

VIII – 7.3

Innenraumluftqualität in Verkehrsflugzeugen

W. ROSENBERGER, S. SCHUCHARDT, beide Hannover, C. BAUMSTARK-KHAN, Köln, und A. HAHN, Berlin

Einleitung

Die systematische Untersuchung der Innenraumluft von Verkehrsflugzeugen auf chemische Stoffe und andere Luftqualitätsparameter wurde seit Beginn der 1990er Jahre international und seit 2009 in Deutschland intensiviert (Crump et al. 2011a und 2011b, Dechow et al. 1997, DeNola et al. 2008 und 2011, Guan et al. 2014a und 2014b, de Ree et al. 2014, Rosenberger 2012, Rosenberger et al. 2013, 2014 und 2016, Schuchardt et al. 2017, Solbu et al. 2011, Spengler et al. 2012, van Netten 2009). Die Gründe hierfür sind vielschichtig, wesentlich ist jedoch die Besorgnis insbesondere des fliegenden Personals über gesundheitsgefährdende Kabinenluft. Es wird angenommen, dass Emissionen von Schmierstoffbestandteilen aus dem Bereich der Antriebswellen in den Turbinen über das Belüftungssystem der Flugzeuge in die Kabine ursächlich für verschiedene Erkrankungen seien. Dabei stehen Additive der Turbinenöle, vornehmlich Trikresylphosphate (TKP, engl. TCP) sowie Hydraulikflüssigkeiten, die in der Regel ebenfalls phosphororganische Verbindungen (OPC engl. für organo phosphorus compounds) enthalten, im Vordergrund. Diskutiert werden aber auch Emissionen weiterer Stoffgruppen (flüchtige organische Verbindungen (VOC), Aldehyde oder organische Säuren) in die Kabine. Sehr häufig werden vermutete Einträge von Chemikalien mit Gerüchen assoziiert, woraufhin der Terminus „Smell Event“ geprägt wurde. Die Beobachtung von Rauch- oder Nebelbildung in der Kabine führte zum Begriff „Fume Event“. Für beide Begriffe liegen keine wissenschaftlichen begründeten Definitionen vor, so dass derzeit im Wesentlichen subjektive Eindrücke zu Geruchsepisoden meist unbekannter Genese als Handlungsgrundlage, z.B. für Abbrüche von Flügen, herangezogen werden. Für die Zusammenfassung der vielfältigen meist unspezifischen Gesundheitsbeeinträchtigungen wurde 2002 der Begriff des sogenannten „Aerotoxischen Syndroms“ eingeführt und bis heute diskutiert (vgl. auch Abschn. 3) (Winder u. Balouet 2002, Chaturvedi 2011, Harrison et al. 2016,

de Boer et al. 2015, Schwarzer et al. 2014, Michalis 2011). Das „Aerotoxische Syndrom“ ist medizinisch-wissenschaftlich nicht akzeptiert und stellt dementsprechend kein Krankheitsbild (Entität) dar.

In diesem Beitrag werden die besonderen Bedingungen in Flugzeugkabinen beschrieben, mögliche chemische Stoffeinträge und deren Quellen aufgeführt, die hiermit verknüpften medizinischen Beschwerdebilder diskutiert, Methoden und Ergebnisse von Messungen in Flugzeugen zusammengefasst, um abschließend ein aktuelles bewertendes Gesamtbild zu beschreiben. Der vorliegende Beitrag fokussiert auf Verkehrsflugzeuge im herkömmlichen Sinne, wobei Untersuchungen von strahlgetriebenen Flugzeugen die wesentliche Basis zur Datenlage chemischer Innenraumluftverunreinigungen darstellen.

1 Innenraum „Flugzeugkabine“

Die Flugzeugkabine gehört zu den Innenräumen (Sagunski 2017), obgleich in diesem speziellen Fall einige Besonderheiten aufzuzeigen sind, bevor über das Vorkommen und die Bedeutung von Chemikalien in Flugzeugen gesprochen werden kann. Im Vergleich zu typischen Innenräumen (vgl. auch Kap. IV – 1.2 Innenräume), wie Wohnungen, Büros, Schulen, Kindertagesstätten etc., ist es zunächst erforderlich, den spezifischen Merkmalen des Flugzeuginnenraums Aufmerksamkeit zu schenken. Erstes Augenmerk gilt hier der Geometrie der Kabine und der typischerweise hohen Anzahl an Personen. Eine Beispielrechnung mit einem Airbus A320-200 im Vergleich zu einem Büroraum und einem Schulklassenraum verdeutlicht die besondere Stellung von Flugzeuginnenräumen (Tab. 1). Für andere Flugzeuge beispielsweise vom Typ Antonov, Boeing, Embraer, Fokker etc. ergibt sich ein ähnlich hohes Beladungsverhältnis.

Ein weiteres und wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen typischen Wohninnenräumen und der Flugzeugkabine ist der zumindest im Reiseflug vor-

	Kabine eines Airbus A320-200*	Büro ($A = 16 \text{ m}^2$, $h = 2,5 \text{ m}$)	Schulklassenraum ($A = 60 \text{ m}^2$, $h = 3 \text{ m}$)
Volumen [m^3]	142	40	180
Oberfläche [m^2]	650	72	216
Personen [P]	169	2	30
Beladung [m^3/P]	0,8	20	6,0**
Oberfläche/Volumen [m^2/m^3]	4,6	1,8	1,2

Tab 1: Beispielrechnung für Geometrie und Beladungsverhältnisse in Flugzeug, Büro und Schulkasse

* Datenquelle: (Pschierer 2013);
** entspricht Anforderung nach bayerischer Schulbau-VO, (BayEUG 2000)

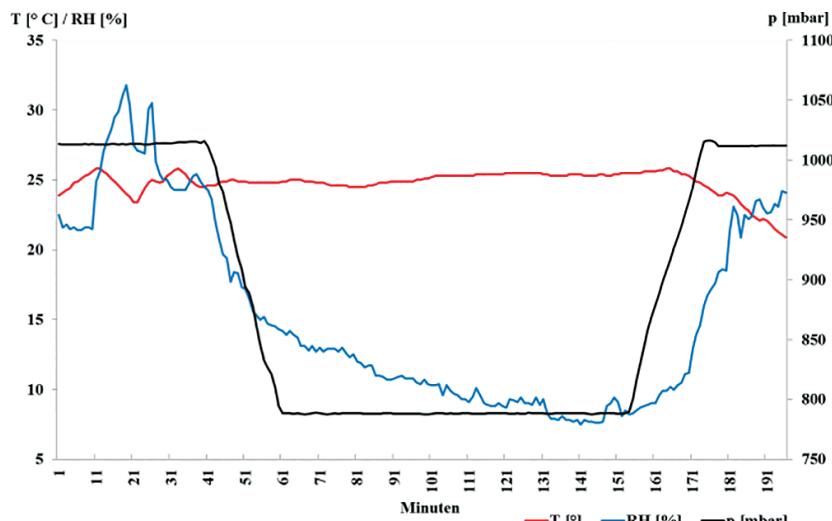


Abb. 1: Beispiel für (schwarz) Luftdruck (p), (rot) Temperatur (T) und (blau) rel. Luftfeuchte (RH) eines typischen innereuropäischen Fluges (eigene Untersuchungen MHH Arbeitsmedizin)

liegende reduzierte Luftdruck von ca. 750 bis 800 hPa im Vergleich zum normalen Luftdruck von 1013 hPa. Neben dem erniedrigten Luftdruck ist auch die ebenfalls sehr niedrige Luftfeuchtigkeit, die häufig deutlich unter 15 % relative Feuchte liegt – im Vergleich zur normalen Luftfeuchtigkeit von ca. 45 % –, ein deutliches Unterscheidungsmerkmal (Abb. 1), wobei in Wintermonaten in gewöhnlichen Innenräumen auch eine sehr geringe Luftfeuchtigkeit herrschen kann.

Aus den genannten physikalischen Gegebenheiten in Verbindung mit den flugzeugspezifischen Außenluftbedingungen resultieren zwangsläufig besondere Anforderungen an die Be- und Entlüftung von Flugzeugen, worauf in Abschnitt 4.3 näher eingegangen wird.

2 Quellen chemischer Stoffe in der Kabinenluft

Bedingt durch zahlreiche Einflussfaktoren (vgl. Tab. 2) kann die Luftzusammensetzung in Flugzeugkabinen grundsätzlich und auch unabhängig von Schadensfällen oder technischen Defekten bestimmte Änderungen erfahren. Die Ursachen hierfür können in verschiedenen Betriebszuständen des Flugzeugs, internen Betriebsabläufen oder auch in äußeren Einflüssen verortet sein.

Insgesamt stellt sich eine Gemengelage unterschiedlichster Emissionscharakteristika dar, die u.a.

- kontinuierlich (CO₂ durch Passagiere und Personal, Emissionen aus der Einrichtung),
- kurzzeitig und betriebsbedingt (Abgaseintrag beim „push back“ oder durch vorausrollende Flugzeuge); „push back“ bezeichnet das mit Hilfsfahrzeugen betriebene Zurücksetzen des Flugzeuges von der Parkposition

Tab. 2: Auswahl von wichtigen Einflussfaktoren auf die Luftbeschaffenheit in Flugzeugkabinen (mod. nach Schuchardt et al. 2017)

Einflussfaktoren	Mögliche Emissionen/Einträge in die Kabine
Triebwerksstart	Abgase mit Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO ₂), Stickoxiden (NO _x), Kerosin,
vorausrollende Flugzeuge	Otto-Kraftstoff, Partikeln, z.B. über das Hilfstriebwerk (APU, auxiliary power unit)
KFZ-Verkehr auf dem Flughafengelände/Vorfeld	
Reinigungsarbeiten in der Kabine	Lösemittel (VOC), Duftstoffe wie z.B. Terpene
Wartungsarbeiten, Reparaturen	
Abschalten der Zapfluft während des Triebwerksstarts	kurzzeitiger Anstieg von CO ₂ in der Kabine
Einrichtungsgegenstände	VOC, Organophosphate (Flammschutzmittel)
Tätigkeiten in der Küche	Gerüche, VOC, Aldehyde
Reinigung von Interieur	Restemissionen von z.B. Tetrachlorethen nach chemischer Reinigung von Sitzen
Flugzeugenteisung	Glykole, weitere VOC
Außenluft im Reiseflug, fehlende Ozon-Konverter	Ozon (O ₃)
Passagiere	CO ₂ , Gerüche, VOC, Duftstoffe etc.
Benutzung der Toiletten	Gerüche
Betriebsstoffe	Hydraulikflüssigkeiten, Motorenöle (Organophosphate, weitere Additive), Treibstoff (Kerosin)
zufällige Ereignisse, wie z.B. kontaminierte Kleidung/Schuhe von Bodenpersonal beim Betreten des Flugzeugs	Eintrag von z.B. Kerosin, Lösemitteln, Hydraulikölen, Motorenölen und anderen Betriebsstoffen
seltener (reisegebietsabhängige) Stoffeinträge	Insektizide, z. B: Pyrethroide (Vektorbekämpfung)

- kurzzeitig und saisonal oder geografisch bedingt (Glykole bei Enteisung, Insektizide bei Schädlingsbefall),
- diskontinuierlich sporadisch (Emissionen durch z.B. Interieur-Erneuerung, Bordservice oder Gebrauch von Reinigungsmitteln und Kosmetika),
- zufällig, selten (Kontaminationen durch Schäden an Leitungen und Dichtungen)

aufreten, wobei Menge und Dauer der Einträge starken Variationen unterworfen sein können.

Diese unterschiedlichen Szenarien sind allerdings größtenteils keine flugzeugspezifischen Besonderheiten, da auch in anderen Innenräumen verschiedene Emissionscharakteristiken auftreten, wie die Abbildung 5 in Kapitel IV – 1.2 Innenräume verdeutlicht.

Das Portfolio an möglichen Einträgen chemischer Substanzen in die Flugzeugkabine und die besondere Belüftungssituation im Flugzeug stellen hohe Anforderungen an die Untersuchungsstrategien, um eine umfassende Bestandsaufnahme zur der Kabinenluftqualität zu erstellen.

3 Sondersituationen, sogenannte „Fume Events“ oder „Smell Events“

3.1 Gesundheitsbeeinträchtigungen

Die Gesundheitsbeeinträchtigungen durch Kabinenluft werden oftmals im Zusammenhang mit ungewöhnlichen Gerüchen, sogenannten „Smell Events“ oder „Fume Events“, berichtet. Der Geruch wird unter anderem mit Begriffen wie „nasser Hund“, „alte Socken“ oder „süßlich verbrannt“ beschrieben. Eine Studie der britischen Cranfield University (Bagshaw 2016) schätzt, dass bei jedem 2 000. Flug über mögliche Öldämpfe oder andere ungewöhnliche Gerüche berichtet wird. Andere Studien kommen zu geringeren Fallzahlen. Insgesamt sind diese Daten aufgrund stark subjektiv geprägter Meldecharakteristiken und zahlreicher weiterer Unsicherheiten als wenig valide anzusehen. Über das Problem wird seit den 1950er-Jahren episodenartig berichtet, aber die Zahl der

Meldungen über derartige Ereignisse hat in den vergangenen Jahren zumindest in bestimmten Staaten (z.B. Deutschland, Vereinigtes Königreich, Österreich) stetig zugenommen. Besonders in den Medien wird speziell in diesen Ländern dargestellt, dass mit derartigen „Fume oder Smell Events“ akute und chronische Gesundheitsbeeinträchtigungen verbunden sind, die mit dem Begriff „Aerotoxisches Syndrom“ als ein angeblich neues Krankheitsbild beschrieben werden. Wie eingangs erwähnt, ist diese Zuordnung nach aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht bewiesen, was eine Diskussion aus umweltmedizinischer Sicht sinnvoll erscheinen lässt. Zu den am häufigsten genannten Beschwerden zählen: Benommenheit, Schwindel, Kopfschmerzen, Atemwegsreizungen und sensorische Wahrnehmungsstörungen wie Kribbeln oder Taubheitsgefühle. Diese mit dem sogenannten „Aerotoxischen Syndrom“ assoziierten Symptome sind generell eher unspezifisch und somit schwer von anderen Krankheitsbildern zu differenzieren (s. Tab. 3). Der unspezifische Charakter der Symptome, meist ohne nachweisbare chemische Stoffbelastung, erinnert an andere innenraumassoziierte Beschwerdebilder, wie sie beispielsweise beim Sick-Building-Syndrom (SBS) und dem Multiple Chemical Sensibility Syndrom (MCS) in den letzten 20 Jahren in westlichen Ländern gehäuft auftraten, zurzeit aber von Patienten deutlich seltener geäußert werden.

Viele Berichte führen die Entwicklung des „Aerotoxischen Syndroms“ auf eine kurzfristige oder dauer-

hafte Kontamination der Atemluft mit (Öl-) Dämpfen von Triebwerksölen zurück. Da seit den 1960er-Jahren die sogenannte Zapfluft (engl. bleed-air) in fast allen gängigen Passagierflugzeugtypen aus dem Verdichterbereich der Triebwerke angesaugt wird, können technisch gesehen geringe Ölmengen aus Undichtigkeiten an den Wellendichtungen enthalten sein. Die erhöhte Temperatur und der erhöhte Druck im Entnahmehbereich der Zapfluft der Triebwerke können möglicherweise für die Freisetzung neu gebildeter Stoffe verantwortlich sein, darunter Kohlenmonoxid, Kohlendioxid oder auch eine Vielzahl an flüchtigen organischen Komponenten (VOC, SVOC). Der Ölgeruch und die evtl. hierdurch ausgelösten Irritationen sollten jedoch erst bei hohen Luftkonzentrationen auftreten.

3.2 Ursachenfindung

3.2.1 Können Bestandteile von Triebwerksölen Auslöser von Gesundheitsstörungen sein?

Als Hauptursache für die beschriebenen Gesundheitsbeeinträchtigungen wird häufig Trikresylphosphat (TKP, engl. TCP) angeführt, das in Konzentrationen von ca. 3 % den Turbinenölen – wie auch bei diversen anderen Ölen – als Verschleißminderer zugesetzt wird. TCP sind die Phosphorsäuretriester von Kresolen (Methylphenole), wobei ausgehend von meta-, para- und ortho-Kresol bei der Veresterung mit Phosphorsäure bzw. bei der Umsetzung der Kre-

Tab. 3: „Aerotoxisches Syndrom“: Akute und chronische Effekte (Winder u. Balouet 2002, Winder 2006)

	Akute Effekte	Chronische Effekte
neurotoxische Symptome	Sehstörungen, wie z.B. Tunnelblick, Gleichgewichtsstörungen, Desorientierung, Bewusstlosigkeit, Tremor, Krämpfe, Parästhesien	Taubheit der Finger, Lippen, Gliedmaßen, Parästhesien
neuropsychologische Symptome	Unkonzentriertheit, Kopfschmerzen, Benommenheit, Schwindel, Verwirrtheit, Angstgefühl, Schlafstörungen, posttraumatische Belastungsstörung (PTSD)	Unkonzentriertheit, Vergesslichkeit, Depression, Schlaflosigkeit, Schwindel, heftige Kopfschmerzen, posttraumatische Belastungsstörung (PTSD)
gastrointestinale Symptome	Übelkeit, Erbrechen	Speichelfluss, Übelkeit, Erbrechen, Durchfall
Atemwegssymptome	Husten, Kurzatmigkeit, Engegefühl, Erstickungsgefühl	Husten, Kurzatmigkeit, Atemstillstand, Engegefühl, Infektanfälligkeit
Herz-Kreislauf-Symptome	erhöhter Puls, Herzrasen	erhöhter Puls, Herzrasen, Schmerzen in der Brust
Reizwirkungen	Auge, Nase, Atemwege	Auge, Nase, Atemwege
allgemeine Symptome	z.B. Erschöpfung, Muskelschwäche	Schwäche und Müdigkeit, Hitzewallungen, Erschöpfung, Muskelschwäche, Gelenkschmerzen
Empfindlichkeit		Zeichen der Immunsuppression, Chemikalienunverträglichkeit

an Befindlichkeitsstörungen, deren Symptome alle Menschen mehr oder weniger gut kennen, nicht unterschätzt werden und verlangt immer eine klinische erfahrende Bewerterin oder Bewerter. Gerade die *Tabelle 14* zeigt exemplarisch, in welchem Maße Symptome ohne direkten Krankheitswert und stattgefunden Exposition in der Bevölkerung verbreitet sind und möglicherweise zu Fehleinschätzungen in der Bewertung führen können.

So lässt eine differenzierte Bewertung nach dem 3-Ebenen-Modell, basierend auf einer Meta-Ebene zusammen mit Ergebnissen konkordanter Studien, keine akute bzw. subakute gesundheitliche Gefährdung im Innenraum von Flugzeugen durch Zapfluft und Innenraummissionen erkennen.

6 Zusammenfassung

Der in einer hochkomplexen Maschine integrierte Innenraum „Flugzeugkabine“ kann sicherlich nicht alle Vorstellungen eines idealen Innenraumes im Hinblick auf das chemische Stoffinventar jederzeit erfüllen. Weitere Verbesserungen der Luftqualität sind deshalb, wie auch in anderen Lebensbereichen (Wohnräumen, Büros, Schulen etc.), durchaus erwünscht. Im Rahmen der Risikowahrnehmung und der diesbezüglichen Diskussion ist es zwingend erforderlich, die vorhandene Faktenlage mit wissenschaftlichen Methoden zu untersuchen. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand kann von einem „Vergiftungsszenario“ nicht die Rede sein. Auch gibt es derzeit aus den Untersuchungen der Kabinenluft oder zur internen Belastung keine Hinweise auf ein Gefährdungspotenzial im Sinne eines „aerotoxischen Syndroms“. Das ist nicht gleichbedeutend damit, dass innenraumhygienische Unzulänglichkeiten und somit umweltmedizinisch assoziierte Beschwerden kategorisch ausgeschlossen werden können. Deshalb sollte das Thema „Kabinenluftqualität“ auf wissenschaftlicher, technischer, regulatorischer, medizinischer und politischer Ebene kontinuierlich vorangetrieben werden, um diesen besonderen Innenraum auch künftig noch sicherer zu gestalten. Neben Fragen zu chemischen Stoffen sollten auch exogene Faktoren, die nicht technischer oder chemischer Natur sind, wie z.B. psychosoziale Faktoren, mit in die Betrachtungen einbezogen werden, um alle Facetten zur Problematik der „kontaminierten Kabinenluft“ weiter zu beleuchten.

7 Literatur

- Abou-Donia MB (2003). Organophosphorus ester-induced chronic neurotoxicity. In: Archives of environmental health 58 (8): 484–497. DOI: 10.3200/AEOH.58.8.484–497
- Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV) (2016). Flugverkehrszahlen Deutschland. Online verfügbar unter <http://www.adv.aero/verkehrszahlen/archiv/>, zuletzt aktualisiert am 01.02.2016
- ATAG (Air Transport Action Group) 820149: Aviation Benefits Beyond Borders. Online verfügbar unter http://aviationbenefits.org/media/-26786/ATAG_AviationBenefits2014_FULL_LowRes.pdf
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (2012): Toxicological Profile for Phosphate Ester Flame Retardants. Online verfügbar unter <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp202.pdf>, zuletzt geprüft am 29.01.2018
- Aygun D, Doganay Z, Altintop L, Guven H, Onar M, Deniz T, Sunter T (2002). Serum acetylcholinesterase and prognosis of acute organophosphate poisoning. In: Journal of toxicology. Clinical toxicology 40(7): 903–910
- Bagsshaw M (2016). Reported cabin fume events: What did investigations show? Symposium „Aerotoxic Syndrome“. In: 36th International Congress of the European Association of Poisons Centres and Clinical Toxicologists (EAPCCT) 24–27 May, 2016, Madrid, Spain
- BayEUG (2000). Bayerisches Gesetz über das Erziehungs- und Unterrichtswesen (BayEUG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Mai 2000 (GVBl. S. 414, 632) BayRS 22.30-1-1-K (Art. 1–123) – Bürgerservice. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayEUG?AspxAutoDetectCookieSupport=1>, zuletzt geprüft am 08.01.2018
- Begemann K, Feistkorn E, Friedemann M, Gessner M, Glaser N, Keipert R (2015). Arztliche Mitteilungen bei Vergiftungen 2011–2013. Herausgeber: BfR-Pressestelle Redaktion: Fachgruppe Vergiftungs- und Produkt-dokumentation. Online verfügbar unter <http://www.bfr.bund.de/cm/350/aerztliche-mitteilungen-bei-vergiftungen-2011-2013.pdf>
- Bergh C, Torgrip R, Emenius G, Ostman C (2011). Organophosphate and phthalate esters in air and settled dust – a multi-location indoor study. In: Indoor air 21(1): 67–76. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2010.00684.x
- Bond HF, Field EJ, Worden AN, Hughes JPW (1960). A study on the acute toxicity of the triaryl phosphates used as plastizers. In: Brit J industr Med (17): 190–200
- Bradman A, Castorina R, Gaspar F, Nishioka M, Colón M, Weathers W (2014). Flame retardant exposures in California early childhood education environments. In: Chemosphere 116: 61–66. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.02.072
- Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung (Herausgeber) (2014). Studie über Ereignisse in Verbindung mit Kabinenluft, BFU 803.1–14 (2014). https://www.bfu-web.de/DE/Publikationen/Statistiken/Tabellen-Studien/Tab2014/Studie_Fume_Events_2014.pdf?__blob=publicationFile
- Chaturvedi AK (2011). Aerospace toxicology overview: aerial application and cabin air quality. In: Reviews of environmental contamination and toxicology 214: 15–40. DOI: 10.1007/978-1-4614-0668-6_2
- ChemG (Chemikaliengesetz-ChemG) (2013). Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen in der Fassung der Bekanntmachung vom 28.08.2013. Fundstelle: BGBl. I S. 3498, 3991. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/chemg/BJNR017180980.html>
- Civil Aviation Authority (CAA) (2015). Flight data. Online verfügbar unter <http://wwwcaa.co.uk/Data-and-analysis/>, zuletzt aktualisiert am 07.12.2015
- Costa LG, Cole TB, Jarvik GP, Furlong CE (2003). Functional genomic of the paraoxonase (PON1) polymorphisms. Effects on pesticide sensitivity, cardiovascular disease, and drug metabolism. In: Annual review of medicine 54: 371–392. DOI: 10.1146/annurev.med.54.101601.152421
- Crump D, Harrison P, Walton C (2011a). Aircraft Cabin Air Sampling Study; Part 2 of the Final Report. Cranfield University
- Crump D, Harrison P, Walton C (2011b). Aircraft Cabin Air Sampling, Study; Part 1 of the Final Report. Cranfield University
- de Boer J, Antelo A, van der Veen I, Brandsma S, Lammertse N (2015). Tricresyl phosphate and the aerotoxic syndrome of flight crew members – current gaps in knowledge. In: Chemosphere 119(Suppl): 58–61. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.05.015
- de Ree H, van den Berg M, Brand T, Mulder GJ, Simons R, Veldhuijzen van Zanten B, Westerink RHS (2014): Health risk assessment of exposure to