

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“

Bei Lufthansa sind folgende Flugzeugtypen mit einem System zum Ablassen von Treibstoff ausgerüstet:

Airbus A380, Boeing 747-400, Boeing 747-8, Airbus A340-600, Airbus A340-300

Andere von Lufthansa geflogene Flugzeugtypen besitzen ein solches System nicht. Die Notwendigkeit Treibstoff in Notfällen ablassen zu können, ergibt sich aus der Differenz zwischen maximalem Start- und maximalem Landegewicht.

Airbus A380	181 t
Boeing 747-400	100 t
Boeing 747-8	130 t
Airbus A340-600	109 t
Airbus A340-300	81 t

Zum Vergleich: Bei dem ebenfalls in Frankfurt eingesetzten Lufthansa Langstreckenflugzeug Airbus A330-300 beträgt diese Differenz nur 46 t und bei den Kurzstreckenflugzeugen der A320 Familie sogar weniger als 10 t.

Treibstoffablass aus Flugzeugen erfolgt nur in Notfällen, um rasch das maximal zulässige Landegewicht zu unterschreiten. Die Beurteilung der Notlage obliegt dem Kapitän. Er/sie orientiert sein/ihr Handeln ausschließlich an der Maxime maximaler Sicherheit. Kann z.B. nach einem Start das Fahrwerk nicht eingefahren oder die Flugzeugkabine nicht mit Druck beaufschlagt werden oder haben sich Teile von einem Triebwerk gelöst, so besteht das Risiko struktureller Schäden und die Sicherheitsmaxime verlangt, dass so schnell wie möglich wieder gelandet wird. Im Rahmen der vorsorglichen Wartung ist das oberste Ziel solche technischen Ausfälle zu vermeiden, jedoch können sie nicht völlig ausgeschlossen werden. Lufthansa hat ein hohes Interesse an der sicheren und planmäßigen Durchführung ihrer Flüge und investiert entsprechend sehr viel Geld in die Wartung. Andere nicht-technische Ursachen (z.B. Vogelschlag,...) sind für die Fluggesellschaften nicht zu beeinflussen. Bei medizinischen Notlagen, wenn z.B. ein Arzt an Bord festgestellt hat, dass das Leben eines Patienten an einer schnellen Überstellung in eine Klinik hängt, wird ein Kapitän Treibstoff ablassen.

Laut Betriebshandbuch der Lufthansa muss er dies mit der Flugsicherung koordinieren, die dem Flug hierzu ein Gebiet zuweisen wird. Eine Mindesthöhe von 6000 Fuß (1800m) über Grund ist einzuhalten.

Bei Lufthansa (ohne Cargo) kam es in den vergangenen 12 Monaten (01.11.2016 bis 31.10.2017) bei 365000 Flügen von- bzw. nach Deutschland fünfmal zum Ablassen von Treibstoff über Deutschland, d.h. jeder 73000. Flug lies über Deutschland ab Treibstoff bzw. bei 99,9986% aller Flüge geschah dies nicht. Insgesamt wurden 215 t Treibstoff über Deutschland abgelassen. Die durchschnittliche Flughöhe betrug 20.000 Fuß (6100m). In keinem Fall wurde das Doppelte der Mindesthöhe unterschritten. Bei dem 75 t Ereignis am 8. September wurde vor Beginn auf eine Höhe von 18.000 Fuß gestiegen, also auf das Dreifache der Mindesthöhe. In allen Fällen wurde das von der DFS zugewiesene Gebiet genutzt. In keinem Fall machte ein Kapitän von seinem Recht Gebrauch, in absoluten Notfällen davon abzuweichen.

Wirkliche Alternativen zu dem bei Crews und Fluggesellschaften extrem unbeliebten Ablassen von Treibstoff existieren nicht. Eine Landung weit oberhalb des maximal zulässigen Landegewichts birgt hohe Risiken für Passagiere und Flugzeug, da Fahrwerk, Struktur und Bremsen des Flugzeugs dafür nicht ausgelegt sind.

Die Alternative den Treibstoff zu verfliegen, statt ihn abzulassen oder ihn an weit entfernten Orten oder nur aus sehr großen Höhen abzulassen, besteht, wenn schnell gelandet werden muss, nicht.

Lufthansa stellt Ausschuss und Umweltbundesamt den beigefügten Untersuchungsbericht der swissair von 1994 zu den ökologischen Aspekten des Fuel-Dumpings zur Verfügung. Aus unserer Sicht sind die dort zusammengestellten Analysen auch heute noch gültig.

Robert Nyenhuis

Vice President Flight Operations Standards FRA L/W, Deutsche Lufthansa AG

und

Cpt Andreas Ritter

Head of Flight Operation Procedures and Technologies FRA L/OS, Deutsche Lufthansa AG

Auftraggeber: Projektausschuss Umwelt, GPI

Verteiler: O, T, G, U, UF, PP, OD, BP,
FLPO, UK, BGS, GPI, OCT, OC, TEM
TE, TEM (Zirk.), TEME, TEMU

ZUSAMMENFASSUNG

Treibstoffablass aus Flugzeugen erfolgt nur in Notfällen, um rasch das maximal zulässige Landegewicht zu unterschreiten.

Im Zuständigkeitsbereich von Swisscontrol Zürich werden jährlich etwa 5 solche Fälle verzeichnet. Durchschnittlich werden pro Ereignis 30-40t Kerosin freigesetzt.

Über die ökologischen Auswirkungen liegen nur wenige Erkenntnisse vor. Einen Forschungsschwerpunkt stellt die mögliche Boden- bzw. Wasserkontamination durch nicht verdampfte flüssige Kerosinanteile dar. Das Ausmass hängt in erster Linie von der Treibstoffzusammensetzung, Bodentemperatur und Ablasshöhe über dem Grund ab.

Der Treibstoffablass stellt eine Umweltbelastung dar. Schwerwiegende Beeinträchtigungen der Umwelt sind aber nicht zu erwarten. Das abgelassene Kerosin wird, da sich der Vorgang über einen Zeitraum von 15-20 Minuten erstreckt, infolge der hohen Fluggeschwindigkeit und Verwirbelung so fein im Luftraum verteilt, dass es unter günstigen meteorologischen Bedingungen bereits in der freien Troposphäre verdunstet.

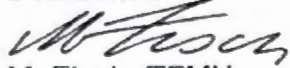
Gasförmiges Kerosin wird photochemisch zu CO₂ und Wasser abgebaut. Als Zwischenstufe wird in beschränktem Umfang auch Ozon gebildet. Die resultierende Ozonzusatzbelastung ist im Vergleich zur bereits vorhandenen Hintergrundbelastung sicher vernachlässigbar klein. Weil ausserdem der vertikale Austausch von Luft sehr gering ist, kann ein Beitrag zur Ozonbelastung in Bodennähe ausgeschlossen werden.

Bei Regen oder geringer Bodentemperatur im Winter ist eine Boden- und Wasserkontamination in Form von feinsten Tröpfchen nicht auszuschliessen. Obwohl aber gemäss Rechenmodell einer Studie bei einer Bodentemperatur von 0°C etwa 25% des abgelassenen Kerosins den Grund erreichen soll, also rund 10t pro Ereignis, konnten auch mit empfindlichsten Messgeräten in Luft-, Wasser-, Boden- und Pflanzenproben aus mutmasslich betroffenen Gebieten nie Kerosinrückstände nachgewiesen werden.

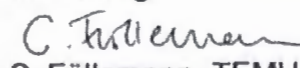
Durch die starke Verdünnung und grossräumige Verfrachtung dürfte die Flächenbelastung derart gering sein, dass die Restmengen keine Umweltschäden verursachen und aufgrund des sofort einsetzenden bakteriellen Stoffwechsels und photochemischer Reaktionen innerhalb von einigen Wochen vollständig abgebaut werden.

Der Beitrag des erst in Bodennähe verdampfenden Kerosins zur Bildung bodennahen Ozons dürfte ebenfalls unbedenklich sein, denn die durch Treibstoffablass freigesetzten Mengen Kohlenwasserstoffdämpfe sind gemessen an der gesamten derartigen Emission gering. So setzen Industrie, Gewerbe, Haushalte und Verkehr in der Schweiz täglich etwa 740t Kohlenwasserstoffe frei.

Bearbeitet:


M. Fisch, TEMU

Genehmigt:


C. Fülleman, TEMU

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	SEITE 3
1.1	Begriffsbestimmung	3
1.2	Begründung für Treibstoff-Schnellablass	3
1.3	Technische Daten	3
1.4	Richtlinien zum Treibstoff-Schnellablass	4
2.	LITERATURÜBERSICHT ZUM THEMA BODENKONTAMINATION	5
3.	HÄUFIGKEIT, MENGEN UND ORT VON TREIBSTOFFABLASS	15
4.	ÖKOLOGISCHE ASPEKTE	16
4.1	Humantoxikologie des Kerosins	16
4.2	Belastung der Luft	17
4.3	Belastung von Boden und Wasser	18
5.	LITERATURVERZEICHNIS	21

1. EINLEITUNG

1.1 Begriffsbestimmung

Treibstoff-Schnellablass (fuel dumping) ist das Ablassen von unverbranntem Kerosin während des Flugs. Treibstoff-Schnellablass ist kein Normalverfahren. Es wird nur angewendet, wenn andernfalls die Sicherheit der Flugpassagiere gefährdet werden könnte.

1.2 Begründung für Treibstoff-Schnellablass

Für jeden Flugzeugtyp ist das maximal zulässige Start- und Landegewicht im Lufttüchtigkeitszeugnis festgehalten. Bei Langstreckenflugzeugen liegt das maximal zulässige Landegewicht bedeutend unter dem Startgewicht. Bei normal verlaufenden Flügen sinkt das Flugzeuggewicht wegen des Treibstoffverbrauchs weit unter das maximal zulässige Landegewicht.

Tritt jedoch bei schwer beladenen Langstreckenflugzeugen kurz nach dem Start eine Situation auf, welche aus Sicherheitsgründen den schnellstmöglichen Abbruch des Flugs erfordert (z.B. Ausfall eines Triebwerks, Ausfall wichtiger Systeme), so muss das Flugzeuggewicht durch Ablassen von Treibstoff auf das maximal zugelassene Landegewicht vermindert werden.

Von der Swissair-Flotte sind die Flugzeugtypen B747 und MD11 mit Einrichtungen zum Treibstoff-Schnellablass ausgerüstet.

Bei Mittel- und Kurzstreckenflugzeugen (A310, MD80, F100) ist wegen des geringen Unterschieds von maximalem Start- und Landegewicht kein Treibstoffablass nötig, sie haben auch gar keine Einrichtungen dazu.

Der immer wieder auftauchende Vorwurf, dass Flugzeuge nicht verbrauchten Treibstoff vor der Landung zur Verminderung der Brandgefahr ablassen, trifft nicht zu.

1.3 Technische Daten

Boeing 747-357:

Max. zulässiges Startgewicht 372 t

Max. zulässiges Landegewicht 285,8t

Im Dezember 1984 hat das BAZL Übergewichtlandungen bis 310t bewilligt. Damit beträgt die maximal abzulassende Treibstoffmenge 62t.

Maximale Leistung des Treibstoff-Schnellablasssystems: 2,4t/Min.

Der Treibstoffablass erfolgt über je ein Ausströmröhr an den Flügelspitzen. Die Ausströmröhre weisen einen Durchmesser von 7,6 cm auf, sind horizontal angeordnet und reichen rund 10 cm über die hintere Flügelkante.

MD11:

Max zulässiges Startgewicht: 283,7t

Max zulässiges Landegewicht: 199t

Im Juni 1994 hat das BAZL Übergewichtlandungen bis 220t bewilligt. Damit beträgt die maximal abzulassende Treibstoffmenge 63,7t.

Maximale Leistung des Treibstoff-Schnellablasssystems: 2,6t/Min.

Der Treibstoff-Schnellablass erfolgt über je ein Ausströmröhr an den Flügelspitzen. Die Ausströmröhre weisen einen Durchmesser von 6,5 cm auf, sind horizontal angeordnet und reichen rund 8 cm über die hintere Flügelkante.

1.4 Richtlinien zum Treibstoff-Schnellablass

Für alle mit Treibstoff-Schnellablasssystem ausgerüsteten Flugzeuge bestehen Vorschriften bezüglich Bedienung des Systems sowie Einschränkungen betreffend deren Anwendung:

- Treibstoff wird nur in ausserordentlichen Situationen abgelassen. Der Entscheid liegt beim Bordkommandanten und ist aus naheliegenden Gründen von keiner weiteren Bewilligung abhängig. Es besteht aber eine Meldepflicht an das BAZL.
- Der Treibstoffablass erfolgt in einer von der Swisscontrol zugewiesenen Zone. Die Zuweisung wird vor allem durch zwei Vorgaben bestimmt. Einerseits durch die herrschenden meteorologischen Bedingungen und andererseits soll der übrige Flugverkehr nicht gestört werden. Weil es sich nicht um ein Normalverfahren handelt, kann ein solcher Raum prinzipiell nicht geplant werden.
- Gemäss Flight Operations Manual (FOM) soll beim Treibstoffablass eine Mindestflughöhe von 6000 ft (1830m) eingehalten werden. Normalerweise erfolgt der Treibstoffablass 4000m bis 8000m über Grund. Die Fluggeschwindigkeit liegt je nach Flugzeuggewicht und Flughöhe zwischen 460 km/h und 590 km/h.
Da nur die Cockpitbesatzung in der Lage ist, eine konkrete Notsituation mit allen möglichen Konsequenzen zu beurteilen, sehen die Vorschriften in den Aircraft Manuals aber ausdrücklich vor, dass die Einschränkungen bezüglich Flughöhe und Geschwindigkeit im Interesse der Sicherheit unterschritten werden dürfen.

2. LITERATURÜBERSICHT ZUM THEMA BODENKONTAMINATION

Zum Thema Bodenkontamination durch Treibstoffablass sind nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen publiziert worden.

Um sicherzustellen, dass auch aktuellste Daten Berücksichtigung finden, wurde via ETH-Bibliothek in verschiedenen Datenbanken nach Literatur recherchiert.

Erste ausführliche Untersuchungen zum Thema Treibstoffablass aus Flugzeugen stammen von Lowell [1], [2]:

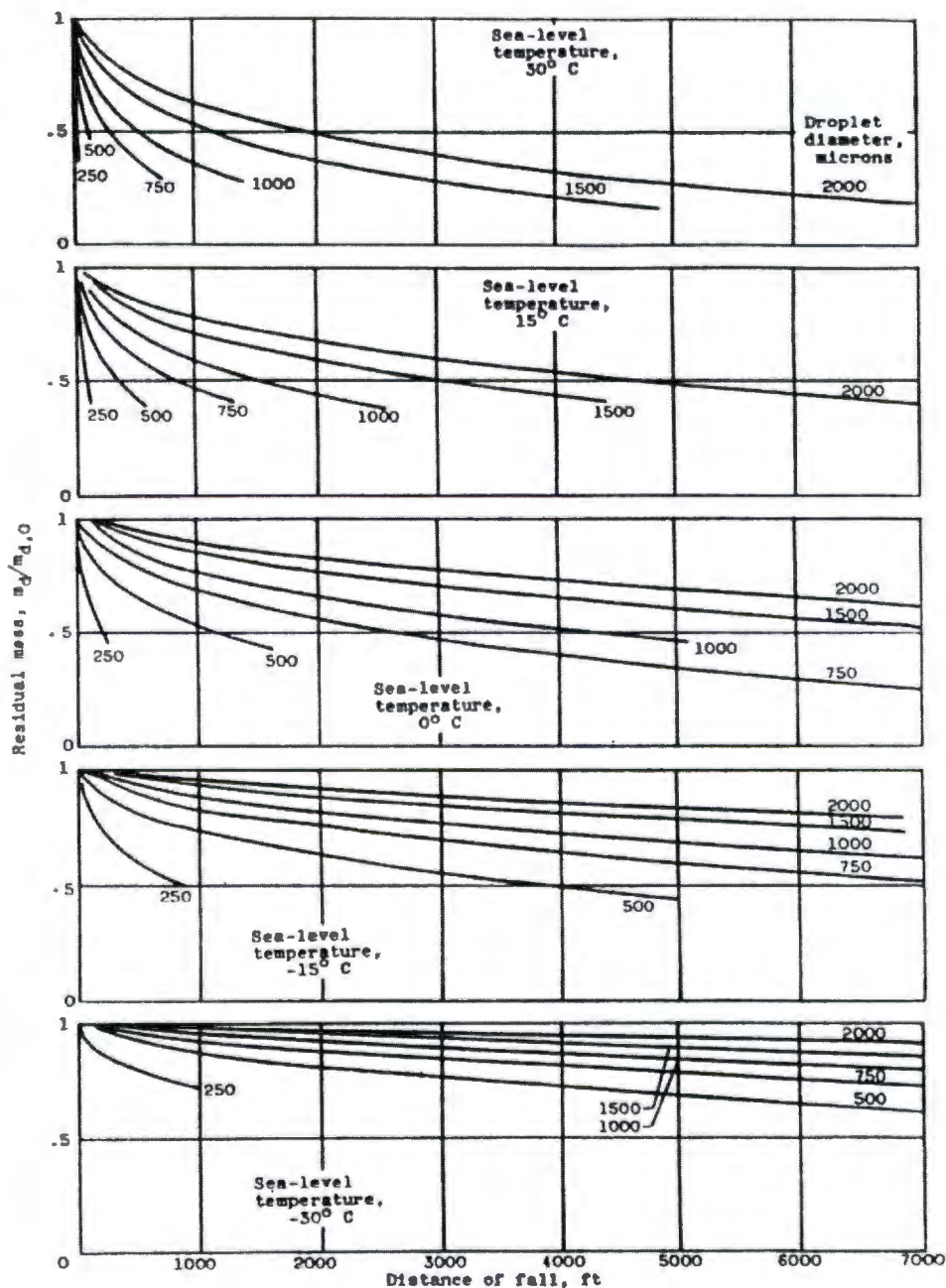
Mit Hilfe eines Computermodells wurde der Gewichtsverlust durch Verdampfung beim freien Fall von JP-4-Tröpfchen (Treibstoff für Militärflugzeuge) bzw. JP-1-Tröpfchen (entspricht Jet A-1, Treibstoff für Zivilflugzeuge) durch eine ungestörte Atmosphäre simuliert. Bei der Simulation wurden die anfänglichen Tröpfchendurchmesser ($250\mu\text{m}$ - $2000\mu\text{m}$), die Flughöhen beim Ablassen [3000 ft - 7000 ft (JP-4)/ 13000 ft (JP-1)] sowie die Bodentemperaturen [-30°C bis 30°C (JP-4)/ 45°C (JP-1)] variiert.

Statt der komplex zusammengesetzten Treibstoffe wurden "Modellgemische" aus je 10 Petroleum-Fractionen mit bekannten physikalischen Eigenschaften untersucht. Über die mutmasslichen Zerstäubungsprozesse an den Ausströmrohren der Flugzeuge, den Einfluss der durch die Triebwerke verursachten Wirbel, die beim Treibstoffablass effektiv resultierenden Tröpfchengrößen und die meteorologischen Einflüsse auf das Sinkverhalten und die Verdünnungsrate (Zustand der Atmosphäre; Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Turbulenzen in Funktion der Höhe) werden keine Aussagen gemacht.

Die Simulation ergibt mit steigender Bodentemperatur stark steigende Verdampfungsraten; kleine Tröpfchen zeigen höhere Verdampfungsraten, vergl. Fig. 4 [1], JP-4 und Fig. 3 [2], JP-1. JP-1 zeigt bei $< 0^\circ\text{C}$ sehr geringe und zwischen 10°C - 20°C mässige Verdampfungsraten.

In Fig. 6 [2] wird der Gewichtsverlust von JP-4 und JP-1-Tröpfchen verglichen. Im Temperaturbereich zwischen -15°C und $+25^\circ\text{C}$ zeigt JP-1 etwa die gleichen Verdampfungsraten wie um 20°C kälteres JP-4. Unterhalb -15°C zeigen beide Treibstofftypen sehr geringe Verdampfungsraten. Bei Temperaturen $> 25^\circ\text{C}$ nähert sich die Verdampfungsrate von JP-1 den Werten von JP-4.

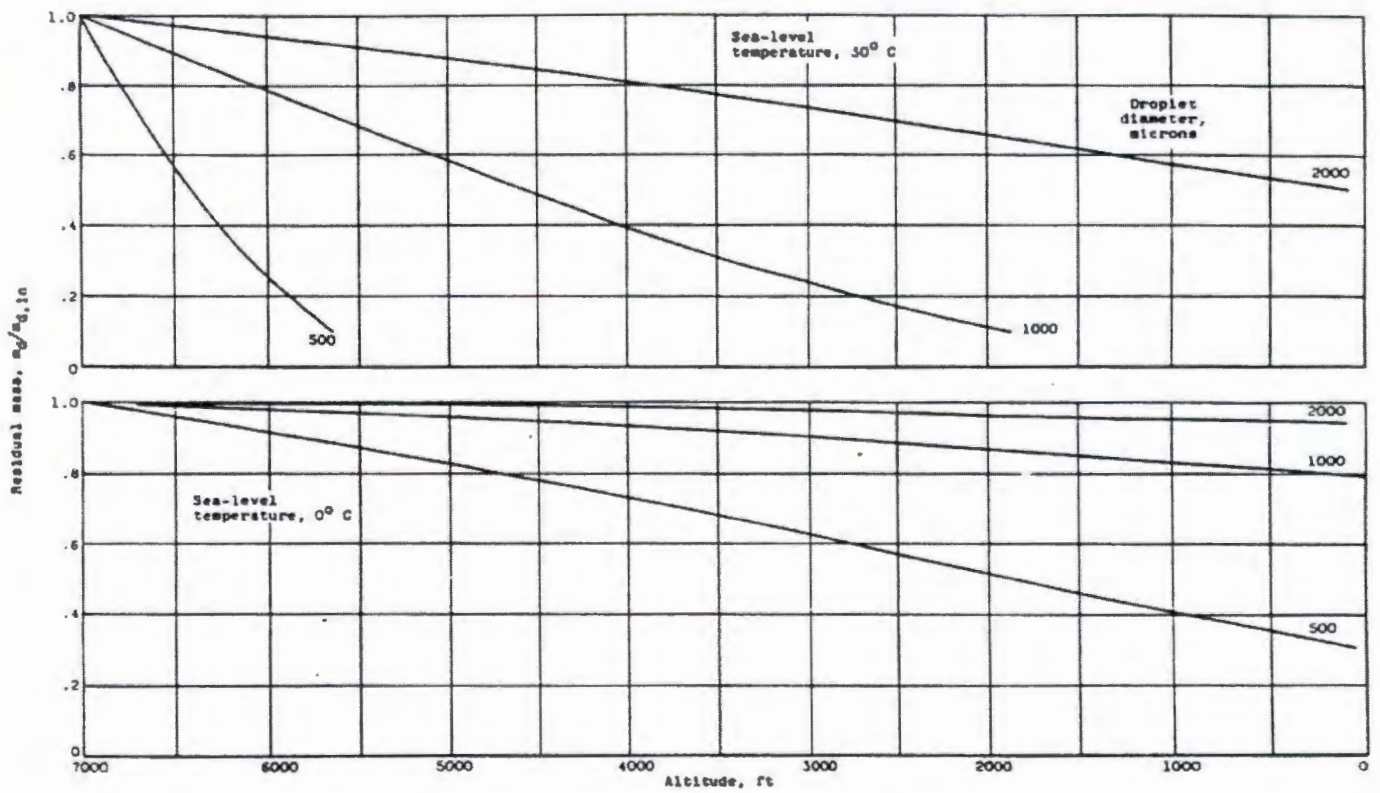
Eine weitere ausführliche Arbeit über die Bodenkontamination durch abgelassenen Treibstoff stammt von Cross und Picknett, 1973 [3]. Die Autoren zeigen mittels Versuchen mit Treibstoffablass aus einem Flugzeug sowie verschiedenen Berechnungen, dass die Bodenkontamination durch viele in weiten Grenzen schwankende Faktoren bestimmt wird, insbesondere durch die Bodentemperatur, Flughöhe, Fluggeschwindigkeit, Windgeschwindigkeit, Windrichtung bezüglich Flugrichtung, abgelassene Treibstoffmenge pro Zeiteinheit und Geometrie des Ablasssystems.



(a) Starting altitude, 7000 feet.

Figure 4. - Residual mass as function of distance of fall at fixed sea-level air temperatures. Fuel, JP-6.

Fig. 4 [1]



(a) Starting altitude, 7000 feet.

Figure 3. - Residual mass as function of altitude at fixed sea-level air temperatures. Fuel, JP-1.

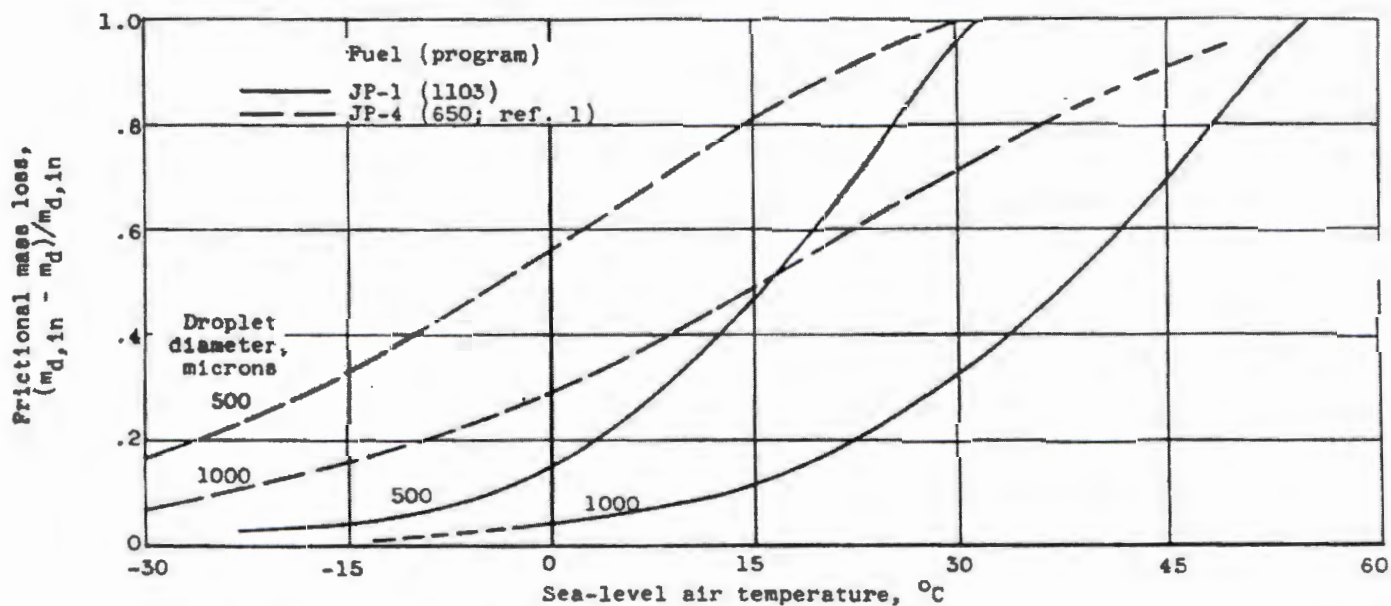


Figure 6. - Fractional mass lost by droplet during fall of 1000 feet as function of air temperature. Starting altitude, 3000 feet.

Fig. 6 [2]

Im ersten Teil der Arbeit wird die Grösse der beim Treibstoffablass entstehenden Tröpfchen diskutiert. Der Ablass von AVTUR-Treibstoff (entspricht Jet A-1) erfolgte in 15m Höhe aus einem Erdkampfflugzeug; Durchmesser des Ablassrohrs 6cm, Fluggeschwindigkeit 430km/h, Ablassmenge 450kg/Min.

Die geringe Flughöhe beim Ablassen wurde gewählt, um die Verdampfungsverluste auf dem Weg zum Boden, welche zu geringeren Tröpfchendurchmessern führt, zu minimieren. Die Tröpfchen wurden am Boden aufgefangen und ausgemessen. Der Median der Häufigkeitsverteilung lag bei einem Durchmesser von 275 μ m, die maximale Tröpfchengrösse bei 680 μ m. Tröpfchen < 40 μ m waren nicht nachweisbar. Es wird postuliert, dass beim Absinken aus 15m Höhe keine Verdampfungsverluste auftreten. Höhere Fluggeschwindigkeiten und kleinere Ablassraten ergeben kleinere Tröpfchendurchmesser.

Der zweite Teil behandelt das Ausmass möglicher Bodenkontaminationen.

Eine wichtige Berechnungsgrundlage bilden die Publikationen von Lowell [1], [2]. Fig. 3 [3] zeigt die maximal den Boden erreichenden Anteile des abgelassenen Treibstoffs in Funktion der Ablasshöhe und Bodentemperatur; vorausgesetzt wird Windstille. Die Berechnungen ergeben, dass z.B. bei 0°C Bodentemperatur und 2700m Ablasshöhe 0,5% des abgelassenen AVTUR (= Jet A-1) den Boden erreicht.

Grosse Tröpfchen fallen schneller und zeigen auf dem Weg zum Boden gegenüber langsam fallenden kleinen Tröpfchen geringere Verdampfungsverluste.

Schliesslich wird die Grössenordnung der Flächenbelastung durch abgelassenes Kerosin diskutiert. Unter Worst Case-Bedingungen (Flugrichtung beim Ablassen in Windrichtung, schwacher Wind, stabile Atmosphäre) ist zu erwarten, dass beim Ablassen von AVTUR aus 300m Höhe und 5°C Bodentemperatur ein etwa 200m breiter Bodenstreifen mit rund 0,1g/m² kontaminiert wird.

Der Einfluss der Windverhältnisse ist erheblich. Bei Flugrichtung quer zum Wind und Windgeschwindigkeiten von 10m/s vermindert sich die Flächenbelastung um den Faktor 25. Die Berechnung ergibt einen Korridor von 4km Breite mit etwa 4mg/m² Flächenbelastung.

Dawbarn et.al., 1975 [4], verfeinerten und erweiterten Lowells [1], [2] Grundlagen zur Modellierung der Verdampfungsverluste. Alle Versuche wurden mit JP-4 durchgeführt, welches leichter verdampft als Jet A-1.

Es wird postuliert, dass beim Treibstoffablass auch sehr kleine Tröpfchen von 10 - 50 μ m Durchmesser entstehen. Beim Treibstoffablass aus 15m Höhe in [3] konnten maximal 55% des abgelassenen Kerosins am Boden nachgewiesen werden. Es wurde angenommen, dass sehr kleine Tröpfchen sofort verdampfen. In [4] wird vermutet, dass diese Tröpfchen durch geringen Wind neben die Probestfläche verfrachtet wurden.

Fig. 1 [4] zeigt das Grössenverteilungsdiagramm nach [3] sowie ein modifiziertes Diagramm unter der neuen Annahme, dass 35% der Tröpfchen einen Anfangsdurchmesser im Bereich 10 bis 50 μ m aufweisen.

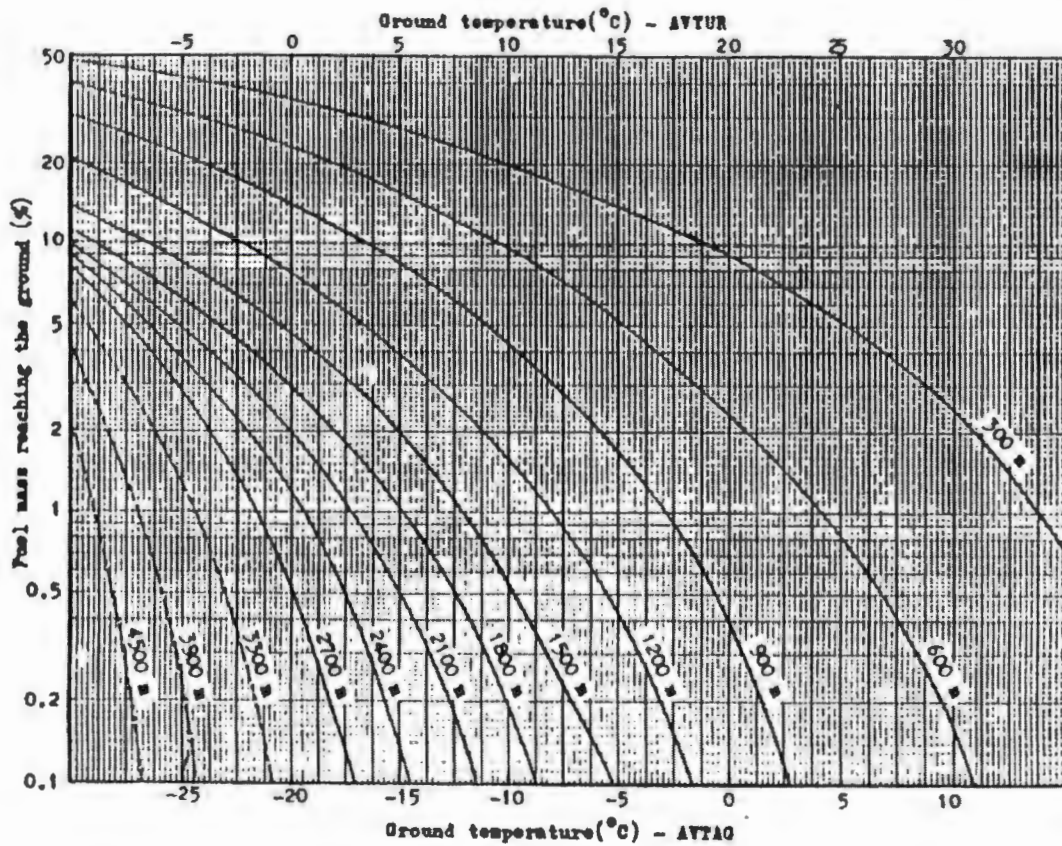


Figure 3. Maximum fuel reaching the ground for different heights of release

Fig. 3 [3]

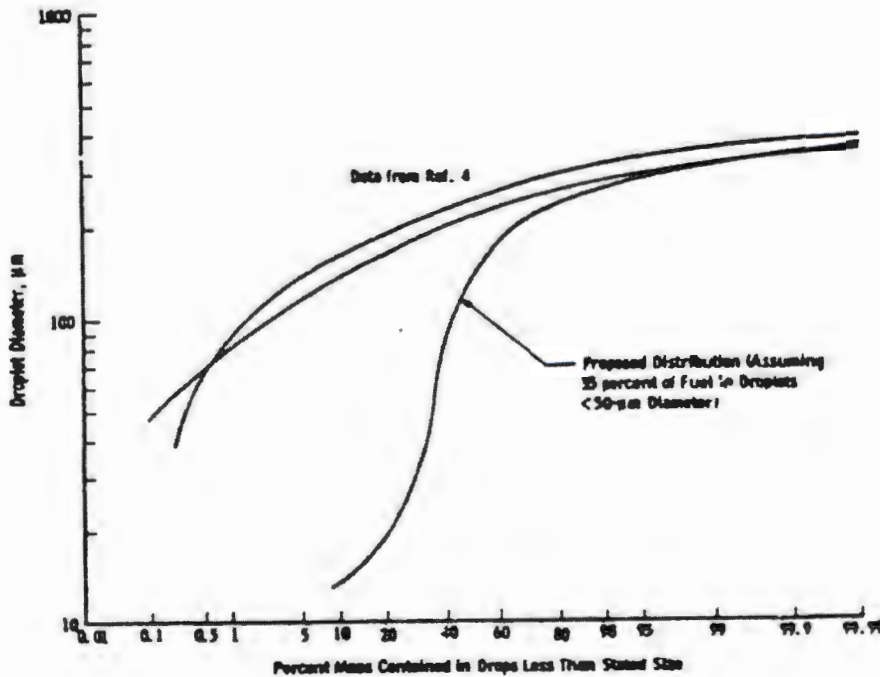


Figure 1. Droplet size distribution from fuel dumping.

Weitere Experimente zeigen, dass sich grosse Tröpfchen nicht durch Verschmelzung vieler kleiner Tröpfchen bilden, sondern unmittelbar beim Austritt aus dem Flügel. Allerdings können grosse Tröpfchen durch Kollision mit kleinen Tröpfchen geringfügig wachsen.

Ausserdem deuten Experimente darauf, dass JP-4-Dämpfe beim Kondensieren von Wasserdampf auf Wassertröpfchen niedergeschlagen und ausgereget werden. Eine Förderung der Kondensation von Wasserdampf an Kondensationskeimen durch die JP-4-Dämpfe konnte nicht nachgewiesen werden. Allerdings können kleine JP-4-Tröpfchen als Kondensationskeime wirken. Falls also kleine JP-4-Tröpfchen auf feuchte Luft treffen, ist ein Ausregnen von Wassertröpfchen mit erhöhtem JP-4-Gehalt denkbar.

Eine Studie von Good und Clewell, 1980 (5), stützt sich auf Experimente bei welchen in verschiedenen Höhen aus einem Flugzeug bei 600km/h über eine Röhre von 10,1cm Durchmesser pro Minute 3,4t JP-4-Treibstoff abgelassen und die entstehenden Tröpfchen auf dem Weg zum Boden von einem weiteren Flugzeug aufgefangen wurden. Für verschiedene Grössenklassen wurden die Fallgeschwindigkeiten sowie die Tröpfchenzahl und -masse bestimmt.

Anschliessend wurde mittels eines aus Lit. (1), (2) und (4) weiterentwickelten Verdampfungsmodells eine Häufigkeitsverteilung der ursprünglichen Tröpfchendurchmesser berechnet. Zur Massenbilanzierung wurde auch die Breite und Höhe der Tröpfchenwolke bestimmt sowie der Anteil gasförmigen Treibstoffs.

Beim Ablass wird der Treibstoffstrahl nicht gleichmässig beschleunigt. Es entstehen Fäden verschiedener Geschwindigkeit, welche zu Tröpfchen zerfallen. Es werden Tröpfchen von 5-2500 μ m Durchmesser erwartet. Der Median der Verteilung liegt bei 270 μ m.

Fig. 8 (5) zeigt ein Grössenverteilungsdiagramm von Tröpfchen, welche 90 Sekunden nach Ablass aufgefangen wurden, sowie die daraus errechnete Verteilung unmittelbar nach Ablass. Zum Vergleich ist auch die Kurve aus (3) aufgetragen.

Fig. 9 (5) zeigt die den Boden erreichenden JP-4-Mengen in Abhängigkeit der Ablasshöhe und Bodentemperatur. Oberhalb von 1500m über Grund nimmt mit steigender Ablasshöhe die Verdunstung nur noch geringfügig zu; massgebend ist in erster Linie die Bodentemperatur. Je höher ein Flugzeug aber beim Ablass fliegt, desto mehr Zeit verbleibt für die horizontale Verfrachtung und grossräumige Verbreitung der Treibstofftröpfchen und Gase durch den Wind und die Wirbeldiffusion und desto geringer wird die Bodenkontamination pro Flächeneinheit. Die resultierenden Konzentrationen in der Luft und am Boden werden als ökologisch unbedenklich taxiert.

Die Resultate gelten für JP-4-Treibstoff und das Ablasssystem des Versuchsflugzeugs. Sie dürften aber bei anderen Flugzeugtypen in der gleichen Grössenordnung liegen.

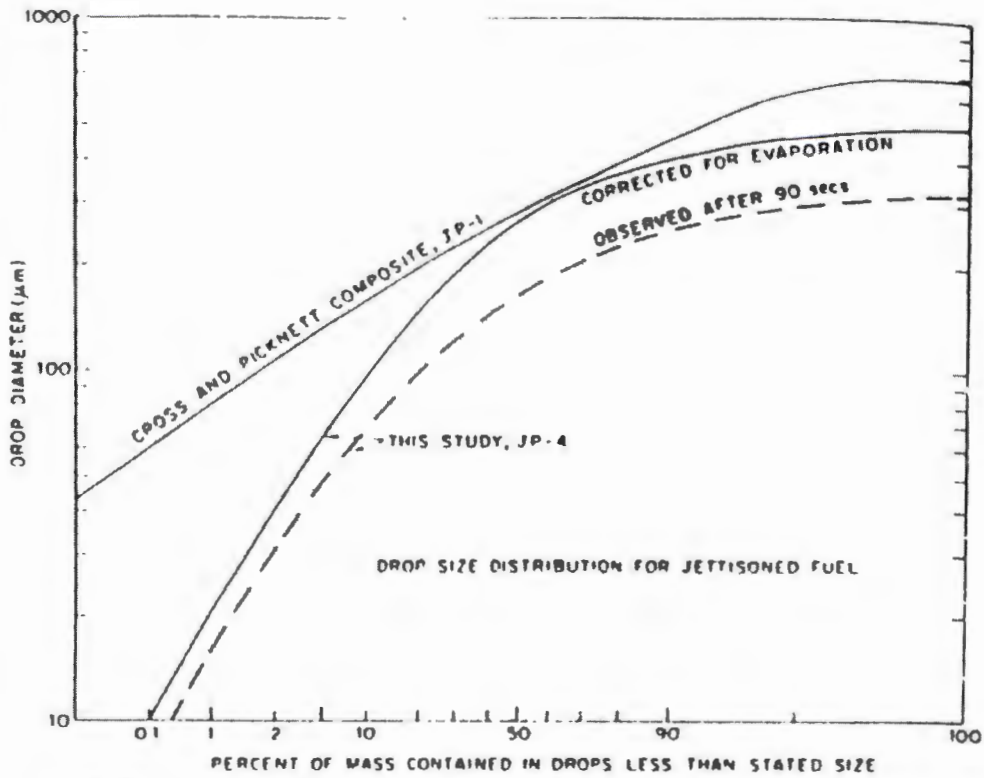


Fig. 8 Drop size spectrum of JP-4 vented from KC-135 aircraft.

Fig. 8 [5]

Fig. 9 Percentage of JP-4 liquid fuel drops predicted to reach the ground as a function of dump altitude, ground temperature, and adiabatic lapse rate.

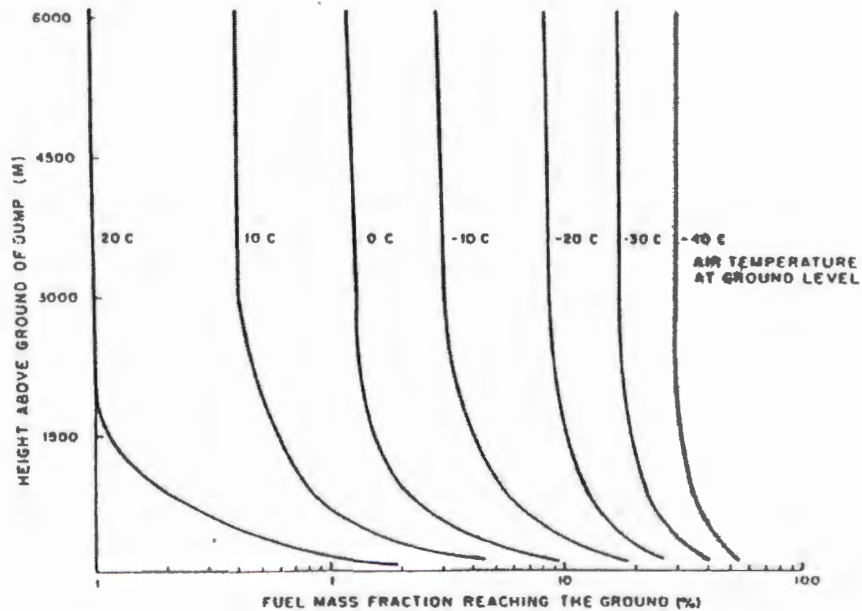


Fig. 9 [5]

In einer späteren Studie von Clewell, 1983 [6] wurden mittels eines Computermodells auch die Verdampfungseigenschaften von Jet A - Treibstoff sowie die mögliche Bodenkontamination simuliert. Fig. 1 [6] zeigt das Resultat. Wie bereits in [5] gezeigt, wird die Bodenkontamination in erster Linie durch die Temperatur bestimmt. Eine Temperaturänderung von 20°C kann die Bodenkontamination bis um den Faktor 10 verändern. Beim Ablass von Jet A - Treibstoff oberhalb von 3000m über Grund verändert sich die Bodenkontamination mit steigender Höhe nur noch gering. Beim Ablassen von Jet A ist die Wahrscheinlichkeit einer signifikanten Bodenkontamination wesentlich grösser als beim leichter flüchtigen JP-4. Bei einer Bodentemperatur von 0°C erreichen gemäss Computermodell mehr als 20% des abgelassenen Jet A - Treibstoffs den Boden, unabhängig von der Ablasshöhe. Die Auswirkungen von gasförmigem Jet A - Treibstoff werden als vernachlässigbar bezeichnet. Dies gilt jedoch nicht für die mögliche Bodenkontamination durch Treibstofftröpfchen. Laut [6] kann aber bei Einhaltung einer Ablasshöhe von 6000m über Grund die Schädigung der Umwelt minimiert werden, da die Treibstofftröpfchen beim Absinken weit verfrachtet werden.

Die Zusammensetzung des Kerosins ändert während des Absinkens stetig, weil die flüchtigen niedermolekularen Komponenten schneller verdampfen. Wird bei geringer Bodentemperatur Jet A abgelassen, weisen die allenfalls den Boden erreichenden Tröpfchen etwa die Zusammensetzung von Dieselöl auf.

In einer aktuellen Studie von Quackenbush et al., 1994 [7] werden neue Berechnungen vorgestellt. Sie basieren auf Computermodellen des USDA Forrest Service und der US Army mit welchen die Ausbreitung von aus Flugzeugen versprühten Pestiziden bzw. biologischen und chemischen Kampfstoffen untersucht werden. Diese Modelle berücksichtigen auch die Auswirkungen der von Turbinen und Flügeln verursachten Luftwirbel und werden mit modernsten Computern angewendet. Leider ist ausschliesslich eine Simulation des Treibstoffablass' aus einen F-15 Kampfflugzeug unter Extrembedingungen verfügbar (Ablass von 300µm-Tröpfchen bei 0°C 300m über Grund). Die Studie bestätigt die in [5] und [6] gemachten Aussagen.

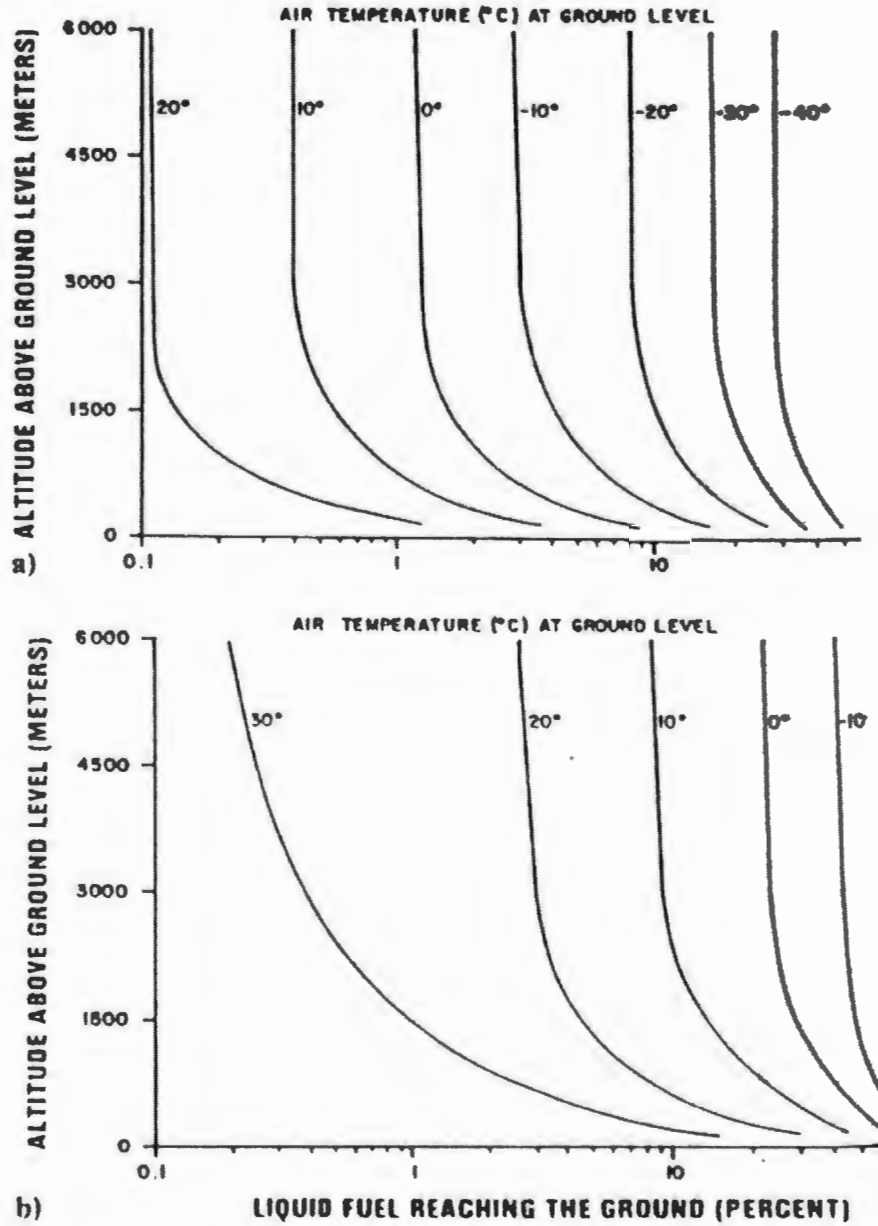


Fig. 1 Effect of release altitude on the percent of fuel reaching ground. a) JP-4, b) JP-8/Jet A.

3. HÄUFIGKEIT, MENGEN UND ORT VON TREIBSTOFFABLASS

Seit 1991 wurde im Zuständigkeitsbereich der Flugsicherungsdienste Zürich (swisscontrol) 16 mal Treibstoff abgelassen. Der Zuständigkeitsbereich ist begrenzt durch die Städte Bern, Stuttgart, Kempten und den Monte Ceneri. Mengen und Ablasszone können Tab. 1 entnommen werden. Pro Ereignis wurden durchschnittlich 34t Treibstoff abgelassen. Wie in Kapitel 1.4 erwähnt, berücksichtigt swisscontrol bei der Zuweisung der Ablasszone die meteorologischen Bedingungen sowie den übrigen Flugverkehr. Meist wird der Treibstoff über dem Mittelland, dem Jura oder den Voralpen abgelassen. Es besteht eine interne Anweisung an die Verkehrsleiter, den Bodenseeraum möglichst nicht zuzuteilen. Diese Anweisung ist politisch motiviert. In Bezug auf eine hypothetische Bodensee-Verschmutzung müsste je nach Windlage auch der Treibstoffablass in der Ostschweiz oder in Südbayern vermieden werden.

Datum	Menge [t]	Ablasszone	Flughöhe [m]	Flugzeugtyp	Airline
23.2.91	50	Willisau-Aarau-Hochwald-Waldshut		DC10	Varig
30.6.91	12	Säntis-Stuttgart	6100		Lufthansa
15.7.91	41	Bern-Willisau-Hochwald	3700	DC8-63	ASA
6.11.91	14	Mt.Ceneri-Zürich-Süddeutschland			
6.12.91	36	Trasadingen			
18.5.92	20	Jura			
28.7.92	25	Mt.Ceneri-Hochwald			
30.8.92	35	Trasadingen-Basel-Jura			
8.8.93	39	St.Prex-Willisau	5900	MD11	Swissair
15.8.93	30	Grossraum Aarau	4200	MD11	Swissair
28.8.93	51	Frauenfeld-Appenzell	4900	MD11	Swissair
2.9.93	30	St. Gallen-Appenzell-Zürich	5300	MD11	Swissair
20.4.94	6	Kempten-Friedrichshafen-Konstanz	5800	B747	Cathay Pacific
20.5.94	50	Schänis-Bivio-Flüela-Buchs	7300	MD11	Swissair
25.5.94	70	Jura	4000	B747	Swissair
31.5.94	38	Zürich-Pizol	5300	MD11	Swissair

Tabelle 1:

Kerosinablass im Zuständigkeitsbereich der Flugsicherungsdienste Zürich

4. ÖKOLOGISCHE ASPEKTE

Abgelassenes Kerosin wird, wie in Kapitel 2 gezeigt, infolge der hohen Flugeschwindigkeit und Verwirbelung in feinste Tröpfchen zerstäubt, welche relativ langsam absinken. Bei 200µm Durchmesser sinkt ein Tröpfchen etwa 60cm pro Sekunde, bei 50µm Durchmesser lediglich 8cm pro Sekunde. Da im Verlauf des Absinkens zumindest ein Teil der Kerosinkomponenten verdampfen, dürfte sich der Tröpfchendurchmesser und damit auch die Sinkgeschwindigkeit beträchtlich verringern.

Weil sich der Treibstoffablass über einen Zeitraum von 15-30 Minuten erstreckt und in Ablasshöhe üblicherweise Windgeschwindigkeiten von 10-20m pro Sekunde herrschen, werden die Tröpfchen in kurzer Zeit auf ein sehr grosses Luftvolumen verteilt und über grosse Distanzen verfrachtet. Unter günstigen meteorologischen Bedingungen verdampft das Kerosin bereits vor Erreichen der Bodenoberfläche.

4.1 Humantoxikologie des Kerosins

Kerosin besteht wie Benzin aus einer Mischung von 100 bis 200 verschiedenen Kohlenwasserstoffen. Hauptkomponenten des Kerosins sind mit einem Anteil von 85 Volumenprozenten langkettige unverzweigte, verzweigte oder ringförmige Paraffine, d.h. Verbindungen die nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen und keine Kohlenstoff-Mehrfachbindungen oder -Ringe enthalten.

Der Anteil an aromatischen Kohlenwasserstoffen, d.h. an ringförmigen Verbindungen bei denen der Kohlenstoff alternierend Einfach- und Doppelbindungen aufweist, beträgt rund 15 Volumenprozent.

Für leicht flüchtige Benzine liegen inhalationstoxikologische Bewertungen sowie Untersuchungen über die Gefahr von Atemweg- und Kreislaufbeschwerden und von Nieren- und Leberschäden vor. Diese können jedoch wegen der abweichenden Zusammensetzung nicht für die Beurteilung von Kerosin herangezogen werden. Die in diesem Zusammenhang als besonders wirkungsrelevant erkannten Komponenten mit 6 bis 9 Kohlenstoffatomen, (v.a. Aromaten) sind im Kerosin kaum vorhanden.

In Kerosin lässt sich lediglich das Benzol als eindeutig krebserzeugende Verbindung nachweisen. Der Benzolgehalt im Kerosin liegt aber stets unter 0,2 Volumenprozent. Ausserdem verdampft das Benzol schneller als die Hauptkomponenten des Kerosins. Wird während des Fluges Kerosin abgelassen, ist die Belastung bodennaher Luft mit Benzol also unwahrscheinlich.

Aus der Gruppe der toxikologisch relevanten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe können einzig verschiedene Naphthalinverbindungen in einer Totalkonzentration von 0,8-3 Volumenprozent nachgewiesen werden. Sie zählen jedoch nicht zu den erwiesenen oder potentiellen krebserzeugenden Verbindungen.

Im Benzin liegt der Gehalt an Aromaten bei rund 30 Volumenprozent. Der Benzolgehalt beträgt etwa 2,5 Volumenprozent, liegt also mindestens 10 mal höher als beim Kerosin.

4.2 Belastung der Luft

Die Auswirkungen von Treibstoffablass sind stark abhängig von der Flughöhe und dem Zustand der Atmosphäre.

In der freien Troposphäre, wo der Treibstoffablass normalerweise erfolgt, werden Kerosindämpfe durch photochemische Prozesse in ähnlicher Weise abgebaut, wie die Kohlenwasserstoff-Emissionen in Bodennähe, nur viel grössräumiger.

Endprodukte des Abbaus sind CO₂ und Wasserdampf, also die gleichen Verbindungen wie wenn der Treibstoff nicht abgelassen, sondern wie vorgesehen in den Triebwerken verbrannt worden wäre.

Es stellt sich aber die Frage, ob auch Ozon gebildet wird. Voraussetzungen für die Ozonbildung sind NO_x, Kohlenwasserstoffe (HC) und Sonnenlicht. In der freien Troposphäre werden nur geringe HC- und NO_x-Gehalte gemessen. Die Hintergrundbelastung liegt für HC bei einigen ppb, für NO_x unterhalb 1ppb.

Abgelassenes Kerosin sowie NO_x aus den Triebwerken dürften lokal zu beträchtlichen Konzentrationserhöhungen führen. Prinzipiell ist also die Bildung von Ozon möglich, allerdings limitiert durch den geringen NO_x-Gehalt.

Bei Treibstoffablass oberhalb der planetaren Grenzschicht leistet das Kerosin einen Beitrag zur Ozonproduktion in der freien Troposphäre. Die gebildete Ozonmenge dürfte allerdings gemessen an der globalen Hintergrundbelastung vernachlässigbar klein sein.

Lokal erhöhte Ozongehalte sind nicht zu erwarten, da die Reaktionsprodukte rasch horizontal verfrachtet und stark verdünnt werden. Gasförmiges Kerosin oder Abbauprodukte können nicht aus der freien Troposphäre in Bodennähe gelangen, da Luftmassen vertikal nur sehr langsam bewegt werden und die planetare Grenzschicht den Luftaustausch hemmt.

Gemäss [6] können Kerosintröpfchen bei geringen Bodentemperaturen auch bodennahe Luftschichten erreichen. Gemessen an der übrigen anthropogenen Kohlenwasserstoff-Belastung sind die Beiträge durch allenfalls in Bodennähe verdampfendes Kerosin aber sicherlich vernachlässigbar klein. Ein Vergleich soll die Grössenordnungen verdeutlichen: Bei einem Treibstoffablass werden jeweils 20-50t Kerosin freigesetzt, wovon bei günstigen meteorologischen Bedingungen ein Gross-teil vor Erreichen bodennaher Luftschichten verdampft. In der Schweiz werden dagegen 1994 in Industrie, Gewerbe, Haushalten und Verkehr etwa 270'000t Kohlenwasserstoffe emittiert (Kanton Zürich 40'000t). Der Anteil des Verkehrs beträgt etwa 15%. Im Gegensatz zum Treibstoffablass erfolgen diese Emissionen vollumfänglich in Bodennähe und tragen in den Sommermonaten zur lokalen und regionalen Ozonbelastung bei.

Auch in [6] werden die ökologischen Auswirkungen gasförmigen Kerosins in der Atmosphäre als vernachlässigbar bezeichnet.

In [8] wurden die mutmasslichen photochemischen Abbauprozesse von Flugzeugtreibstoff in verschiedenen Höhen genauer diskutiert. In einer Reaktionskammer von 6000 Liter Inhalt wurden Druck-, Temperatur- und Strahlungsbedingungen auf 0, 3000 und 6000m über Grund simuliert. Anschliessend wurde JP-4- bzw. JP-8-Treibstoff zusammen mit NO_x-haltiger Luft exponiert und analysiert.

Flugzeugtreibstoff enthält langkettige Paraffine sowie Aromaten. Der Abbau dieser Verbindungen erfolgt hauptsächlich durch Hydroxylradikale ([°]OH). Die aus Aromaten gebildeten Radikale oxidieren ihrerseits NO zu NO₂. Durch Photolyse von NO₂ entsteht Ozon (O₃). Die langkettigen Paraffine scheinen dagegen nach der Oxidation bevorzugt mit NO zu Alkylnitrat zu reagieren.

JP-4 und insbesondere JP-8 sind im Vergleich zu Benzin photochemisch wesentlich reaktionsträger. Die Experimente zeigen, dass bei Exposition eines JP-4/NO_x/Luft-Gemischs der Gehalt an [°]OH-Radikalen tiefer liegt als in Abwesenheit von JP-4. Für JP-8 dürfte das gleiche gelten. Die Reaktivität der aus Flugtreibstoff gebildeten Radikale wird durch die NO-Oxidationsrate ausgedrückt. Bei Exposition von JP4 steigt diese Rate mit steigender Höhe. Ausschlaggebend ist die Druckverminderung mit steigender Höhe; eine Temperaturabhängigkeit besteht praktisch nicht. Dagegen sanken die maximal gemessenen Ozongehalte mit steigender Höhe geringfügig. Die Veränderungen der Ozongehalte waren relativ gering, da auch die NO-Oxidationsrate tief lag.

Aus JP-8 gebildete Radikale wirken weit weniger oxidierend als JP-4-Radikale und die NO-Oxidationsrate stieg mit zunehmender Höhe nur gering.

4.3 Belastung von Boden und Wasser

[9], [10] und [11] enthalten Angaben zur Abbaubarkeit petrochemischer Produkte im Boden. Obwohl die Produktionsmengen beträchtlich sind, liegen nur wenige Angaben über das Verhalten dieser Verbindungen in Böden vor.

Die folgenden Erkenntnisse wurden in erster Linie im Zusammenhang mit Ölfunfällen gewonnen bei welchen grosse Mengen in den Boden eingetragen werden!

Öle, Petroleum sowie Mixturen langkettiger Paraffine und Aromaten sind wenig wasserlöslich und gehen mit der organischen Bodensubstanz hydrophobe Bindungen ein.

Der Abbau im Boden erfolgt am effektivsten durch adaptierte aerobe Bakterien und Pilze bei leicht alkalischen Bedingungen. Bei tiefem pH erfolgt der Abbau vor allem durch Pilze. Unter anaeroben Bedingungen sind auch denitrifizierende oder sulfatreduzierende Bakterien in der Lage, Öl abzubauen. Die zum Abbau petrochemischer Produkte befähigten Mikroorganismen sind in Feld-, Wald- und Wiesenböden weitverbreitet.

Der Abbau der Paraffine wird durch eine Oxidation am terminalen Kohlenstoffatom eingeleitet. Es folgt die Oxidation zu Fettsäuren. Die Spaltung der Aromaten-Ringe erfolgt nach der Oxidation zu Phenolen.

Kerosin besteht hauptsächlich aus Paraffinen, Cycloparaffinen und Aromaten mit 10 bis 14 Kohlenstoffatomen. Paraffine und Aromaten mit 10 bis 22 Kohlenstoffatomen weisen eine geringe Toxizität und gute biologische Abbaubarkeit auf.

Dies überrascht nicht, werden doch diese oder verwandte Verbindungen auch von Pflanzen laufend gebildet. Die Kutikula, welche die Oberfläche von Blättern überzieht und vor Wasserverlust schützt, wird durch Polykondensation und Polymerisation aus Fettsäuren gebildet. Die Wasserundurchlässigkeit wird noch durch die Einlagerung von Wachsmolekülen (19 oder mehr Kohlenstoffatome) gesteigert. Pflanzen vermögen auch aromatische Kohlenwasserstoffe zu bilden, z.B. Lignin als wichtiger Holzbestandteil.

Verbindungen mit mehr als 22 Kohlenstoffatomen sind wenig toxisch aber schwerer abbaubar. Bei Verbindungen mit weniger als 10 Kohlenstoffatomen erfolgt die Elimination in erster Linie durch Verdampfung.

Der Abbau von petrochemischen Produkten erfolgt meist ohne Anhäufung von Zwischenprodukten. Ein vollständiger Abbau ist aber nicht möglich, da die unpolaren Kohlenwasserstoffe stark an Bodenpartikeln adsorbiert und somit der in wässriger Phase wirksamen mikrobiellen Metabolisierung entzogen sind. Solche persistente Restgehalte sind oft analytisch nicht mehr nachweisbar.

Gemäss Tabelle 2.7.6/20 [9] wird 7g Kerosin pro kg Boden unter Freilandbedingungen innerhalb von 60-100 Tagen vollständig abgebaut (Temperatur und Abbauprozesse unbekannt).

2.7.6/20: Abbau von Erdölprodukten unter Freilandbedingungen (DEKREUX 1986)

	g/kg	Bodenart	Abbau nach Tagen		Temp. °C
			%	d	
Kerosen	7.0	S	100	60 - 100	-
Petroleum	1.5	IS	23 - 33	49 - 56	22 - 25
Diesel	10.1	-	90	42	28
Schweröl	3.5	SL	14 - 17	450	-

Tab. 2.7.6/20 [9]

Im Zusammenhang mit Treibstoffablass dürfte die Bodenbelastung, vorausgesetzt dass Kerosin wirklich zu Boden gelangt, um Grössenordnungen kleiner sein, was sich wiederum auf die Elimination auswirkt.

Zum Ablass von 50t Kerosin werden etwa 20 Minuten benötigt. Bei einer Geschwindigkeit von 600km/h legt ein Flugzeug in dieser Zeit 200km zurück. Zwar erreicht gemäss [6] bei einer Bodentemperatur von 0°C etwa 25% des Treibstoffs den Boden. Wegen der weiträumigen Verfrachtung und Verdünnung dürfte aber die maximale Flächenbelastung unterhalb 1mg/m² liegen. Zum Vergleich: Die natürlichen Kohlenwasserstoffgehalte in der obersten Humusschicht liegen bei etwa 0,1g pro kg Humus. Unter 1m² unkultiviertem Boden liegen also etwa 13g Kohlenwasserstoffe (Annahmen: Dichte des Bodens 1,3g/cm³, Mächtigkeit der Humusschicht 10cm).

Signifikante Flächenbelastungen dürften lediglich im Fall von Treibstoffablass in einer Regenzone auftreten. Während und nach dem 2. Golfkrieg wurden feinste Öltröpfchen aus brennenden Kuwaitischen Ölquellen in die Atmosphäre getragen. Bei Niederschlägen in angrenzenden Gebieten koagulierten diese Öltröpfchen mit Regen und wurden ausgewaschen.

Bei Regen dürfte also ein Teil des Kerosins mitgerissen werden. Nimmt man an, dass sich das Kerosin beim Niederschlag auf einen Streifen von 2km Breite verteilt und 50% des Treibstoffs den Boden erreicht, ergibt sich eine kontaminierte Fläche von 400km² und eine Flächenbelastung von etwa 60mg pro m².

Da Kerosin eine geringe Wasserlöslichkeit aufweist, ist ein Eindringen von Kleinstmengen in den Boden unwahrscheinlich; es herrschen also aerobe Abbaubedingungen.

Wegen der geringen Menge ist, im Gegensatz zu Havarien, nicht mit der Anreicherung von adaptierten, auf Kerosinabbau spezialisierten Mikroorganismen zu rechnen. Wahrscheinlich erfolgt der Abbau im Kometabolismus.

Verdampfung und abiotische Abbauprozesse wie Hydrolyse und Photolyse dürften jedoch wichtiger sein als der mikrobielle Metabolismus. Die Elimination dürfte innerhalb einiger Tage bis weniger Wochen erfolgen.

Das Schädigungspotential von Kerosin variiert je nach Bodentyp und Vegetationszone. Besonders empfindlich sind schlecht gepufferte alpine Ökosysteme. Zudem erfolgt der mikrobielle Abbau wegen der geringen Temperatur langsam.

Zu den Auswirkungen von Kerosin auf im Kontaminationsbereich lebende wirbellose Organismen lässt sich folgendes sagen: Auch heute noch werden Mineralöle zur Bekämpfung von Schildläusen und Milben insbesondere im Obst-, Wein- und Kartoffelbau eingesetzt. Gemäss Herstellerangaben handelt es sich um Paraffine mit 15 und mehr Kohlenstoffatomen. Pro Hektare werden 10-15l verspritzt, was eine Flächenbeaufschlagung von 800 bis 1200mg pro Quadratmeter ergibt. Das Mittel wirkt durch Erstickung und soll gut pflanzenverträglich sein. Ob im Fall von Treibstoffablass in einer Regenzone mit mutmasslicher maximaler Flächenbeaufschlagung von etwa 60mg pro Quadratmeter wirbellose Organismen geschädigt werden ist nicht bekannt.

Über die Auswirkungen von Paraffinen und Aromaten in Gewässern liegen nur spärliche Informationen vor. Aromaten und Paraffine sind in Oberflächengewässern immer zu finden. Sie werden auch von Algen gebildet. Daher sind auch Bakterien vorhanden, welche befähigt sind, diese Verbindungen abzubauen. Gut dokumentiert ist z.B. die biogene anaerobe Bildung und Akkumulation von Toluol aus der Aminosäure Phenylalanin. Steht Sauerstoff zur Verfügung, wird Toluol vollständig abgebaut [12]. Aromaten werden, weil sie etwas besser wasserlöslich sind, als die Paraffine auch aus der Luft in die Gewässer eingetragen. In Oberflächengewässern werden normalerweise Aromatengehalte von 10-80 ng pro Liter gemessen. Die Aromaten dürften innerhalb einiger Wochen vollständig abgebaut sein, Paraffine weniger rasch.

Wird wieder von einem Treibstoffablass in einer Regenzone mit einer Flächenbeaufschlagung von maximal 60mg/m^2 ausgegangen, ist mit den folgenden Belastungen zu rechnen.

Erfolgt der Treibstoffablass im Sommer wird sich das Kerosin auf einer Wassersäule von etwa 15m Höhe verteilen, da die sommerliche Erwärmung den Aufbau einer stabilen warmen Wasserschicht an der Seeoberfläche bewirkt. Die Mächtigkeit dieser Schicht schwankt je nach Seetiefe. Im Bodensee werden 30m, im Greifensee 5m gemessen. 60mg Kerosin verteilt auf 15m^3 Wasser ergibt $4\mu\text{g/l}$. Dieser Wert liegt zwar beträchtlich über dem natürlichen Gehalt. Eine Gefährdung des Trinkwassers ist aber unwahrscheinlich. Ausserdem erfolgt die Trinkwasserfassung unterhalb der obersten Wasserschicht.

Im Winter und Frühjahr ist der Wasserkörper homogen durchmischt, wodurch das Kerosin auf ein grösseres Wasservolumen verteilt wird.

Kohlenwasserstoffbelastungen in ähnlichen Grössenordnungen wie die Schätzwerte für Treibstoffablass bei Regen werden übrigens bei Motorboothäfen gemessen [13]. Motorboote tragen flüchtige organische Kohlenwasserstoffe, hauptsächlich Aromaten von grosser Umweltrelevanz ins Wasser ein. In einem Kanal zu einem Hafen am Bodensee wurde nach Passage von 100 Motorbooten ein totaler Aromatengehalt von $\sim 5\mu\text{g/l}$ gemessen!

5. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Lowell, H. H.: Free fall and evaporation of JP-4 jet fuel droplets in a quiet atmosphere; NASA TN D-33, Washington, Sept. 1959.
- [2] Lowell, H. H.: Free fall and evaporation of JP-1 jet fuel droplets in a quiet atmosphere; NASA TN D-199, Washington, March 1960.
- [3] Cross, N.L. and Picknett, R.G.: Ground contamination by fuel jettisoned from aircraft; Atmospheric pollution by aircraft engines, Advisory Group for Aerospace Research and Development, Conference proceedings 125, London, April 1973.
- [4] Dawbarn, R. et al.: A study of the jettisoning of JP-4 fuel in the atmosphere; AEDC TR-75-49, Arnold Engineering Development Center, Tullahoma, Tenn., Nov. 1975.
- [5] Good, R. E. and Clewell, H. J.: Drop formation and evaporation of JP-4 fuel jettisoned from aircraft; Journal of aircraft, Vol. 17, July 1980, pp 450-456.
- [6] Clewell, H. J.: Ground contamination by fuel jettisoned from aircraft in flight; Journal of aircraft, Vol. 20, 1983, pp 382-384.
- [7] Quackenbush, T. R. et al.: A model for assessing fuel jettisoning effects; Atmospheric Environment, Vol. 28, 1994, pp 2751-2759.

- [8] Winer, A. W. et al.: High altitude jet fuel photochemistry; ESL-TR-82-38, Statewide Air Pollution Research Center University of California, Riverside, Calif., Oct. 1982.
- [9] Blume, H.-P. (Hrsg.): Handbuch des Bodenschutzes; Kap. 2.7.6 Organische Verbindungen, pp 340 ff., ecomed, Landsberg 1990.
- [10] Atlas, R. M.: Petroleum microbiology; pp 442 ff, Macmillan, New York 1984.
- [11] Schlegel, H. G.: Allgemeine Mikrobiologie, 5. Auflage; Kap. 14.11 Kohlenwasserstoffe, pp 409 ff, Thieme, Stuttgart 1981.
- [12] Jüttner, F.: Distribution of toluene in stratified lakes and river dams of Southwest Germany; Verh. Internat. Verein. Limnol., Nr. 24, Sept. 1990, pp 279-281.
- [13] Jüttner, F.: Motor-boat-derived volatile organic compounds (VOC) in lakewater; Z. Wasser- Abwasser-Forsch., Nr. 21, 1988, pp 36-39.