

ULF DANIELSSON



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.

Ulf Danielsson

Energikostnad vid fotmarsch och risken för överhettning

Titel	Energikostnad vid fotmarsch och risken för överhettning
Title	Energy cost of foot march and the risk of heat exhaustion
Rapportnr/Report no	FOI-R--2634--SE
Rapporttyp Report Type	Användarrapport User report
Sidor/Pages	45 p
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2008
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde Programme area	8. Människa och teknik 8.Human Systems
Delområde Subcategory	81 Fysiologi 81Physiology
Projektnr/Project no	E 4462
Godkänd av/Approved by	
FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI , Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för CBRN-skydd och säkerhet	CBRN Defence and Security
901 82 Umeå	SE-901 82 Umeå

Sammanfattning

Fysisk uthållighet kan påverkas negativt av förhöjd kroppstemperatur. För Försvarmaktens del kan värmeobalans uppstå vid aktioner i länder med tropiskt eller ökenklimat men kan även förekomma i Sverige. Fotförflyttning är en aktivitet som förknippas med ökad risk för överhettning eftersom den kan pågå under längre tid. Energikostnaden har mätts för fotmarsch i skilda terrängar med små höjdskillnader; a) grusväg, b) gräsbevuxen, plöjd åker, c) torr mosse samt b) skogsstig (något kuperad). Bördan var antingen 22 kg eller 35 kg. Energikostnaden vid förflyttning i mörker med hjälp av bildförstärkare, såväl på grusväg som i skogen har jämförts med marsch i dagsljus. Transportkostnaden, TpC, (energikostnaden per förflyttad massa och sträcka) var 3,9 J/(kg•m) på plan grusväg, 5,9 J/(kg•m) på igenvuxen åker samt 7,9 J/(kg•m) vid gång i torr mosse. Den självvalda farten var 1,5 m/s, 1,2 m/s respektive 1,0 m/s. Farten minskade obetydligt då 35 kg bars i stället för 22 kg. Transportkostnaden påverkades marginellt av bördans storlek. TpC för den något kuperade skogsstigen (börda 35 kg) var 6,7 J/(kg•m) och farten var 1,1 m/s. Vid snabbmarsch (jogging), med farten 2,2 m/s och bördan 22 kg blev TpC 5 J/(kg•m). TpC påverkades inte av ljusförhållandet vid gång på grusväg medan mörkret medförde att TpC ökade från 6,7 till 8,8 J/(kg•m) vid förflyttning i skogen, samtidigt som farten reducerades påtagligt. Baserat på uppmätt transportkostnad har risken för att värmerelaterade problem uppstår under en längre fotmarsch beräknats för Sverige, Serbien, Tchad, Somalia, DR Congo, Afghanistan samt Irak. För att minimera risken för överhettning har gränsen för acceptabel värmelagring satts till 6 kJ/kg vid exponering under flera timmar. Genom att anpassa farten och välja lätt fältuniform kan en 6 h 40 min lång förflyttning (50/10 min arbete respektive vila samt 60 min lunchpaus) genomföras med liten risk för överhettning även när ballistiskt kroppsskydd bärs. Dock, under den varma årstiden i Irak och Tchad är även farten 0,9 m/s på hård, plan grusväg alltför hög. Kortare arbetspass och längre vila krävs om kroppsskyddsnivån ska kunna behållas. Alternativt måste någon typ av kylning tillföras. Vätskebehovet är väl relaterat till den ackumulerade värmelagringen. Om värmelagringen har nått 6 kJ/kg vid marschens slut kommer vätskeförlusten, huvudsakligen i form av svettning, att ha varit minst 0,8 liter per timme förflyttning.

Nyckelord: Terrängfaktor, värmelagring, skyddsnivå, aktivitet, klimat, kylning, vätskeförlust

Summary

Physical performance can be impaired at raised body temperature. As for the Armed Forces thermal unbalance can occur during missions in tropical or desert climate, but can also arise in Sweden. Foot march is one activity that can proceed for a considerable time period and hence, is associated with raised risk of heat exhaustion. Metabolic power has been measured during foot march on various flat terrains a) gravel road with hard surface, b) ploughed field, overgrown with grass, c) dry bog and d) forest path (slightly hilly). The mass of the carried load was either 22 kg or 35 kg including field uniform, weapon and ballistic vest. Power of walking in daylight was compared with walking in the dark on a gravel road and in the forest (NIR-goggles were used). Transport cost, TpC ($J/(m \cdot kg)$), energy cost (J) per unit of total mass (kg) and distance (m), was 3,9 $J/(m \cdot kg)$ (gravel road), 5,9 $J/(m \cdot kg)$ (ploughed field) and 7,9 $J/(m \cdot kg)$ (dry bog). Mass hardly affected TpC. The self-chosen speed was 1,5 m/s, 1,2 m/s and 1,0 m/s, respectively. Speed was reduced only marginally when 35 kg was carried. TpC for the somewhat hilly forest path was 6,7 $J/(m \cdot kg)$ and the speed was 1,1 m/s (carried load 35 kg). Rapid march (jogging) was also conducted carrying 22 kg. Speed was set to 2,2 m/s and this gave a TpC of 5 $J/(m \cdot kg)$. Darkness did not affect speed, 1,5 m/s, nor TpC, 4,7 $J/(m \cdot kg)$, when walking on a gravel road (slightly hilly with somewhat rough surface). On the contrary, darkness increased TpC substantially, from 6,7 $J/(m \cdot kg)$ to 8,8 $J/(m \cdot kg)$ in the forest and speed was reduced from 1,2 m/s to 1,0 m/s. Based upon TpC, the risk of heat related problems due to a long foot march has been calculated for climatic conditions typical for Sweden, Serbia, Tchad, Somalia, DR Congo, Afghanistan and Iraq. To minimize the risk of heat exhaustion the upper limit of heat storage at long duration exposure was set to 6 kJ/kg. For the mentioned countries the 6 h and 40 min long march (50/10 min work/rest and 1 h lunch break) can be conducted with minor risk of heat failure if speed is adapted and a light combat uniform is worn together with a ballistic vest. Nevertheless, during the warmest months in Iraq and Tchad walking at the speed 0,9 m/s on a level, hard gravel road carrying 35 kg produces too much heat. Provided that the body armour is carried a modified march discipline is needed if external cooling cannot be provided. Water loss is closely related to body heat storage. If it has reached 6 kJ/kg at the end of the march the water loss has been roughly 0,8 l per hour of walking.

Keywords: Terrain factor, heat storage, protection level, activity, climate, cooling, water loss

Innehållsförteckning

1	Bakgrund	7
2	Metoder och Teknik	8
2.1	Effektutveckling	8
2.2	Värmeproduktion	9
2.3	Värmeavgivning	10
2.4	Värmelagring - överhettning	11
2.5	Fältförsök	12
2.6	Beräkningar	13
3	Resultat	15
3.1	Fältförsök	15
3.2	Resultat av simuleringsberäkningar	16
3.2.1	Värmelagring - Stockholm, Sverige	16
3.2.2	Värmelagring - konfliktorter	20
3.2.3	Vätskeförlust	26
3.2.4	Klimatgräns	26
4	Diskussion	28
4.1	Diskussion fältförsök	28
4.2	Diskussion simuleringsberäkningar	31
4.2.1	Simuleringsberäkningar, Stockholm	31
4.2.2	Simuleringsberäkningar, konfliktorter	33
4.3	Slutsatser	36
5	Appendix A (Klädda människans värmeterans)	37
6	Appendix B (Simuleringsmodellen INSULA)	39
7	Appendix C (Extern kylning)	40
7.1	Kylstrategier	40
7.2	Kyltekniker	41
8	Appendix D (Skattning av värmelagring i fält)	43
9	Appendix E (Konvertering till annan fart, massa och/eller underlag)	44

Omslagsbild: Amerikansk soldat i Irak, 2007. Okänd fotograf.

1 Bakgrund

Även med en hög grad av mekanisering kommer den markstridande soldaten ofta förflytta sig till fots. De konflikter som finns på den internationella arenan kräver patrullering och strid till fots, ofta på grund av att konfliktområdet kännetecknas av tät bebyggelse eller kraftig kupering. I många områden begränsar även växtlighet och vattendrag fordonsframkomlighet vilket gör att många insatser måste ske avsuttet.

Dagens, och morgondagens markstridssoldat är, och kommer att vara, tungt utrustade med såväl vapen, kroppsskydd och övrig personlig utrustning. Strävan finns att göra varje artikel lättare men möjligheten att vara bättre rustad i olika hotsituationer genom införande av sensorer, kommunikationsutrustning, tilläggsvapen m.m. gör att totala vikten knappast kommer att minska. Följden blir att fysiska kravet på soldaten ökar vid fotförflyttning vilket i sin tur medför stigande värmeproduktion i kroppen. Olägenheten skulle kunna balanseras om soldaten kunde avge mer värme från kroppen. Tyvärr tenderar utvecklingen att gå i motsatt riktning. Ett lika drivande krav som att få teknik som ger bättre omgivningsuppfattning är att få mer kvalificerat skydd mot splitter, projektiler samt stickvapen. Den typen av skydd kommer att utgöra den största enskilda vikt-komponenten hos den framtida soldaten samtidigt som skydden är såväl täta som tjocka. Effekten blir att soldaten får allt svårare att göra sig av med överskottsvärmen framförallt vid uppträdande i varmt och fuktigt klimat. Konflikten mellan skyddsnivå och rörlighet blir påtaglig.

Dilemmat har identifierats tidigare¹. Utländska förband med långvarig erfarenhet av strid och uppträdande i varmt klimat har inte kunnat peka på lösningar som förenar dagens krav på bra skydd (låga förluster) och ett avsuttet, rörligt uppträdande. I en nära framtid finns små möjligheter till tekniska genombrott som kan ge individuell kylning eller utrustning/plagg som ger önskat skydd men samtidigt är ventilerande. Följden blir att den tid och/eller med den hastighet som soldaten kan förflytta sig måste begränsas i en grad som bestäms av klimatet, alternativt så måste lättnader i skyddet göras med stigande risk för förluster.

Syftet med denna rapport är att, utifrån utförda studier av energikostnaden vid fotförflyttning och kännedom om den personliga utrustningens värmetekniska egenskaper ge rekommendationer om vilka förflyttningshastigheter, skyddsnivåer m.m. som är förenliga med låg risk för överhettning vid fotmarsch i för FM aktuella insatsområden, under olika årstider.

Begränsning: Rapporten berör inte de termiska problem som uppkommer i CBRN-miljöer. Dessa har belysts tidigare².

¹ Danielsson, U. Rörelse som skydd-inverkan av utrustning och hot. FOI-R—2186—SE, 2006

² Danielsson, Ulf. "Soldatens fysiska uthållighet i CBRN(E)-miljö. FOI-R—2395—SE, 2008

2 Metoder och Teknik

2.1 Effektutveckling

Effektutvecklingen och därmed värmeproduktionen i kroppen bestäms av förflyttningshastigheten, individens och den burna bördans sammanlagda massa samt underlagets beskaffenhet. Dessutom har det visat sig att dag/mörker inverkar på kostnaden för förflyttning. Förutom att kroppsdelar accelereras under steget så sker detsamma med utrustningen vilket är effektkrävande. Plagg som har stor friktion eller är olämpligt konfektionerade ökar också effektutvecklingen³. Olika utrustningars och aktiviteters inverkan på energikostnaden har beskrivits i olika källor^{4,5,6,7,8}. Flera av studierna har gjorts på soldater under fotmarsch med varierande börda och på olika underlag⁹. Problemet med vissa av dessa är att det inte alltid klart framgått vilken utrustning som burits, inte heller är det alltid givet hur rådande markförhållanden ska översättas till motsvarande "aktuell" terräng.

I de refererade FOI-studierna har effektutvecklingen (W) mätts med direktteknik. Den kan beräknas¹⁰ genom att bestämma inandningens flödes hastighet, V_i (l/min), och utandningsluftens syrgaspartialhalt (f_eO_2) enligt

$$E = [350 \cdot V_i \cdot (0,2094 - f_eO_2) \cdot (273) / (273 + T_a) \cdot (p_b - p_{H_2O}) / 101] / (1 + 0,082 \cdot p) \quad (1)$$

Korrigerig gör för lufttemperatur, T_a , (°C), lufttryck, p_b , (kPa), vattenångpartialtryck, p_{H_2O} , (kPa) samt den fraktion av bränslet till energimetabolismen som kommer från proteiner, p , (normalt 0,13). Soldatens nakenvikt och den burna massan har mätts med personvåg. Förflyttningshastigheten och vald väg har i de flesta fall bestämts med hjälp av GPS som givit såväl lokal- som medelhastighet. Farten har kunnat relateras till den specifika terrängen och underlaget genom att "spåret" överlagrats elektronisk karta.

Effektutvecklingen kan också beräknas indirekt. Förflyttningshastigheten, v (m/s), terrängbeskaffenheten, f (n.d.), total förflyttad massa, m_t (kg) samt underlagets lutning, G (%/100, a (°), utgör de variabler som nyttjas vid beräkningen där ekv 3 och 4 gäller för uppförsbacke respektive nedförsbacke.

$$E_u = f \cdot (0,661 \cdot v + 0,115) \cdot 3,28 \cdot m_t + 71,1 + 3,5 \cdot (m_t \cdot 9,81 \cdot v \cdot G) \quad (2)$$

$$E_n = f \cdot (0,661 \cdot v + 0,115) \cdot 3,28 \cdot m_t + 71,1 + 2,4 \cdot (m_t \cdot 9,81 \cdot v \cdot G) \cdot 0,3^{(a/7,65)} \quad (3)$$

Ursprungliga ekvationen¹¹ var härledd för en fart men är här är något modifierad för att gälla olika farter¹². Ekvationerna baseras på en terrängfaktor (f) som härrör från klassiska

³ Patton, J.F., T.E. Bidwell, M. Murphy, R. Mello och M. Harp. Energy cost of wearing chemical protective clothing during progressive treadmill walking. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 66, pp. 238-242, 1995.

⁴ Goldman, R.F. Energy expenditure of soldiers performing combat type activities. *Ergonomics*, 8, pp. 321-327, 1965.

⁵ Passmore, R. Och J.V.G.A. Durnin. Human energy expenditure. *Physiology Review*, 35, pp. 801-840, 1955.

⁶ Danielsson, U. burens utrustning, särskilt kroppsskyddets, effekt på soldatens belastning och prestation. FOI-R—0563—SE, 2002.

⁷ Cristie, C.C. och P.A. Scott. Metabolic responses of south African soldiers during simulated marching with 16 combinations of speed and backpack load, *military medicine*, 170, pp. 619-622, 2005.

⁸ Ainsworth, B. E., W.L. Haskell, A.S. Leon, D.R. Jacobs Jr, H.J. Montoye, J.F. Sallis och R.S. Paffenbarger Jr. Compendium of physical activities: classification of energy costs of human physical activities *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25, pp. 71-80, 1993.

⁹ Demczuk, V. Field validation of an energy expenditure model for walking soldiers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 22 pp. 381-387, 1998.

¹⁰ Wennberg, L.A., U. Danielsson. A new formula for estimating metabolic rate. *European Journal of applied Physiology*, 35, pp. 231-234, 1976

¹¹ Santee, W.R., W. F. Allison, L.A. Blanchard och M.G. Small. A proposed model for load carriage on sloped terrain. *Aviation, Space and Environmental medicine*, 72, pp. 562-566, 2001

studier av Soule och Goldman¹³ och Pandolf et al.¹⁴ och vilka varit förhärskande i decennier. Terrängfaktorn är uttryckt som kvoten mellan effektkostnaden vid förflyttning på ett underlag och den för slät, plan asfaltsväg. Nivåerna har dock givit något låga värden och beskrivningarna har varit något oprecisa avseende underlagets egenskaper. Förutom terrängfaktorer för barmark har även motsvarande för fotmarsch i snö med varierande djup undersökt¹⁵. För fullständighetens skull har dessutom undersökts effektkravet vid skidmarsch med och utan pulka i varierande terräng¹⁶. Vinterstudierna är mindre relevanta avseende överhettning men har betydelse för bedömning av uthållighet och vätskebalans. Dessutom kan gång i snö vara jämförbart med förflyttning i lös sand samt i våtmarker.

Vid andra studier där kravet har varit minimal störning av försökspersonerna, har effektutvecklingen beräknats indirekt genom att mäta hjärtfrekvens och relaterat denna till maximal arbetsförmåga och puls. Därigenom har ett mått på energiomsättningskostnaden kunnat erhållas utan att försökspersonen störts nämnvärt. Förutsatt att arbetet inte är alltför långvarigt och att värmebelastningen är låg fås resultat jämförbara med den direkta tekniken. Pulsättning har nyttjats vid t.ex. orientering då kravet på rörelseförmåga och hastighet varit högre än vid förflyttning med burens utrustning då belastningen ändå är avsevärd. Men det är inte realistiskt att tro att den vanlige soldaten ska vara utrustad med sensorer som specifikt mäter fysiologiska variabler. Bedömning av soldatens, stridsparets eller gruppens effektutveckling under förflyttning måste baseras på teknik som soldaten ändå behöver för exempelvis sin omvärldsuppfattning. I den ingår positionerings- och navigeringsutrustning och annat som ingår i "ledningssystem soldat".

Ett enkelt uttryck för beräkning av effektkravet (W) vid förflyttning fås ur

$$P = v \cdot m_t \cdot (T_p C + Gr) \quad (4)$$

Där Gr är mått på underlagets lutning och härleds ur ekv. 2 och 3. Indata kan komma från inklinometer eller höjdmätare som ingår i soldatens utrustning. Transportkostnaden ($T_p C$) är energikostnaden per förflyttad massenhet (kg) och sträcka (m) och är den parameter som måste kunna hämtas från en terrängdatabas. I en framtid kan relevant värde kanske hämtas ur basen genom analys av kroppens acceleration under förflyttning. Olika accelerometrar kommer att ingå i soldatutrustningen. Kvar återstår att manuellt lägga in individens och bördans massa.

2.2 Värmeproduktion

Den metaboliska energiomsättningshastigheten vid given förflyttning är inte identisk med den värmeeffekt som produceras i kroppen eftersom verkningsgraden kan anta olika värden. För att mer exakt kunna bedöma risken för termisk obalans är det av betydelse att veta värmeproduktionen vid given arbetsform. Vid enkla fysiska aktiviteter utförda på t.ex. ergometercykel eller andra bromsande maskiner är kunskapen hyggligt god avseende hur stor del av energiomsättningen som blir värme i kroppen. Vid gång på rullmatta, men i än

¹² Danielsson, U., S. Grambo. Position och arbetsbelastning i fält. Direktmätning och beräkning från GPS-data. FOI-R—0683—SE, 2003.

¹³ Soule, R.G. och R.F. Goldman. Terrain coefficients for energy cost prediction. *Journal of Applied physiology*, 32, pp. 706-708, 1972.

¹⁴ Pandolf, K.B., B. Givoni och R.F. Goldman. Predicting energy expenditure with loads while standing or walking slowly. *Journal of applied Physiology*, 43, pp. 577-581, 1977.

¹⁵ Pandolf, K.B. M.F. Haisman och R.F. Goldman. Metabolic energy expenditure and terrain coefficients for walking on snow. *Ergonomics*, 19, pp. 683-690, 1976.

¹⁶ Bergh, U. och U. Danielsson. Power requirements during skiing with sledges and backpack. *Proc. Problems with cold*. Ed. Holmér, Kuklane. Arbete och Hälsa, 18, pp. 232-234, 1998.

högre grad i terrängen, är kunskapen om verkningsgraden vid muskelarbetet begränsad. Det yttre arbetet, som förflyttning kräver, är vid gång på hårt underlag i storleksordningen 10 till 12 % av metabolismen¹⁷. Det betyder att cirka 90 % av effektutvecklingen blir värme som måste avges för att inte kroppstemperaturen ska öka. Hur stor verkningsgraden är vid förflyttning i obanad terräng är okänd och därför svår att ansätta ett värde på. Bristen på data gör att i de värmebalansräkningar som följer nedan är det antaget att verkningsgraden är 12 % oberoende av underlag, burens massa, förflyttningshastighet, terrängens lutning m.m. Denna förenkling innebär troligtvis ingen avgörande skillnad när det gäller slutsatsen även om avvikelser från maximal verkningsgrad på cirka 20 % till 0 % innebär minus eller plus 30 till 50 W vilket inte är försumbart för värmeupplagringen under längre tider.

2.3 Värmeavgivning

Kroppen har begränsad förmåga därför måste nästan all värme som utvecklas i kroppen, på sikt, avges för att inte överhettning ska inträffa. Det medför att vid lite längre insatser, halv timme eller längre, måste graden av obalans vara relativt liten.

För att uppnå värmebalans måste den producerade värmen avges. Det kan ske dels via "torra" processer som konvektion, konduktion och strålning dels genom "våta" processen dunstning av vatten (svett). Vanligtvis är konduktion en mindre viktig process men lokalt kan den vara av betydelse vid direktkontakt med utrustning då brännskada alternativt förfrysningsskada kan uppstå. Konvektiv värme- och masstransport mellan hud och omgivning är en följd av luftens hastighet, ytans struktur, storlek och form¹⁸. Mängden värme som transporteras bestäms av den temperaturskillnad som råder mellan hud och omgivning. Hudytans storlek som exponeras mot omgivningen är också av avgörande betydelse för den mängd värme och fukt som kan avges. Om hela kroppen är naken kan den avge all den värme som utvecklas i kroppen under alla de aktiviteter som är relevanta för soldaten under en insats i de allra flesta miljöer. Konflikten mellan producerad och avgiven värmeeffekt accentueras när kroppen i ökande grad täcks med skyddande lager.

Värme och masstransporten mellan hud och omgivning sker genom materiallagren, huvudsakligen via diffusion, samt via forcerad konvektion¹⁹. Diffusionen sker långsamt och i proportion till materialets ånggenomsläpplighet. Impermeabla, täta, material tillåter ingen ång- eller vätsketransport. Bara "torr" värmetransport är möjlig. Dock så kan dunstning och kondensation, i speciella fall, bidra till att mer värme avges än bara via "torra" processer. Ett annat sätt att förbättra värmetransporten är att välja ett material som är mer luftpermeabelt. Transporten genom materialet sker då inte bara genom diffusion utan även genom konvektion. Detta kan sänka värme- och ångmotståndet avsevärt.

Uniformssystem består ofta av flera plaggager. Mellan varje materiallager, mellan hud och det närmaste lagret samt på utsidan av det yttersta lagret finns skikt av stillastående luft där diffusionshastigheten är låg. Det medför att i flerlayersplagg är värme- och ångmotståndet högre eller mycket högre än summan av de enskilda materiallagrens motstånd. Av detta följer att passformen påverkar det termiska motståndet, mer löst sittande plagg ger större motstånd. Eftersom fältuniformen oftast sitter löst på kroppen är inverkan på värmetransporten, vid given skyddsförmåga, större än nödvändigt. Nackdelen med åtsittande plagg är att det oftast begränsar rörelseförmågan mer än i det löst åtsittande vilket kan ge högre värmeproduktion vid vissa typer av aktiviteter. En annan nackdel med åtsittande kläder är att designen blir mer avgörande för rörelseomfånget och att kravet på

¹⁷ Webb, P. W. sarris, P. Schoffelen, G. van Ingen Schenau och F. ten Hoor. The work of walking: a calorimetric study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 20, pp. 331-337, 1988

¹⁸ Danielsson, U. Activity and wind induced convective heat transfer coefficients in man. *Tekn.Lic. avh.. KTH*, 1990

¹⁹ Danielsson, U. Convection coefficients in clothing air layers. *Tekn.Dok. avh. KTH*, 1993.

antalet storlekar ökar. Möjligheten att byta plagg mellan individer minskar, kostnaden ökar och större krav ställs på logistiken.

Den alternativa vägen för värme- och masstransport från huden är transport genom öppningar i plaggen t.ex. vid hals, midja, hand- och fotleder. Under normala aktiviteter, med öppna passager, ventileras beklädnaden tack vare kropps rörelser som fungerar som luftpumpar då plaggen deformeras. Men eftersom den burna utrustningen tenderar till att försluta öppningar elimineras i praktiken en viktig väg för värmetransport. Det gäller också t.ex. de öppningar som ibland återfinns i sidan av jackan, vid armhålorna, under axeloket e.t.c. Men genom att införa forcerad ventilation av dräkten med hjälp av mikroklimatutrustning kan värmebelastningen reduceras. Dessutom, om den ventilerande luften är torkad och kyld kan den termiska uthålligheten förbättras ännu mera (Appendix C).

2.4 Värmelagring - överhettning

Skillnaden mellan i kroppen producerad värmemängd och den som avges via de olika transportvägarna är den värmemängd som lagras i eller förloras från kroppen. För att upprätthålla funktion och prestation måste temperaturen i kroppen hållas inom relativt snäva ramar. Detta gäller speciellt kroppskärnan som inte bör variera mycket från 37 grader för att inte försämringar ska uppstå i fysiskt eller mentalt hänseende. I perifera kroppsdelar kan större temperaturvariationer accepteras men problem kan uppstå, framförallt på den kalla sidan.

När kroppstemperaturen stiger ökar risken för olika grader av funktionsnedsättningar. Vissa mentala funktioner drabbas först medan fysiska begränsningar blir påtagliga då kroppstemperaturen stigit något mer^{20,21}. Här finns dock en tidsaspekt som gör att viss förhöjd kroppstemperatur kan tolereras sämre under lång tid medan om värmebelastningen sker under kortare tidsutsträckning kan en högre temperatur accepteras²² (Appendix A). Eftersom den höjda kroppstemperaturen medför ökat krav på hudblodflöde för att förbättra kylningen uppstår en konkurrens om det blod som musklerna kräver för att utföra det avsedda arbetet. Det höjda cirkulationskravet överskrider slutligen kapacitetstaket och i konflikten mellan kylning (hudblodflöde) och arbete (muskelblodflöde) prioriteras kylningen. Det medför att fysisk utmattning uppstår som följd av cirkulatorisk utmattning/begränsning. Konflikten innebär att den som har högre fysisk arbetsförmåga och därmed högre cirkulatorisk kapacitet kan, vid givet arbete, ofta klara högre värmebelastning än den individ som har lägre arbetsförmåga. Dilemmat mellan krav och uthållighet vid fysiskt arbete i varmt klimat finns belyst i många olika textkällor^{23,24,25} och på nätet²⁶.

I den beskrivna konfliktsituationen tvingas individen till att vila vilket ofta innebär odramatisk återhämtning i takt med att kroppstemperaturen sjunker. I andra sammanhang blir överhettningen farligare på grund av att temperaturen blivit högre och att temperaturen kan bli liggande på hög nivå under längre tid om inte aktiv kylning sätts in. Följden blir värmeslag vilket kan vara livshotande. Gränsen mellan när värmeutmattning utvecklas till värmeslag är inte alltid tydlig vilket gör att det finns klara behov av råd om uppträdande så

²⁰ Bergh, U. och U. Danielsson. Förslag till ändringar av PPTM och kravspecifikation rörande flygstridsdräktens termiska skydd. Slutrapport. FOA, 98-4763/L, 1998.

²¹ Danielsson, U. och J. Keinänen. Fysisk belastning vid minröjning i Västsahara. FOI-R—99-01100-720—SE, 1999.

²² Shvartz, E. och D. Benor. Heat strain in hot and humid environments. *Aerospace Medicine*, 43, 1972.

²³ Heat Illness: A handbook for medical officers. USARIEM Technical Report Note 91-3, Natick, 1991

²⁴ Sustaining soldier health and performance in operation support hope: Guidance for small unit leaders. USARIEM Technical Report Note 94-3, Natick, 1994.

²⁵ Glitz, K.J., W. Gorges, Dahms, P. och W. von Restorff. Heisse Klimazonen, Zentrales Institut des Sanitätsdienstes der Bundeswehr Koblenz, 2001.

²⁶ <http://chppm-www.apgea.army.mil/heat/heatvideo.asp>

att risken för värmeslag minimeras men också råd om hur det akuta omhändertagandet bör utformas om värmeslag inträffat. Kunskap om detta är dock dåligt spritt i Sverige²⁷.

2.5 Fältförsök

Energikostnaden för att förflytta sig i olika terrängtyper har bestämts dels direkt med hjälp av bärbar energimetabolismmätare, dels indirekt genom att mäta hjärtfrekvensen. Förflyttningshastighet, vägval och avverkad sträcka mättes med personburen GPS. I ett specifikt försök för att klargöra inverkan av olika bördor på transportkostnaden, TpC , per kg och tillryggalagd sträcka, $J/(kg \cdot m)$, deltog 16 markstridssoldater. Deras nakenmedelvikt var 80 kg och maximala arbetskapacitet motsvarade $3,9 \text{ lO}_2/\text{min}$. De var utrustade med sin personliga utrustning inklusive vapen och kroppsskydd. Den lättare bördan, 22 kg, motsvarar den lägsta realistiska nivån som möjliggör kortvarig insats under gynnsamma förhållanden. Den tyngre bördan, 35 kg, motsvara massan för en mer realistisk utrustning som kan ge rimlig uthållighet under skilda förhållanden. Dock inkluderar den inte tilläggsvapen som pansarskott eller ksp. Soldaterna fick förflytta sig gående i tre terrängtyper, a) hård, plan grusväg (bild 1v), b) något mjukt och ojämnt underlag (igenvuxen plöjd åker) (bild 1h) samt c) mjuk terräng med högt ris som krävde benlyft (torr mosse) (bild 2 v). Dessutom fick soldaterna gå en skogsstig som var något kuperad och som bitvis innehöll förhållandena a), b) och c). Bördan var 35 kg (bild 2 h). Slutligen fick soldaterna även springa på den hårda, plana grusvägen där farten styrdes till 2,2 m/s (endast 22 kg). I övriga situationer fick soldaterna välja den fart som de ansåg kunna hålla under en längre tid. Försöken var dock så korta att tröttheten inte blev en begränsande faktor. För att få en uppskattning på hur stor den maximala arbetsförmågan var sprang soldaterna också s.k. fälttest, 2 km, med reglerad utrustning. Vid ett separat försök skedde även förflyttningen på grusstig samt i skogsterräng under dagsljus respektive mörker (bild 3) (bildförstärkare användes i mörkret för att finna rätt väg).

Bild 1. Förflyttning på plan, hård grusväg (öv), ojämnt, fast underlag (igenväxt åker) (öh), mjukt underlag med höga fotlyft (torr mosse) (nv), något kuperad skogsstig bestående de andra terrängtyperna (nh).



²⁷ Christensen, R. Fysiologiska och fysikaliska aspekter vid nedkylning av hud hos överhettad människa. C-uppsats i Fysiologi, KI, 2008.



Bild 2. Förflyttning på mjukt underlag med höga fotlyft (torr mosse) (v), något kuperad skogsstig bestående av de andra terrängtyperna (h).



Bild 3. Förflyttning i mörker med hjälp av bildförstärkare. Effekttutvecklingen mättes samtidigt.

2.6 Beräkningar

Erfarenheten i det svenska försvaret avseende risken för värmerelaterade problem är begränsad. Även inom arméer som har stor erfarenhet av att uppträda i varmt klimat finns begränsad kännedom om hur stor risken för överhettning är vid skilda insatser. Det beror på att många faktorer påverkar soldatens värmebalans, inte bara att de yttre förhållandena ofta varierar. Därför efterlyses mer datoriserat stöd²⁸. Ett alternativt sätt är som US Army som utvecklat en "värmekalkylator" som kan ge viss vägledning. En komplicerande faktor är att det finns en avsevärd individuell variation gällande effekten av värmepåverkan. Det gör att generella råd, i bästa fall, är tillämpbara på gruppen eller plutonen som en helhet. Sammantaget finns det dock behov av råd och rekommendationer om hur soldaten bör uppträda i olika termiska miljöer för att minimera risken för värmeutmattning.

²⁸ Werner, A. och H.-C. Gunga. Physiologie und Pathophysiologie des Wärmehaushalts und der Temperaturregulation des Menschen in extremen Umwelten und operationelle Konsequenzen für den militärischen Einsatz. Wehrmedizinische Monatschrift, 52, pp.234-243, 2008

De råd som följer nedan är baserade på kunskap om värmeproduktion och värmeavgivning under skilda betingelser. Eftersom antalet kombinationer av aktivitet, klimat och personlig utrustning är i det närmaste oändligt är ett urval av kombinationer gjorda för att illustrera möjligheter och begränsningar. Om behov av råd finns för andra, speciella kombinationer, kan sådana utarbetas. Råden, som baseras på antagandet att viss värmelagring inte ska överskridas under viss tid, är beräknade med hjälp av simuleringsprogrammet INSULA (Appendix B).

Simuleringsberäkningarna är baserade på förflyttning i Sverige (Stockholm), Serbien (Belgrad), Irak (Bagdad), Afghanistan (Kabul), Somalia (Mogadishu), Tchad (Njamena), Demokratiska Republiken Kongo (Kinshasa). Typsoldaten motsvarar i samtliga fall en vältränad markstridssoldat som är 20 år, väger naken 75 kg och är 180 cm lång. Hans maximala syrgasupptag är 3,8 l O₂/min. Soldaten bär FU90 inklusive hjälm med uppfällt dok, ballistiskt kroppsskydd, samt stridshandskar. Alternativt bär soldaten FU90 L FN/FU90 TR GR/BE. I dessa fall används inte stridshandskar. Några beräkningar baseras på avtaget kroppsskydd. Den totala, burna vikten, räknat från naken, är 35 kg.

Klimatet är det som kan förväntas för årstiden och tidpunkten på dagen. Värmelagringen är, för svenska förhållanden, illustrerade i detalj för maj, juni, juli, augusti och september, för utländska orter delvis andra månader. Beräkningarna är baserade på en vind av 2 m/s som är en följd av den yttre vinden samt den som genereras av att soldaten marscherar. Under vila är lufthastigheten 0,9 m/s. Det antas också att solinstrålningen under marsch sker från 4/8 molntäckt himmel vilket antas motsvarar solinstrålning under 50 % av tiden. Några beräkningar är även baserade på fullt solsken alternativt 7/8 molntäckt himmel. Under rast/vila, som sker i skugga, är solinstrålningen motsvarande den från 7/8 molntäckt himmel. Markreflexionen sker från gräs- och jordtäckt yta.

Aktiviteten består av fotmarsch på grusväg med hastigheten 1,5 m/s alternativt 0,9 m/s. Vägen är plan och hård. Inverkan av förflyttning på andra underlag och med andra färter som ger samma effektutveckling kan i vissa fall beräknas (Appendix E). De är baserade på uppmätta effektkostnader som har transponerats till förflyttning på grusväg. Fotmarschen består av förflyttning och vila med förhållandet 50 min arbete/10 min vila. Förflyttningen startar klockan 09.00 och avbryts efter tre marschpass av lunch under en timme (kl. 11.50 till 12.50). Efter lunchen återupptas förflyttningen vilken avslutas efter tre pass kl. 15.40 (sommartid gäller). Under rasterna sker ingen lättnad i klädsel medan under lunchen så tas kroppsskydd, hjälm och stridshandskar av.

3 Resultat

3.1 Fältförsök

I nedanstående tabell (1) visas transportkostnaden, $J/(kg \cdot m)$, för de olika miljöerna och förhållandena.

Tabell 1. Transportkostnad, TpC, och självvald fart (ej grusväg, löpning) i skilda terrängtyper med olika bördor.

	Grusväg, gång	Grusväg, löpning,	Igenvuxen åker	Torr mosse	Skogsstig
Transportkostnad $J/(m \cdot kg)$ (22kg)	3,9	5,0	6,1	7,9	
Fart (m/s) (22kg)	1,5	2,2	1,3	1,1	
Transportkostnad $J/(m \cdot kg)$ (35kg)	3,9		5,7	7,9	6,7
Fart (m/s) (35kg)	1,5		1,2	1,0	1,1

Den självvalda hastigheten påverkades endast marginellt av ändrad börda även om den genomgående var något lägre för 35 kg. Transportkostnaden var i stort sett densamma för 22 kg och 35 kg. Skogsstigen, som motsvarade en blandning av något mjukt underlag (största delen), mjukt underlag (torr mosse) samt grusväg gav en transportkostnad som var ungefär i proportion till de ingående delarna vilket också gällde farten. Variationskoefficienten (cov) för TpC (22 kg) var 11, 7 och 6 % för grusvägen, oplöjda åkern respektive mossen. COV för farten (22 kg) på respektive underlag var 7, 8 och 6 %. Motsvarande värden för 35 kg börda var 7, 11 och 13 % (för TpC) respektive 8, 6 och 12 % (för fart). COV för skogsstigen var 9 % (TpC) och 2 % (fart)

Tabell 2. Hjärtfrekvens (och fart) vid förflyttning i de skilda terrängtyperna.

	Grusväg, gång	Grusväg, löpning,	Igenvuxen åker	Torr mosse	Skogsstig
Puls (slag/min) (22kg)	121	161	135	144	
Fart (m/s) (22kg)	1,5	2,2	1,3	1,1	
Puls (slag/min) (35kg)	126		139	148	142
Fart (m/s) (35kg)	1,5		1,2	1,0	1,1

Tabell 2 visar att hjärtfrekvensen var endast något förhöjd vid 35 kg jämfört med 22 kg. Dock visar pulsen att den relativa belastningen var högre vid förflyttning på den igenvuxna åkern och ännu högre på mossen. Resultaten från fp:s fälttest gav en genomsnittstid på 10:27,38 över 2000 m vilket indikerar en maximal arbetskapacitet/syreupptag på 1350 W eller 3,9 lO_2/min . Gångmarschen på grusväg krävde 607 W (22 kg) respektive 659 W (35 kg) vilket alltså motsvarade knappt 50 % av deltagarnas maximala syreupptag.

Tabell 3 visar att transportkostnaden, TpC, i dagsljus var praktiskt taget densamma som i mörker när förflyttning skedde på något kuperad grusväg (motionsslinga). Nivån var något

Tabell 3. Transportkostnad (TpC) och självvald fart vid förflyttning i dagsljus och mörker på något kuperad grusväg respektive i storskogen.

	Grusväg, ngt kuperad	Storskog
Transportkostnad J/(m·kg) (dagsljus)	4,7	6,7
Fart (m/s) (dagsljus)	1,5	1,2
Transportkostnad J/(m·kg) (mörker)	4,8	8,8
Fart (m/s) (mörker)	1,5	0,9

högre än på plan slät grusväg (tabell 1). Den valda farten var emellertid densamma för de två underlagen och ljusförhållandena. Tabell 3 visar också att energikostnaden vid förflyttning i terrängen (storskog), i dagsljus, var densamma som vid gång på kuperad stig (tabell 1) men något högre än vid gång på något mjukt, ojämnt underlag (tabell 1). Den valda farten var densamma som på det senare underlaget. I mörker, vid förflyttning i terrängen, ökade dock transportkostnaden påtagligt samtidigt som farten minskade. Variationskoefficienten för grusvägen var 10 % (TpC, dag) och 5 % (fart, dag) medan cov. för mörker var 16 % respektive 8 %. Motsvarande värden för storskogen var 10 % och 10 % (dag) samt 13 % respektive 20 % (mörker).

3.2 Resultat av simuleringsberäkningar

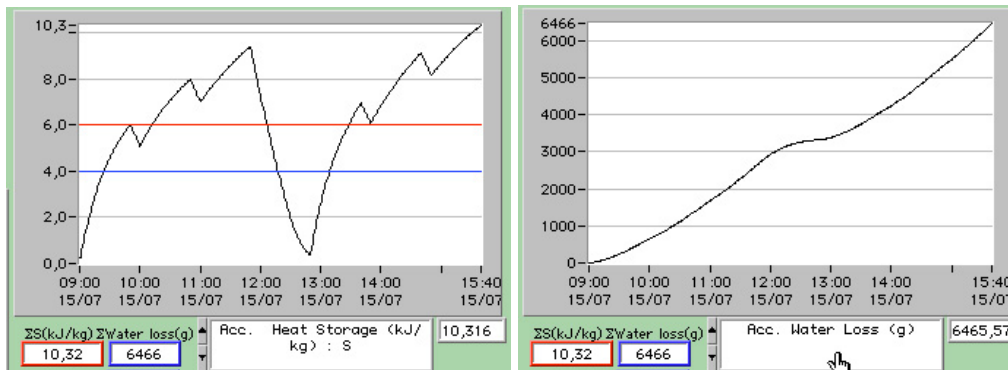
3.2.1 Värmelagring - Stockholm, Sverige

Ackumulerad värmelagring samt vätskeförlust under fotförflyttning på grusväg mellan kl. 09.00 och 15.40 visas i tabell 4. Tabellen visar att med farten 1,5 m/s uppnås värmelagringsnivåer över 7 kJ/kg under månaderna juni, juli och augusti. Under resten av året är nivåerna lägre. Om hastigheten reduceras till 1,3 m/s blir värmelagringen lägre än 7 kJ/kg även under juli. Även om en timmes lunchvila i det närmaste återställer värmebalansen blir värmelagringen något högre efter lunch på grund av solhöjden.

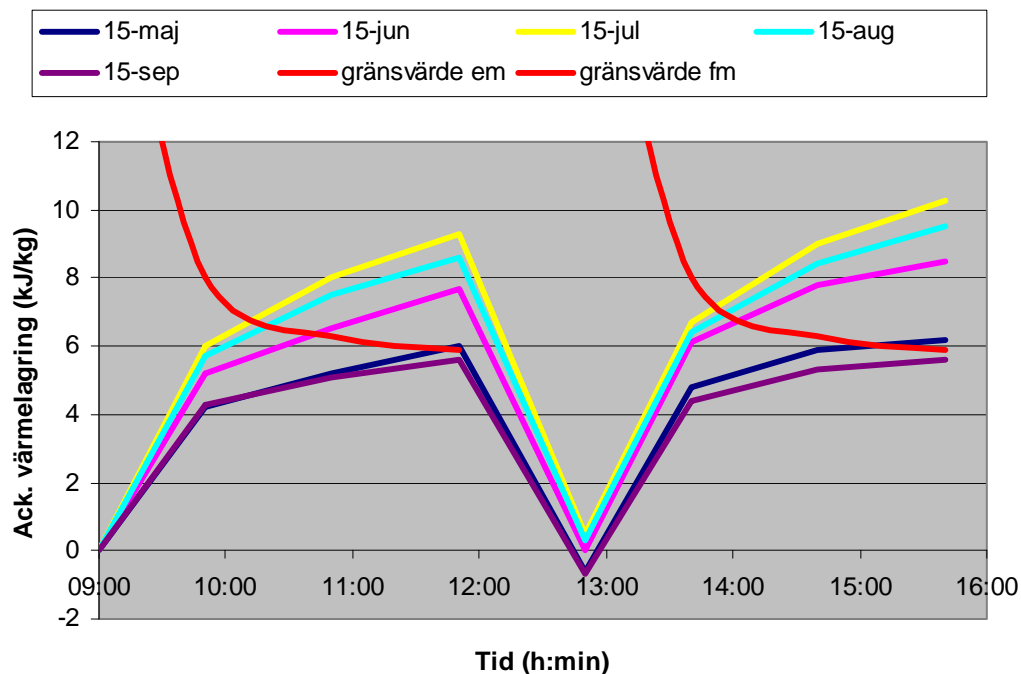
Tabell 4. Ackumulerad värmelagring under marsch, 1,5 m/s (1,3 m/s), i Stockholmstrakten under perioden maj t.o.m. september. Bördan är 35 kg och FU90 bärs. Övriga förutsättningar se 2.6.

Datum	09.00 (kJ/kg)	09.50 (kJ/kg)	10.50 (kJ/kg)	11.50 (kJ/kg)	12.50 (kJ/kg)	13.40 (kJ/kg)	14.40 (kJ/kg)	15.40 (kJ/kg)	Vätska (l)	Fart (m/s)
15/5	0	4,2	5,2	6,0	-0,6	4,8	5,9	6,2	4,3	1,5
15/6	0	5,2	6,5	7,7	0,0	6,1	7,8	8,5	5,4	1,5
15/7	0	6,0	8,0	9,3	0,5	6,7	9,0	10,3	6,5	1,5
15/7	0	4,5	5,7	6,3	0,2	5,2	6,4	6,8	4,6	1,3
15/8	0	5,7	7,5	8,6	0,3	6,4	8,4	9,5	6,0	1,5
15/9	0	4,3	5,1	5,6	-0,7	4,4	5,3	5,6	4,0	1,5

Figur 1(vänster) visar värmeupplagringsförloppet för 15/7 illustrerande dynamiken i uppvärmning och avkylning. Den snabbaste uppgången sker under första arbetspasset före och efter lunchvilan. Under de 10 minuterna som rasterna utgör hinner temperaturen i kroppen sjunka något. Dock har värmelagring strax efteråt överskridit den nivå som gällde före rasten. Figur 1(höger) visar ackumulerad vätskeförlust under samma förhållanden.



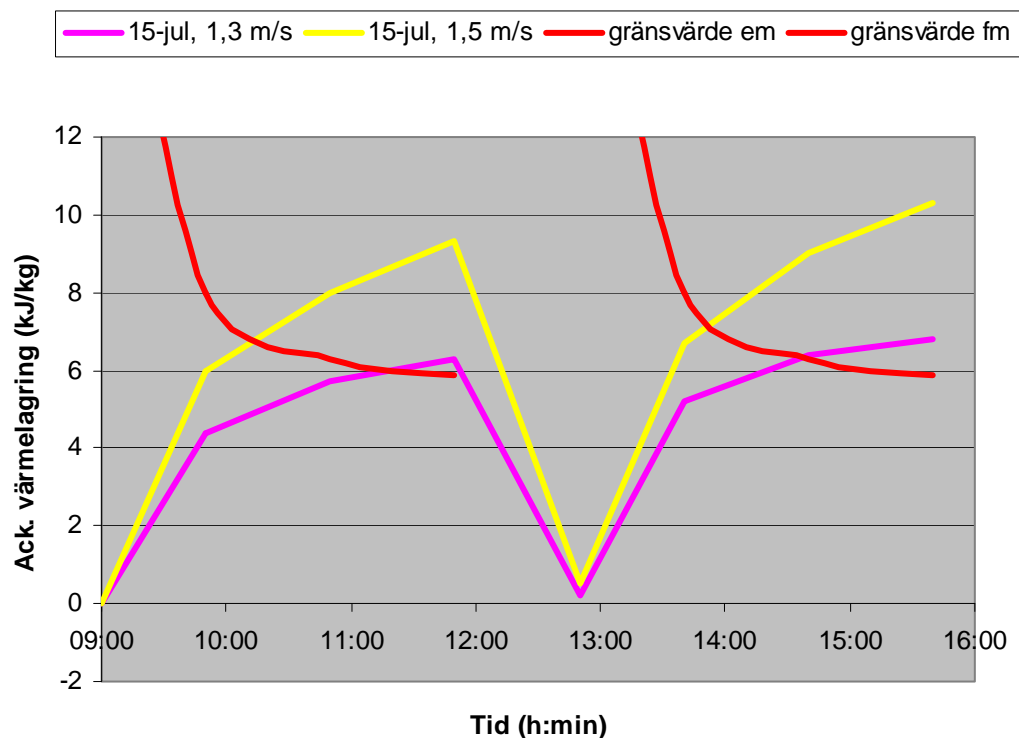
Figur 1: Värmelagring (vänster) och vätskeförlust (höger) vid 1,5 m/s fotmarsch, ort Stockholm, då FU90 bärs. Gränsen 6 kJ/kg är den nivå då risken för överhettning betraktas som liten eller mycket liten även vid långvarig exponering. Över nivån 6 kJ/kg ökar dock risken för värmerelaterade problem.



Figur 2. Värmeupplagringen tillsammans med de inlagda gränser (tvådelad röd kurva) då överhettning kan uppstå hos dem som är mest värmekänsliga. Förhållandena är 1,5 m/s fart på hård, plan grusväg med bördan 35 kg. Uniformen är FU90. Orten är Stockholm.

Kurvans lutning ökar med stigande värmelagringsvärden. Under lunchvilan avtar vätskeförlusten nästan helt medan den skjuter fart då arbetet återupptas.

Värmebelastningen under sommarmånaderna juni, juli och augusti är så hög att värmelagringen överskrider de nivåer (tvådelad röd kurva) som är förknippade med problem för dem som är mest känsliga (figur 2). Under förmiddagen inträffar detta efter 1 till 1,5 h medan under eftermiddagen överskrider gränsvärdet något tidigare. Vilan i skugga under 1 h, med avtaget kroppsskydd, hjälm och stridshandskar, hjälper dock soldaten att återställa kroppstemperaturen. Under resten av året kan förflyttningen genomföras utan termiska problem vilket illustreras i figur 2 med att respektive kurvor inte överskrider gränsvärdena. Betydelsen av förflyttningskostnaden visas i figur 3. Genom att reducera



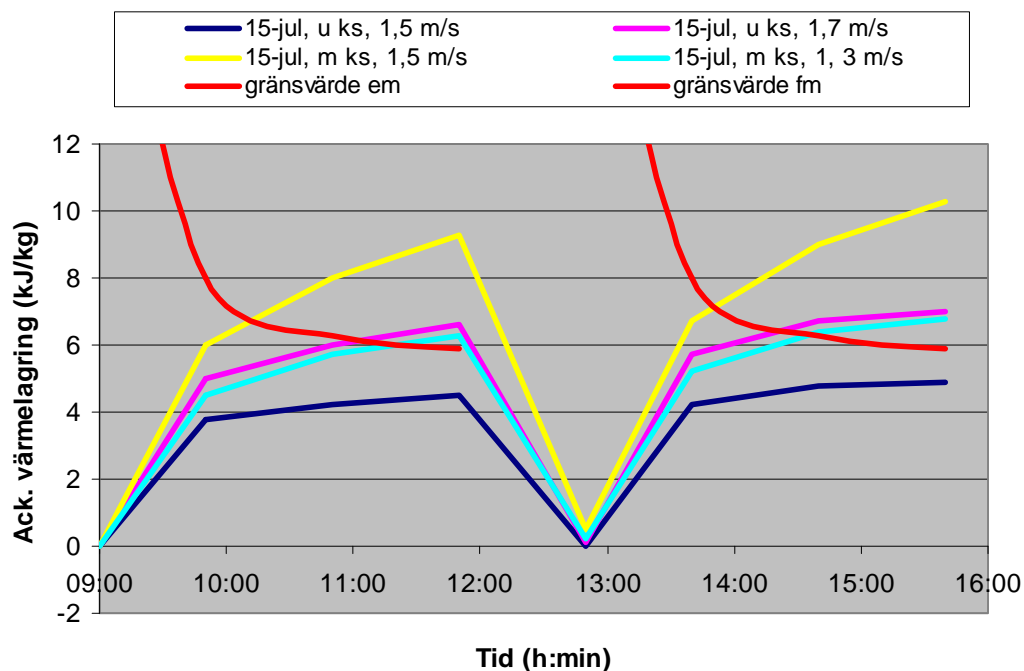
Figur 3. Värmeupplagringen, ort Stockholm, när hastigheten är 1,3 m/s (cerise linje) 1,5 m/s (gul linje) och underlaget är plan, hård grusväg och bördan är 35 kg. Uniformen som bärs är FU90

farten till 1,3 m/s kan förflyttningen genomföras även under juli månad med endast en viss riskhöjning under slutet av perioden efter lunchvilan.

Tabell 5 visar värmelagringen för två marschhastigheter då kroppsskyddet mot splitter är avtaget även under förflyttningen. Värmelagringen blir betydligt lägre och några termiska problem förväntas inte när kroppsskyddet är avtaget. Det innebär att under juli månad så kan farten till och med ökas utan att värmelagringen blir alltför hög. Nivån 7 kJ/kg nås vid slutet av andra perioden med farten 1,7 m/s. Detta illustreras av figur 4 som tydligt visar skillnaden mellan med och utan ballistiskt kroppsskydd avseende värmeupplagring under juli månad. Om kroppsskyddet behålls på måste farten reduceras. Under förmiddagen räcker det med reduktion från 1,5 till 1,3 m/s medan det under eftermiddagen måste till ytterliggare reduktion i fart. Fig. 4 visar att samma värmebelastning uppnås vid 1,3 m/s om kroppsskydd bärs som vid farten 1,7 m/s men utan kroppsskydd. Med respektive utan skydd motsvarar alltså en skillnad i fart på 0,4 m/s.

Tabell 5. Värmelagring för olika farter och med/utan kroppsskyddet (15/7)

m/u ks	09.00 (kJ/kg)	09.50 (kJ/kg)	10.50 (kJ/kg)	11.50 (kJ/kg)	12.50 (kJ/kg)	13.40 (kJ/kg)	14.40 (kJ/kg)	15.40 (kJ/kg)	Vätska (l)	Fart (m/s)
u	0	3,8	4,2	4,5	0,0	4,2	4,8	4,9	3,5	1,5
m	0	6,0	8,0	9,3	0,5	6,7	9,0	10,3	6,5	1,5
u	0	5,0	6,0	6,6	0,1	5,7	6,7	7,0	4,7	1,7

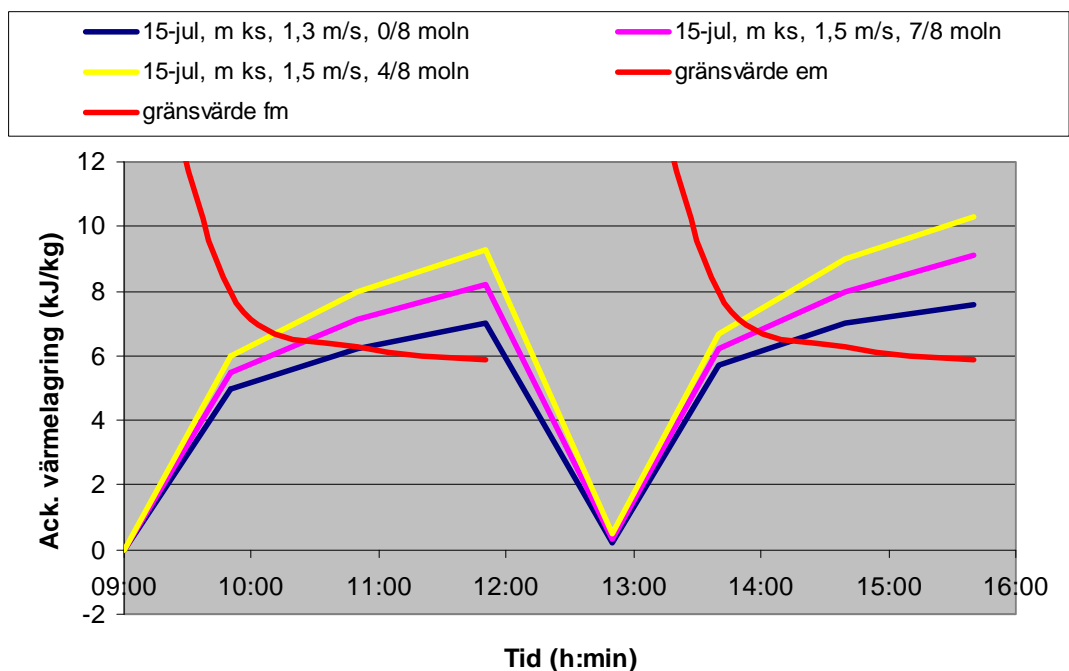


Figur 4. Värmeupplagringen, ort Stockholm, för olika kombinationer ballistiskt kroppsskydd och fart. Börden är i samtliga fall 35 kg och uniformen är FU 90.

Tabell 6 visar värmelagringen då olika grader av solinstrålning råder under förflyttningen. Under rast/vila antas himlen alltid vara täckt till 7/8 (skuggläge). Om himlen är täckt till 7/8, även under förflyttningen, minskar värmelagringen med ca 10 %. Nivån blir ändå för hög under sommarmånaderna och tiden till då gränsvärdet uppnås förlängs endast marginellt. Däremot om farten reduceras kan värmelagringen hållas på betydligt lägre nivå även när himlen är helt klar. Tabelldata illustreras av figur 5. I situationen då klimatet är mest belastande, himlen helt klar, blir värmelagringsökningen långsammare om farten reduceras till 1,3 m/s jämfört med fallet med nästan mulen (7/8) himmel. Dock överskrider gränsvärdet både under för- och eftermiddagen. Men arbetstiden kan förlängas med cirka 40 minuter på förmiddagen innan gränsen nås medan motsvarande effekt ger ca 15 minuter på eftermiddagen. I samtliga fall återställs dock kroppstemperaturen under den en timme långa lunchvilan.

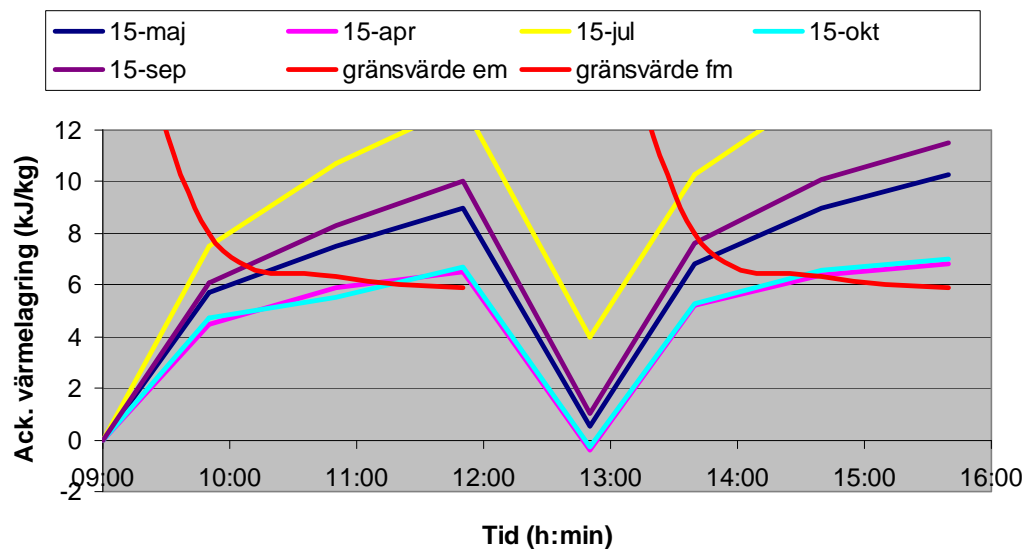
Tabell 6. Värmelagringen (15/7) för olika grader av solinstrålning (molnighet) och förflyttningss fart.

Moln	09.00 (kJ/kg)	09.50 (kJ/kg)	10.50 (kJ/kg)	11.50 (kJ/kg)	12.50 (kJ/kg)	13.40 (kJ/kg)	14.40 (kJ/kg)	15.40 (kJ/kg)	Vätska (l)	Moln (m/s)
7/8	0	5,5	7,1	8,2	0,3	6,2	8,0	9,1	5,8	1,5
4/8	0	6,0	8,0	9,3	0,5	6,7	9,0	10,3	6,5	1,5
0/8	0	5,0	6,2	7,0	0,2	5,7	7,0	7,6	5,0	1,3



Figur 5. Värmeupplagring, ort Stockholm, för skilda kombinationer av solinstrålning (molnighet) och förflytningshastighet. FU 90 bärs.

3.2.2 Värmelagring - konfliktorter

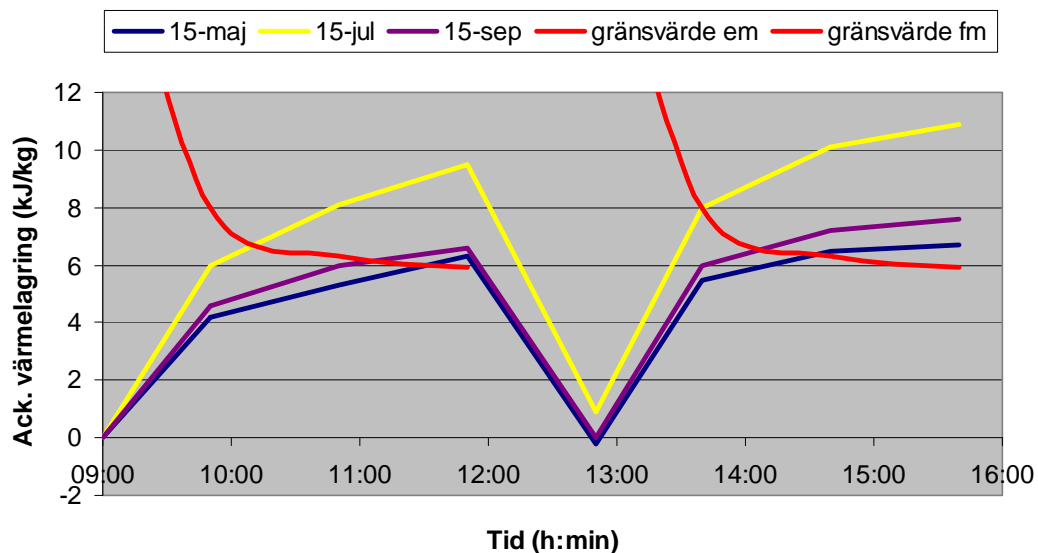


Figur 6. Värmelagringen, ort Belgrad, Serbien, då FU90 bärs under förflyttning med farten 1,5 m/s.

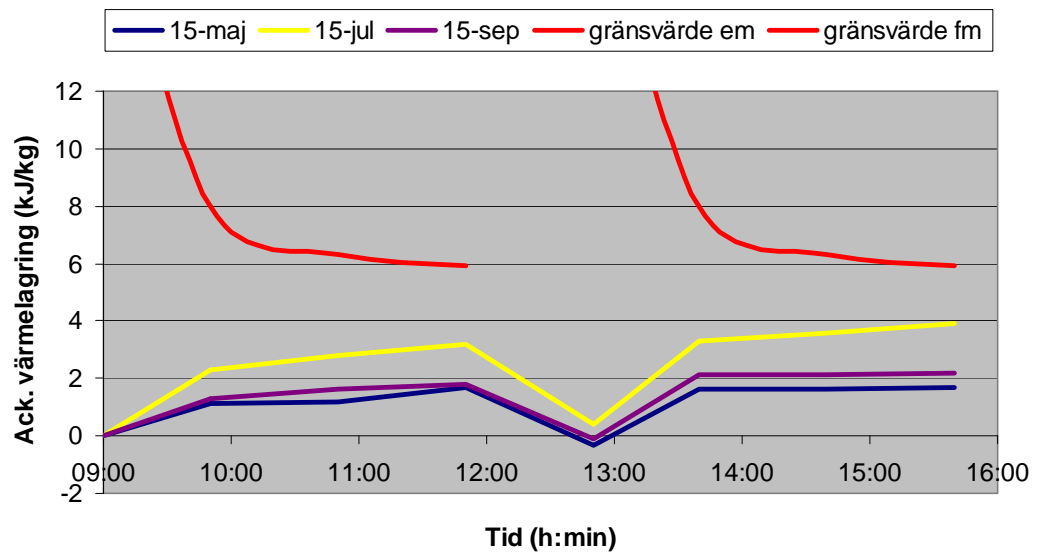
Figur 6 visar att värmebelastningen under sommarhalvåret i Serbien (Belgrad) riskerar att bli påtagligt högre än i Stockholm (figur 2). Under perioden maj till och med september når den ackumulerade värmelagringen sådana nivåer så att stor risk för överhettning föreligger. Detta gäller såväl för- som eftermiddagspasset. Även i mitten av oktober och april överskrider gränsvärdet efter halva eftermiddagspasset. Figuren visar också att en timmes lunchvila, i skugga med avtagna kroppsskydd inte räcker till för att återställa

kroppstemperaturen till normal nivå. Ovanstående gäller när FU90 bärs. Med den lättare, mindre täckande FU90 L FN blir belastningen lägre. Figur 7 visar att med bibehållen fart så blir värmelagringen under maj och september acceptabel under förmiddagspasset. Däremot, under eftermiddagen överskrider gränsvärdet så mycket att problem kan uppstå. Under sommarmånaderna juni, juli och augusti blir nivåerna alltför höga för att kunna accepteras. Dock innebär den lättare klädseln, kombinerat med lägre maximal nivå, att kroppstemperaturen återställs under lunchvilan. För att undgå de höga värmelagringsnivåerna måste arbetsintensiteten minskas. Ett sätt är att sänka farten. Figur 8 visar att med farten 0,9 m/s i den lättare uniformen uppstår inga som helst värmeproblem i Serbien under den varma årstiden. Samtliga resultat för Serbien avser förflyttning på hård, plan grusväg.

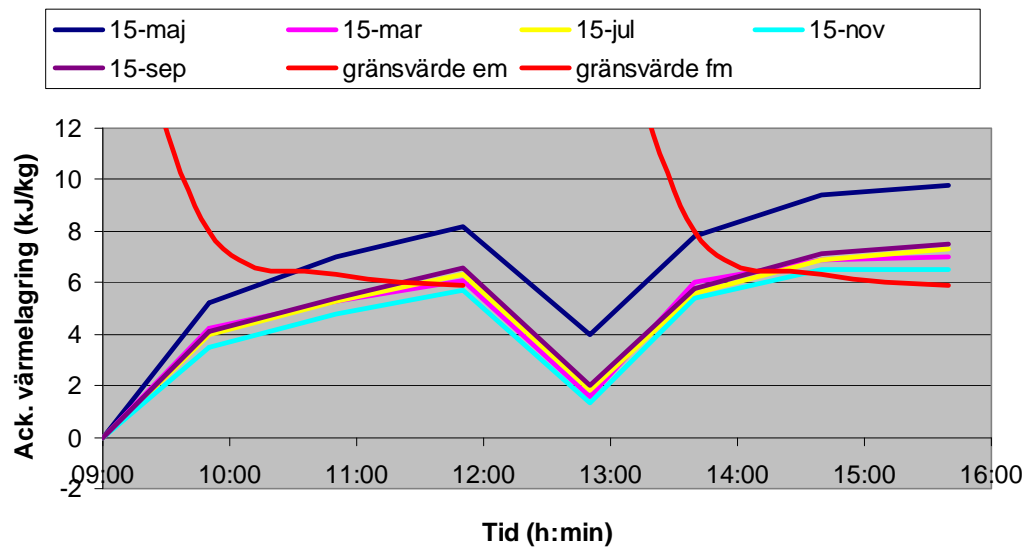
I ett varmare klimat ökar risken för termiska problem. Figur 9 visar värmelagringen vid förflyttning i Tchad (Ndjamena). Figuren visar att även med låg fart, 0,9 m/s, och lätt uniform blir värmelagringen i Tchad alltför hög under maj månad. Även under svalare månader blir nivån något hög under eftermiddagspasset delvis beroende på otillräcklig avkylning under lunchvilan trots att lätt uniformen (FU90 TR BE) bärs. Genom att Tchad är beläget strax söder om norra vändkretsen blir de varmaste månaderna andra än på norra halvklotet. Regnperioderna inverkar också på temperatur och luftfuktighet.



Figur 7. Värmelagring, ort Belgrad, Serbien, då förflyttning sker med farten 1,5 m/s och då FU90 L FN bärs.

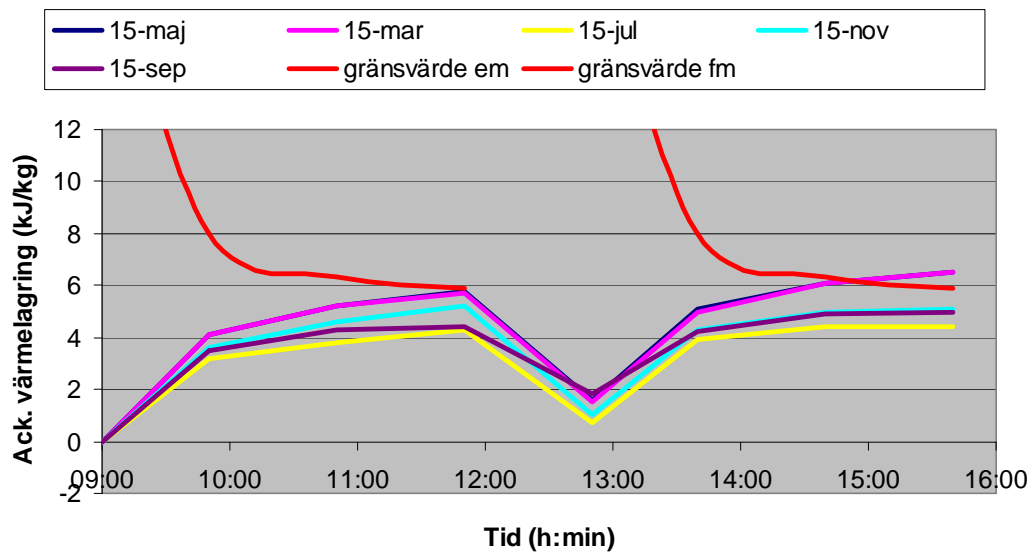


Figur 8. Värmelagring, ort Belgrad, Serbien, då förflyttning sker med farten 0,9 m/s och FU90 L FN / FU90 TR GR bärs.

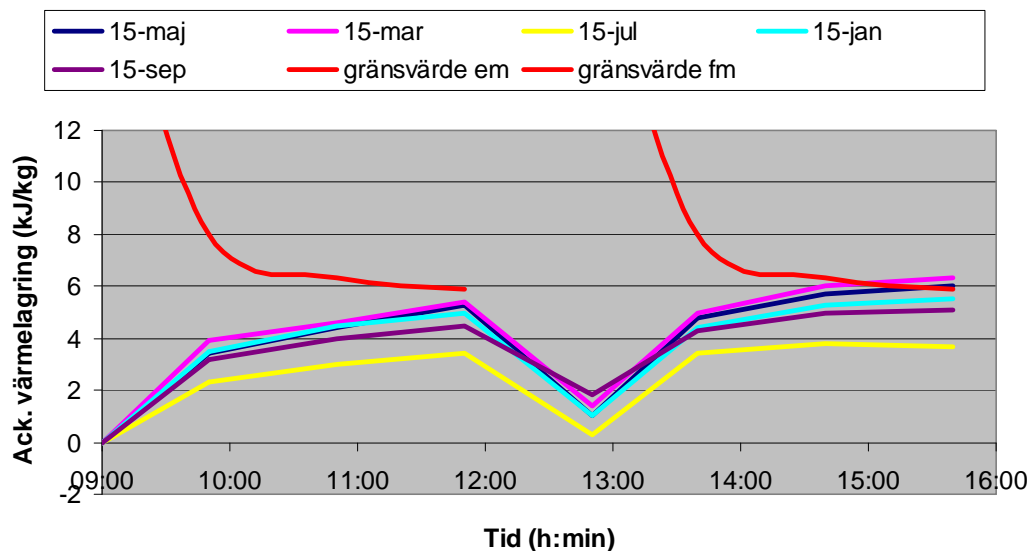


Figur 9. Värmelagring, ort Ndjamena, Tchad, då förflyttningen sker med farten 0,9 m/s och FU90 L FN / FU90 TR BE bärs.

Klimatet i Somalia (Mogadishu) är något mindre belastande än i Tchad av vilket följer att med 0,9 m/s och lätt uniform, FU90 TR BE, överskrids inte gränsvärdet vare sig under förmiddags- eller eftermiddagspasset undantaget en kort period under eftermiddagen i mars (fig. 10).

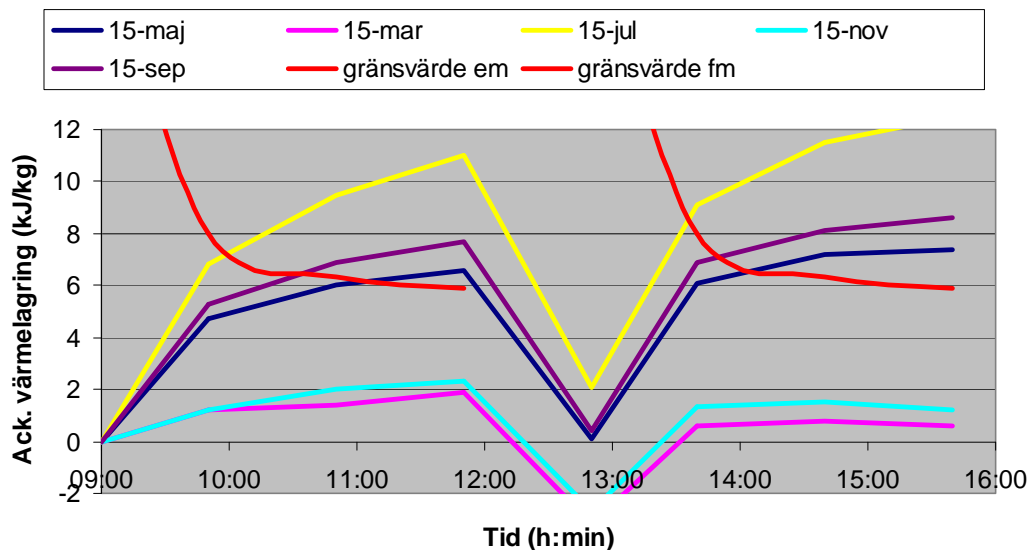


Figur 10. Värmelagring, ort Mogadishu, Somalia, då förflyttningen sker med farten 0,9 m/s och FU90 L FN / FU90 TR BE bärs.

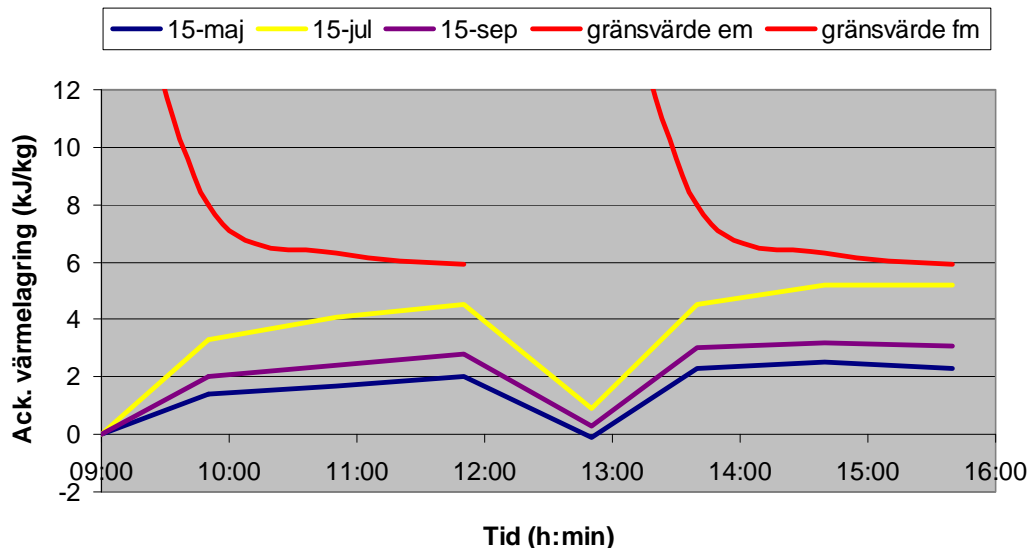


Figur 11. Värmelagring, Kinshasa, DR Congo, då förflyttning sker med farten 0,9 m/s och FU90 L FN / FU 90 TR GR bärs.

I DR Congo (Kinshasa) (fig. 11) är värmebelastningsförhållandet liknande den i Somalia vilket innebär att förflyttningen kan genomföras med farten 0,9 m/s i lätt uniform (FU90 TR GR) utan att gränsvärdet överskrids. Dock ligger nivåerna något olika för samma månad, delvis beroende på skillnader i latitud och när regnperioden infaller.



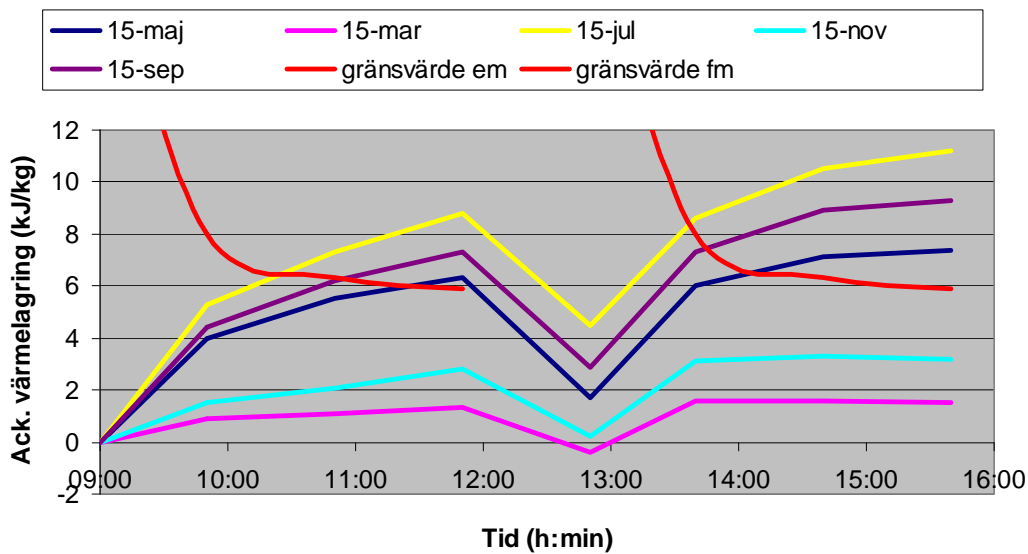
Figur 12. Värmelagring, ort Kabul, Afghanistan, när förflyttningen sker med farten 1,5 m/s och FU90 L FN / FU 90 TR BE bärs.



Figur 13. Värmelagring, ort Kabul, Afghanistan, när förflyttningen sker med farten 0,9 m/s och FU90 L FN / FU90 TR BE bärs.

I Afghanistan (Kabul) variera klimatet över året betydligt mer än i ovannämnda afrikanska regioner. Det innebär att värmelagringen ser helt olika ut under sommarmånaderna jämfört med under vintern. Från maj till september – oktober överskrids gränsvärden under såväl förmiddags- som eftermiddagspassen när farten är 1,5 m/s och lätt uniform bärs (FU90 TR BE). Frånsett juli månad så återställs dock kroppstemperaturen under lunchvilan. Under vinterhalvåret uppstår inga som helst värmeproblem under arbete. Däremot kan det antas att uniformen är för tunn och lite täckande under viloperioden och sannolikt även under arbetet.

Liknande resultat som för Kabul fås även för Irak (Bagdad) vilket figur 14 visar. I Irak är dock beräkningarna gjorda för farten 0,9 m/s vilket visar att termiska (värme) situationen där är mer krävande än i Afghanistan. Figuren visar att även med lätt uniform, FU90 TR BE, är 0,9 m/s för hög fart under juli (även juni och augusti) för att vara förenligt med liten risk för överhettning under förflyttningen. Under september (maj) blir nivåerna också för höga och då speciellt under eftermiddagspasset. Under lunchvilan återställs inte heller



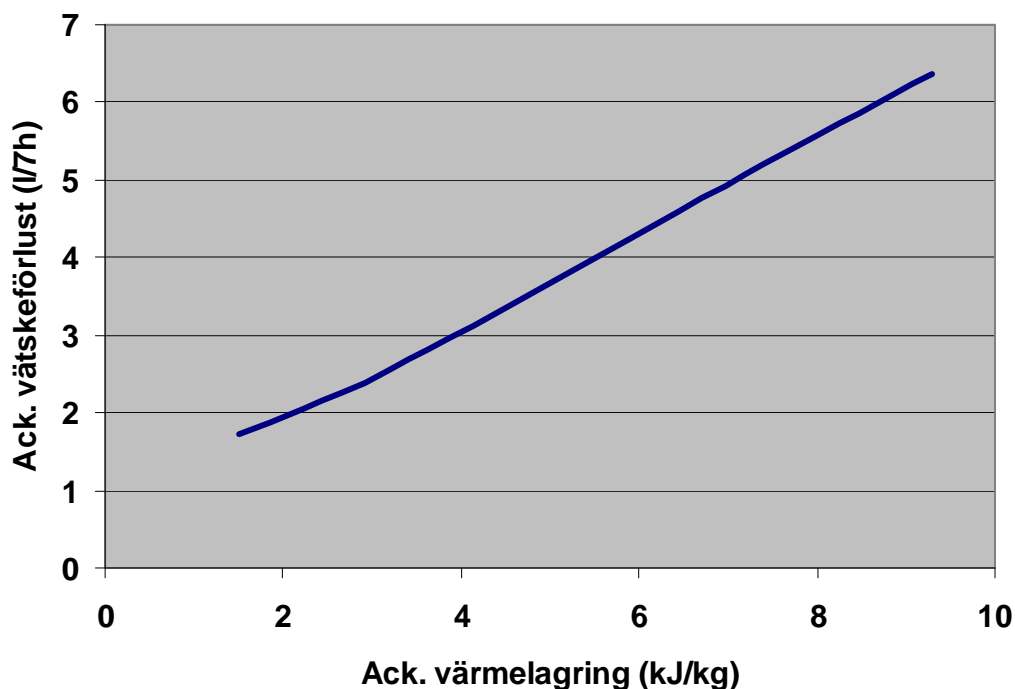
Figur 14. Värmelagring, ort Bagdad, Irak, då förflyttningen sker med farten 0,9 m/s och FU90 L FN / FU90 TR BE bärs.

Tabell 7. Sammanfattning av resultaten visade i figur 2 till och med figur 14.

ort	jan.	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	fart	övr.
Stockholm														1,5 FU90
Stockholm														1,3 FU90
Stockholm														1,5 FU90 u.ks
Stockholm														1,7 FU90 u.ks
Belgrad														1,5 FU90
Belgrad														1,5 FU90 L FN/TR
Belgrad														0,9 FU90 L FN/TR
Ndjamena														0,9 FU90 L FN/TR
Mogadishu														0,9 FU90 L FN/TR
Kinshasa														0,9 FU90 L FN/TR
Kabul														1,5 FU90 L FN/TR
Kabul														0,9 FU90 L FN/TR
Bagdad														0,9 FU90 L FN/TR

kroppstemperaturen. Däremot under vinterhalvåret är risken för värmepåverkan liten om farten är 0,9 m/s och ökenuniform bärs.

En sammanfattning av resultaten för de olika orterna och skilda betingelser visas i tabell 7. Färgmarkeringen grön innebär att värmelagringen inte överskrider 6 kJ/kg under den 6 h och 40 min långa insatsen. I fallen med röd markering överskrider gränsvärdet påtagligt medan gul markering innebär att gränsvärdet överskridits något (< ca 6,5 kJ/kg) och då genomgående under den senare delen av andra perioden.



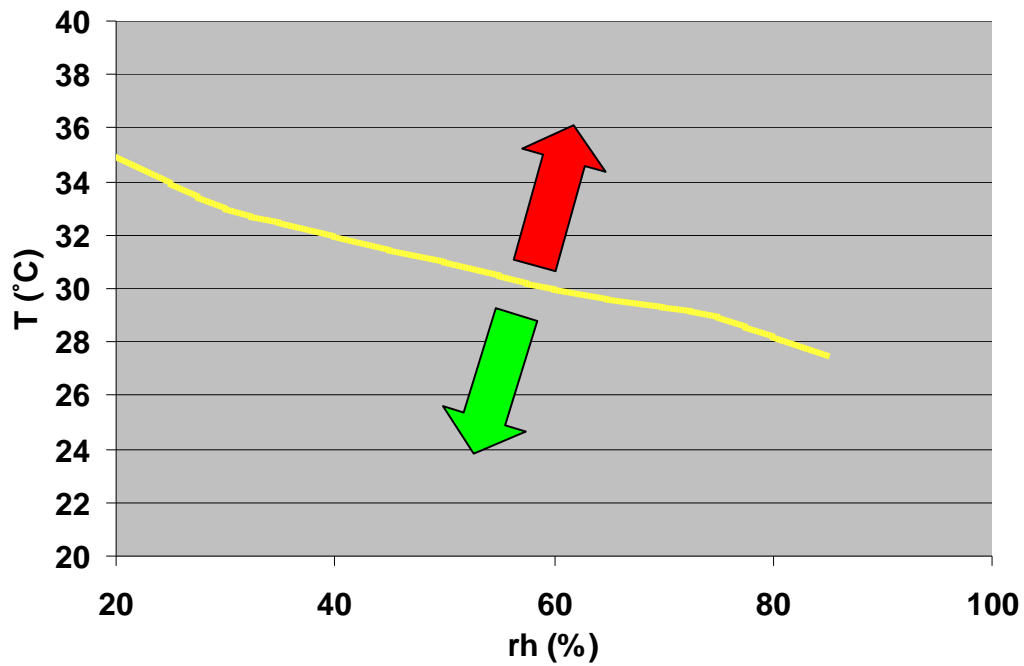
Figur 15. Relationen mellan ackumulerad värmelagring efter 6 h 40 min (7 h) förflyttning och ackumulerad vätskeförlust under samma tid.

3.2.3 Vätskeförlust

Vätskeåtgången styrs i hög grad av kroppstemperaturen (värmelagringen). Figur 15 visar den totala mängden vätska (approximativt) som förloras via svettning och utandning under den 6 timmar och 40 minuter långa insatsen. Vätskeförlusten är relaterad till den ackumulerade värmelagringsnivå som uppnått vid eftermiddagspassets slut. Så om 6 kJ/kg är uppnådd kl. 15.40 kan förväntas att den genomsnittliga mängden vatten som förlorats under förflyttningen är drygt fyra liter och att det mesta förlorats under marsch. Eftersom värmelagringsfigurerna genomgående visar på högre nivåer under eftermiddagspasset så kan vätskeförlusten vid lunchvilan förväntas vara något mindre än hälften av slutvärdet.

3.2.4 Klimatgräns

En mängd faktorer påverkar värmeupplagringshastigheten. Men om bara lufttemperaturen och luftfuktigheten ändras mellan olika tillfällen kan, approximativt, en gräns erhållas som visar vid vilka kombinationer temperatur och relativ luftfuktighet som medför liten alternativt ingen risk för överhettning. Figur 16 visar denna gränslinje. Ovan och till höger, markerad med röd pil, ökar risken för värmeutmattning medan nedan gränslinjen, markerad med grön pil minskar risken. Förutsättningen är att förflyttning sker med farten 0,9 m/s och att den genomförs på hård, plan grusväg med bördan 35 kg och att FU90 TR BE/GR alternativt FU90 L FN bärs tillsammans med kroppsskydd och hjälm.



Figur 16. Approximativ gräns (gul linje) markerande för vilka lufttemperaturer och luftfuktigheter värmebelastningen börjar göra sig gällande under en 7 h lång förflyttning (50/10 marschdisciplin) med 1 h vila i skugga (7/8) med kroppsskydd och hjälm avtagna. Himlen är under förflyttningen täckt till 4/8 med moln och soldaten utsätts för en lufthastighet av 2 m/s. Fotmarschen sker med farten 0,9 m/s, bördan är 35 kg, och förflyttningen sker på plan, hård grusväg. Uniform FU90 L FN / FU90 TR GR/BE bärs inkluderande ballistiskt kroppsskydd och hjälm. Röd pil markerar ökande risk för överhettning medan grön pil visar på minskande risk.

4 Diskussion

4.1 Diskussion fältförsök

Energiomsättningskostnaden vid förflyttning har som nämnts studerats tidigare. Problemet med att tolka resultaten har bestått i att förutsättningarna inte alltid har varit tillräckligt väl beskrivna. Den här studien löser långt ifrån alla problem men här framtagna data är förhoppningsvis något mer generella än de som tidigare nyttjats. I grova drag bestäms effektkravet av hur mycket massa som förflyttas, med vilken fart förflyttningen sker, underlagets beskaffenhet samt vilket förflyttningssätt som används. Man har konstaterat tidigare att en viktig komponent i effektkravet är den vertikala förflyttningshastigheten. Mer raffinerade bestämningar väger även in acceleration av kroppsdelar, olika kostnader för ifrånskjut respektive inbromsning vid fotisättning med mera^{29,30}. De olika momenten som genererar kostnader skiljer sig sannolikt åt mellan olika individer och det kan förklara spridningen mellan individer beroende på olika gångstilar. Variationskoefficienten för T_pC var ca 10 % medan den för fart var något lägre. Att kostnaden varierar mellan olika personer har betydelse i nästa led, nämligen att värmeproduktionen i kroppen varierar och därmed fås en spridning avseende risken för överhettning. Dessutom finns ytterliggare en mekanism som inte nyttjats i simuleringsberäkningarna nämligen den att värmeproduktionen ökar vid långvarig arbetsbelastning^{31,32}. Studier har t.ex. visat att en börda på 30 kg ökar effektutvecklingen vid marsch med 10 % efter 3 perioders arbete á 50 minuter³³.

Den vertikala förflyttningen av masscentrum är olika vid gång jämfört med vid löpning. För att kunna ta det längre loppsteget måste kroppen lyftas högre och därmed ökar kostnaden. I förliggande fältförsök var kostnaden vid löpning ca 5 J/(kg•m) medan gång krävde ca 4 J/(kg•m). Jämförelsen haltar något eftersom löpningen skedde med 2,2 m/s medan gånghastigheten var 1,5 m/s. Sannolikt beror dock den största delen av den 25 %-iga skillnaden på högre vertikal lyfthöjdshastighet. Konsekvensen, sett ur värmebalanssynvinkel, är att avsevärt mer värme produceras i kroppen vid löpning medan försumbart mer värme kyls bort av den högre fartvinden. Flera fall av överhettning har uppstått under utbildningskontroll i Sverige vid så kallad snabbmarsch inom vissa förband³⁴. Om en person inklusive packning väger 100 kg är energiomsättningen knappt 1100 W vid löpning med farten 2,2 m/s medan 1,5 m/s gång kräver 600 W (tabell 1). Om situationen kräver snabbmarsch så måste den, under den varmare årstiden, göras kort om inte värmeproblemen ska bli stora eller mycket stora. Även vid gång 1,5 m/s uppstår värmeproblem under den varmaste perioden (Sverige) givet att normal personlig utrustning bärs. En slutsats är alltså att farten ska hållas låg. Om situationen kräver hög fart kan det bara ske under kortare tid. Som en följd av nämnda FM-incidenter har rekommendationer utarbetats³⁵ delvis baserade på här presenterade resultat och analyser.

²⁹ Gottschall, J.S. och R. Kram. Energy cost and muscular activity required for propulsion during walking. *Journal of Applied Physiology*, 94, pp. 1766-1772, 2003

³⁰ Griffin, T., T. Roberts och R. Kram. Metabolic cost of generating muscular force in human walking: insights from load-carrying and speed experiments. *Journal of Applied Physiology*, 95, pp. 172-183, 2003.

³¹ Epstein, Y., J. Rosenbaum, R. Burstein och M.N. Sawka. External load can alter the energy cost of prolonged exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 57, pp. 243-247. 1988.

³² Danielsson, U. och U. Bergh. Fysiska krav på befattningar inom räddningstjänsten. FOA-R-97—00549-720—SE, 1997.

³³ Patton, J.F., J. Kaszuba, J.R.P. Mello och K.L. Reynolds. Physiological responses to prolonged treadmill walking with external loads. *European Journal of Applied Physiology*, 63, pp. 89-93, 1991.

³⁴ Bergh, U., U. Danielsson, O. Eiken och M. Gennser. Värmerelaterade problem relevanta för Försvarmakten. FOI Memo 2050, 2007.

³⁵ Bedömning av värmebalans vid insats och övning. HKV 14 990:63220, 2008-04-01.

Fältförsöken med olika underlag gjordes med två bördor, 22 kg och 35 kg. Syftet var att undersöka om energikostnaden, normerad för total förflyttad massa, påverkades av massan och av underlaget. Resultaten indikerar att transportkostnaden var relativt opåverkad av bördans storlek i respektive terrängtyp trots att underlaget varierade stort från hård grusväg till mjuk, torr mosse som krävde relativt höga benlyft. Resultatet betyder att energikostnaden med avseende på förflyttning, för ett givet underlag, kan normeras. Eftersom motsvarande för fart har visats tidigare förenklar detta bedömningen av totala energikostnaden genom att, inom rimliga, praktiska gränser är TpC linjär mot förflyttad massa och fart. Det framhålls ibland att bördans inverkan på balansen också påverkar energikostnaden. Studier har dock visat att även om balansen påverkas genom att bördan placeras högt eller lågt, så har det liten betydelse för förflyttningskostnaden³⁶.

Fältförsöken genomfördes vid "en" hastighet. I själva verket fick varje försöksperson välja sin "lämpliga" fart för varje terrängtyp (undantaget var löpning 2,2 m/s som styrdes med hjälp av GPS). Syftet var att få information om vad som var "lämplig" fart och hur den eventuellt varierade mellan personerna. De var tillsagda att välja fart som var förenlig med långvarig förflyttning utan risk för utmattning. Resultaten visade att variationen mellan individerna var relativt liten för de olika underlagen. Däremot är bedömningen den att vissa farter ändå var för högt valda för att kunna genomföras under timmar. Att den fart som valdes på grusväg, 1,5 m/s för båda bördorna, var rimlig beror sannolikt på att soldaterna var mer vana vid längre marsch på den typen av underlag. Farten 1,5 m/s på grusväg motsvarar knappt 50 % av soldaternas maximala arbetskapacitet medan effektkostnaden vid de andra underlagen var högre. Speciellt gällde detta den torra mossen där effektutvecklingen var mellan 800 och 900 W vilket motsvarade 65 - 70 % av maximal kapacitet. Vid den typen av förflyttning är sannolikt vald fart för hög för marsch under "timmar". Att farten blev 1,0 - 1,1 m/s på mossen beror sannolikt på att underlaget var obekant samt att varje delförsök gjordes så kort att inte värmen skulle påverka vald fart och subjektivt skattad ansträngning. En rimligare fart vore omkring 0,7 till 0,8 m/s. Cirka 0,7 m/s har uppmätts vid tidigare mätning då soldaten skulle genomföra taktisk förflyttning i terräng som delvis liknade den "torra mossen". En motsvarande justering för underlagen igenvuxen åker och skogsstig är gissningsvis reduktion med cirka 0,1 m/s. Betydelsen av vald fart för transportkostnaden undersöktes alltså inte i denna studie. Det har dock gjorts tidigare, för olika underlag, och de resultaten har visat på en okänslighet för vald fart så länge den är inom vanliga, "rimliga" gränser³⁷. Det innebär att den normerade transportkostnaden avseende fart är ungefär densamma för olika farter. Sammantaget är den avseende totalmassa och fart normerade transportkostnaden relativt okänslig för massa och fart. Det innebär att värdet för givet underlag kan multipliceras med totalmassa (kg personvikt samt burens börda) och fart (m/s) så fås effektkravet (W).

Helt klart är att underlagets egenskaper har betydelse för transportkostnaden. Ju mjukare och ojämnare underlag desto högre är TpC. Förklaringen till att underlaget påverkar är att det deformeras under fotisättningen. Om inte underlaget fjädrar tillbaka förloras hela kostnaden för deformationen vilken övergår till värme i materialet. En bieffekt till att underlaget komprimeras är att foten måste lyftas högre under kommande steg vilket ytterligare ökar transportkostnaden. Deformationskostnaden har också studerats vid gång i lössnö³⁸. Den ökade kostnaden står i proportion till nedsjunkningsdjupet (lössnödjupet). Ännu högre kostnad fås om underlaget inte bara komprimeras utan även bryts sönder som exempelvis då skare brister. En variant av deformation av snö underlag är gång i lös sand

³⁶ Johnson, R.C., R.P. Pelot, J.B. Doan och J. M. Stevenson. The effect of load position on biomechanical and physiological measures during a short duration march. ADP010990, maj 2001.

³⁷ Danielsson, Ulf. Orienteringsförmåga och fysisk belastning. FOI-R—1567—SE.

³⁸ Soule, R.G. och R.F. Goldman. Terrain coefficients for energy cost prediction. Journal of Applied Physiology, 32, pp. 706-708, 1972.

där deformationen inte nödvändigtvis är så stor men där priset för att skjuta ifrån i varje steg är kostsamt eftersom sanden trycks undan vilket innebär ett avsevärt extraarbete. Med ett sådant underlag kan man snart nå maximal ansträngning trots att uppnådd fart blir beskedlig. Orsaken till att ojämnt underlag ökar transportkostnaden, $5,9 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{m})$ på igenvuxen åker, är mindre uppenbar. Sannolikt ökar kostnaden vid fotisättningen i det något mjuka underlaget men det borde bara vara en mindre del av kostnadsökningen. En större del kan härröras till att vertikala förflyttningen blir större på ett ojämnt underlaget för att minska risken för att snubbla och falla.

En viktig del i transportkostnaden är terrängens lutning. Den har studerats tidigare men då huvudsakligen på rullband. Terrängens lutning kombinerad med olika markunderlag har knappast studerats avseende transportkostnaden. Några försök har gjorts på hårt underlag som asfältväg och grus³⁹. Enligt tidigare studier så kan den ökade transportkostnaden vid gång i uppförsbacke ganska enkelt förklaras med ökat arbete på grund av vertikal förflyttning. Det muskelarbetet är koncentriskt för vilket verkningsgraden är relativt välkänd. Vid gång i utförlöpa återvinns inte den lagrade energin mer än till viss del. Det ökade bromsarbetet som utförs vid fotisättningen är excentriskt vilket har en mycket hög verkningsgrad⁴⁰. Dessutom lagras en viss spänning i muskler och ligament som sammantaget gör att transportkostnaden är lägre än vid gång på plan mark men är inte linjär mot planets lutning. Förflyttningen på skogsstigen hade en transportkostnad av $6,7 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{m})$. Om hänsyn tas till det skiftande underlaget samt den vertikala förflyttningen upp och ner fås en medeltransportkostnad som relativt väl sammanfaller med den uppmätta. Approximativt tycks transportkostnaden öka med cirka 10 % jämfört med den på plan mark om underlaget består av upprepade "kulle upp och kulle ned" givet att brantheten är måttlig.

Det fristående försöket med förflyttning i dagsljus och mörker visade att transportkostnaden ökade markant vid förflyttning i mörker då underlaget var "osäkert". Vid gång i samma "spår" i dagsljus var kostnaden $6,7 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{m})$ vilket var samma värde som vid gång på den något kuperade skogsstigen. I båda fallen fanns viss kupering samt underlag som skiftade men som huvudsakligen upplevdes som stadigt för foten. Men i mörker ökade transportkostnaden till $8,8 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{m})$ vilket är en remarkabel ökning. Genom att sträckan var markerad med IR-stavar och bildförstärkare användes skedde förflyttningen längs samma spår mörker såväl som i dagsljus. Dock, att gå i terrängen med bildförstärkare är långt ifrån enkelt på grund av svårigheten att kunna variera fokus mellan nära fötterna och längre fram. Men någon bra förklaring till den stora skillnaden finns inte. Med analogin igenvuxen åker så kan en del av förklaringen ligga i att mörkret krävde högre benlyft och att den vertikala förflyttningen blev högre på grund av osäkerhet vid fotisättningen. Vid gång på grusvägen (något kuperad motionsslinga) blev transportkostnaden 17 % högre än vid gång på plan hård grusväg. Det högre värdet kan till viss del (ca 10 %) förklaras av kuperingen medan de resterande 7 % delvis beror på att underlaget bitvis var täckt av en is- och snöskorpa som bröts sönder vid fotisättningen. Vid förflyttning på samma grusväg under mörker, med bildförstärkare uppstod inte någon ytterligare ökning av transportkostnaden. Det tolkas som att det inte var några svårigheter att förflytta sig på det underlaget även om bildförstärkare nyttjades. Risken att snubbla bedömdes som minimal eftersom man visste att vägen var hyggligt slät. Dock ökade variationskoefficienten i mörker för såväl grusvägen som skogen vilket skulle kunna tolkas som att vissa individer blev mer osäkra på underlaget som då framkallade en annan gångteknik.

³⁹ Danielsson, U. och S. Grambo. Position och arbetsbelastning i fält. Direktmätning och beräkning från GPS-data. FOI-R—0683—SE, 2003.

⁴⁰ Margaria, R. Biomechanics and energetics of muscular exercise. Oxford, 1976.

4.2 Diskussion simuleringsberäkningar

Simuleringsprogrammet Insula (Appendix B) har validerats i olika avseenden, beklädnadens termiska egenskaper samt, värmestrålningsöverföring mellan omgivning och dräkttyta, individens värmelagring m.m. I föreliggande applikation har Insula validerats med avseende på värmelagring och vätskeförlust under klimatförhållanden som bl.a. förekommer i centralafrika (varmt och fuktigt)⁴¹. Valideringen har baserats på de rekommendationer USARIEM har utarbetat för amerikanska försvaret. Rekommendationerna emanerar från USARIEM:s heat strain model som är validerad. Resultaten från jämförelsen finns i Appendix A (tabell A1).

4.2.1 Simuleringsberäkningar, Stockholm

Risken att drabbas av värmerelaterade problem beskrivs av kurvan i Appendix A. Med ökande värmeinnehåll (ökande kroppstemperatur) ökar risken för överhettning och ju högre värden desto allvarigare blir konsekvenserna. Ökande tid vid given värmelagring ökar också risken för såväl fysiska som mentala värmerelaterade problem. Kurvan som beskriver förhållandet mellan exponeringstid och värmeinnehåll anger den nivå då fysiska problem börjar uppstå på de individer som är känsligast. Det innebär att mer "robusta", fysiskt vältränade, acklimatiserade individer kan tåla något högre värmeinnehåll utan att förlora i prestation. Grafen i Appendix A planar ut mot 6 kJ/kg vid längre exposition. Därför är det den nivån som använts som gränsvärde vid bedömning av exponering som pågår många timmar. Gränsen är något försiktigt satt. Beroende på vilka risker alternativt vinster som kan uppnås med en högre värmebelastning kan naturligtvis en annan nivå väljas. Det beslutet måste då innefatta förståelsen för hur överhettade ska omhändertas och hur följden kan påverka chansen till framgång i insatsen.

Figur 1 (vänster) visar att kroppens värmeinnehåll når 6 kJ/kg när det är dags för första 10-minuterspausen. Men eftersom grafen i Appendix A visar att problem sannolikt inte uppkommer under 8 kJ/kg efter 50 minuters exponering så är inte taket nått ännu. Dock efter vilan, då värmen minskat något i kroppen, ökar den snabbt under den fortsatta förflyttningen så att gränsvärdet och uppnådd värmelagring korsar efter cirka 15 minuter in på andra passet. Konsekvensen är att om inga överhettningar ska tillåtas under rådande förhållanden bör vilan utsträckas och kombineras med lättnader i klädseln. Kurvan (figur 1, vänster) visar att en timmes vila återställer kroppsvärmen till ursprungsnivån varefter ytterligare ett arbetspass kan genomföras med liten risk för överhettning. Om inte insatsen tillåter så långa viloperioder och skydds- och utrustningsnivån är given måste farten reduceras.

Figur 2 visar samma värmelagringskurva som figur 1 dock med lägre upplösning vilket gör att "hacken" vid de korta pauserna inte syns. Kurvorna visar att värmeproblem kan uppstå vid långa förflyttningar i Sverige (Stockholm) under sommarmånaderna juni, juli och augusti. Däremot, under resten av året kan långa fotmarscher genomföras med farten 1,5 m/s (5,4 km/h, 11 min/km) och då soldaten medför 35 kg packning inkluderande påtaget ballistiskt kroppsskydd, hjälm samt stridshandskar. Förutsättningen är att klimatet är " normalt " för perioden, att solen skiner 50 % av tiden och att förflyttningen sker på hård, plan grusväg. Om fotmarschen sker i annan terräng och eller bördan har en annan

⁴¹ Sustained soldier health and performance in operation support hope: Guidance for small unit leader. USARIEM Technical note 94-3, 1994

vikt kan samma värmebelastning uppnås om farten modifieras. Hur mycket t.ex. lättnader i börda kan möjliggöra ökad fart vid olika underlag kan utläsas i Appendix E.

I givet klimat är förflyttningshastigheten den viktigaste komponenten i värmebalansen. Om förflyttningen sker under dagtid, i juli, i Sverige måste farten reduceras för att minska risken för överhettning. Figur 3 visar effekten av reducerad fart på värmelagringen. I beräkningarna antas att farten minskas från 1,5 m/s till 1,3 m/s men att övriga förutsättningar, börda, utrustning och klimat, är oförändrade. Figur 3 visar att med den lägre farten så kan förmiddagen genomföras med liten risk för överhettning. Under sista passet på eftermiddagen överskrids gränsvärdet vilket medför förhöjd risk men med något förlängd paus eller något minskad fart så kan hela förflyttningen genomföras. Priset är att den genomförda förflyttningen blir 4 km kortare efter 7 timmars förflyttning medan vinsten är undvikandet av ett antal överhettade personer vilkas omhändertagande säkerligen försenat/avkortat förflyttningen i mycket högre grad än följden av den lägre farten.

Alternativet till att reducera farten för att kunna genomföra förflyttningen i juli månad är att förbättra avkylningen. Det kan ske genom att ta av det ballistiska kroppsskyddet. Det som vinnas är att cirka 30 % av kroppsytan befrias från ett lager som effektivt bromsar avdunstning av svett. Dessutom minskar isolationen över samma yta och ventilationen förbättras över bålen vilket är gynnsamt för avkylningsmöjligheten. Tabell 5 och figur 3 visar att värmelagringen minskar drastiskt, vid bibehållen fart, om kroppsskyddet tas av. Hela förflyttningen kan genomföras utan risk för överhettning och värmelagringsnivån blir betydligt lägre än vid jämförelse med farten 1,3 m/s med påtaget kroppsskydd. Beräkningarna visar att, utan skydd, så kan till och med farten höjas till 1,7 m/s utan att risken blir större än vid 1,3 m/s med påtaget skydd. Priset för minskad överhettningrisk är dock ökad risk för skada i händelse av beskjutning. En annan fördel med att ta av skyddet är minskat vätskebehov (tabell 2). Beräkningarna indikerar att vätskebehovet blir drygt en liter mindre än då förflyttningen genomförs med skydd (vid farten 1,3 m/s). Effekten av avtaget ballistiskt kroppsskydd tycks vara stor. Möjligtvis är den något mindre i en verklig situation. Orsaken är att även med avtaget kroppsskydd så påverkar stridsväst och annan utrustning såväl värme som fuktavgivningen från bålen. För detta har inte kompensert helt vilket gör att skillnaden kan vara något mindre än den beskrivna. Å andra sidan möjliggör avtaget kroppsskydd att bålen lättare kan ventileras och att lättnader i klädsel förenklas. Men inte minst viktigt är att värmeproduktionen minskar om förflyttningen sker utan ballistiskt kroppsskydd⁴².

Solinstrålning och vind påverkar värmebalansen. Ju klarare himlen är desto mer värme tillförs kroppen. Med ökande vind förbättras värmeavgivningen och dunstningen av svett. Dessutom minskar effekten av den solinstrålning som primärt värmer utrustningen och naken hud. Det sker genom att vinden sänker temperaturen på ytan och därmed diffusionen av värme in mot kroppen. Tabell 6 och figur 5 visar effekten av instrålad värme från solen på värmelagringen. Grundförutsättningen för samtliga simuleringar är att himlen är täckt till 4/8 av moln. Det översätts till att hälften av tiden så skiner solen från klar himmel medan under resterande tiden så är direktinstrålningen försumbar. I beräkningarna antas i stället att solen skiner med reducerad styrka under hela tiden. Beräkningssättet är rimligt eftersom kroppen och utrustningen agerar som en stor värmebuffert. Figur 5 visar att med himlen täckt till 7/8 så minskar värmelagringstakten med cirka 1 kJ/kg vid slutet av första respektive andra arbetsperioden. Skillnaden i aktionstid innan gränslinjen skärs är dock liten, omkring 10 minuter. Viktigt att veta är att inverkan av solinstrålning påverkas av temperatur, fukthalt och arbetstygnd. I ett scenario

⁴² Riccardi, R., P. Deuster, och L. Talbot. Metabolic demands of body armour on physical performance in simulated conditions. *Military Medicine*, 173, pp. 817-824, 2008.

då arbetstyngden är lägre men klimatet mer belastande kan olika grader av solinstrålning ha mycket stor betydelse för termiska uthålligheten. Figur 5 visar också att om himlen är helt klar men att farten reduceras till 1,3 m/s så kan hela första perioden genomföras med endast viss förhöjd risk. Relativa betydelsen av arbetsbelastning (värmeproduktion) och solinstrålning i Sverige, i mitten av juli, är sådan att arbetsbelastningen dominerar starkt. Tabell 6 visar också att lägre värmeproduktion och eller lägre värmeinstrålning har betydelse för vätskeåtgången vilket är av stort logistiskt värde. Dessutom förutsätter en kraftfull svettning att kroppen inte är uttorkad.

4.2.2 Simuleringsberäkningar, konfliktorter

Länderna är valda på grund av att konflikter nyligen har förkommit där eller att stridigheter pågår eller att länderna hyser potentiella oroshärdar. Orterna i sin tur representerar i vissa fall platser där konflikter förekommer, alternativt att det är centralorter för vilka det finns klimatstatistik. Det innebär att klimatet kanske inte är helt relevant för vissa konfliktorter, speciellt gäller det de länder som hyser vitt skilda klimatzoner.

Serbien, Belgrad, får representera Balkan. Figur 6 visar att fotmarsch med farten 1,5 m/s innebär avsevärd överhettningrisk på Balkan under sommarmånaderna. Detta gäller om FU90 bärs. Bara under det svalare halvåret, oktober till april, kan sådan förflyttning ske med liten risk. Som tidigare visats kan konflikten lösas om farten reduceras. Men sannolikt räcker inte en minskning till 1,3 m/s utan 1,1 – 1,2 m/s bör nog inte överskridas, speciellt under juli månad. Ett annat sätt än att minska farten är att bära lättare uniformsystem. Figur R7 visar värmelagringsutvecklingen då FU90 L FN alternativt FU90 TR GR bärs. Med lättare uniform kan fotförflyttningen ske säkert även under maj och september (förmiddagspasset) men med förhöjd risk under eftermiddagen. Under övriga sommarmånader måste dock farten reduceras för att inte värmeutmattningar ska ske. En minskning till 1,3 m/s är sannolikt tillräcklig. I figur 8 är beräkningarna gjorda baserade på farten 0,9 m/s. Figuren visar att risken för värmerelaterade problem är försumbar under hela året om den lättare uniformen bärs. Värmelagringen är så låg att inte ens situationer som kräver hög uppmärksamhet bör påverkas negativt eller i så fall bara i mindre grad. (En genomgång av värmebelastningens betydelse för fysisk och mental prestation är gjord i rapporten "Fysisk belastning vid minröjning i Västsahara"⁴³)

I klimat varmare än de som normalt förekommer i Europa måste såväl lättare uniformssystem som lägre fart nyttjas för att minska värmeproblemen. Figur 5 visar att för Tchad är det tillräckligt med låg förflyttningshastighet och lätt uniform för att hålla värmelagringen tillräckligt låg under förmiddagsperioden bortsett från den varmaste månaden som är maj. Under eftermiddagsperiodens förflyttning ökar dock risken utom för vintermånaderna december och januari. Eftersom orten ligger strax söder om norra vändkretsen och att regnperioder förekommer är den varmaste årstiderna förskjutna (maj och oktober) jämfört med vad som gäller i exempelvis Europa. En mer detaljerad beskrivning av värmebelastningen i Tchad finns utgiven⁴⁴. Simuleringarna är gjorda för det vanligaste förekommande klimatet i Ndjamen. Dock finns tre klimatzoner, öken, savann och regnskog, vilka representerar olika krav. Ndjamen befinner sig i savann-zonen.

⁴³ Danielsson, U. och J. Keinänen. Fysisk belastning vid minröjning i Västsahara. Resultat från enkätundersökning och datorsimulering. FOA-R—99-01100-720—SE, 1999.

⁴⁴ Danielsson, U. Värmebelastning vid FM-uppdrag i Tchad-Sudan (Darfur). FOI Memo 2184, 2008.

Det termiska klimatet i Somalia är något mindre krävande. I kuststaden Mogadishu kan förflyttningen ske utan eller med liten riskökning under hela året om farten är 0,9 m/s och lätt uniform bärs. Det varma klimatet medför dock att kroppstemperaturen inte helt återgår till den normala under den 1 timme långa lunchvilan trots att den tas i skugga och att kroppsskydden tas av. Detta gäller även Ndjamena. Liknande värmelagringskurvor fås för Kinshasa, DR Congo, som för Mogadishu. Lätt uniform och låg förflyttningshastighet ger låga risker för överhettning under hela förflyttningen under i stort sett hela året. På grund av placeringen vid ekvatorn fås lägst belastning vid juli och december. Poängteras bör dock att beräkningarna förutsätter förflyttning på hård, plan grusväg. Eftersom detta inte är det vanligaste underlaget vare sig i Tchad, Somalia eller DR Congo, kan korrigering av farten behöva göras när fotmarschen sker på mjukare underlag (se Appendix C).

I mer utpräglade öken och bergstrakter som Irak och Afghanistan är klimatvariationerna oftast större än i Afrika. Figur 12 visar att värmelagringen i Kabul, Afghanistan, är risken för överhettning förhöjd eller stor under sommarhalvåret (maj till september) om förflyttningen sker med 1,5 m/s. Under vinterhalvåret är dock värmebelastningen liten givet att lätt uniform (FU90 TR BE) bärs. En minskning av farten till 0,9 m/s gör att överhettningensrisken blir försumbar även under sommarhalvåret (figur 13). Figuren 12 visar att värmelagringen sjunker under noll under delar av vinterhalvåret vilket visar att uniformen är för lätt för det då rådande klimatet. En förstärkning av plaggen behöver ske under vilan alternativt att FU90 bärs hela tiden. Även då kan förstärkningsplagg kunna behövas. Bagdad, Irak, uppvisar liksom Kabul stora skillnader i värmebelastning mellan sommar och vinter. Under sommarhalvåret medför lätt uniform (FU90 TR BE) och låg fart, 0,9 m/s, ändå att värmelagringen når riskfyllda nivåer, och då speciellt under eftermiddagspasset. Det innebär att fördelningen arbete/vila (50 min/10 min) inte kan hållas utan att arbetsperioden måste kortas påtagligt, eventuellt i kombination med en ytterligare sänkning av farten. Alternativt måste lättnader i skyddet göras. Som figur 4 visar finns stora vinster att hämta om ballistiskt kroppsskydd tas av. Ett sådant förfarande minskar risken för överhettning och möjliggör snabbare och längre förflyttningar men till priset av ökad risk för skador vid bekämpning.

Tabell 4 visar en sammanställning av simuleringsberäkningarna för de flesta orter och situationer. Om utgångspunkten är att den ballistiska skydds-nivån ska vara så hög som möjligt finns bara en möjlighet att minska värmebelastningen och det är att minska tempot. Visserligen förbättras värmeavgivningen genom att skifta från t.ex. FU90 till FU90 L FN alternativt FU90 TR GR/BE men det får inte lika stor effekt som reduktion av farten. Av de gjorda beräkningarna är det bara i Irak (Bagdad) samt Tchad (Ndjamena) som en sänkning till 0,9 m/s inte är tillräcklig för att värmelagringen ska hamna under 6 kJ/kg efter långtidsexponeringen. Problem med värmen i Bagdadregionen är också dokumenterade⁴⁵ där såväl överhettning som kraftig dehydrering är vanligt förekommande främst för de förband som patrullerar, men även för dem som står post. Liknande problem finns i Ndjamena men de är inte fullt så stora som i delar av Irak. Givet att skydds-nivån inte reduceras så måste marschschemat ändras så att viloperioderna blir längre och arbetstiden kortare. Om möjligt så bör förflyttningen ske under de mörka timmarna. Om det inte är möjligt så bör morgon och sen eftermiddag nyttjas i högre omfattning. En sådan förskjutning i arbetsperioden, till sen natt och tidig förmiddag gjordes vid minröjning i Västsahara⁴⁶ vilket förbättrade uthålligheten och minskade riskerna.

⁴⁵ Manning, E. och B. Wilson. Dehydration in extreme temperatures while conducting stability and support operations in a combat zone. *Military Medicine*, 172, pp. 972-976, 2007

⁴⁶ Danielsson, U. och J. Keinänen. Fysisk belastning vid minröjning i Västsahara. FOI-R—99-01100-720—SE, 1999.

Ett möjligt alternativ till att försämra skyddet och/eller minska farten är att utnyttja någon form av kylning av mikroklimatet i fältuniformerna. Några olika tekniska lösningar finns i sinnevärlden och fler är under utveckling. Nackdelen är att de oftast har kort aktionstid och att de väger relativt mycket vilket i sin tur ökar värmeproduktionen. Appendix D diskuterar kapacitet och tillgänglighet hos den typen av apparatur.

Svettningsintensiteten är nära relaterad till kroppens värmeinhåll. Så med ökad värmebelastning ökar svettningen av vilket följer att kroppen förlorar vätska. Ett exempel på ackumulerad vätskeförlust visas i figur 1(h) gällande förflyttning i Sverige (Stockholm) med farten 1,5 m/s och FU90. Figuren visar ett accelererande förlopp, bortsett från lunchvilan i mitten av perioden då vätskeförlusten planar ut och nästan upphör. Efter vilan ökar värmelagringen åter varvid vätskeförlusten visar att brantare lutning. Genom den koppling som finns mellan kroppens värmeinhåll och svettningsintensitet fås ett resultat som inte är situationsberoende avseende aktivitet, klimat eller utrustning. Figur 15 visar ett ungefärligt mått på hur stor den ackumulerade vätskeförlusten har blivit efter knappt 7 timmars förflyttning och där den ackumulerade värmelagringen är den vid förflyttningens slut. En värmelagring på nivån 6 – 6,5 kJ/kg (grön – gul markering i tabell 7) innebär att ca 4,5 l har förlorats. Men den individuella svettningen är så varierande att vissa individer kan kräva 50 % mer än vad grafen visar⁴⁷. Noteras bör att figur 15 baseras på det speciella uppträddet som beräkningarna baseras på utgörs av ett 50/10 schema avbrutet av en längre lunch samt på att individerna är klädda med någon form av fältuniform.

Utifrån samma begränsningar som gäller för figur 15 kan, approximativt, en klimatlinje härledas utifrån lufttemperatur och relativ luftfuktighet och som visar när risken för komplikationer kan uppstå som följd av överhettning (figur 16). Linjen är baserad på att 6 kJ/kg nås vid slutet av den 6h 40 min långa förflyttningen. Röd pil markerar i vilken riktning risken ökar medan grön pil visar minskande risk. Ökande lufttemperatur och/eller ökande relativ luftfuktighet ökar alltså risken för värmeutmattning. Om förutsättningarna ändras, exempelvis genom att farten är högre än 0,9 m/s eller att underlaget är mjukare gäller inte linjen. I det fallet måste riskgränsen justeras nedåt. Detsamma gäller om utrustningen är tyngre än 35 kg eller att FU90 bärs. Om bara bördans massa, underlaget och/eller farten varierar kan "risklinjen" behållas om korrigeringen sker enligt Appendix E.

US Army har gett ut rekommendationer avseende förhållandet arbets-/vilotid och mängd vätskeersättning⁴⁸. Referensen gäller uppträddet i varmt och fuktigt klimat bland annat exemplifierat med Kinshasa, DR Congo. Men att jämföra de rekommendationerna med "gränslinjen" i figur 16 ter sig dock svårt på grund av att små skillnader i värmeobalans kan ge stora effekter. US Army – råden baseras på att soldaten är fullt uppvätskad, utvilad och aklimatiserad, att vinden är 2 m/s, fullt solsken råder och att högst 5 % förluster i värmeutmattning accepteras. Linjen i figur A1 (Appendix A) indikerar var de första fallen av värmeutmattning sker. Vad det innebär i förlustprocent p.g.a. värme är osäkert men är rimligtvis inte högre än 5 %. Det, tillsammans med att simuleringsberäkningarna inte är baserad på speciellt värmeacklimatiserade individer gör att figur 16 sannolikt innebär en marginal gentemot överhettning. Svårast med jämförelsen beror dock på eventuella skillnader i arbetsintensitet. Inom arbetslivet, inkluderande försvarsmakter, är det vanligt att klassificera arbetstyngder efter "mycket lätt", "lätt", "moderat" och "tungt". Men om aktiviteten ligger 50 W fel i värmeproduktion i förhållande till en viss kategori kan det ha mycket stor betydelse för utfallet i rekommendationen. Enligt US Army kan, om BDU (kan jämföras med FU90 TR/BE) med ballistiskt kroppsskydd bärs och arbetstyngden är

⁴⁷ Bergh, U. och U. Danielsson. Proving av prototyper till ny larmdräkt för statens Räddningsverk. FOA, PM Dnr: 89-6060/S, 1989

⁴⁸ Sustained soldier health and performance in operation support hope: Guidance for small unit leader. USARIEM Technical note 94-3, 1994

"tung" (kan jämföras med 1,5 m/s på hård grusväg med börda 30 kg), och luftfuktigheten är 75 % kan arbetet pågå 28, 24, 19, 13 och 4 minuter, medan resterande tid av timmen består av vila i skugga, om temperaturen är 24, 27, 29, 32 respektive 35 °C. Motsvarande simuleringsberäkningar är inte gjorda eftersom 50/10 schemat varit styrande. US Army rekommendationerna avseende "lätt" aktivitet, vilket är något lättare än 0,9 m/s på hård grusväg med 35 kg packning anses kunna pågå obegränsat utom i fallet 35 °C då aktiviteten bara kan pågå 20 minuter per timme. I fallet med moderat arbetstyngd så är motsvarande tider; utan begränsning, 39, 30, 21 respektive 8 minuter.

En jämförelse mellan US Army rekommenderad vätsketillförsel och den erhållna ur figur 15 ger ungefär samma vätskebehov, mellan 0,8 och 0,9 l/h vid ovanstående temperaturintervall; vid "tungt" arbete från 0,8 l/h till 1,1 l/h medan "lätt" aktivitet kräver från 0,6 l/h till 1,1 l/h.

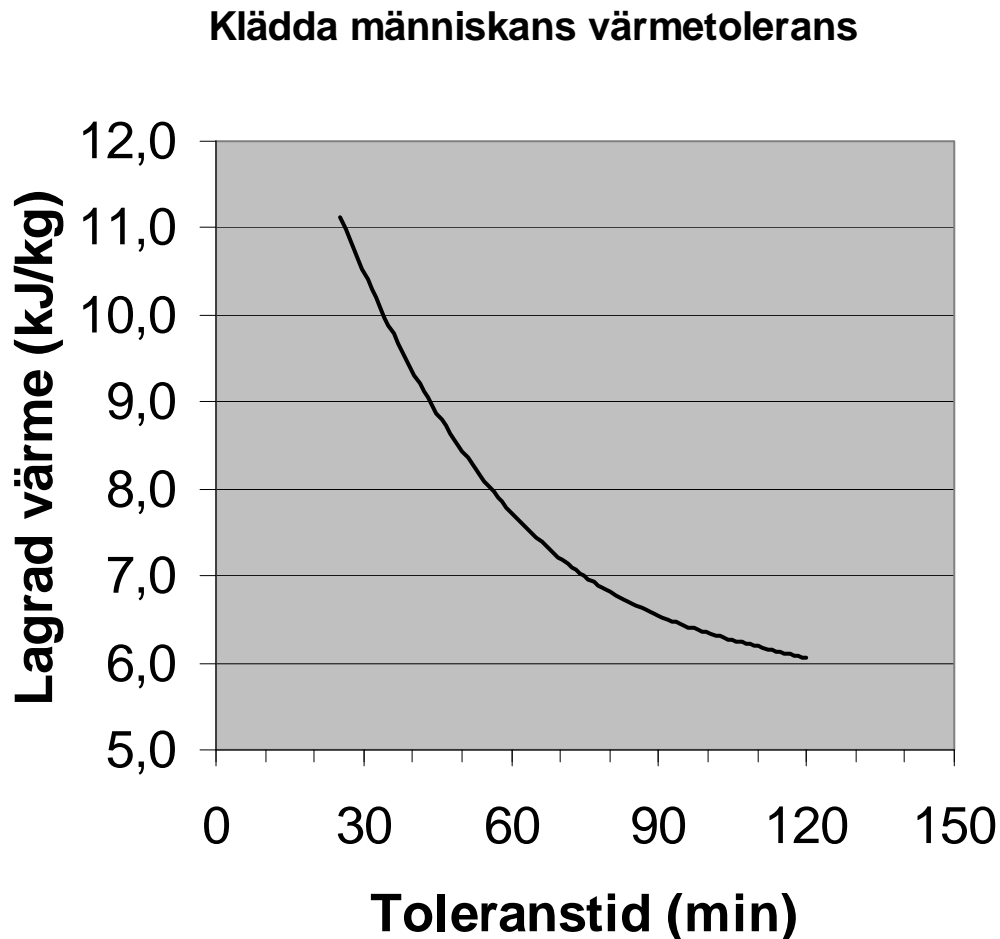
4.3 Slutsatser

Effektkravet vid fotförflyttning påverkas huvudsakligen av gångsättet (gång eller språngmarsch), farten, förflyttad total massa (individ samt börda), terrängens lutning samt underlagets jämnhet och fasthet. Dessutom inverkar ljusförhållandet. Om effekten normeras med avseende på massa och fart blir den erhållna transportkostnaden, TpC, relativt okänslig för ändringar i fart och totalt förflyttad massa så länge variationerna är rimliga. Däremot är transportkostnaden, TpC, känslig för förflyttningssättet samt underlagets karaktär. Jämfört med marsch på plan, hård grusväg ökar TpC med ca 50 % då underlaget är något mjukt och ojämnt och med 100 % vid mjukt, bromsande underlag som kräver höga benlyft. Snabbmarsch (jogging) på hård plan grusväg medför 25 % högre TpC. Mörker ökar TpC med ca 30 % om underlaget är ojämnt och något hindrande. Om underlaget känns "tryggt" (grusväg) ökar inte TpC vid mörker. Kunskapen om nivån på TpC innebär att det är möjligt att bedöma den termiska uthålligheten men kan även användas för bedömning av behov av energitillförsel, relativ arbetsbelastning samt muskulär uthållighet vid skilda typer av fotförflyttning.

Transportkostnaden, TpC, vid fotmarsch, beräknad enligt ovan, har nyttjats för simulering av värmeutvecklingen hos en individ som genomför fotförflyttning. Värmebelastningen påverkas av klimatet, energikostnaden vid förflyttning samt den personliga utrustningens termiska egenskaper. Genom att välja en lättare uniform och/eller att ta av det ballistiska kroppsskyddet så kan uthålligheten förbättras avsevärt. Betydelsen av en sådan åtgärd beror dock på hur varmt och/eller fuktigt klimatet är. Att göra en mindre lättnad i börda har ofta en begränsad betydelse för värmeproduktionen. Den faktor som alltid har stor (störst) betydelse är arbetsintensiteten. Om farten måste hållas hög kommer uthålligheten i varmt klimat att vara begränsad. Om arbetsintensiteten kan varieras inom vida gränser kan termisk uthållighet nästan alltid uppnås. För att kunna avge tillräckligt med värme krävs att svettningfunktionen har hög kapacitet. För detta krävs att den vätska som förloras ersätts i ungefär samma grad som den förloras. Det innebär att i varma klimat så kan vätskebehovet vara cirka 1 liter per timme.

Risken för överhettning har beräknats för orter i Sverige, Serbien, Tchad, Somalia, DR Congo, Afghanistan samt Irak. Risknivån har satts så att risken för överhettning vid långvarig exponering bedöms var liten eller mycket liten. Genom att reducera farten samt att välja en lätt fältuniform kan, för de orter som ingått i simuleringen, överhettning undvikas vid förflyttning på hårt, plant underlag, under större delen av året. I de mer ökenlika områdena i Tchad eller Irak räcker det dock inte att minska farten till 0,9 m/s under den varma årstiden. Ytterligare sänkning av farten och/eller kortare arbetspass krävs för uppnå liten risk för överhettning.

5 Appendix A (Klädda människans värmeterans)



Figur A 1. Toleranstid för olika värmelagringsnivåer.

Kurvan visar risken för värmeutmattning hos en klädd individ⁴⁹. Kurvan ska tolkas som att när exponeringstiden är kortare kan högre mängd värme tålas än när värmebelastningen har pågått en längre tid. Exempelvis, om värmebelastningen sker under 45 minuter och kroppen under den tiden har lagrat 9kJ/kg (kroppsvikt) så är risk för värmeutmattning låg. Om däremot exponeringstiden är 120 minuter så ska värmelagringen inte överskrider 6 kJ/kg om risken ska betraktas som liten. Vissa, känsliga personer kan redan vid de nivåer som kurvan anger, visa tecken på värmepåverkan. Dock är risken liten eller mycket liten för de flesta. Somliga individer kan tåla högre värmebelastning än vad kurvan visar. Speciellt kan detta gälla vid korta exponeringar om personerna exempelvis är fysiskt mycket starka. Men genom att utsätta en grupp individer för högre belastning kommer ett antal i gruppen sannolikt att drabbas av värmeutmattning. Det kan finnas taktiska situationer då det finns fog för ett förhöjt risktagande med tanke på de vinster som det kan medföra. Men om inte situationen är sådan eller om eventuella konsekvenser är

⁴⁹ Shvartz, E. och D. Benor. Heat strain in hot and humid environments. *Aerospace Medicine*, 43, 1972.

svårhanterbara och det exempelvis är ohanterbart att ett antal blir värmeutslagna bör gruppindividerna inte exponeras mer än vad kurvan anger. Viktiga förutsättningar för att kurvan ska gälla är att individerna inte börjar exponeringen med förhöjd kroppstemperatur, att de är normalt uppvätskade samt i övrigt friska.

För amerikanska förband i värmebelastande klimat finns utarbetade rekommendationer gällande maximal, kontinuerlig arbetstid och arbetschemata (arbete/vila) för olika klimat och arbetsintensiteter⁵⁰. Tabell A1 visar värden applicerbara på framförallt afrikanska förhållanden. Tiderna är baserade på USARIEM Heat Strain Model som är validerad. De förutsättningar som gäller är att soldaten är fullt uppvätskad, utvilad samt värmeacclimatiserad. Lufthastigheten är 2,2 m/s och fullt solsken råder. Risken för värmeutmattning beräknas till < 5 %. Maximal, kontinuerlig arbetstid (min) är beräknad för arbetstyngden light (244 W), moderate (363 W) respektive heavy (568 W). Baserat på samma förutsättningar har Insula (Appendix B) använts för att beräkna tiden till att värmelagringen skär risklinjen i figur A1. Tabell A1 visar att överensstämmelsen är god för arbetstyngden "heavy". Detsamma gäller vid "moderate" och "light". Ett problem är dock att veta vad "light", "moderate" respektive "heavy" motsvarar för effekt. I nedanstående referens finns exempel angivna men de kan variera med ± 50 W inom samma klass och det har mycket stor betydelse för beräkning av "tid till överhettning" speciellt då förutsättningarna medger långa tider. I tabell A1 anges de effektnivåer som använts vid jämförelsen. NL står för "obegränsad" arbetstid vilket fås vid de mindre belastande klimaterna då arbetstyngden är "light" men också i vissa fall "moderate".

Tabell A1. Maximal rekommenderad kontinuerlig arbetstid enligt US Army för olika lufttemperatur- och fuktighetsnivåer då arbetstyngden är light (244 W), moderate (363 W) respektive heavy (568 W). Motsvarande tider till skärning med låg risknivå (Figur A1) är också beräknade med Insula (Appendix B)

T(°C)	rh (%)	Light	Light	Moderate	Moderate	Heavy	Heavy
		(US Army) 244 W	(Insula) 244 W	(US Army) 363 W	(Insula) 363 W	(US Army) 568 W	(Insula) 568 W
24	75	NL	NL	NL	NL	74	80
27	75	NL	NL	NL	NL	63	60
29	75	NL	NL	99	NL	53	50
32	75	NL	NL	69	85	43	43
35	75	133	115	51	62	35	35

⁵⁰ Sustained soldier health and performance in operation support hope: Guidance for small unit leader. USARIEM Technical note 94-3, 1994

6 Appendix B (Simuleringsmodellen INSULA)

En datoriserad simuleringsmodell, INSULA⁵¹, har utvecklats för beräkning av människans termiska belastning vid godtyckliga kombinationer av klimat, fysisk aktivitet och personlig utrustning. INSULA består av tre delar; en fysiologisk, en beklädnadsfysikalisk och en klimatmodell. En händelse kan sättas samman ur godtyckliga kombinationer av aktiviteter och klimattyper. För varje delhändelse kan beklädnaden varieras genom att addera eller ta av plagg.

Människan beskrivs med grundvärdena kön, ålder, vikt, längd och fysisk träningsgrad alternativ maximal syreupptagningsförmåga. Kroppen utgörs av kärna och yta där ytan består av 13 delar, från fot till hjässa. Kärn(rektal)temperatur, hudtemperatur, värmeinnehåll, hudblodflöde, huttring, svettningssintensitet, ackumulerad vätskeförlust, vätning av kläderna, fraktion våt hudyta, termisk komfort och hjärtfrekvens beräknas. Kroppens effekt(värme)utveckling tas ur en aktivitetslista eller så kan den anges med siffervärde. Vid fot- och skidmarsch anges förflyttningshastighet, underlagets beskaffenhet (terrängtyp/skidspårets hårdhet), terrängens lutning och bördans vikt. Om skidpulka dras, anges dess vikt. Vid fotmarsch i snö ingår nedsjunkningsdjupet.

Den beklädnadsfysikaliska modellen möjliggör beräkning av termisk isolation och vattenångmotstånd hos beklädnader i flera lager. De flesta plagg som nyttjas av FM ingår i en garderob som dessutom täcker ett stort antal civila klädestyper. Ett plagg beskrivs med materialtjocklek och vilka av de 13 kroppsytorna det täcker samt passform ("tight", "loose" eller "very loose"). Plaggmaterialet kan vara permeabelt, impermeabelt eller semipermeabelt (två nivåer). Beklädnaden kan ventileras via fysisk aktivitet (bål och/eller armar och/eller ben) samt med hjälp av extern apparatur (mikroklimatkonditionering). Konditioneringen kan göras med olika luftomsättningar och lufttemperatur/fukthalt samt styras till hela kroppen eller kroppen utan huvud. Inverkan av vind och marschhastighet på plaggens egenskaper beräknas. Plaggens ytemperatur (termiska IR-signatur) kan även bestämmas för varje ytdel separat.

Klimatmodellen utgår från temperatur- och luftfuktighetsdata vid ett stort antal orter fördelade över samtliga världsdelar (ej Antarktis). Longitud och latitud bestämmer automatiskt den dagliga och årstidsbundna variationen i temperatur, luftfuktighet och solinstrålning. Dessa parametrar kan även anges manuellt. Vind, grad av molnighet och underlagets reflexionsegenskaper anges manuellt.

Angående validering av beräknad värmelagring i föreliggande rapport; se Appendix A.

⁵¹ INSULA, ett generellt simuleringsprogram för beräkning av soldatens termofysiologiska belastning. Effekter av aktivitet, beklädnad och klimat. Ulf Danielsson. FOI-R--1052--SE, Jan 2004.

7 Appendix C (Extern kylning)

7.1 Kylstrategier

Under vissa insatser måste ibland speciella åtgärder vidtas för att förhindra värmeutmattning. Detta kan ske enligt tre vägar, antingen genom att reducera värmeproduktionen eller att öka värmetransporten från kroppen. Tredje vägen är att reducera inflödet av värme från omgivningen genom att exempelvis minimera instrålad effekt från solen. Dock, om en uppgift måste utföras inom en given tidsram är effektkravet och därmed värmeproduktionen låst. Om uppgiften kan lösas i skuggan så reducerar detta värmestillskottet från solinstrålningen. Dock är det kanske bara undantagsvis som arbetsuppgiften kan flyttas, vilket innebär att klimatbelastningen utifrån är given och styrs av vädret. Men om arbetet kan förläggas till godtycklig tid på dygnet så är det en fördel av termiska skäl att uppgifterna löses under dygnets mörka timmar då värmeinstrålningen utifrån är minimal samtidigt som temperaturen oftast sjunker.

Inom idrotten används ibland tekniken att starta aktiviteten med sänkt kroppstemperatur⁵². Vinsten är att det tar längre tid att skadlig kärntemperatur uppnås och därmed fås längre aktionstid innan vila eller andra åtgärder behöver sättas in. Nackdelen är att vinsten är relativt liten och att den kräver teknik för att uppnå sänkt kroppstemperatur. Vid längre insatser kan därför den metoden betraktas som mindre lämplig. Det har också visat sig att med sänkt kärntemperatur så dröjer det längre innan svettningen startar vilket minskar kyleffekten. I situationer där dunstning av svett är en viktig komponent kan det alltså vara kontraproduktivt att kyla kroppen. Detta är sannolikt skälet till att intermittent kylning ger större effekt än kontinuerlig (under vissa premisser)⁵³. Mekanismen skulle i så fall vara att svettningens mekanism inte undertrycks vid tidvis för stor kylning. I vissa situationer är dunstningen av svett så begränsad att en sänkt kärntemperatur i princip skulle kunna ge en större vinst. Men viktigast är sannolikt att individen varit i så sval omgivning som möjligt innan insatsen och att den fysiska aktiviteten varit minimal timmarna innan insatsen⁵⁴.

Kylning under viloperioderna ger viss effekt (se ovan). Dock kräver metoden oftast en viss procedur innan kylan kan kopplas på vilket minskar viloperioden. Dessutom bör vilan/kylningen ske i så sval, solfri miljö som möjligt. Eftersom möjlig kyleffekt står i proportion till förhållandet mellan arbets- och viloperiodernas längd krävs långa viloperioder med kyla om arbetsintensiteten är hög. Den relativa tidsvinsten kan vara stor men den faktiska, mätt i tid blir ofta låg. Störst faktisk vinst i tid fås då obalansen inte är alltför stor utan där skillnaden kan kompenseras av den externa kylningen. Då kan skillnaden exempelvis bli från någon timme till en hel dag.

Åtskilliga studier har gjorts med syftet att finna vilka kroppsdelar som fungerar bäst som värmeavgivningsyta. Det är känt att kärlsammandragningen vid kyla är begränsad när det gäller huden på huvudet. Det innebär att skallen skulle kunna fungera bra som värmeväxlare. Det är också fallet men betydligt bättre är händer och underarmar⁵⁵. Det har också visat sig att benen fungerar bra och t.o.m. bättre än bålen för värmeutbyte⁵⁶. Problemet med extern kylning är att det måste vara praktiskt att anbringa och fördela kylan på de effektivaste kroppsdelarna. Forcerad ventilation är möjlig att styra till önskade

⁵² Daanen, H. A., van Es E, M., och de Graaf, J. L. Heat strain and gross efficiency during endurance exercise after lower, upper or whole body precooling in the heat. *Int J Sports Med.* 27(5), 2006

⁵³ Cadarette, B. S., Chevront, S. N., Kolka, M. A., Stephenson, L. A. och S. N. Sawka. Intermittent microclimate cooling during exercise-heat stress US army chemical protective clothing. *Ergonomics*, 49(2), 2006.

⁵⁴ Danielsson, U. och J. Keinänen. Fysisk belastning vid minröjning i Västsahara. FOA-R--99-01100-7200—SE, april 1999.

⁵⁵ House, J.R., och J.A.S. Groom. The alleviation of heat strain using water-perfused forearm cuffs. In: *Proc. Of 8th International Conference on Environmental Ergonomics*, San Diego, CA, 1998

⁵⁶ Pozos, R., Wittmers, L. Hoffman, R., Ingersoll, B., och D. Israel. Efficiency of combinations of cooling for microclimate cooling suit design, tested in man at 100 °F with exercise. In: *Proc. Of 8th International Conference on Environmental Ergonomics*, San Diego, CA, 1998

kroppsdelar genom lämplig applicering av slangar. Tyvärr är den tekniken mindre effektiv än vätskekyllning där slangar i en åtsittande brynja täcker bålen. Eftersom bålen inte är den bästa kroppsdelen för värmeutbyte skulle slangarna hellre omsluta armar och ben. En sådan lösning är dock opraktisk, obekvämlig och mekaniskt utsatt.

7.2 Kyltekniker

Att öka värmetransporten från kroppen kan ske genom att modifiera fältuniformen. Men om skyddet (ballistiskt, mekaniskt etc.) är styrande är det lite som kan göras för att öka värmeavgivningen om inte en klimatanläggning är tillgänglig för att konditionera dräkten. Det kan ske via ”passiv” teknik som isväst eller dunstning av vatten på dräktens utsida. Kylutrustning kan också vara ”aktiv” d.v.s. kyla kroppen genom att luft blåses in mellan plagglagren. En annan teknik är att cirkulera vätska i slangar som är fästa i ett bärlager nära skinnet. En genomgång av nu tillgängliga tekniker och vilka kyleffekter som är möjliga har gjorts⁵⁷. Den passiva tekniken med isväst är kanske mindre lämplig i en mobil miljö eftersom det kräver att isen förnyas relativt ofta. En annan nackdel är att kyleffekten på kroppstemperaturen är relativt liten eftersom västen placeras på ett relativt stort avstånd från huden. Liknande teknik som isväst är att istället för smältande is nyttja fasändring i vissa salter. Övergång från fast till flytande form tar värme från omgivningen medan övergång från flytande till fast genererar värme. Samma begränsning gäller som för isvästen nämligen att teknik krävs för regenerering (nedkylning) samt av kylinnehållet är begränsat och verkningsgraden vid värmeöverföringen relativt låg.

Den andra passiva tekniken, dunstning av vatten, är applicerbar om insatspersonalen bär impermeabel dräkt eller en dräkt där ytterskiktet är semipermeabelt för att förhindra vätskegenomgång. I detta fall begjuts utsidan med vatten som får dunsta och därmed kyla kroppen. Nackdelen är densamma som för isvästen genom att kylvatten kommer en bit ifrån huden. Arean på den vatta ytan kan å andra sidan göras större än med västen. Likaså är logistiken mindre krävande eftersom det bara krävs vattendusch. Att kyla från utsidan är alltså mindre effektiv för kompensation av den värme som kroppen genererar. Däremot är tekniken mycket lämplig för att minska effekten av instrålad värme utifrån, den från exempelvis öppen eld eller solinstrålning. När totala verkningsgraden ska beräknas på en dräkt med kylutrustning måste det beaktas den extra termiska isolationen och ångmotståndet som en kylutrustning introducerar. Speciellt om skyddsdräkten är permeabel så medför det extra lagret som innehåller is, kylslingor etc. att dunstningen av svett genom detta lager förhindras helt eller delvis. För att optimera nyttan av mikroklimatkonditionering bör fysiologin tas i beaktande. Det kan ske genom att exempelvis inte kyla alltför mycket lokalt eftersom det minskar svettproduktionen som ändå är nödvändig eftersom tekniken bara är till för att stötta kroppens vanliga värmeavgivningsvägar. En uppskattning har gjorts av hur stora kyleffekter som kan uppnås med skilda tekniker⁵⁸. Västar som nyttjar smältande is eller fasändrande salter kan maximalt leverera en kyleffekt av upp till ca 140 W under några timmar. Vätskekyllning baserad på smältande is kan leverera upptill ca 200 W under några timmar medan samma teknik som baseras på kontinuerlig kylning har en funktionstid som bestäms av tillgång på yttre kraft. Ventilation med komprimerad luft som expanderar kan kyla med upp till 350 W under ”obegränsad” tid. Men den sammantagna nyttan bestäms av hur rörlig individen behöver vara och hur tung den burna utrustningen är. Eftersom verkningsgraden hos

⁵⁷ Reffeltrath, P. A., van Gent, R., den Hartog, E. A., Tan, K. och H.A.M. Daanen. Individual cooling strategies under NBC protective clothing – Tests carried out at TNO. In: Operational requirements an evaluation of state-of-the-art CBRN equipment for EU First Responders, IMPACT, EU security research, 2006.

⁵⁸ Laprise, B., Teal, W., Zuckerman, L. och Cardinal, J. Evaluation of commercial off-the-shelf and governmental off-the-shelf microclimate cooling systems. Natick/TR 05/019, 2005.

människan vid fotmarsch är ca 12 % kommer varje ökning av arbetstyngden som härrör till kylutrustning direkt reducera den effektiva kyleffekt som kan nyttiggöras. Ovan nämnda kyleffektvärden kan jämföras med den sänkning av värmeutvecklingen med cirka 40 W som sker om farten minskar med 0,1 m/s (35 kg börda på hård grusväg).

8 Appendix D (Skattning av värmelagring i fält)

I flertalet soldatmoderniseringsprogram ingår en önskan att kunna diagnostisera soldaten med avseende på fysisk och mental belastning och utifrån svaren besluta om olika åtgärder och/eller ändrat uppträdande⁵⁹. Ett sätt vore att förse soldaten med skilda sensorer som mäter och rapporterar om relevanta fysiska och fysiologiska variabler. En tillämpning kan vara specialförbandsinsats i krävande miljö där till exempel värmeutmattning skulle kunna innebära stor risk för att uppdraget misslyckas. Soldaterna kan behöva övervaka(s) så att de inte arbetar för länge eller för hårt. Ett sådant system skulle kunna innehålla ett positionerings- och navigeringssystem med digitalt kartstöd. GPS, helst stöttat av tröghetsnavigering möjliggör detta. Risken för värmepåverkan kan kvantifieras utifrån kunskap om värmeproduktion, hjärtfrekvens och kroppstemperatur. Dessutom behövs kunskap om individens arbetskapacitet, maximal puls. En sådan databas är sannolikt inte tänkbar för markstrids soldater i allmänhet men kan kanske accepteras för specialförband. För den "vanlige" soldaten kan ett enklare monitoreringssystem, som bara loggar fart och terrängens lutning tillsammans med en uppsättning TpC-data, ge tillräcklig information om hur stor risken är för överhettning vid bibehållen fart och hur mycket den behöver ändras för att eliminera risken. Ett sådant system skulle även kunna tipsa om hur mycket vätska som bör drickas för att minska risken för uttorkning eller vätskerelaterad prestationsförlust. Problemet är att få systemet att veta vilken TpC som gäller. Manuellt inlagda data är sannolikt inte funktionellt och data lästa ur kartunderlaget är sannolikt inte tillräckligt. Metod som baseras på kroppens acceleration skulle kunna utvecklas för indikering av TpC. Ett sådant arbete har påbörjats.



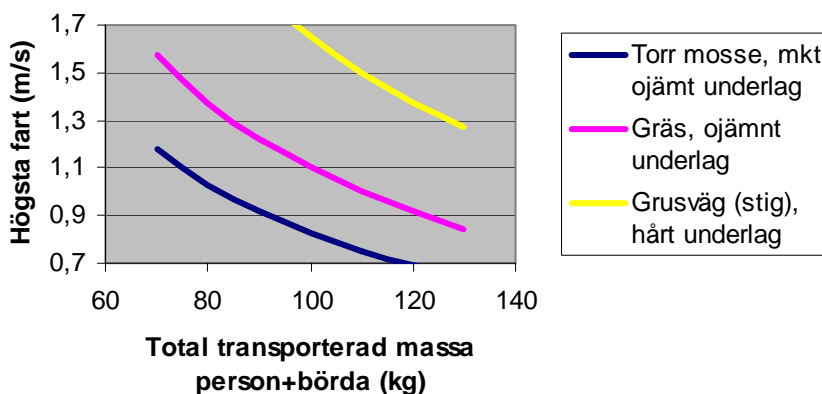
Bild D1. Klocka med inbyggd GPS som också visar spåret, dock utan kartstöd. Klockan loggar hjärtfrekvensen från ett pulssändarband.

⁵⁹ Danielsson, U. "Soldier modernisation". FOA-R—99-01293-720—SE, december 1999.

9 Appendix E (Konvertering till annan fart, massa och/eller underlag)

För givet klimat och burens utrustning är det arbetsintensiteten som avgör om värmelagringen ska överskrida en viss risknivå. Enligt Resultat (fältförsök) så är den transportkostnaden, TpC , relativt okänslig för ändringar i fart och burens massa. Det innebär att de simuleringsberäkningar som är genomförda, och som är baserade på viss fart, börda och underlag, även kan fås giltiga för andra värmealstrande kombinationer. I figurerna nedan kan avläsas hur mycket t.ex. farten kan/måste justeras om andra bördor eller underlag är rådande. Figuren E1 gäller för de simuleringsberäkningar där acceptabel förflyttningsfart var 1,5 m/s. Om simuleringen visade att den farten, på underlaget plan, hård grusväg, och bördan 35 kg (personvikt 75 kg) ($3,9 \cdot 110 \cdot 1,5 = 644W$) kunde genomföras utan risk för att överskrida gränsvärdeskurvan kan vissa andra kombinationer av fart, underlag och/eller börda väljas utan att risken ökar bara ($TpC \cdot m \cdot v$ ger ungefär samma effektvärde). Figur 2 visar exempelvis att förflyttningen kunde genomföras den 15 september i Stockholm utan risk för värmeproblem. Men om förflyttningen planeras ske, inte på hård grusväg utan på ojämnt gräsunderlag kan fotmarschen ändå genomföras om farten minskas till 1,0 m/s om börda fortfarande är 35 kg (figur E1) enligt ($5,9 \cdot 110 \cdot 1,0 = 649W$). Om bördan dessutom lättas till 17 kg kan farten ökas till 1,2 m/s med bibehållen risknivå ($5,9 \cdot 92 \cdot 1,2 = 651W$).

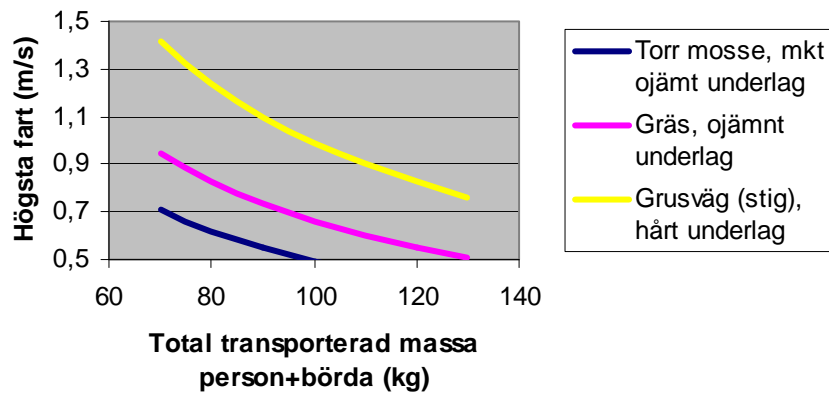
Relation mellan fart, massa och underlag i de fall farten 1,5 m/s ej ger överhettning



Figur E1. Relation mellan fart, totalmassa och underlag i de fall 1,5 m/s på grusväg inte ger överhettning.

På samma sätt kan figur E2 nyttjas om farten 0,9 m/s var acceptabel. Exempelvis figur 11 visar att i Kinshasa (DR Congo) kan förflyttningen ske med farten 0,9 m/s på hård grusväg utan värmeproblem i mitten av maj månad ($3,9 \cdot 110 \cdot 0,9 = 386 \text{ W}$). Men om underlaget vore gräs och dessutom ojämnt måste farten reduceras. Dock om personen bara väger 70 kg och bördan 15 kg behöver farten inte minskas mer än till knappt 0,8 m/s ($5,9 \cdot 85 \cdot 0,8 = 401 \text{ W}$).

Relation mellan fart, massa och underlag i de fall farten 0,9 m/s ej ger överhettning



Figur E2. Relation mellan fart, totalmassa och underlag i de fall 0,9 m/s på grusväg inte ger överhettning.