seltenen Fällen Kerosin abgelassen? *Luftfahrt aktuell* 5/2018. September 2018, S. 2.

Carstens, Peter. 2018. Fuel Dumping: Jedes Jahr regnen Hunderte Tonnen Flugbenzin auf Deutschland. [Online] 25. 01 2018. [Zitat vom: 13. 02 2018.] <https://www.geo.de/natur/18269-rtkl-fuel-dumping-jedes-jahr-regnen-hunderte-tonnen-flugbenzin-auf-deutschland>.

Chao, Yi-Chun E., Gibson, Roger L. und Nylander-French, Leena A. 2005. Dermal Exposure to Jet Fuel (JP-8) in US Air Force Personnel. *The Annals of Occupational Hygiene*. 1. Oktober 2005, Volume 49, Issue 7, S. 639-645.

Chilcott, Robert P. 2006. Compendium of Chemical Hazards: Kerosene (Fuel Oil). *World Health Organization*. [Online] 2006. [Zitat vom: 13. Februar 2018.] <http://www.who.int/ipcs/emergencies/kerosene.pdf>.

Civil Aviation Safety Authority Australia. 2003. Advisory Circular. *Dropping of objects and substances from aircraft other than agricultural and fire fighting*. Mai 2003. AC 91-155(0).

Clewell III, Harvey J. 1980. *Evaporation and Groundfall of JP-4 Jet Fuel Jettisoned by USAF Aircraft*. Air Force Engineering and Services Center. 1980. S. 131, Report ESL-TR-80-56.

—. **1980.** *Fuel Jettisoning by U.S. Air Force Aircraft. Volume I: Summary and analysis*. Air Force Engineering and Services Center. 1980. Report ESL-TR-80-17.

—. **1983.** Ground Contamination by Fuel Jettisoned from Aircraft in Flight. *Journal of Aircraft*. April 1983, Volume 20, Issue 4, S. 382-384.

Colella, Rick. 2007. Overweight Landing? Fuel Jettison? What to Consider. *Boeing*. [Online] 2007. [Zitat vom: 28. Dezember 2017.] http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_3_07/article_03_1.html.

Cornell Law School. 14 CFR 23.1001 - Fuel jettisoning system. *Cornell Law School*. [Online] [Zitat vom: 13. Februar 2018.] <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/23.1001>.

—. **14 CFR 25.1001 - Fuel jettisoning system.** *Cornell Law School*. [Online] [Zitat vom: 13. Februar 2018.] <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/25.1001>.

—. **14 CFR 29.1001 - Fuel jettisoning.** *Cornell Law School*. [Online] [Zitat vom: 13. Februar 2018.] <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/29.1001>.

Cross, N. L. und Picknett, R. C. 1973. *Ground Contamination by Fuel Jettison from Aircraft*. Wiltshire : Chemical Defence Establishment, 1973.

Dean-Ross, Deborah. 1993. Fate of Jet Fuel JP-4 in Soil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 1993, Bd. 51, S. 596-599.

Dean-Ross, Deborah, Mayfield, Howard und Spain, Jim. 1992. Environmental fate and effects of jet fuel JP-8. *Chemosphere*. 1992, Bd. 2, 24, S. 219-228.

Der Westen / jei. 2017. Gefährlich für Mensch und Umwelt? Flugzeug lässt 40 Tonnen Kerosin über Pfälzerwald ab. [Online] 14. 10 2017. [Zitat vom: 13. 02 2018.]
<https://www.derwesten.de/panorama/flugzeug-laesst-40-tonnen-kerosin-ueber-pfaelzerwald-ab-id212235545.html>.

Deutsche Flugsicherung (DFS). 2018. *Luftverkehr in Deutschland - Mobilitätsbericht 2017*. Langen : DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, 2018.

Deutsche Flugsicherung. 2017. *Betriebsanweisung der Flugverkehrsdienste (BA-FVD)*. Deutsche Flugsicherung. 2017.

Deutscher Bundestag. 2001. *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Eva-Maria Bulling-Schröter und der Fraktion der PDS*. Deutscher Bundestag. s.l. : Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, 2001. Drucksache 14/6420. ISSN 0722-8333.

—. **2016.** *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Markus Tressel, Peter Meiwald, Matthias Gastel, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN*. Deutscher Bundestag. Köln : Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2016. S. 8, Drucksache 18/9917. ISSN 0722-8333.

—. **1997.** *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Ulrike Höfken, Christian Sterzing, Albert Schmidt (Hitzhofen) und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN*. Deutscher Bundestag. Bonn : Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, 1997. S. 8, Drucksache 13/6938. ISSN 0722-8333.

—. **2016.** *Schriftliche Fragen mit den in der Woche vom 8. August 2016 eingegangenen Antworten der Bundesregierung*. Deutscher Bundestag. Köln : Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2016. S. 66, Drucksache 18/9390. ISSN 0722-8333.

—. **2018.** *Zu Umweltauswirkungen durch Treibstoffschnellablass*. WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und Forschung, Wissenschaftliche Dienste. 2018. Sachstand WD 8 - 3000 - 049/17.

DFG. 2015. *MAK- und BAT-Werte-Liste 2015*. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Weinheim : Wiley-VCH-Verlag, 2015.

dpa. 2017. Über Rheinland-Pfalz . *Flugzeug lässt 40 Tonnen Kerosin ab*. [Online] 14. 10 2017. [Zitat vom: 13. 02 2018.] http://www.t-online.de/nachrichten/panorama/id_82486162/-fuel-dumping-flugzeug-laesst-40-tonnen-kerosin-ueber-der-pfalz-ab.html.

dpa/lrs. 2017. Zu wenig Daten. *kaum Informationen zum "Fuel Dumping"*. [Online] 14. 11 2017. [Zitat vom: 13. 02 2018.] <https://www.welt.de/regionales/rheinland-pfalz-saarland/article170620557/kaum-Informationen-zum-Fuel-Dumping.html>.

dpa/vwe. 2017. Panorama. *Flugzeug lässt 50 Tonnen Kerosin über Rheinland-Pfalz ab*. [Online] 22. 11 2017. [Zitat vom: 13. 02 2018.]
<https://www.welt.de/vermishtes/article170850454/Flugzeug-laesst-50-Tonnen-Kerosin-ueber-Rheinland-Pfalz-ab.html>.

Eickhoff, Walter. 1998. *Emissionen organisch-chemischer Verbindungen aus zivilen Flugzeugtriebwerken*. Dezernat 6.2: Luftreinhaltung/Emissionen, Hessische Landesanstalt für Umwelt. Wiesbaden : Hessische Landesanstalt für Umwelt, 1998. ISBN 3-89026-277-5.

Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft). **BMU. 2002.** 25, s.l. : Carl Heymanns Verlag KG, 2002, Gemeinsames Ministerialblatt, S. 511-605.

EuroAirport. 3. Quartal 2017. *Umwelt Bulletin Nummer 67*. Basel : Flughafen Basel-Mulhouse, 3. Quartal 2017. Umwelt Bulletin. ISSN 1662-9310.

FAA, Federal Aviation Administration. 1972. *Air Carrier Operations Bulletin No. 72-11*. 1972.

Federal Aviation Administration. 2004. Order 7110.65P. Air Traffic Control. [Online] 2004. [Zitat vom: 12. Februar 2018.]
[https://www.faa.gov/documentlibrary/media/order/7110.65p%20chg%20air traffic control%20\(08-04-2005 to 02-15-2006\).pdf](https://www.faa.gov/documentlibrary/media/order/7110.65p%20chg%20air%20traffic%20control%20(08-04-2005%20to%2002-15-2006).pdf).

Fleuti, Emanuel. 2012. *Treibstoffschnellablass*. s.l. : Flughafen Zürich AG, 2012.

Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG). **Bund. 2018.** 2018, S. 2254ff.

Giemulla, Dr. Elmar M. 2019. *Rechtliche Bewertung von Treibstoffschnellablässen im Flugverkehr*. Fellbach : s.n., 2019. Rechtsgutachten.

Good, R. Earl und Clewell III, Harvey J. 1980. Drop Formation and Evaporation of JP-4 Fuel Jettisoned from Aircraft. *Journal of Aircraft*. Vol. 17, No. 7, 1980, S. 450-456.

Graubaum, H.-J., et al. 2011. Luftschadstoffe durch Flugverkehr - die unsichtbare Gefahr. Teil 1: eine seltsame Geschichte. [Online] 2011. [Zitat vom: 12. Februar 2018.] http://www.fbi-berlin.org/wp-uploads/2011/05/artikel-prof-behrbohm_i.pdf.

Harris, David T., et al. 1997. Short-Term Exposure To Jp-8 Jet Fuel Results in Longterm Immunotoxicity. *Toxicology and Industrial Health*. Volume: 13, 1. September 1997, Volume 13, Issue 5, S. 559-570. nur Abstract vorhanden (18.04.2018).

Harstad, Kenneth und Bellan, Josette. 2004. Modeling evaporation of Jet A, JP-7 and RP-1 drops at 1 to 15 bars. *Combustion and Flame*. April 2004, Volume 137, Issues 1-2, S. 163-177.

Hartwig, A. 2018. The MAK Collection for Occupational Health and Safety. 2018, Bd. 1, 3.

Hegmann, Gerhard. 2017. Schnell abgelassenes Kerosin. *Wie gefährlich ist Fuel-Dumping?* [Online] 24. 11 2017. [Zitat vom: 13. 02 2018.]
<https://www.welt.de/wirtschaft/article170888528/Wie-gefaehrlich-ist-Fuel-Dumping.html>.

Hessische Landesanstalt für Umwelt. 2000. *Mediationsverfahren Flughafen Frankfurt/Main - Stellungnahme*. Kassel : HLfU, 2000.

Hessischer Landtag. 2016. *Kleine Anfrage des Abg. Gremmels (SPD) vom 23.08.2016 betreffend Ablassen von Kerosin über Hessen und Antwort des Ministers für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung*. Hessischer Landtag. Wiesbaden : Kanzlei des Hessischen Landtags, 2016. Drucksache 19/3703.

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. 2007. *Planfeststellungsbeschluss zum Ausbau des Verkehrsflughafens Frankfurt Main*. Wiesbaden : s.n., 2007. Planfeststellungsbeschluss. Kapitel 9 Luftreinhaltung.

—. **2007.** *Planfeststellungsbeschluss zum Ausbau des Verkehrsflughafens Frankfurt Main.* Wiesbaden : s.n., 2007. Planfeststellungsbeschluss. Inhaltsverzeichnis.

High Load Event Reporting. **Airbus. 2018.** 26, Blagnac Cedex : Airbus Product Safety department, 2018, Safety First - The Airbus Safety Magazine #26, S. 14-27.

Hoffmann, Thorsten. 2001. *Analytische Untersuchungen zur Bildung sekundärer organischer Aerosolpartikel in der Troposphäre.* Dortmund : Universität Dortmund, 2001.

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. 2018. Gefahrstoffinformationssystem (GESTIS). [Online] 2018. [Zitat vom: 17.. 09. 2018.] <https://www.dguv.de/ifa/gestis/index.jsp>.

—. Kerosin. *GESTIS-Stoffdatenbank.* [Online] [Zitat vom: 12. Februar 2018.] [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/090150.xml?f=templates\\$fn=default-doc.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/090150.xml?f=templates$fn=default-doc.htm$3.0).

Interior Health. 2013. Summary of health impacts. Jet Fuel A-1: Aviation turbine fuel distillate mixture. [Online] August 2013. [Zitat vom: 13. Februar 2018.] <https://www.interiorhealth.ca/YourEnvironment/EmergencyPreparedness/Documents/JetFuelA1HealthSummary.pdf>.

International Agency for Research on Cancer (IARC). 1989. *Jet Fuel.* s.l. : IARC, 1989.

International Civil Aviation Organization ICAO. 2001. *Procedures for Air Navigation Services. Air Traffic Management.* International Civil Aviation Organization ICAO. 2001. Doc 4444.

—. **2016.** *Procedures for Air Navigation Services. Air Traffic Management, Doc 4444. Doc 4444.* 10. November 2016. Sixteenth Edition. ISBN 978-92-9258-081-0.

Interventions- und Referenzwerte der Niederlande. **Niederländisches Ministerium für Wohnungswesen, Raumordnung und Umwelt. 1994.** 1994.

jub, V. 2017. Fuel Dumping: Flugzeuge lassen Hunderte Tonnen Kerosin über Deutschland ab. [Online] 08. 12 2017. [Zitat vom: 13. 02 2018.] <https://weather.com/de-DE/wissen/umwelt/news/2017-12-08-wenn-flugzeuge-kerosin-uber-deutschland-ablassen>.

Knave, B., et al. 1976. Long-term exposure to jet fuel: an investigation on occupationally exposed workers with special reference to the nervous system. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health.* 1976, Volume 2, Issue 3, S. 152-164.

Kyodo, AFP-JIJI. 2018. U.S. fighter jet dumps fuel tanks into Aomori Prefecture lake after engine fire. *japantimes.co.jp.* [Online] 20. 02 2018. [Zitat vom: 05. 03 2018.] <https://www.japantimes.co.jp/news/2018/02/20/national/u-s-fighter-jet-dumps-fuel-tanks-aomori-prefecture-lake-engine-fire/#.WtdRj38uBhF>.

LAGA. 2004. *Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung 1.2 Bodenmaterial (TR Boden).* Länderarbeitsgemeinschaft Abfall. 2004. S. 22.

Land Brandenburg. 2002. *Anhörungsverfahren für das Vorhaben "Ausbau des Flughafens Berlin Schönefeld". Stellungnahme zum Ergebnis des Anhörungsverfahrens.* Ministerium für Infrastruktur und Landesplanung. 2002. Anhörungsverfahren Aktenzeichen 6441/1.

Landtag des Saarlandes. 2018. *Antrag der CDU-Landtagsfraktion, der SPD-Landtagsfraktion betr.: Kerosinablass über Deutschland und unserer Region; möglichen Gefahren vorbeugen, nach alternativen Methoden forschen.* Landtag des Saarlandes. 2018. Drucksache 16/246.

Landtag Rheinland-Pfalz. 2017. *Antwort des Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Andreas Hartenfels und Jutta Blatzheim-Roegler (BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN).* Landtag Rheinland-Pfalz. 2017. Drucksache 17/4215.

—. **2017.** *Stellungnahme der Lufthansa zum Anhörverfahren im Ausschuss für Wirtschaft und Verkehr des Landtags Rheinland-Pfalz am 14. November 2017 zu den "Risiken von abgelassenem Kerosin für Gesundheit und Umwelt".* Landtag Rheinland-Pfalz. 2017. Vorlage 17/2172.

Landtag von Baden-Württemberg. 2016. *Antrag der Abg. Bernd Gögel u. a. AfD und Stellungnahme des Ministeriums für Verkehr.* Landtag von Baden-Württemberg. 2016. Drucksache 16/1147.

—. **2004.** *Antrag der Abg. Dr. Walter Caroli u. a. SPD und Stellungnahme des Ministeriums für Umwelt und Verkehr. Ablassen von Treibstoff aus Sicherheitsgründen über dem Gebiet des Landes.* Landtag von Baden-Württemberg. 2004. S. 4, Drucksache 13/3618.

LAWA. 2016. *Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser.* Bundes-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Berlin : Kulturbuch-Verlag GmbH, 2016. S. 28.

Lewellen, W. S. und Sykes, R. I. 1989. Meteorological data needs for modelling air quality uncertainties. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 1989, 6, S. 759-768.

Lowell, Herman H. 1959. *Dispersion of jettisoned JP-4 jet fuel by atmospheric turbulence, evaporation, and varying rates of fall of fuel droplets.* National Aeronautics and Space Administration. Washington : s.n., 1959. NASA-TN-D-84.

—. **1959.** *Free fall and evaporation of JP-4 jet fuel droplets in a quiet atmosphere.* National Aeronautics and Space Administration. Washington : s.n., 1959. NASA-TN-D-33.

—. **1953.** *Free fall and evaporation of n-octane droplets in the atmosphere as applied to the jettisoning of aviation gasoline at altitude.* National Advisory Committee for Aeronautics. Washington : s.n., 1953. NACA RM E52L23a.

Lufthansa Group. 2016. *Annual Report 2016.* Köln : Deutsche Lufthansa AG, 2016. Geschäftsbericht. ISSN 1616-0258.

—. **2017.** *Balance. Das Wichtigste zum Thema Nachhaltigkeit in der Lufthansa Group.* Frankfurt am Main : Deutsche Lufthansa AG, 2017. S. 103, Nachhaltigkeitsbericht der Lufthansa Group.

Malina, G. und Grotenhuis, J.T.C. 2000. The role of biodegradation during bioventing of soil contaminated with jet fuel. *Applied Biochemistry and Biotechnology.* Juli 2000, Volume 88, Issue 1-3, S. 59-76. nur Abstract vorhanden (18.04.2018).

Mattie, David R. und Sterner, Teresa R. 2011. Past, present and emerging toxicity issues for jet fuel. *Toxicology and Applied Pharmacology.* Vol. 254, Issue 2, 2011, S. 127-132.

Mattie, David R., et al. 1991. A 90-Day Continuous Vapor Inhalation Toxicity Study of JP-8 Jet Fuel Followed by 20 or 21 Months of Recovery in Fischer 344 Rats and C57BL/6 Mice. *Toxicologic Pathology.* Vol. 19, No. 2, 1991.

McDougal, James N., et al. Assessment of Skin Absorption and Penetration of JP-8 Jet Fuel and Its Components. [Hrsg.] Society of Toxicology. *Toxicological Sciences.* 55, S. 247-255.

McDougal, James N., et al. 2007. Effects of Brief Cutaneous JP-8 Jet Fuel Exposures on Time Course of Gene Expression in the Epidermis. *Toxicological Sciences.* 1. Februar 2007, Volume 95, Issue 2, S. 495-510.

Mediationsverfahren Flughafen Frankfurt / Main. HLFU. 2000. [Hrsg.] Hessische Landesanstalt für Umwelt. Kassel : Hessische Landesanstalt für Umwelt, 2000. S. 4.

Ministerium für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr des Landes Brandenburg. 2004. *Planfeststellungsbeschluss Ausbau Verkehrsflughafen Berlin-Schönefeld vom 13. August 2004. BAND I.* Ministerium für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr des Landes Brandenburg. 2004. Planfeststellungsbeschluss. Az.: 44/1-6441/1/101.

— **2004.** *Planfeststellungsbeschluss Ausbau Verkehrsflughafen Berlin-Schönefeld vom 13. August 2004. BAND II.* Ministerium für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr des Landes Brandenburg. 2004. Planfeststellungsbeschluss. Az.: 44/1-6441/1/101.

Modeling of the evaporation and combustion of jet fuel droplets under microgravity conditions. **Cuoci, A., et al. 2005.** Louvain-la-Neuve, Belgien : s.n., 2005. European Combustion Meeting.

Monteiro-Riviere, Nancy A., Inman, Alfred O. und Riviere, Jim E. 2004. Skin toxicity of jet fuels: ultrastructural studies and the effects of substance P. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 15. März 2004, Volume 195, Issue 3, S. 339-347. nur Abstract vorhanden (18.04.2018).

Muhammad, F., Monteiro-Riviere, N. A. und Riviere, J. E. 2005. Comparative In Vivo Toxicity of Topical JP-8 Jet Fuel and Its Individual Hydrocarbon Components: Identification of Tridecane and Tetradecane as Key Constituents Responsible for Dermal Irritation. [Hrsg.] The Society of Toxicologic Pathology. *Toxicologic Pathology*. 33, 2005, S. 258-266.

Mustermann, Max. 2017. *Musterbuch – Nebentitel*. 1. Berlin : Musterverlag, 2017. S. 20-30.

National Research Council of the National Academies. 2011. *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals. Volume 10.* National Research Council of the National Academies. Washington, D.C. : The National Academies Press, 2011. ISBN 978-0-309-21987-7.

National Research Council. 2003. *Toxicologic Assessment of Jet-Propulsion Fuel 8.* Washington, D.C. : The National Academies Press, 2003. Platzhalter. Bericht/Buch nicht vorhanden (18.04.2018). doi: 10.17226/10578.

Neste Oyj. 2015. Safety Data Sheet. Aviation Jet Fuel JET A-1 (JETA1). [Online] 03. September 2015. [Zitat vom: 13. Februar 2018.] https://www.neste.fi/static/ktt/10505_eng.pdf.

Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV). **Bund. 2018.** 2018, Bundesgesetzblatt, S. 1222ff.

Oakes, Dan. 2015. RAAF jet fuel damaged ground crews' body cells; long-term consequences unknown, says groundbreaking research. *abc.net*. [Online] 30. 04 2015. [Zitat vom: 09. 03 2018.] <http://www.abc.net.au/news/2015-04-30/raaf-personnel-exposed-to-jet-fuel-suffered-cell-damage/6433360>.

Official Journal of the European Union. 2015. *Regulations. Commission implementing Regulation (EU) 2015/1018 of 29 June 2015 laying down a list classifying occurrences in civil aviation to be mandatorily reported according to Regulation (EU) No 376/2014 of the European Parliament and of the Council.* European Union. 2015. L 163/1.

Perry, R. H. 1997. *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. 1997.

Peters, Ralf. 2015. Heutige und zukünftige Kraftstoffe für Brennstoffzellen in der Luftfahrt. [Hrsg.] Springer-Verlag Berlin Heidelberg. *Brennstoffzellensysteme in der Luftfahrt*. Jülich : Forschungszentrum Jülich, 2015, S. 7-16.

Pfeiffer, Karl Durant. 1994. A Numerical Model to Predict the Fate of Jettisoned Aviation Fuel. *Thesis*. s.l. : The Faculty of the School of Engineering of the Air Force Institute of Technology, Dezember 1994.

Pleil, Joachim D., Smith, Leslie B. und Zelnick, Sanford D. 2000. Personal Exposure to JP-8 Jet Fuel Vapors and Exhaust at Air Force Bases. *Environmental Health Perspectives*. März 2000, Volume 108, Issue 3, S. 183-192.

Prof. Dr. Giemulla, Elmar, et al. 2020. *Wissenschaftliche Kenntnisse zum TSA (Treibstoffschnellablass), Band II: Rechtliche Bewertung von Treibstoffschnellablässen im Flugverkehr*. Forschungsgemeinschaft reconsite GmbH & Joswig GmbH. 2020. Rechtliche Bewertung. reconsite GmbH, Joswig Ingenieure GmbH.

Pynn, Larry. 2018. Planes dumped hundreds of tonnes of fuel over Canada in 2016. *vancouver.sun.com*. [Online] 26. 02 2018. [Zitat vom: 05. 03 2018.] <http://vancouver.sun.com/news/local-news/planes-dumped-hundreds-of-tonnes-of-fuel-over-canada-in-2016>.

Quackenbush, Todd R., Teske, Milton E. und Polymeropoulos, Constantini E. 1994. A model for assessing fuel jettisoning effects. *Atmospheric Environment*. September 1994, Volume 28, Issue 16, S. 2751-2759. nur Abstract vorhanden (18.04.2018).

Rachner, M. 1998. *Die Stoffeigenschaften von Kerosin Jet A-1*. Köln : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 1998.

Regierung von Oberbayern. 2011. *Planfeststellungsbeschluss für den Verkehrsflughafen München 3. Start- und Landebahn. Band 2*. Regierung von Oberbayern. München : s.n., 2011. Planfeststellungsbeschluss.

Regierungspräsidium Darmstadt. 2006. *Planfeststellungsverfahren für den geplanten Ausbau des Flughafens Frankfurt Main*. Regierungspräsidium Darmstadt. 2006. Stellungnahme der Anhörungsbehörde vom 29. September 2006.

—. 2006. *Planfeststellungsverfahren für den geplanten Ausbau des Flughafens Frankfurt Main. Stellungnahme*. Regierungspräsidium Darmstadt. 2006. Literaturverzeichnis, Inhaltsübersicht.

Republik Österreich der Bundesminister für Öffentliche Wirtschaft und Verkehr. 1991. *Anfragebeantwortung betreffend die schriftliche Anfrage der Abg. Mag. Molterer und Kollegen vom 16. Oktober 1991, Nr. 1746/J-NR/1991, "Fuel-Dumping" im Flugverkehr*. Der Bundesminister für Öffentliche Wirtschaft und Verkehr. Wien : s.n., 1991.

Ritchie, Glenn D., et al. 2003. Biological and health effects of exposure to Kerosene-based jet fuels and performance additives. *Journal of Toxicology and Environmental Health*. Part B, 6, 2003, S. 357-451.

Rogers, James V., et al. 2004. The cytotoxicity of volatile JP-8 jet fuel components in keratinocytes. *Toxicology*. 15. April 2004, Volume 197, Issue 2, S. 112-120. nur Abstract vorhanden (18.04.2018).

Schlegel, Hans-Günter. 2006. *Allgemeine Mikrobiologie*. [Hrsg.] Georg Fuchs. 8. Auflage. s.l. : Thieme, 2006.

Seydewitz, Rolf. 2018. Groko will schnelle Infos über Kerosinablässe. *volksfreund.de*. [Online] 14. 02 2018. [Zitat vom: 05. 03 2018.] https://www.volksfreund.de/nachrichten/rheinland-pfalz/union-und-spd-sprechen-sich-fuer-rasche-veroeffentlichung-von-fuel-dumping-aus_aid-7271324.

—. **2018.** Treibstoffregen über Rheinland-Pfalz nimmt zu. *volksfreund.de*. [Online] 24. 01 2018. [Zitat vom: 05. 03 2018.] https://www.volksfreund.de/themen/treibstoffregen-ueber-rheinland-pfalz-nimmt-zu_aid-7104752.

Shell Global. 2018. Civil Jet Fuel. [Online] 2018. [Zitat vom: 17. 09. 2018.] <https://www.shell.com>.

Smart Cockpits. 2006. B737 Briefings - Overweight Landing. *www.smartcockpit.com*. [Online] Version 01 (Nov.06), 2006. [Zitat vom: 27. 09 2018.] <http://www.smartcockpit.com>.

Spektrum. 2018. Lexikon der Chemie. [Online] 2018. [Zitat vom: 17.. 09. 2018.] www.spektrum.de.

Spiegel / brt. 2017. Treibstoffschnellablass. *Das passiert, wenn Kerosin in die Luft gesprüht wird*. [Online] 13. 09 2017. [Zitat vom: 01. 03 2018.] <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/treibstoffschnellablass-das-passiert-wenn-kerosin-in-die-luft-gesprueht-wird-a-1167461.html>.

SR. 2017. Meldekette für Fuel Dumping gefordert. [Online] 03. 12 2017. [Zitat vom: 13. 02 2018.] http://www.sr.de/sr/home/nachrichten/panorama/kritik_an_fuel_dumping100.html.

Sturgis, Sue. 2010. Jet-fuel dumping behind Tenn. crop damage some blamed on BP spill. *facingsouth.org*. [Online] 08. 07 2010. [Zitat vom: 05. 03 2018.] <https://www.facingsouth.org/2010/07/jet-fuel-dumping-behind-tenn-crop-damage-some-blamed-on-bp-spill.html>.

swissair. 1994. *Ökologische Aspekte des Fuel-Dumpings*. s.l. : TEM Material Technologie & Umwelt, 1994. S. 22. 236867.

SWR. 2017. Kerosinregen über Rheinland-Pfalz. *Flugsicherung für sofortige Information*. [Online] 19. 10 2017. [Zitat vom: 01. 03 2018.] <https://www.swr.de/swraktuell/rp/kerosinregen-ueber-rheinland-pfalz-flugsicherung-fuer-sofortige-information/-/id=1682/did=20481052/nid=1682/1omjgn3/index.html>.

—. **2018.** Kritik nach neuen Zahlen . *Grüne fordern Untersuchung zu Kerosin-Regen*. [Online] 23. 01 2018. [Zitat vom: 13. 02 2018.] <https://www.swr.de/swraktuell/rp/kritik-nach-neuen-zahlen-gruene-fordern-untersuchung-zu-kerosin-regen/-/id=1682/did=21022222/nid=1682/nf6nus/index.html>.

—. **2018.** Wieder Vorfall mit Frachtflieger am Hahn. *Maschine muss umkehren - und lässt Kerosin ab*. [Online] 01. 03 2018. [Zitat vom: 01. 03 2018.] <https://www.swr.de/swraktuell/rp/kaiserslautern/wieder-vorfall-mit-frachtflieger-am-hahn-maschine-muss-umkehren-und-laesst-kerosin-ab/-/id=1632/did=21258038/nid=1632/1ulsv7c/index.html>.

Technische Regeln für Gefahrstoffe - Arbeitsplatzgrenzwerte - TRGS 900. BMAS. 28, Gemeinsames Ministerialblatt, S. 542-545.

Teske, Milton, et al. 1993. FSCBG: An aerial spray dispersion model for predicting the fate of released material behind aircraft. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1993, 12, S. 453-464.

Tesseraux, I., Mach, B. und Koss, G. 1998. Flugzeugtreibstoffe und Flugzeugemissionen. Eine Risikocharakterisierung für Flughafenanwohner am Beispiel des Hamburger Flughafens. *Zentralblatt für Hygiene und Umweltmedizin*. Juni 1998, Volume 201, Issue 2, S. 135-151. nur Abstract vorhanden (18.04.2018).

Todd, Jeffrey M. 1995. An assessment of the impact of fuel jettisoning events using simulation and impact models. [Thesis]. s.l. : Air Force Institute of Technology, Dezember 1995.

TÜV Rheinland Gruppe. 1993. *Konzeptstudie zur Umweltsituation des Rhein-Main-Flughafens Frankfurt/Main.* Wiesbaden : Hessischer Minister für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten, 1993. Konzeptstudie.

U.S. Department of Health and Human Services. 1995. *Toxicological Profile for jet fuels JP-4 and JP-7.* Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Department of Health and Human Services. 1995.

U.S. Department of Veterans Affairs. 2014. U.S. Department of Veterans Affairs. *VA Research Currents.* [Online] 20. 03 2014. [Zitat vom: 06. 03 2018.]

<https://www.research.va.gov/currents/spring2014/spring2014-11.cfm>.

Umweltbundesamt. 2018. Stoffdatenbank STARS. www.umweltbundesamt.de. [Online] 2018. [Zitat vom: 13. 12 2018.] <https://www.umweltbundesamt.de/portale/stoffdatenbank-stars>.

United States General Accounting Office. 1976. *Military And Civilian Aircraft Discharging Fuel In Flight.* Federal Aviation Administration, Department of Defense. Washington, D.C. : s.n., 1976.

US Department of Transportation. 2012. Aircraft Fuel System. *Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe.* 2012, Bd. 2, 14, S. 62.

Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen.

Europäisches Parlament. 2008. L353, 31. 12 2008, Amtsblatt der Europäischen Union, S. 1355.

Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV). **Bund. 2017.** 18.. 04. 2017, Bundesgesetzblatt, S. 905ff.

Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (TrinkwV). **Bund. 2018.** 2018, Bundesgesetzblatt, S. 99ff.

Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV). **Bund. 2017.** 2017, Bundesgesetzblatt, S. 626ff.

VNV. 2010. Overweight Landing. www.vnv.nl. [Online] Feb. 2010, 2010. [Zitat vom: 27. 09 2018.] <https://www.vnv.nl/publications/overweight-landing>.

Wabbels, Dorothea, Teutsch, Georg & der Themenverbund 1. 2008. *Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei mineralölkontaminierten Standorten. Methoden, Empfehlungen und Hinweise zur Untersuchung und Beurteilung.* s.l. : Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG), 2008. Leitfaden KORA-Themenverbund 1. ISBN 978-3-89746-093-9.

Wittekindt, Widu und Staut, Anne. 2018. Fuel Dumping nimmt zu. [Online] 22. 01 2018. [Zitat vom: 13. 02 2018.]

http://www.sr.de/sr/home/nachrichten/politik_wirtschaft/kerosin_ablass_zunehmendes_problem100.html.

Zannetti, P. 1990. *Air Pollution Modelling: Theories, Computational Methods, and Available Software.* New York : Van Nostrand, 1990.

A Treibstoffablässe 2002 - Juni 2018 über Deutschland

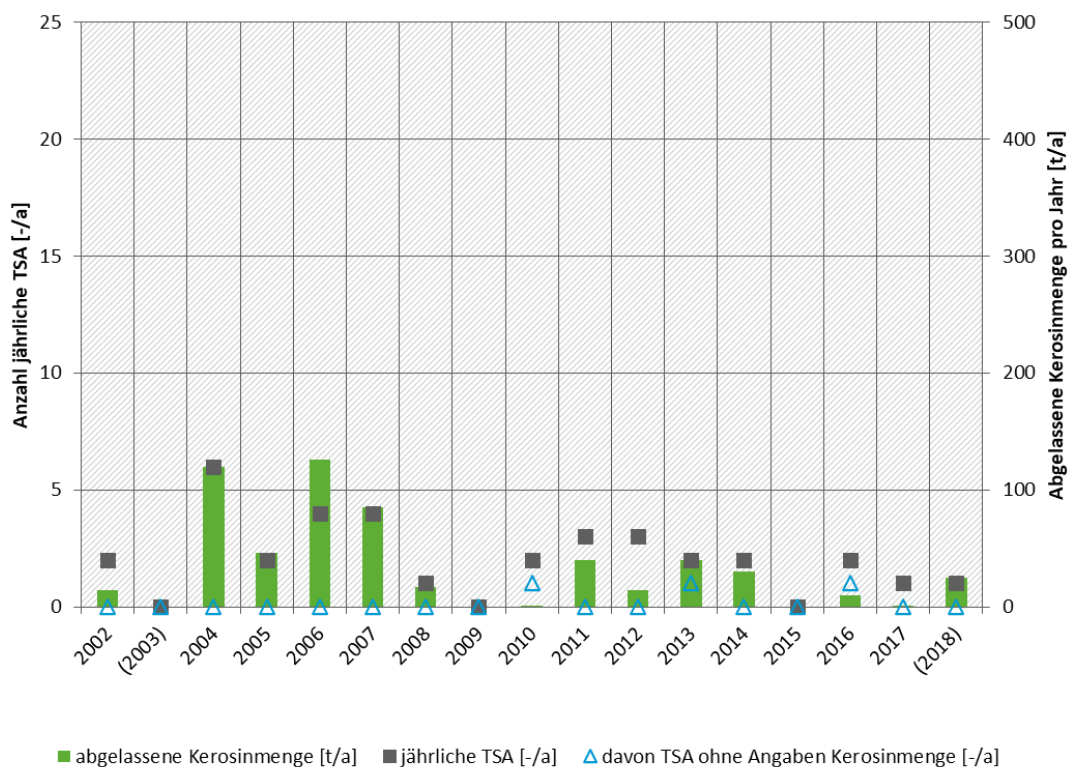
A.1 Jährliche TSA-Anzahl und abgelassene Kerosinmenge je Bundesland

Die nachfolgenden statistischen Auswertungen beziehen sich auf die über einem Bundesland abgelassene Tonnen an Kerosin im Zeitraum 2002 bis 2018 [t]. Datenbasis für diese Auswertungen sind die Dokumentationen der Deutschen Flugsicherung. Die Daten der Jahrgänge 2003 und 2018 sind in diesen Auswertungen unvollständig (s. Kap. 4.2).

Die abgelassenen Kerosinmenge darf nicht mit dem Niederschlag an Präzipitat an der Erdoberfläche gleichgesetzt werden. Ein Großteil der Inhaltsstoffe beim Kerosin verdampft in der Atmosphäre und wird hier u.a. durch UV-Strahlung zu unschädlichen Produkten ungesetzt. Nur ein Teil der freigesetzten Stoffe erreicht als Präzipitat die Erdoberfläche (s. Kap. 6.2.2).

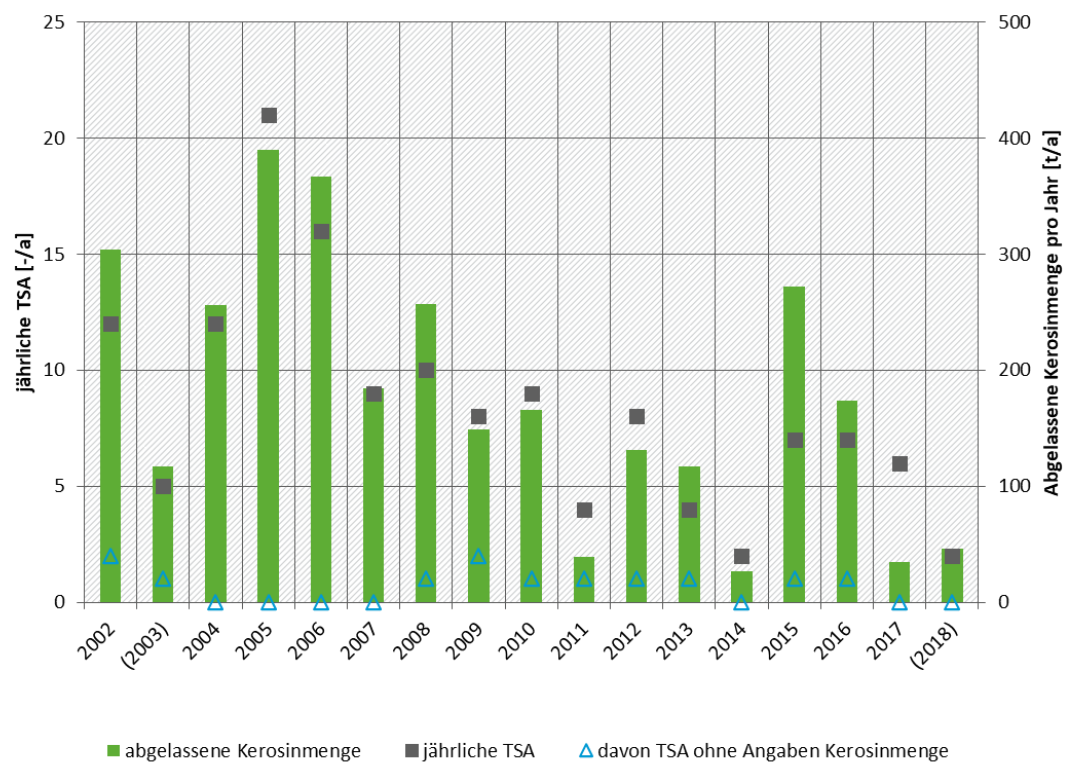
Jedoch ist aus den nachfolgenden Auswertungen keine Ableitung möglich, in welchem Bundesland sich Präzipitat niederschlägt. Die Datenbasis inkl. Witterungsverhältnisse sind hierzu in der Historie unzureichend detailliert. Insbesondere der Niederschlag von TSA in der Nähe der Landesgrenze ist hier schwer bilanzierbar (z.B. TSA über Rheinland-Pfalz, Niederschlag eines Teils des Präzipitats über dem Saarland, NRW, Hessen aber auch Luxemburg und Lothringen (Frankreich) möglich).

Abbildung 18: Treibstoffschnellablässe über Baden-Württemberg (BW)



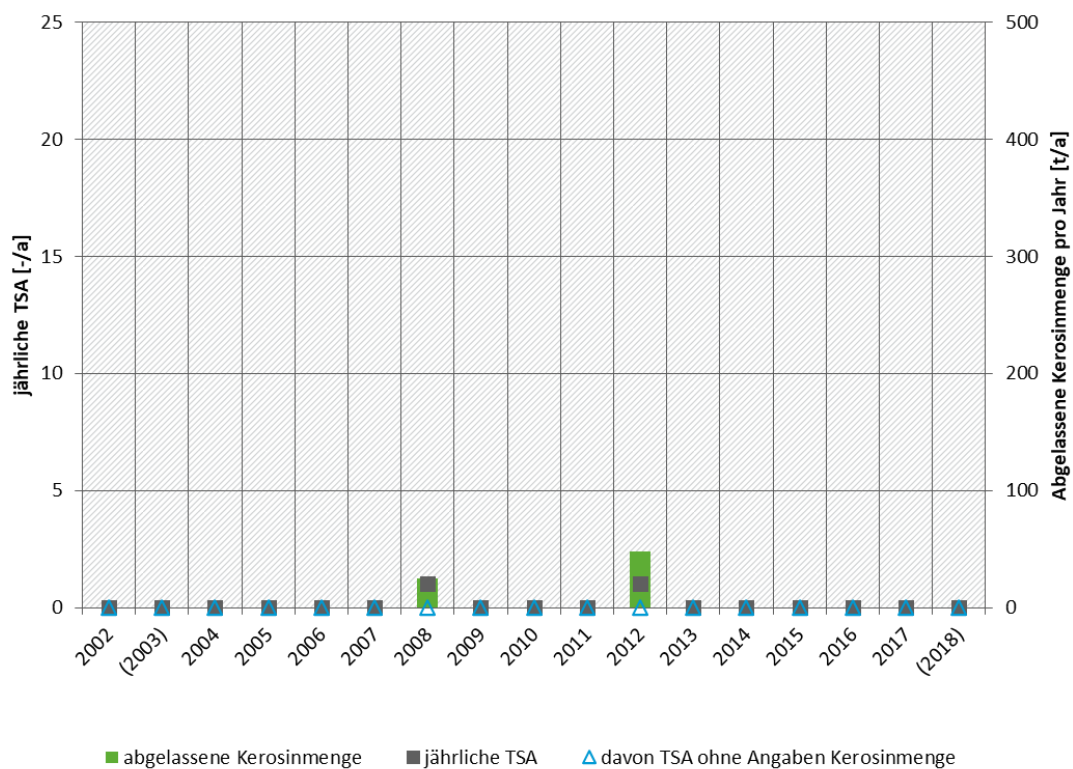
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reonsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 19: Treibstoffschnellablässe über Bayern (B)



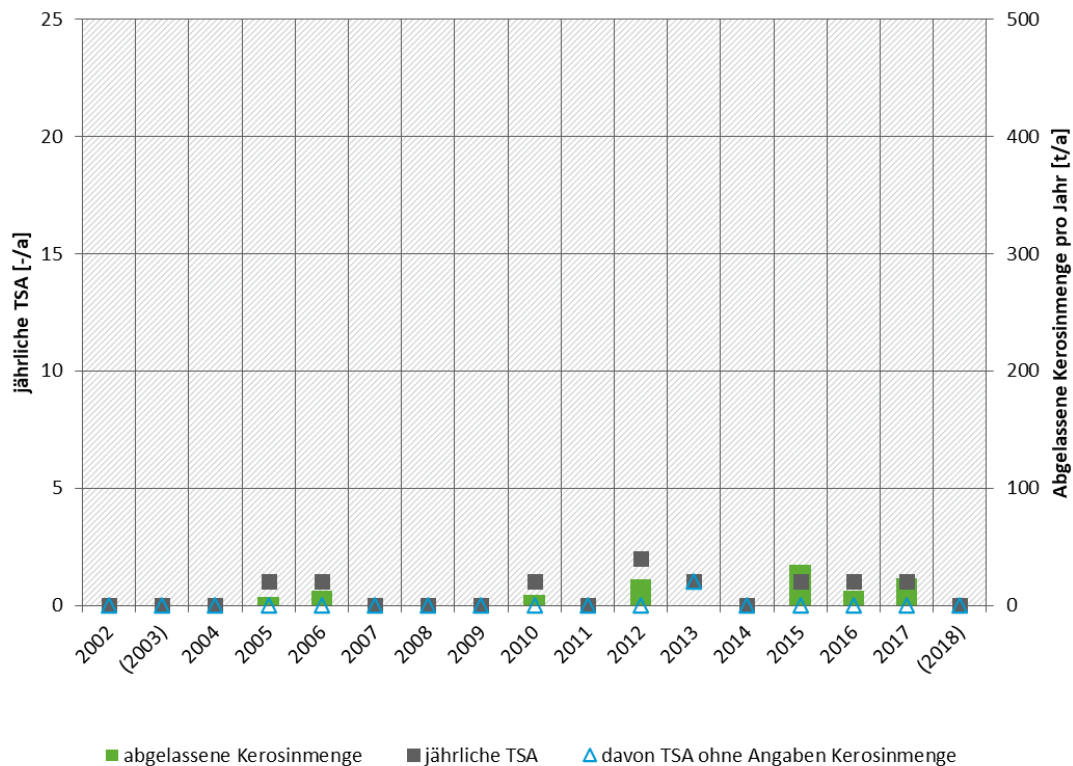
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reonsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 20: Treibstoffschnellablässe über Berlin (BE)



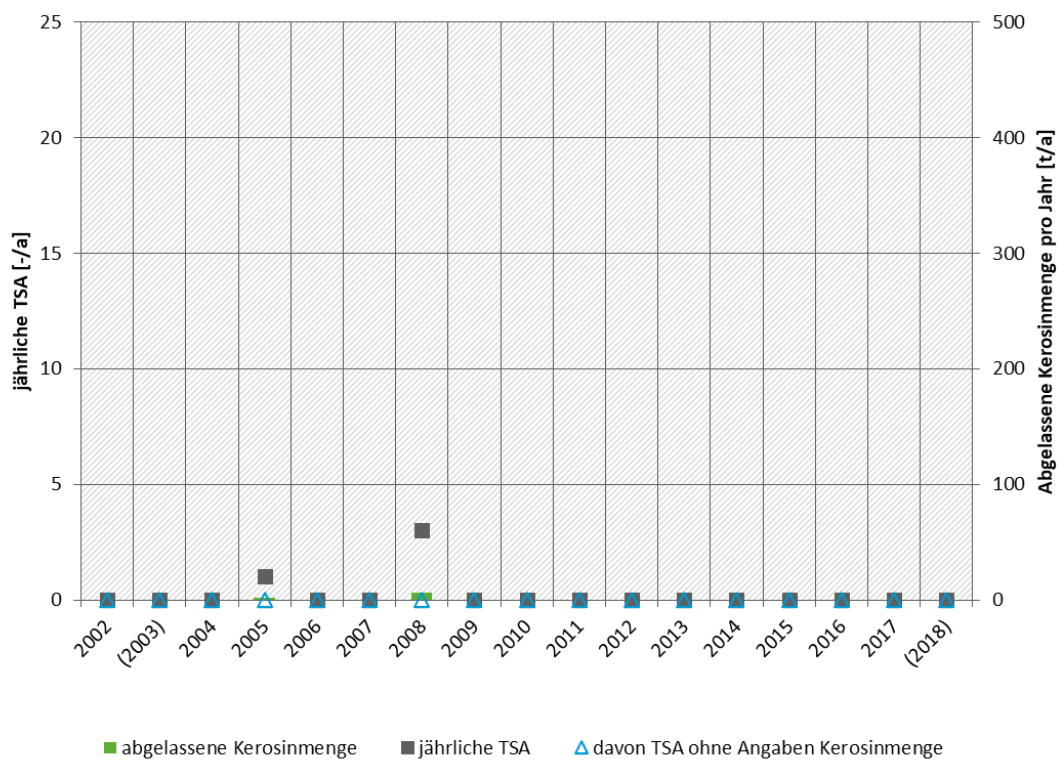
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 21: Treibstoffschnellablässe über Brandenburg (BB)



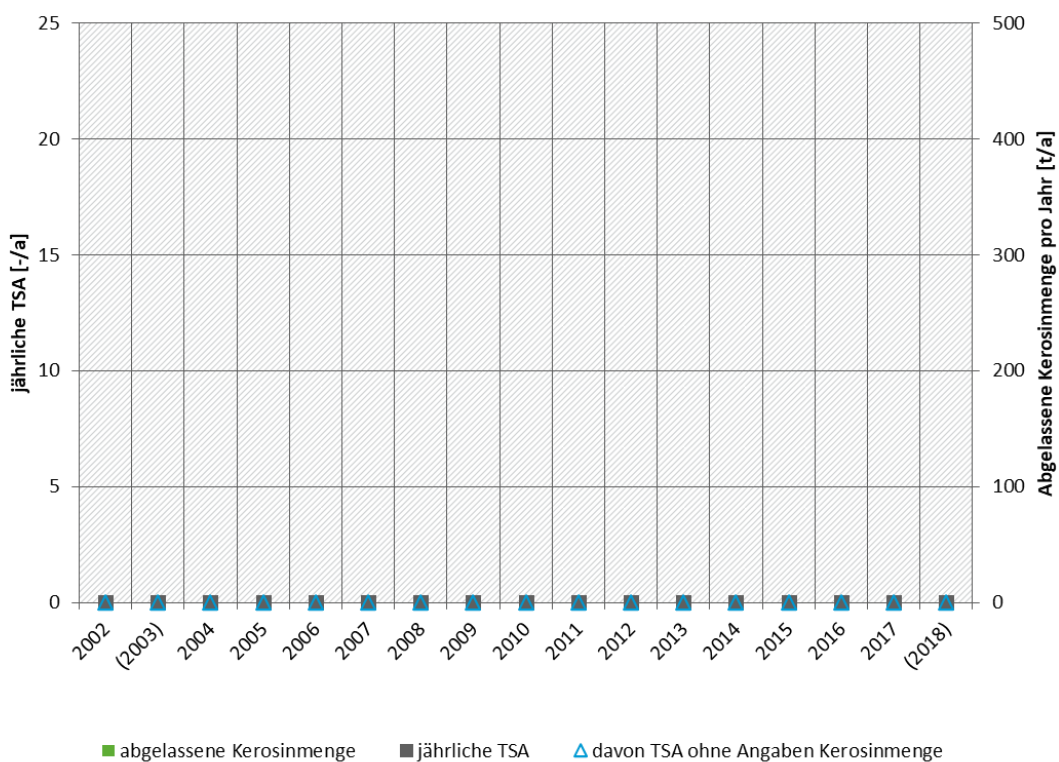
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 22: Treibstoffschnellablässe über Bremen (HB)



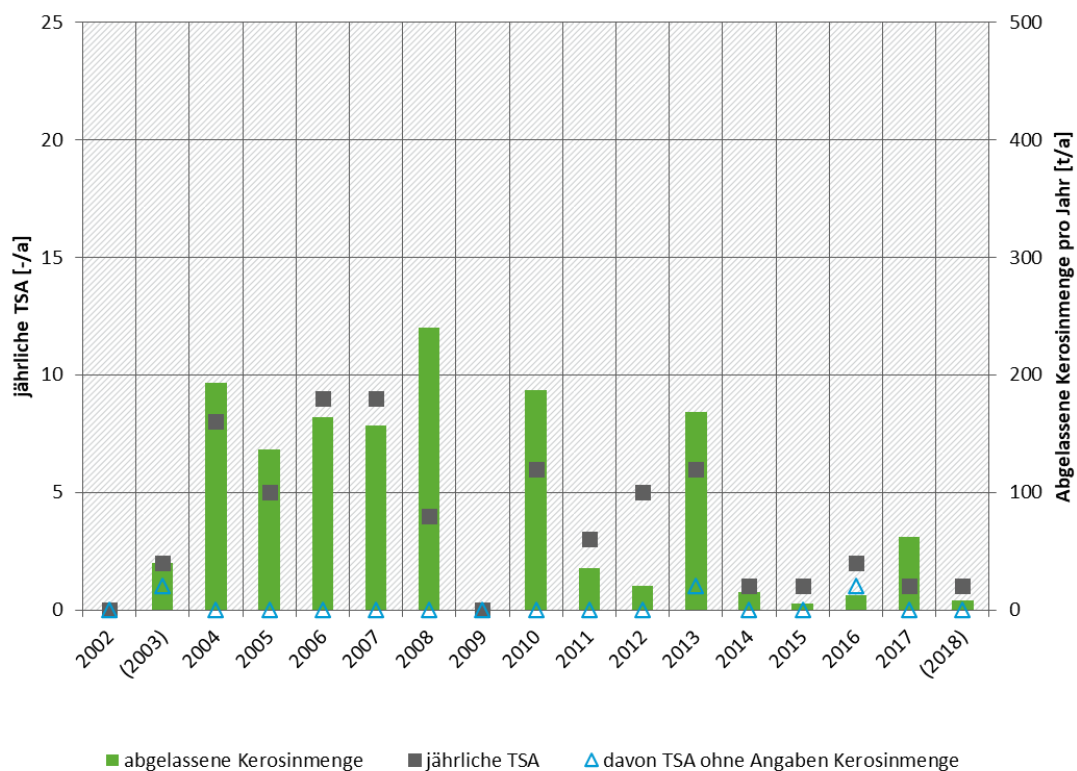
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 23: Treibstoffschnellablässe über Hamburg (HH)



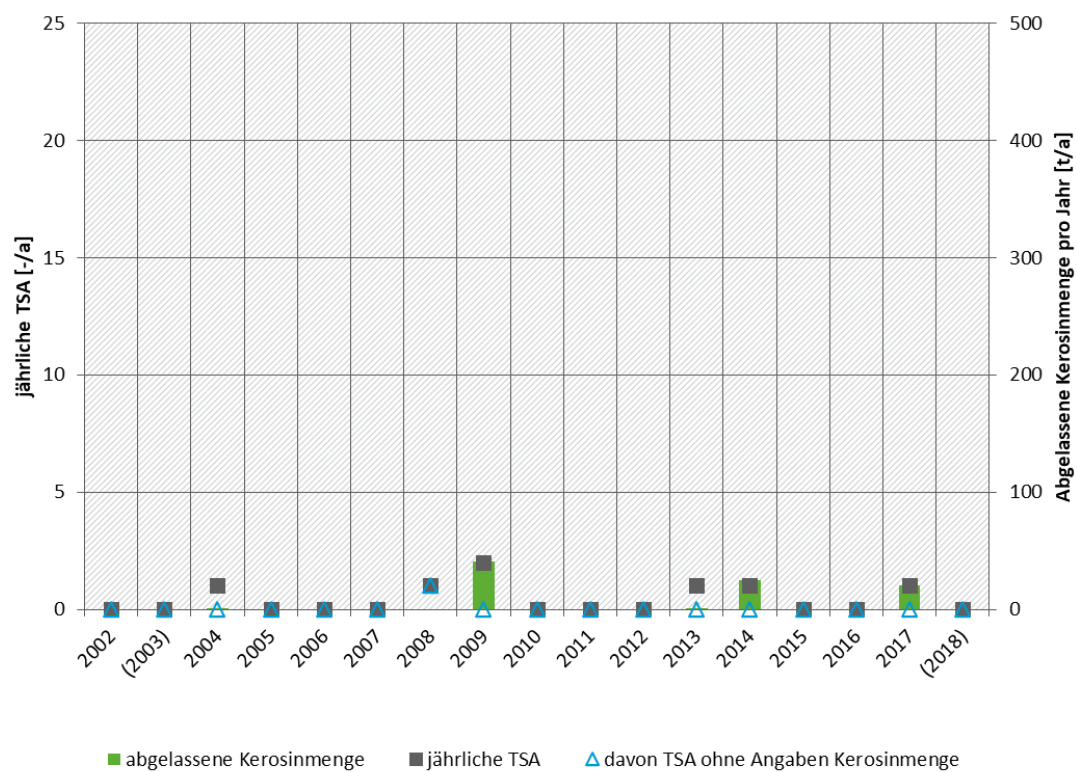
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 24: Treibstoffschnellablässe über Hessen (HE)



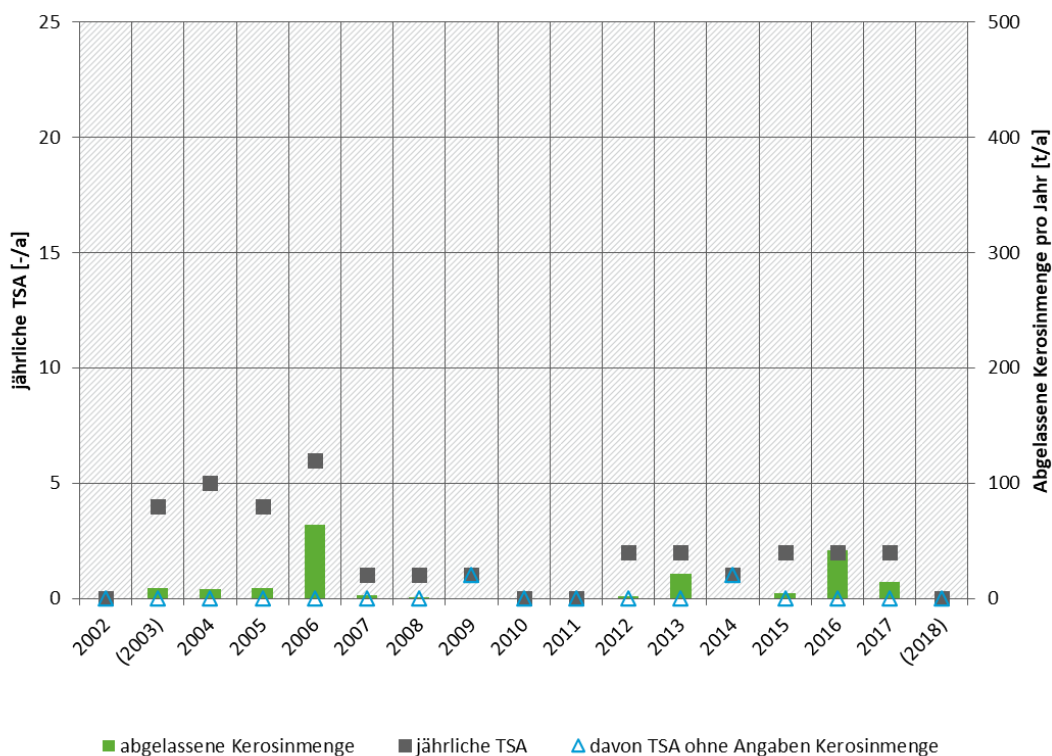
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 25: Treibstoffschnellablässe über Mecklenburg-Vorpommern (MV)



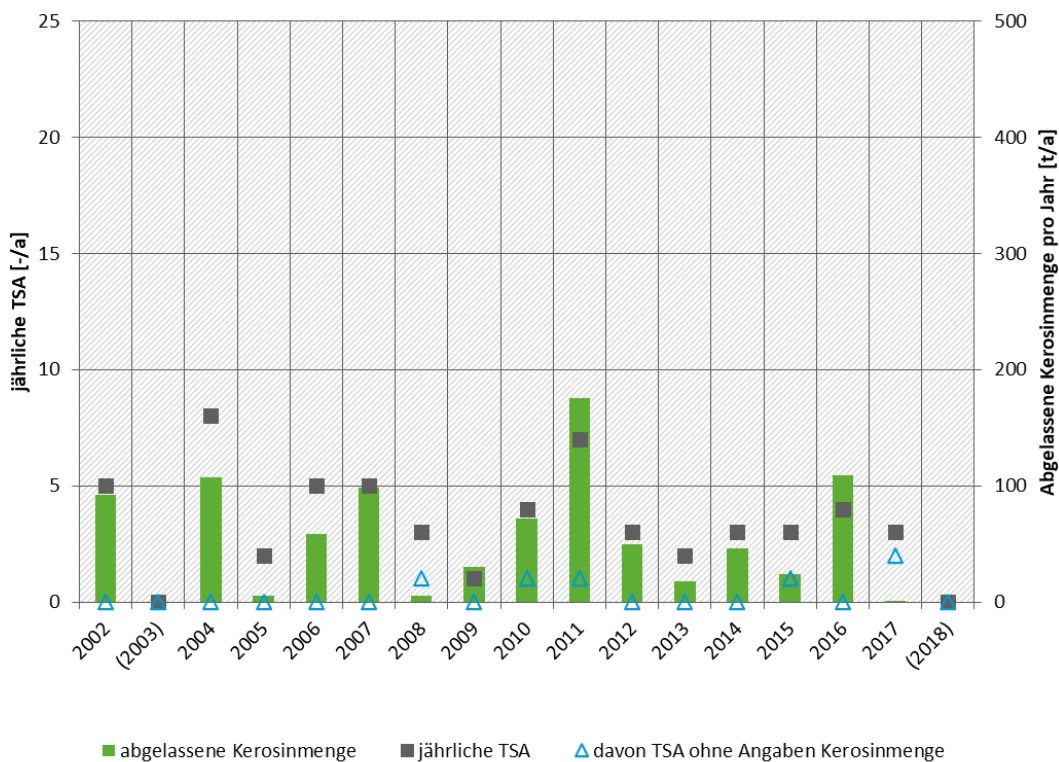
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 26: Treibstoffschnellablässe über Niedersachsen (NI)



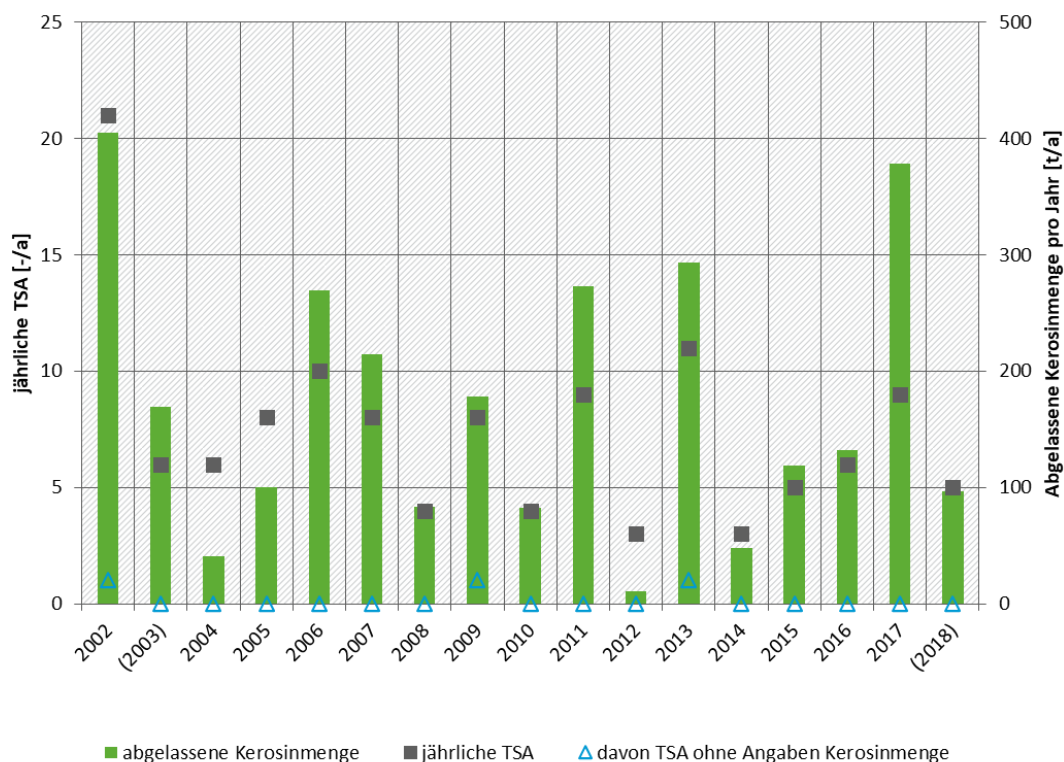
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 27: Treibstoffschnellablässe über Nordrhein-Westfalen (NW)



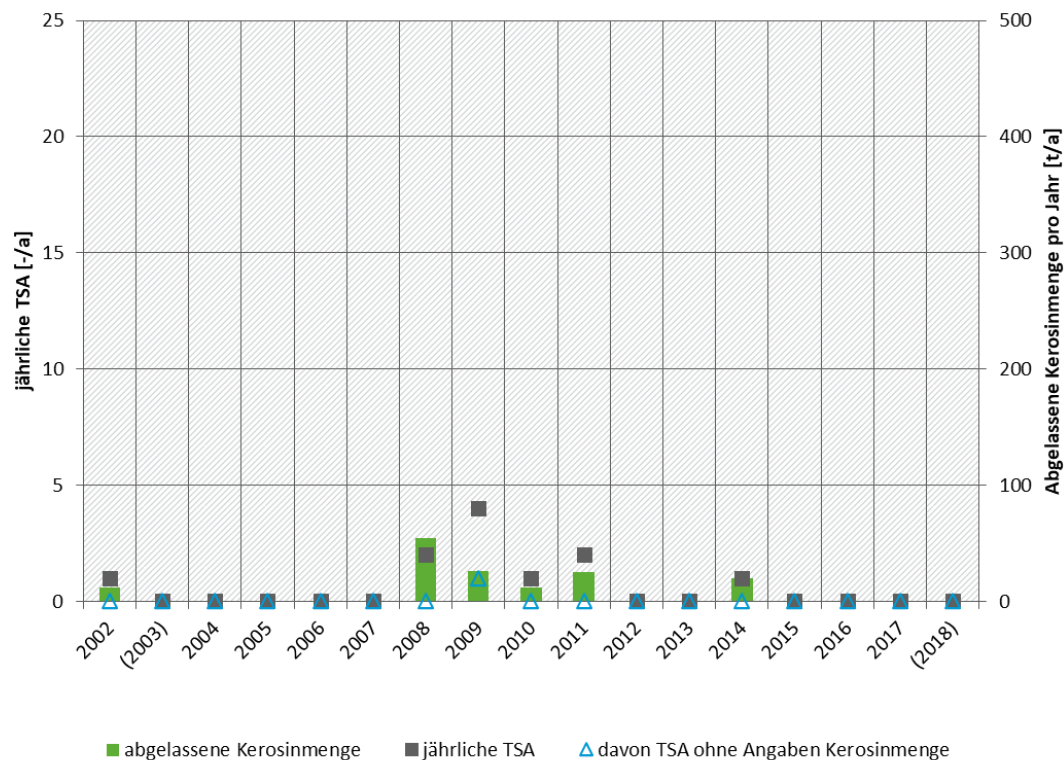
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 28: Treibstoffschnellablässe über Rheinland-Pfalz (RP)



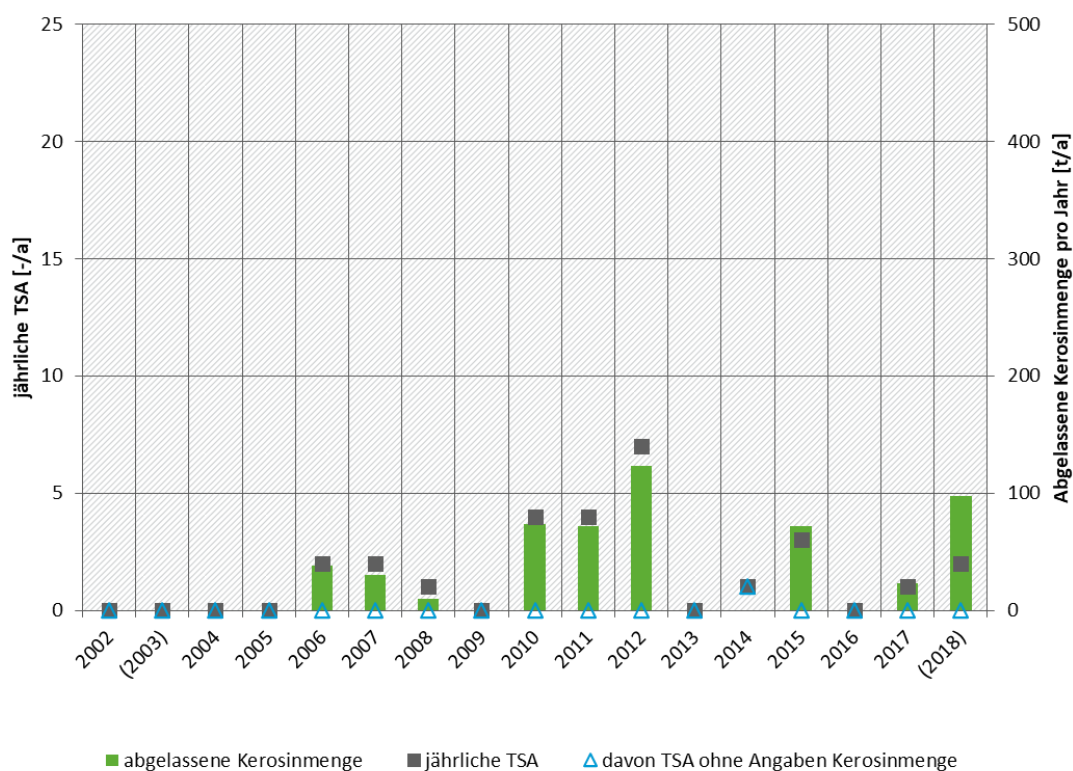
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 29: Treibstoffschnellablässe über Saarland (SL)



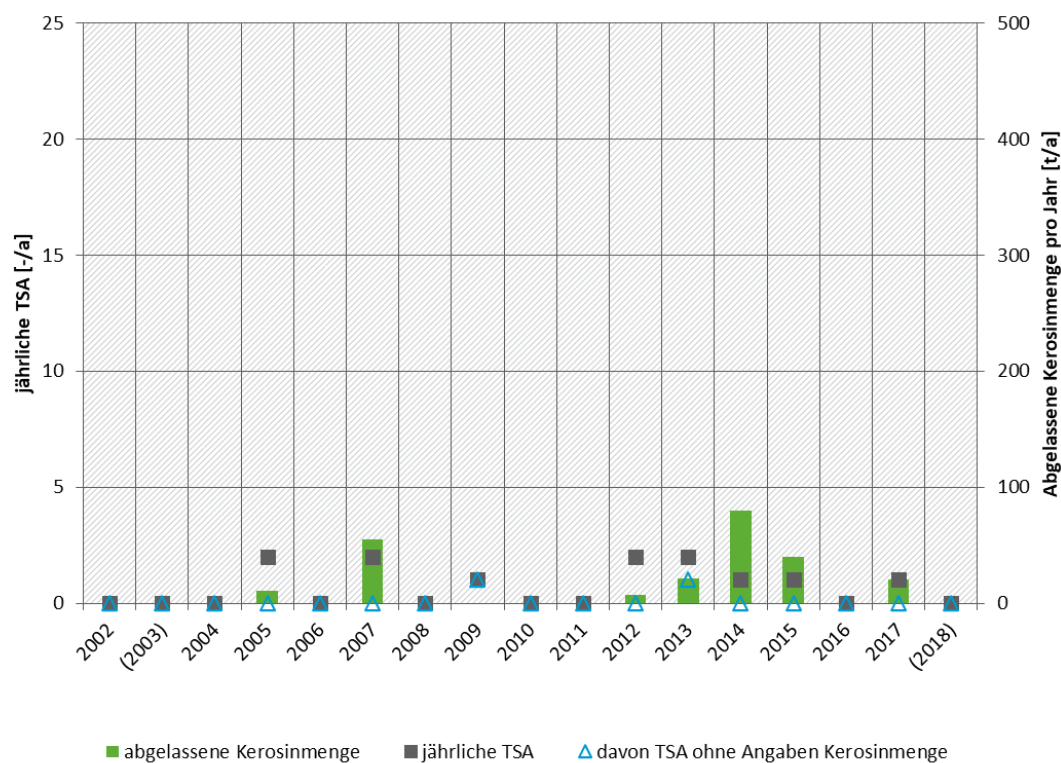
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 30: Treibstoffschnellablässe über Sachsen (SN)



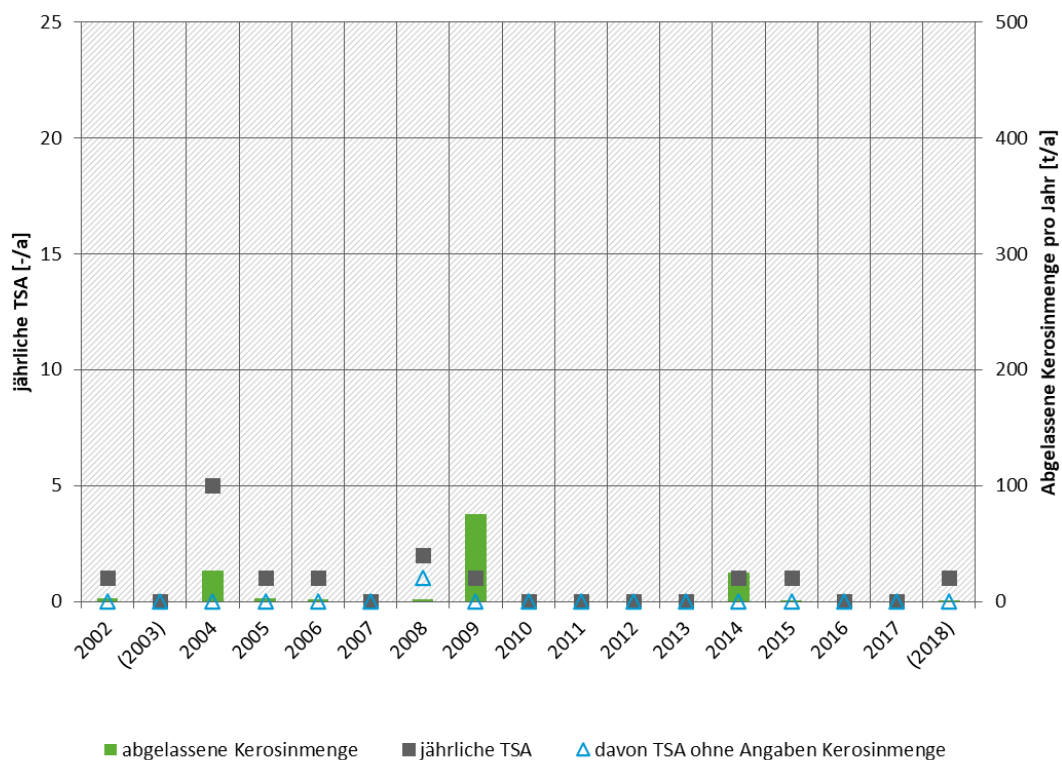
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 31: Treibstoffschnellablässe über Sachsen-Anhalt (ST)



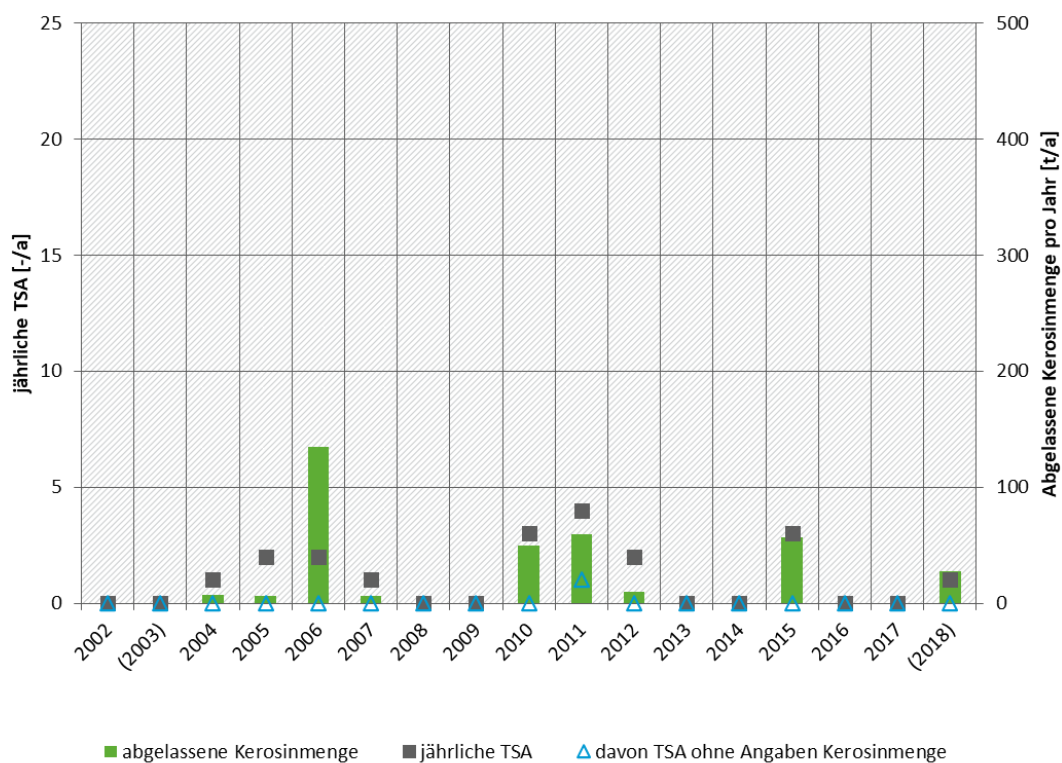
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 32: Treibstoffschnellablässe über Schleswig-Holstein (SH)



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Abbildung 33: Treibstoffschnellablässe über Thüringen (TH)



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

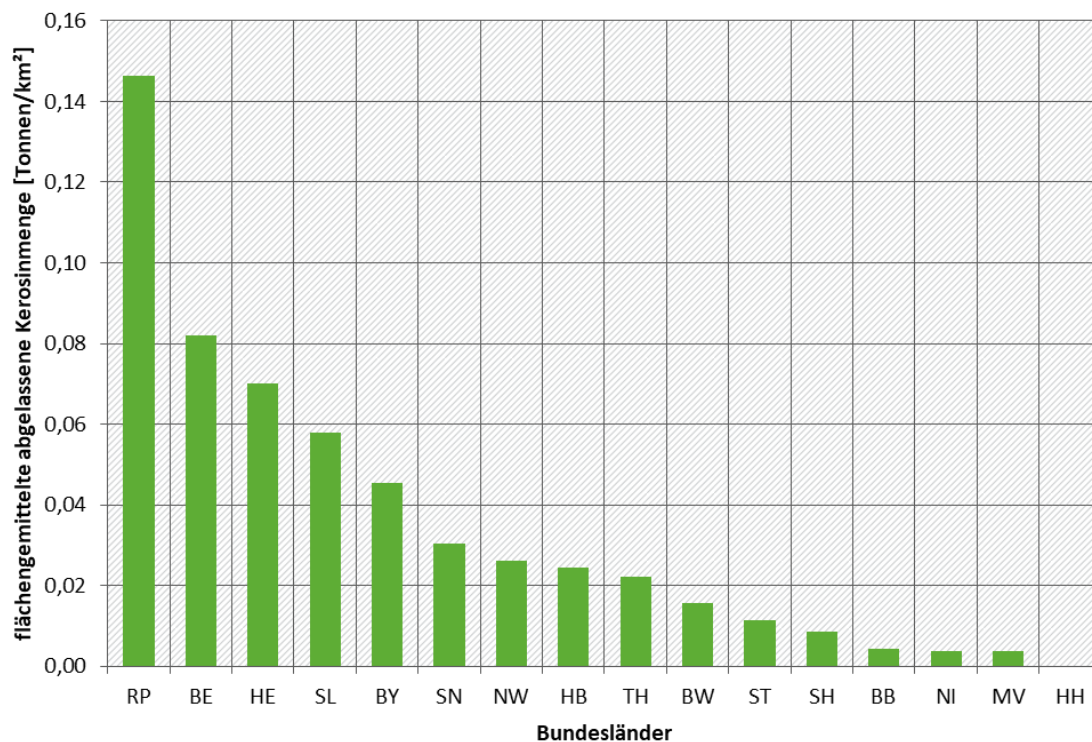
A.2 Summe der abgelassenen Kerosinmenge je Bundesland

Die nachfolgenden statistischen Auswertungen beziehen sich auf die über einem Bundesland abgelassene Tonnen an Kerosin im Zeitraum 2002 bis 2018 [t]. Datenbasis für diese Auswertungen sind die Dokumentationen der Deutschen Flugsicherung. Die Daten der Jahrgänge 2003 und 2018 sind in diesen Auswertungen unvollständig (s. Kap.4.2).

Die abgelassenen Kerosinmenge darf nicht mit dem Niederschlag an Präzipitat an der Erdoberfläche gleichgesetzt werden. Ein Großteil der Inhaltsstoffe beim Kerosin verdampft in der Atmosphäre und wird hier u.a. durch UV-Strahlung zu unschädlichen Produkten ungesetzt. Nur ein Teil der freigesetzten Stoffe erreicht als Präzipitat an die Erdoberfläche (s. Kap.6.2.2).

Jedoch ist aus den nachfolgenden Auswertungen keine Ableitung möglich, in welchem Bundesland sich Präzipitat niederschlägt. Die Datenbasis inkl. Witterungsverhältnisse sind hierzu in der Historie unzureichend detailliert. Insbesondere der Niederschlag von TSA in der Nähe der Landesgrenze ist hier schwer bilanzierbar (z.B. TSA über Rheinland-Pfalz, Niederschlag eines Teils des Präzipitats über dem Saarland, NRW, Hessen aber auch Luxemburg und Lothringen (Frankreich) möglich).

Abbildung 34: Summe der zwischen 2002 und Juni 2018 abgelassenen Kerosinmenge bezogen auf die Landesfläche [Tonnen Kerosin pro km²]



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

B Zusammenfassende toxikologische Einordnung von Kerosin-Inhaltsstoffen

Tabelle 11: Wassergefährdungsklassen von Kerosin-Inhaltsstoffen gemäß AwSV (2017)

Modell: d = 270 µm, H = 5.000 ft, v = 450 km/h, q = 2,6 t/min, B Nachlauf = 100m, NVT-Dispers.												
Lufttemperatur in Bodennähe		10° C	0° C			10° C	0° C			10° C	0° C	
	Alkane (Paraffine)		Präzipitat		Cycloalkane (Cycloparaffine)		Präzipitat		Aromaten		Präzipitat	
	Name	WGK	mg/m²		Name	WGK	mg/m²		Name	WGK	mg/m²	
C8	Octan	WGK 2	-	-	Cyclooctan	WGK 2	-	-	Xylole	WGK 2	-	-
C9	Nonan	WGK 3	-	-	Cyclononan		-	-	Mesitylen/1,3,5-TMB	WGK 2	-	-
C10	Decan	WGK 1	-	-	Cyclodecan	WGK 3	-	-	Naphthalin	WGK 3	-	-
									Azulen			
C11	Undecan	WGK 1	-	0,1	Cycloundecan		-	-			-	0,2
C12	Dodecan	WGK 1	-	4,2	Cyclododecan	WGK 1	-	5,1			-	1,8
C13	Tridecan	WGK 1	0,7	15,0	Cyclotridecan		-	7,2	Fluoren			
									Phenalen	WGK 3	0,2	6,8
C14	Tetradecan	WGK 1	3,6	11,5	Cyclotetradecan		9,3	12,5	Anthracen	WGK 2		
									Phenanthren	WGK 3	6,0	7,8
C15	Pentadecan	WGK 1	1,8	3,1	Cyclopentadecan		2,2	2,8			1,4	1,8
C16	Hexadecan	WGK 1			Cyclohexadecan				Pyren	WGK 2		
									Fluoranthen	WGK 2		
											0,3	0,5
Aromaten Benzol (C ₆ H ₆) und Toluol (C ₇ H ₈) wurde für die Tabelle nicht erfasst.												
WasserGefährdungsklassen												
			WGK 1 = schwach wassergefährdend									
			WGK 2 = deutlich wassergefährdend									
			WGK 3 = stark wassergefährdend									
			= keine Stoffdatenblätter in Datenbanken (GESTIS, Sigma Aldrich, EPA, STARS, Rigoletto, molbase)									

Bestandteile
kommen ...

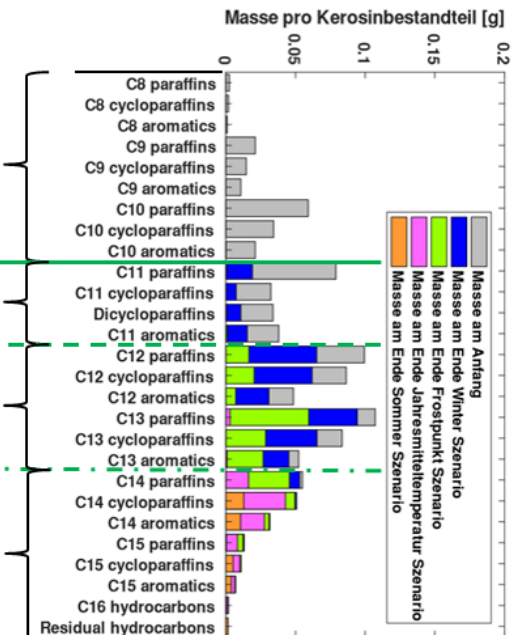
C8 - C10 ... in
keinem der 4
Szenarien ...

C11 ... im
Winter ...

C12 – C13 ...
im Winter- u.
Forst- Sz. ...

C14 – C16 ...
bei allen 4
Szenarien ...

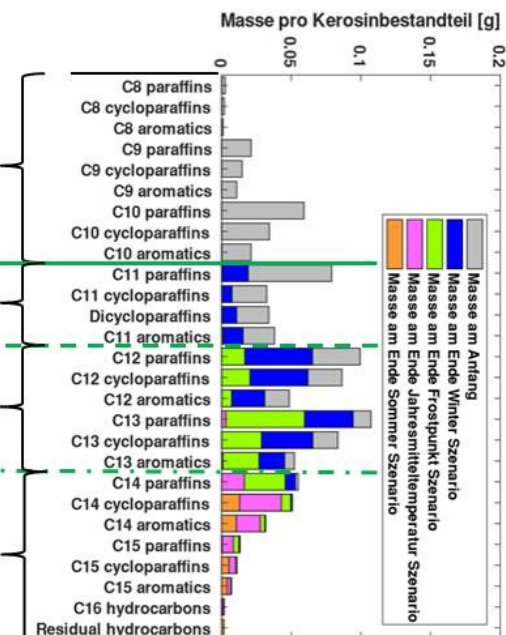
... am Boden an



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Tabelle 12: MAK-Werte für Kerosin-Inhaltsstoffe (Auswahl)

Modell: d = 270 µm, H = 5.000 ft, v = 450 km/h, q = 2,6 t/min, b_Nachlauf = 100m, NVT-Dispers.													
Lufttemperatur in Bodennähe				10° C		0° C		10° C				0° C	
	Alkane (Paraffine)		Präzipitat		Cycloalkane (Cycloparaffine)		Präzipitat		Aromaten		Präzipitat		
	Name	MAK-Wert [mg/m³]	mg/m²		Name	MAK-Wert [mg/m³]	mg/m²		Name	MAK-Wert [mg/m³]	mg/m²		
C8	Octan	2400	-	-	Cyclooctan	-	-	-	Xylole	440	-	-	
C9	Nonan	k.A.	-	-	Cyclononan	-	-	-	Mesitylen/1,3,5-TMB	100	-	-	
C10	Decan	k.A.	-	-	Cyclodecan	-	-	-	Naphthalin	2*	-	-	
									Azulen				
C11	Undecan	k.A.	-	0,1	Cycloundecan	-	-	-			-	0,2	
C12	Dodecan	k.A.	-	4,2	Cyclododecan	k.A.	-	5,1			-	1,8	
C13	Tridecan	k.A.	0,7	15,0	Cyclotridecan	-	-	7,2	Fluoren	k.A.	0,2	6,8	
									Phenalen				
C14	Tetradecan	k.A.	3,6	11,5	Cyclotetradecan	-	-	9,3	12,5	Anthracen	k.A.	6,0	7,8
										Phenanthren	k.A.		
C15	Pentadecan	k.A.	1,8	3,1	Cyclopentadecan	-	-	2,2	2,8			1,4	1,8
C16	Hexadecan	k.A.			Cyclohexadecan	-	-			Pyren	k.A.		
										Fluoranthen	k.A.		
											0,3	0,5	
Aromaten Benzol (C ₆ H ₆) und Toluol (C ₇ H ₈) wurde für die Tabelle nicht erfasst.													
MAK-Wert = Maximale Arbeitsplatz Konzentration, Wert in mg/m³, Empfehlung der MAK-Kommission bzw. TRGS 900 (*)													
= keine Stoffdatenblätter in Datenbanken (GESTIS, Sigma Aldrich, EPA, STARS, Rigoletto, molbase)													

Bestandteile kommen ...**C8 - C10 ... in keinem der 4 Szenarien ...****C11 ... im Winter ...****C12 - C13 ... im Winter- u. Forst- Sz. ...****C14 - C16 ... bei allen 4 Szenarien ...****... am Boden an**

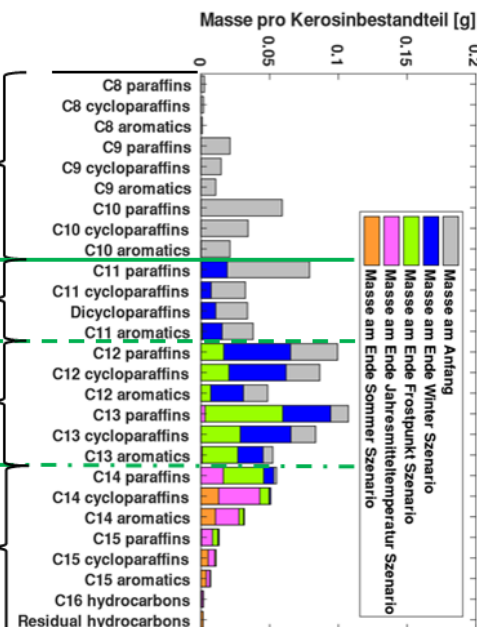
(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

Tabelle 13: Wassergefährdung durch Kerosin-Inhaltsstoffe gemäß EU-GHS-Verordnung (2006)

Modell: d = 270 µm, H = 5.000 ft, v = 450 km/h, q = 2,6 t/min, B_Nachlauf = 100m, NVT-Dispers.												
Lufttemperatur in Bodennähe		10° C	0° C			10° C	0° C					
	Alkane (Paraffine)		Präzipitat		Cycloalkane (Cycloparaffine)		Präzipitat		Aromaten		Präzipitat	
	Name	WG a/c	mg/m²		Name	WG a/c	mg/m²		Name	WG a/c	mg/m²	
C8	Octan	1/1	-	-	Cyclooctan	k.A.	-	-	Xylöle	k.A.	-	-
C9	Nonan	1/1	-	-	Cyclononan		-	-	Mesitylen/1,3,5-TMB	k.A./2	-	-
C10	Decan	k.A.	-	-	Cyclodecan		-	-	Naphthalin	1/1	-	-
									Azulen			
C11	Undecan	k.A.	-	0,1	Cycloundecan		-	-			-	0,2
C12	Dodecan	k.A.	-	4,2	Cyclododecan		-	5,1			-	1,8
C13	Tridecan	k.A.	0,7	15,0	Cyclotridecan		-	7,2	Fluoren	1/1	0,2	6,8
									Phenalen			
C14	Tetradecan	k.A.	3,6	11,5	Cyclotetradecan		9,3	12,5	Anthracen	1/1	6,0	7,8
									Phenanthren	1/1		
C15	Pentadecan	k.A.	1,8	3,1	Cyclopentadecan		2,2	2,8			1,4	1,8
C16	Hexadecan	k.A.			Cyclohexadecan				Pyren	1/1		
									Fluoranthen	1/1		
											0,3	0,5
Aromaten Benzol (C ₆ H ₆) und Toluol (C ₇ H ₈) wurde für die Tabelle nicht erfasst.												
WG a/c = EU-GHS-Einstufung wassergefährdend akut/chronisch												
= keine Stoffdatenblätter in Datenbanken (GESTIS, Sigma Aldrich, EPA, STARS, Rigoletto, molbase)												

Tabelle 14: Letalitätsdosis Ratte (LD₅₀) für Hauptkomponenten von Kerosingemischen

Modell: d = 270 µm, H = 5.000 ft, v = 450 km/h, q = 2,6 t/min, B. Nachlauf = 100m, NVT-Dispers.									
Lufttemperatur in Bodennähe		10° C	0° C			10° C	0° C		
Alkane (Paraffine)		Präzipitat		Cycloalkane (Cycloparaffine)		Präzipitat		Aromaten	
Name	LD ₅₀ Ratte [mg/kg]	mg/m ²		Name	LD ₅₀ Ratte [mg/kg]	mg/m ²		Name	LD ₅₀ Ratte [mg/kg]
C8	Octan	428	-	Cyclooctan	k.A.	-	-	Xylol	4300
C9	Nonan	16,8 mg/l/4h	-	Cyclononan	-	-	-	Mesitylen/1,3,5-TMB	24 mg/l/4h
C10	Decan	k.A.	-	Cyclodecan	-	-	-	Naphthalin	490
C11	Undecan	>2000	-	Cycloundecan	-	-	-	Azulen	-
C12	Dodecan	>2000	-	Cyclododecan	>2500	-	5,1	Fluoren	k.A.
C13	Tridecan	k.A.	0,7	Cyclotridecan	-	-	7,2	Phenalen	0,2
C14	Tetradecan	>5000	3,6	Cyclotetradecan	-	9,3	12,5	Anthracen	k.A.
C15	Pentadecan	k.A.	1,8	Cyclopentadecan	-	2,2	2,8	Phenanthren	k.A.
C16	Hexadecan	k.A.	-	Cyclohexadecan	-	-	-	Pyren	2700
								Fluoranthren	2000
									0,3
									0,5
Aromaten Benzol (C ₆ H ₆) und Toluol (C ₇ H ₈) wurde für die Tabelle nicht erfasst.									
LD ₅₀ = mittlere letale Dosis, oral [mg/kg]									
LD ₅₀ Angaben in mg/l/4h beziehen sich auf LC ₅₀ inhalativ Ratte									
= keine Stoffdatenblätter in Datenbanken (GESTIS, Sigma Aldrich, EPA, STARS, Rigoletto, molbase)									

Bestandteile kommen ...**C8 - C10 ... in keinem der 4 Szenarien ...****C11 ... im Winter ...****C12 - C13 ... im Winter- u. Forst- Sz. ...****C14 - C16 ... bei allen 4 Szenarien ...****... am Boden an**

(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

C Technische Dokumentation zu den Modellberechnungen mit Hilfe der Software MATLAB

C.1 Gewähltes Konzept für die Modellierung

C.1.1 Übersicht über die 2 Hauptkomponenten des Modells

Um die Umweltauswirkungen von Treibstoffschnellablass bei Flugzeugen (Fuel Dumping) berechnen zu können, wurde ein numerisches Modell mit der Software Matlab (Fa. MathWorks) von Joswig Ingenieure GmbH erstellt. Das Modell basiert auf den bisher bekannten wissenschaftlichen Untersuchungen, Berechnungsansätzen und Formeln zu Treibstoffschnellablässen. Es besteht aus folgenden zwei Hauptkomponenten:

Hauptkomponente 1: Tröpfchenmodell [D5] und [D7]:

Im Tröpfchenmodell werden schrittweise Weg und Verdunstung eines einzelnen Präzipitat-Tröpfchens unmittelbar nach dem TSA durch die Atmosphäre berechnet. Da sich bereits unmittelbar nach dem Ablassen durch die selektive Verdunstung einzelner Komponenten die chemische Zusammensetzung des abgelassenen Kerosintröpfchens ändert, wird das Komponentengemisch nach Einsetzen der Verdunstung als Präzipitat bezeichnet. Wesentliche Randbedingungen sind u.a. die Ablasshöhe, die Zusammensetzung des Treibstoffgemisches aus den Einzelkomponenten, der initiale Tröpfchendurchmesser und die Lufttemperatur am Boden.

Hauptkomponente 2: Dispersionsmodell [D12]:

Mit Hilfe eines Advektions- und Dispersionsmodells (vereinfacht im Folgenden Dispersionsmodell genannt) werden die Ergebnisse aus dem Tröpfchenmodell von einem einzelnen Tröpfchen auf die gesamte abgelassene Kerosinmenge und deren flächige Verteilung umgerechnet. Dabei wird auf Basis eines statistischen Ansatzes (Gauß'sche Normalverteilung) die flächige Konzentrationsverteilung des Präzipitats modelliert, welche den Boden erreicht.

Eine detaillierte Beschreibung der Berechnung ist in den Kapiteln 3 (Tröpfchenmodell) und 4 (Dispersionsmodell) dargestellt.

Bei der Entwicklung des Modell-Codes wurde darauf geachtet, dass die Anwendung des Modells auf komplexere Szenarien (z.B. Inversionswetterlage mit unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten) mit geringfügigen Änderungen am Code möglich ist. Darüber hinaus sind umfassendere Modellerweiterungen zum Beispiel auf Basis von neuen Erkenntnissen aus Feldversuchen möglich.

C.1.2 Modellannahmen

Folgende wichtige Annahmen für das Modell wurden gemäß den Literatur-quellen [D 5], [D 7] und mit [D 12] übernommen:

- Der Fall eines Präzipitat-Tröpfchens wird unabhängig vom Fall anderer Präzipitat-Tröpfchen betrachtet. Kollisionen, Vereinigungen und Zerteilungen von Tröpfchen werden nicht betrachtet. Interaktionen von Tröpfchen mit Regentropfen, Schneeflocken oder anderen Partikeln in der Luft werden nicht betrachtet.

- ▶ Die Form eines Präzipitat-Tröpfchens wird als ideale Kugel festgelegt.
- ▶ Mit dem Modell wird ausschließlich die flüssige Kerosinmasse (Flüssigphase) betrachtet. Die verdunstete Kerosinmasse (Gasphase) wird nach dem Verdunstungsprozess dem Modell bilanztechnisch entzogen und somit im Modell nicht weiter betrachtet.
- ▶ Verwirbelungseffekte unmittelbar nach dem Flugzeug (Wirbelschleppen, Wake Effects) werden im Tröpfchenmodell vernachlässigt. Es wird vereinfacht angenommen, das Tröpfchen befindet sich von Beginn der Modellberechnung an im freien Fall. Auch im Dispersionsmodell findet keine Berechnung der hydrodynamischen Verwirbelungseffekte statt, jedoch werden diese mit der Annahme einer initialen Konzentrationsverteilung und Nachlaufbreite indirekt berücksichtigt.
- ▶ Die atmosphärische Temperaturabnahme mit steigender Höhe über der Erdoberfläche wird mit einem linearen vertikalen Temperaturgradienten von 6,5 K/km abgebildet (ICAO-Standardatmosphäre).
- ▶ Die Ergebnisse des Tröpfchenmodells dienen als Eingangsdaten für das Dispersionsmodell. Es findet danach keine Rückkopplung vom Dispersionsmodell zum Tröpfchenmodell statt.
- ▶ Für die Treibstoffzusammensetzung Jet-A1 wird die in [D 7] verwendete Modellzusammensetzung für JP-8 verwendet, da diese weitgehend identisch sind.
- ▶ Die Fallgeschwindigkeit eines Präzipitat-Tröpfchens entspricht immer seiner Endgeschwindigkeit (engl. terminal velocity). Die Endgeschwindigkeit bezeichnet die Geschwindigkeit, die das Präzipitat-Tröpfchen am Ende seiner Beschleunigung erreicht hat, wenn sich die Gewichtskraft des Tröpfchens und sein Luftwiderstand im Gleichgewicht befinden. Da sich durch die Verdunstungsprozesse Masse und Durchmesser des Tröpfchens während des Falls verringern, muss die Endgeschwindigkeit in jedem Berechnungsschritt neu ermittelt werden.
- ▶ Jede Komponente verdunstet unabhängig von den anderen Komponenten im jeweils vorliegenden Stoffgemisch.
- ▶ Alle Tröpfchen werden zur gleichen Zeit in der gleichen Höhe und Fluggeschwindigkeit abgelassen.
- ▶ Grundsätzlich kann im Tröpfchenmodell eine Verteilung verschiedener initialer Tröpfchendurchmesser berücksichtigt werden, aufgrund der Datenlage wurde in den durchgeführten Modellberechnungen von einer einheitlichen initialen Tröpfchengröße ausgegangen.
- ▶ Zu Beginn der Modellberechnung ist die Tröpfchenwolke in Flug-richtung (in x-Richtung) linienförmig, die initiale Konzentrations-verteilung quer zur Flugrichtung (in y-Richtung) entspricht einer Gauß-Kurve.
- ▶ In z-Richtung (Höhe) erfolgt keine Betrachtung der Dispersion (alle Tröpfchen haben je Berechnungsschritt in den jeweiligen Höhenintervallen stets die gleiche Höhe).

- Weitere Modellannahmen, welche sich auf Berechnungsdetails beziehen, werden in den jeweiligen Kapiteln zur Beschreibung des Berechnungsverfahrens dargestellt.

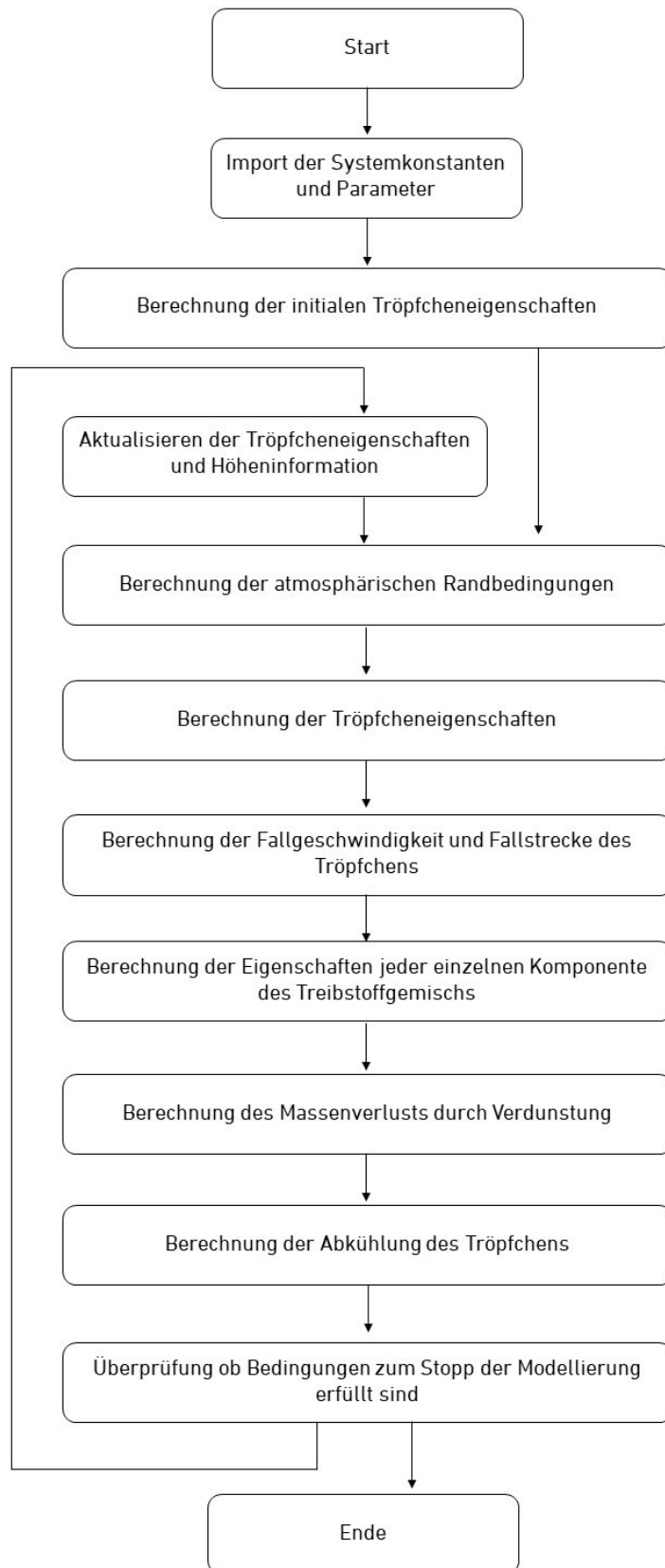
C.2 Aufbau der 1. Hauptkomponente: Tröpfchenmodell

Das für das Tröpfchenmodell verwendete Berechnungsverfahren basiert im Wesentlichen auf den beiden Veröffentlichungen von Clewell III [D5] und [D7]. Es wurden lediglich an einigen Stellen Verfeinerungen in der Berechnung wie z. B. geringere Grenzwerte für Kriterien aufgrund der besseren zur Verfügung stehenden Rechenleistung vorgenommen. Zudem waren einige Änderungen struktureller Art erforderlich, da eine andere Programmiersprache (Matlab statt Fortran) verwendet wurde.

In Abbildung 35 ist ein Flussdiagramm dargestellt, welches die Struktur des Programmcodes des Tröpfchenmodells gemäß [D5] mit kleineren Anpassungen darstellt. Mit Hilfe des Tröpfchenmodells wird rechnerisch der Weg eines Präzipitattropfchens durch die Atmosphäre verfolgt. Dabei werden die wesentlichen physikalischen Prozesse wie der Fall des Tröpfchens durch die Atmosphäre und die Verdunstung des Tröpfchens, jeweils in Abhängigkeit der Umgebungsparameter in der Atmosphäre, mit dem Modell nachberechnet.

Die Berechnung wird in sehr kleinen Berechnungsschritten (zeitliche Diskretisierung) durchgeführt, da besonders zu Beginn der Berechnung, d.h. kurz nach dem Treibstoffschnellablassvorgang, die physikalischen Prozesse sehr schnell ablaufen. Eine Berechnung mit dem Tröpfchenmodell besteht somit i.d.R. aus mehr als 20.000 Einzel-Berechnungsschritten. In jedem dieser Berechnungsschritte werden die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Rechenoperationen durchgeführt.

Abbildung 35: Vereinfachtes Flussdiagramm der Berechnungsschritte des Tröpfchenmodells



(Quelle: Forschungsgemeinschaft reconsite - Joswig Ingenieure)

C.2.1 Diskretisierung

Dem Modell liegt eine zeitliche Diskretisierung zu Grunde, welche durch ein sehr kleines initiales Zeitinkrement definiert wird. Falls während eines Rechenschritts ein ausreichend geringer Anteil des Tröpfchens verdunstet, wird für den nächsten Zeitschritt das Zeitinkrement verdoppelt. Die Länge der Zeitinkremente liegt zwischen $2 \cdot 10^{-8}$ und 0.33 Sekunden.

Gekoppelt an die zeitliche Diskretisierung ist die räumliche Diskretisierung, d. h. aus jedem zeitlichen Berechnungsschritt ergibt sich die Höhe des Tröpfchens aus der Fallgeschwindigkeit. Im Tröpfchenmodell wird zunächst nur die vertikale Fallrichtung (1-dimensional) ohne Berücksichtigung äußerer Einflüsse, wie z.B. Wind betrachtet, eine Berücksichtigung der horizontalen Verlagerung unter Berücksichtigung des Windes erfolgt mit Hilfe des Dispersionsmodells (siehe Kapitel C.3).

C.2.2 Berechnung der Umgebungsbedingungen in der Atmosphäre

Die Umgebungstemperatur T_a [K], der Atmosphärendruck P_a [N/m²] die Dichte der Luft ρ_a [kg/m³] und die dynamische Viskosität der Luft μ_a [Ns/m²] werden in jedem Berechnungsschritt neu mit den Gleichungen (C.2-1) bis (C.2-4) bestimmt. Die lokale Lufttemperatur T_a [K] wird hierfür mit einer linearen Approximation der Temperaturverteilung berechnet:

$$T_a = T_0 - l \cdot \left(h_0 - \sum_{i=1}^j \Delta z (i) \right) \quad (C.2-1)$$

Hierbei entspricht T_0 [K] der Bodentemperatur, l dem linearen Koeffizienten der Temperaturabnahme in der Höhe (6.5 K/km), h_0 [m] der Flughöhe des Flugzeuges und Δz [m] der bei jedem Berechnungsschritt i zurückgelegten Fallstrecke des Tröpfchens.

Der Atmosphärendruck wird mit Gleichung (C.2-2) berechnet:

$$P_a = P_0 \cdot \left(\frac{T_0}{T_a} \right)^{\left(\frac{g \cdot M_a}{R_0 \cdot l} \right)} \quad (C.2-2)$$

Die Dichte der Luft ρ_a wird mit Gleichung (C.2-3) berechnet:

$$\rho_a = \frac{P_a \cdot M_a}{R_0 \cdot T_a} \quad (C.2-3)$$

Hierbei ist R_0 die universelle Gaskonstante. Die dynamische Viskosität der Luft μ_a wird mit Gleichung (C.2-4) berechnet:

$$\mu_a = \frac{1,458 \cdot 10^{-6} \cdot T_a^{1,5}}{110,4 + T_a} \quad (C.2-4)$$

C.2.3 Berechnung der Tröpfcheneigenschaften

Berechnung der Initialen Tröpfcheneigenschaften

Im ersten Berechnungsschritt lassen sich die Tröpfcheneigenschaften des Treibstoffgemisches gemäß den nachfolgenden Gleichungen berechnen.

Die Initiale Tröpfchentemperatur $T_{d,1}$ [K] kann gemäß [D1] zitiert in [D5] als die Stagnationstemperatur T_s [K] angenommen werden, die sich aus der Fluggeschwindigkeit v_0 [m/s] des Flugzeugs, der lokalen Schallgeschwindigkeit C_s [m/s] und der lokalen Lufttemperatur mit Gleichung (C.2-5) berechnen lässt:

$$T_{d,1} = T_s = T_{a,1} \cdot \left(1 + \frac{v_0^2}{5C_{s,1}^2} \right) \quad (C.2-5)$$

Für die Berechnung wird die lokale Schallgeschwindigkeit benötigt, welche mit Gleichung (C.2-6) berechnet werden kann:

$$C_{s,1} = \sqrt{1,4 \cdot R_0 \cdot \frac{T_{a,1}}{M_a}} \quad (C.2-6)$$

Hierbei ist M_a [kg/kmol] die molare Masse der Luft (Systemkonstante).

Im ersten Berechnungsschritt wird der initiale Tröpfchendurchmesser $d_{d,1}$ [m] vorab festgelegt und ist somit definiert. Unter Annahme einer Kugelform kann das initiale Tröpfchenvolumen $V_{d,1}$ [m³] mit Gleichung (C.2-7) berechnet werden:

$$V_{d,1} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{d,1}}{2} \right)^3 \quad (C.2-7)$$

Die initiale Masse des Tröpfchens $m_{d,1}$ [kg] kann folgerichtig aus dem initialen Volumen des Tröpfchens $V_{d,1}$ und seiner initialen Dichte in Gleichung (C.2-8) berechnet werden:

$$m_{d,1} = V_{d,1} \cdot \rho_{d,1} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{d,1}}{2} \right)^3 \cdot \rho_{d,1} \quad (C.2-8)$$

Um die Dichte des Tröpfchens zu bestimmen, wird zuerst die Dichte jeder Komponente ρ_k [kg/m³] in Gleichung (C.2-9) bestimmt. Diese hängt von der Tröpfchentemperatur ab.

$$\rho_k = \frac{\rho_{k,20^\circ C}}{1 + 0,001 \cdot (T_{d,1} - 293,15)} \quad (C.2-9)$$

Die Komponentendichte kann dann mit den Volumenanteilen $V_{\text{frac},k}$ [-] der jeweiligen Komponenten gewichtet werden und die Tröpfchendichte somit mit Gleichung (C.2-10) berechnet werden:

$$\rho_{d,1} = \sum_{k=1}^N V_{frac,k} \cdot \rho_k \quad (C.2-10)$$

Die Masse einer einzelnen Komponente kann dann aus dem Tröpfchenvolumen, dem Volumenanteil $V_{frac,k}$ [-] und der jeweiligen Komponentendichte mit Gleichung (C.2-11) berechnet werden:.

$$m_{k,1} = V_{frac,k,1} \cdot \rho_{k,1} \cdot V_{d,1} \quad (C.2-11)$$

Aktualisierung der Tröpfcheneigenschaften

Für alle Rechenschritte (mit Ausnahme des ersten Berechnungsschritts) wird die Masse des Tröpfchens m_d [kg] aus der Differenz zwischen der Summe der Masse aller einzelnen Komponenten im vorangegangenen Berechnungsschritt und der verdunsteten Masse im vorangegangenen Berechnungsschritt gemäß Gleichung (C.2-12) berechnet:

$$m_{d,i} = \sum_{k=1}^N (m_{k,i-1} - \Delta m_{k,i-1}) \quad (C.2-12)$$

In allen Rechenschritten (mit Ausnahme des ersten Berechnungsschritts) wird der Tröpfchendurchmesser über die Dichte des Tröpfchens ρ_d [kg/m³] und das Tröpfchenvolumen V_d [m³] bestimmt, welches sich aus der Summe der Quotienten von Masse und Dichte jeder einzelnen Komponente (Gleichung (C.2-13)) zusammensetzt:

$$V_d = \sum_{k=1}^N \frac{m_k}{\rho_k} \quad (C.2-13)$$

Der Durchmesser des Tröpfchens kann dann anhand der Geometrie einer Kugel wie folgt bestimmt werden:

$$d_d = \left(\frac{6}{\pi} \cdot V_d \right)^{\frac{1}{3}} \quad (C.2-14)$$

Berechnung der Fallstrecke eines Tröpfchens je Berechnungsschritt

Die Fallstrecke Δz [m] des Tröpfchens, die es während eines Berechnungsschritts zurücklegt, lässt sich aus dem Produkt seiner Geschwindigkeit U_t [m/s] mit dem Zeitinkrement des Berechnungsschritts Δt [s] in Gleichung (C.2-15) berechnen:

$$\Delta z = U_t \cdot \Delta t \quad (\text{C.2-15})$$

Die Tröpfchengeschwindigkeit U_t wird mit Hilfe eines empirisch ermittelten Zusammenhangs zwischen der Reynoldszahl Re [-] und einem Geschwindigkeitsbeiwert q [-] berechnet, wobei sich q mit Gleichung (C.2-16) berechnen lässt:

$$q = \sqrt{4 \cdot \rho_a \cdot \rho_d \cdot \frac{g \cdot d_d^3}{3 \cdot \mu_a^2}} \quad (\text{C.2-16})$$

Der empirische ermittelte Zusammenhang zwischen q und Re ist in Gleichung (C.2-17) beschrieben:

$$\ln Re = -3,13 + 2,06 \cdot \ln q - 0,083 \cdot (\ln q)^2 \quad (\text{C.2-17})$$

Aus Gleichung (C.2-17) kann die Reynoldszahl ermittelt und somit die Geschwindigkeit des Tröpfchens mit Gleichung (C.2-18) berechnet werden:

$$U_t = \frac{\mu_a \cdot Re}{d_d \cdot \rho_a} \quad (\text{C.2-18})$$

C.2.4 Berechnung des Massenverlusts durch Verdunstung

Bei den Verdunstungsprozessen des Tröpfchens wird jede einzelne Komponente des Präzipitats separat betrachtet und deren jeweilige spezifische Verdunstung unabhängig von den anderen Einzelkomponenten berechnet.

Die Änderung der Masse einer Komponente des Tröpfchens Δm_k [kg] wird mit Hilfe

- eines Massentransferkoeffizienten h_k [s/m], sowie dem
- Dampfdruck einer Komponente P_k [N/m²] und dem
- Stoffmengenanteil einer Komponente ϵ_k [-]

in Gleichung (C.2-19) berechnet:

$$\Delta m_k = \pi \cdot d_d^2 \cdot h_k \cdot P_k \cdot \epsilon_k \cdot \Delta t \quad (\text{C.2-19})$$

Der Stoffmengenanteil einer Komponente ϵ_k [-] hängt von der Zusammensetzung des Präzipitats ab. Der Dampfdruck einer Komponente wird mit Gleichung (C.2-20) berechnet wobei $T_{b,k}$ [K] der spezifische Siedepunkt der jeweiligen Einzelkomponente ist. Die Konstanten in Gleichung (C.2-20) wurden gemäß [D5] aus der modifizierten Antoine-Gleichung mit 3,3-Dimethylhexan als Referenzelement erlangt.

$$\ln P_k = 20,53 - \frac{2899}{385,15 \cdot \frac{T_d}{T_{b,k}} - 62,3} \quad (\text{C.2-20})$$

Der Massentransferkoeffizient h_k ist eine Funktion aus der Diffusität einer Komponente D_k [m²/s], der Schmid-Zahl Sc_k [-] und der Nusselt-Zahl Nu_k [-], welche jeweils von weiteren Parametern abhängen. Die Diffusität einer Komponente des Präzipitats kann mit Gleichung (C.2-21) berechnet werden:

$$D_k = \frac{2,66 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{M_k} + \frac{1}{M_a}\right)}}{P_a \cdot \left(V_{b,k}^{\frac{1}{3}} + 0,31\right)^2} \quad (\text{C.2-21})$$

Hierbei wird die Temperatur des Verdunstungsfilms des Tröpfchens T_f [K] als Mittelwert zwischen der Tröpfchentemperatur und der Atmosphärentemperatur definiert. Der Parameter M_k [kg/kmol] beschreibt die spezifische molare Masse einer Einzelkomponente und $V_{b,k}$ [-] das spezifische molare Volumen einer Einzelkomponente bei ihrem jeweiligen Siedepunkt. Die Berechnung von $V_{b,k}$ erfolgt durch Gleichung (C.2-22):

$$V_{b,k} = \frac{M_k \cdot \left(1 + 0,001 \cdot (T_{b,k} - 293,15)\right)}{\rho_{k,20^\circ\text{C}}} \quad (\text{C.2-22})$$

Die Schmidt-Zahl einer Komponente Sc_k [-] kann mit Gleichung (C.2-23) berechnet werden¹:

$$Sc_k = \frac{\mu_a}{\rho_a \cdot D_k} \quad (\text{C.2-23})$$

Die Nusselt-Zahl einer Komponente Nu_k [-] kann mit Gleichung (C.2-24) berechnet werden:

$$Nu_k = 2 + 0,6 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Sc_k} \quad (\text{C.2-24})$$

Der Massentransferkoeffizient wird abschließend mit Gleichung (C.2-25) berechnet:

¹Bei [D5] ist anstatt D_k (dort Di), B_k (also Bi) als Parameter im Nenner des Terms aufgeführt. Dies ist jedoch offensichtlich ein Druckfehler und wurde auch anhand des Fortran-Codes von [D5] verifiziert.

$$h_k = Nu_k \cdot D_k \cdot \frac{M_k}{d_d \cdot R_0 \cdot T_a} \quad (\text{C.2-25})$$

C.2.5 Berechnung der Temperaturänderung des Tröpfchens

Im letzten Modellierungsschritt wird die Temperaturänderung des Tröpfchens berechnet. Für die Berechnung der Temperaturänderung werden zwei Fälle unterschieden:

- $T_d > T_a$ (Tröpfchen wärmer als Umgebung) und
- $T_d < T_a$ (Tröpfchen kälter als Umgebung).

Betrachtungen bei Präzipitat-Tröpfchen, die wärmer als ihre Umgebung sind, $T_d > T_a$

Hierzu wird eine Energiebilanz Q_d [J] in Gleichung (C.2-26) aufgestellt, die sich wie folgt zusammensetzt:

$$Q_d = \pi \cdot d_d^2 \cdot \Delta t \left(e_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 + \frac{1}{4} \cdot (1 - a) \cdot L + k \cdot (T_a - T_d) - e_d \cdot \sigma \cdot T_d^4 \right) - \Delta H_v \cdot \Delta m_d \quad (\text{C.2-26})$$

Dabei beschreiben

- e_a [-] und e_d [-] die Emissionsgrade der Luft und des Tröpfchens,
- σ die Stefan-Boltzmann Konstante [$\text{J}/\text{sm}^2\text{K}^4$],
- a [-] die Albedo des Tröpfchens,
- L die solare Strahlungsrate [$\text{J}/\text{m}^2\text{s}$],
- ΔH_v [J/kg] die latente Verdunstungswärme und
- k [$\text{J}/\text{m}^2\text{s K}$] den Wärmeübergangskoeffizient.

Während für e_a , e_d , a und L Systemkonstanten sind, müssen der Wärmeübergangskoeffizient k und die latente Verdunstungswärme ΔH_v berechnet werden. Die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten erfolgt in Gleichung (C.2-27):

$$k = k_h \cdot \frac{(2 + 0,6 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr})}{d_d} \quad (\text{C.2-27})$$

Hierbei sind k_h [J/msK] die Wärmeleitfähigkeit und Pr [-] die Prandtl-Zahl, welche das Verhältnis von kinematischer Viskosität zur Wärmeleitfähigkeit im Bereich des Verdunstungsfilms beschreibt, und mit Hilfe der Gleichungen (C.2-28) und (C.2-29) berechnet werden.

$$k_h = 0,024 \cdot (1 + 0,0034 \cdot (T_a - 273,15)) \quad (\text{C.2-28})$$

$$Pr = 0,713 \cdot (1 - 4,6 \cdot 10^{-4} \cdot (T_a - 273,15)) \quad (\text{C.2-29})$$

Die latente Wärmeleitfähigkeit ΔH_v des Kohlenwasserstoffgemischs lässt sich für den Temperaturbereich dieser Modellbetrachtung (-40°C - 40°C) gemäß [D5] ausreichend genau durch die in Gleichung (C.2-30) dargestellte lineare Approximation bestimmen:

$$\Delta H_v = 3,7 \cdot 10^5 \cdot (1 - 0,0013 \cdot (T_d - 273,15)) \quad (\text{C.2-30})$$

Die Abkühlung des Tröpfchens kann nun gemäß [D5] mit Gleichung (C.2-31) berechnet werden:

$$\Delta T_d = \frac{Q_d}{m_d \cdot C_p} \quad (\text{C.2-31})$$

C_p [J/kg/K] ist hierbei die spezifische Wärmekapazität des Komponentengemischs und kann gemäß [D5] mit Gleichung (C.2-32) abgeschätzt werden².

$$C_p = 4840 \cdot \frac{181 + 0,8 \cdot T_d}{\rho_d} \quad (\text{C.2-32})$$

Mit Gleichungen (C.2-26) bis (C.2-32) wird die Abkühlung des Tröpfchens berechnet, solange dieses wärmer als seine Umgebungstemperatur ist. Die Tröpfchentemperatur für den nächsten Berechnungsschritt lässt sich dann mit Gleichung (C.2-33) berechnen:

$$T_{d,i+1} = T_{d,i} - \Delta T_{d,i} \quad (\text{C.2-33})$$

Betrachtungen bei Präzipitat-Tröpfchen, die kälter als ihre Umgebung sind, $T_d < T_a$

Unterschreitet die Tröpfchentemperatur die Umgebungstemperatur ($T_d < T_a$), wird ein anderes Verfahren zu ihrer Berechnung verwendet. Dazu erfolgt in einem Zwischenschritt die Berechnung der Gleichgewichtstemperatur (Steady State Temperatur $T_{\text{steady state}}$) des Tröpfchens, die sich aufgrund des Gleichgewichts der Energiebilanz Q_d einstellt. Um diese

²nach Anpassung der SI-Einheiten gemäß [D5] und [D13]

Gleichgewichtstemperatur zu berechnen, wird mit Hilfe des Newton-Raphson-Verfahrens die Energiebilanz (Gleichung (C.2-26)) gleich dem Wert Null gesetzt und nach T_d aufgelöst.

Die so berechnete Gleichgewichtstemperatur des Berechnungsschritts i ($T_{\text{steady state}}(i)$), wird nun mit der für die Verdunstung verwendeten Tröpfchentemperatur $T_d(i)$ verglichen. Unterscheiden sich diese Temperaturwerte um mehr als einen definierten Schwellenwert, der im Rahmen dieser Modellierung auf 0.05 K verfeinert wurde, wird die Berechnung des gesamten Berechnungsschritts (also ab Gleichung (C.2-9)) mit der errechneten Gleichgewichtstemperatur als Tröpfchentemperatur erneut durchgeführt. Dieser Prozess wird so lange iterativ wiederholt bis sich eine konsistente Tröpfchentemperatur einstellt.

Aktualisierung der Tröpfcheneigenschaften

Nachdem alle Prozesse im Tröpfchenmodell abgebildet wurden, werden die Masse und die Höhe des Präzipitat-Tröpfchens für den nächsten Berechnungsschritt wie in Gleichung (C.2-34) und (C.2-35) dargestellt aktualisiert.

$$m_{d,i+1} = m_{d,i} - \Delta m_{d,i} \quad (\text{C.2-34})$$

$$z_{d,i+1} = z_{d,i} - \Delta z_{d,i} \quad (\text{C.2-35}).$$

C.3 Aufbau der Hauptkomponente 2: Advektions- und Dispersionsmodell

Um die räumliche Konzentrationsverteilung der abgelassenen Kerosinmenge bestimmen zu können, wird ein Advektions- und Dispersionsmodell verwendet. Das Advektions- und Dispersionsmodell basiert im Wesentlichen auf einer Veröffentlichung von Pfeiffer [D 12]. Es besteht aus einem Advektions-Modellpart und einem Dispersions-Modellpart.

Der Advektions-Modellpart beschreibt die Ablenkung der Flugbahn eines Tröpfchens aufgrund von Windgeschwindigkeit und Windrichtung und hat daher keinen direkten Einfluss auf die Konzentrationsverteilung, sondern nur auf den Ort, an welchem diese vorliegt.

Der Dispersions-Modellpart hingegen beschreibt die Entwicklung der Konzentrationsverteilung, während die Präzipitattröpfchen zu Boden fallen. Der Dispersions-Modellpart beeinflusst somit die Größe der Kontaminationsfläche und die Höhe der berechneten Maximalkonzentration des am Boden ankommenden Präzipitats. Hierfür muss eine initiale Konzentrationsverteilung direkt nach dem Abwurf angenommen werden, welche als Anfangsbedingung für die Modellierung notwendig ist. Des Weiteren müssen geeignete Annahmen über die vorherrschenden Windrichtungen im gesamten Höhenprofil getroffen werden.

C.3.1 Advektionsmodell

Zur Betrachtung der Advektion eines Tröpfchens wird analog zu [D12] zunächst die horizontale Geschwindigkeit V [m/s] eines Tröpfchens bestimmt. Hierzu wird zu Beginn ein Koordinatensystem eingeführt, bei welchem die X-Achse in Flugrichtung und die Y-Achse quer

zur Flugrichtung definiert werden. In Flugrichtung wird das Tröpfchen von der Fluggeschwindigkeit des Flugzeugs bis zur vorherrschenden Windgeschwindigkeit abgebremst. Bei der Betrachtung quer zur Flugrichtung entfällt der Term v_0 in Gleichung (C.3-36).

$$V = U - \frac{U - v_0}{1 + \frac{3}{8} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_d} \cdot \frac{1}{r} \cdot C_{dr} \cdot (U - v_0)^2 \cdot t} \quad (\text{C.3-36})$$

v_0 [m/s] ist hier die Fluggeschwindigkeit des Flugzeugs, r [m] der Radius des Tröpfchens, U [m/s] die mittlere Windgeschwindigkeit in beziehungsweise quer zur Flugrichtung und t [s] die verstrichene Zeit seit dem Treibstoffablass. Der Strömungswiderstandskoeffizient (Drag Coefficient) C_{dr} [-] wird analog zu [D12] in Gleichung (C.3-37) errechnet, welcher sich durch einen empirisch ermittelten Zusammenhang mit der Reynoldszahl [D8] [D11] ergibt:

$$C_{dr} = \frac{24}{Re_{disp}} \cdot (1 + 0,197 \cdot Re_{disp}^{0,63} + 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot Re_{disp}^{1,38}) \quad (\text{C.3-37})$$

Die Reynoldszahl kann hierfür mit Gleichung (C.3-38) berechnet werden.

$$Re_{disp} = \frac{\rho_a \cdot v_{rel} \cdot d_d}{\mu_a} \quad (\text{C.3-38})$$

Hierbei entspricht v_{rel} [m/s] der Relativgeschwindigkeit, welche als die Differenz zwischen der vorherrschenden Windgeschwindigkeit und der Horizontalgeschwindigkeit des Tröpfchens definiert ist. Für jeden Zeitschritt wird so die errechnete Tröpfchengeschwindigkeit V mit dem Zeitinkrement multipliziert und somit die horizontale Verschiebung eines Tröpfchens während seines als 1-D betrachteten Falls durch die Atmosphäre bestimmt. Das Advektionsmodell wird separat durch vektorielle Betrachtungen in und quer zur Flugrichtung berechnet.

C.3.2 Dispersionsmodell

Die Dispersionsvorgänge wurden nach [D12] durch Diffusionsprozesse (Gleichung (C.3-41) und Gleichung (C.3-42)) abgebildet. Für die Anfangsbedingung der Konzentrationsverteilung direkt nach dem Treibstoffablass in der Höhe des Treibstoffablasses wurde eine Normalverteilung $g(y)$ angenommen deren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion in Gleichung (C.3-39) berechnet wird:

$$g(y) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_y} \cdot e^{\left(\frac{-y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right)} \quad (\text{C.3-39})$$

Hierbei entspricht σ_y [m] der Standardabweichung und y [m] dem Betrachtungsraum quer zur Flugrichtung. Die Standardabweichung dieser Gauss'schen Normalverteilung wird gemäß der Literaturangaben [D13] mit Gleichung (C.3-40) berechnet, wobei B [m] der Initialen Nachlaufbreite direkt nach dem Treibstoffablass entspricht.

$$\sigma_y = \frac{B}{3} \quad (\text{C.3-40})$$

Die Änderung der Konzentration c [kg/m] in eine Richtung lassen sich grundsätzlich mit dem Zweiten Fick'schen Gesetz (C.3-41) und (C.3-42) berechnen.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K_x \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial^2 x} \quad (\text{C.3-41})$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K_y \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial^2 y} \quad (\text{C.3-42})$$

Die Wahl der Diffusionskoeffizienten K_x [m²/s] und K_y [m²/s] erweist sich in der Praxis als schwierig, da die errechneten Werte laut [D12] unter Berufung auf [D10] um den Faktor 10-100 von experimentell ermittelten Werten abweichen können. Die Diffusionskoeffizienten können nach [D12] unter Berufung auf [D10] wie in den Gleichungen (C.3-43) beziehungsweise (C.3-44) berechnet werden:

$$K_x = \frac{10^3 \cdot \Delta_\theta^2 \cdot u \cdot |\cos \varphi|}{2} \quad (\text{C.3-43})$$

$$K_y = \frac{10^3 \cdot \Delta_\theta^2 \cdot u \cdot |\sin \varphi|}{2} \quad (\text{C.3-44})$$

Hierbei entspricht u [m/s] der mittleren Windgeschwindigkeit, ϕ [°] dem Winkel zwischen Wind- und Flugrichtung und der Term Δ_θ [rad] der Abweichung der Windrichtung. Der Term Δ_θ setzt sich aus zwei Komponenten zusammen und wird in Gleichung (C.3-45) berechnet:

$$\Delta_\theta = \sigma_\theta + \sigma_\theta' \quad (\text{C.3-45})$$

Darin sind σ_θ [rad] die beobachtete Abweichung der Windrichtung und σ_θ' [rad] die Abweichung zwischen tatsächlicher und beobachteter Windrichtung aufgrund meteorologischer Ungenauigkeiten, welche von [D9] beschrieben und in [D12] wie in Gleichung (C.3-46) dargestellt zitiert wurde:

$$\sigma_\theta' = \pi \cdot e^{-0.367 \cdot u} \quad (\text{C.3-46})$$

Der Term σ_θ' beschreibt eine Abweichung der angenommenen Windrichtung, welche aus der Ungenauigkeit der Aussage über die Windgeschwindigkeit resultiert. Da für die Modellberechnungen keine Daten zur beobachteten Abweichung der Windrichtung (σ_θ) vorliegen, wurde gemäß [D13] ein Mindestwert für σ_θ angenommen. Dies verhindert bei Annahme von Gleichung (C.3-46) eine Verringerung des Diffusionskoeffizienten bei steigender Windgeschwindigkeit.

Die Konzentrationen an einem bestimmten Zeitpunkt können dann mit Hilfe eines Finite Differenzen Ansatzes in X-Richtung (Gleichung (C.3-47)) und in Y-Richtung (Gleichung (C.3-48)) berechnet werden:

$$c_{m+1,n} = c_{m,n} \cdot \frac{K_x \cdot \Delta t_{disp}}{\Delta x^2} \cdot (c_{m,n+1} - 2c_{m,n} + c_{m,n-1}) \quad (C.3-47)$$

$$c_{m+1,o} = c_{m,o} \cdot \frac{K_y \cdot \Delta t_{disp}}{\Delta y^2} \cdot (c_{m,o+1} - 2c_{m,o} + c_{m,o-1}) \quad (C.3-48)$$

Hierbei ist Δt_{disp} [s] das Zeitinkrement des Dispersionsmodells, Δx [m] und Δy [m] entsprechen der räumlichen Diskretisierung, m bezeichnet den zeitlichen Index, n und o entsprechen den räumlichen Indizes.

Bei der Wahl der Parameter Δx , Δy und Δt_{disp} wurde die Einhaltung des Stabilitätskriteriums gemäß Gleichung (C.3-49) und (C.3-50) überprüft, welches einen Zusammenhang zwischen räumlicher und zeitlicher Diskretisierung beschreibt.

$$\Delta t_{disp} \leq \frac{\Delta x^2}{2K_x} \quad (C.3-49)$$

$$\Delta t_{disp} \leq \frac{\Delta y^2}{2K_y} \quad (C.3-50)$$

Am Ende der Berechnung wurde darüber hinaus überprüft, ob sich die Finite Differenzen Lösung über die Berechnungsgrenzen hinweg ausgebreitet hat und gegebenenfalls eine Anpassung dieser Berechnungsgrenzen vorgenommen.

Für den Zeitpunkt, an dem die Tröpfchen den Boden erreichen, werden die aus den Gleichungen (C.3-47) und (C.3-48) errechneten eindimensionalen Konzentrationsverteilungen rechnerisch überlagert. Daraus ergibt sich die flächige Konzentrationsverteilung des Präzipitats am Boden.

C.4 Verwendete Parameterbezeichnungen

Parameter	Einheit	Beschreibung
ΔH_v	J/kg	Latente Verdunstungswärme
Δm_d	kg	Massenverlust des Tröpfchens durch Verdunstung
Δm_k	kg	Massenverlust einer Komponente durch Verdunstung
Δt	s	Zeitinkrement im Tröpfchenmodell
ΔT_d	K	Abkühlung eines Tröpfchens
Δt_{disp}	s	Zeitliche Diskretisierung im Dispersionsmodell
Δx	m	Räumliche Diskretisierung in X-Richtung
Δy	m	Räumliche Diskretisierung in Y-Richtung
Δz	m	Fallstrecke während eines Berechnungsschritts
$\Delta \theta$	rad	Addition der Terme der Abweichung in Flugrichtung
μ_a	Ns/m ²	Dynamische Viskosität der Luft
a	-	Albedo des Tröpfchens
B	m	Initiale Nachlaufbreite
C_{dr}	-	Strömungswiderstandskoeffizient
C_p	J/kg/K	Spezifische Wärmekapazität
C_s	m/s	Lokale Schallgeschwindigkeit
c_x	kg/m	Konzentration in X-Richtung
c_y	kg/m	Konzentration in Y-Richtung
d_d	m	Tröpfchendurchmesser
$d_{d,1}$	m	Initialer Tröpfchendurchmesser
D_k	m ² /s	Diffusivität einer Komponente
e_a	-	Emissionsgrad der Luft
e_d	-	Emissionsgrad des Tröpfchens
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
$g(y)$		Verteilungsfunktion der Initialen Konzentrationsverteilung
h_0	m	Flughöhe aus der das Treibstoffgemisch abgelassen wird
h_k	s/m	Massentransferkoeffizient einer Komponente
k	J/m ² s K	Wärmeübergangskoeffizient
k_h	J/msK	Wärmeleitfähigkeit
K_x	m ² /s	Diffusionskoeffizient in X Richtung
K_y	m ² /s	Diffusionskoeffizient in Y Richtung

Parameter	Einheit	Beschreibung
I	K/m	Standard-Abkühlungsrate der Atmosphäre
L	J/m ² s	Solare Strahlungsrate
M_a	kg/kmol	Molare Masse der Luft
m_d	kg	Masse des Tröpfchens
m_k	kg	Masse einer Komponente
M_k	kg/kmol	Spezifische molare Masse einer Komponente
Nu_k	-	Nusselt-Zahl einer Komponente
P_0	N/m ²	Atmosphärendruck auf NN
P_a	N/m ²	Atmosphärendruck
P_k	N/m ²	Dampfdruck einer Komponente
Pr	-	Prandtl-Zahl
q	-	Geschwindigkeitsbeiwert
Q_d	J	Energiebilanzterm
r	m	Radius des Tröpfchens
R_0	Nm/K kmol	Universelle Gaskonstante
Re	-	Reynoldszahl im Tröpfchenmodell
Re_{disp}	-	Reynoldszahl im Dispersionsmodell
Sc_k	-	Schmidt-Zahl einer Komponente
t	s	Verstrichene Zeit seit Ablassbeginn
T_0	K	Atmosphärentemperatur am Boden
T_a	K	Umgebungstemperatur der Atmosphäre
$T_{b,k}$	K	Spezifischer Siedepunkt einer Komponente
T_d	K	Tröpfchentemperatur
T_f	K	Verdunstungsfilmtemperatur
T_s	K	Stagnationstemperatur
$T_{steady\ state}$	K	Steady State Umgebungstemperatur
u	m/s	Mittlere Windgeschwindigkeit
U	m/s	Mittlere Windgeschwindigkeit in/quer zur Flugrichtung
U_t	m/s	Terminal Velocity, Fallgeschwindigkeit
V	m/s	Horizontale Geschwindigkeit eines Tröpfchens in/quer zur Flugrichtung
v_0	m/s	Fluggeschwindigkeit des Flugzeugs
$V_{b,k}$	-	Spezifisches molare Volumen einer Komponente bei ihrem normalen

Parameter	Einheit	Beschreibung
V_d	m^3	Tröpfchenvolumen
$V_{frac,k}$	-	Volumenanteil einer Komponente
v_{rel}	m/s	Relativgeschwindigkeit
y	m	Betrachtungsraum für die Anfangsbedingung in Y Richtung
z_d	m	Höhe des Tröpfchens
ε_k	-	Stoffmengenanteil einer Komponente
ρ_a	kg/m^3	Dichte der Luft
ρ_d	kg/m^3	Dichte des Tröpfchens
ρ_k	kg/m^3	Dichte einer Komponente
$\rho_{k,20^\circ C}$	kg/m^3	Dichte einer Komponente bei $20^\circ C$
σ	$J/s\ m^2\ K^4$	Stefan-Boltzmann Konstante
σ_y	m	Standardabweichung der Initialen Konzentrationsverteilung
σ_θ	rad	Abweichung der Windrichtung
σ_θ'	rad	Meteorologische Ungenauigkeit, mit welcher Windgeschwindigkeitsbeobachtungen behaftet sind
ϕ	$^\circ$	Winkel zwischen Flugrichtung und Windrichtung

C.5 Verwendete Indexbezeichnung

Modell	Index	Beschreibung
Tröpfchenmodell	i	Laufender Index für Berechnungsschritte
	j	Anzahl der Berechnungsschritte
	d	Tröpfchen
	a	Luft
	k	Laufender Index für Komponenten
	N	Anzahl der Komponenten
	1	im ersten Berechnungsschritt
Dispersionsmodell	x	Räumliche Achse in Flugrichtung
	y	Räumliche Achse quer Flugrichtung
	m	Laufender Index für Zeitliche Betrachtung
	n	Laufender Index für räumliche Betrachtung in Flugrichtung
	o	Laufender Index für räumliche Betrachtung quer zur Flugrichtung
	disp	Dispersionsmodell

C.6 Quellenverzeichnis

- [D1] Lowell, H. H.: Free fall and evaporation of n-octane droplets in the atmosphere as applied to the jettisoning of aviation gasoline at altitude. NACA RM E52L23a, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, 1953
- [D2] Lowell, H. H.: Dispersion of jettisoned JP-4 jet fuel by atmospheric turbulence, evaporation, and varying rates of fall of fuel droplets. NASA-TN-D-84, National Aeronautics and Space Administration, Washington, 1959
- [D3] Lowell, H. H.: Free fall and evaporation of JP-4 jet fuel droplets in a quiet atmosphere. NASA-TN-D-33, National Aeronautics and Space Administration, Washington, 1959
- [D4] Cross, N. L. & Picknett, R. G. Ground Contamination by Fuel Jettison from Aircraft. - AGARD Conference Proceedings No. 125, 1973
- [D5] Clewell III, Harvey J.: Evaporation and Groundfall of JP-4 Jet Fuel Jettisoned by USAF Aircraft, Report ESL-TR-80-56, Air Force Engineering and Services Center, 1980
- [D6] Clewell III, Harvey J.: Fuel Jettisoning by U.S. Air Force Aircraft. Volume I: Summary and analysis. Re-port ESL-TR-80-17, Air Force Engineering and Services Center, 1980
- [D7] Clewell III, Harvey J.: Ground Contamination by Fuel Jettisoned from Aircraft in Flight. Journal of Aircraft (Volume 20, Issue 4), S. 382-384, 1983
- [D8] Bilanin, Alan J., et al. "AGDISP: The Aircraft Spray Dispersion Model, Code Development and Experimental Validation," Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 32(1):327-334 (January-February 1989)
- [D9] Lewellen, W.S. and R.I. Sykes. "Meteorological data needs for modeling air quality uncertainties," Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 6:759-768 (October 1989)
- [D10] Zannetti, P.: Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods, and Available Software. New York, Van Nostrand Reinhold, 1990
- [D11] Teske, Milton E., et al. "FSCBG: An aerial spray dispersion model for predicting the fate of released material behind aircraft," Environmental Toxicology and Chemistry, 12:453-464 (1993).
- [D12] Pfeiffer, K. D.: A Numerical Model to Predict the Fate of Jettisoned Aviation Fuel. Thesis. The Faculty of the School of Engineering of the Air Force Institute of Technology, 1994
- [D13] Todd, J. M.: An assessment of the impact of fuel jettisoning events using simulation and impact models. Air Force Institute of Technology, 1995
- [D14] Perry, R. H.: Perry's Chemical Engineer's Handbook, Seventh Edition, 1997

D Stoffdatenblätter der Hauptinhaltsstoffe von Kerosin

D.1 Aliphatische Kohlenwasserstoffe (C5 - C16)

Abbildung 36: Sicherheitsdatenblatt Pentan

Pentan

 **IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Pentan



IDENTIFIKATION

Pentan
n-Pentan

ZVG Nr: 10040
CAS Nr: 109-66-0
EG Nr: 203-692-4
INDEX Nr: 601-006-00-1

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
fast geruchlos

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Leicht entzündbare Flüssigkeit.
Dämpfe bilden mit Luft explosive Gemische.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Leichter als Wasser.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/23 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 37: Sicherheitsdatenblatt Hexan

Hexan

 **IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Hexan

IDENTIFIKATION

Hexan
n-Hexan

ZVG Nr: 510789
CAS Nr: 110-54-3
EG Nr: 203-777-6
INDEX Nr: 601-037-00-0

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
schwach benzinartiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Leicht entzündbare Flüssigkeit.
Dämpfe bilden mit Luft explosive Gemische.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Leichter als Wasser.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/26 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 38: Sicherheitsdatenblatt Heptan

Heptan

 **IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Heptan

IDENTIFIKATION

Heptan
n-Heptan

ZVG Nr: 13820
CAS Nr: 142-82-5
EG Nr: 205-563-8
INDEX Nr: 601-008-00-2

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
schwach benzinartiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Leicht entzündbare Flüssigkeit.
Dämpfe bilden mit Luft explosive Gemische.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Leichter als Wasser.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/24 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 39: Sicherheitsdatenblatt Octan

Octan

**IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Octan



IDENTIFIKATION

Octan
n-Octan

ZVG Nr: 13810
CAS Nr: 111-65-9
EG Nr: 203-892-1
INDEX Nr: 601-009-00-8

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
benzinartiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Leicht entzündbare Flüssigkeit.
Dämpfe bilden mit Luft explosive Gemische.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Leichter als Wasser.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank1/214.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 40: Sicherheitsdatenblatt Nonan

Nonan

 **IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Nonan

IDENTIFIKATION

Nonan
n-Nonan

ZVG Nr: 29230
CAS Nr: 111-84-2
EG Nr: 203-913-4

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
charakteristischer Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Entzündbare Flüssigkeit.
Dämpfe können mit Luft beim Erhitzen des Stoffes über seinen Flammpunkt explosive Gemische bilden.
Dies ist bereits bei erhöhter Umgebungstemperatur möglich.
Praktisch unlöslich in Wasser.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/21 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 41: Sicherheitsdatenblatt Decan

Decan

**IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Decan



IDENTIFIKATION

Decan
n-Decan

ZVG Nr: 37720
CAS Nr: 124-18-5
EG Nr: 204-686-4

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
charakteristischer Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Entzündbare Flüssigkeit.
Dämpfe können mit Luft beim Erhitzen des Stoffes über seinen Flammpunkt explosive Gemische bilden.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Leichter als Wasser.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank1/214.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 42: Sicherheitsdatenblatt Undecan

Undecan

**IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Undecan



IDENTIFIKATION

Undecan
n-Undecan

ZVG Nr: 510707
CAS Nr: 1120-21-4
EG Nr: 214-300-6

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
charakteristischer Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar (Flammpunkt > 60 bis 93 °C).
Dämpfe können mit Luft beim Erhitzen des Stoffes über seinen Flammpunkt explosive Gemische bilden.
Bei starker Erwärmung ist der Stoff auch ohne Einwirkung einer Zündquelle sehr zündwillig (Zündtemperatur unter 250 °C).

IFA GESTIS-Stoffdatenbank1/184.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 43: Sicherheitsdatenblatt Dodecan

Dodecan



Dodecan



IDENTIFIKATION

Dodecan
n-Dodecan

ZVG Nr: 13560
CAS Nr: 112-40-3
EG Nr: 203-967-9

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
benzinartiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar (Flammpunkt > 60 bis 93 °C).
Bei starker Erwärmung ist der Stoff auch ohne Einwirkung einer Zündquelle sehr zündwillig (Zündtemperatur unter 250 °C).
Dämpfe können mit Luft beim Erhitzen des Stoffes über seinen Flammpunkt explosive Gemische bilden.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/17 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 44: Sicherheitsdatenblatt Tridecan

Tridecan		
 IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung	GESTIS-Stoffdatenbank	
Tridecan		
		
IDENTIFIKATION		
Tridecan n-Tridecan		
ZVG Nr:	106376	
CAS Nr:	629-50-5	
EG Nr:	211-093-4	
CHARAKTERISIERUNG		
STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL		
140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt		
AGGREGATZUSTAND		
Der Stoff ist flüssig.		
EIGENSCHAFTEN		
farblos benzinartiger Geruch		
CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG		
Brennbarer Stoff, schwer entzündbar (Flammpunkt > 60 bis 93 °C). Bei starker Erwärmung ist der Stoff auch ohne Einwirkung einer Zündquelle sehr zündwillig (Zündtemperatur unter 250 °C). Dämpfe können mit Luft beim Erhitzen des Stoffes über seinen Flammpunkt explosive Gemische bilden.		
IFA GESTIS-Stoffdatenbank	1/11	4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 45: Sicherheitsdatenblatt Tetradecan

Tetradecan	
 IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung	GESTIS-Stoffdatenbank
Tetradecan	
	
IDENTIFIKATION	
Tetradecan n-Tetradecan	
ZVG Nr:	106378
CAS Nr:	629-59-4
EG Nr:	211-096-0
CHARAKTERISIERUNG	
STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL	
140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt	
AGGREGATZUSTAND	
Der Stoff ist flüssig.	
EIGENSCHAFTEN	
farblos benzinartiger Geruch	
CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG	
Brennbarer Stoff, schwer entzündbar. Bei starker Erwärmung ist der Stoff auch ohne Einwirkung einer Zündquelle sehr zündwillig (Zündtemperatur unter 250 °C). Praktisch unlöslich in Wasser. Leichter als Wasser.	
IFA GESTIS-Stoffdatenbank	1/15
4.07.2018	

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 46: Sicherheitsdatenblatt Pentadecan

Pentadecan



Pentadecan



IDENTIFIKATION

Pentadecan
n-Pentadecan

ZVG Nr: 21490
CAS Nr: 629-62-9
EG Nr: 211-098-1

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
benzinartiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Bei starker Erwärmung ist der Stoff auch ohne Einwirkung einer Zündquelle sehr zündwillig (Zündtemperatur unter 250 °C).
Praktisch unlöslich in Wasser.
Leichter als Wasser.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/11 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 47: Sicherheitsdatenblatt Hexadecan

Hexadecan

**IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Hexadecan



IDENTIFIKATION

Hexadecan
Cetan
n-Hexadecan

ZVG Nr: 13200
CAS Nr: 544-76-3
EG Nr: 208-878-9

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140110 Kohlenwasserstoffe, aliphatisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
benzinartiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Bei starker Erwärmung ist der Stoff auch ohne Einwirkung einer Zündquelle sehr
zündwillig (Zündtemperatur unter 250 °C).
Praktisch unlöslich in Wasser.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank1/164.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

D.2 Cyclische Kohlenwasserstoffe

Abbildung 48: Sicherheitsdatenblatt Cyclohexan

Cyclohexan



IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Cyclohexan



IDENTIFIKATION

Cyclohexan
Naphthen
Hexahydrobenzol
Hexamethylen
Hexanaphthen

ZVG Nr: 13790
CAS Nr: 110-82-7
EG Nr: 203-806-2
INDEX Nr: 601-017-00-1

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140210 Kohlenwasserstoffe, cyclisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
charakteristischer Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

IFA GESTIS-Stoffdatenbank

1/25

4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 49: Sicherheitsdatenblatt Cycloheptan

Cycloheptan



Cycloheptan



IDENTIFIKATION

Cycloheptan

ZVG Nr: 37750
CAS Nr: 291-64-5
EG Nr: 206-030-2

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140210 Kohlenwasserstoffe, cyclisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Leicht entzündbare Flüssigkeit.
Dämpfe bilden mit Luft explosive Gemische.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Leichter als Wasser.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.
Der Stoff ist gewässergefährdend.
(s. Kapitel VORSCHRIFTEN).

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/19 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 50: Sicherheitsdatenblatt Cyclooctan

Cyclooctan



IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Cyclooctan



IDENTIFIKATION

Cyclooctan

ZVG Nr: 492985
CAS Nr: 292-64-8
EG Nr: 206-031-8

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140210 Kohlenwasserstoffe, cyclisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
muffiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Entzündbare Flüssigkeit.
Dämpfe können mit Luft beim Erhitzen des Stoffes über seinen Flammpunkt explosive Gemische bilden.
Dies ist bereits bei erhöhter Umgebungstemperatur möglich.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Leichter als Wasser.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank

1/13

4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 51: Sicherheitsdatenblatt Cyclododecan

Cyclododecan

**IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Cyclododecan

IDENTIFIKATION

Cyclododecan

ZVG Nr: 40780
CAS Nr: 294-62-2
EG Nr: 206-033-9

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140210 Kohlenwasserstoffe, cyclisch, gesättigt

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

farblos
muffiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Praktisch unlöslich in Wasser.

[Stoffinformationen in Wikipedia](#)

FORMEL

C₁₂H₂₄

IFA GESTIS-Stoffdatenbank1/124.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

D.3 Additive

Abbildung 52: Sicherheitsdatenblatt 2,2'-Methylenbis (4-methyl-6-tert-buthylphenol) Cycloheptan

2,2'-Methylenbis(4-methyl-6-tert-butylphenol)



IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

2,2'-Methylenbis(4-methyl-6-tert-butylphenol)



IDENTIFIKATION

2,2'-Methylenbis(4-methyl-6-tert-butylphenol)
2,2'-Dihydroxy-3,3'-di-tert-butyl-5,5'-dimethyldiphenylmethan

ZVG Nr: 16190
CAS Nr: 119-47-1
EG Nr: 204-327-1

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

142100 Phenole, Kresole, Xylenole, Dihydroxybenzole usw.

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

kristallines Pulver
hellgelb
geruchlos

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.
(s. Kapitel VORSCHRIFTEN).

IFA GESTIS-Stoffdatenbank

1/10

4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 53: Sicherheitsdatenblatt 2,3,6-Trimethylphenol

2,3,6-Trimethylphenol

 **IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

2,3,6-Trimethylphenol



IDENTIFIKATION

2,3,6-Trimethylphenol

ZVG Nr: 492115
CAS Nr: 2416-94-6
EG Nr: 219-330-3

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

142100 Phenole, Kresole, Xylenole, Dihydroxybenzole usw.

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

kristallines Pulver
weiß bis gelblich
Geruch nach Phenol

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Schwer löslich in Wasser.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.
(s. Kapitel VORSCHRIFTEN).

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/18 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 54: Sicherheitsdatenblatt 2,3,6-Trimethylphenol

SIGMA-ALDRICH		sigma-aldrich.com
		SICHERHEITSDATENBLATT
		gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 Version 5.2 Überarbeitet am 21.01.2016 Druckdatum 04.07.2018
ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs bzw. des Gemischs und des Unternehmens		
1.1 Produktidentifikatoren		
Produktname	:	2,4,6-Trimethylphenol
Produktnummer	:	442306
Marke	:	Supelco
REACH Nr.	:	Eine Registriernummer für diesen Stoff ist nicht vorhanden, da der Stoff oder seine Verwendung von der Registrierung ausgenommen sind, die jährliche Tonnage keine Registrierung erfordert oder die Registrierung für einen späteren Zeitpunkt vorgesehen ist.
CAS-Nr.	:	527-60-6
1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird		
Identifizierte Verwendungen	:	Laborchemikalien, Herstellung von Stoffen
1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt		
Firma	:	Sigma-Aldrich Chemie GmbH Riedstrasse 2 D-89555 STEINHEIM
Telefon	:	+49 89-6513-1444
Fax	:	+49 7329-97-2319
Email-Adresse	:	eurtechserv@sial.com
1.4 Notrufnummer		
Notfall Tel.-Nr.	:	0800 181 7059 (CHEMTREC Deutschland) +49 (0)696 43508409 (CHEMTREC weltweit)
ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren		
2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs		
Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
Ätzwirkung auf die Haut (Kategorie 1B), H314		
Chronische aquatische Toxizität (Kategorie 2), H411		
Den Volltext der in diesem Abschnitt aufgeführten Gefahrenhinweise finden Sie unter Abschnitt 16.		
2.2 Kennzeichnungselemente		
Kennzeichnung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
Piktogramm		
Signalwort	Gefahr	
Gefahrenbezeichnung(en)	Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.	
H314	Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung.	
H411		
Supelco - 442306	Seite 1 von 8	

(Quelle: SIGMA-ALDRICH)

Abbildung 55: Sicherheitsdatenblatt 2,3,6-Tri-tert-butylphenol

SIGMA-ALDRICH		sigma-aldrich.com
		SICHERHEITSDATENBLATT
		gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 Version 5.1 Überarbeitet am 10.02.2015 Druckdatum 04.07.2018
ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs bzw. des Gemischs und des Unternehmens		
1.1 Produktidentifikatoren		
Produktname	:	2,4,6-Tri-tert-butylphenol
Produktnummer	:	T49409
Marke	:	Aldrich
REACH Nr.	:	Eine Registriernummer für diesen Stoff ist nicht vorhanden, da der Stoff oder seine Verwendung von der Registrierung ausgenommen sind, die jährliche Tonnage keine Registrierung erfordert oder die Registrierung für einen späteren Zeitpunkt vorgesehen ist.
CAS-Nr.	:	732-26-3
1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird		
Identifizierte Verwendungen	:	Laborchemikalien, Herstellung von Stoffen
1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt		
Firma	:	Sigma-Aldrich Chemie GmbH Riedstrasse 2 D-89555 STEINHEIM
Telefon	:	+49 89-6513-1444
Fax	:	+49 7329-97-2319
Email-Adresse	:	eurtechserv@sial.com
1.4 Notrufnummer		
Notfall Tel.-Nr.	:	0800 181 7059 (CHEMTREC Deutschland) +49 (0)696 43508409 (CHEMTREC weltweit)
ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren		
2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs		
Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
Akute Toxizität, Oral (Kategorie 4), H302		
Akute aquatische Toxizität (Kategorie 1), H400		
Den Volltext der in diesem Abschnitt aufgeführten Gefahrenhinweise finden Sie unter Abschnitt 16.		
Einstufung gemäss EU-Richtlinien 67/548/EWG oder 1999/45/EG		
Xn, N Gesundheitsschädlich, R22, R51/53		
Umweltgefährlich		
Den vollen Wortlaut der hier genannten R-Sätze finden Sie in Abschnitt 16.		
2.2 Kennzeichnungselemente		
Kennzeichnung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
Piktogramm	:	
Signalwort	:	Achtung

Aldrich - T49409

Seite 1 von 7

(Quelle: SIGMA-ALDRICH)

Abbildung 56: Sicherheitsdatenblatt 2,4-Di-tert-butylphenol

2,4-Di-tert-butylphenol

 IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

2,4-Di-tert-butylphenol

IDENTIFIKATION

2,4-Di-tert-butylphenol
2,4-Bis(1,1-dimethylethyl)phenol

ZVG Nr: 492569
CAS Nr: 96-76-4
EG Nr: 202-532-0

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

142100 Phenole, Kresole, Xylenole, Dihydroxybenzole usw.

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

kristallin
weiß bis gelblich
phenolartiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.
Der Stoff ist gewässergefährdend.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/7 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 57: Sicherheitsdatenblatt 2,6-Diisopropylphenol

SIGMA-ALDRICH		sigma-aldrich.com
		SICHERHEITSDATENBLATT
		gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 Version 5.4 Überarbeitet am 15.10.2016 Druckdatum 01.07.2018
ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs beziehungsweise des Gemischs und des Unternehmens		
1.1 Produktidentifikatoren		
Produktname	:	2,6-Diisopropylphenol
Produktnummer	:	W505102
Marke	:	Aldrich
REACH Nr.	:	Eine Registriernummer für diesen Stoff ist nicht vorhanden, da der Stoff oder seine Verwendung von der Registrierung ausgenommen sind, die jährliche Tonnage keine Registrierung erfordert oder die Registrierung für einen späteren Zeitpunkt vorgesehen ist.
CAS-Nr.	:	2078-54-8
1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird		
Identifizierte Verwendungen	:	Laborchemikalien, Herstellung von Stoffen
1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt		
Firma	:	Sigma-Aldrich Chemie GmbH Riedstrasse 2 D-89555 STEINHEIM
Telefon	:	+49 89-6513-1444
Fax	:	+49 7329-97-2319
Email-Adresse	:	eurtechserv@sial.com
1.4 Notrufnummer		
Notfall Tel.-Nr.	:	0800 181 7059 (CHEMTREC Deutschland) +49 (0)696 43508409 (CHEMTREC weltweit)
ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren		
2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs		
Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
Akute Toxizität, Oral (Kategorie 4), H302		
Reizwirkung auf die Haut (Kategorie 2), H315		
Augenreizung (Kategorie 2), H319		
Spezifische Zielorgan-Toxizität - einmalige Exposition (Kategorie 3), H335		
Den Volltext der in diesem Abschnitt aufgeführten Gefahrenhinweise finden Sie unter Abschnitt 16.		
2.2 Kennzeichnungselemente		
Kennzeichnung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
Piktogramm	:	
Signalwort	:	Achtung

(Quelle: SIGMA-ALDRICH)

Abbildung 58: Sicherheitsdatenblatt 2,6-Di-tert-butylphenol

2,6-Di-tert-butylphenol

 IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

2,6-Di-tert-butylphenol

IDENTIFIKATION

2,6-Di-tert-butylphenol
2,6-Bis(1,1-dimethylethyl)phenol

ZVG Nr: 16570
CAS Nr: 128-39-2
EG Nr: 204-884-0

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

142100 Phenole, Kresole, Xylenole, Dihydroxybenzole usw.

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

gelblich
phenolartiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.
Der Stoff ist gewässergefährdend.
(s. Kapitel VORSCHRIFTEN).

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/17 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 59: Sicherheitsdatenblatt 2,6-Di-tert-butyl-p-kresol

2,6-Di-tert-butyl-p-kresol



2,6-Di-tert-butyl-p-kresol



IDENTIFIKATION

2,6-Di-tert-butyl-p-kresol
2,6-Di-tert-butyl-4-methylphenol
3,5-Di-tert-butyl-4-hydroxytoluol
Butylhydroxytoluol
BHT
E 321

ZVG Nr: 14260
CAS Nr: 128-37-0
EG Nr: 204-881-4

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

142100 Phenole, Kresole, Xylenole, Dihydroxybenzole usw.

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

kristallines Pulver
weiß
geruchlos

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/18 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 60: Sicherheitsdatenblatt 2-Isopropyl-phenol

SIGMA-ALDRICH		sigma-aldrich.com	
		SICHERHEITSDATENBLATT	
		gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 Version 5.3 Überarbeitet am 02.10.2017 Druckdatum 04.07.2018	
ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs beziehungsweise des Gemischs und des Unternehmens			
1.1	Produktidentifikatoren		
	Produktname	:	2-Isopropyl-phenol
	Produktnummer	:	129526
	Marke	:	Aldrich
	REACH Nr.	:	Eine Registriernummer für diesen Stoff ist nicht vorhanden, da der Stoff oder seine Verwendung von der Registrierung ausgenommen sind, die jährliche Tonnage keine Registrierung erfordert oder die Registrierung für einen späteren Zeitpunkt vorgesehen ist.
	CAS-Nr.	:	88-69-7
1.2	Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird		
	Identifizierte Verwendungen	:	Laborchemikalien, Herstellung von Stoffen
1.3	Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt		
	Firma	:	Sigma-Aldrich Chemie GmbH Riedstrasse 2 D-89555 STEINHEIM
	Telefon	:	+49 89-6513-1444
	Fax	:	+49 7329-97-2319
	Email-Adresse	:	eurtechserv@sial.com
1.4	Notrufnummer		
	Notfall Tel.-Nr.	:	0800 181 7059 (CHEMTREC Deutschland) +49 (0)696 43508409 (CHEMTREC weltweit)
ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren			
2.1	Einstufung des Stoffs oder Gemischs		
	Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
	Akute Toxizität, Oral (Kategorie 4), H302		
	Ätzwirkung auf die Haut (Kategorie 1B), H314		
	Den Volltext der in diesem Abschnitt aufgeführten Gefahrenhinweise finden Sie unter Abschnitt 16.		
2.2	Kennzeichnungselemente		
	Kennzeichnung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
	Piktogramm	:	
	Signalwort	:	Gefahr
	Gefahrenbezeichnung(en)	:	
	H302	:	Gesundheitsschädlich bei Verschlucken.
	H314	:	Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.
	Aldrich - 129526	:	Seite 1 von 7

(Quelle: SIGMA-ALDRICH)

Abbildung 61: Sicherheitsdatenblatt 2-Propanol

2-Propanol

**IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

2-Propanol



IDENTIFIKATION

2-Propanol
Isopropylalkohol
Isopropanol
Dimethylcarbinol

ZVG Nr: 11190
CAS Nr: 67-63-0
EG Nr: 200-661-7
INDEX Nr: 603-117-00-0

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

142200 Alkohole

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
alkoholartiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Leicht entzündbare Flüssigkeit.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank1/254.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 62: Sicherheitsdatenblatt 3-Isopropylphenol

SIGMA-ALDRICH		sigma-aldrich.com
		SICHERHEITSDATENBLATT
		gemäß Verordnung (EG) Nr. 453/2010 Version 5.1 Überarbeitet am 11.09.2015 Druckdatum 04.07.2018
ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs bzw. des Gemischs und des Unternehmens		
1.1 Produktidentifikatoren		
Produktname	:	3-Isopropylphenol
Produktnummer	:	479667
Marke	:	Aldrich
REACH Nr.	:	Eine Registriernummer für diesen Stoff ist nicht vorhanden, da der Stoff oder seine Verwendung von der Registrierung ausgenommen sind, die jährliche Tonnage keine Registrierung erfordert oder die Registrierung für einen späteren Zeitpunkt vorgesehen ist.
CAS-Nr.	:	618-45-1
1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird		
Identifizierte Verwendungen	:	Laborchemikalien, Herstellung von Stoffen
1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt		
Firma	:	Sigma-Aldrich Chemie GmbH Riedstrasse 2 D-89555 STEINHEIM
Telefon	:	+49 89-6513-1444
Fax	:	+49 7329-97-2319
Email-Adresse	:	eurtechserv@sial.com
1.4 Notrufnummer		
Notfall Tel.-Nr.	:	0800 181 7059 (CHEMTREC Deutschland) +49 (0)696 43508409 (CHEMTREC weltweit)
ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren		
2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs		
Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
Akute Toxizität, Oral (Kategorie 4), H302		
Ätzwirkung auf die Haut (Kategorie 1B), H314		
Den Volltext der in diesem Abschnitt aufgeführten Gefahrenhinweise finden Sie unter Abschnitt 16.		
2.2 Kennzeichnungselemente		
Kennzeichnung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
Piktogramm		
Signalwort	Gefahr	
Gefahrenbezeichnung(en)		
H302	Gesundheitsschädlich bei Verschlucken.	
H314	Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.	
Aldrich - 479667	Seite 1 von 7	

(Quelle: SIGMA-ALDRICH)

Abbildung 63: Sicherheitsdatenblatt 4-Isopropyl-phenol

SIGMA-ALDRICH		sialma-aldrich.com	
		SICHERHEITSDATENBLATT	
		gemäß Verordnung (EG) Nr. 453/2010	
		Version 5.2 Überarbeitet am 11.09.2015	
		Druckdatum 04.07.2018	
ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs bzw. des Gemischs und des Unternehmens			
1.1	Produktidentifikatoren		
	Produktname	:	4-Isopropyl-phenol
	Produktnummer	:	175404
	Marke	:	Aldrich
	REACH Nr.	:	Eine Registriernummer für diesen Stoff ist nicht vorhanden, da der Stoff oder seine Verwendung von der Registrierung ausgenommen sind, die jährliche Tonnage keine Registrierung erfordert oder die Registrierung für einen späteren Zeitpunkt vorgesehen ist.
	CAS-Nr.	:	99-89-8
1.2	Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird		
	Identifizierte Verwendungen	:	Laborchemikalien, Herstellung von Stoffen
1.3	Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt		
	Firma	:	Sigma-Aldrich Chemie GmbH Riedstrasse 2 D-89555 STEINHEIM
	Telefon	:	+49 89-6513-1444
	Fax	:	+49 7329-97-2319
	Email-Adresse	:	eurtechserv@sial.com
1.4	Notrufnummer		
	Notfall Tel.-Nr.	:	0800 181 7059 (CHEMTREC Deutschland) +49 (0)696 43508409 (CHEMTREC weltweit)
ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren			
2.1	Einstufung des Stoffs oder Gemischs		
	Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
	Akute Toxizität, Oral (Kategorie 4), H302		
	Ätzwirkung auf die Haut (Kategorie 1B), H314		
	Sensibilisierung durch Einatmen (Kategorie 1), H334		
	Den Volltext der in diesem Abschnitt aufgeführten Gefahrenhinweise finden Sie unter Abschnitt 16.		
2.2	Kennzeichnungselemente		
	Kennzeichnung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
	Piktogramm		
	Signalwort	:	Gefahr
	Gefahrenbezeichnung(en)	:	Gesundheitsschädlich bei Verschlucken.
	H302	:	
	Aldrich - 175404	:	
		:	Seite 1 von 7

(Quelle: SIGMA-ALDRICH)

Abbildung 64: Sicherheitsdatenblatt 6-tert-Buthyl-2,4-xylenol

6-tert-Butyl-2,4-xylenol

 **IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

6-tert-Butyl-2,4-xylenol



IDENTIFIKATION

6-tert-Butyl-2,4-xylenol
Topanol A
2-(tert-Butyl)-4,6-dimethylphenol

ZVG Nr: 494105
CAS Nr: 1879-09-0
EG Nr: 217-533-1

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

142100 Phenole, Kresole, Xylenole, Dihydroxybenzole usw.

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos bis gelblich
phenolartiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Sehr schwer löslich in Wasser.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.
Der Stoff ist gewässergefährdend.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/7 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 65: Sicherheitsdatenblatt Diethylenglykolmonomethylether

Diethylenglykolmonomethylether	
 IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung	GESTIS-Stoffdatenbank
Diethylenglykolmonomethylether	
	
IDENTIFIKATION	
Diethylenglykolmonomethylether 2-(2-Methoxyethoxy)ethanol Methyldiglykol DEGME	
ZVG Nr:	20530
CAS Nr:	111-77-3
EG Nr:	203-906-6
INDEX Nr:	603-107-00-6
CHARAKTERISIERUNG	
STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL	
142311 Glykolether, Polyether	
AGGREGATZUSTAND	
Der Stoff ist flüssig.	
EIGENSCHAFTEN	
farblos schwacher Geruch	
CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG	
Brennbarer Stoff, schwer entzündbar (Flammpunkt > 60 bis 93 °C).	
IFA GESTIS-Stoffdatenbank	1/20
4.07.2018	

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 66: Sicherheitsdatenblatt Dodecylbenzolsulfonsäure

Dodecylbenzolsulfonsäure, Isomere

 IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Dodecylbenzolsulfonsäure, Isomere

IDENTIFIKATION

Dodecylbenzolsulfonsäure, Isomere
n-Dodecylbenzolsulfonsäure, Isomere
Laurylbenzolsulfonsäure, Isomere

ZVG Nr: 20420
CAS Nr: 27176-87-0
EG Nr: 248-289-4

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

147500 Sulfonsäuren

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

hellgelb bis braun
charakteristischer Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Leicht löslich in Wasser.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.
Der Stoff ist gewässergefährdend.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/15 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 67: Sicherheitsdatenblatt Fettsäuren

Fettsäuren		
 IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung		
GESTIS-Stoffdatenbank		
Fettsäuren		
IDENTIFIKATION		
Fettsäuren		
ZVG Nr:	91170	
Verwandte		
CAS Nr:	67701-01-3	C12-18
	67701-02-4	C14-18
	67701-03-5	C16-18
	67701-05-7	C8-18 u. C18 ungesätt.
	67701-06-8	C14-18 u. C16-18 ungesätt.
	67701-07-9	C16 u. C18 ungesätt.
	67701-08-0	C16-18 u. C18 ungesätt.
EG Nr:	266-925-9	C12-18
	266-926-4	C14-18
	266-928-5	C16-18
	266-929-0	C8-18 u. C18 ungesätt.
	266-930-6	C14-18 u. C16-18 ungesätt.
	266-931-1	C16 u. C18 ungesätt.
	266-932-7	C16-18 u. C18 ungesätt.
CHARAKTERISIERUNG		
STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL		
143013 Fettsäuren		
AGGREGATZUSTAND		
Zu dieser Stoffgruppe können flüssige oder feste Stoffe gehören.		
PHYSIKALISCH CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN		

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 68: Sicherheitsdatenblatt alpha,alpha'-Propyldinitrilodi-o-kresol

alpha,alpha'-Propyldinitrilodi-o-kresol

 IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

alpha,alpha'-Propyldinitrilodi-o-kresol

IDENTIFIKATION

alpha,alpha'-Propyldinitrilodi-o-kresol
2,2'-[Propan-1,2-diylbis(nitrilomethylyliden)]diphenol
N,N'-Disalicyliden-1,2-diaminopropan

ZVG Nr: 101232
CAS Nr: 94-91-7
EG Nr: 202-374-2

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

144100 Imine
142101 Phenole, substituiert

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

Feste, viskos geschmolzene Masse mit hellen kristallinen Fraktionen
gelb

[Stoffinformationen in Wikipedia](#)

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/6 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 69: Sicherheitsdatenblatt Naphtha (Petroleum)

Naphtha (Petroleum), gesamtes Alkylatbenzin

 **IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Naphtha (Petroleum), gesamtes Alkylatbenzin



IDENTIFIKATION

Naphtha (Petroleum), gesamtes Alkylatbenzin
Gerätebenzin
Grünes Benzin
Spezialbenzin
Sonderkraftstoff

ZVG Nr:	150866	
CAS Nr:	64741-64-6	Naphtha, gesamtes Alkylatbenzin, C7-C12 Isoparaffine
EG Nr:	265-066-7	
INDEX Nr:	649-274-00-9	
Verwandte		
CAS Nr:	68527-27-5 64741-65-7 64741-66-8	Gesamtes Alkylatbenzin, butanhaltig Schweres Alkylatbenzin, C9-C12 Isoparaffine Leichtes Alkylatbenzin, C7-C10 Isoparaffine
EG Nr:	271-267-0 265-067-2 265-068-8	Gesamtes Alkylatbenzin butanhaltig Schweres Alkylatbenzin, C9-C12 Isoparaffine Leichtes Alkylatbenzin, C7-C10 Isoparaffine

CHARAKTERISIERUNG

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank

1/13

4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

D.4 Weitere Stoffdaten

Abbildung 70: Sicherheitsdatenblatt Kohlenwasserstoffgemische

Kohlenwasserstoffgemische		
 IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung	GESTIS-Stoffdatenbank	
Kohlenwasserstoffgemische		
IDENTIFIKATION		
Kohlenwasserstoffgemische Kohlenwasserstoff-Lösemittel		
ZVG Nr:	531461	
Die in der Literatur verfügbaren Informationen reichen für die Erstellung eines kompletten Stoffdatenblattes nicht aus.		
CHARAKTERISIERUNG		
STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL		
140000 Kohlenwasserstoffe		
AGGREGATZUSTAND		
Der Stoff ist flüssig.		
PHYSIKALISCH CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN		
WASSERLÖSLICHKEIT		
Löslichkeit:	1 ... 50 mg/l	
Temperatur:	20 °C	
	07570	
Quelle:		
VORSCHRIFTEN		
EU-GHS-EINSTUFUNG UND KENNZEICHNUNG		
Über die Gefahreneinstufung liegen uns zur Zeit keine Informationen vor.		
IFA GESTIS-Stoffdatenbank	1/3	4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 71: Sicherheitsdatenblatt Naphthalin

Naphthalin

**IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Naphthalin



IDENTIFIKATION

Naphthalin
Steinkohlenkampfer
Steinkohlenteerkampfer
Antimite
Naphthylwasserstoff

ZVG Nr: 15510
CAS Nr: 91-20-3
EG Nr: 202-049-5
INDEX Nr: 601-052-00-2

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140320 Kohlenwasserstoffe, aromatisch, polycyclisch

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

Flocken, Pulver, Tabletten oder Kugeln
weiß
Geruch nach Mottenpulver/Teer

IFA GESTIS-Stoffdatenbank1/244.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 72: Sicherheitsdatenblatt Paraffine (Erdöl), normale C5-20

Paraffine (Erdöl), normale C5-20-



Paraffine (Erdöl), normale C5-20-



IDENTIFIKATION

Paraffine (Erdöl), normale C5-20-

ZVG Nr: 151012
CAS Nr: 64771-72-8
EG Nr: 265-233-4

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140000 Kohlenwasserstoffe

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
paraffinartiger Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Komplexe Kombination normaler Paraffine, erhalten durch ein selektives Adsorptionsverfahren mit einem festen Adsorbens. Besteht aus gesättigten Kohlenwasserstoffen mit gerader Kette und mit Kohlenstoffzahlen vorherrschend im Bereich C5 bis C20 und siedet im Bereich von 35 °C bis 345 °C.

Die folgenden Angaben beziehen sich auf handelsübliche Produkte mit einem

IFA GESTIS-Stoffdatenbank1/94.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 73: Sicherheitsdatenblatt Toluol

Toluol

**IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Toluol



IDENTIFIKATION

Toluol
Methylbenzol
Toluen
Phenylmethan

ZVG Nr: 10070
CAS Nr: 108-88-3
EG Nr: 203-625-9
INDEX Nr: 601-021-00-3

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140300 Kohlenwasserstoffe, aromatisch

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
charakteristischer Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Leicht entzündbare Flüssigkeit.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank1/294.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 74: Sicherheitsdatenblatt Benzol

Benzol

 **IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Benzol

IDENTIFIKATION

Benzol
Benzen

ZVG Nr: 10060
CAS Nr: 71-43-2
EG Nr: 200-753-7
INDEX Nr: 601-020-00-8

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140300 Kohlenwasserstoffe, aromatisch

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
charakteristischer Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Leicht entzündbare Flüssigkeit.
Dämpfe bilden mit Luft explosive Gemische.
Schwer löslich in Wasser.
Leichter als Wasser.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/31 4.07.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 75: Sicherheitsdatenblatt Anthracen

Anthracen

 **IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Anthracen

IDENTIFIKATION

Anthracen
Anthracen

ZVG Nr: 22880
CAS Nr: 120-12-7
EG Nr: 204-371-1

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140320 Kohlenwasserstoffe, aromatisch, polycyclisch

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

kristallin
weiß bis gelblich
schwach aromatischer Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Lichtempfindlich.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/19 20.09.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 76: Sicherheitsdatenblatt Fluoranthren

Fluoranthren

 IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Fluoranthren

IDENTIFIKATION

Fluoranthren
1,8-(o-Phenylen)naphthalin
Benzo(jk)fluoren

ZVG Nr: 30010
CAS Nr: 206-44-0
EG Nr: 205-912-4

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140320 Kohlenwasserstoffe, aromatisch, polycyclisch

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

kristallin
gelb

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.
Der Stoff ist gewässergefährdend.

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/12 20.09.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 77: Sicherheitsdatenblatt Fluoren

Fluoren	
 IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung	GESTIS-Stoffdatenbank
Fluoren	
	
IDENTIFIKATION	
Fluoren Diphenylenmethan o-Biphenylenmethan 2,2'-Methylenbiphenyl	
ZVG Nr:	22990
CAS Nr:	86-73-7
EG Nr:	201-695-5
CHARAKTERISIERUNG	
STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL	
140300 Kohlenwasserstoffe, aromatisch	
AGGREGATZUSTAND	
Der Stoff ist fest.	
EIGENSCHAFTEN	
kristallines Pulver weiß geruchlos	
CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG	
Brennbarer Stoff, schwer entzündbar. Praktisch unlöslich in Wasser.	

IFA GESTIS-Stoffdatenbank	1/15	20.09.2018
---------------------------	------	------------

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 78: Sicherheitsdatenblatt 1,3,5-Trimehtylbenzol

1,3,5-Trimethylbenzol

 IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

1,3,5-Trimethylbenzol



IDENTIFIKATION

1,3,5-Trimethylbenzol
sym-Trimethylbenzol
Mesitylen

ZVG Nr: 31080
CAS Nr: 108-67-8
EG Nr: 203-604-4
INDEX Nr: 601-025-00-5

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140300 Kohlenwasserstoffe, aromatisch

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
öliger, aromatischer Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Entzündbare Flüssigkeit.
Dämpfe können mit Luft beim Erhitzen des Stoffes über seinen Flammpunkt explosive

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/25 20.09.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 79: Sicherheitsdatenblatt Phenanthren

Phenanthren

 IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Phenanthren

IDENTIFIKATION

Phenanthren

ZVG Nr: 22900
CAS Nr: 85-01-8
EG Nr: 201-581-5

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140320 Kohlenwasserstoffe, aromatisch, polycyclisch

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

Tafeln oder Blättchen
farblos

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Praktisch unlöslich in Wasser.
Von dem Stoff gehen akute oder chronische Gesundheitsgefahren aus.
Der Stoff ist gewässergefährdend.
(s. Kapitel VORSCHRIFTEN).

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/18 20.09.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 80: Sicherheitsdatenblatt Pyren

Pyren

**IFA**
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Pyren



IDENTIFIKATION

Pyren
Benzo(def)phenanthren

ZVG Nr: 22830
CAS Nr: 129-00-0
EG Nr: 204-927-3

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140320 Kohlenwasserstoffe, aromatisch, polycyclisch

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist fest.

EIGENSCHAFTEN

kristallines Pulver
farblos
geruchlos

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Brennbarer Stoff, schwer entzündbar.
Sehr schwer löslich in Wasser.
Der Stoff ist gewässergefährdend.
(s. Kapitel VORSCHRIFTEN).

IFA GESTIS-Stoffdatenbank1/1720.09.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 81: Sicherheitsdatenblatt Xylol, Isomerengemisch

Xylol, Isomerengemisch

 IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

GESTIS-Stoffdatenbank

Xylol, Isomerengemisch

IDENTIFIKATION

Xylol, Isomerengemisch

ZVG Nr: 10080
CAS Nr: 1330-20-7
EG Nr: 215-535-7
INDEX Nr: 601-022-00-9

CHARAKTERISIERUNG

STOFFGRUPPENSCHLÜSSEL

140300 Kohlenwasserstoffe, aromatisch

AGGREGATZUSTAND

Der Stoff ist flüssig.

EIGENSCHAFTEN

farblos
aromatischer Geruch

CHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Technische Xylol-Gemische enthalten meist die drei Isomeren o-Xylol (20 - 24 Vol%), m-Xylol (42 - 48 Vol%) p-Xylol (16 - 20 Vol%) und zusätzlich Ethylbenzol (10 - 11 Vol%).
Entzündbare Flüssigkeit.
Dämpfe können mit Luft beim Erhitzen des Stoffes über seinen Flammpunkt explosive

IFA GESTIS-Stoffdatenbank 1/26 20.09.2018

(Quelle: GESTIS-Stoffdatenbank)

Abbildung 82: Sicherheitsdatenblatt Fluoren

SIGMA-ALDRICH		sigma-aldrich.com
		SICHERHEITSDATENBLATT
		gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 Version 5.2 Überarbeitet am 02.01.2015 Druckdatum 17.08.2018
ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs bzw. des Gemischs und des Unternehmens		
1.1 Produktidentifikatoren		
Produktname	:	Fluoren
Produktnummer	:	128333
Marke	:	Aldrich
REACH Nr.	:	Eine Registriernummer für diesen Stoff ist nicht vorhanden, da der Stoff oder seine Verwendung von der Registrierung ausgenommen sind, die jährliche Tonnage keine Registrierung erfordert oder die Registrierung für einen späteren Zeitpunkt vorgesehen ist.
CAS-Nr.	:	86-73-7
1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird		
Identifizierte Verwendungen	:	Laborchemikalien, Herstellung von Stoffen
1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt		
Firma	:	Sigma-Aldrich Chemie GmbH Riedstrasse 2 D-89555 STEINHEIM
Telefon	:	+49 89-6513-1444
Fax	:	+49 7329-97-2319
Email-Adresse	:	eurtechserv@sial.com
1.4 Notrufnummer		
Notfall Tel.-Nr.	:	0800 181 7059 (CHEMTREC Deutschland) +49 (0)696 43508409 (CHEMTREC weltweit)
ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren		
2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs		
Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
Akute aquatische Toxizität (Kategorie 1), H400		
Chronische aquatische Toxizität (Kategorie 1), H410		
Den Volltext der in diesem Abschnitt aufgeführten Gefahrenhinweise finden Sie unter Abschnitt 16.		
Einstufung gemäss EU-Richtlinien 67/548/EWG oder 1999/45/EG		
N	Umweltgefährlich	R50/53
Den vollen Wortlaut der hier genannten R-Sätze finden Sie in Abschnitt 16.		
2.2 Kennzeichnungselemente		
Kennzeichnung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008		
Piktogramm		
Signalwort	Achtung	
Gefahrenbezeichnung(en)	Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung.	
H410		
Aldrich - 128333	Seite 1 von 8	

(Quelle: SIGMA-ALDRICH)

D.5 Kerosin Jet A 1

Abbildung 83: Sicherheitsdatenblatt Jet A-1

SICHERHEITSDATENBLATT	
Verordnung (EG) Nummer 1907/2006 (REACH-Verordnung).	
Jet A-1	
Version 5.1	Überarbeitet am 18.10.2017
Druckdatum 10.04.2018	
ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs beziehungsweise des Gemischs und des Unternehmens	
1.1 Produktidentifikator	
Handelsname	: Jet A-1
Produktnummer	: 002C0364
1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird	
Verwendung des Stoffs/des Gemischs	: Treibstoff für Flugzeug-Turbinenmotoren. Siehe Abschnitt 16 für die zugelassenen Verwendungszwecke unter REACH.
Verwendungen, von denen abgeraten wird	: Dieses Produkt darf nicht als Lösungs- oder Reinigungsmittel, zum Entzünden oder Anfachen von Feuer oder als Hautreiniger verwendet werden., Darf nicht als Kraftstoff für Kraftfahrzeuge verwendet werden., Darf nicht verwendet werden, um Gelierung von Dieselmotoren zu verhindern. Dieses Produkt darf ohne vorherige Befragung des Lieferanten nicht für andere als die in Abschnitt 1 empfohlenen Anwendungen verwendet werden.
1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt	
Hersteller/Lieferant	: Shell (Switzerland) AG Baarerstrasse CH-8340 Baar
Telefon	: (+41) 417694444
Telefax	: (+41) 417694550
E-Mail-Kontakt für Sicherheitsdatenblatt	: Bei Fragen zum Inhalt dieses Sicherheitsdatenblatt senden Sie bitte eine E-Mail an fuelSDS@shell.com
1.4 Notrufnummer	: (+41) 145 Tox Info Suisse
ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren	
2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs	
Einstufung (VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008)	
Entzündbare Flüssigkeiten, Kategorie 3	H228: Flüssigkeit und Dampf entzündbar.
Reizwirkung auf die Haut, Kategorie 2	H315: Verursacht Hautreizungen.
Aspirationsgefahr, Kategorie 1	H304: Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein.
Spezifische Zielorgan-Toxizität -	H336: Kann Schläfrigkeit und Benommenheit
1 / 50	800001002769 CH

(Quelle: REACH-Verordnung)