

## **Övertrycksandningssystemet i flygplan 39 Gripen: Effekter av mottrycksvästen**

M. Grönkvist, E. Bergsten, R. Kölegård och O. Eiken

NBC-skydd, Försvarsmedicin, Berzelius väg 13, Karolinska Institutet, 17177 Stockholm

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT  
NBC Skydd, Försvarsmedicin  
SE-901 82, Umeå

FOI-R--1474--SE

December 2004

ISSN 1650-1942

**VETENSKAPLIG RAPPORT**

## **Övertrycksandningssystemet i flygplan 39 Gripen: Effekter av mottrycksvästen**

M. Grönkvist, E. Bergsten, R. Kölegård och O. Eiken

NBC-skydd, Försvarsmedicin, Berzelius väg 13, Karolinska Institutet, 17177 Stockholm

<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI NBC-skydd Försvarsmedicin 901 82, Umeå	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--1474--SE	<b>Klassificering</b> Vetenskaplig rapport
	<b>Forskningsområde</b> 8. Människan i totalförsvaret	
	<b>Månad, år</b> December 2004	<b>Projektnummer</b> E4452
	<b>Verksamhetsgren</b> 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	<b>Delområde</b> 81. MSI med fysiologi	
	<b>Författare/redaktör</b> Mikael Grönkvist Eddie Bergsten Roger Kölegård Ola Eiken	<b>Projektledare</b> Ola Eiken
<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> Försvarsmakten		
<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b> Ola Eiken		
<b>Rapportens titel</b> Övertrycksandningssystemet i flygplan 39 Gripen: Effekter av mottrycksvästen.		
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> <p><b>Bakgrund.</b> I moderna stridsflygplan utsätts piloten för höga G-belastningar i huvud-fot-riktning (Gz). För att säkerställa tillräckligt artärtryck i huvudhöjd använder piloten en anti-G-dräkt i kombination med tryck i andningsvägarna (övertrycksandning). För att optimera G-skyddet, underlätta andningsarbetet och minska risken för övertänjning av lungorna anbringas även ett mottryck på bröstkorgen via en bröstblåsa. Syftet med studien var att undersöka bröstblåsans funktion vid övertrycksandning under hög G-belastning. <b>Metoder.</b> Tre olika försöksserier genomfördes i humancentrifugen på KI med dräktsystemet i 39 Gripen. I serie-1 undersöktes 12 försökspersoner (fp) under 20 s G-profiler upp till 8.0 Gz. I serie-2 undersöktes 9 fp under 20 s G-profiler upp till 9.0 Gz, samt under simulerad flygstridsmanöver (SACM). I serie-1 och 2 registrerades påverkan av centralt och perifert seende, artärtryck, tryck i nedre delen av bröstkorgen, masktrycket samt uttänjningen av bröstkorgen. I serie-3 undersöktes 6 fp under 20 s G-profiler upp till 7.0 Gz varvid trycket i övre delen av bröstkorgen registrerades. De tre serierna utfördes under två olika betingelser, med respektive utan trycksatt bröstblåsa. <b>Resultat.</b> Artärtryck, tryck i nedre delen av bröstkorgen, masktryck och uttänjning av bröstkorgen var likartade med respektive utan trycksättning av bröstblåsan. Trycket i övre delen av bröstkorgen var något högre när bröstblåsan var trycksatt. Under SACM var tid till utmattningsgrad samma med respektive utan trycksatt bröstblåsa. <b>Slutsats.</b> Resultaten talar för att bröstblåsan kan avlägsnas ur dräktsystemet för JAS 39 Gripen utan att det menligt påverkar G-toleransen eller G-uthålligheten, eller påtagligt ökar risken för lungbristning.</p>		
<b>Nyckelord</b> Acceleration, anti-G-dräkt, G-belastning, G-tolerans, intra-thorakalt tryck, mottrycksväst, övertrycksandning		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b>	Svenska
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b>	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris: Enligt prislista</b> <b>Sekretess</b> Öppen rapport	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency NBC Defence Defence Medicine SE-901 82, Umeå Sweden	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--1474--SE	<b>Report type</b> Scientific report
	<b>Research area code</b> 8. Human systems	
	<b>Month year</b> December 2004	<b>Project no.</b> E4452
	<b>Customers code</b> 5. Commissioned research	
	<b>Sub area code</b> 81 Human factors and Physiology	
<b>Author/s (editor/s)</b> Mikael Grönkvist Eddie Bergsten Roger Kölegård Ola Eiken	<b>Project manager</b> Ola Eiken	
	<b>Sponsoring agency</b> Swedish Armed Forces	
	<b>Scientifically and technically responsible</b> Ola Eiken	
<b>Report title (In translation)</b> The positive pressure breathing system in JAS 39 Gripen; Effects of counter-pressure jerkin		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> <p><b>Background.</b> In fighter aircraft positive pressure breathing is commonly used as part of the anti-G ensemble. To optimize G-protection and prevent over-distention of the lungs, increased airway pressure is balanced by applying a counter pressure to the chest. The aim of the study was to investigate the efficacy of chest counter-pressure.</p> <p><b>Methods.</b> Three series of experiments were performed using the anti-G ensemble of the 39 Gripen aircraft (AGE-39). In the first series 12 subjects were exposed to 20 s G-time profiles up to 8.0 Gz. In the second series 9 subjects were exposed to 20 s profiles up to 9.0 Gz and simulated aerial combat maneuvers (SACM). Impairment of central and peripheral vision, arterial and airway pressures, pressure in the lower portion of the esophagus and chest-wall distension were measured in series 1 and 2. In the third series, 6 subjects were exposed to 20 s profiles up to 7.0 Gz and esophageal pressure was measured in the upper thorax. In all series, two conditions were compared: with and without pressurized chest bladder. <b>Results.</b> During the 20 s profiles arterial and esophageal pressures, chest wall distension and visual impairment were of the same magnitude with and without pressurized chest bladder. Upper esophageal pressure was slightly higher with than without chest bladder. During SACM, time to exhaustion and the level of perceived exertion were similar with and without pressurized chest bladder.</p> <p><b>Summary.</b> The results suggest that the chest counter-pressure can be removed from AGE-39 without diminishing G-tolerance or G-endurance or significantly increasing the risk of lung parenchyma disruption.</p>		
<b>Keywords</b> Acceleration, chest counter-pressure, G-load, G-protection, G-tolerance, intra-thoracic pressure		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b>	
	<b>Price acc. to pricelist</b> <b>Security classification</b> Open report	

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

INNEHÅLLSFÖRTECKNING .....	4
BAKGRUND .....	5
METODER .....	7
Försökspersoner .....	7
Instrumentering och mätmetoder .....	7
Försöksprotokoll .....	9
G-tolerans och G-uthållighet.....	9
Analys .....	9
RESULTAT .....	10
G-tolerans och G-uthållighet.....	10
Skattad ansträngning.....	10
Masktryck under inandningen (Pmask) .....	11
Tryckdifferens i masken ( $\Delta P_{mask}$ ).....	11
Dräkttryck .....	11
Hjärtfrekvens.....	13
Medelartärtryck i ögonhöjd (MAP) .....	14
Esofagstryck under inandning (Peso), nedre och övre.....	15
Tryckdifferens i esofagus ( $\Delta P_{eso}$ ).....	15
Utandningsläget för bröstorg och buk.....	15
Muskelaktivitet .....	15
DISKUSSION .....	17
SAMMANFATTNING .....	19
TACKORD.....	20
REFERENSER .....	21

## BAKGRUND

Piloter i stridsflygplan utsätts för höga centrifugalkrafter i huvud-fot-riktning (G-belastning; Gz) vilket leder till förhöjda tryckgradienter i blodkärlen mellan hjärta och huvud. För att upprätthålla adekvat artärblodtryck i huvudhöjd måste trycket i hjärtat således höjas tillräckligt för att överbrygga denna G-inducerade tryckgradient.

De traditionella sätten att höja artärtrycket under G-belastning har varit trycksättning av en anti-G-dräkt (6, 13, 21) och/eller genom att utföra muskelanspännings- och krystningsmanövrer (22, 23).

Vid trycksättning av anti-G-dräkten komprimeras buk och ben, vilket motverkar den G-inducerade ökningen av avståndet mellan hjärta och huvud samt leder till ökad perifer blodflödesresistans med ökat artärtryck och till omfördelning av blod från benens kärl till bröst-korgen (16, 21).

Vid introduktionen av JAS 39 Gripen med dess höga prestanda vad gäller maximal G-belastning (upp till 9 Gz) och G-tillväxt (6 G/s) var det nödvändigt att förbättra pilotens G-skydd. Ett nytt dräktsystem (anti-G ensemble 39; AGE-39; Figur 1) utvecklades, vilket består av en anti-G-dräkt med utökad blåstäckning och av ett övertrycksandningssystem som genererar positivt tryck i luftvägarna (17, 18). Det övertryck som anbringas i luftvägarna överförs till brösthålan och därmed till hjärta och kärl i bröstkorgen, vilket i sin tur ger motsvarande ökning av artärtrycket (13).

För att förbättra trycköverföring från luftvägar till brösthåla samt för att underlätta andningen och motverka övertänjning av bröstkorg och lungor (10) används övertrycksandning tillsammans med ett aktivt mottryck på bröstkorgen, vilket anbringas med hjälp av en mottrycksväst som trycksätts med samma tryck som till luftvägarna, så kallad ”balanserad övertrycksandning” (17). I AGE-39 är mottrycksvästen inkorporerad i armfixeringsjackan och består av en blåsa som täcker främre delen av bröstkorgen och är sammanvävd med ett oelastiskt tyg som täcker ryggen och sidorna. Skälet till att blåsan endast täcker en begränsad del av bröstkorgen är att söka minimera den totala värmebelastningen samt att minska västens inverkan på rörligheten.

Under senare år har dock behovet av bröstblåsa vid övertrycksandning under hög G-belastning ifrågasatts (13, 14). Det har spekulerats i att den tillbakalutade sittställningen (28° från vertikallinjen i 39 Gripen) och den ökande tyngden av bröstkorgen med stigande G-belastning, i kombination med den kompressionseffekt av bröstkorgens nedre del som anti-G-dräktens bukblåsa framkallar, skulle kunna ge ett tillräckligt mottryck. Det aktiva mottrycket från bröstblåsan skulle i så fall vara överflödigt.

Syftet med den föreliggande studien var att undersöka fysiologiska effekter av mottrycksvästen under övertrycksandning vid höga G-belastningar för att bedöma om det är möjligt att avlägsna bröstblåsan ur AGE-39 utan att äventyra pilotens G-tolerans, komfort och medicinska säkerhet.



**Figur 1.** En försöksperson iklädd dräktsystemet som används i 39 Gripen (AGE-39), dvs heltäckande anti-G-dräkt, mottrycksväst, mask och hjälm, och som användes i alla tre försöksserierna.

## METODER

Alla försök genomfördes i humancentrifugen på Karolinska Institutet. Den har en radie på 7.25 m och är utrustad med en förarstol med samma sittvinkel som i 39 Gripen (ryggen bakåtlutad 28° från vertikalen).

Studien omfattar tre separata försöksserier. I den första serien (serie-1) undersöktes effekten av mottrycksvästen vid övertrycksandning under höga G-belastningar upp till 8.0 Gz genom att koppla bort västen och således ansluta masken direkt till tryckregulatorn. Denna förbi-koppling av blåsan i mottrycksvästen resulterade i markanta tryckstötter i masken (se nedan). En andra försöksserie (serie-2) genomfördes därför, upp till 9.0 Gz, med en luftreservoar/volymbuffert inkopplad mellan masken och regulatorn i den försöksbetingelse där mottrycksvästen kopplades bort. Den tredje serien (serie-3) utfördes för att undersöka effekten av att avlägsna mottrycket i västen på trycket i övre delen av thorax vid G-belastningar upp till 7.0 Gz; även i denna serie användes en volymbuffert.

### Försökspersoner

Försökspersonerna (fp) rekryterades bland friska män, där alla som deltog i försök med ökad G-belastning var väl förtrogna med att åka i humancentrifug och hade god kännedom om den G-skyddsutrustning som används i 39 Gripen. Alla tre serierna genomfördes vid såväl normal (1.0 Gz) som ökad G-belastning. I serie-1 deltog tolv fp i 1.0 Gz situationen varav åtta även deltog vid ökad G-belastning tillsammans med fyra andra fp. I både serie-2 och serie-3 deltog samma fp vid 1.0 Gz som vid förhöjd G-belastning. Fyra av fp i serie-1 deltog även i serie-2. Av de sex fp i serie-3 deltog en person i både serie-1 och 2, och ytterligare en person i serie-2. Alla försökspersoner fick skriftlig och muntlig information innan försöksstart. Studien var godkänd av Forskningsetikommittén vid Karolinska Institutet.

**Tabell 1.** Personuppgifter för de försökspersoner (fp) som deltog i de tre försöksserierna, angivna såsom medel och (min-max).

	Antal	Ålder (År)	Längd (cm)	Vikt (kg)
Serie-1: 1.0 Gz	12	36 (24-49)	181 (172-190)	79 (65-94)
Serie-1: höga Gz	12	35 (25-49)	181 (170-189)	80 (70-94)
Serie-2	9	33 (26-50)	179 (170-188)	81 (70-92)
Serie-3	6	35 (22-50)	180 (170-187)	78 (69-85)

### Instrumentering och mätmetoder

Fp bar under försöken den G-skyddsutrustning som används i 39 Gripen (AGE-39). Den består av en heltäckande anti-G-dräkt, mottrycksväst, flyghjälm och syrgasmask (Figur 1). Mottrycksvästen är en del av armfixeringsjackan och består av en trycksättningsbar blåsa som täcker framsidan av bröstkorgen, insydd i ett oelastiskt tyg som täcker ryggen och bröstkorgens sidor. Bröstblåsan trycksätts med samma tryck som masken via ett T-stycke mellan regulatorn/G-ventilen (EROS, F-5341, EROS, Frankrike) och masken. För att minska risken för maskläckage används en flyghjälm utrustad med en nackblåsa som trycksätts med samma tryck som i masken.

I serie-2 och serie-3 användes en luftreservoar/volymbuffert mellan EROS-regulatorn och masken i försökssituationen utan mottryck för att minska de tryckstötter i masken som påvisades i serie-1 när masken kopplades direkt till EROS-regulatorn (se Resultatavsnittet nedan). Denna volymbuffert bestod av en extra mottrycksväst som surrades på vänster sida av stolen intill EROS-regulatorn.

Tryck i mask via en anslutning i maskväggen och anti-G-dräkt via matningsslangen till dräkten mättes med två differentialtryckgivare (Endevco 8510, Endevco, USA och Wika



891.13.500, Wika GMB, Tyskland). Medeltrycket i masken under inandning ( $P_{mask}$ ) och differensen av medeltrycket i masken vid ut- och inandning ( $\Delta P_{mask}$ ) beräknades.

Hjärtfrekvens mättes med 5-avlednings precordial elektrokardiografisk registrering (EKG; Datex-Engström, Instrumentarium Corp., Finland).

Medelartärtryck (Mean Arterial Pressure; MAP) mättes med fotopletysmografisk teknik (Portapres®, TNO, Nederländerna) där en tryckmanschett placerades runt höger långfingers mellanfalang. Under artärtrycksmätningarna användes ögonhöjd som tryckreferensnivå; höger underarm vilade på ett stöd med handen strax ovan hjärthöjd.

Registrering av tryck i brösthålan skedde indirekt genom att mäta tryck i matstrupen, esofagus, med hjälp av en kateter (Erich Jaeger GmbH, Tyskland), bestående av en styv plastslang med en ballong i ena änden, som placerades i matstrupen via näsan. I serie-1 och 2 placerades den 10 cm långa ballongen i nedre tredjedelen av matstrupen, med kateterspetsen ungefär 39 cm från näsöppningen för mätning av tryck i nedre delen av bröstkorgen (nedre esofagstryck). För att möjliggöra mätning inom övre delen av bröstkorgen (övre esofagstryck) modifierades ballongen i serie-3 till en längd av c:a 4 cm och placerades i matstrupen med spetsen c:a 28 cm från näsöppningen. I alla tre försöksserier anslöts katetern via en lufttät genomföring i masken till en tryckgivare (Endevco 8510B-5, Endevco, USA) placerad bakom stolen och ballongen fylldes med cirka 0.5 mL luft innan tryckregistrering påbörjades.

Medeltryck i bröstkorgen under inandning ( $P_{eso}$ ) och differensen av medeltrycket i bröstkorgen vid ut- och inandning ( $\Delta P_{eso}$ ) beräknades.

Andningsmönster i form av bröstkorgens och bukens andningsrörelser mättes med respiratorisk induktanspletysmografi (RIP) via två elastiska band placerade på bröstkorgen i nivå med bröstvårtorna respektive på buken strax under naveln. Via dessa band kan relativa förändringar av tvärsnittsarean under respektive band registreras. Från RIP-bandens signaler beräknades ändringar i utandat läge för bröstkorgen och buken.

Muskelaktivitet (elektromyografi, EMG) registrerades på höger sida från en lårmuskel (m. vastus lateralis) och en bukmuskel (m. rectus abdominis) med hjälp av ett Bagnoli-4 EMG system och mjukvara (EMG-works) från DelSys Inc., MA, USA. EMG-signalerna mättes med bipolära ytelektroder placerade på den tjockaste delen av respektive muskel. Muskelaktivitet i form av EMG-RMS (Root-Mean-Square) -värden beräknades för varje G-profil och normaliserades som procent av muskelaktivitet vid en maximal muskelanspanning, utförd i början av varje mätserie.

För skattning av synpåverkan användes en ljusramp bestående av en central röd lampa och två gröna lampor placerade i 60° vinkel i förhållande till fp:s ögon. Fp rapporterade central och perifer synpåverkan enligt en fyrgradig skala (klart, suddigt, grått, svart (5)).

Allmän och andningsrelaterad ansträngning skattades enligt en 10-gradig skala (0=inget alls, ..., 3=måttlig, ..., 5=stark, ..., 7=mycket stark, ..., 10= mycket, mycket stark (nästan maximalt) (1), där angivande av skattningsvärden mellan två heltal tilläts.

G-belastning mättes med en analog accelerometer placerad i hjärthöjd. Alla signaler mellan gondolen och kontrollrummet överfördes via släpringar och registrerades med hjälp av skrivare (Graphtec Thermal Arraycorder, WR9000, Graphtec Corp., Japan), digital mätbandspelare (TEAC DAT recorder RD-135T, TEAC Corp., Japan), eller en Pentium dator via ett 16-kanalers A/D-kort (DAS 1602, Keithley Metrabyte, USA). Datainsamling och analys skedde med ett för ändamålet anpassat program utvecklat i TestPoint (TestPoint, Capital Equipment Corp., USA).

## **Försöksprotokoll**

Fp utrustades med givare och AGE-39 (dvs anti-G-dräkt, mottrycksväst, mask och hjälm). Anti-G-dräkt och väst anpassades för att sitta stramt men fortfarande komfortabelt. Varje fp undersöktes under två olika betingelser:

- 1 - Bröstblåsan i mottrycksvästen ”matades” med samma tryck som masken (med mottryck)
  - 2 - Inget tryck i bröstblåsan (utan mottryck), dvs masken kopplades antingen direkt till EROS-regulatorn (serie-1) eller till EROS-regulatorn via en volymbuffert (serie-2 och serie-3).
- Ordning mellan de båda betingelserna alternerades mellan fp.

Vid 1.0 G trycksattes mask och anti-G-dräkt under 20 s med ett testtryck om cirka 4.7 kPa (35 mmHg) respektive 14 kPa (105 mmHg). Under ökad G-belastning trycksattes mask och anti-G-dräkt med hjälp av EROS-regulatorn i proportion till belastningens storlek på samma vis som i flygplan 39.

I alla tre serier påbörjades varje G-profil vid 1.0 G med en G-tillväxt av 0.5 G/s till önskad G-nivå vilken hölls under 20 s. Därefter sänktes G-belastningen till 1.0 Gz med 0.5 G/s för byte av försöksbetingelse (inkoppling/urkoppling av bröstblåsan), varefter samma G-profil upprepades. De G-nivåer som användes i serie-1 var 5.0, 6.0, 7.0, 7.5 och 8.0 Gz. I serie-2 var G-nivåerna 7.0, 8.0, 8.5 och 9.0 Gz, förutom för de två första fp vilka utsattes för 6.5 och 7.5 Gz istället för 7.0 Gz. För dessa två fp har data från 6.5 och 7.5 Gz slagits samman och presenteras i fortsättningen som 7.0 Gz data. De G-nivåer som användes i serie-3 var 6.0, 6.5 och 7.0 Gz.

I alla tre serier instruerades fp att endast utföra anti-G-manövrer (dvs muskelanspänning/krysta) under G-tillväxten för att sedan i möjligaste mån slappna av och andas relaxerat under G-platån. Efter varje G-exposition skattade försökspersonen visuella symptom samt upplevd allmän och andningsrelaterad ansträngning.

I serie-2 genomförde sex fp dessutom, c:a 30 minuter efter sista G-profilen med 20 s platå, G-uthållighetstest i form av en simulerad flygstridsmanöver (Simulated Aerial Combat Maneuver, SACM) vilken genomfördes under båda försöksbetingelserna. Under SACM växlad G-belastningen mellan 5.5 (10 s) och 8.0 Gz (5 s) med G-tillväxt/sänkning av 5 G/s med maximalt 10 expositioner vid 8.0 Gz, med en totaltid av 186 s.

## **G-tolerans och G-uthållighet**

Totalt bortfall av det centrala eller perifera seendet användes som avbrottskriterier och som mått på G-tolerans. G-uthållighet definierades som tid till utmattning eller till totalt perifert/centralt synbortfall under SACM.

## **Analys**

I alla tre serierna användes de sista 10 s av den 20 s långa G-profilen för utvärdering av de olika mätvariablerna. Av utrymmesskäl redovisar vi för serie-3 endast den mätvariabel (övre esofagstryck) och dess bakgrundsvariabler (masktryck och medelartärtryck) som skiljer sig åt jämfört med serie-1 och 2.

Statistiska skillnader beräknades med variansanalys (ANOVA) för de fysiologiska mätvariablerna. De subjektivt skattade variablerna analyserades med ”Wilcoxon’s matched-pair” test för respektive G-nivå, korrigerat för multipla jämförelser med ”False Discovery Rate” (7). P-värden <0.05 betraktades som statistiskt signifikanta skillnader mellan testade variabler, medan  $0.05 < p < 0.10$  betraktades som tendens till skillnad. Data angivna som medel  $\pm$  standardfel, om annat inte anges.

## RESULTAT

Antal fp som genomförde båda försöksbetingelserna vid de olika G-nivåerna i serie-1 och 2 anges i tabell 2. Ett uttalat maskläckage, med markant sänkt masktryck, noterades hos en fp vid 7.0 Gz och en annan fp vid både 7.5 och 8.0 Gz. Data från dessa körningar uteslöts därför. I serie-2 krystade en fp under alla körningar vid ökad G-belastning varför alla hans data vid de höga G-belastningarna uteslöts. I serie-3 genomförde alla sex fp alla G-profiler. För vissa mätvariabler kunde endast data från ett reducerat antal fp användas för bearbetning pga olika mättekniska problem.

**Tabell 2.** Antalet fp som användes för databearbetning för de olika G-profilerna i serie-1 och 2 (antal personer för databearbetning/totalt antal personer som deltog i respektive serie).

	1.0 Gz	5.0 Gz	6.0 Gz	6.5 Gz	7.0 Gz	7.5 Gz	8.0 Gz	8.5 Gz	9.0 Gz
<b>Serie-1</b>	12/12	12/12	12/12	-	10/12	9/12	9/12	-	-
<b>Serie-2</b>	9/9	-	-	-	8/9	-	8/9	7/9	7/9
<b>Serie-3</b>	6/6	-	6/6	6/6	6/6	-	-	-	-

### **G-tolerans och G-uthållighet**

*Serie-1 och 2.* Det inträffade ingen G-inducerad medvetlöshet (G-LOC) eller rapporterades något fall av totalt bortfall av centralt (blackout) eller perifert (greyout) seende i någon av försöksbetingelserna. Det förekom inte heller någon skillnad i G-uthållighet mellan de två försöksbetingelserna, mätt som tid till utmattnings under SACM-profilerna (Utan mottryck =  $145 \pm 48$  s; Med mottryck =  $140 \pm 53$  s).

### **Skattad ansträngning**

*Serie-1.* Vid 1.0 Gz försöken skattades ansträngningsgraden något högre utan än med mottryck både för allmän ( $p=0.043$ ) och andningsrelaterad ansträngning ( $p=0.016$ ; Tabell 3). Vid förhöjd G-belastningarna var det ingen skillnad i allmän ansträngning, medan andningsrelaterad ansträngning var större utan mottryck vid 6.0 och 7.5 Gz ( $p=0.02$ ; Tabell 3). Vid en direkt fråga till åtta av fp vilket de föredrog, med eller utan mottryck svara 7 av 8 fp att de föredrog med mottryck medan en sade att det inte spelade någon roll.

*Serie-2.* Det rapporterades inte någon skillnad mellan de båda försöksbetingelserna för allmän ansträngning oavsett G-belastning. Vid 1.0 Gz försöken skattades den andningsrelaterade ansträngningen något större utan än med mottryck ( $p=0.012$ ; Tabell 3). Vid förhöjd G-belastning var det ingen skillnad i skattad andningsansträngning mellan de två försökssituationerna. Vid en direkt fråga till åtta av fp vilket de föredrog, med eller utan mottryck svara 4 av 8 fp att de föredrog med mottryck, en att han föredrog utan mottryck och 3 sade att det inte spelade någon roll.

**Tabell 3.** Skattad allmän och andningsrelaterad ansträngning och antal fp vid de olika G-belastningarna i försöksserie-1 och 2. Data angivna som median och (min-max).

Variabel	Försöksserie	G-belastning	Antal fp	Ansträngning Utan mottryck	Ansträngning Med mottryck
Allmän	Serie-1	1.0 Gz	12	3.0 (1.0-6.0)	2.0 (1.0-4.0)
		5.0 Gz	12	3.0 (1.0-3.0)	2.75 (1.0-3.0)
		6.0 Gz	12	3.0 (1.0-4.0)	3.0 (1.0-3.5)
		7.0 Gz	10	3.0 (3.0-4.5)	3.0 (2.0-4.5)
		7.5 Gz	10	3.75 (3.0-5.5)	3.5 (3.0-5.0)
	Serie-2	8.0 Gz	10	5.0 (2.0-7.0)	4.5 (2.0-6.5)
		1.0 Gz	9	2.0 (0.5-5.0)	2.0 (0.5-5.0)
		7.0 Gz	8	3.5 (1.5-5.0)	3.75 (1.5-5.0)
		8.0 Gz	8	4.0 (2.5-6.0)	4.0 (2.0-6.0)
		8.5 Gz	7	4.5 (3.0-7.5)	4.5 (3.0-7.0)
Andning	Serie-1	9.0 Gz	5	5.0 (3.5-8.5)	5.5 (3.0-8.25)
		1.0 Gz	12	4.0 (1.0-6.0)	3.0 (1.0-7.0)
		5.0 Gz	12	3.0 (1.0-3.0)	2.25 (0.5-3.0)
		6.0 Gz	12	3.0 (2.0-5.5)	2.5 (0.0-4.0)
		7.0 Gz	10	3.5 (2.0-4.0)	3.0 (2.0-4.0)
	Serie-2	7.5 Gz	10	4.0 (3.0-6.0)	3.0 (2.0-5.0)
		8.0 Gz	10	4.0 (3.5-7.0)	3.5 (2.0-6.5)
		1.0 Gz	9	3.0 (2.0-7.0)	2.0 (1.0-6.0)
		7.0 Gz	8	2.75 (1.0-3.0)	2.63 (1.0-4.0)
		8.0 Gz	8	3.0 (1.5-4.0)	3.0 (1.0-5.0)
		8.5 Gz	7	4.0 (3.0-6.0)	3.25 (2.5-5.0)
		9.0 Gz	7	3.5 (3.25-7.0)	4.0 (1.5-6.0)

### **Masktryck under inandningen (Pmask)**

*Serie-1, 2 och 3.* Det uppmättes ingen skillnad i Pmask mellan utan och med mottryck vid någon given G-belastning (Figur 2 A, B och C).

### **Tryckdifferens i masken ( $\Delta P_{mask}$ )**

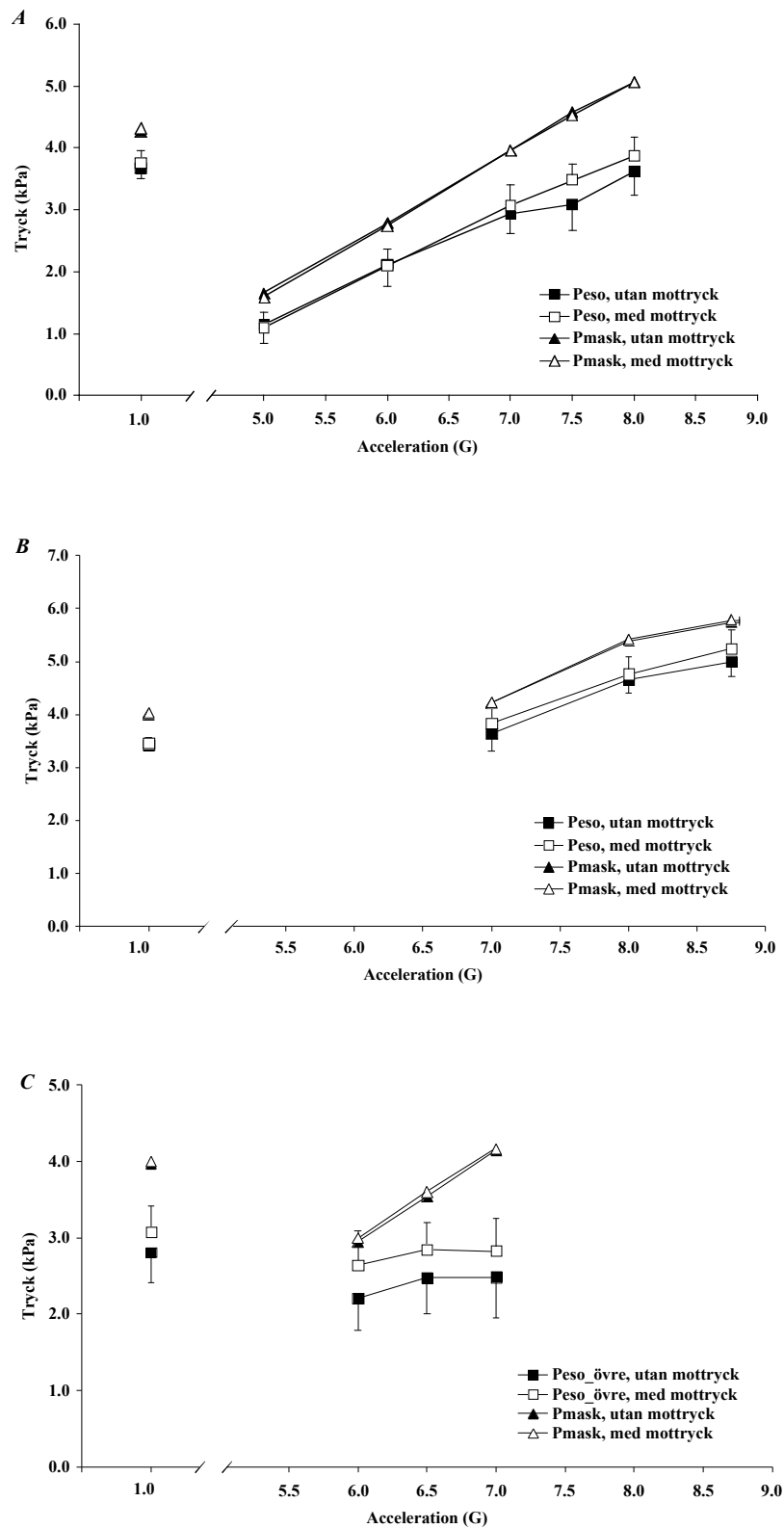
*Serie-1.*  $\Delta P_{mask}$  var större utan än med mottryck såväl vid 1.0 Gz ( $p=0.002$ ) som vid alla nivåer med förhöjd G-belastning ( $p<0.001$ ), vilket berodde på förhöjt masktryck under utandningen i betingelsen utan mottryck (Tabell 4).

*Serie-2.*  $\Delta P_{mask}$  var större utan än med mottryck vid 1.0 ( $p=0.015$ ;  $n=9$ ), 8.5 ( $p=0.030$ ;  $n=7$ ) och 9.0 Gz ( $p<0.001$ ;  $n=7$ ) vilket berodde på ett förhöjt masktryck under utandningen i betingelsen utan mottryck (Tabell 4).

### **Dräkttryck**

*Serie-1.* Vid 1.0 G försöken var dräkttrycket något högre utan ( $15.6 \pm 0.2$  kPa) än med mottryck ( $14.5 \pm 0.2$  kPa;  $p<0.001$ ), medan det inte fanns någon skillnad i dräkttryck mellan betingelserna vid förhöjd G-belastning.

*Serie-2.* Ingen skillnad i dräkttryck uppmättes mellan de båda försöksbetingelserna vid någon G-belastning.



**Figur 2.** Tryck i bröstgåla (Peso) och mask (Pmask) under inandning som funktioner av G-belastning i serie-1 (**A**: n=12 vid 1.0 Gz; n=9 vid förhöjd G-belastning), serie-2 (**B**: n=9 vid 1.0 Gz; n=8 vid förhöjd G-belastning) och i serie 3 (**C**: n=6) med och utan trycksatt bröstblåsa i mottrycksvåsten.

**Tabell 4.** Skillnad i medeltryck mellan utandning och inandning i bröstkorgen ( $\Delta$ Peso) och masken ( $\Delta$ Pmask) i serie-1 och serie-2.

Variabel	Försöksserie	G-belastning	Antal fp	Tryckskillnad (kPa) Utan mottryck	Tryckskillnad (kPa) Med mottryck	
$\Delta$ Peso	Serie-1	1.0 Gz	12	1.50 (0.14)	1.11 (0.14)	
		5.0 Gz	12	0.89 (0.05)	0.71 (0.06)	
		6.0 Gz	12	1.07 (0.07)	0.85 (0.05)	
		7.0 Gz	10	1.31 (0.14)	0.96 (0.07)	
		7.5 Gz	9	1.49 (0.20)	1.12 (0.15)	
		8.0 Gz	9	1.67 (0.21)	1.19 (0.16)	
	Serie-2	1.0 Gz	9	1.10 (0.09)	1.10 (0.19)	
		7.0 Gz	8	1.21 (0.16)	1.15 (0.12)	
		8.0 Gz	8	1.64 (0.12)	1.40 (0.16)	
		8.5 Gz	6	1.77 (0.30)	1.71 (0.29)	
		9.0 Gz	5	2.04 (0.31)	1.71 (0.36)	
	$\Delta$ Pmask	Serie-1	1.0 Gz	12	1.03 (0.07)	0.65 (0.04)
			5.0 Gz	12	0.44 (0.03)	0.25 (0.02)
			6.0 Gz	12	0.58 (0.03)	0.32 (0.02)
7.0 Gz			10	0.75 (0.08)	0.41 (0.02)	
7.5 Gz			9	0.81 (0.07)	0.44 (0.04)	
8.0 Gz			9	0.88 (0.10)	0.53 (0.05)	
Serie-2		1.0 Gz	9	0.64 (0.03)	0.58 (0.04)	
		7.0 Gz	8	0.51 (0.04)	0.42 (0.03)	
		8.0 Gz	8	0.75 (0.09)	0.56 (0.07)	
		8.5 Gz	7	0.85 (0.14)	0.62 (0.07)	
		9.0 Gz	7	1.04 (0.12)	0.68 (0.08)	

### Hjärtfrekvens

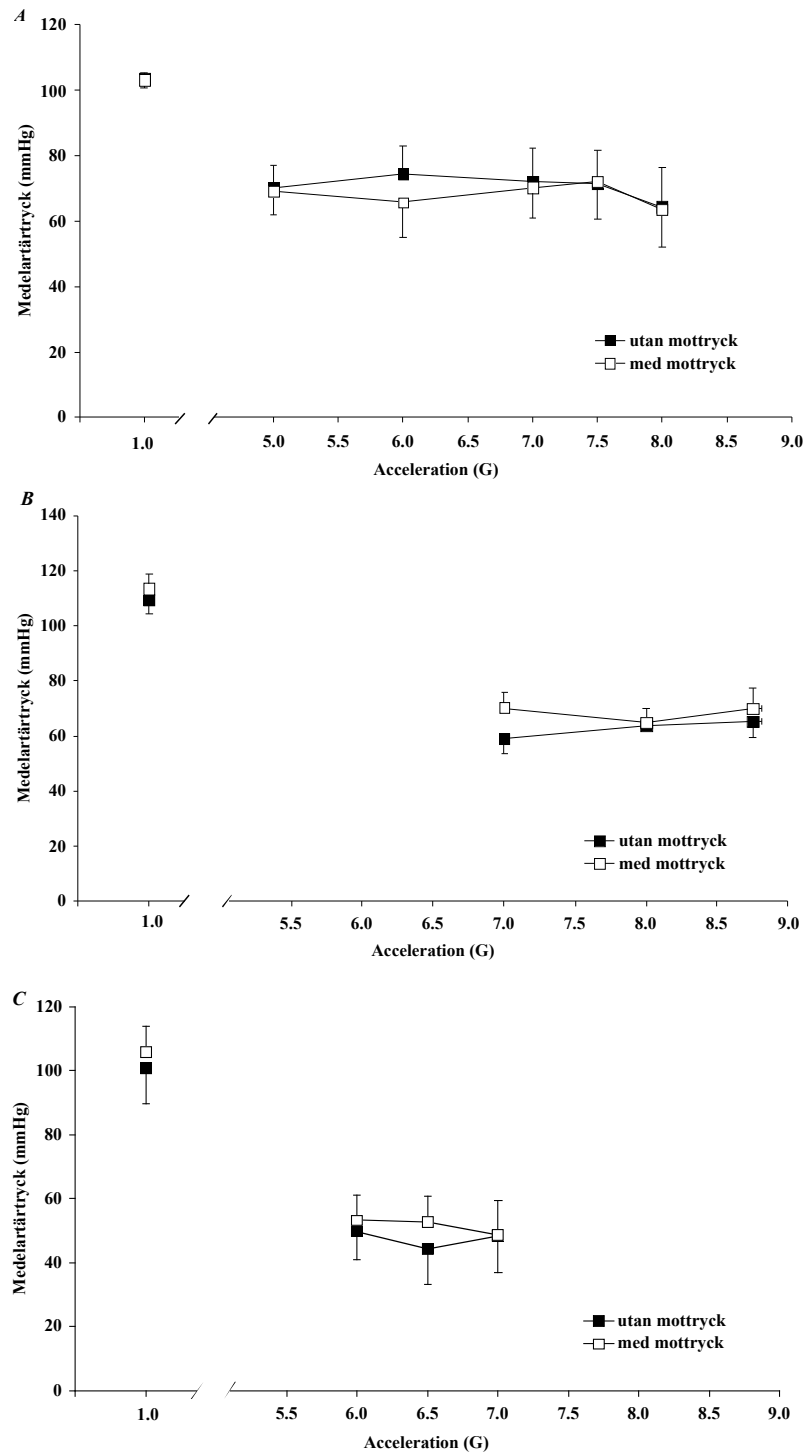
*Serie-1 och 2.* Hjärtfrekvensen ökade med ökande G-belastning ( $p < 0.001$ ) men ingen skillnad uppmättes mellan de båda försöksbetingelserna vid någon G-belastning (Tabell 5).

**Tabell 5.** Hjärtfrekvens och antal fp vid de olika G-belastningarna i serie-1 och serie-2. Data angivna som medel och (standardavvikelse).

Försöksserie	G-belastning	Antal fp	Hjärtfrekvens (1/min) Utan mottryck	Hjärtfrekvens (1/min) Med mottryck
Serie-1	1.0 Gz	12	67 (4)	63 (3)
	5.0 Gz	12	88 (13)	90 (12)
	6.0 Gz	12	96 (16)	92 (15)
	7.0 Gz	10	99 (17)	96 (16)
	7.5 Gz	9	99 (13)	100 (9)
	8.0 Gz	9	106 (13)	103 (12)
Serie-2	1.0 Gz	9	67 (12)	64 (13)
	7.0 Gz	8	108 (10)	100 (13)
	8.0 Gz	8	110 (17)	112 (12)
	8.5 Gz	7	120 (15)	118 (15)
	9.0 Gz	7	129 (15)	124 (15)

### Medelartärtryck i ögonhöjd (MAP)

Serie-1, 2 och 3. Ingen skillnad i medelartärtryck uppmättes mellan de båda försöksbetingelserna vid någon G-belastning (Figur 3 A, B och C).



**Figur 3.** Medelartärtryck (MAP) som funktion av G-belastning i serie-1 (A: n=12 vid 1.0 Gz; n=9 vid förhöjd G-belastning), serie-2 (B: n=8 vid 1.0 Gz; n=6 vid förhöjd G-belastning) och i serie 3 (C: n=6) med och utan trycksättning av bröstblåsan i mottrycksvästen.

### **Esofagstryck under inandning (Peso), nedre och övre**

*Serie-1.* Peso i nedre delen av bröstkorgen var något högre vid 1.0 Gz med än utan mottryck ( $p=0.009$ ). Vid förhöjd G-belastning ökade Peso med stigande G-belastning ( $p<0.001$ ) och var högre med än utan mottryck vid 7.5 ( $p<0.001$ ) och 8.0 Gz ( $p=0.012$ ; Figur 2 A).

*Serie-2.* Vid 1.0 Gz var det ingen skillnad i Peso i nedre delen av bröstkorgen mellan de båda försöksbetingelserna. Vid ökad G-belastning ökade Peso med stigande G-belastning ( $p<0.001$ ) på likartat vis i de båda försöksbetingelserna (Figur 2 B).

*Serie-3.* Ingen förändring av Peso i övre delen av bröstkorgen uppträdde med stigande G-belastning. Peso var generellt något högre med än utan mottryck ( $p=0.033$ ; Figur 2 C).

### **Tryckdifferens i esofagus ( $\Delta$ Peso)**

*Serie-1.*  $\Delta$ Peso var större utan än med mottryck vid 1.0 G ( $p=0.002$ ; Tabell 4). I bägge försöksbetingelserna steg  $\Delta$ Peso med G-belastning, men mer uttalat utan än med mottryck och  $\Delta$ Peso var större utan mottryck vid 7.0 ( $p=0.002$ ), 7.5 ( $p=0.002$ ) och 8.0 G ( $p<0.001$ ; Tabell 4).

*Serie-2.* Det var ingen skillnad i  $\Delta$ Peso mellan försöksbetingelserna vid någon G-belastning (Tabell 4).

### **Utandningsläget för bröstorg och buk**

*Serie-1.* Vid 1.0 Gz höjdes bröstkorgens utandningsläge lika mycket under båda försöksbetingelserna ( $p<0.001$ ;  $n=12$ ), medan bukens utandningsläge inte ändrades påtagligt under någon betingelse ( $n=7$ ). Vid förhöjd G-belastning uppmättes höjning av bröstkorgens utandningsläge ( $p<0.001$ ) och sänkning av bukens utandningsläge ( $p=0.007$ ). Förändringarna var lika stora för de båda försöksbetingelserna (Figur 4 A).

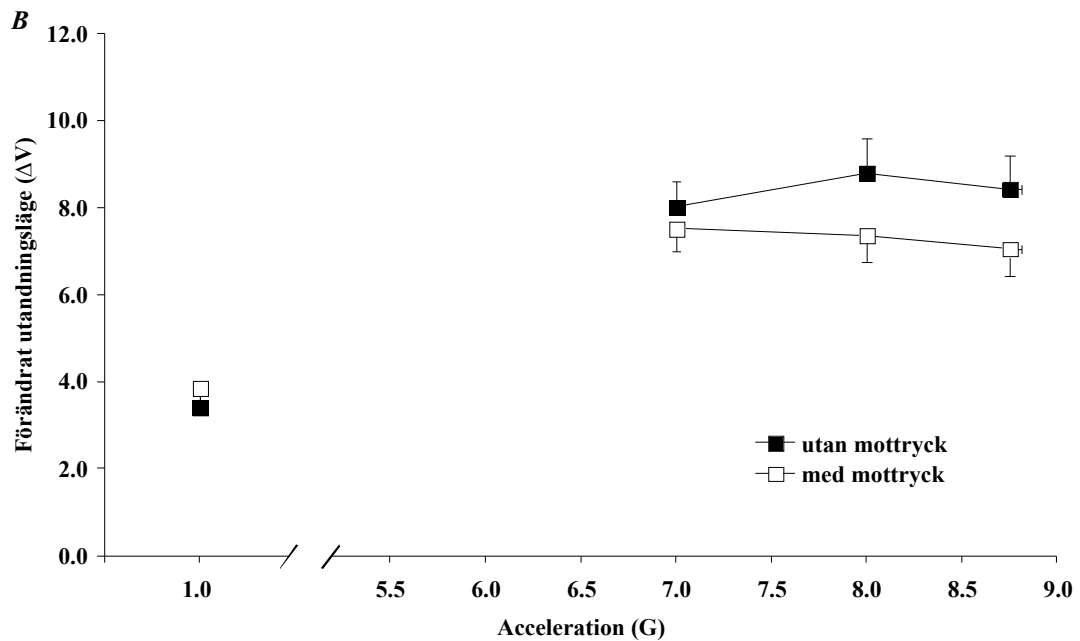
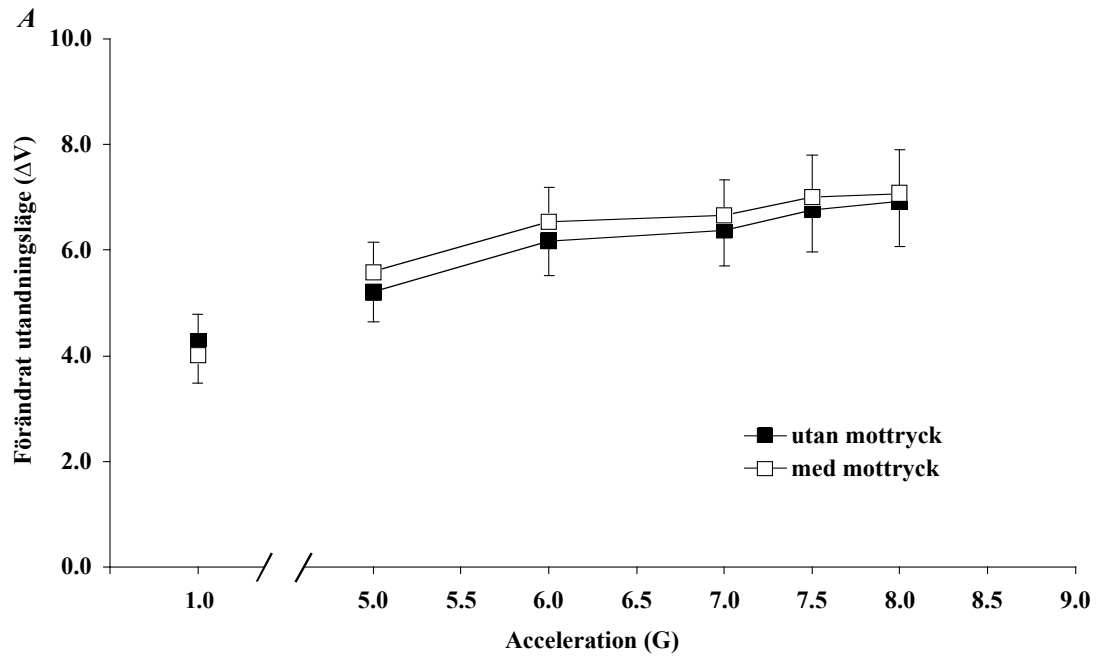
*Serie-2.* Vid 1.0 Gz höjdes utandningsläget för bröstkorgen ( $p<0.001$ ;  $n=9$ ) och sänktes för buken ( $p=0.021$ ;  $n=6$ ) lika mycket utan som med mottryck. Vid förhöjd G-belastning uppmättes höjning av bröstkorgens ( $p<0.001$ ) och sänkning ( $p<0.009$ ;  $n=5$ ) av bukens utandningsläge med en tendens till ett högre utandningsläge för bröstkorgen utan mottryck ( $p=0.078$ ) (Figur 4 B).

### **Muskelaktivitet**

*Serie-1.* Det förelåg ingen skillnad i uppmätt muskelaktivitet mellan de båda försöksbetingelserna vid någon G-belastning. En viss ökning av aktivitet i den raka bukmuskeln sågs med stigande G-belastning, från 7% av den maximala anspänningen vid 1.0 Gz till 13% vid 8.0 Gz; ( $p=0.0026$ ).

*Serie-2.* Muskelaktiviteten för bukmuskeln var likartad i båda försöksbetingelserna medan aktiviteten i benet var större vid 9.0 Gz utan (50% av maximal anspänning) än med mottryck (20%;  $p=0.002$ ;  $n=5$ ).





**Figur 4.** Förändring av bröstorgans utandningsläge som funktion av G-belastning i serie-1 (**A**: n=12 vid 1.0 Gz; n=10 vid förhöjd G-belastning) och serie-2 (**B**: n=9 vid 1.0 Gz; n=6 vid förhöjd G-belastning) med och utan trycksättning av bröstblåsan i mottrycksvästen.

## DISKUSSION

Resultaten visade att trycksättning av mottrycksvästen inte påverkade medelartärtryck, tryck i nedre delen av bröstkorgen, uttänjning av bröstkorgen eller grad av G-inducerad synpåverkan vid någon given G-nivå. Trycksättning av mottrycksvästen påverkade inte heller tid till utmattning eller ansträngningsgrad i samband med en simulerad flygstridsmanöver (SACM). Dessa fynd talar för att mottrycksvästen kan avlägsnas ur övertrycksandningssystemet i JAS 39 Gripen utan att detta väsentligt påverkar pilotens G-tolerans eller G-uthållighet.

Att trycksättning av mottrycksvästen i AGE-39 inte tycks påverka pilotens förmåga att klara höga G-belastningar stöds av resultat från en tidigare studie (8). I den studien exponerades 10 försökspersoner för såväl G-belastning upp till 9.0 Gz som simulerad flygstridsmanöver med och utan trycksättning av en modifierad mottrycksväst, anpassad med utrustning för kommande utlandsuppdrag (överlevnadsplagg-39), vilket ökade västens totala vikt till ungefär det dubbla (8). Bortsett från den extra utrustningen var västen identisk med västen i föreliggande studie. Inte heller i den tidigare studien noterades någon skillnad i G-tolerans eller G-uthållighet med respektive utan trycksättning av bröstblåsan (8).

Flera mekanismer kan tänkas bidra till att mottrycksvästen inte signifikant påverkar G-skyddet. Vid höga G-belastningar med piloten sittandes lätt tillbakalutad (28° från vertikallinjen i 39 Gripen) förefaller den ökade tyngden av bröstkorgen tillsammans med kompression av nedre delen av bröstkorgen genom anti-G-dräktens bukblåsa ge tillräcklig kompression av bröstkorgen för att göra mottrycksvästen överflödig. Således var tryckförlusterna från luftvägarna (dvs masktrycket) till nedre delen av brösthålan små eller måttliga (Figur 2 A och B). Eftersom övertrycksandning alltid genomfördes med trycksatt anti-G-dräkt är det tänkbart att kompression av bröstkorgen från anti-G-dräkten gav ett betydande bidrag till trycköverföring från luftvägar till brösthåla och thorakala blodkärl. Att tryckskillnaden under inandning mellan luftvägarna och nedre delen av brösthålan snarare tenderade att öka än att minska med stigande G-belastning (Figur 2 A och B) kan tyda på att den ökande tyngden av bröstkorgen inte nämnvärt påverkade trycket i brösthålan. Det bör noteras, trots att trycköverföringen från luftvägarna till nedre delen av brösthålan var relativt god, kvarstod en tryckskillnad mellan luftvägar och brösthåla vid hög G-belastning. Detta tillsammans med observationen att denna skillnad inte påverkades vid trycksättning av västen, talar för att trycköverföringen från bröstblåsa till brösthåla var bristfällig. Det är möjligt att den begränsade storleken av bröstblåsan, med täckning endast av bröstkorgens framsida, kan ha inskränkt trycköverföringen från blåsa till brösthåla. Resultat från föreliggande undersökning av undermålig trycköverföring från bröstblåsa till underliggande vävnad stöds av fynd i tidigare studier, vilka visar att under maximal krystningsmanöver vid höga G-belastningar ger trycksättning av en bröstblåsa med begränsad täckningsyta ingen tryckökning i nedre delen av bröstkorgen (3) och heller ingen ökning av artärtrycket (9).

Att den begränsade blåstäckningen kan vara en väsentlig orsak till den dåliga trycköverföringen stöds av en studie av Ernsting (10). Han fann att vid 1.0 Gz gav anti-G-byxor tillsammans med övertrycksandning en mycket effektivare höjning av artärtrycket när heltäckande mottrycksväst, dvs väst med blåsa som täckte hela bröstkorgen (inklusive rygg och buk) användes, än när mottrycksväst med enbart täckning av bröstkorgens framsida användes (10). Att bristfällig passning av västen påtagligt bidrog till en dålig trycköverföring (4) i föreliggande undersökning förefaller mindre trolig då västen individanpassades noggrant på varje försöksperson innan försöket påbörjades.

Den ursprungliga bevekelsegrunden för att införa aktivt mottrycket på bröstkorgen vid övertrycksandning var inte enbart att höja tryck i bröstkorg och artärer, utan även att skydda lungvävnaden från bristning till följd av övertänjning (10). Vår observation att vid varje given G-belastning var uttänjningen av bröstkorgen ungefär lika stor med som utan trycksatt väst tyder

på att bröstblåsan inte heller påtagligt motverkar uttänjning av bröstorg och lungor vid övertrycksandning. Detta överensstämmer med en studie av Green (12) som undersökte huruvida mottrycksvästen påverkar lungvolym och uttänjning av lungorna under övertrycksandning vid förhöjd G-belastning. Han använde två olika västar, den ena västen hade en blåsa som täckte både framsidan av bröstkorgen och ryggen medan blåsan i den andra västen endast täckte bröstkorgens framsida. Green fann inget som tydde på att någon av västarna påverkade lungvolym eller uttänjning av lungorna (12).

Att mottrycksvästen i AGE 39 inte motverkar en allmän uttänjning av lungorna utesluter dock inte att den kan förhindra regional uttänjning av lungornas övre, dvs apikala, delar. Hög G-belastning i huvud-fot-riktning förstör den vertikala hydrostatiska tryckgradienten i bröstkorgen vilket medför förskjutning av blod och vävnad till bröstkorgens nedre, basala, delar med samtidig omfördelning av luft till de övre lungregionerna (2, 11). Detta ökar tryckskillnaden mellan de apikala lungblåsornas in- och utsida; tryckskillnaden förstärks även av det tryck som anbringas i luftvägarna vid övertrycksandning, vilket leder till ytterligare uttänjning av apikala lungblåsar och följaktligen till ökad risk för lungbristning (15, 20). Trycksättning av anti-G-dräkten, å andra sidan, motverkar den G-inducerade tryckskillnaden mellan in- och utsida i lungans övre delar genom att reducera G-inducerad förskjutning av diafragma och förlängning av lungorna (16, 19). Våra resultat påvisade ett markant lägre tryck i övre än nedre delen av bröstkorgen vid förhöjd G-belastning, vilket tyder på att den G-inducerade ökningen av tryckgradienten i bröstkorgen kvarstår även vid trycksättning av anti-G-dräkten (Figur 2 A-B). Vår observation att trycksättning av mottrycksvästen endast medförde en modest ökning av trycket i övre delen av bröstkorgen tyder på att även mottryckvästens förmåga att minska risken för lungbristning kan ifrågasättas. Icke desto mindre gav trycksättningen av mottrycksvästen ett något högre tryck i övre delen av bröstkorgen (Figur 2 C). Det är tänkbart att detta lätt förhöjda tryck i övre delen av bröstkorgen skulle kunna förklara varför flera av försökspersonerna föredrog trycksatt mottrycksväst.

Även om fynden i föreliggande undersökning ger vid hand att mottrycksvästen kan avlägnas ur AGE-39 utan att påverka G-tolerans eller påtagligt öka risken för lungbristning finns det praktiska aspekter som måste beaktas om västen skall tas bort. Mottrycksvästen är inkopplad mellan andningsmasken och EROS-regulatorn via ett T-stycke. Under ett andetag sker förändringar av tryck och flöde i både mask och bröstblåsa. På grund av denna interaktion mellan mask och bröstblåsa visade det sig i serie-1 att bortkoppling av bröstblåsan (dvs i situationen utan mottryck) gav upphov till stora tryckvariationer mellan in- och utandning med markanta tryckstötter under utandningen, vilket resulterade i högre skattning av andningsansträngning. Bröstblåsan verkar således fungera som en luftreservoar/volympuffert för andningsgasen med en utjämning av tryck och flöden i masken. För att undvika dessa stora tryckvariationer infördes i serie-2 och 3 en ”dummy väst” som volymreservoar mellan mask och EROS-regulator när mottrycksvästen var urkopplad.

## **SAMMANFATTNING**

Resultaten i denna studie av mottrycksvästens effekt vid övertrycksandning visar:

- Ingen skillnad i G-tolerans med respektive utan trycksättning av mottrycksvästen, baserat på mätning av synpåverkan och artärblodtryck i ögonhöjd vid given förhöjd G-belastning.
- Ingen skillnad i G-uthållighet med respektive utan trycksättning av mottrycksvästen, mätt som tid till utmattning och ansträngningsgrad vid simulerad flygstridsmanöver.
- Ingen påtagligt ökad risk för övertänjning av bröstorg och lungor när mottrycksvästen inte är trycksatt.
- Att tryckstötter i andningsmasken uppstår då mottrycksvästen avlägsnas men att en luftreservoar/volymbuffert mellan G-ventil och andningsmask motverkar detta problem.

Slutsatsen är att det ur fysiologisk/medicinsk synvinkel är möjligt att avlägsna mottrycksvästen från det G-skyddssystem som används i JAS 39 Gripen.

Det bör dock noteras att studien inte omfattar effekter av övertrycksandning vid höghöjdsflygning.

## **TACKORD**

Ett stort tack riktas till Björn Johannesson för god teknisk assistans vid körningarna i centrifugen. Dessutom ett stort tack alla som ställde upp som försökspersoner i den här studien trots obehagliga försök med slangar i näsan och höga G-belastningar med många starter och stopp.

## REFERENSER

1. **Borg, G.** Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 14: 377-381, 1982.
2. **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.
3. **Buick, F., J. Hartley, and M. Pecaric.** Maximum intra-thoracic pressure with anti-G straining maneuvers and positive pressure breathing. *Aviat Space Environ Med* 63: 670-677, 1992.
4. **Buick, F., G. Porlier, and J. Maloan.** Cardiovascular responses to pressure breathing with loose and tight jerkin. *Aviat Space Environ Med* 60: 497-497, 1989.
5. **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.
6. **Burton, R. R. and J. E. Whinnery.** Biodynamics: Sustained acceleration. In: *Fundamentals of aerospace medicine*, edited by DeHart R.L. Baltimore: Williams & Wilkins. 1996, p. 201-260.
7. **Curran-Everett, D.** Multiple comparisons: philosophies and illustrations. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 279: 1-8, 2000.
8. **Eiken, O., Kölegård, R., Johannesson, B., Bergsten, E., and Grönkvist, M.** Överlevnadsplagg 39; effekt på andningsarbete och komfort under ökad acceleration. FOI - Swedish Defence Research Agency; 2003. FOI-R--0908--SE: 1-16.
9. **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.
10. **Ernsting, J.** Some effects of raised intrapulmonary pressure in man. AGARDograph No 106. Neuilly-sur-Seine, France: NATO. 1966.
11. **Glaister, D. H.** The effect of gravity and acceleration on the lung. AGARDograph 133. Slough, England: Technovision Services. 1970.
12. **Green, N. D. C.** Lung volume changes under positive pressure breathing for G protection. London: Ministry of Defence; 1995. Report No: RAF, SAM 01/95: 1-21.
13. **Green, N. D. C.** Protection against long duration acceleration. In: *Aviation Medicine*, edited by J. Ernsting, A. N. Nicholson, and D. J. Rainford. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1999, p. 148-156.
14. **Grönkvist, M., E. Bergsten, R. Kölegård, P. Gustafsson, and O. Eiken.** Is the counter-pressure jerkin needed during positive pressure breathing at high +Gz-loads? *Aviat Space Environ Med* 74: 469-470, 2003.
15. **Henry, J. P.** A determination of the mechanical limits to safe pressurization of the mammalian lung. N R C Comm on Aviat Med Report No. 463: 1945.
16. **Howard, P.** The physiology of positive acceleration. In: *A textbook of aviation physiology*, edited by J. A. Gillies. Glasgow: Pergamon Press Ltd. 1965, p. 551-687.
17. **Landervik, B. and Dahlbäck, G.** Man rating of the anti-G protection in a human centrifuge of the tactical flight combat suit (TFCS), the EROS oxygen regulator / anti-G valve with the Swedish JAS 39 test pilots. Stockholm, Sweden;1991. Report No: Defence Material Administration Testing Directorate Test Report M73:52 / 91.

18. **Landervik, B.** The Swedish tactical flight combat suit is approved for production. SAFE: 356-361, 1997.
19. **Modell, H. I. and F. W. Baumgardner.** Influence of the chest wall on regional intrapleural pressure during acceleration (+Gz) stress. Aviat Space Environ Med 55: 896-902, 1984.
20. **Wood, E. H.** Maximum protection anti-G suits and their limitation. Safe J 18: 30-30, 1988.
21. **Wood, E. H.** Development of anti-G suits and their limitations. Aviat Space Environ Med 58: 699-706, 1987.
22. **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.
23. **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.