

Jagerflyging og effekter på lungene

Prosjektoppgave ved profesjonsstudiet i medisin,

Universitetet i Oslo,

Mars 2014

Christoffer K. Smith
Medisinstudent

Veileder:
Anthony S. Wagstaff,
MD, DAvMed, PhD, MBA,
Sjef Flymedisinsk institutt,
Førsteamanuensis, Universitetet i Oslo

1. Abstract

High performance flying and effects on pulmonary function

1.1 Background

Flying high performance aircraft subjects the pilot to physical stress beyond the limits of human tolerance. The pilot faces challenges such as G-forces, low pressure environment and hypoxic air. Some research was done in the mid-1900s to explore the effects of flying on the human body. However, most research focused on topics relevant for enhancing the pilot's performance in the working situation in cockpit, less on pathologic effects of flying. Knowing that a lot of the physical stress on the pilot during high performance flying is directly affecting the lungs, the aim of this paper has been to answer the following question: How does high performance flying affect pulmonary function, both in the short and long term?

1.2 Method

I did a systematic search on PubMed and read titles and abstracts of 597 articles, selecting 11 relevant articles for a critical review. Further I did non-systematic searches in the NATO AGARD-library, UpToDate, and reference lists. I also used Ernsting's Aviation Medicine (4th ed., 2006), one of the most renowned textbooks of aviation medicine.

1.3 Results

There is good evidence that increasing G-forces change the ventilation-perfusion equilibrium in the lungs. Breathing 100 % oxygen results in absorption atelectasis. G-forces, 100 % oxygen and G-suits all contribute to acceleration atelectasis and reduced vital capacity (VC). There is also evidence that poisonous gases and ozone present in cockpit may cause inflammation in the airways. The potential pathological effects of Positive Pressure Breathing (PPB) are unknown.

As for long term effects only a few studies exist and the results are inconsistent. The research is more than 20 years old – thus it has not taken into account effects of fourth generation fighter planes introduced in the 80s and 90s. In addition these studies lack certain quality requirements that apply to research today.

1.4 Conclusion

High performance flying has immediate effects on lung function, both as a result of the flying itself and by the variety of aids that help the pilot maintain his function in a physically demanding situation. There is a great lack of knowledge about high performance flying and long term pathologic effects on pulmonary function. Further research on the topic is required.

Innholdsfortegnelse

| | |
|--|----|
| 1. Abstract | 2 |
| 1.1 Background..... | 2 |
| 1.2 Method..... | 2 |
| 1.3 Results | 2 |
| 1.4 Conclusion | 2 |
| 2. Liste over forkortelser | 4 |
| 3. Innledning..... | 5 |
| 3.1 Bakgrunn | 5 |
| 3.2 Helsemessige konsekvenser av flyging..... | 5 |
| 3.3 Lungenes betydning | 6 |
| 3.4 Flygerens hjelpemidler | 8 |
| 3.4.1 Trykkabin | 8 |
| 3.4.2 Oksygen | 8 |
| 3.4.3 Overtrykkspusting/Positive pressure breathing (PPB) | 8 |
| 3.4.4 Anti-G-manøver (Anti-G Straining Maneuver, AGSM) og G-bukser | 8 |
| 3.4.5 Sittestilling | 9 |
| 3.5 Seleksjon og kontroll av lungefunksjon av jagerflygere i Norge | 9 |
| 3.6 Problemstilling..... | 10 |
| 4. Metode | 11 |
| 4.1 Litteratursøk | 11 |
| 4.2 Komplementær litteraturinnhenting..... | 12 |
| 5. Resultater | 12 |
| 5.1 Kortvarige effekter på lungene | 12 |
| 5.1.1 G-belastning (+Gz) | 12 |
| 5.1.2 Pusting av rent oksygen / absorpsjonsatelektase | 13 |
| 5.1.3 Akselerasjonsatelektase | 14 |
| 5.1.4 Positive pressure breathing (PPB) | 15 |
| 5.1.5 Forurensning og ozon..... | 15 |
| 5.2 Langsiktige effekter på lungene | 15 |
| 6. Diskusjon | 17 |
| 6.1 Kortsiktige effekter | 17 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 6.2 Langsiktige effekter | 18 |
| 7. Konklusjon | 18 |
| 8. Litteratur..... | 19 |

2. Liste over forkortelser

| | |
|------|--|
| AGSM | Anti-G straining maneuver |
| CPAP | Continuous positive airway pressure |
| DLCO | Diffusing capacity of the lung for carbon monoxide |
| FEV1 | Forced expiratory volume in 1 second |
| FMI | Flymedisinsk institutt |
| FRC | Functional residual capacity |
| FVC | Forced vital capacity |
| GLOC | G-induced loss of consciousness |
| MVV | Maximal voluntary ventilation |
| PPB | Positive pressure breathing |
| TLCO | Transfer factor of the lung for carbon monoxide |
| VC | Vital capacity |

3. Innledning

3.1 Bakgrunn

Brødrene Wright gjennomførte sin første flyvning i 1903, og hendelsen markerte starten på menneskets bruk av motorfly. I løpet av 1900-tallet gjennomgikk flyene en rivende teknisk utvikling og ytelsesmessige begrensninger ble tilsvarende redusert. Allerede på 70-tallet leverte produsentene state-of-the-art jagerfly som i teorien kunne fly to ganger lydets hastighet og tålte påkjenninger på ni ganger tyngdekraften. Et av disse var Lockheed Martins F-16, som Luftforsvaret i Norge tok i bruk i januar 1980.

Under flyging utsettes menneskekroppen for påkjenninger som varierer med flytype og hensikten med flygingen. Flyging med militære jagerfly i simulert eller reell luftkamp utsetter flygeren for noen av de tøffeste fysiske belastningene et menneske kan oppleve. Samtidig stilles store krav til psykisk og fysisk kapabilitet i selve situasjonen. Flygeren skal altså både tåle belastningen - og prestere på høyt nivå underveis.

Kravene til flygerne har også gjennomgått forandringer siden flygingens begynnelse. På den ene siden har teknologisk og medisinsk utvikling muliggjort bedre undersøkelser og dermed mer nøyaktig seleksjon av potensielle flygere. På den andre siden har også meningene om hva som er viktige egenskaper hos en flyger endret seg – mer eller mindre godt fundamentert i evidensbasert forskning. Blant annet syn, hørsel og kardiopulmonær status vektlegges i dag som rent medisinske faktorer.

I løpet av romkappløpet under Den kalde krigen fokuserte forskerne på problemstillinger som kunne bidra til å utvide grensene for menneskets tåleevne. Eksempelvis gjorde Sass og kolleger (1) hundeforsøk med pusting av oksygenert væske for å se om dette kunne øke lungenes toleranse for G-krefter. Selv om væskepusting i teorien ville gjort mennesket i stand til å motstå langt mer ekstreme belastninger enn normalt, konkluderte de med at det var praktisk umulig.

Etter Den kalde krigens slutt har den datateknologiske utviklingen gjort at fremtiden i militær luftfart knyttes nært til ubemannede fly, et område som er høyt prioritert hos verdens stormakter (2). Videre har trusselbildet endret seg og gjort at mindre nasjoner fokuserer mer på luft-til-bakke enn luft-til-luft-kapabilitetene til kampflyene sine. Scenarioet med innbyrdes luftkamp mellom jagerfly og store påkjenninger for fly og flyger har blitt mindre sannsynlig. Behovet for å presse grensene når det gjelder menneskets fysiske begrensninger har således blitt mindre. Dette kan gjenspeiles i at F-35, Norges arvtaker til F-16, forventes å ha lavere maksfart og tåle samme G-belastning som F-16, selv om det er nesten 40 år nyere.

3.2 Helsemessige konsekvenser av flyging

Når det gjelder kunnskap om helsemessige konsekvenser av å jobbe som jagerflyger foreligger en del dokumentasjon. Likevel har forskningen vært fokusert rundt problematikk som gir symptomer direkte i arbeidssituasjonen, det vil si spørsmål knyttet til flysikkerhet og flygers funksjon i cockpit. Dette var nok naturlig all den tid man prioriterte å utforske menneskets grenser og arbeide preventivt mot ulykker.

Ved en gjennomgang av en av de mest kjente lærebøkene i faget flymedisin, Ernsting's Aviation Medicine, finner man flere kapitler dedikert til ulykker og hva slags skader de kan resultere i. Det er også grundig gjennomgått i hvilken grad ulike sykdommer gjør en person uskikket til flygende tjeneste. Videre omtales relativt grundig problemer som hypoksi, dekompresjon, vibrasjon og støy. Det som derimot synes å mangle er en bredere tilnærming med fokus på helsemessige konsekvenser på lang sikt(3). I fagmiljøet ved Flymedisinsk Institutt (FMI) er man godt kjent med nakkeskader hos jagerflygere og hørselsskader hos flygere generelt. Men kunnskapsgrunnlaget rundt annen symptomatikk som kan oppstå etter endt flygerkarriere er begrenset.

3.3 Lungenes betydning

To viktige elementer som kan skape utfordringer ved jagerflyoperasjoner er høy G-belastning og operasjoner i store høyder. Sammenliknet med helikoptre og passasjerfly tåler jagerfly svært store akselerasjonskrefter. Eksempelvis kan F-16 klare belastning tilsvarende ni ganger tyngdekraften (+9Gz). Flygeren blir i en slik situasjon naturlig nok utsatt for de samme kreftene, og må både tåle det og yte på høyt nivå underveis.

Problematikk knyttet til store høyder er relevant under jagerflyoperasjoner av flere årsaker. Jagerfly har mulighet til å operere i høyder der lufttrykket – og dermed oksygentrykket – er så lavt at et menneske ville blitt hypoksisk i løpet av sekunder. Der Luftforsvarets Hercules transportfly opererer med en maksimal marsjhøyde på 34 000 fot kan F-16 fly i høyder over 45 000 fot. Dette medfører større risiko for hypoksi og nødvendiggjør at jagerflygeren tar andre forholdsregler enn transportflygeren, for eksempel kontinuerlig bruk av oksygen. Selv ved umiddelbar tilførsel av oksygen etter tap av kabintrykk i 30 000 fots flyhøyde vil flygerens alveolære oksygentrykk synke under en kritisk grense hvor det oppstår fare for å miste bevisstheten (3, pp 42-54).

Dette illustreres i figur 1 nedenfor. Ved havoverflaten utgjør trykket av atmosfæren 760 mmHg. Atmosfæretrykket synker etter som høyden over havet øker, og er halvert til 380 mmHg ved omtrent 18 000 fot over havet. Oksygen utgjør 21 % av bestanddelene i normal luft. Partialtrykket til oksygen i atmosfæren vil derfor synke i takt med at det totale atmosfæretrykket synker når høyden over havet øker. Et menneske på 18 000 fot vil derfor puste inn luft som inneholder halvparten så mye oksygen som ved havoverflaten. Figur 1 viser hvordan atmosfæretrykket synker med økende høyde, og hvilken effekt dette har på arteriell oksygenmetning i et menneske.

| Blood Oxygen Saturation By Altitude | | |
|-------------------------------------|--|-----------------------------|
| Altitude (feet) | Arterial O ₂ Saturation Without Supplemental O ₂ | Atmospheric Pressure (mmHg) |
| 0 | 96% | 760 |
| 5,000 | 95% | 632 |
| 7,500 | 93% | 575 |
| 10,000 | 89% | 523 |
| 12,500 | 87% | 474 |
| 14,000 | 83% | 446 |
| 16,500 | 77% | 403 |
| 20,000 | 65% | 349 |
| 25,000 | Below 60% | 282 |

"The Pilot: An Air Breathing Mammal," Mehler, Stanley R. MD, Human Factors Bulletin, Flight Safety Foundation, 1981.

Figure 1: Oksygenmetning i blodet som funksjon av høyde over havet

Et annet mulig faremoment i store høyder er dekompresjon, som kan sammenliknes med dekompresjonsproblematikken hos dykkere. Hvis det skjer en eksplosiv dekompresjon i stor høyde under flyging vil trykket i lungene være langt større enn trykket utenpå kroppen. Det kan da oppstå skader dersom gassen i lungene ikke slipper ut tilstrekkelig raskt. Litteraturen beskriver problemet på ulike måter, og kaller det blant annet «pulmonalt barotraume», «pulmonary overinflation syndrome (POIS)» og «lungesprengning». Resultatene kan være pneumothorax, traumatisk mediastinal/subkutant emfysem og arterielle luftembolier. Problemet forekommer riktignok svært sjeldent (4-8).

Konsekvensen av både G-belastning og hypoksi kan i verste fall bli for liten oksygentilførsel til hjernen, med påfølgende redusert prestasjon, bevisstløshet og eventuelt død. En del av nøkkelen til tilstrekkelig oksygentilførsel ligger nettopp i lungene. I teorien kan også en person med obstruktive lunger ha økt risiko for skader som lungesprengning ved relativt sett lavere høyder enn en frisk person. For at jagerflygeren skal kunne prestere godt i luften, og for at sikkerheten skal være best mulig ivaretatt, er god lungefunksjon av stor betydning.

Som man kan se utsettes lungene for store belastninger under jagerflyging. På grunn av miljøet de opererer i er det i tillegg økt risiko for skader på lungene ved ulykker og uforutsette hendelser hos jagerflygere enn hos andre flygere. Det var ikke uten grunn at Wood kalte lungene for menneskets Akilleshæl i miljøer med høy G-belastning (9). Nedenfor skal jeg også beskrive en del verktøy som flygeren benytter i sitt arbeid, og som kan bidra ytterligere til å øke belastningen på lungene.

3.4 Flygerens hjelpemidler

Jagerflygere har ulike hjelpemidler for å motvirke de ugunstige effektene av operasjoner i store høyder og høy G-belastning. Enkelte av hjelpemidlene kan i seg selv gi opphav til nye problemstillinger, men man vurderer altså at gevinsten av å bruke dem oppveier ulempen. Nedenfor følger en gjennomgang av verktøy som en jagerflyger kan ha til disposisjon.

3.4.1 Trykkabin

På samme måte som for de fleste transport-/passasjerfly er kabinen til jagerflyene trykksatt. Mens et passasjerfly kan operere med en trykkforskjell mellom kabin og utside på ½ atmosfæres trykk, har et jagerfly som regel en maksimal forskjell på 0,3 atmosfæres trykk (3, pp 113-114). Volumet av en jagerflykabin er så lite at en skade på selve kabinen eller en feil i trykksettingsmekanismen vil medføre en momentan utlikning av trykkforskjellen mellom innsiden og utsiden. Som nevnt tidligere kan det medføre både hypoksi og lungeskade. I større fly tar denne utlikningsprosessen lengre tid, og det betyr at flygerne i disse maskinene har bedre tid til å ta på seg oksygenmasker og starte nedstigning til lavere høyder.

3.4.2 Oksygen

I F-16 bruker flygeren maske under hele flyturen. I flyhøyder over 23 000 fot leverer masken «on demand» oksygen, det vil si at oksygenkonsentrasjonen i innåndingsluften automatisk øker med økende høyde over havet. Masken leverer på det meste 100 % oksygen, og flygeren kan også manuelt skru over på 100 % oksygen ved behov. Men selv med pusting av 100 % oksygen er det begrensninger i maksimal flyhøyde på grunn av faren for hypoksi.

3.4.3 Overtrykkspusting/Positive pressure breathing (PPB)

For ytterligere å øke makshøyden er noen jagerfly utstyrt med overtrykksventilasjonsystemer. Disse leverer oksygen med overtrykk i høyder over havet der mennesket ellers ville blitt hypoksisk ved pusting av kun 100 % oksygen. Dette øker oksygentrykket i alveoleluften. PPB kan i beste fall sørge for tilstrekkelig høy oksygenkonsentrasjon i lungeluft ved flyhøyder over 60 000 fot (10, 11). Systemet har også gunstige effekter ved G-belastning, ved å bidra til å øke arterietrykket slik at flygeren opprettholder cerebral perfusjon (11).

3.4.4 Anti-G-manøver (Anti-G Straining Maneuver, AGSM) og G-bukser

Flygeren kan benytte seg av en anti-G-manøver for å øke G-toleransen. Dette er en teknikk der man strammer musklene i bein og mage og samtidig lukker glottis, for slik å øke det intrathorakale trykket. Flygeren kan også bruke såkalte G-bukser, som blåses opp og yter et motpress mot flygerens bein og hofter under G-belastning. Effekten skal være den samme ved begge metodene – nemlig å øke

arteriestrykket og hjelpe den venøse tilbakestrømningen til hjertet. Slik forbedres også G-toleransen (10, 12).

3.4.5 Sittestilling

Setet i Norges F-16 plasserer flygeren i en 30 grader tilbakelent posisjon. Dette minsker den vertikale avstanden fra hjertet til hjernen. På den måten får hjernen tilstrekkelig blodtilførsel ved et lavere arteriestrykk enn når flygeren sitter i normalt oppreist posisjon.



Figure 2: ACES II sete i F-16 (13)

3.5 Seleksjon og kontroll av lungefunksjon av jagerflygere i Norge

Nettopp på grunn av lungenes sentrale rolle, både som premissleverandør for flygerens funksjon og som en brikke i eksternt påført fysiologisk støtte, er det relevant å danne seg et godt bilde av lungenes funksjon hos flygere. Green mener at de små luftveier kan få omfattende skader uten at dette gjenspeiler seg i kliniske symptomer ved havnivå. Derimot kan slike skader gi betydelig reduksjon av oksygenmetning i blodet ved større høyder (14). Det er derfor nødvendig med undersøkelser som kan avdekke subklinisk patologi i lungene.

Obstruktive tendenser og skader i de små luftveier gir typiske og reproducerbare forandringer i spirogrammer og andre lungefunksjonsmålinger(14). Flygere i Luftforsvaret gjennomgår en omfattende lungefunksjonsundersøkelse ved FMI i forbindelse med seleksjon til flygerutdannelsen, og deretter ved FMI hvert sjette år frem til fylte 40 år (hvert tredje år for flygere over 40 år). I tillegg utføres årlige spirometriske tester ved flygerens hjemmestasjon.

Fra 1960-tallet og frem til 1989 brukte FMI en Vitalograph fra Maids Moreton House til de spirometriske undersøkelsene. Fra 1989 til 1992 brukte FMI en Vitalograph Compact, og fra og med 1992 har man utført undersøkelsen med et Jaeger Masterlab spirometer. Foruten målinger av forsert vitalkapasitet (FVC) og forsert ekspiratorisk volum i løpet av 1 sekund (FEV1), undersøkes også maksimal voluntær ventilasjon (MVV) og diffusjonskapasitet (TLCO/DLCO). Undersøkelsene gjøres av godt trent og svært erfarent helsepersonell, da det de siste tiårene har vært svært liten utskiftning av personellet som gjør disse undersøkelsene ved FMI. Flygeren oppgir også om han røyker eller ikke, og dersom flylegen mistenker lungesykdom utredes dette umiddelbart.



Figure 3 Vitalograph brukt ved FMI fra 60-tallet frem til 1989 (15)

I henhold til Luftforsvarets reglement om medisinske krav til luftpersonell, stilles følgende krav til aspiranter til jagerflyutdannelsen: «Søkeren skal være lungefrisk. Ingen innskrenkning av statiske eller dynamiske lungevolum, diffusjonskapasitet og maksimal ventilasjonskapasitet i forhold til kjønn, alder, høyde og vekt. Minstekrav ved seleksjon er FEV1/FVC over eller lik 75 %.» Vedlikeholds krav for resten av karrieren er FEV1/FVC over eller lik 70 % (16). Dette tar hensyn til den naturlige aldersrelaterte nedgangen i FEV1/FVC som starter et stykke inn i 30-årene (17). FMI gjør likevel en skjønnsmessig vurdering av grensetilfeller hos personer der det ikke er økt risiko for lungesykdom (Personlig meddelelse, Underdirektør Anthony Wagstaff).

3.6 Problemstilling

Lungene har stor betydning for en jagerflygers funksjonsevne. Samtidig utsettes de for påkjenninger de i utgangspunktet ikke er skapt for. Det gjelder både langvarige og kontinuerlige belastninger som pusting av rent oksygen, og kortvarige, men hyppige belastninger som G-krefter. I Luftforsvaret og ved FMI anses lungenes tilstand som så viktig at lungefunksjonsmålingene utgjør en stor del av både de årlige og seks-årlige undersøkelsene.

Jeg ønsker i denne prosjektoppgaven å undersøke hvilke effekter en karriere som jagerflyger har på lungene. Hvilke konsekvenser for lungefunksjon og eventuell forekomst av patologi medfører jagerflyging i et lengre tidsperspektiv? Fordi spørsmålet er naturlig knyttet til umiddelbare effekter på lungene av flyging, vurderte jeg det nødvendig også å studere endringer i lungene på kort sikt.

4. Metode

For å besvare problemstillingen gjorde jeg en litteraturstudie av et strategisk utvalg av artikler og annet kildemateriale. I første del av resultatkapitlet vurderer jeg artikler som omhandler umiddelbare effekter på lungene av flyging. Her har jeg avgrenset utvalget til artikler som omhandler flyging som gjenspeiler virkeligheten for en norsk F-16-flyger. I andre del av resultatkapitlet ser jeg på forskning som har tatt for seg flygingens mer langsiktige effekter på lungene.

4.1 Litteratursøk

Jeg søkte systematisk i PubMed med MeSH-termene «hypergravity/adverse effects», «lung/pathology» og «pulmonary atelectasis». For å avgrense ytterligere kombinerte jeg «lung/pathology» og ordet «aviation», og «pulmonary atelectasis» og ordet «aviation». Det viste seg at en del av litteraturen var så gammel at artiklene ikke var MeSH-indeksert. Derfor gjorde jeg enkle søk i PubMed med termene “military aviators” og “fighter pilots”. Søkene ble foretatt i perioden 2. januar – 7. mars 2014. Resultatene er gjengitt i tabell 1.

Ved å lese tittel og abstract selekterte jeg alle artikler som var relatert til flyging og lungefunksjon og studerte disse detaljert. Jeg ekskluderte ingen artikler på bakgrunn av alder eller type. Dessverre manglet både abstrakt og fulltekst for noen av artiklene med interessant tittel. Disse var verken tilgjengelige elektronisk eller på papir i bibsys-systemet. Andre potensielt interessante artikler var skrevet på russisk eller kinesisk.

Noe av utfordringen i søket relaterte seg også til hvordan forfattere bruker ulike begrep på samme tema. For eksempel betyr ordene *hypergravity*, *acceleration*, *+Gz force* og *+Gz exposure* det samme i denne sammenhengen.

Ved avsluttet søk og seleksjon satt jeg igjen med 11 artikler som omhandlet tematikken jeg var interessert i. Det store antallet ekskluderte artikler omhandlet hovedsakelig rygg- og nakkeproblematikk, andre helsemessige konsekvenser av G-krefter og kardiovaskulære problemstillinger hos flygere.

| Søkeord | Totale treff | Antall artikler etter seleksjon | Antall artikler tilgjengelig med abstract eller fulltekst |
|----------------------------------|--------------|---------------------------------|---|
| Hypergravity/adverse effects | 284 | 5 | 3 |
| Lung/pathology + aviation | 30 | 2 | 2 |
| Pulmonary atelectasis + aviation | 13 | 5 | 4 |
| Military aviators | 71 | 1 | 1 |
| Fighter pilots | 199 | 1 | 1 |

TABELL 1: Resultater fra litteratursøk

4.2 Komplementær litteraturreinhenting

På grunn av få treff ved litteratursøket var det nødvendig å finne flere kilder, og det gjorde jeg på ulike måter. Ved hjelp av litteraturlistene i sentrale artikler fant jeg ytterligere relevante artikler.

NATOs *Advisory Group for Aerospace Research and Development* (AGARD) som ble nedlagt i 1996 har et arkiv over sine tidligere publikasjoner tilgjengelig elektronisk. Jeg søkte i dette med termene «pulmonary» og «lung*».

Jeg gjorde også et søk på temaet «oxygen toxicity» på UpToDate for å få en systematisk oversikt over temaet, samt usystematiske søk etter oversiktsartikler i PubMed med ordene «absorption atelectasis» og «oxygen toxicity».

Jeg var i kontakt med fagmiljøet ved FMI og fikk via dem tilgang til rapporter som til dels ikke er tidligere publisert, til dels ikke er søkbare i PubMed eller via andre søkemotorer. Der fikk jeg også innsyn i de mer praktiske problemstillinger knyttet til flyging, hypoksi, G-belastning og pusting av 100 % oksygen.

Jeg benyttet meg i tillegg av lærebøkene *Ernsting's Aviation Medicine* (4th ed., 2006) og *Guyton and Hall textbook of medical physiology* (12th ed., 2011).

5. Resultater

5.1 Kortvarige effekter på lungene

5.1.1 G-belastning (+Gz)

Ved hjelp av forsøk med inspirasjon av ulike typer radioaktive gasser har både West og Bryan med kolleger vist at det allerede ved normal påvirkning av tyngreften (1 G) i stående stilling er regionale forskjeller i distribusjon av luft (ventilasjon) og blod (perfusjon) i lungene hos mennesker (18, 19).

Bryan med kolleger og Jones med kolleger fant i sine studier av mennesker i sentrifuger at forskjellene i ventilasjon og perfusjon i de ulike områdene i lungene øker med økende G-krefter. De konkluderte med at økende G-krefter spesielt reduserer perfusjonen til de øvre lungeavsnitt, og begrunnet det med en økt hydrostatisk trykk-gradient (19, 20). I følge Ernsting er forskjellene så omfattende at den øvre halvdel av lungen ikke perfunderes ved belastning over 4-5 G (3, pp 151-152).

Gerst med kolleger studerte effektene av endringer i lungeperfusjon ved å indusere blødning hos hunder, og fant at blodtap økte det respiratoriske dødsvolumet (21). Barr sammenliknet de studerte effektene av blodtap med hvordan perfusjonsendringer skapt av G-krefter kan bidra til å skape respiratorisk dødsvolum i lungene (22).

Flere andre forfattere har beskrevet hvordan forskjellen i ventilasjon og perfusjon mellom ulike deler av lungen har to viktige konsekvenser. Det gir en økning i det respiratoriske dødsvolumet øverst i lungen, det vil si det området som får luft, men ikke blodtilførsel. Dette får imidlertid ingen umiddelbar effekt på

kroppen. Samtidig hindres oksygenering av blodet i de lukkede lungeavsnitt basalt, da disse har perfusjon, men ikke ventilasjon. Her oppstår i praksis en høyre-til-venstre sirkulatorisk shunt som kan få stor betydning for oksygenmetningen i blodet (3, pp 150-153, 23-25).

Barr gjorde forsøk der han målte oksygenmetning hos mennesker som ble utsatt for G-krefter i sentrifuge med gjentatte eksponeringer uten lengre pauser imellom. Resultatet var et merkbart fall i oksygenmetning ved 4,5 G og videre at metningen falt raskere og til lavere nivåer for hver påfølgende eksponering. Han tilskriver denne effekten til høyre-til-venstre shunting i lungene (22). Glaister hevder at opp til 50 % av kardiell output kan shuntet på denne måten ved 5 G (26). I verste fall kan det gi så lav oksygenmetning at flygeren opplever forvirring og nedsatt kognitiv funksjon, eller til og med bevisstløshet (G-induced loss of consciousness, GLOC) (24).

Bryan med kolleger fant videre at økt G-belastning også øker pleuretrykket nederst i lungene. Det medfører at alveolene basalt i lungene blir mindre, mens de øker i størrelse i kranial retning (19). Helt nederst i lungene kan det intrapulmonale trykket overstige trykket i luftveiene, med den følge at luftveiene kollapser og avstenges. Lungevolumet når luftveiene lukkes kalles *closing volume* (lukningsvolum). Lukningen av luftveiene er midlertidig, og disse vil åpnes spontant når G-kreftene avtar (20). Dette til forskjell fra såkalt akselerasjonsatelektase, som jeg vil komme tilbake til nedenfor. Ernsting skriver at lukningsvolumet øker lineært med G-belastningen (3, pp 151-152).

I studier på effekten av vektløshet på lungefunksjon gjort i fly som fløy i paraboliske baner fant Edyvean med kolleger og Paiva med kolleger at økende G-krefter, også over 1 G, gir økt ende-ekspiratorisk volum (functional residual capacity, FRC). Forskerne mente årsaken var at diafragma synker nedover i abdomen når tyngdeakselerasjonen øker (27, 28). Bruk av G-bukse med bukblære reduserer FRC fordi abdomeninnholdet – og dermed diafragma – løftes når bukblæren blåses opp. Dette vil igjen øke antallet ikke-ventilerte alveoler i lavere del av lungene og forsterke den negative virkningen på blodets oksygenmetning (3, pp 150-152, 26). AGSM vil derimot øke FRC fordi det skjer en økning i intrathorakalt og intraabdominalt trykk (3, p 160).

Whitley gjorde en studie på 61 jagerflygere i sentrifuge og viste at økende G-krefter reduserer inspiratorisk flow, men ikke ekspiratorisk flow. Han konkluderte med at G-belastning og bruk av G-bukse ga økt vanskelighet med innpust (12).

Langdon foreslo i forbindelse med en undersøkelse av lungesyntomer hos 134 jagerflygere at sterke G-krefter øker det intrakapillære trykket og gir fokal dannelse av lungeødem (29).

Når det gjelder akutte lungeskader på grunn av G-krefter, foreligger et eksempel der Wood refererer et tilfelle av mediastinalt emfysem hos en frisk person som ble utsatt for 5,5 G i sentrifuge (23).

5.1.2 Pusting av rent oksygen / absorpsjonsatelektase

Ernsting skrev i en artikkel på 60-tallet at pusting av 100 % oksygen over tid skader alveolekapillærmembranen og reduserer diffusjonskapasiteten (30). At oksygen er potensielt skadelig for lungene er relativt velkjent også utenfor flymedisinske miljøer. I en oversikt på UpToDate oppsummeres at

pusting av høye oksygenkonsentrasjoner kan gi et variert spekter av lungeskader, fra trakeobronkitt til diffus alveolær skade. Trolig medfører det risiko for skade allerede når oksygenkonsentrasjonen overstiger normalnivået ved havoverflaten (31).

Det er rapportert om tyngdefølelse i brystet, brystmerter, hoste og dyspne hos friske forsøkspersoner 24 timer etter å ha pustet ren oksygen. Symptomene relateres til bronkitt og absorpsjonsatelektase der oksygenet har diffundert fra alveolene før det har rukket å bli erstattet av ny luft. Erytem og ødem av store luftveier har også blitt observert (31).

Shanklin fant at det er prosentandelen oksygen i luften som blir pustet, ikke partialtrykket, som er avgjørende for om det blir skade på lungene (32).

Absorpsjonsatelektase er et kjent problem fra kirurgiske operasjoner der det ventileres med 100 % oksygen i forbindelse med anestesi. O'Brien fant i en systematisk oversiktsartikkel fra 2013 ingen tegn på at absorpsjonsatelektase medførte alvorlige konsekvenser for lungefunksjon postoperativt (33).

I en annen oversiktsartikkel skriver Sjöberg og Singer at man de senere år har blitt mer forsiktig med å bruke oksygentilskudd i akutte settinger som resuscitering av nyfødte, hjerteinfarkt, slag og hjertestans, da forskning har vist at effekten faktisk kan være negativ. De konkluderer med at det er nødvendig med ytterligere undersøkelser for å fastslå om det foreligger evidens for dagens bruk av oksygen i klinisk praksis (34). Spesielt innen nyfødtdedisinen har man allerede gått bort fra å gi oksygentilskudd til nyfødte i de første timene av livet etter at omfattende forskning har vist at det er mer skadelig enn gunstig (35).

5.1.3 Akselerasjonsatelektase

Flere forfattere beskriver at flygere gjennom tidene har rapportert om ubehagelige symptomer i etterkant av flyging, blant annet brystmerter, hoste og vansker med å puste. Disse symptomene tilskrives såkalt akselerasjonsatelektase, det vil si absorpsjon av innestengt alveolær gass når tilførende luftveier lukkes på grunn av akselerasjonskrefter (24, 29, 30, 36-39). En del av disse forskerne har foreslått at symptomene også kan komme av økt intrakapillært trykk med påfølgende ødemdannelse i lungene (29, 30, 39).

G-belastning, pusting av 100 % oksygen og bruk av G-bukse virker gjensidig forsterkende på utviklingen av akselerasjonsatelektase. Problemet øker i omfang ved pusting av 100 % oksygen fordi ren oksygen i alveoleluften gjør at absorpsjonen fra alveolene går raskere. Absorpsjonen øker også ved økt G-belastning fordi perfusjonen øker i de basale deler av lungene, og oksygenet dermed fjernes raskere fra alveolene. G-bukse bidrar ved at diafragma heves og lungevolumet reduseres når bukblæren i G-buksen blåses opp (26, 36).

York viste ved hjelp av tre forsøkspersoner i jagerfly at akselerasjonsatelektase etter G-belastning og pusting av 100 % oksygen gir en signifikant reduksjon i vitalkapasitet (VC) på opptil 28 %. Fysisk undersøkelse av forsøkspersonene var derimot upåfallende (37).

Browning fant også nedsatt vitalkapasitet etter G-belastning og pusting av 100 % oksygen, på det meste opp til 37 % reduksjon. Han viste videre at volumtapet er 3,5 ganger større hos røykere, og at selv kortvarig og lav G-belastning gir seg utslag i redusert VC. Også hans studie ble utført på flygere i jagerfly, med totalt 23 forsøkspersoner (39).

Haswell og medarbeidere brukte sentrifuge i sitt forsøk, og påviste signifikant reduksjon i vitalkapasitet ved pusting av oksygenkonsentrasjoner på 70 % eller mer (38).

5.1.4 Positive pressure breathing (PPB)

PPB benyttes med trykk på 95 cm H₂O og høyere. CPAP som medisinsk behandling starter oftest med en trykkinnstilling på 5 cm H₂O, og derfor er ikke disse metodene nødvendigvis sammenliknbare (11). Det som foreligger av forskning om overtrykkspusting relatert til flyging dreier seg hovedsakelig om gunstige effekter på G-toleranse og motvirkning av hypoksi. Dette gjennomgås i oversiktsartikler av Clere (10) og Lauritzsen og Pfitzner (11).

Når det gjelder overtrykkspusting og direkte effekter på lungene er det gjort enkelte studier, men ikke i fly-relaterte settinger. I sitt forsøk med å påføre hunder blødning fant Gerst med medarbeidere at overtrykkspusting reduserer blodstrømmen i lungene og kan avstenge deler av karsengen i lungene totalt (21). Bjurstedt med medarbeidere studerte respiratorisk og sirkulatorisk respons hos åtte forsøkspersoner som pustet med 30 cm H₂O overtrykk. Konklusjonen var at PPB gir hyperventilasjon og respiratorisk alkalose hos personer i hvile (40).

5.1.5 Forurensning og ozon

Ulike forfattere har lansert andre problemområder knyttet til lungefunksjon og flyging. West (24) og Ming med kolleger (41) foreslo at giftige gasser i cockpit kunne gi skader på lungene. Sistnevnte har også foreslått at pusting av kald, tørr luft i cockpit kan indusere bronkokonstriksjon både på kort og lang sikt (41).

Et annet spørsmål som har vært diskutert er hvorvidt høye ozon-nivåers bronkokonstrangerende effekt kan være problematisk for flygere. Ozon-konsentrasjonen i 40 000 fot er ca 1 part per million by volume (ppmv), og dette skal være nok til å gi lungeirritasjon og redusere VC, FEV1 og diffusjonskapasitet (3, pp 5-6). Seltzer og medarbeidere fant at eksponering for ozon hos 10 friske forsøkspersoner ga økt mengde nøytrofile granulocytter, prostaglandiner og tromboxaner i lungevæske (42).

5.2 Langsiktige effekter på lungene

Totalt fant jeg ikke mer enn fire artikler som hadde studert sammenhengen mellom flyging og langtidseffekter på lungefunksjon.

MacIntyre med kollegaer studerte lungefunksjon hos 697 militære flygere i tidsrommet 1940-69. De målte vitalkapasitet ved hjelp av spirometri og total lungekapasitet ved hjelp av røntgen thorax, og analyserte variabler som røyking, høyde, vekt, sykdom i familien, antall år som flyger, lungesyntomer og hjertesykdom. Studien fant ingen sammenheng mellom en karriere som militær flyger, definert som mer enn 15 år i flygende tjeneste, og lungekapasitet (43).

Ming med kolleger gjorde i 1991 en sammenlikning av *maksimalt ekspiratorisk flow-volum-kurver* (MEFV) på 110 jagerflygere og 126 transportflygere, alle med over 1000 flytimer. Samtlige var lungefriske ikke-røykere, og alder og flytid var sammenliknbare for de to gruppene. I artikkelen hevdes det at endringer i MEFV-kurven påviser patologi i de små luftveier før sykdom manifesterer seg klinisk. Forskerne fant at *maksimal ekspiratorisk flow av middels vitalkapasitet* (MMEF), *maksimal ekspiratorisk flow* etter ekspirasjon av 50 % og 25 % av vitalkapasiteten (v50 og v25) og v25/høyde var signifikant nedsatt for jagerflygere sammenliknet med transportflygere. De fant ingen signifikant forskjell for parameteren «PF», som trolig tilsvarer peak expiratory flow (PEF) i Norge. Begrepene MEFV og MMEF brukes ikke i europeisk eller amerikansk litteratur og utdypes heller ikke ytterligere i artikkelen. Studien foreslo at faktorer som hypoksi, lavere relativ fuktighet i kabinluften og forurensning av kabinluften med giftige gasser kunne forårsake skader i luftveiene hos jagerflygerne (41).

I en studie som ble presentert på det årlige møtet i Aerospace Medical Association i 1992 gjorde Christensen og kolleger en undersøkelse av vitalkapasitet (VC) og forsert ekspiratorisk volum ila 1 sekund (FEV1) hos 204 norske militære flygere. Studien tok utgangspunkt i lungefunksjonsmålinger før oppstart av flygerutdanningen, etter seks år og etter 12 år som flyger. Studien skilte mellom jager-, transport- og helikopterflygere, men korrigererte ikke for antall flytimer, type jagerfly (F-5 eller F-16), eller år utenfor flygende tjeneste. Man fant ingen signifikant forskjell i VC eller FEV1 mellom jagerflygere og andre flygere i løpet av 12-års-perioden. Flygerne hadde heller ikke dårligere VC eller FEV1 sammenliknet med en referansegruppe (den norske Gulsvik-standard). Derimot så man en tendens til at flere jagerflygere enn transportflygere med tiden fikk en FEV1/VC-ratio under 70 og 75 %, men tallene var for små til å være signifikante, se tabell 2 (44).

| | Jagerflygere | | | Transportflygere | | |
|------------|---------------|---------------|--------|------------------|---------------|--------|
| | FEV/VC < 70 % | FEV/VC < 75 % | Antall | FEV/VC < 70 % | FEV/VC < 75 % | Antall |
| Applicants | 0 | 6 (6%) | 95 | 1 | 8 (9 %) | 94 |
| 6 years | 6 (7%) | 21 (24%) | 89 | 5 (5%) | 22 (23%) | 95 |
| 12 years | 4 (23%) | 9 (53%) | 17 | 1 (5%) | 8 (40%) | 20 |

TABELL 2: Flygere med reduksjon i FEV1/VC til verdier under 70 % og 75 % (44)

Gray (45) gjorde i 1991 en insidensundersøkelse av kardiopulmonær sykdom hos 14 flymedisinske institutter i NATO, omfattende 87 665 flygende personell. Han undersøkte årsakene til at folk dette året ble tatt ut av flygende tjeneste eller hadde fått restriksjoner i tjenesten. Lungesykdommer utgjorde 4,8 %

av totalen blant medisinske årsaker. Herav var astma var den vanligste grunnen, andre var sarkoidose og allergisk alveolitt. To flygere ble tatt ut av flygende tjeneste pga KOLS.

6. Diskusjon

6.1 Kortsiktige effekter

De eldste studiene om lungefunksjon og flyging stammer fra 40-tallet, og i min gjennomgang har jeg brukt kilder fra tilbake til 50-tallet. Selv om alder i seg selv ikke er et tegn på dårlig kvalitet, gir det grunn til å stille noen kritiske spørsmål til metodikken og nøyaktigheten i disse studiene. Blant annet er det ikke alltid artiklene beskriver alle elementer som forventes av en forskningsartikkel i dag. Flere studier oppgir ikke hvorvidt resultatene er statistisk signifikante (22, 29), eller gir kun et prosentvis anslag over endring (37, 39). Andre er kvalitative og beskriver kun observerte fysiologiske forandringer (19, 20). Dette kan være problematisk, spesielt da mange av studiene har få forsøkspersoner. Noen av artiklene mangler kritisk diskusjon av egen metode og resultater (19, 22, 29). Én studie beskriver at det var 13 forsøkspersoner som utviklet akselerasjonsatelektase, men opplyser ikke det totale antallet av personer man undersøkte (38).

Felles for svært mange av studiene om både G-belastning og akselerasjonsatelektase er at de er utført i sentrifuger med relativt få forsøkspersoner. Antallet varierer fra 3-13 personer (12, 19, 20, 22, 36, 38, 46). Andre er gjort i fly i simulert luftkamp eller under flyging av spesielle G-belastningsprogrammer (27-29, 37, 39). Her er det relevant å stille spørsmål ved reproduserbarheten, selv om belastning i sentrifuger nok er en realistisk setting hvis man vil studere G-belastning i forbindelse med jagerflyging. En av studiene ble gjort på hunder uten at det foreligger noen diskusjon om resultatene er overførbare til mennesker (21).

Likevel er resultatene både innen G-belastnings- og akselerasjonsatelektase-studiene så konsistente at det er grunnlag for å vurdere konklusjonene som valide og overførbare til en jagerflygers arbeidssituasjon.

Jeg vurderer at kunnskapsgrunnlaget omkring toksisiteten av oksygen er godt. Det foreligger mye god forskning av nyere dato som er oppsummert i systematiske oversikter og artikler (31, 33-35). Det er naturlig å tenke at oksygens farlige virkninger også kan gjøre seg gjeldende for en jagerflyger. Spesielt fordi behandlingsmessig bruk av oksygen som regel foregår i et begrenset tidsrom, mens en jagerflyger derimot vil kunne eksponeres i lengre tid *hver* gang han flyr.

Shanklins studie (32) som viser at det er oksygenkonsentrasjonen, ikke partialtrykket, som har betydning for skadeomfang er også relevant for jagerflyging. Under flyging i større høyder foregår bruk av oksygen under lave partialtrykk, men med oksygenkonsentrasjoner opp mot 100 %.

6.2 Langsiktige effekter

MacIntyres studie (43) undersøkte flygere som var aktive på 40-50 tallet. Datidens fly hadde store begrensninger i forhold til dagens. I tillegg skiller ikke studien på flytype, og selv om den skiller mellom antall år i tjeneste (over/under 15 år), tar den ikke hensyn til antall flytimer. Det er klart avgjørende om flygeren har flydd jagerfly, og om han har flydd på heltid eller kun holdt ferdighetene ved like ved siden av en kontorjobb. Disse faktorene sier mye om eksponeringen og kan være høyst relevante for konklusjonen forfatterne trekker. I artikkelen bemerkes det da også at nyere fly utsetter flygeren for større fysiske påvirkninger enn artikkelens materiale, og at denne risikoen burde evalueres videre.

Ming med kolleger(41) har derimot skilt mellom flytype og inkludert et minstekrav til antall flytimer, selv om de utover dette ikke har tatt mengden timer i betraktning. Studien gir kun et øyeblikksbilde av forskjellen på jagerflygere og transportflygere. Forfatterne beskriver ikke likheter og forskjeller ytterligere, utover at gjennomsnittsalderen på de to gruppene er lik. Et viktig spørsmål som står ubesvart er hvordan gruppenes lungefunksjon var da flygerne startet sine karrierer.

Styrken ved Christensens studie (44) er at den følger samme personell over tid slik at man kan se på utviklingen i lungefunksjon for samme person, samt at den skiller mellom flytype personellet har flydd. Forfatterne kommenterer også at de ikke tatt hensyn til flytimer eller perioder uten flygende tjeneste. Et annet problem er det store frafallet underveis. Studien ble gjort i en tid da plikttjenesten for flygere var 10 år – altså hadde de fleste forlatt Luftforsvaret når det var tid for 12års-undersøkelsen (se Tabell 2). Et ubesvart spørsmål er om det er noen forskjeller i helsestatus på de som blir igjen i Luftforsvaret og de som slutter.

For alle tre studiene gjelder at de er gjort på en selektert gruppe, nemlig unge, friske menn. Videre skjer en automatisk seleksjon av flygerne ettersom karrieren går fremover. Det er mest sannsynlig at de med god helse – og dermed god lungefunksjon – er de som blir værende i en såpass fysisk krevende jobb. Flygerne med dårlig helse slutter å fly eller konverterer til andre flytyper enn jagerfly. Det skaper et frafallsbias som kan maskere en eventuell påvirkning av lungefunksjon. Dette kan være medvirkende til resultatene i studiene til MacIntyre og Christensen.

Grays undersøkelse (45) reiser flere spørsmål enn den besvarer. Artikkelen hans beskriver ikke metoden han har brukt, og det fremkommer ingen informasjon om rutiner og prosedyrer ved de enkelte instituttene. Han sier selv det er et ubesvart spørsmål hvorvidt gjentatt G-påvirkning gir permanente skader på lungene, og at det trengs mer forskning på området.

West kommenterer i en artikkel fra 2013 at det er enorm forskjell på kunnskapen man innehar om funksjonen av fly og funksjonen av flygere (24). Det er lett å si seg enig i den påstanden.

7. Konklusjon

I løpet av noen tiår på midten av 1900-tallet ble det forsket en god del på flygingens kortsiktige effekter på lungene. Selv om forskningen er gammel, er den konsistent og stemmer godt med dagens

kunnskapsgrunnlag. Det er grunn til å tro at eksponering for G-krefter gir seg utslag i relativt akutte forandringer i lungene. Videre vet man at pusting av høye oksygenkonsentrasjoner raskt kan gi lungeskade. Derimot foreligger ingen studier som kobler disse mekanismene mot patologiske prosesser på lengre sikt.

Det eksisterer etter min mening et begrenset kunnskapsgrunnlag rundt flyging og langtidseffekter på lungene. Resultatene fra forskningen på området spriker, og den eneste studien som viser en langsiktig effekt på lungefunksjon er av svært dårlig kvalitet.

To andre studier kan ikke konkludere med at flyging gir seg utslag i signifikant dårligere lungefunksjon. Det er ingen grunn til slå seg til ro med disse resultatene - studiene er gamle og av dårlig kvalitet. Én av undersøkelsene ble gjort på 1940-60-tallet, i en tid da flyene ennå hadde begrenset yteevne. Selv den nyeste studien er mer enn 20 år gammel, og har sannsynligvis ikke fått med full effekt av flyging med fjerde generasjons jagerfly som F-16. Videre er det flere svakheter i studiene: En skilte ikke mellom jagerflygere og flygere av andre flytyper, og ingen av dem tok hensyn til antall flytimer hos flygerne. Frafallet i begge undersøkelser er stort og kan være uttrykk for et bias.

Det er behov for mer forskning på området. I nye studier bør det fokuseres på å unngå svakhetene som preger eksisterende materiale. Andre parametere som diffusjonskapasitet bør også inkluderes. FMI sitter på et unikt materiale i form av journaler med omfattende data fra lungefunksjonsundersøkelser som kan danne grunnlag for videre forskning.

8. Litteratur

1. Sass DJ, Ritman EL, Caskey PE, Banchero N, Wood EH. Liquid breathing: prevention of pulmonary arterial-venous shunting during acceleration. *J Appl Physiol.* 1972;32(4):451-5.
2. Snøfugl I. Her testes Norges nye superdrone 2013. Available from: <http://www.tu.no/industri/2013/10/05/her-testes-norges-nye-super-drone>.
3. Ernsting J, Gradwell DP, Rainford DJ. Ernsting's aviation medicine. London: Hodder Arnold; 2006. XI, 864 s. ; ill. p.
4. Hauge A. Dykkersyke: Store Medisinske Leksikon; 2013. Available from: <http://sml.snl.no/dykkersyke>.
5. Hudson SJ, Todd JS. Rapid decompression in the EA-6B. *Mil Med.* 1998;163(8):572-4.
6. Durigon M, Campana JP, Eliakis E, Derobert L. [Pulmonary lesions observed in victims of an aircraft accident]. *Forensic Sci.* 1975;6(3):153-63.
7. Grong K, Eidsvik S, Molster A, Strom E. [Back pain--when both patients and physicians are in deep waters]. *Tidsskr Nor Laegeforen.* 2000;120(24):2872-3.
8. Rozali A, Sulaiman A, Zin BM, Khairuddin H, Abd-Halim M, Sherina MS. Pulmonary overinflation syndrome in an underwater logger. *Med J Malaysia.* 2006;61(4):496-8.
9. Wood EH, Hoffman EA. The lungs, Achilles heel of air breathers in changing gravitational-inertial force environments. *Physiologist.* 1984;27:47-8.

10. Clere JM, Ossard G, Melchior F. Physiological considerations concerning positive pressure breathing (PBG) during +Gz. *Physiologist*. 1993;36(1 Suppl):S102-5.
11. Lauritzsen LP, Pfitzner J. Pressure breathing in fighter aircraft for G accelerations and loss of cabin pressurization at altitude--a brief review. *Can J Anaesth*. 2003;50(4):415-9.
12. Whitley PE. Pilot performance of the anti-G straining maneuver: respiratory demands and breathing system effects. *Aviat Space Environ Med*. 1997;68(4):312-6.
13. Picture from: <http://designer.home.xs4all.nl/aircraft/af-16/af16-1.htm>. DOI: 15.02.14
14. Green M. Small airways, lung function and aviation. *Aviat Space Environ Med*. 1984;55(5):415-8.
15. Picture from: <http://www.pftforum.com/history/vitalograph-spirometer-1979/>. DOI 02.02.14
16. (FSAN) Fs. Reglement om medisinske krav til luftpersonell, kontroll- og varslingspersonell og AE personell. 2011.
17. Burrows B, Cline MG, Knudson RJ, Taussig LM, Lebowitz MD. A descriptive analysis of the growth and decline of the FVC and FEV1. *Chest*. 1983;83(5):717-24.
18. West JB. Regional differences in gas exchange in the lung of erect man. *J Appl Physiol*. 1962;17:893-8.
19. Bryan AC, Milic-Emili J, Pengelly D. Effect of gravity on the distribution of pulmonary ventilation. *J Appl Physiol*. 1966;21(3):778-84.
20. Jones JG, Clarke SW, Glaister DH. Effect of acceleration on regional lung emptying. *J Appl Physiol*. 1969;26(6):827-32.
21. Gerst PH, Rattenborg C, Holaday DA. The effects of hemorrhage of pulmonary circulation and respiratory gas exchange. *J Clin Invest*. 1959;38(3):524-38.
22. Barr PO. Hypoxemia in man induced by prolonged acceleration. *Acta Physiol Scand*. 1962;54:128-37.
23. Wood EH. Some effects of the force environment on the heart, lungs and circulation. *Clin Invest Med*. 1987;10(5):401-27.
24. West JB. A strategy for in-flight measurements of physiology of pilots of high-performance fighter aircraft. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md : 1985)*. 2013;115(1):145-9.
25. Fong KL, Fan SW. An overview of the physiological effects of sustained high +Gz forces on human being. *Ann Acad Med Singapore*. 1997;26(1):94-103.
26. Glaister DH. The effects of gravity and acceleration on the lung. London: NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development; 1970.
27. Edyvean J, Estenne M, Paiva M, Engel LA. Lung and chest wall mechanics in microgravity. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md : 1985)*. 1991;71(5):1956-66.
28. Paiva M, Estenne M, Engel LA. Lung volumes, chest wall configuration, and pattern of breathing in microgravity. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md : 1985)*. 1989;67(4):1542-50.
29. Langdon DE, Reynolds GE. Postflight respiratory symptoms associated with 100 per cent oxygen and G-forces. *Aerosp Med*. 1961;32:713-8.
30. Ernsting J. Some effects of oxygen-breathing on man. *Proc R Soc Med*. 1960;53:96-8.
31. Malhotra A, Schwartz DR, Schwartzstein RM. Oxygen Toxicity. UpToDate. 2014 [cited 11.03.14].
32. Shanklin DR. On the pulmonary toxicity of oxygen. I. The relationship of oxygen content to the effect of oxygen on the lung. *Lab Invest*. 1969;21(5):439-48.
33. O'Brien J. Absorption atelectasis: incidence and clinical implications. *AANA J*. 2013;81(3):205-8.
34. Sjoberg F, Singer M. The medical use of oxygen: a time for critical reappraisal. *J Intern Med*. 2013;274(6):505-28.
35. Saugstad OD. The oxygen paradox in the newborn: keep oxygen at normal levels. *J Pediatr*. 2013;163(4):934-5.
36. Tacker WA, Jr., Balldin UI, Burton RR, Glaister DH, Gillingham KK, Mercer JR. Induction and prevention of acceleration atelectasis. *Aviat Space Environ Med*. 1987;58(1):69-75.

37. York E. Post-flight discomfort in aviators: aero atelectasis. *Aerosp Med.* 1967;38(2):192-4.
38. Haswell MS, Tacker WA, Jr., Balldin UI, Burton RR. Influence of inspired oxygen concentration on acceleration atelectasis. *Aviat Space Environ Med.* 1986;57(5):432-7.
39. Browning WH. Deleterious effects of cigarette smoking and 100 percent oxygen on aircrew members in high performance aircraft. *Aerosp Med.* 1970;41(1):39-42.
40. Bjurstedt H, Rosenhamer G, Lindborg B, Hesser CM. Respiratory and circulatory responses to sustained positive-pressure breathing and exercise in man. *Acta Physiol Scand.* 1979;105(2):204-14.
41. Ming ML, Zhang HX, Quan DS, Na YL, Ning LX. Relationship between different types of aeroplane and small airways function of aircrew. *Aviation Medicine Quarterly.* 1991;3(1):30-40.
42. Seltzer J, Bigby BG, Stulbarg M, Holtzman MJ, Nadel JA, Ueki IF, et al. O₃-induced change in bronchial reactivity to methacholine and airway inflammation in humans. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md : 1985).* 1986;60(4):1321-6.
43. MacIntyre NR, Mitchell RE, Oberman A, Harlan WR, Graybiel A. Long-term follow-up of lung volume measurements in initially healthy young aviators. *Aviat Space Environ Med.* 1981;52(1):1-5.
44. Christensen CC, Owe JO, Schamaun O, Andersen HT, Neslein IL, Lian L. Pulmonary function studies of pilots flying fighters and multi-engine aircraft. 1991. Unpublished study.
45. Gray GW. Cardiovascular and pulmonary disease in NATO aircrew. An overview. AGARD lecture series 189 - Cardiopulmonary aspects in aerospace medicine. 1993:2-5.
46. Lalande S, Buick F. Physiologic +Gz tolerance responses over successive +Gz exposures in simulated air combat maneuvers. *Aviat Space Environ Med.* 2009;80(12):1032-8.