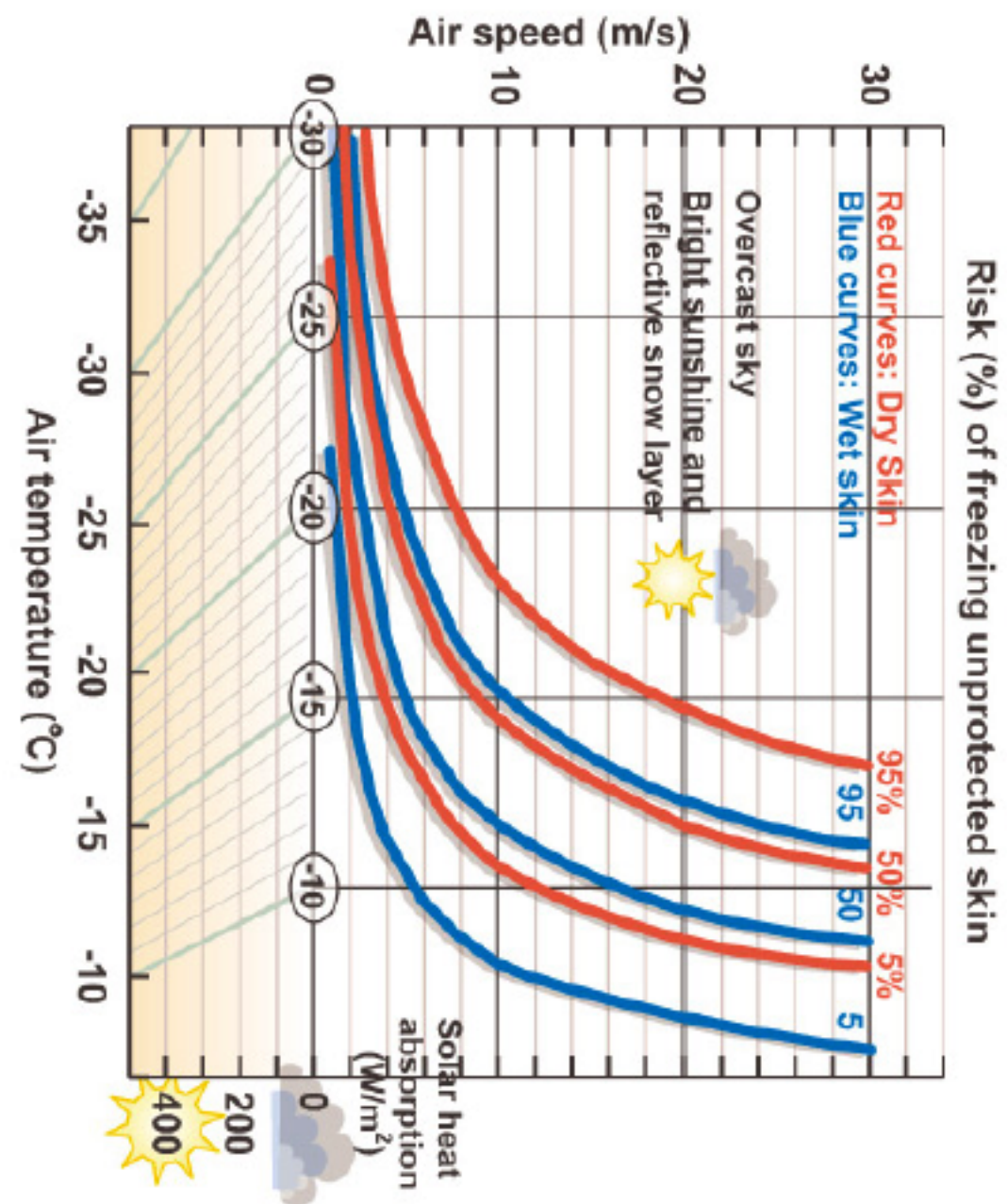


Ulf Danielsson

## VINDKYLA OCH RISKEN ATT FÖRFRYSA OSKYDDAD HUD



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

NBC-skydd  
901 82 Umeå

FOI-R--0405--SE

Mars 2002

ISSN 1650-1942

**Användarrapport**

Ulf Danielsson

# VINDKYLA OCH RISKEN ATT FÖRFRYSA OSKYDDAD HUD

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                      |                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Utgivare<br>Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI<br>NBC-skydd<br>901 82 Umeå                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Rapportnummer, ISRN<br>FOI-R--0405--SE               | Klassificering<br>Användarrapport |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Forskningsområde<br>8. Människan i totalförsvaret    |                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Månad, år<br>Mars 2002                               | Projektnummer<br>EF 024           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Verksamhetsgren<br>5. Uppdragsfinansierad verksamhet |                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Delområde<br>81 MSI med fysiologi                    |                                   |
| Författare/redaktör<br>Ulf Danielsson                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Projektledare<br>Ulf Danielsson                      |                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Godkänd av                                           |                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Uppdragsgivare/kundbeteckning<br>FM                  |                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig            |                                   |
| Rapportens titel<br>VINDKYLA OCH RISKEN ATT FÖRFRYSA OSKYDDAD HUD                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                      |                                   |
| Sammanfattning (högst 200 ord)<br>Låga temperaturer och vind innebär ökad risk för förfrysning av hud som exponeras. Sådana skador kan medföra avsevärd förlust av tjänstgöringstid och kan också kräva lång medicinsk behandling. Kalla klimat kan förväntas i många områden där konflikter kräver militär närvaro. Därför är det värdefullt om det finns metoder att förutsäga risken för förfrysning av huden för att minska risken för köldrelaterade skador. Siple och Passel (1945) utsatte naken hud för olika klimat och iakttog vid vilka kombinationer av temperatur och vind som orsakade förfrysning. Dessutom genomförde de avkylningsförsök med vattenfylld cylinder ur vilka de kunde härleda sitt vindkyle-index (WCI). De rapporterade att ökad risk för förfrysning förekom vid WCI högre än 1400 [kcal/m <sup>2</sup> •h)]. Förfrysning av fingrar rapporterades dock även vid avsevärt lägre WCI än 1400. Under dessa tillfällen var det dock snöyra eller att huden var våt. En annan faktor av betydelse för frysrisk är förekomst av solsken. Det har iakttagits att förfrysning av hud sällan sker i samband med intensiv solbelysning trots höga WCI-tal. Även om vindkyle-indexet är spritt i många länder så har dess grund ifrågasatts gång på gång. WCI har analyserats och befunnits beskriva den konvektiva värmetransporten felaktigt. Baserad på en korrigerad värmeöverföringsmodell samt analys av fingerförfrysningsdata presenterade i litteraturen så har det visats att frekvensen av hudförfrysning är linjärt kopplad till hudyttemperaturen. Ur dessa samband har riskkurvor utvecklats som förutsäger rimligt väl både risken att förfrysa fingrar under kontrollerade förhållanden som skadefrekvensen bland soldater under övningar och vistelse i fält. Riskkurvor har utvecklats vidare och tar nu hänsyn till såväl solinstrålning som väta på huden. Betydelsen av akklimatisering uttryckt som tid tillbringad i kallt klimat kan också inkluderas i skattningen av risken att förfrysa oskyddad hud. |                                                      |                                   |
| Nyckelord<br>Vindkyla, konvektion, dunstning, solinstrålning, anpassning, risknomogram                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                      |                                   |
| Övriga bibliografiska uppgifter                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Språk Svenska                                        |                                   |
| ISSN 1650-1942                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Antal sidor: 29 s.                                   |                                   |
| Distribution enligt missiv                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Pris: Enligt prislista                               |                                   |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                         |                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Issuing organization</b><br>FOI – Swedish Defence Research Agency<br>NBC Defence<br>SE-901 82 Umeå                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Report number, ISRN</b><br>FOI-R--0405--SE           | <b>Report type</b><br>User report |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Research area code</b><br>8. Human Systems           |                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Month year</b><br>March 2002                         | <b>Project no.</b><br>EF 024      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Customers code</b><br>5. Commissioned Research       |                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Sub area code</b><br>81 Human Factors and Physiology |                                   |
| <b>Author/s (editor/s)</b><br>Ulf Danielsson                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>Project manager</b><br>Ulf Danielsson                |                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Approved by</b>                                      |                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Sponsoring agency</b><br>Swedish Armed Forces        |                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Scientifically and technically responsible</b>       |                                   |
| <b>Report title (In translation)</b><br>WINDCHILL AND THE RISK OF FREEZING UNPROTECTED SKIN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                         |                                   |
| <b>Abstract (not more than 200 words)</b><br><p>Low air temperatures and high winds are associated with an increased risk of freezing exposed skin. Such injuries may result in extensive loss of duty-time and can also require long medical treatment. Cold weather can be expected in many regions where conflicts demand military presence. Hence, tools for predicting the risk of skin frostbite is helpful in order to reduce cold weather casualties. Siple and Passel (1945) exposed bare skin to different climates and observed at what combinations of air speed and temperature skin freezing occurred. In addition, they performed cooling experiments on a water-filled cylinder from which they derived the wind chill index (WCI). They reported that an increased risk of frostbite was prevalent at a WCI above 1400 [kcal/(m<sup>2</sup>•h)]. Finger frostbite at considerably lower WCI values than 1400 has also been reported. These exposures were, however associated with snow in the air or with the skin wetted. Another factor of importance is presence of solar radiation. It has been found that frostbite rarely occurs in intense sunshine in spite of high WCI-values. Though the use of the wind chill index has been widely spread, its foundations have been questioned from time to time. WCI has been re-examined and was found not to describe the convective heat transfer correctly. Based on a corrected heat transfer model, an analysis of finger frostbite data, presented in the literature, revealed that the frequency of tissue freezing was related to the skin surface temperature. Risk curves have been developed that predicts reasonably well both the frequency of experimentally developed finger frostbite and casualty rate among soldiers during field exercise. These risk curves have been extended, now also taking into consideration solar radiation and skin wetness. The effect of acclimation, expressed as time stayed in cold regions, can also be included in the prediction of the risk of tissue freezing</p> |                                                         |                                   |
| <b>Keywords</b><br>Windchill, convection, evaporation, solar radiation, adaption, risk nomogram                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                         |                                   |
| <b>Further bibliographic information</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Language</b> Swedish                                 |                                   |
| <b>ISSN</b> 1650-1942                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Pages</b> 29 p.                                      |                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>Price acc. to pricelist</b>                          |                                   |



## Innehåll

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| Sammandrag                                     | 6  |
| Introduktion                                   | 7  |
| Metoder och teknik                             | 9  |
| Värmetransport                                 | 9  |
| Resultat och Diskussion                        | 11 |
| Ingångsdata                                    | 11 |
| Wind-chill index                               | 11 |
| Risken för förfrysning                         | 12 |
| Modellen                                       | 14 |
| Validering                                     | 15 |
| Förfrysning av torr hud                        | 15 |
| Förfrysning av våt hud                         | 16 |
| Solinstrålning                                 | 16 |
| Förfrysning under militära aktiviteter         | 17 |
| Andra faktorer som påverkar förfrysningsrisken | 19 |
| Oskyddad transport                             | 19 |
| Snöskoterkörning och skidåkning                | 19 |
| Fysiska skydd.                                 | 19 |
| Hudkrämer                                      | 19 |
| Mössor och huvor                               | 20 |
| Acklimatisering                                | 21 |
| Värmeinnehåll och CIVD-reaktion                | 21 |
| Slutsats                                       | 22 |
| Litteratur                                     | 24 |
| APPENDIX 1                                     | 26 |
| (forts. av Metoder och Teknik)                 |    |
| Konvektion                                     | 26 |
| Evaporation                                    | 27 |
| Solstrålning                                   | 27 |
| Fysiska skydd                                  | 28 |

Bilder på omslagets fram och baksida: Nils Danielsson

---

## SAMMANDRAG

Det är välbekant att vind ökar risken för förfrysning vid exponering i kallt klimat. Förklaringen är att förhöjd lufthastighet ökar värmetransporthastigheten från kroppen. Den här effekten kvantifierades av Siple och Passel i början av 1940-talet. De mätte den tid som åtgick för att vatten i en behållare skulle frysa till is under skiftande kombinationer av vind och lufttemperatur. Från dessa data utvecklade de ett "windchill index" (WCI) avsett att kunna förutsäga värmetransporten från oskyddade kroppsdelar. Senare utvecklades WCI vidare för att uttryckas som "equivalent temperature" ( $T_e$ ). En genomgång av de data som Siple och Passel baserade sitt index på har visat att WCI och  $T_e$  inte korrekt beskriver vindens inverkan på värmetransporten och därmed inte heller förfrysningsrisken (Danielsson, 1996). Eftersom tabeller baserade på WCI och  $T_e$  ofta används för att beskriva risken vid givet kallt klimat så borde dessa index korrigeras. En annan nackdel med dessa är att viktiga faktorer för förutsägelse av vindkyla är begränsad till lufthastighet och temperatur. En tidigare presenterad riskmodell för förfrysning av naken hud (Danielsson, 1996) har vidareutvecklats och tillåter nu simulering av effekten av våt hud och solinstrålning på förfrysningsrisken. Modellen föreslår att risken för förfrysning av fingrar ökar från 30% till 70% om huden våts när lufthastigheten och temperaturen är 6,8 m/s respektive  $-15^{\circ}\text{C}$ . Den här förutsägelsen stämmer väl med experimentella data presenterad i litteraturen. Det är en allmänt accepterad åsikt att förfrysningsskador på naken hud är ovanliga i Antarktis under sommarhalvåret. Uppskattningsvis motsvarar solinstrålningen mellan  $5^{\circ}\text{C}$  och  $10^{\circ}\text{C}$  högre lufttemperatur. Dessa värden är jämförbara med de som föreslås av modellen vid de solintensiteter som är vanliga under sommaren i Antarktis. En annan åsikt är att vistelse i regioner med kallt klimat minskar risken för förfrysning påtagligt. Den här adaptationen har setts minska frekvensen av förfrysning av fingrar, från 74% till 29%, när förstaårs expeditionsdeltagare jämförts med dem som varit på plats två år eller mer. En sådan anpassning innebär att individen kan exponeras för dubbelt så hög lufthastighet eller 2 till  $5^{\circ}\text{C}$  lägre lufttemperatur med oförändrad risk för förfrysning. Riskmodellens förutsägelser har också jämförts med frekvensen av köldrelaterade skador hos amerikanska soldater placerade i Alaska. Jämförelsen visade att den "ekvivalenta temperaturen" ( $T_e$ ), som sammanföll med den största riskökningen för förfrysning vid vindkyla, samvarierade väl med ökad risk för förfrysning enligt riskmodellen, medan de vanligtvis använda vindkyltabellerna tycks ha underskattat risken. Slutligen diskuteras ändring i förfrysningsrisk som följer av ändrad central kroppstemperatur och också om kroppens fysiologiska försvar (CIVD) inte fungerar adekvat. Det poängteras att om CIVD inte fungerar så ökar risken betydligt om inte kroppen har ett stort överskott av värme som följd av t.ex. tungt fysiskt arbete. Betydelsen av olika typer av huvudbonader och nyttjande av hudkräm för risken att förfrysa ansiktet värderas och kopplingar görs till förfrysningsmodellen. Hudkrämer minskar inte risken. Denna kan till och med öka om hudkrämen orsakar vätnings av huden med påföljande ökning av värmeförlusten. Bruket av huva över välisolerande mössa skapar ett gynnsammare klimat närmast ansiktet och om huvan kompletteras med ansiktsmask eller skidglasögon så kan mycket sträng vindkyla klaras utan förfrysning.

## INTRODUKTION

Låg lufttemperatur och höga vindhastigheter ökar risken att förfrysa huden. För svenska försvarsmakten rapporterades knappt 800 kylskador under åren mellan 1995 och 1999. Den dominerande delen av skadorna drabbade fötter och händer men var inte direkt kopplade till vindkyla även om vindkyla ökar risken för förfrysning av dessa delar. Knappt 20% av samtliga skador (27 individer per år) kan betecknas som vindkylskador där oskyddad hud, företrädesvis ansiktet, har samtidigt exponerats för låga temperaturer och vind. En mindre del av dessa har dessutom varit utsatta för väta. Motsvarande data från finska försvarsmakten (Lehmuskallio, 2000) pekar på högre frekvens av vindkylskador. Under åren 1976 till 1989 drabbades cirka 70 individer per år av sådana skador. Det motsvarar 44% av samtliga förfrysningsfall. Statistiken över förfrysningsskador hos amerikanska soldater som tjänstgjort i Alaska pekar på liknande skadefrekvens (Candler och Ivey, 1997). Omkring 40% av samtliga förfrysningsfall var relaterade till skador på ansiktet orsakat av vindkyla. Förklaringen till att vindkyla förorsakar procentuellt färre skador i Sverige än i de andra länderna är inte uppenbar. Diagnosmetoder och rapporteringsrutiner spelar roll. Den svenska kylskadestatistiken kan ha vissa brister eftersom den inte är lika specifik som den från Finland och USA. Klimatet i Sverige och Finland är jämförbart och bör därför inte vara en förklaring även om statistiken inte härrör till samma årtal. Det är inte troligt att vi har bättre kunskap eller skydd mot vindkyla som därigenom skulle ge oss en mer gynnsam situation. Mer bekymmersamt vore det om den lägre procentsatsen beror på att vi har sämre sko- och handskbeklädnad och som därigenom givit, relativt sett, fler skadefall. Detta är dock inte studerat.

Förfrysningsskador kan medföra avsevärd förlust i tjänstgöringstid och kan också kräva långvarig medicinsk behandling. Därför finns det behov av att kunna förutsäga risken för förfrysning av huden för att minska den köldrelaterade skadefrekvensen. Behovet är inte nytt, och framförallt militära aktiviteter har under alla tider varit förknippade med olika typer och grader av kylskador. För att i någon mån kunna kvantifiera risken för förfrysningsskador utsatte Siple och Passel (1945) naken hud för olika kombinationer av lufthastighet och temperatur för att kunna observera vid vilka klimat som huden frös. Dessutom genomförde de avkylningsförsök på vattenfyllda cylindrar. Ur dessa försök utvecklade de det så kallade vindkylindexet (WCI) där

$$WCI = 1,162 \cdot (10,45 + 10 \cdot v^{0,5} - v) \cdot (33 - T_a) \quad (W \cdot m^{-2})$$

och där  $v$  är lufthastighet (m/s) och  $T_a$  (°C) är omgivningstemperaturen. De rapporterade att en ökad risk för förfrysning sammanföll med ett WCI som överskred 1400 ( $kcal \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ). Dock har förfrysning av fingrar rapporterats även vid avsevärt lägre WCI än 1400. Dessa exponeringstillfällen har emellertid varit förknippade med snö i luften eller då huden varit våt. Ytterligare faktorer som är av betydelse är förekomst av solinstrålning och tid tillbringad i kalla regioner. Användningen av vindkylindex är och har varit spridd över många länder med kallt klimat men riktigheten av vindkylindexets bakgrund, och tolkningen av indexet, har ifrågasatts från tid till tid. Undersökningar som genomförts i Kanada (Maarouf och Bitzos, 2000) har visat att kunskapen om vindkyla variera påtagligt från region till region och mellan olika grupper av människor. Genomgående har vindkylindexet, uttryckt som ekvivalent temperatur ( $T_e$ ), föredragits framför WCI uttryckt i  $W/m^2$  eller utan enhet. Ändå visade undersökningen med all tydlighet att människor i allmänhet inte förstår vindkylindexets betydelse eller att det skapade förvirring delvis beroende på den enhet som användes. Utbildning som ger kunskaper



om WCI anses därför som en verklig utmaning (Maarouf och Bitzos, 2000). Olika "ekvivalenta temperaturer" ( $T_e$ ) har härletts under något skilda förutsättningar (11)

$$T_e = 33 - WCI / [1,162 \cdot (10,45 + 10 \cdot v_{ref}^{0,5} - v_{ref})] \quad (^\circ\text{C})$$

där WCI är vindkylindexet och  $v_{ref}$  är referenshastigheten hos luften. Den vanligaste använda  $T_e$  härrör från Siple och Passel (1945) där  $T_e$  beräknas baserat på en referenshastighet, oftast 6 (1,7 m/s) eller 8 km/h (2,2 m/s). Denna skenbart lilla skillnaden ger dock upphov till en skillnad på 5°C i  $T_e$ , en skillnad, som om den vore faktisk, skulle kunna medföra avsevärt ändrad köldexponering. Om  $T_e$  bara används som en indikator på köldstressen så kan det eventuellt accepteras. Men  $T_e$ -tabellerna är ofta indelade i riskzoner benämnda "låg risk", "ökande risk" och "stor risk", zoner där en skillnad på 5°C kan betyda allt från en "säker" exponeringstid på timmar ned till 1 minut. En person som förbereder fältaktiviteter i kallt klimat skulle sannolikt föredra en mer informativ risktabell som också inkluderade andra riskfaktorer som påverkar risken för skada på grund av vindkyla.

Även om både WCI och den härledda  $T_e$  är populära och frekvent använda så innehåller dessa vissa brister. En av dessa är att den konvektiva värmetransportkoefficienten är felaktig genom att den inte rätt tar hänsyn till bidraget från vind vid högre lufthastigheter. Andra nackdelar är att WCI varken är baserat på människans fysiologi eller hennes kroppsdimensioner. WCI är inte heller lämplig för riskbedömning som inkluderar andra faktorer som solinstrålning, våt hud, akklimatisering med mera. Hitintills har till exempel solinstrålning beaktats bara genom att introducera en korrektionsfaktor i form av höjning av  $T_e$ -temperaturen. Ett sådant tillvägagångssätt är i princip inte tillrådligt eftersom det döljer de faktorer som är styrande för risken för förfrysning.

Syftet med det här arbetet var därför att förbättra en tidigare vindkylmodell som skattar risken för förfrysning (Danielsson, 1996) av naken hud genom att inkludera effekten av våt hud och solinstrålning. (Observera att risken för s.k. KFI-skador inte berörs). Den nya modellen är baserad på allmängiltiga fysikaliska relationer som beskriver värmeflödet och temperaturfördelningen från hudytan till omgivningen. Den fysikaliska modellen sammankopplas med en riskmodell som baseras på data från humanförsök tagna ur litteraturen. Förteckningen nedan visar vilka komponenter i de olika modellerna som ingår explicit (X), implicit (Y) och som diskuteras kvalitativt eller kvantitativt (Z) avseende effekt på förfrysningsrisken.

|                       | Wind-chill tabell<br>(Siple and Passel-45) | Risknomogram<br>(Danielsson-96) | Ny modell |
|-----------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|-----------|
| Lufttemperatur        | X                                          | X                               | X         |
| Lufthastighet         | X                                          | X                               | X         |
| Solinstrålning        |                                            |                                 | X         |
| Fuktig hud            |                                            |                                 | X         |
| Kroppsdelens diameter |                                            | Y                               | Y         |
| Akklimatisering       |                                            | Z                               | Z         |
| Fysiska skydd         |                                            |                                 | Z         |
| Kroppstemperatur      |                                            |                                 | Z         |

## **METODER och TEKNIKER**

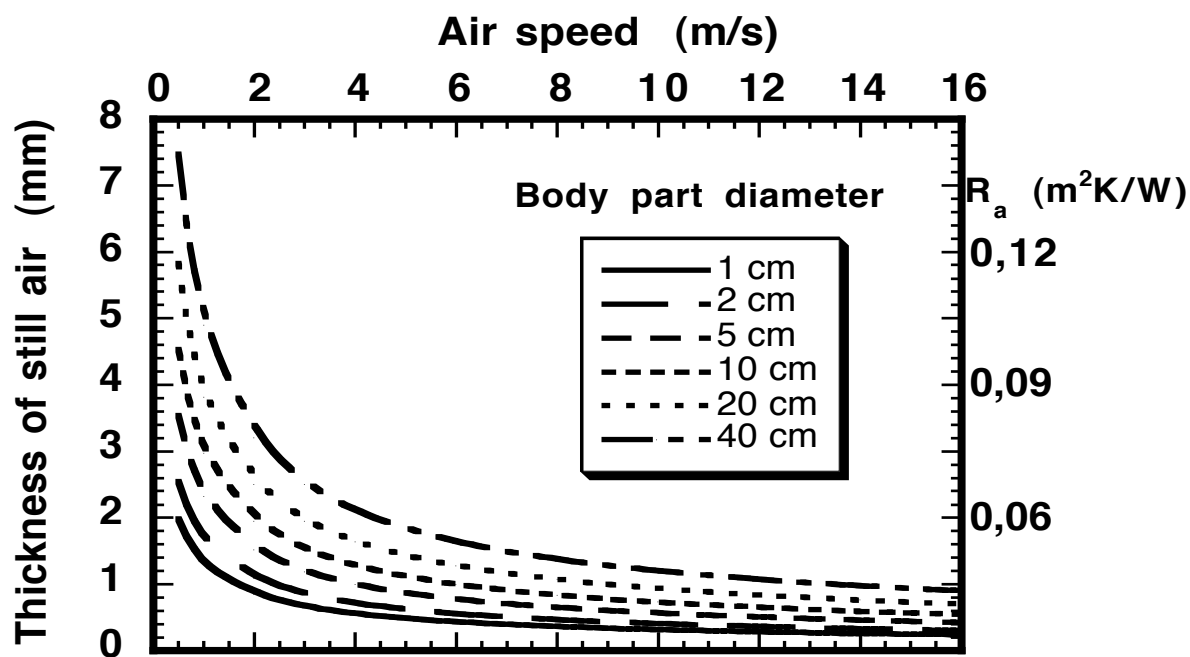
(mer ingående, se APPENDIX 1)

### **Värmetransport**

Hudtemperaturen är huvudsakligen ett resultat av två faktorer, värmeförlusten till omgivningen och värmeinflödet från blodet. En i kyla sjunkande hudtemperatur kan motverkas om den fysiologiska reaktionen CIVD (cold-induced vasodilation eller köldpåverkad kärlutvidgning) öppnar blodkärlen så att mer varmt blod kan nå huden. Värmetillförselkapaciteten hos blodflödet i fingrarna är så stor att de flesta, även extrema vindkylsituationer, kan motverkas om CIVD aktiveras i tid. Men ett hudblodflöde är omöjlig om blodet är fruset, en situation som inträffar när blodtemperaturen är lägre än  $-1^{\circ}\text{C}$  (Keating och Cannon, 1960). Så, för en given CIVD reaktionstid är värmeinflödes hastigheten från huden avgörande för om huden kommer att frysa eller inte.

Innan CIVD aktiverats är värmeproduktionen och blodets värmetransport till huden normalt så låg att temperaturförändringen i huden huvudsakligen beror på värmeinnehållet i den aktuella kroppsdelens och värmetransporten från huden till omgivningen. Den här fysikaliska processen drivs av temperaturskillnaden mellan hud och omgivning. Värmemotståndet i huden, från den nivå där den största koncentrationen av de ytliga hudblodkärlen finns och utåt, utgörs av isolationen hos läderhud och överhud. Men mer betydelsefullt för värmetransporthastigheten är isolationen hos det skenbart stillastående luftlagret som omger kroppsdelens. Tjockleken på det här lagret beror på luftflödet och ytans struktur. Ett textillager eller till och med skäggstubb förbättrar tjockleken avsevärt och reducerar därmed värmeförlusten från huden i motsvarande grad. Därav krävs lägre hudblodflöde för att exempelvis minska risken för förfrysning.

Luftlagrets tjocklek har även betydelse för hur stor avkylningen ska bli vid dunstning av fukt från hudytan. Det är känt att risken för förfrysning ökar om huden är fuktig och samtidigt utsätts för vind och låga temperaturer. Om dunstningen kan förhindras påverkas risken bara marginellt medan en hög dunstningshastighet kan ge stor risk. Dunstningen sker genom det stillastående luftlagret. Om det är tunt, vilket följer av vind, ökar avkylningshastigheten medan det motsatta sker vid tjockt luftlager. Följdaktigen minskar dunstningshastigheten om den fuktiga huden täcks av ett tyglager, t.ex. en balaclava. Användandet av hudkräm för att minska risken för förfrysning kan ha motsatt effekt. Orsaken är att vissa salvor innehåller vatten som därmed dunstar från hud(salv)ytan vilket ökar värmetransporten från huden. Om salvan är vattenfri finns risk att fukt samlas mellan hud och salva varvid hudens yttre lager tar upp fukten och därmed minskar i isolation.



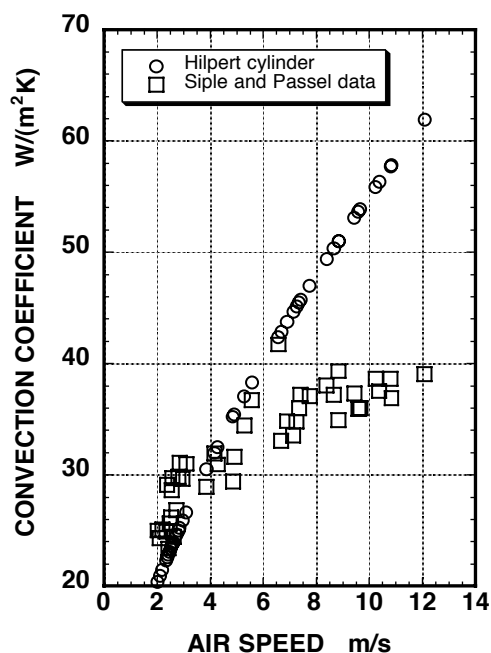
Figur 1. Tjockleken på det skenbart stillastående luftlagret (mm) som omger en approximativt cirkulär kroppsdel utsatt för vind vinkelrätt mot kroppsdelens längdriktning. Luftlagrets isolationsvärde har också givits enheten ( $m^2K/W$ ) i figuren, en enhet där strålningskoefficienten också ingår.

## RESULTAT och DISKUSSION

### Ingångsdata

Den fysikaliska modellen möjliggör beräkning av temperaturgradient och värmefflux om randvillkoren är kända. Modellen är inte begränsad med avseende på värmetransportmekanismer. Därför finns även möjlighet att nyttja modellen för beräkning av risken för brännskada. Oberoende av syfte så behöver modellen information om hur den mänskliga kroppen reagerar på olika temperaturstimuli. Tekniken som används här är att kombinera den fysikaliska hud-omgivningsmodellen med den fördelning av risk för förfrysning som följer av olika temperaturer på hudytan, data som kommer från humanförsök och är beskrivna i den vetenskapliga litteraturen.

*Wind-chill index.* Siple och Passel-studien (1945) inkluderade till en början inte humandata. Deras experimentserie fokuserade på avkylningshastigheten hos en vattenfylld cylinder. De mätte hur lång tid det tog för vattnet att frysa vid olika kombinationer av lufthastighet och temperatur. Från dessa data beräknade de värmeffluxen ( $W/m^2$ ) från cylindern. Men vid omvandling från värmefflux till "vindkylindex" (konvektiv värmetransportkoefficient) infördes ett fel som fortfarande ingår i samtliga WCI och  $T_e$ -värden. Siple och Passel räknade inte med cylinderväggens isolation. Följdaktligen blev deras konvektionskoefficient inkorrekt och relationen mellan lufthastighet konvektiv koefficient skiljer sig markant från det allmänt vedertagna för cylindrar i "tvärvind" (figur 2). Därför baseras WCI och  $T_e$ -värdena på en konvektiv koefficient som är kraftigt underskattad vid vindhastigheter högre än 4 till 5 m/s (Danielsson, 1996).

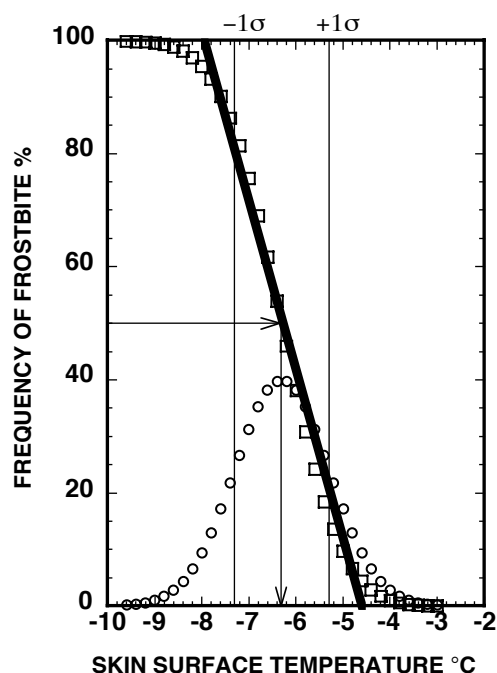


Figur 2. Jämförelse mellan konvektionskoefficienten för en cylinder(fyrkant) enligt Siple och Passel (14) jämfört med den sanna (cirkel) (7) vid vind tvärs en cylinders längdaxel med diametern 6 cm.

*Risken för förfrysning.* Siple och Passel (1945) införde en fysiologisk faktor genom att exponera sig själva och kollegor för olika klimat och registrera vid vilken temperatur och vind som huden i ansiktet frös ("nip"), indikerad av en distinkt smärtupplevelse. Vindkyindexet beräknades från vindkylfaktorn genom att anta en hudtemperatur av  $+33^{\circ}\text{C}$ . Med en ofysiologisk hudtemperatur och en fysikalisk felaktig konvektiv koefficient fann Siple och Passel att förfrysning av huden sällan skedde vid ett vindkyindex lägre än 1400 ( $\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ). De identifierade även två andra nivåer motsvarande  $\text{WCI} = 2000$  respektive 2300. Olika nivåer av köldexponeringen uttryckte Siple och Passel som "relativa graden av mänsklig komfort".  $\text{WCI}=1400$  verbaliserades som "Frysning av mänsklig hud börjar men med inverkan av aktivitet, solstrålning och hudens blodcirkulation. Resa och uppehåll i tillfälliga skydd blir obehagliga".  $\text{WCI}=2000$  uttrycktes som "Villkoren för resa och vistelse i tillfälliga skydd är farliga. Exponerad yta av ansiktet fryser inom mindre än 1 minut för den genomsnittlige individen" medan  $\text{WCI}=2300$  benämndes som "De delar av ansiktet som exponeras kommer att frysa inom kortare tid än 30 sekunder för den genomsnittlige individen". Dessa karakteriseringar är fortfarande i bruk vid användning av de vitt spridda  $\text{WCI} / T_e$ -tabellerna.

Åren omkring 1970 gjorde Wilson och Goldman förfrysningsexperiment på fingrar. De fann närapå inga förfrysningar vid  $\text{WCI}$ -index lägre än 1400; värden högre än detta index var ofta men inte alltid sammankopplade med förfrysning av hud. Dessa resultat bekräftar att  $\text{WCI}=1400$  är en rimligt bra indikator på de lufttemperaturer och hastigheter som kan orsaka förfrysning av bar hud, detta trots de inbyggda felaktigheterna. Men Wilson och Goldman mätte en avsevärd variation i hudtemperatur när frysningen inträffade. Dessutom avvek deras temperaturvärden, då vävnad fryser, avsevärt från de som hade uppmätts av Keating och Cannon (1960) vilka föreslog att frysning sker vid cirka  $-1^{\circ}\text{C}$ . Wilson och Goldman (1970) och Wilson et al (1976) fann att huden började frysa vid en ytemperatur på cirka  $-13^{\circ}\text{C}$  respektive  $-9^{\circ}\text{C}$ . Men enligt Danielsson (1996) är dessa värden 3 till  $4^{\circ}\text{C}$  för låga på grund av mätfel orsakade av handhavandet av termoelementen. En annan avvikelse är att Keating och Cannon mätte hudtemperaturen i ett snitt i läderhuden och med fingret kylt i förväg till låg temperatur. I de andras studier mättes temperaturen på fingrets hudyta med ett termoelement med antagandet att den "sanna" temperaturen erhöles. En sådan procedur introducerar emellertid samma typ av fel som det som infördes i Siple och Passels  $\text{WCI}$ -faktor.

Baserat på antagandet att huden, i skiktet mellan läderhud och underhud, börjar att frysa vid  $-1^{\circ}\text{C}$  erhålls hudyttemperaturer från den fysikaliska modellen som är mycket nära de som uppmättes av Wilson och Goldman (1970) efter att deras värden hade korrigerats för ovan nämnda fel. De beräknade (och korrigerade) hudyttemperaturerna befanns vara linjärt relaterade till den frekvens med vilken fingrarna blev frostnypna (Danielsson, 1996). Utifrån resultaten (figur 3) kan antas att risken för förfrysning för de individer som deltog ökade linjärt från 0 till 100% när hudyttemperaturen sjönk från  $-4,6^{\circ}\text{C}$  till  $-8^{\circ}\text{C}$ . Denna relationen har använts som "mänskligt" ankare till den fysikaliska modellen där båda dessa delar genererar en riskmodell för vindkyla. Den vidareutvecklade modellen, som nu också inkluderar kylning på grund av dunstning av vatten och solinstrålning, är baserad på samma relation mellan risknivå och hudyttemperatur. Antagandet har varit att typen av värmetransportmekanism inte är avgörande för uppkomsten av hudfrysning, viktigt är endast den ytemperatur som uppstår på huden och den därav initierade CIVD-reaktionen.



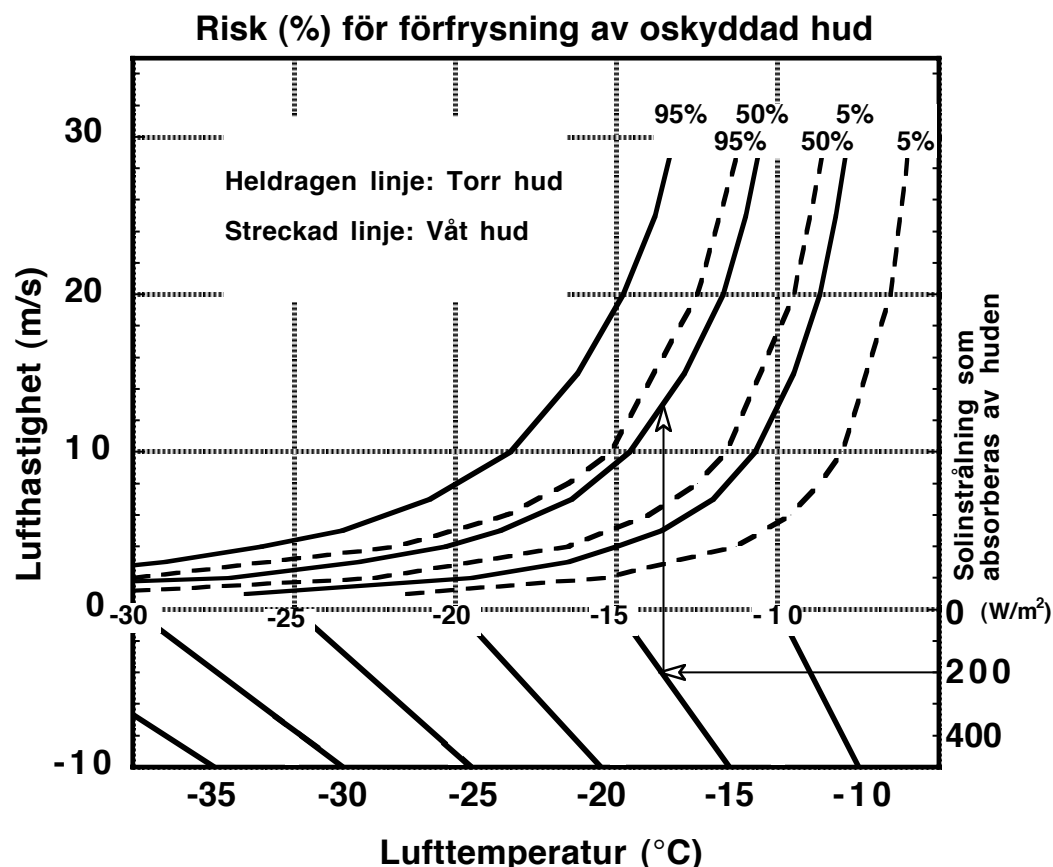
Figur 3. En standard normalfördelningskurva med medelvärdet  $-6,3^{\circ}\text{C}$  och standardavvikelsen ( $\sigma$ )  $1^{\circ}\text{C}$ . Den tillhörande kumulativa fördelningskurvan följer nära sambandet mellan "steady-state"-hudyttemperatur och frekvensen fingerförfrysning. Mellan  $-1\sigma$  och  $+1\sigma$  finns det hudtemperaturområde där 68% av de personer som deltog i studien drabbades av förfrysning.

Från fördelningskurvan erhålls relationen mellan hudens ytemperatur och risken för förfrysning av oskyddad hud. I risknomogrammet används tre risknivåer; 5, 50 och 95%, vilka alltså är kopplade till hudyttemperaturen  $-4,8^{\circ}\text{C}$ ,  $-6,3^{\circ}\text{C}$  respektive  $-7,8^{\circ}\text{C}$ . Det bör poängteras att risken är baserad på en grupp individer som inte är acklimatiserad till kyla. Den risk som utläses i nomogrammet är alltså inte den förfrysningsrisk en individ utsätter sig för utan risken ska utläsas som den fraktion av en köldexponerad grupp förväntas drabbas av förfrysning.

Fig. 4 visar den risk för förfrysning som en grupp av människor, som ej är köldacklimatiserade, utsätts för vid olika kombinationer av lufthastighet, temperatur, solabsorption och torr alternativt våt hud. Riskkurvan för torr hud visar en stark icke-linearitet som speglar luftlagrets tjocklek och dess beroende av lufthastigheten (jämför med figur 1). Vid låga lufttemperaturer, omkring  $-30^{\circ}\text{C}$ , innebär en ökning av lufthastigheten med cirka 1 m/s att temperaturen måste vara  $5^{\circ}\text{C}$  högre för oförändrad förfrysningsrisk. Vid  $-25^{\circ}\text{C}$  så innebär en liknande temperaturhöjning att 4 m/s högre lufthastighet kan accepteras för oförändrad risk medan vid  $-20^{\circ}\text{C}$  så motsvarar  $5^{\circ}\text{C}$  temperaturhöjning omkring 12 m/s högre lufthastighet för oförändrad risk. Riskkurvorna för våt hud uppvisar liknande former som för torr hud vilket beror på en gemensam mekanism för värme- och masstransport (Lewis, 1922). Kurvorna visar att vid lufttemperaturer omkring  $-10^{\circ}\text{C}$  eller högre så är risken för förfrysning av torr hud liten, en risk som dock kan bli avsevärt högre om huden våts. Stark solsken kombinerad med

kraftig markreflektion minskar påtagligt risken för förfrysning av oskyddad hud. Den solstrålning som absorberas av huden kan uppnå  $1000 \text{ W/m}^2$  eller mer under sommaren på Antarktis. I tempererade klimatzoner är motsvarande absorptionsnivåer avsevärt lägre men  $400\text{-}500 \text{ W/m}^2$  kan sannolikt uppnås en klar dag om marken är täckt av fin nysnö.

## MODELLEN



Figur 4 (Se även omslagets baksida). Risken för förfrysning av en smal kroppsdel (diameter 2 cm) för olika lufthastigheter, lufttemperaturer och grader av solabsorption. Bruksanvisning: Från mängden absorberad solstrålning gå horisontellt till aktuell lufttemperatur. Gå därefter vertikalt till rådande lufthastighet. Uppskatta risken för förfrysning av torr hud genom att läsa av mot de heldragna kurvor. Om huden är våt ska risken avläsas mot de streckade kurvorna. Exempel:  $200 \text{ W/m}^2$  absorberad solstrålning och en lufttemperatur av  $-15^\circ\text{C}$  ger 50% risk för förfrysning om lufthastigheten är 13 m/s och huden är torr (se pilen). Om huden är våt ökar risken till ungefär 90%

Av etiska skäl är det svårt att validera de här presenterade riskkurvorna. De experimentella data som finns, och inte nyttjats för humanmodellen, är starkt begränsade. De empiriska data som eventuellt finns från utomhusvistelse saknar oftast viktiga klimatupplysningar. Data är ofta angivna som tidsmedelvärden och lufthastigheten är ibland kvantifierad som "uppskattad genom erfarenhet" eller erhållen från mätgivare placerade på standardhöjden 10 meter och då ofta på annan plats än där exponeringen skedde. Icke desto mindre finns det vissa outnyttjade data eller erfarenhetsvärden som kan användas för validering av riskkurvorna.

## Validering

**Förfrysning av torr hud.** Tabell 1 visar en jämförelse mellan observerad frekvens av förfrysning baserad på Wilson och medarbetare (1976), tidigare opublicerad data från Wilson och Goldman (1970) och de frekvenser som erhålls ur risknomogrammet. De data som kommer från Wilson och medarbetare (1976) är uppgivna som genomsnittsförfrysningsrisk (45%) på grund av att antalet exponeringar under varje klimatförhållande är okända. Det tycks finnas en relativt god överensstämmelse mellan predikterade och observerade data bortsett från några av de tidigare opublicerade data (1970). Orsaken till avvikelse kan vara att de experimentella förutsättningarna (dessa är okända) inte är jämförbara med dem som riskkurvorna baseras på. En förändring från 0% till 63% observerade förfrysningsfall som resultat av bara 2°C lägre lufttemperatur vid 10 m/s (Wilson och Goldman, 1970) styrker misstanken att andra, okända faktorer har varit rådande. Men det bör också hållas i minnet att de kontrollerade försöken sällan inkluderade mer än 6 eller 7 försökspersoner. Så en "slumpmässig" variation i antalet frostnypna försökspersoner med en individ medför 15 till 20% ändrad risk för förfrysning.

Tabell 1. Jämförelse mellan observerad och avläst (risknomogrammet) frekvensen förfrysningsfall.

\* Medelvärde, \*\*okända försöksvillkor.

| lufttemp/lufthast<br>(°C/m•s <sup>-1</sup> ) | Observerad förfrysnings<br>frekvens (%) | Skattad förfrysnings<br>frekvens (%) | referens                          |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| -15/6,8                                      | 45                                      | 35                                   | Molnar et al. (1973)              |
| -15/6,8                                      | 45*                                     | 30                                   | Wilson et al. (1976)              |
| -15/9                                        | 45*                                     | 50                                   | Wilson et al. (1976)              |
| -15/10                                       | 45*                                     | 55                                   | Wilson et al. (1976)              |
| -12/10                                       | 45*                                     | 20                                   | Wilson et al. (1976)              |
| -13,5/10                                     | 80                                      | 35                                   | Wilson och Goldman (1970)**       |
| -17,5/4,5                                    | 0                                       | 30                                   | Wilson och Goldman (1970)**       |
| -11,5/10                                     | 63                                      | 15                                   | Wilson och Goldman (1970)**       |
| -9,5/10                                      | 0                                       | 0                                    | Wilson och Goldman (1970)**       |
| -14,5/6,5                                    | 46                                      | 30                                   | Hughes (Wilson och Goldman, 1970) |



**Förfrysning av våt hud.** Kontrollerade försök och erfarenhet från utomhusvistelse har visat att våt hud ökar risken för förfrysning. Frysskada vid "låga" WCI-värden har ofta samvarierat med snö i luften orsakad av starka vindar (snöyra börjar vid lufthastigheter högre än 8 till 9 meter per sekund (Liljequist, 1957)). Mekanismen som ligger bakom den ökande risken är inte klarlagd. Men om värmeförlusten från huden är approximativt konstant så faller hudtemperaturen kontinuerligt (laboratorieförhållande). Utomhus så kommer värmeförlusten att variera beroende på gränsskiktets tjocklek vilket i tur beror på faktorer som fysisk aktivitetsgrad, vindriktning, åtgärder vidtagna för att bryta vinden etc. Under sådana dynamiska förhållanden är det möjligt att hudtemperaturen passerar fryspunkten upprepade gånger. Om snö smälter på huden så startar en dunstningsprocess som ökar värmetransporten från huden. Enligt Massey (1959) så domnade huden mycket oftare när det var snö i luften jämfört med snöfria förhållanden. Han fann att vid WCI mellan 800 och 1000 så ökade snöyra frekvensen av domnad hud med en faktor två medan ökningen var sexfaldig vid WCI mellan 1000 och 1200. Förfrysning av hud följer inte nödvändigtvis av att huden domnat, men en ökad förekomst av domnad hud indikerar lägre hudtemperatur, sannolikt på grund av ökad avkylningshastighet.

Men dessa data kan inte användas för validering av risknomogrammets kurvor för våt hud. Molnar och medarbetare (1973) undersökte dock effekten vid kontrollerad hudvättning. De fann att vatten i överhuden orsakade förfrysning av hud i 6 fall av 7 (86%) medan torr hud, i samma klimat, orsakade frysning i 3 fall utav 7 (43%). Dessa resultat erhöles vid lufthastigheten 6,8 m/s och temperaturen -15°C. Riskkurvorna för våt hud pekar på 70% risk för förfrysning av oskyddad hud medan bara 30% av de exponerade individerna bör ha fått frysskada om huden varit torr. Denna studie genomfördes så att huden vättes snabbt (under mindre än 30 sekunder) för att huden skulle ta upp minimalt med vatten. Samma studie avslöjade att frysning sker vid något högre temperatur än när huden är torr. Detta är helt i linje med den fysikaliska hudmodellen. Förklaringen är att vatten i huden sänker hudens värmeisolation. Med oförändrad lufttemperatur, lufthastighet och den temperatur då huden fryser så måste hudens yttemperatur öka då vatten absorberats av överhuden med minskande isolation som följd. Dessa mekanismer och dess effekter på temperaturfördelning och värmefflux kan simuleras. Den nuvarande modellen visar att bidraget från överhuden, när den är torr, till den totala hudisolationen är mycket liten vilket innebär att våt hud endast påverkar förfrysningsrisken försumbart förutsatt att dunstning kan förhindras.

**Solinstrålning.** Solinstrålning minskar risken för förfrysning av oskyddad hud. Detta har konstaterats åtskilliga gånger och beskrivits i litteraturen, huvudsakligen vid rapporter från expeditonsmedlemmar i Antarktis (t.ex. Siple och Passel, 1945). Baserat på värmeöverföringsteorier bör det förväntas att avkylningshastigheten minskar vid tillförsel av värme från en yttre källa och att därmed risken för köldskada minskar. Ändå har den här effekten inte visats explicit under kontrollerade försök. Därför kan risknomogrammet inte valideras strikt i detta avseende. Effekterna enligt nomogrammet kan bara stödjas implicit. Cherenko och Pugh (1961) har beskrivit solinstrålningens bidrag till människans värmebalans. Baserat på observationer från Maudheim på Antarktis gjorda av Liljequist (1956) visade Cherenko och Pugh (1961) att den direkta solinstrålningen en klar dag är omkring 750 W/m<sup>2</sup> när solhöjden är 10° och omkring 1050 W/m<sup>2</sup> vid en solhöjd av 40°. Mer relevant för en person som utför normala aktiviteter utomhus är den solintensitet som faller på en vertikal yta, exempelvis ansiktet. I det fallet är motsvarande värden 175 respektive 750 W/m<sup>2</sup>. Viktigt

är också markreflektionen när underlaget är täckt av fin nysnö. Den indirekta solstrålningen som når en stående människa kan vara av samma storleksordning som den som når henne direkt. Även när himlen är täckt av moln så kan den infallande strålningen vara upp till 60% av den direkta strålningen en klar dag. Detta följer av den kraftiga reflektionen från snön som orsakar multipla reflexioner mellan markytan och molnens undersida. I tempererade klimatzoner är dock reflexionen sällan mer än 25%. Så den totala värmeinstrålning som faller på en vertikal yta, inkluderande reflexionen från himlen, är omkring  $400 \text{ W/m}^2$  vid solhöjden  $10^\circ$  och så mycket som  $1500 \text{ W/m}^2$  vid  $40^\circ$ . Även om ansiktet vänds bort ifrån solen så når fortfarande ungefär hälften av strålning ansiktet. Om man antar att den kortvägiga solstrålningen som når huden absorberas till cirka 65% så är den mängd värme som absorberas av huden från cirka  $150 \text{ W/m}^2$  vid  $10^\circ$  solhöjd och vid frånvaro av direktinstrålning till cirka  $1000 \text{ W/m}^2$  vid  $40^\circ$  solhöjd inkluderande den direkta strålningskomponenten. Sannolikt bör dessa värden reduceras med 50% för tempererade klimatzoner. I Antarktis, vid en lufttemperatur av  $-15^\circ\text{C}$  och vinden  $9 \text{ m/s}$  så föreslår risknomogrammet att förfrysningsrisken är omkring 50% i händelse av ingen solinstrålning. Men om en stående människa exponeras för den solinstrålning som råder vid en solhöjd av  $40^\circ$  så minskar risken till 5% om ingen direktstrålning når ansiktet, exempelvis då solen är i ryggen. Men även om denna kombination av temperatur och vind är ovanlig under den antarktiska sommaren (Wilson 1963) så borde frekvensen av förfrysningar vara låg. Det är också vad erfarenheten har utvisat. Effekten av solinstrålning på upplevd köldförmimmelse har också uttryckts som motsvarande höjning av lufttemperaturen. Subjektiva bedömningar, t.ex. (Cherenko och Pugh, 1961), föreslår att solinstrålningen motsvarar en höjning av lufttemperaturen med 5 till  $10^\circ\text{C}$ . Dessa nivåer sammanfaller väl med de som föreslås i risknomogrammet i samband med klart väder.

**Förfrysning under militära aktiviteter.** En genomgång av fem år av köldrelaterade skador bland amerikanska soldater i Alaska (Candler och Ivey, 1997) visar att nästan 40% av alla skador bestod av frostbitna öron och näsor. Något mer än 50% av skadorna drabbade händer och fötter. En rimlig förväntan är att frekvensen frostnupna öron och näsor borde bero på "vindkylan" medan hand- och fotskadorna borde vara mer kopplade till temperaturen enbart eftersom vindens inverkan på täckta kroppsdelar är mindre. Dock tyder studiens resultat på att den ackumulerade frekvensen av köldskador var väl relaterad till "ekvivalenta temperaturen" ( $T_e$ ) vilket är en "vindkyltemperatur". Chandler och Ivey (1997) fann att det största ökningen av alla skador, från 30% till 80% (ackumulerad skadefrekvens) inträffade inom det ekvivalenta temperaturområdet  $-30^\circ\text{C}$  till  $-40^\circ\text{C}$ . De fann också att mer än 70% av alla skador inträffade vid (ekvivalenta) temperaturer lägre än  $T_e = -29^\circ\text{C}$ . (referenshastighet:  $1,67 \text{ m/s}$ ). Dessa resultat kan, med viss försiktighet, användas för validering av riskmodellen. Om prediktionsförmågan hos risknomogrammet bedöms som acceptabelt både för de laborativa exponeringarna som för de köldrelaterade utomhusskadorna i Alaska bör nomogrammet kunna betraktas som generellt användbart. Detta speciellt som situationerna i Alaska inkluderade mycket skiftande omgivningsförhållanden och (militära) aktiviteter. Tabell 2 visar den traditionellt använda vindkyltabellen (USRIEM, 1992) innehållande "ekvivalenta temperaturer" ( $T_e$ ). Tabell 3 visar liknande vindkyltabell men där  $T_e$ -värden ersatts med riskvärden från nomogrammet (under antagandet att huden är torr och solinstrålningen är försumbar) beräknade för samma lufthastighet och temperatur. De markerade tabellcellerna motsvarar  $T_e$ -värden inom området  $-30^\circ\text{C}$  till  $-40^\circ\text{C}$ . Tabellen är uppdelad i tre zoner med stigande risk uttryckt som "låg risk" (övre vänstra delen), "ökande risk" (mellersta delen) och "stor risk" (nedre högra delen). Riskklassificeringen är gjord av US Army (USRIEM, 1992).

Tabell 2. Wind-chill tabell som visar "ekvivalent temperatur" för olika luftfästigheter ( $v$ ) och temperaturer ( $T_a$ ) baserad på Siple and Passel (1945) och som används i de flesta sammanhang (t.ex. inom svenska försvarsmakten, US Army m. fl.). Enligt USRIEM (1992) betecknas det övre vänstra tabellområdet med "liten risk" ( $<1400 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ), den mellersta med "ökande risk" och den nedre högra delen med "stor risk" ( $>2000 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ). De gråmarkerade cellerna visar "ekvivalenta" temperaturområdet  $-30^\circ\text{C}$  till  $-40^\circ\text{C}$  där största ökningen av skador skedde enligt Candler och Ivey (1997).

| $v \backslash T_a$ | -6,6 | -12,2 | -17,8 | -23,3 | -28,9 | -34,4 | -40 | -45,6 | -51  |
|--------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|------|
| Lugnt              | -7   | -12   | -18   | -23   | -29   | -34   | -40 | -46   | -51  |
| 2,2                | -9   | -15   | -21   | -27   | -33   | -39   | -45 | -51   | -56  |
| 4,5                | -17  | -24   | -31   | -37   | -45   | -51   | -58 | -65   | -72  |
| 6,7                | -21  | -29   | -36   | -44   | -52   | -59   | -67 | -74   | -82  |
| 8,9                | -24  | -32   | -40   | -48   | -57   | -65   | -73 | -81   | -89  |
| 11,1               | -27  | -35   | -43   | -52   | -60   | -68   | -77 | -85   | -93  |
| 13,4               | -28  | -37   | -46   | -54   | -63   | -72   | -80 | -89   | -97  |
| 15,6               | -30  | -39   | -47   | -56   | -65   | -74   | -83 | -91   | -100 |
| 17,9               | -31  | -40   | -49   | -57   | -66   | -75   | -84 | -93   | -102 |

Tabell 3. Vindkyltabell som visar risken (%) för förfrysning vid olika kombinationer av lufttemperatur ( $^\circ\text{C}$ ) och luftfästighet ( $\text{m/s}$ ) när huden är torr och solinstrålningen försumbar. Risknivåerna är beräknade ur figur 4 och gäller när en smal kroppsdel exponeras, (näsa, öron eller fingra; 2 cm i diameter). Nedre tabellen gäller  $d=15 \text{ cm}$  (t.ex. ansikte). De gråmarkerade cellerna visar "ekvivalenta" temperaturområdet  $-30^\circ\text{C}$  till  $-40^\circ\text{C}$  där största ökningen av skador skedde enligt Candler och Ivey (1997).

| $v \backslash T_a$ | -6,6 | -12,2 | -17,8 | -23,3 | -28,9 | -34,4 | -40 | -45,6 | -51 |
|--------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-----|
| Lugnt              | 0    | 0     | 0     | 18    | 47    | 76    | 100 | 100   | 100 |
| 2,2                | 0    | 0     | 0     | 32    | 68    | 100   | 100 | 100   | 100 |
| 4,5                | 0    | 0     | 35    | 82    | 100   | 100   | 100 | 100   | 100 |
| 6,7                | 0    | 6     | 62    | 100   | 100   | 100   | 100 | 100   | 100 |
| 8,9                | 0    | 18    | 79    | 100   | 100   | 100   | 100 | 100   | 100 |
| 11,1               | 0    | 29    | 97    | 100   | 100   | 100   | 100 | 100   | 100 |
| 13,4               | 0    | 38    | 100   | 100   | 100   | 100   | 100 | 100   | 100 |
| 15,6               | 0    | 44    | 100   | 100   | 100   | 100   | 100 | 100   | 100 |
| 17,9               | 0    | 53    | 100   | 100   | 100   | 100   | 100 | 100   | 100 |

| $v \backslash T_a$ | -6,6 | -12,2 | -17,8 | -23,3 | -28,9 | -34,4 | -40 | -45,6 | -51 |
|--------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-----|
| Lugnt              | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 12  | 29    | 44  |
| 2,2                | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 6     | 26  | 44    | 62  |
| 4,5                | 0    | 0     | 0     | 0     | 24    | 47    | 74  | 100   | 100 |
| 6,7                | 0    | 0     | 0     | 18    | 50    | 79    | 100 | 100   | 100 |
| 8,9                | 0    | 0     | 0     | 35    | 71    | 100   | 100 | 100   | 100 |
| 11,1               | 0    | 0     | 12    | 50    | 88    | 100   | 100 | 100   | 100 |
| 13,4               | 0    | 0     | 21    | 62    | 100   | 100   | 100 | 100   | 100 |
| 15,6               | 0    | 0     | 29    | 74    | 100   | 100   | 100 | 100   | 100 |
| 17,9               | 0    | 0     | 38    | 85    | 100   | 100   | 100 | 100   | 100 |

Tabell 3 (övre) visar att förfrysningsrisken, beräknad för smal kroppsdel (diameter 2 cm) sammanfaller väl med de markerade tabellcellerna vilka visar under vilka förhållanden den ackumulerade skadefrekvensen ökade från 30% till 80%. Tabellvärdena indikerar också att riskzonindelningen "liten risk", "ökande risk" o.s.v. tycks underskatta den faktiska risken eftersom ändringen från 30% till 80% av alla skador inträffade mellan zonen "liten risk" till "ökande risk". Samma jämförelse har också gjorts under antagandet av en större kroppsdel, nu med en diameter av 15 cm, exempelvis huvudet (tabell 2, nedre). Tabellen visar att riskprediktionen från nomogrammet klart underskattar de faktiska skadefrekvenserna. Slutsatsen är att smala kroppsdelar som näsa, öron och fingrar är mer utsatta för köldskador än vidare kroppsdelar som t. ex. ansiktet. Detta bekräftas också av de rapporterade skadorna (Candler och Ivey, 1997) eftersom mindre än 8% av köldskadorna uppstod i ansiktet (exkl. näsa och öron).

## Andra faktorer som påverkar förfrysningsrisken

### Oskyddad transport

**Snöskoterkörning och skidåkning.** Ökad exponering för vind under kalla förhållanden ökar risken för förfrysning. Enligt Lehmuskallio (2000) ökar risken för köldskada på kinden med en faktor på 2,2 när transport sker i öppet fordon eller under blåsiga förhållanden, data som kommer från finska militära förband. Brukandet av snöskoter ökar risken för köldskador, sannolikt på grund av ökad vindexponering även om en koppling till "vita fingrar" (vibrationsskador) föreligger. Enligt Ervasti och medarbetare (1991) finns en tydlig koppling mellan risken att förfrysa ansiktet och antalet timmar per år som tillbringas på snöskoter. Mellan 11 och 150 h/år, 151-500 h/år och mer än 500h/år är förenade med en ökad frekvens av köldskada på cirka 2, 5 respektive 9 gånger. Data gäller aktiva, heltids och deltidssysselsatta renskötare. Ansiktet och öronen är mest utsatta med 80% av skadorna uppkomna under snöskoterkörning. Under annan typ av renskötareaktivitet svarade drygt 50% för ansiktsskador. Av mer än 2000 svarande av enkäten hade, under ett år, cirka 20% förfrusit sig under skoterkörning medan annan typ av renskötareaktivitet hade medfört frysskada hos knappt 8%. Uppgifter från Antarktis visar också på risken med skoteråkning men också vid skidåkning. Cattermole (1999) rapporterade att under fritiden inträffade de flesta förfrysningsfallen (knappt 80%) och att det framförallt var under skidåkning som skadorna uppstod (mer än 80% av fallen).

### Fysiska skydd

**Hudkrämer.** Enligt resonemang och beräkningar (under Metoder och Tekniker) bör bruket av salva eller kräm på köldutsatta delar inte minska utan sannolikt öka risken för förfrysning. Omfattande undersökningar och enkäter i Finland bekräftar dessa misstankar. Enligt Lehmuskallio och Anttonen (1999) visar försök med salvor applicerade på "sweating hot plate" att det termiska isolationsbidraget från salvor är minimalt när det får täcka en torr yta. Även när tjockleken på salvan är tio gånger större än den normalt applicerade fås inte någon märkbar isolationseffekt. Om salvan är av typen "oil in water" fås en signifikant avkylningsökning när vätskan i salvan dunstar, en effekt som pågår cirka 40 minuter efter att den applicerats.

Lehmuskallio och medarbetare (2000) studerade även den faktiska och upplevda temperatureffekten av salvor applicerade på försökspersoners ansikten när dessa var utsatta för vind, 3 m/s, med temperaturen  $-15^{\circ}\text{C}$ . Ena ansiktshalvan fick agera som referens när icke-medicinska såväl som medicinska, kärlutvidgande respektive kärlsammandragande salvor applicerades. De icke-medicinska preparaten var av typen vattenfria, syntetiskt respektive mineralfettbaserad (vaselin), och sådana innehållande vatten; olja i vatten- respektive vatten i olja- baserade emulsioner. Resultaten från studierna visade att de icke-medicinska preparaten oftast gav lägre temperatur eller ingen påverkan alls på de belagda delarna av ansiktet. Den subjektiva upplevelsen av ansiktstemperaturen, på de ställen där salva applicerats, var opåverkad för de flesta, icke-kärlutvidgande salvorna. Detta gällde dock inte när vaselin användes. Denna salva gav en signifikant värmeupplevelse trots att temperaturpåverkan inte kunde mätas varken med termistorgivare eller IR-teknik. Författarnas slutsats var därför att salvor av typen vaselin kan ge en falsk känsla av skydd mot förfrysning trots att risken är oförändrad eller till och med ökad på grund av salvan. Kärlutvidgande salvor ökade yttemperaturen vid appliceringen men effekten var så kortvarig att den inte har någon skyddseffekt vid vindkyla.

Utifrån de uppmätta effekterna av salva på vindkylutsatta kroppsdelar kan det förväntas att salva saknar köldskyddande effekt, snarare ger den en ökad risk för förfrysning. Lehmuskallio (1999) fann vid en enkätundersökning bland värnpliktiga i Finland att 47% hade förfrusit delar av huvudet varav öronen varit mest utsatta, (43%) med 23% hade förfrusit andra delar av ansiktet. Av de som använt salva som köldskyddande åtgärd var förfrysningsfrekvensen signifikant högre, speciellt på haka och kinder, än hos de som inte använde salva. Trots detta var de som hade använt salva klart positiva (84%) till den skyddande effekten som salvan förväntades ha. Den här diskrepansen mellan faktisk skyddseffekt och upplevd/förväntad kan delvis bero på den subjektivt upplevda hudtemperaturökning som vaselin har enligt studien från Lehmuskallio och medarbetare (2000). Enligt Lehmuskallio (2000) så ökar risken för förfrysning av örat, näsan och andra delar av ansiktet med en faktor 4,5, 5,6 respektive 3,3 gånger om ”köldskyddande” salva används.

**Mössor och huvor.** Enligt Lehmuskallio (2000) så är den viktigaste faktorn för att reducera förfrysningsrisken av ansiktet att använda vintermössa med nedfällda öronlappar. Speciellt öronen skyddas så bra av sådan mössa att risken att förfrysa öronen ökar nästan med en faktor 20 om öronlappar inte används. Effekten av öronlappar på risken att förfrysa resten av ansiktet har inte studerats. Däremot så visade samma studie att frånvaro av halsduk ökar risken att förfrysa öron och kinder med ungefär en faktor på 2 respektive faktorn 4. Den uppenbara effekten av mössa och halsduk är att det isolerande lagret av stillastående luft ökar kraftigt tack vare materialets förmåga att innesluta luft. En mössa med nedfällda öronlappar ökar ansiktets ”effektiva, konvektiva” diameter varför risken att förfrysa resten av ansiktet bör ha minskat jämfört med situationen med uppfällda öronlappar. En studie av Rintamäki et al. (1998) visar att vid gång på rullmatta (5 km/h) med en vind på 5 m/s rakt mot ansiktet och temperaturen  $-15^{\circ}\text{C}$  så medför huva och mössa betydligt högre temperatur på de flesta ansiktsdelar än då bara mössa bärs. Mössan skyddade bara ytterörats övre del. Med mössa och huva blev örsnibben nästan  $7^{\circ}\text{C}$  varmare och övriga ansiktsdelar 3 till  $5^{\circ}\text{C}$  varmare än då ingen huva bars. Nästippen blev dock inte signifikant varmare trots att huvan nådde cirka 5 cm framför pannan. Tydligen hade ett ”djupare” vindfång behövts för att även skydda nästippen.

Omfattande försök i USA under 70-talet i samband med framtagning av ny huvudbonad för extremt kalla klimat (Lockhart och Bense, 1975) visade att en traditionell huva i kombination med isolerande mössa ger bra termiskt skydd. Syftet med att utveckla en ny huvudbonad, utan huva, var att uppnå större synfält och kanske, något bättre hörbarhet. Prototypen av ny huvudbonad visade sig dock underlägsen den traditionella vid mycket kallt klimat,  $-46^{\circ}\text{C}$  och 4,5 m/s vind, avseende termiskt skydd. Prototypen, där ett ansiktsskydd var integrerat och som bara exponerade ögonen och området däromkring, gav dock inte bättre skydd än den traditionella med pälskantad huva. När denna kompletterades med ansiktsskydd och skidglasögon (goggles) erhöles mycket komfortabla temperaturer över hela huvudet trots det extrema klimatet. När den traditionella huvudbonaden kompletterades med skidglasögon, men utan ansiktsmask, blev huvudtemperaturerna avsevärt högre än för prototypen. Detta gällde även nästippen som i standardutförandet inte var täckt som i prototypfallet. Det visar att skidglasögon påtagligt minskar risken för förfrysning av ansiktet, där såväl kinder, panna som näsa skyddas. Två mekanismer ger detta; dels ökad effektiv konvektiv diameter, dels täckning av vindexponerade ytor (till viss del även näsans utsida).

Om ansiktet skyddas väl vilket inkluderar välisolerad mössa och uppfälld huva kommer riskkurvorna i figur 4 att överskatta faran för förfrysning. Om dessutom huvan har pälskant eller motsvarande som ökar den "inneslutna luftvolymen" samt om skidglasögon används som ytterliggare skyddar näsan och områdena kring ögonen kommer risken att vara än mindre. En bättre riskbedömning fås då av tabell 3 där risknivåerna är beräknade för en kroppsdel med diametern 15 cm. Riskkurvor liknande de i figur 4 kan ritas för denna situation. Detta görs dock inte i den här rapporten för att inte skapa oklarheter eller tolkningsproblem. Data ur Alaskastudien (Candler och Ivey, 1997) pekar på att riskkurvorna beräknade för smal kroppsdel bäst sammanfaller med det faktiska skadeutfallet. Det tyder på att individer i militär aktivitet inte kan eller vill skydda sig optimalt vilket har som följd ökad risk för förfrysning av t.ex. näsa och öron. Ett skäl till att skyddet väljs för "dåligt" är att det begränsar framförallt synförmågan men även hörseln. Det var ju dessa skäl som låg bakom USAs ambition att ta fram ny huvudbeklädning som skulle kunna kombinera gott termiskt skydd med ökad omvärldsuppfattning (Lockhart och Bense, 1975).

### **Acklimatisering.**

En anpassningsfaktor i termen av "tid tillbringad i kalla områden" har rapporterats ge färre förfrysningsskador. Det är inte klart huruvida acklimatiseringen speglar ett mer kompetent uppträdande under köldexponering eller om den minskade risken är en effekt av den väldokumenterade fysiologiska adaptationen som minskar känsligheten för förfrysning. Gissningsvis bidrar både uppträdande och ändrad fysiologi till en lägre risk. Massey (1959) rapporterade att under kontrollerad vindkylexponering så drabbades 74% av förstaårsdeltagarna på Antarktis av frysskada medan bara 29% av de som var inne på andra året på Antarktis. Även Candler och Ivey (1997) identifierade en högre risk för förfrysning för de soldater som gjorde sitt första år på Alaska jämfört med de som gjort en längre period. Något mått på skillnaden rapporterades dock inte. Om Massey-data tillämpas på risknomogrammet så fås att personer med mer än ett års anpassning till kallt klimat kan utstå två gånger så hög lufthastighet eller 2 till  $5^{\circ}\text{C}$  lägre lufttemperatur jämfört med "nykomlingar" för samma risk för förfrysning av oskyddad hud.

### **Värmeinnehåll och CIVD - reaktion**

Det är känt att kroppens försvar mot lokal nedkylning påverkas av t.ex. ålder, kroppsbyggnad och värmeinnehåll (Havenith och medarbetare, 1992, Keatinge, 1957). Keatinge (1957) visade att CIVD-reaktionen påverkades påtagligt, såväl kvantitativt (avgiven värmeeffekt) som tid till kärlutvidgning, av kroppens centrala värmeinnehåll. Detta kan tolkas som att kroppen värderar skyddet av de perifera delarna utifrån dess möjlighet att upprätthålla central kroppsfunction. Om en person har låg kroppstemperatur kommer således inte CIVD-reaktionen att aktiveras alternativt bli så försenad och/eller svag att det knappast kan skydda de perifera delarna från frysskada. Däremot, om kroppstemperaturen är normal eller hög kommer CIVD-reaktionen att bli tydlig och snabb vilket ökar chansen att förhindra frysskada. I den senare situationen har kroppen "råd" med att förlora värme utan att riskera centrala organs funktion medan i den förra situationen har kroppen inte möjlighet att avvara värmen till t.ex. fingrar och tår för att detta skulle kunna sänka kroppstemperaturen alltför mycket. En person som har hög värmeproduktion genom tungt fysiskt arbete och har överskott av värme behöver kanske inte lita på CIVD-funktionen, utan den perifera cirkulationen är ändå så hög att huden knappast riskerar att förfrysa.

Risikkurvorna i figur 4 baseras på att det finns en normal CIVD-funktion. När kurvorna indikerar ökad risk att förfrysa huden grundar det sig på att tiden till att den fysiologiska försvarsmekanismen startar inte är tillräcklig för ett ökande antal individer i en grupp. Men om en CIVD-reaktion uteblir helt oberoende av köldstressens omfattning ökar risken påtagligt vid klimat som normalt betraktas som "säkert". Hur stor del av befolkningen som saknar CIVD-funktionen är inte känt. Hittills har den andelen ansetts vara liten men enligt studier (Michel Ducharme, personlig kommunikation) under senaste åren finns tecken på att den andelen kan vara relativt hög. Forskning under de kommande åren kommer sannolikt att ge svar på denna fråga. Fördelningskurvan (figur 3) visar frekvensen av frysskador för olika hudyttemperaturer inom en grupp som är icke-acklimatiserad till kallt klimat. I princip kan fördelningsfunktionens medelvärde och spridning få anta olika värden beroende på för vilken kategori risikkurvorna ska beräknas. En mer homogen grupp får "toppigare" kurva (mindre spridning) medan en grupp med svag eller ingen CIVD-reaktion får en förskjutning av kurvan mot högre hudyttemperaturer. För en sådan, fullständig, riskbeskrivning krävs dock många och omfattande studier, studier som inte alldeles lätt går att genomföra av bl. a. etiska skäl.

### **Slutsats**

Rapporten beskriver vidareutvecklingen av en riskmodell som är baserad på en generell fysikalisk modell som beskriver värmeflödet och temperaturfördelningen i huden. Riskmodellen inkluderar också ett fysiologiskt ankare som möjliggör riskbedömning vid exponering av oskyddad hud för skilda kombinationer av vind och lufttemperatur. Det som tillförts i den vidareutvecklade modellen är att risken kan bedömas för såväl torr hud som våt. Nytt är även att solinstrålningens inverkan på förfrysningssrisken kan ingå. Omfattande undersökningar som gjorts ibland annat i Kanada har visat på en stor okunskap vad gäller förståelse och tolkning av de vindkyltabeller som vanligtvis används världen över. Även om allmänheten föredrar att "risken" uttrycks som temperatur så har en sådan modell både låg relevans och liten utvecklingspotential. Delvis därför finns en strävan i fler länder att utveckla ett nytt sätt att bedöma risken för skada men också upplevelse av brist på termisk komfort.

Den rapporterade riskmodellen har utformats som ett nomogram där risken för förfrysning av oskyddad hud kan avläsas om vind och lufttemperatur är kända liksom graden av solinstrålning och om huden är våt eller torr. Risknomogrammet gör det även enkelt att bedöma hur skaderisken påverkas av olika åtgärder, då i första hand minskning av vindens hastighet, vilket kan ske genom åtgärder i klädseln som bryter vinden eller genom att minska förflyttningshastigheten. Risknomogrammet visar tydligt att risken för förfrysning är mycket stor vid låga temperaturer,  $-25^{\circ}\text{C}$  och lägre. Vid sådant klimat kan en ändring av lufthastigheten med några få meter per sekund innebära en skillnad i risk från nästan 0% till 100%. Vid temperaturer högre än  $-10^{\circ}\text{C}$  är däremot risken för förfrysning liten och vid ännu något högre temperatur är den försumbar även vid hård vind. Detta gäller dock bara om huden är torr. Skulle den vätas ökar risken för förfrysning betydligt även vid dessa temperaturer. Solinstrålningen är på våra breddgrader ofta låg under den kalla årstiden och har därför oftast begränsad betydelse. Men under våren då solen står högre samtidigt som temperaturen kan nå låga värden, kan solstrålningen ha betydelse. Det gäller kanske i högre grad vid uppträdande i högländ terräng i sydligare länder, där kombinationen sol, låga temperaturer och vind är mer vanlig än i Sverige.

Eftersom riskmodellen är baserad på generella fysikaliska samband finns möjlighet att vidareutveckla modellen så att den även inkluderar andra faktorer som har betydelse för förfrysningsrisken. En sådan, vilken redan nämnts, är betydelsen av kroppsdelens diameter. Risken är lägre för en del med större diameter än en som är smalare. Betydelsen av att minska lufthastigheten lokalt har nämnts och i nomogrammet skulle olika typer av "vindfång", som kapuschong med eller utan pälskant, kunna inkluderas i en framtida modell. Olika typer av textila skydd såsom balaclava kan också inkluderas i nomogrammet, skydd som minskar lufthastigheten över huden och därmed höjer hudtemperaturen. I detta avseende bör risken med våt hud på grund av kondens beaktas. Olika typer av hudkrämer och dess betydelse för förfrysningsrisken kan även adderas inklusive effekten av att huden fuktas under ett sådant lager. Hudens termiska egenskaper och hudlagrens tjocklek kan även ändras och därmed risken för förfrysning.

I väntan på vidareutveckling av modellen beskrivs kvalitativt betydelsen av olika fysiska och fysiologiska skydd. Alla åtgärder som ökar mängden stillastående luft framför ansiktet, t.ex. ansiktsmask, huva, skidglasögon, minskar risken för kylskador via olika mekanismer. Betydelsen av hudkrämer konstateras vara minimalt när det gäller skydd mot frysskada. I värsta fall ökar risken på grund av vätning av huden med påföljande dunstning. En annan farhåga är att salvor av typen vaselin kan ge en förnimmelse av värme trots att igen sådan skapas av salvan. Därigenom kan brukaren invaggas i en säkerhet som inte motsvaras av den faktiska situationen.

Betydelsen av central kroppstemperatur har diskuterats. En hög sådan ger lägre risk för förfrysningsskada medan en låg temperatur ökar risken. Det har också poängterats att om antalet personer som inte har en adekvat CIVD-reaktion är större än vad man hittills trott så ökar risken för förfrysning påtagligt inom en grupp om den innehåller sådana personer, och då även vid klimat som hittills betraktats som "säkra".



## Litteratur

- Candler, W. H. och H. Ivey. Cold weather injuries among U.S. soldiers in Alaska: A five-year review. *Milit. Med.* 162, 12: 788-791., 1997
- Cattermole, T. J. The epidemiology of cold injury in Antarctica. *Aviat., Space Environ. Med.*, 70(2): 135-140, 1999.
- Chrenko, F. A. och L. G. C. E. Pugh. The contribution of solar radiation to the thermal environment of man in Antarctica. *Proc. of the Royal Society of London*, ser B, 155, 1961.
- Danielsson, U. *Activity and wind-induced convective heat transfer coefficients in man..* (Lic. Eng thesis) Climate & Buildings, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 3, 1990.
- Danielsson, U. *Convection coefficients in clothing air layers.* (PhD thesis) Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1993.
- Danielsson, U. Windchill and the risk of tissue freezing. *J. Appl. Physiol.* 81(6):2666-2673, 1996.
- Ervasti, O., H. Virokannas och J. Hassi. Frostbite in reindeer herders. *Arct Med Res*, 50: Suppl. 6: 89-93, 1991.
- Havenith, G., E. J. G. Van de Linde och R. Heaus. Pain, thermal sensation and cooling rates of hands while touching cold materials. *Eur. J. Appl. Phys. Occup. Health.* 65:43-51, 1992.
- Henriques, Jr, F. C., och A. R. Moritz. Studies of thermal injury. I. The conduction of heat to and through skin and the temperatures attained therein. A theoretical and an experimental investigation. *Am. J. Path.* 23: 531-549, 1947.
- Hilpert, R. Wärmeabgabe von geheizten Drähten und Rohren in Luftstrom. *Forsch. Geb. Ingenieurwes.* 4: 215-224, 1933.
- Keatinge, W. R. The effect of general chilling on the vasodilator response to cold. *J. Physiol. London.* 139: 497-507, 1957.
- Keatinge, W. R. och P. Cannon. Freezing-point of human skin. *Lancet* January 2: 11-14, 1960.
- Lehmuskallio, E. Cold protecting ointments and frostbite. A questionnaire study of 830 conscripts in Finland. *Acta Derm. Venerol.*, 79:67-70, 1999.
- Lehmuskallio, E. och H. Anttonen. Thermophysical effects of ointments in cold: An experimental study with a skin model. *Acta Derm. Venereol.*, 79: 33-36, 1999.
- Lehmuskallio, E., Rintamäki, H., och H. Anttonen. Thermal effects of emollients on facial skin in the cold. *Acta Derm. Venerol.*, 80: 203-207, 2000.
- Lehmuskallio, E. Emollients in the prevention of frostbite. *Int. J. Circumpolar Health*, 59: 122-130, 2000.
- Lewis, W. K. The evaporation of a liquid into a gas. *Am. Soc. Mech. Eng., ASME, Trans.* 4: 325-340, 1922
- Liljequist, G. H. *Short-wave radiation. Energy exchange of an Antarctic snow-field.* Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition, 1949-1952. Sci. Res. II, Part 1 A. Norsk Polarinstitut, Oslo, 1956
- Liljequist, G. H. *Wind structure in the low layer. Energy exchange of an Antarctic snow-field.* Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition, 1949-1952. Sci. Res. II, Part 1 C. Norsk Polarinstitut, Oslo, 1957
- Lockhart, J. M. och C. K. Benschel. *A human factors evaluation of cold weather headgear.* United States Army. Natick Development Center, Natick, Mass., USA. Technical report. AD-A018 237
- Maarouf, A. och M. Bitzos. *Windchill Indices: A review of science, current applications and future directions for Canada.* Meteorological Service of Canada., Environment Canada, 2000.

- Massey, P. M. O. Finger numbness and temperature in Antarctica. *J. Appl. Physiol.* 14: 616-620, 1959.
- Molnar, G. W., Hughes, A. L., Wilson, O. och R. F. Goldman. Effect of skin wetting on finger cooling and freezing. *J. Appl. Physiol.* 35: 205-207, 1973.
- Rintamäki, H., Mäkinen, T. och D. Gavhed. Effect of a wide hood on facial skin temperatures in cold and wind. *Arbete och Hälsa*, 18:58-59, 1998.
- Siple, P. A. och C. F. Passel. Measurement of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proc. Amer. Phil. Soc.* 89: 177-199, 1945.
- US Army Medical Research and Development Command: *Sustaining health and performance in the cold: Environmental medicine guidance for cold weather operations* USRIEM TN 92-22, 1992.
- Wilson, O. och R. F. Goldman. Role of air temperature and wind in the time necessary for a finger to freeze. *J. Appl. Physiol.* 29: 658-664, 1970.
- Wilson, O., Goldman, R. F., and G. W. Molnar. Freezing temperature of finger skin. *J. Appl. Physiol.* 41: 551-558, 1976.
- Wilson, O. *Cooling effect of an Antarctic climate on man*. Norsk Polarinstitut skifter nr.128. Norsk Polarinstitut, Oslo, 1963.

## APPENDIX 1

### (fortsättning av Metoder och teknik)

*Konvektion.* Det skenbart stillastående luftlagrets tjocklek kan beräknas från den konvektiva värmetransportkoefficienten ( $h_c$ ) vilken beror på ett antal faktorer såsom kroppsstorlek och kroppsform, relativ lufthastighet och graden av turbulens (figur 1). Om vindriktningen är tvärs kroppsdelen längdaxel och den yttre vinden är approximativt laminär så kan olika kroppsdelar betraktas som cylindrar av olika form och därav olika konvektiva värmetransportkoefficienter. Luftflödets karakteristik runt en cirkulär cylinder beror starkt på Reynolds tal ( $Re$ ) (dimensionslöst, ND)

$$Re = v \cdot d / \nu \quad (ND)$$

där  $v$  är luftens hastighet (m/s),  $d$  är kroppens diameter (m) och  $\nu$  är kinematiska viskositeten ( $m^2/s$ ). Hilpert (1933) upptäckte att det genomsnittliga Nusselt-talet,  $Nu$  (ND), för en cylinder kunde skrivas

$$Nu = h_c \cdot d / \lambda \quad (ND)$$

där  $h_c$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) är den påtvingade konvektiva koefficienten,  $\lambda$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) är den termiska konduktiviteten hos det omgivande mediumet och  $Pr = \nu / \alpha$  är Prandtl tal (ND) där  $\alpha$  är den termiska diffusiviteten ( $m^2/s$ ). Genom att kombinera ovanstående ekvationer fås det generella uttrycket för  $h_c$

$$h_c = 4,47 \cdot d^{-0,38} \cdot v^{0,62} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$$

och som gäller för temperaturen  $-25^\circ C$  men där koefficienten minskar från 4,47 till 4,37 vid  $0^\circ C$ . Motsvarande ekvationen som härleddes av Danielsson (1990) ur experimentella data, var för stående människa vid  $+28^\circ C$

$$h_c = 3,76 \cdot d^{-0,36} \cdot v^{0,61} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$$

vilket är jämförbart med korrelationsekvationen som gäller för cylindrar i vind tvärs längdriktningen. Den något lägre koefficienten för den mänskliga kroppen beror delvis på den högre temperaturen men till största delen på störningar i luftflödet orsakad av närliggande kroppsdelar (Danielsson, 1990). Formeln visar den genomsnittliga  $h_c$ -värdet för kroppsdelen. Om det är av intresse att veta värmeflödet på en specifik plats så måste hänsyn tas till det lokala  $h_c$ -värdet. Det beror på vinkeln mot vinden men påverkas också av till exempel inverkan av klädesplagg (Danielsson, 1993). Variationen i  $h_c$ -värde runt kroppsdelen periferi kan vara förhållandevis stor jämfört med medelvärdet (Danielsson, 1990). Ostörd luftströmning producerar vanligtvis det högsta  $h_c$ -värdet på vindsidan av kroppen medan det lägsta värdet oftast uppträder vinkelrätt mot vindriktningen. På läsidan finns det ett annat maximum men det är oftast lägre än på vindsidan. För en kropp som är ungefärligen cirkulär så är  $h_c$ -värdet på vindsidan cirka 40% högre än genomsnittet för alla vinklar.

Även vid stark vind så är luftlagret närmast kroppen approximativt stillastående. Detta lager utgör ett motstånd mot såväl värme- som masstransport. Om man bortser från den långvågiga värmestrålning vid hudytan, vilket man kan vid smala kroppsdelar i "stark" vind, så kan den termiska isolationen hos luftlagret,  $R_a$  beräknas genom att inverta  $h_c$ -värdet ( $R_a = h_c^{-1}$ ). Resultatet från en sådan beräkning, för olika lufthastigheter och kroppsdiamentrar, visar tydligt att smala kroppsdelar är utsatta för avkylning i mycket högre grad än vad som gäller för vida kroppsdelar. Om man jämför dessa  $R_a$ -värden med isolationsvärdena för läder- och överhud så är det tydligt att huden spelar en underordnad roll jämfört med luftlagret när det gäller att skydda vävnaden mot nedkylning. I modellen som presenteras här antas att tjockleken hos överhuden är 0,2 mm (normal variation 0,1 till 0,7 mm) och att termiska konduktiviteten är  $0,21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  medan läderhuden antas vara 1,5 mm tjock (normalt 1 till 2 mm) med en konduktivitet på  $0,37 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (Henriques och Moritz, 1947). Av detta följer att hudens isolationsvärde är approximativt  $0,006 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Även för en "tjock" hud kommer luftlagrets isolation att dominera. Men betydelsen av hudens isolation ska ändå inte underskattas eftersom skyddet mot avkylning är en fråga om tid tills CIVD-reflexen aktiveras. Även med ett lågt värmemotstånd i huden kan hastigheten i temperaturfallet minska tillräckligt för att hinna ge CIVD chansen att aktiveras. Figur 1 visar tydligt att stora ändringar i luftlagerisolation sker vid låga lufthastigheter medan den relativa effekten är mindre vid stark vind. Detta förklarar varför vindkyltabellerna vanligtvis inte täcker vind med högre hastighet än cirka 20 m/s. Formen på  $R_a$ -kurvorna förklarar även varför valet av referenshastighet är så viktigt när man beräknar  $T_e$ . De två referenslufthastigheterna som vanligtvis används, 6 och 8 km/h (1,7 respektive 2,2 m/s), ger upphov till cirka  $5^\circ\text{C}$  skillnad i  $T_e$ , en skillnad som kan påverka risken för förfrysning betydligt.

**Evaporation.** I den fysikaliska hudmodellen leds värmen genom hudens olika delar (läderhuden och överhuden). Olika termiska egenskaper hos huden kan simuleras, till exempel som följd av fukt i överhuden. En sådan situation kan, simuleringsmässigt, kombineras med eller utan dunstning från huden. Dunstning antas ske från hudens yta och masstransporthastigheten (diffusionen) beror på det omgivande luftlagrets tjocklek. Här antas huden vara oklädd men effekten av textillager, hudkrämer o.s.v. kan inkluderas i modellen. I de flesta situationer där forcerad luftströmning förekommer, turbulent eller laminär, så kan den evaporativa värmetransporten beräknas med hjälp av Lewis relation,  $L$ ,

$$L = h_e / h_c = 16,7 \quad (\text{K/kPa})$$

där  $h_e$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{kPa}^{-1}$ ) är den evaporativa värmetransportkoefficienten. Det skenbart stillastående luftlagret som bromsar transporten av värme och massa är approximativt det samma för värme,  $d_{th} = 0,26 / h_c$  (m), som för massa,  $d_e = 0,031 / h_e$  (m). Den evaporativa värmetransporten drivs av skillnaden i vattenångpartialtrycket vid hudytan och omgivande luft. Vattenångtrycket i luften beräknas från lufttemperaturen och med ett antagande om en relativ luftfuktighet (rh) av 80%. Partialtrycket på hudytan beräknas från rh=100% och en hudtemperaturen  $0^\circ\text{C}$ .

**Solstrålning.** En faktor som kompenserar den konvektiva avkylningen av huden är absorption av solstrålning. Ett sådant tillskott bromsar hudtemperaturfallet eller kan till och med resultera i ökande hudtemperatur. Värmetillskottet från solstrålningen kan variera från nästan inget till

ett nettoinflöde på nästan  $1000 \text{ W/m}^2$ . Den kortvågiga strålningen som når huden kommer både som direktstrålning och som reflekterad strålning från himlen och från marken (albedo). Den direkta strålningskomponentens storlek beror på graden av molnighet, solhöjden och objektets läge i förhållande till den infallande strålningen. Den indirekta komponenten, bestående av reflektionen från himlen men framförallt från marken, skapar ett värmeinflöde som är relativt oberoende av vinkeln mellan inkommande strålning och objektets position. Detta gäller framförallt om marken är täckt av nysnö. Om ansiktet exempelvis är vänt bort från solen så blir den direkta strålningskomponenten i det närmaste försumbar. Men strålningen som kommer från mark- och himmelsreflexionen kan nå samma storleksordning som den direktinfallande solstrålningen. När himlen är molntäckt blir reflexionskomponenten större eller mycket större än den direkt strålningen på grund av upprepad reflexion mellan mark och molnens undersida (Liljequist, 1957). Den situationen kräver dock att marken reflexionsförmåga är mycket god. Om marken är täckt av fin nysnö så är reflektiviteten mycket hög, omkring 85%, jämfört med mark täckt av gräs eller öppen jord där reflektivitet sällan är högre än 15 till 20%.

Den mängd solstrålning som absorberas av naken hud beror något på hudens egenskaper. I modellen antas att 65% av den inkommande kortvågiga strålningen absorberas medan den långvågiga strålningen emitteras till 97%. Strålningsutbytet sker vid det yttersta lagret av huden både i avseende på kortvågig som långvågig, termisk strålning. Den termiska effekten av solinstrålning beror i hög grad på lufthastigheten. Om strålningen skapar ett nettoinflöde, stiger hudtemperaturen vilket medför att förlusten från djupare liggande vävnad minskar. Samtidigt som den högre hudtemperaturen minskar värmeflödet från djupare liggande vävnad så ökar värmeförlusten utåt på grund av den högre temperaturskillnaden. Så om det isolerande luftlagret är tjockt, vilket innebär att lufthastigheten är låg, så blir effekten av solinstrålning stor. Detta är en anledning till att lätt klädseln kan bäras på sommaren i Antarktis. Temperaturen är sällan under  $-10^\circ\text{C}$ , vinden är ofta lätt och solinstrålningen är intensiv. Men om vinden är stark blir värdet av solinstrålning mindre eftersom den av huden absorberade värmen lättare förloras till omgivningen.

**Fysiska skydd.** En under många år praktiserad åtgärd med syftet att minska förfrysningsrisken har varit att lägga ett lager salva på hudens köldutsatta delar. En tanke har varit att salvan ska fungera som isolerande lager. Ur värmeledningssynvinkel är detta bidrag till den totala isolationen försumbart även i jämförelse med hudens (Lehmuskallio och Anttonen, 1999). Salvans tjocklek, utbredd på ansiktet, kan knappast vara större än någon tiondels millimeter vilket är jämförbart med överhudens tjocklek. Värmeledningsförmågan hos salvan är lika eller större än hudens vilket innebär att isolationsbidraget från salvan i bästa fall är jämförbart med det från överhuden. Eftersom detta är litet blir salvans eventuella bidrag till minskad risk för förfrysning marginell.

En negativ effekt som orsakas av vattenfri salva är att den fukt som normalt finns i huden förhindras att dunsta. Det innebär att fukt kommer att samlas i överhuden eller i gränsskiktet mellan salva och överhud. Fukt i överhuden minskar hudens isolation med ökat värmeinflöde som följd. Om salvan är vattenbaserad kommer dunstningen att ske från dess yta. Dunstningen påverkar värmeflödet med ökad avkylning som följd. Sammantaget innebär därför en hudsalva, i bästa fall, oförändrad men mer troligt, ökad värmetransport och därmed större förfrysningsrisk, inte minskad risk vilket många förväntar.

De viktigaste yttre faktorerna som påverkar risken för förfrysning är vind och lufttemperatur. Metoder att minska risken är att bromsa vinden och att höja temperaturen. Det senare låter sig oftast inte göra vid utomhusvistelse. Däremot kan relativa lufthastigheten påverkas på olika vis, bland annat genom att minska den relativa hastigheten, dvs. minska sin egen förflyttningshastighet. Dessutom kan avkylningshastigheten minskas för given lufthastighet. Ett sätt är att vända ansiktet från vinden. Avkylningshastigheten på läsidan är i genomsnitt cirka 40% lägre än genomsnittet på vindsidan, detta för samma yttre, ostörda vindhastighet. Ett annat sätt att minska avkylningshastigheten är att öka ansiktets effektiva diameter. Betydelsen av detta kan ses i figur 1 alternativt beräknas ur ekvationen  $h_c = 3,76 \cdot d^{-0,36} \cdot v^{0,61}$ . Ökningen av diameter kan ske med en huva som tillsammans med en mössa som distans kan öka effektiva diametern med cirka 50% vilket minskar avkylningen med cirka 20%. Effekten kan förstärkas genom att huvan förses med pälsbräm eller på annat sätt fås att sticka fram framför ansiktet. Åtgärderna "fångar" vinden vilket innebär en faktisk minskad "yttre" lufthastighet samtidigt som den ökade diametern påverkar avkylningshastigheten. Andra tekniker för att minska lufthastigheten är "tratt" framför ansiktet, tidigare ofta använd av mc-ordonanser. Tratten skapar en "stillastående" luftström samtidigt som sikten framåt blir acceptabel. En sämre lösning i detta avseende är visir som lätt immar eller frostar igen vid hård fysisk aktivitet. Däremot kan den vindbromsande effekten vara god.

Ett vanligt förekommande ansiktsskydd är "balaclava" som är en relativt tunn ansiktsmask som följer ansiktsformen. Balaclavan som oftast är av textil kan vara mer eller mindre genomsläpplig för luft och vattenånga. Men om luftgenomsläppligheten betraktas som försumbar kan balaclavans skyddseffekt ses i figur 1. Antag att materialet är två millimeter tjockt, då kommer den stillastående luftspalten framför t.ex. ansiktet att öka med knappt 1,5 mm. För ansiktet innebär det en motsvarande vindreduktion från exempelvis 10 m/s till cirka 6 m/s. Effekten är mycket större (och viktigare!) för smalare delar t.ex. näsan där skyddet motsvara en vindreduktion från t.ex. 16 m/s till cirka 4 m/s. Ju tjockare balaclavan är desto bättre skydd ger den. Nackdelen är att med ökad tjocklek ökar den mängd fukt som kondenserar i materialet, fukt som sedan kan frysa till is. Is har dålig värmeisolans vilket medför ökad risk för förfrysning för de ansiktsdelar som kommer i kontakt med isen eftersom dess temperatur alltid är lägre än 0°C och har en mycket högre värmekapacitivet än stillastående luft.

