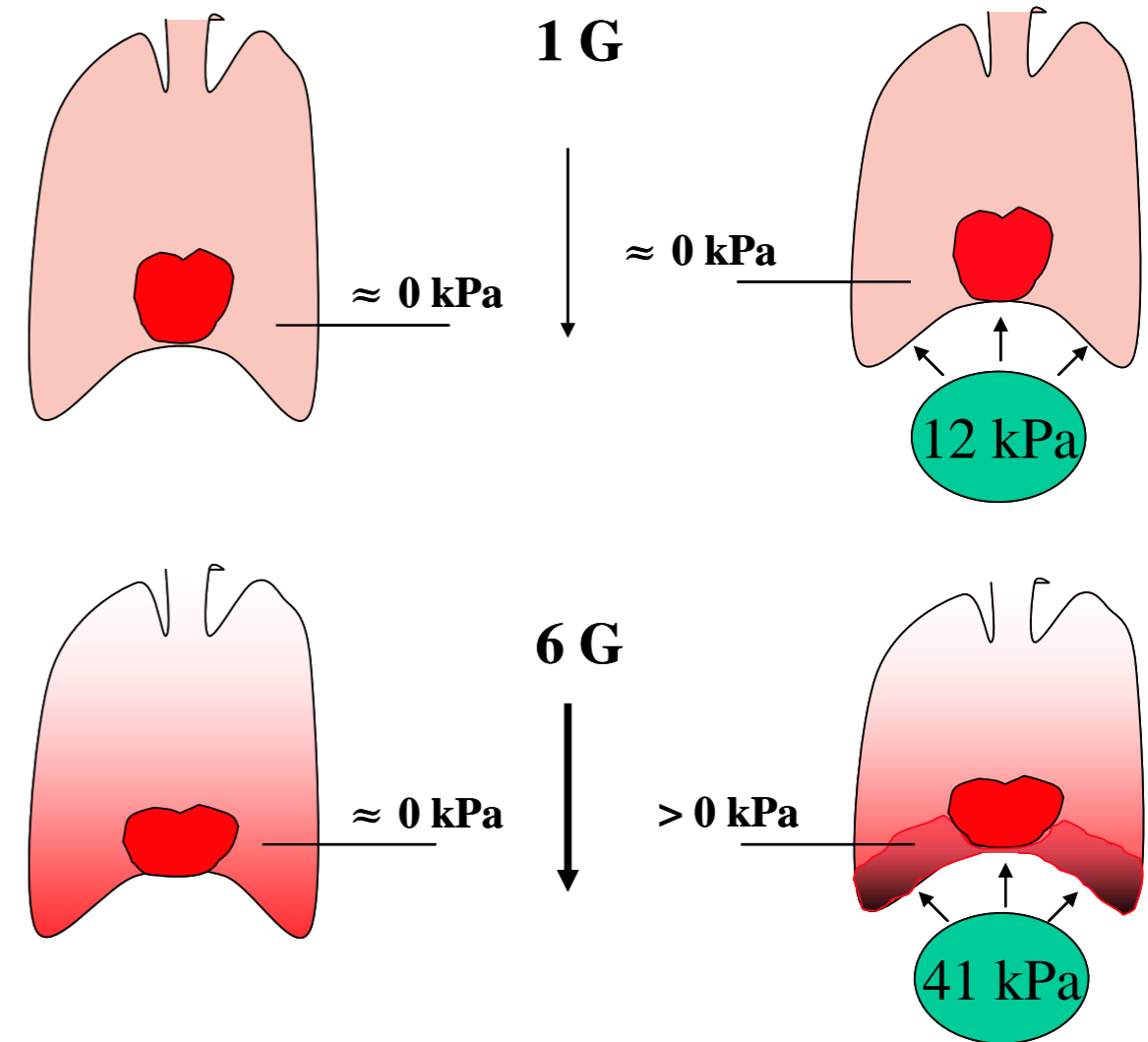


OLA EIKEN, EDDIE BERGSTEN, MIKAEL GRÖNKVIST



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Ola Eiken, Eddie Bergsten, Mikael Grönkvist

# Skyddsverkan hos G-byxans bukblåsa i AGE-39-systemet

|  |  |
|--|--|
| Titel  | Skyddsverkan hos G-byxans bukblåsa i AGE-39-systemet                                   |
| Title  | G protection afforded by the abdominal bladder of the anti-G suit in the AGE-39 system |
| Rapportnr/Report no                            | FOI-R--2664--SE  |
| Rapporttyp<br>Report Type                      | Användarrapport<br>User report   |
| Sidor/Pages                                    | 18 p   |
| Månad/Month                                    | December   |
| Utgivningsår/Year                              | 2008   |
| ISSN   | 1650-1942  |
| Kund/Customer                                  | Försvarsmakten/Swedish Armed Forces  |
| Forskningsområde<br>Programme area             | 8. Människa och teknik<br>Human Systems  |
| Delområde<br>Subcategory                       | 81 MSI med Fysiologi<br>Human Factors and Physiology                                   |
| Projektnr/Project no                           | E4461  |
| Godkänd av/Approved by                         | Anders Norqvist  |
| <b>FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut</b> | <b>FOI , Swedish Defence Research Agency</b>   |
| Avdelningen för CBRN-skydd och säkerhet        | CBRN Defence and Security  |
| 901 82 Umeå                                    | SE-901 82 Umeå   |

## Sammanfattning

Piloter som flyger högprestandaplan utsätts för höga tyngd-(G)-krafter i riktning huvud-till-säte. För att tillse adekvat blodperfusion i hjärnan vid 9 G måste artärtrycket i hjarthöjd höjas till 230-300 mmHg. Höjning av artärtrycket åstadkoms bl.a. med hjälp av trycksättning av G-dräkt och övertrycksandning. G-dräkten omsluter benen och har dessutom en bukblåsa vars G-skyddande effekter traditionellt tillskrivs (i) minskad blodansamling i bukens kärlbäddar och (ii) minskad nedåtriktad förskjutning av hjärtat under G-belastning. Syftet var att undersöka om G-dräktens bukblåsa verkar även via andra mekanismer. Tre olika experimentserier genomfördes varvid sammanlagt 21 friska försökspersoner (fp) undersöktes i humancentrifug vid G-belastning  $\leq 9$  G. Experiment genomfördes med och utan G-dräkt, med och utan övertrycksandning samt med och utan G-dräktens bukblåsa inkopplad. Resultaten talar sammantaget för att G-dräktens bukblåsa inte bara verkar genom att (i) minska blodansamling i bukens vener och (ii) reducera sänkning av hjärtat utan även genom att (iii) förbättra trycköverföring från andningsvägar till brösthålan och (iv) via direktöverföring av tryck från G-dräkt till brösthålan.

Nyckelord: Anti-G-dräkt, bukblåsa, G-belastning, G-skydd, transdiafragmalt tryck, transpulmonellt tryck, övertrycksandning

## Summary

G protection afforded by the abdominal bladder of a pneumatic anti-G suit is usually attributed to counter action of +Gz-induced 1) caudad displacement of the heart and 2) pooling of blood in abdominal veins. The present study examined whether the abdominal bladder might provide G protection also via other mechanisms. Subjects were exposed to +Gz loads while sitting relaxed and wearing a full coverage anti-G suit modified to permit separate pressurization of the abdominal and leg bladders. In two experimental series (n=8, n=14) subjects were breathing at positive airway pressure (PPB). In a third series (n=5) subjects were breathing at atmospheric airway pressure. Pressure in the lower thorax was estimated by use of an esophageal catheter. Mean arterial pressure (MAP) was measured using a volume-clamp technique. During PPB at high G-loads intrathoracic pressure was higher with than without pressurized abdominal bladder. In 7 of the 14 subjects, intrathoracic pressure exceeded airway pressure during PPB when the abdominal bladder was pressurized. The MAP response at high Gz loads was higher in this subset of subjects than in the subjects in which airway pressure exceeded intrathoracic pressure. Without PPB at increased Gz load, intrathoracic pressure was higher with than without pressurized abdominal bladder. Thus, during PPB the abdominal bladder acts as an airway counter pressure, thereby facilitating transmission of pressure from the airways to the thorax and hence improving G protection. It also appears that in several individuals, pressure may be transmitted from the abdominal bladder into the lower thorax and to the heart.

Keywords: Abdominal bladder, anti-G suit, G-load, G protection, pressure breathing, transdiaphragmal pressure, transpulmonary pressure

## Innehållsförteckning

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Inledning</i>                         | <u>6</u>  |
| <i>Metoder</i>                           | <u>8</u>  |
| <i>Resultat</i>                          | <u>11</u> |
| <i>Diskussion</i>                        | <u>14</u> |
| <i>Slutsatser och praktisk betydelse</i> | <u>16</u> |
| <i>Referenser</i>                        | <u>17</u> |

## Inledning

Vid flygning med stridsflygplan är en ständigt återkommande fysiologisk utmaning för piloten att bibehålla adekvat genomblödning av hjärnan och ögonens näthinnor då han/hon exponeras för höga tröghets-(G)-krafter i riktning huvud-till-säte (+Gz; i det följande kommer G att användas som beteckning för +Gz om inte annat anges). I exempelvis JAS 39 Gripen exponeras piloten för G-krafter motsvarande upp till 9 gånger normal tyngdkraft (9 G), vilket leder till markant tryckfall utefter artärer som löper mellan hjärtat och huvudet. För att vid 9 G inte riskera medvetanderubbning och/eller synpåverkan, till följd av lågt lokalt artärtryck, måste således pilotens medelartärtryck i hjärtnivå höjas från normalvärden om ca 80-100 mmHg till 230-300 mmHg.

Artärtrycket kan höjas med hjälp av upprepad anspänning av ben- och bålmuskulatur (Anti-G Straining Maneuvers, AGSM; Wood & Hallenbeck, 1946), samt med hjälp av anti-G-dräkt (Wood & Lambert 1952; i det följande används anti-G-dräkt och G-dräkt som synonyma begrepp) och övertrycksandning (Chambers et al., 1962, Burns & Balldin, 1988). I Gripen används AGSM i kombination med en heltäckande pneumatisk anti-G dräkt och övertrycksandning, vilket ger ett mycket effektivt G-skydd (Eiken et al., 2003, Eiken et al., 2007).

Övertrycksandningen framkallar G-skydd genom att tryck överförs från andningsvägarna via brösthålan till hjärta och artärer (för referenser se Burton & Whinnery 2002, Green 2006, Eiken et al., 2007). Anti-G-dräkten består av en blåsa som täcker bukens nedre del (bukblåsa) och som är kopplad i serie med två blåsor vilka vardera omsluter ett ben. Det är väl dokumenterat att bukblåsan, i förhållande till sin täckningsarea, utgör det mest effektiva G-skyddet hos en pneumatisk anti-G-dräkt (Wood & Lambert 1952, Burton & Krutz 1975, Wood 1987, 1990). Samtidigt är bukblåsan den del av G-skyddssystemet som framkallar mest obehag (Wood 1990) och G-relaterade skador, t ex i form av muskelsträckningar (egna opublicerade data). Bukblåsans utformning har därför ofta varit föremål för diskussion (jfr. Eiken et al., 1998). Gripen-systemets anti-G-dräkt höjer G-toleransen med ca 3 G; där en tredjedel av detta G-skydd (1G) kan tillskrivas bukblåsan (Eiken et al., 2007). Bukblåsan anses verka genom att motverka G-framkallad (*i*) blodansamling i bukens kärlbäddar och (*ii*) sänkning av diafragman och därmed hjärtat, vilken leder till ökat arteriellt tryckfall mellan hjärta och huvud (Green 2006).

I samband med tidigare experimentserier rörande effekt av mottrycksväst vid övertrycksandning (Grönkvist et al., 2005, 2008) har vi dock fått indikationer på att även andra mekanismer skulle kunna bidra till bukblåsans G-skydd. Syftet med föreliggande undersökning var att mer ingående studera sådana mekanismer, med hypoteserna att bukblåsan även verkar genom att:

- i) Vid övertrycksandning utöva ett externt mottryck mot bröstkorgen och därmed göra trycköverföring från andningsvägar till brösthåla och hjärta mer effektiv.
- ii) Under G-belastning överföra tryck direkt från G-dräkt till brösthåla och hjärta.

Att känna till hur G-skyddsutrustningens olika komponenter verkar är av stort värde då det gäller att modifiera befintliga eller utveckla nya G-skyddssystem.



## Metoder

Sammanlagt 21 friska män deltog som försökspersoner (fp) varav 6 personer deltog i mer än en försöksserie. Deras ålder, vikt och längd var (medel (intervall)) 32 (23-46) år, 79 (70-97) kg och 181 (170-191) cm. Samtliga fp var väl förtrogna med humancentrifugen vid Karolinska Institutet (KI) samt med den G-skyddsutrustning som används i Gripenplanet. 11 av fp var aktiva flygvapenpiloter och de övriga 10 ingick i en grupp individer som genomgått speciellt träningsprogram i humancentrifugen och som regelmässigt medverkat i centrifugexperiment. Experimentserierna var godkända av Forskningsetik-nämnden i Stockholm.

### Instrumentering och mätmetoder

Experimenten genomfördes i KI:s centrifug, vilken har en radie om 7.25 m. Under försöken satt fp i en stol vars ryggstöd lutar 28° mot vertikalen på samma vis som i Gripenplanet. I samtliga försök bar fp en heltäckande anti-G-dräkt av den typ som används i Gripenplanet. I två av försöksserierna var dräkten modifierad för att medge separat trycksättning av bukblåsa respektive benblåsor (se nedan).

Esofagstryck (Pes). Tryck i brösthålan mättes indirekt genom att registrera tryck i matstrupen (esofagstryck; Pes) med hjälp av en eller två plastkatetrar (se under försöksprotokoll). Varje kateters ena ände var försedd med en 4 cm lång ballong som infördes i endera näsborren och nedsvaldes till antingen 28 (Pes\_apex) eller 39 (Pes\_bas) cm från näsöppningen. Katetrarna kopplades till tryckgivare (Enevco 8510B-5, Enevco, USA). Före mätning tömdes varje kateter genom att fp utförde krystningsmanöver, varefter katetern fylldes med 0.3 ml luft.

Tryck i andningsmask (Pmask) och tryck i anti-G-dräkt (Pdräkt) mättes med hjälp av slangar från mask respektive G-dräkt till tryckgivare (Endevco 8510B-2 respektive Wika 891.13.500, Wika GMB, Tyskland). Mask och G-dräkt trycksattes medelst andningsregulator/G-ventil (EROS F5341, EROS, Frankrike) på samma vis som i Gripen, version A/B.

Hjärtfrekvens (HF) och Medelartärtryck (Mean Arterial Pressure; MAP). HF mättes medelst 5-avlednings precordial elektrokardiografisk (EKG)-registrering (Datex-Engström, Instrumentarium Corp., Finland). MAP mättes med hjälp av fotopletysmografisk teknik (Portapres, TNO, Nederländerna), där tryckmanschetter placerades runt höger långfingers mellanfallang. Under artärtrycksmätningarna användes ögonhöjd som tryckreferensnivå; höger underarm vilade på ett stöd placerat strax framom och till höger om bröstkorget med fingertopparna i horisontalnivå med halsgropen (jugulum).

Muskelaktivitet (elektromyografisk aktivitet (EMG)-aktivitet) mättes på höger sida i en bukmuskel (m. rectus abdominis) och en lårmuskel (m. vastus lateralis) med hjälp av ett Bagnoli-4 EMG-system i kombination med EMG-works mjukvara (DelSys Inc., USA). EMG-aktiviteten registrerades medelst bipolära ytelektroder som placerades över respektive muskelbuk. EMG-aktiviteten i form av RMS-(Root Mean Square)-värden monitorerades kontinuerligt under experimenten. Om fp ej följde instruktionerna (att sitta passivt under G-belastningsprofilens andra hälft, dvs. då esofagus-, mask- och artärtryck mättes) ombads han att genomföra G-profilen på nytt. EMG-aktiviteten nyttjades således enbart för att under pågående försök kontrollera att fp följde instruktionerna och signalerna bearbetades inte ytterligare och presenteras inte vidare i denna rapport.

Perifera och centrala seendet. Fp skattade syninskränkningar med hjälp av en ljusramp placerad i horisontalplanet i förhållande till fp:s ögon. Ljusrampen var försedd med en central röd lampa placerad rakt framför fp och 2 gröna lampor placerade i 60° vinkel i förhållande till ögonen. Centralt och perifert seende skattades medelst 4-gradig skala (klart, suddigt, grått, inget ljus (svart); se Buick et al., 1995).

G-belastning mättes med en analog accelerometer placerad i hjärtlöjd.

Alla mätsignaler överfördes via släpringsdon och registrerades med hjälp av en Pentium persondator via 16-kanals analog-digital-omvandlare (DAS-1602, Keithley Metrabyte, USA) i kombination med ett TestPointbaserat (TestPoint, Capital Equipment, USA) specialanpassat mätprogram.

## **Försöksprotokoll**

Sammanlagt tre olika experimentserier genomfördes. I varje serie inleddes enskilda experiment med att fp instruerades och instrumenterades, varefter han genomförde en tillvänjnings-G-profil (vanligen en "Gradual Onset Rate" profil (G-tillväxt 0.1 G/s) till 5-7 G).

Serie 1. (n= 8). Varje fp var utrustad med hela den G-skyddsutrustning som används i Gripenplanet (Anti-G Ensemble 39, AGE-39), vilken, förutom den heltäckande anti-G-dräkten, består av ett övertrycksandningssystem inklusive mottrycksväst (se Eiken et al., 2007, Grönkvist et al., 2008). Anti-G-dräkten som användes i denna studie var modifierad för att möjliggöra separat trycksättning av benblåsorna och bukblåsan.

Varje fp undersöktes under två olika betingelser:

- 1) Övertrycksandning med trycksättning av anti-G-dräkt, inklusive bukblåsa.
- 2) Övertrycksandning med trycksättning av anti-G-dräktens benblåsor men inte av dess bukblåsa.

Ordningsföljden mellan de båda betingelserna alternerades mellan fp.

Vid 1.0 G trycksattes mask och anti-G-dräkt under 20 s med testtryck om cirka 4.7 kPa (35 mmHg) respektive 14 kPa (105 mmHg). Under ökad G-belastning trycksattes mask och anti-G-dräkt via EROS-regulatorn på samma sätt som i JAS 39 Gripen. Varje G-profil påbörjades vid 1.0 G med en G-tillväxt av 0.5 G/s till önskad G-nivå vilken konstanthölls under 20 s. Därefter sänktes G-belastningen till 1.0 G med 0.5 G/s för byte av försöksbetingelse (inkoppling/urkoppling av bukblåsan), varefter identisk G-profil upprepades. De G-nivåer som användes var 5.0, 6.0, 7.0, 7.5 och 8.0.

Serie 2. (n=14). Fp var utrustad med komplett AGE-39 (dvs. med standard anti-G-dräkt där trycksättning av bukblåsa alltid sker samtidigt med benblåsorna). Vid 1.0 G trycksattes mask och anti-G-dräkt under 20 s med testtryck om ca 4.7 kPa respektive 14 kPa. Under ökad G-belastning trycksattes mask och anti-G-dräkt via EROS-regulatorn. Varje G-profil påbörjades vid 1.4 G (krypvarvtal) med en G-tillväxt av 0.5 G/s till önskad G-nivå vilken hölls konstant under 20 s. De G-nivåer som användes varierade något mellan fp, men för varje fp ökades belastningen stegvis i steg om 0.5 G från 5.0 G under första profilen till som högst 9 G vid sista profilen.

I serie 3 deltog 5 fp. Fp, som endast bar den modifierad anti-G-dräkten, undersöktes under två olika betingelser:

- 1) Trycksättning av hela anti-G-dräkten inklusive bukblåsa.
- 2) Trycksättning av anti-G-dräktens benblåser men inte av dess bukblåsa.

Ordning mellan de båda betingelserna alternerades mellan fp.

Varje G-profil påbörjades vid 1.4 G. Belastningen höjdes stegvis med 0.5 G/steg (G-tillväxt av 0.5 G/s) var 20:e sekund tills fp fick syninskränkningar (se nedan).

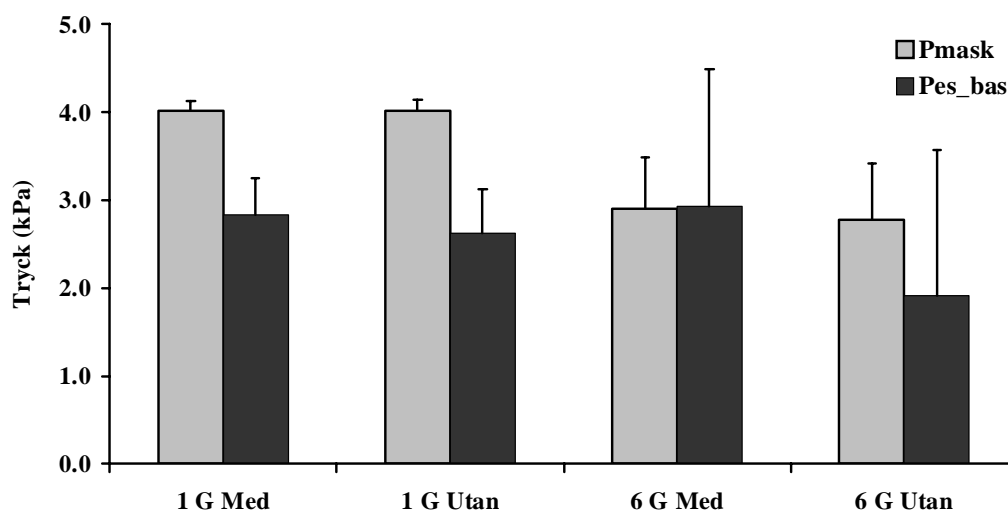
I samtliga försöksserier var fp instruerad att endast utföra anti-G-manöver under G-tillväxten och att sitta avslappnad och viloandas på G-platån. Efter varje G-exposition skattade försökspersonen upplevda synsymptom. Totalt bortfall av det perifera seendet och/eller bortfall av färgseendet centralt användes som avbrottskriterier.

## **Analys**

Statistisk signifikans av skillnader mellan försöksbetingelser beräknades med hjälp av Student's T-test och med hjälp av variansanalys (ANOVA) följt av Tukeys HSD test för post-hoc analys.

## Resultat

Serie 1 (n=8). Vid 1 G och under stegvis ökande G-belastning uppmättes stipulerade tryck i andningsmasken (Pmask) under båda försöksbetingelserna, talande för att inget eller ringa maskläckage förekom. Figur 1 visar Pmask och Pes\_bas under inandning såväl vid 1 G som vid 6 G. Vid 1 G uppmättes en liten skillnad i Pes\_bas mellan trycksatt ( $2.8 \pm 0.4$  kPa) respektive ej trycksatt bukblåsa ( $2.6 \pm 0.5$  kPa;  $p < 0.01$ ). Under förhöjd G-belastning var Pes\_bas väsentligt högre ( $p < 0.001$ ) med ( $2.9 \pm 1.6$  kPa vid 6 G) än utan trycksatt bukblåsa ( $1.9 \pm 1.7$  kPa vid 6 G).

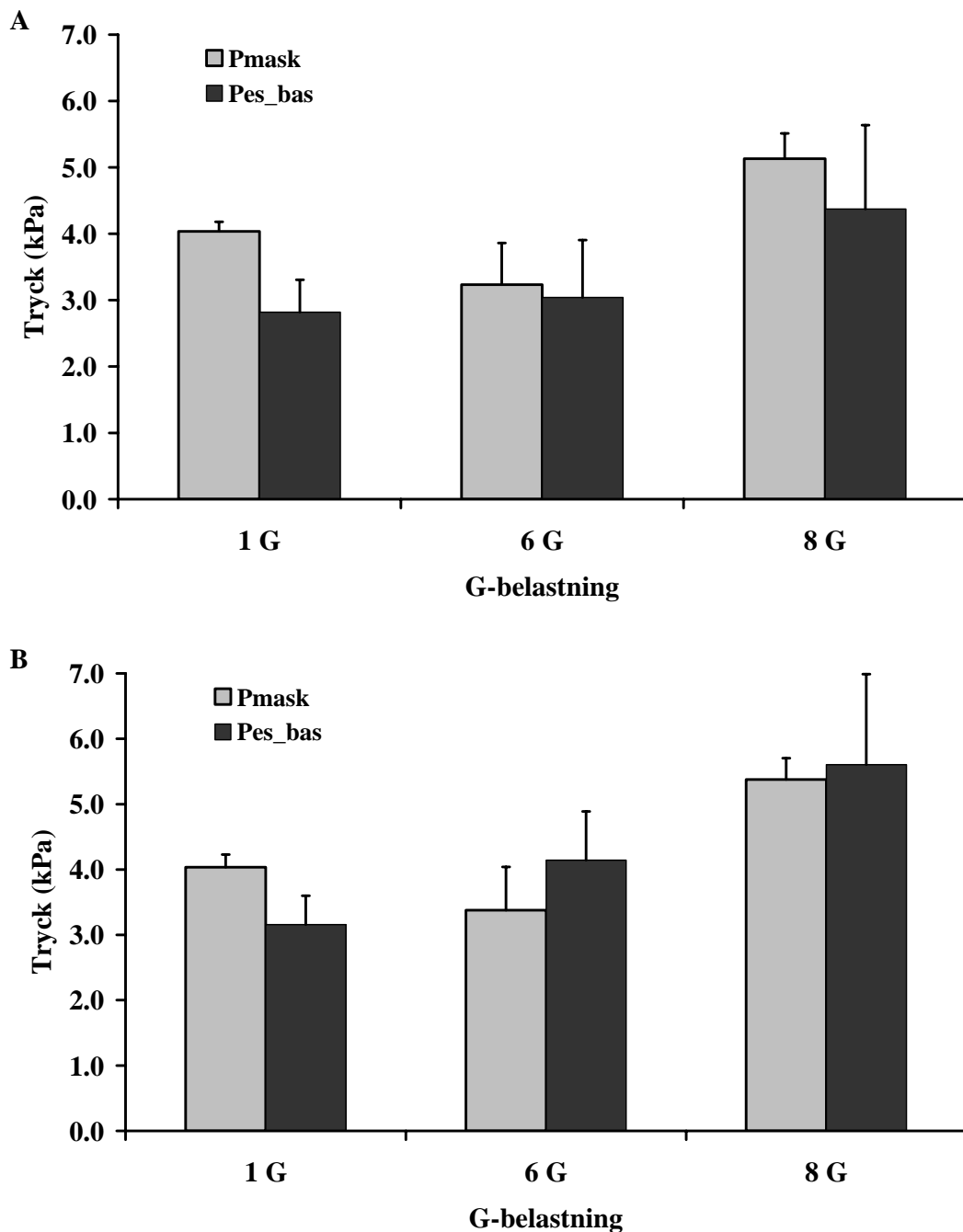


**Figur 1.** Tryck i andningsvägar (Pmask) och basalt i brösthålan (Pes\_bas) under inandning i sittande kroppsställning med och utan trycksatt bukblåsa, under normal (1 G) och förhöjd tyngdkraft (6 G). Värden är medel (sd), n=8.

MAP sjönk med stigande G-belastning. Sänkningen var mer uttalad då bukblåsan ej var trycksatt ( $-35 \pm 17$  mmHg vid 6 G) än då den var trycksatt ( $-28 \pm 20$  mmHg vid 6 G) ( $p < 0.05$ ).

Serie 2. (n=14). Vid 1 G var Pmask högre än Pes\_bas för samtliga fp. Hos 7 av de 14 fp var Pes\_bas högre ( $p < 0.05$ ) än Pmask under förhöjd G-belastning, antingen vid en eller vid flera av G-belastningarna (Fig. 2B). Detta gällde såväl under inandning som under utandning.

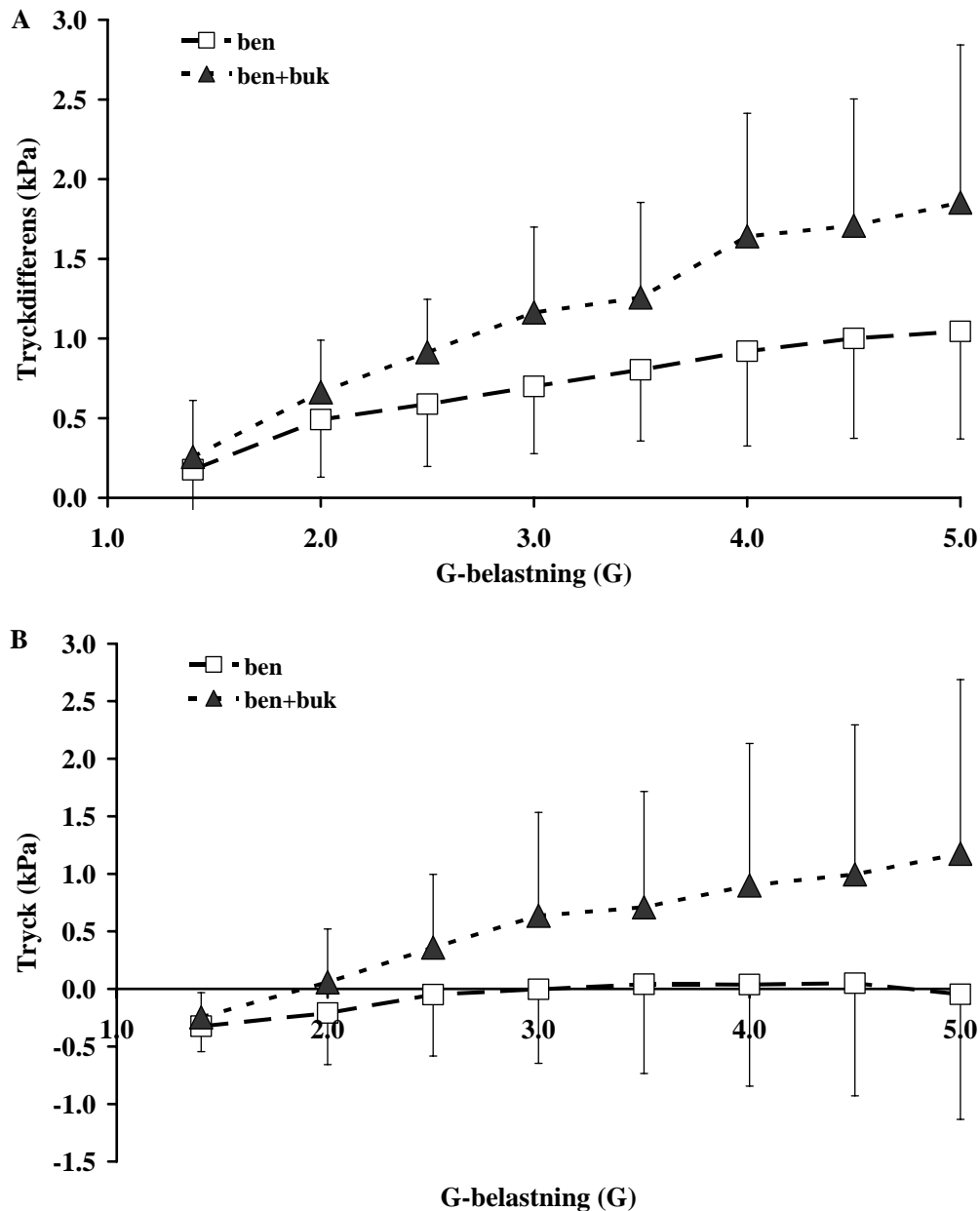
Under måttligt förhöjd G-belastning, var MAP högre ( $p < 0.05$ ) hos den grupp av fp för vilken Pes\_bas översteg Pmask ( $81 \pm 35$  mmHg vid genomsnittsbelastningen 6 G) än hos den grupp för vilken Pmask översteg Pes\_bas ( $76 \pm 59$  mmHg vid genomsnittsbelastningen 6 G).



**Figur 2.** *Pmask* och *Pes\_bas* under inandning vid 1 G och vid förhöjd G-belastning (grupperade och beräknade som medel mellan 5.0 och 7.0 G respektive 7.5 och 9.0 G) för hela försöksgruppen (A; medel-G-belastning = 6.3 respektive 8.1 G;  $n=14$ ) och hos den subgrupp av försökspersoner ( $n=7$ ) som under någon eller flera G-belastningar uppvisade högre *Pes\_bas* än *Pmask* (B; medel-G-belastning = 6.4 respektive 8.1 G).

Serie 3 ( $n=5$ ). Den vertikala tryckgradienten i brösthålan (differensen mellan *Pes\_bas* och *Pes\_apex*) ökade linjärt med ökande G-belastning såväl med

( $p < 0.05$ ) som utan trycksatt bukblåsa ( $p = 0.06$ ; Fig. 3A). Den G-betingade ökningen av tryckgradienten var dock större med trycksatt bukblåsa, vilket uteslutande berodde på en mer uttalad ökning ( $p = 0.06$ ) av  $P_{es\_bas}$  under denna betingelse (Fig. 3B).



**Figur 3.** Tryckdifferensen mellan nedre (39 cm) och övre delen (28 cm) av brösthålan (A;  $P_{es\_bas}$  minus  $P_{es\_apex}$ ) samt trycket i nedre delen av brösthålan (B;  $P_{es\_bas}$ ) som funktioner av G-belastning med hela G-dräkten trycksatt (ben+buk) samt med G-dräkt utom bukblåsan trycksatt (ben). Värden är medel (sd),  $n=5$ .

## Diskussion

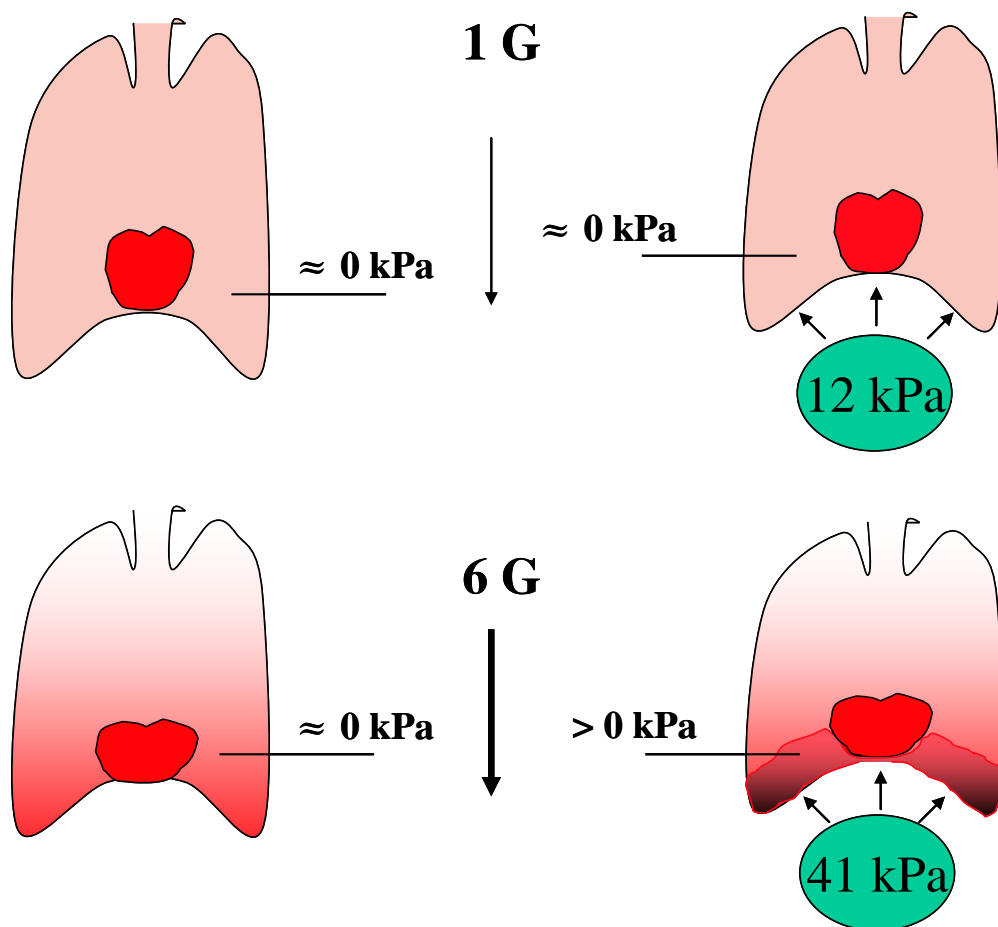
Försöken visade att vid övertrycksandning under förhöjd G-belastning var trycket i nedre delen av brösthålan högre med än utan trycksättning av G-dräktens bukblåsa. Med trycksatt bukblåsa var brösthåletrycket till och med högre än trycket i andningsvägarna hos hälften av fp. Artärtrycket under G-belastning var högre hos denna grupp av fp än hos den grupp av fp där trycket i andningsvägarna var högre än brösthåletrycket.

Syftet med övertrycksandning under flygning i högprestanda-flygplan är att höja G-toleransen genom att tryck överförs från andningsvägarna via brösthålan till hjärtat och artärsystemet (för ref. se Burton & Whinnery 2002, Green 2006, Eiken et al., 2007). För att övertrycksandningen skall vara så effektiv som möjligt är det således viktigt att minimera tryckförluster mellan andningsvägar och brösthåla. Om övertryck anbringas i luftvägarna utan att mottryck samtidigt appliceras på bröstkorgen, blir tryckreduktionen mellan andningsvägar och brösthåla betydande, vilket anses bero på att det åtgår energi för att övervinna lungvävnadens elastiska återfjädringstryck (Ernsting 1966). Detta bekräftades av föreliggande resultat att då bukblåsan ej var trycksatt var brösthåletrycket betydligt lägre än det övertryck som anbringades i andningsvägarna. Tryckförlusterna mellan andningsvägar och brösthåla kan minimeras genom att samtidigt med övertrycksandningen anbringa ett lika stort mottryck runt hela bröstkorgen (för ref. se Grönkvist et al., 2008). Våra resultat visade att då bukblåsan var trycksatt under förhöjd G-belastning överfördes tryck från andningsvägar till brösthåla utan nämnvärda förluster, medan betydande tryckförluster uppstod då bukblåsan ej trycksattes. Att trycköverföringen från andningsvägar till brösthåla är så pass effektiv då övertrycksandning används under G-belastning, beror sannolikt mestadels på att G-dräktens bukblåsa motverkar den G-inducerade sänkningen av mellangärdet och att den därigenom bidrar till kompression av de nedre, basala, delarna av lungorna. Det är även möjligt att trycksättning av bukblåsan bidrar till den effektiva trycköverföringen från andningsvägarna till brösthålan genom att strama upp bröstkorgens frontala och laterala mjukdelar.

Då bukblåsan ej var trycksatt var den relativa tryckförlusten mellan andningsvägar och basala brösthålan ( $P_{\text{mask-Pes\_bas}}/P_{\text{mask}}$ ) vid 6 G knappt 1/3 (Fig. 1). Under förutsättning att de relativa tryckförlusterna är liknande även vid högre G-belastningar torde det maximala G-skydd som övertrycksandningen bidrar med om ca 2 G (Eiken et al., 2007) reduceras till cirka 1.3 G om bukblåsan tas bort från G-dräkten. Det bör i detta sammanhang påpekas att till skillnad från bukblåsan, är den mottrycksväst som ingår i AGE-39-systemet, och vars syfte bl.a. är att förbättra trycköverföring från andningsvägar till brösthåla, helt verkningslös (Grönkvist et al., 2005, Grönkvist et al., 2008).

Att, då bukblåsan var trycksatt, trycket i nedre brösthålan till och med kunde överstiga det tryck som anbringades i andningsvägarna, talar för att tryck även kan överföras direkt från bukblåsa till brösthåla. En positiv tryckgradient

mellan brösthåla och andningsvägar observerades emellertid endast under förhöjd G-belastning; vid trycksättning av andningsvägar och G-dräkt vid 1 G översteg trycket i andningsvägarna alltid det som uppmättes i nedre delen av brösthålan. Hög +Gz-belastning framkallar omfördelning av lungornas blodvolym med en anrikning av blod i lungans baser som kan bli så uttalad att de basala alveolerna kollapsar (Barr 1963). Det ligger nära tillhands att anta att denna G-inducerade omvandling av lungornas baser från att vara luftförande till att bli blodfyllda och inkompressibla underlättar trycköverföring från bukblåsan till brösthålan (Fig. 4).



**Figur 4.** Schematisk framställning av tryckförhållanden och blodfördelning i brösthålan vid 1 G (övre figurer) och 6 G (nedre figurer) utan trycksatt bukblåsa (vänstra figurer) och med trycksättning av bukblåsa till 12 kPa (provtrycksnivå vid 1 G) respektive 41 kPa (regulatorns trycknivå vid 6 G). Trycksatt bukblåsa i kombination med G-belastning leder till blodansamling i lungvävnad med icke luftförande, blodfyllda basala delar. Tryck kan därför överföras från buken till inkompressibel basal lungvävnad och därmed till hjärta och centrala artärer (nederst till höger).



Även resultaten från försöksserie 3, i vilken den vertikala tryckgradienten i brösthålan uppmättes, talar för att tryck kan överföras från bukblåsan till nedre delen av brösthålan. Det är välkänt att den hydrostatiska tryckgradient som råder i brösthålan i upprätt kroppsläge förstärks då G-belastningen i huvud-fot-riktning höjs och att förstärkningen står i direkt proportion till G-talets storlek (Bryan et al., 1966, Glaister 1967). Även i föreliggande undersökning ökade tryckgradienten i brösthålan linjärt med ökande G-belastning (Fig. 3A). Den G-betingade ökningen av tryckgradienten var emellertid betydligt större med än utan trycksatt bukblåsa, vilket helt kunde tillskrivas en ökning av trycket i brösthålan basala delar (Fig. 3B). Eftersom det inte finns någon anledning att misstänka att avståndet mellan den apikala och basala tryckkatetern var större med trycksatt bukblåsa, förefaller en direkt transmission av tryck från bukblåsan som den mest troliga förklaringen till denna bukblåse-inducerade ökning av tryck i basala brösthålan under G-belastning.

Våra resultat medger inte någon säker kvantifiering av hur stor del av G-dräktens totala G-skydd som går att hänföra till trycköverföring från bukblåsan till brösthåla. Som framgår av figur 3 torde endast en ringa del av dräktrycket överföras till brösthålan; vid 5 G är dräktrycket drygt 30 kPa. Eftersom tryck i nedre brösthålan överförs relativt odistorderat till hjärta och centrala artärer (Green 2006) torde även trycktillskott till brösthålan om  $\leq 1$  kPa ha praktisk betydelse. Om man gör följande antagande: (i) att den skillnad som uppmättes mellan trycksatt och icke trycksatt G-dräkt vad gäller  $P_{es\_bas}$  (Fig. 3B) återspeglar trycköverföring från bukblåsa till brösthåla, samt (ii) att denna tryckskillnad fortsätter att stiga linjärt med G-belastning, så kan det uppskattas att tryck om maximalt cirka 1.2-1.5 kPa överförs från bukblåsa till brösthåla. Detta torde motsvara 1/4 till 1/3 av bukblåsans totala G-skydd om 1 G (jfr. Eiken et al., 2007).

## Slutsatser och praktisk betydelse

Resultaten visar att G-dräktens bukblåsa inte bara verkar genom att minska G-inducerad (i) blodansamling i bukens blodkärl och (ii) sänkning av hjärtat, utan även genom att (iii) förbättra trycköverföring från andningsvägar till brösthåla och (iv) via direktöverföring av tryck från G-dräkt till brösthålan. Även de G-skyddande effekterna av de två sistnämnda mekanismerna är tillräckligt stora för att vara av praktisk betydelse, vilket innebär att de måste beaktas vid modifiering av befintlig eller utveckling av ny G-skyddsutrustning.

## Referenser

- Barr, P.-O.** Pulmonary gas exchange in man as affected by prolonged gravitational stress. *Acta Physiol Scand* 58: 1-46, 1963.
- Bryan, A. C., J. Milic-Emili, and D. Pengelly.** Effect of gravity on the distribution of pulmonary ventilation. *J Appl Physiol* 21: 778-784, 1966.
- Buick, F., E. H. Wood, M. Pecaric, and J. Maloan.** Methods for measuring physiological responses and protection in man exposed to high +Gz. In: *Current Concepts on G-protection research and development*. AGARD-LS-202: 8-15, 1995.
- Burns, J.W. and U.I. Balldin.** Assisted positive pressure breathing for augmentation of acceleration tolerance time. *Aviat Space Environ Med* 59: 225-233. 1988.
- Burton R.R. and R.W. Krutz.** G-tolerance and protection with anti G suit concepts. *Aviat Space Environ Med* 46:119-24, 1975.
- Burton, R. R. and J. E. Whinnery.** Biodynamics: Sustained acceleration. In: *Fundamentals of aerospace medicine*, edited by DeHart R.L. Baltimore: Williams & Wilkins. 2002, pp. 122-153.
- Chambers R.M., R. Kerr, W.S. Augerson, and D.A. Morway.** Effects of positive pressure breathing on performance during acceleration. Warminster, PA: U.S. Naval Air Development Center, *Aviation Medical Acceleration Laboratory*; NADC-MA-60205. 1962.
- Eiken, O., M. Grönkvist, E. Bergsten, H. Örnheden and P. Gustafsson.** Effekt av modifierad bukblåsa till "anti-G dräkt 97" på transdiafragmalt tryck och diafragmaposition. *FOA-R--98-00813-720--SE*. 16 pp. 1998.
- Eiken, O., R. Kölegård, E. Bergsten, and M. Grönkvist.** G protection: Interaction of straining maneuvers and positive pressure breathing. *Aviat Space Environ Med* 78: 392-398, 2007.
- Eiken, O., R. Kölegård, B. Lindborg, I. B. Mekjavic, and J. Linder.** The effect of muscular straining on G-protection during assisted pressure breathing. *Aviat Space Environ Med* 74: 822-826, 2003.
- Ernsting, J.** Some effects of raised intrapulmonary pressure in man. *AGARDograph No 106*. Maidenhead, England: Technivision Ltd. 1966.
- Glaister, D. H.** The effects of positive centrifugal acceleration upon the distribution of ventilation and perfusion within the human lung, and its relation to pulmonary arterial and intraoesophageal pressures. *Proc Roy Soc London Ser. B*168: 311-334, 1967.

**Green, N. D. C.** Protection against long duration acceleration. In: Ernsting's *Aviation Medicine*, edited by D. Rainford and D.P Gradwell. Oxford Univ. Press. 2006, pp. 159-168.

**Grönkvist, M., E. Bergsten and O. Eiken.** G tolerance and pulmonary effects of removing chest counterpressure during pressure breathing. *Aviat Space Environ Med* 76: 833-840, 2005.

**Grönkvist, M., E. Bergsten and O. Eiken.** Lung mechanics and transpulmonary pressures during unassisted pressure breathing at high Gz loads. *Aviat Space Environ Med* 79: 1041-1046, 2008.

**Wood, E. H.** Development of anti-G suits and their limitations. *Aviat Space Environ Med* 58: 699-706, 1987.

**Wood E.H.** Final report "Evolution of Anti-G suits and their limitations". *DARPA/STO Contract No. N66001-87-C-0079*. 1990.

**Wood, E. H. and G. A. Hallenbeck.** Voluntary (self protective) maneuvers which can be used to increase man's tolerance to positive acceleration. *Fed Proc* 5: 118. 1946.

**Wood, E. H. and E. H. Lambert.** Some factors which influence the protection afforded by pneumatic anti-G suits. *J Aviat Med* 23: 218-228, 1952.