

## **Klimawandel und Ausführbarkeit körperlicher Arbeit im Freien – Bewertungsverfahren im Vergleich**

Peter BRÖDE<sup>1</sup>, Dusan FIALA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund (IfADo)*

*Ardeystraße 67, D-44139 Dortmund*

<sup>2</sup> *ERGONSIM – Human Thermal Modelling*

*Am Dobelblick 29, 76359 Marxzell*

**Kurzfassung:** Dem Konzept der Ausführbarkeit folgend ermöglichen ergonomische Bewertungsverfahren, die Auswirkungen des Klimawandels auf Gesundheit und Produktivität bei Arbeit im Freien abzuschätzen. Mit Simulationen ganztätiger Schichten unterschiedlicher Arbeitsschwere und Arbeits-Pausen-Regelungen unter extremer Hitzebelastung verglichen wir neun Verfahren, die auf der Wet-Bulb-Globe-Temperatur (WBGT, ISO 7243), dem thermophysiological Beanspruchungsindex ‚Predicted Heat Strain‘ (PHS, ISO 7933) sowie dem UTCI-Fiala-Modell der Thermoregulation beruhen. Während leichte Arbeit uneingeschränkt ausführbar war, indizierten die WBGT-Verfahren im Vergleich zu PHS und UTCI-Fiala verkürzte Ausführbarkeit bei mittelschwerer, jedoch weniger Restriktionen bei schwerer Arbeit, da WBGT die kumulierte Hitzebeanspruchung nach langer Exposition in den Nachmittagsstunden nicht berücksichtigte. Die Ergebnisse belegen, dass die Wahl des Bewertungsverfahrens die Aussagen über die betrachteten Folgen des Klimawandels mitbestimmt. Thermophysiological Modelle können hierbei zu einer ausgewogenen Bewertung beitragen, wobei neben Modelldetails auch die physiologischen Beurteilungskriterien Beachtung verdienen.

**Schlüsselwörter:** Klima, Modell, Produktivität

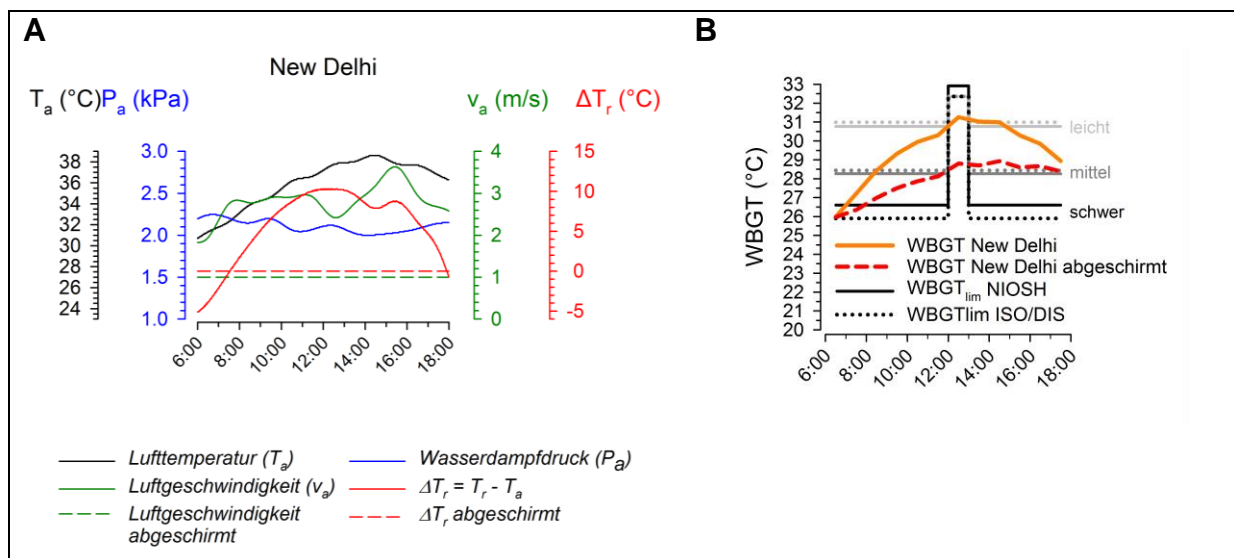
### **1. Einleitung**

Direkte Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels auf die Ausführbarkeit körperlicher Arbeit (AkA) im Freien werden weniger in Deutschland (Brosseur et al. 2017), sondern insbesondere in bereits heute hitzebelasteten tropischen und subtropischen Regionen erwartet (Kjellstrom 2009; Dunne et al. 2013).

Ziel der hier vorgestellten Simulationsstudie war ein Vergleich der mit unterschiedlichen Bewertungsverfahren vorgenommenen Abschätzung dieser Folgen.

### **2. Material und Methoden**

Rechnersimulationen erfolgten für akklimatisierte Arbeitspersonen in Ganz-Tages-Schichten von 06:00 bis 18:00 Uhr mit einer 1-stündigen Mittagspause unter extremen Sommer-Bedingungen für heiße (New Delhi, Dallas) und feucht-warme Klimazonen (Managua, Osaka), für die auch eine abgeschirmte Bedingung ohne Sonneneinstrahlung simuliert wurde (Abb. 1A).



**Abbildung 1:** Tagesverlauf von Lufttemperatur ( $T_a$ ), Wasserdampfdruck ( $P_a$ ), Luftgeschwindigkeit ( $v_a$ ) und der Differenz von mittlerer Strahlungstemperatur ( $T_r$ ) zu Lufttemperatur ( $A$ ) sowie von WBGT im Vergleich zu den Richtwerten nach NIOSH (Jacklitsch et al. 2016) und (ISO/DIS 7243 2015) für leichte, mittelschwere und schwere Arbeit ( $B$ ) in New Delhi für den heißesten Monat und für eine abgeschirmte Arbeitssituation.

Es wurden leichte, moderate und schwere körperliche Belastungen sowie zusätzlich zur stetigen Arbeit weitere Profile mit unterschiedlichen Arbeits-Pausen-Regelungen sowie verhaltensangepasster reduzierter Arbeitsschwere untersucht.

Die Bewertung basierte einerseits auf der Wet-Bulb-Globe-Temperatur (WBGT) unter Verwendung der Richtwerte nach ISO (ISO/DIS 7243 2015) bzw. NIOSH (Jacklitsch et al. 2016), vgl. Abb. 1B, sowie eines in Beobachtungsstudien (Hothaps) empirisch ermittelten Kriteriums (Kjellstrom et al. 2014). Zum Vergleich dienten der thermophysiological Beanspruchungsindex PHS - ‚Predicted Heat Strain‘ (DIN EN ISO 7933 2004) sowie das dem ‚Universal Thermal Climate Index‘ – UTCI (Bröde et al. 2012) zugrundeliegende UTCI-Fiala-Modell der Thermoregulation (Fiala et al. 2012) unter Anwendung standardisierter (DIN EN ISO 7933 2004) Beanspruchungskriterien (max. Kerntemperatur 38 °C, max. Schweißmenge 7.5% des Körpergewichts), die konservativen (38 °C, 3%) (Parsons 2014) als auch liberalen (Malchaire et al. 2000) Kriterien (38.2 °C, 7.5%) gegenübergestellt wurden.

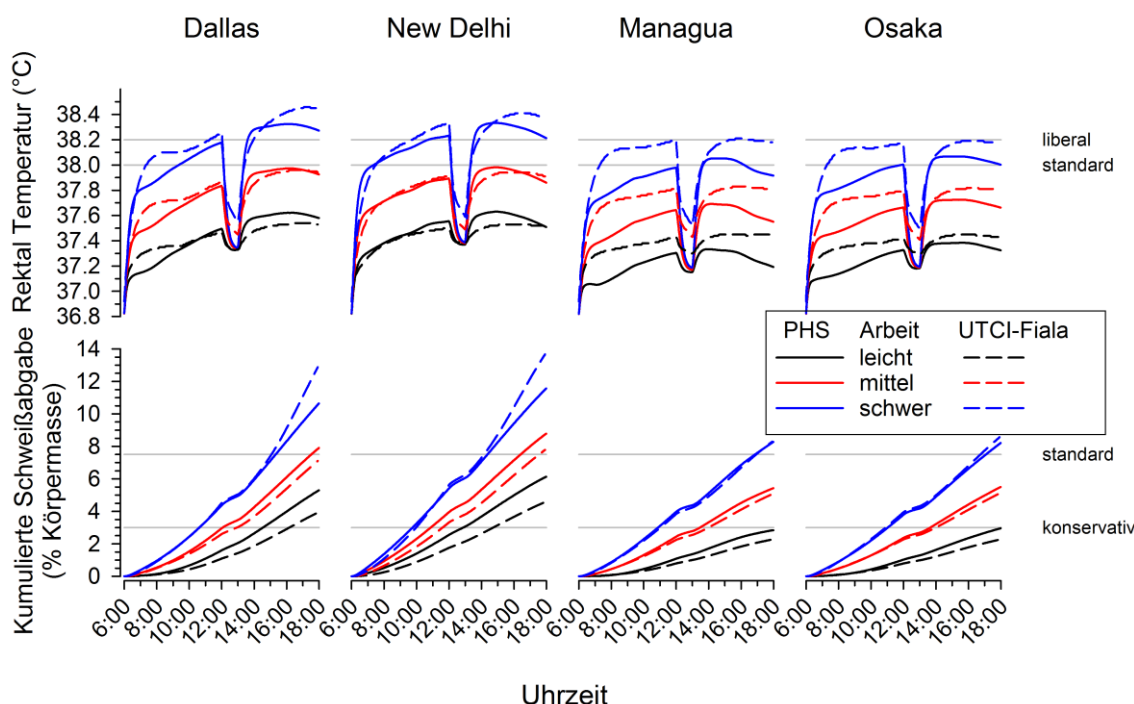
AkA wurde als prozentualer Anteil der Arbeitszeit je Arbeitsstunde bestimmt, für den keine Grenzwertüberschreitung vorlag. Varianzkomponenten zum Einfluss von Bewertungsverfahren, Arbeitsschwere, -zeit, -profil, Abschirmung und Klimazone auf AkA wurden mit ANOVA berechnet (Littell et al. 1996).

### 3. Ergebnisse

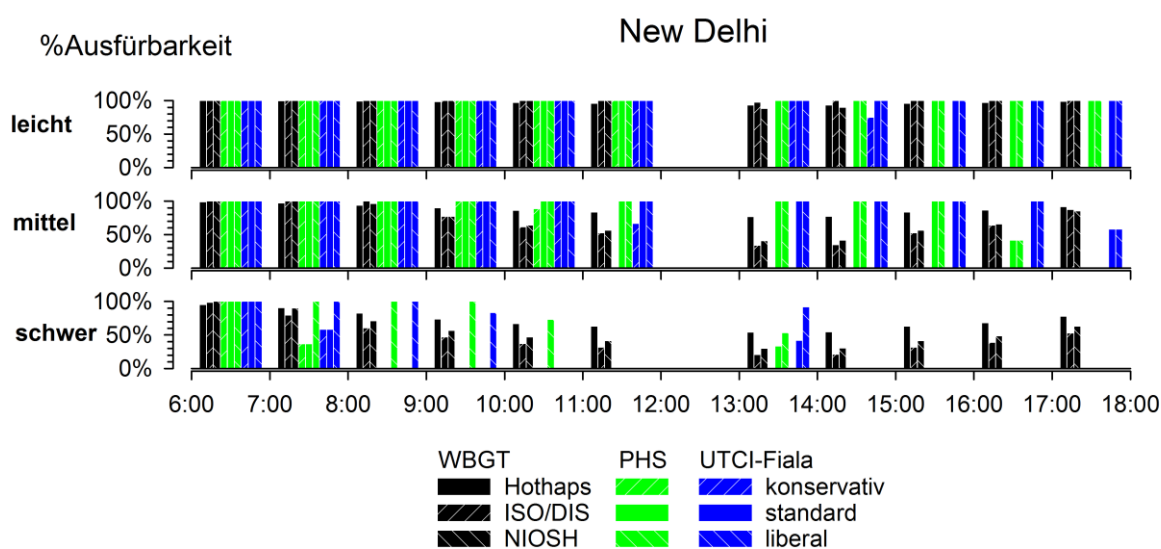
Am Beispiel der stetig ausgeführten Arbeit unter den Klimabedingungen in New Delhi zeigen Abb. 1B den WBGT-Verlauf, Abb. 2 die von PHS und UTCI-Fiala vorhergesagten physiologischen Reaktionen sowie Abb. 3 die für jede Stunde mit den neun Verfahren errechnete Ausführbarkeit.

Die Varianzkomponentenzerlegung ergab, dass die Bewertungsverfahren, Arbeitsschwere, Zeitdauer und Klimazonen über 80% der AkA-Variabilität erklärten (Abb. 4B). Während leichte Arbeit nahezu uneingeschränkt ausführbar war (Abb. 3 &

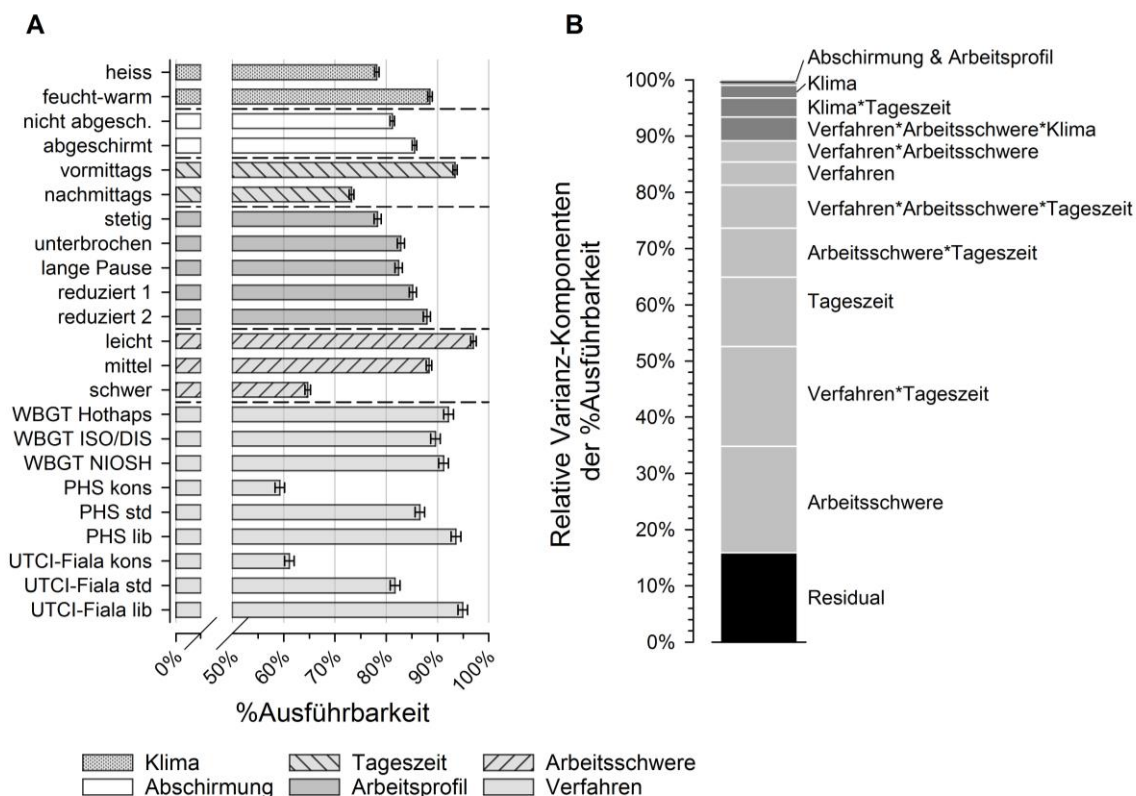
4A), indizierten die WBGT-Verfahren im Vergleich zu PHS und UTCI-Fiala verkürzte AKA bei mittelschwerer, jedoch weniger Restriktionen bei schwerer Arbeit (Tab. 1), da WBGT die kumulierte Hitze-Beanspruchung nach langer Exposition in den Nachmittagsstunden nicht berücksichtigte (Abb. 2 & 3). Obwohl PHS und UTCI-Fiala sich im Detail z.T. deutlich unterschieden, z.B. bei PHS durch ein unrealistisches Unter- und Überschwingen der Kerntemperatur zu Beginn und nach Ende von Arbeitspausen, determinierten die Grenzwertkriterien das Ergebnis bei den physiologischen Bewertungsverfahren (Abb. 2, Tab. 1).



**Abbildung 2:** Von PHS und dem UTCI-Fiala-Modell für vier Klimate und leichte, mittelschwere und schwere Arbeit simulierte Rektaltemperaturen (oben) und kumulierte Schweißabgabe (unten) im Vergleich zu Standard-, konservativen und liberalen Beurteilungskriterien.



**Abbildung 3:** Verlauf der stündlichen prozentualen Ausführbarkeit berechnet mit neun Verfahren für leichte, mittlere und schwere körperliche Belastung bei ununterbrochener Arbeit unter extremer Hitzebelastung in New Delhi.



**Abbildung 4:** Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen (A) sowie Varianzkomponentenzerlegung (B) für die untersuchten Faktoren der prozentualen Ausführbarkeit.

**Tabelle 1:** Mittelwerte (AM) und Standardabweichungen (SD) der stündlichen Ausführbarkeit in Relation zu Arbeitsschwere und Uhrzeit für neun verschiedene Bewertungsverfahren (Metriken), die zum einen auf WBGT nach dem Hothaps-Ansatz bzw. den Richtwerten nach ISO/DIS 7243 (2015) und NIOSH, zum anderen auf PHS und dem UTCI-Fiala Modell unter Verwendung konservativer (kons), standard (std) und liberaler (lib) Kriterien für Kerntemperatur bzw. Dehydrierung basierten.

Arbeitsschwere	leicht		mittel		schwer	
	vor-mittags	nach-mittags	vor-mittags	nach-mittags	vor-mittags	nach-mittags
<b>Uhrzeit</b>						
<b>Metrik</b>	AM (SD) der stündlichen Ausführbarkeit (%)					
Hothaps	99 (1)	98 (2)	96 (2)	91 (5)	90 (5)	78 (10)
WBGT ISO/DIS	100 (0)	100 (0)	97 (5)	88 (17)	86 (11)	64 (19)
WBGT NIOSH	100 (0)	100 (1)	97 (5)	88 (16)	90 (9)	72 (18)
PHS kons	100 (0)	64 (39)	98 (5)	13 (14)	78 (21)	0 (0)
PHS std	100 (0)	100 (0)	100 (0)	97 (8)	84 (22)	35 (37)
PHS lib	100 (0)	100 (0)	100 (0)	97 (7)	99 (4)	64 (34)
UTCI-Fiala kons	100 (0)	84 (22)	100 (1)	24 (20)	56 (29)	0 (0)
UTCI-Fiala std	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (1)	57 (29)	31 (26)
UTCI-Fiala lib	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (1)	96 (10)	72 (30)

#### 4. Diskussion und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse belegen, dass die Wahl des Bewertungsverfahrens die Aussagen über die Folgen des Klimawandels auf die AkA erheblich mitbestimmt.

Während leichte Arbeit uneingeschränkt ausführbar war, indizierten die WBGT-Verfahren im Vergleich zu PHS und UTCI-Fiala verkürzte Ausführbarkeit bei mittelschwerer, jedoch weniger Restriktionen bei schwerer Arbeit, da WBGT die kumulierte Hitze-Beanspruchung nach langer Exposition in den Nachmittagsstunden nicht berücksichtigt.

Thermophysiological Modelle können hierbei zu einer ausgewogenen Bewertung beitragen, wobei neben Modelldetails auch die physiologischen Beurteilungskriterien Beachtung verdienen.

Darüber hinaus deuten die Resultate das Potential organisatorischer Maßnahmen zur Abmilderung dieser Folgen an, die neben technischen Maßnahmen, etwa zur Abschirmung solarer Strahlung, auch als Verhaltensanpassung von den Beschäftigten in Eigenregie (Kampmann 2000) umgesetzt werden können.

Einschränkend ist zu bemerken, dass die hier geschilderten Befunde nur in Bezug auf körperliche Arbeit gelten. Entsprechende Modelle für mentale Arbeit (Hancock & Vasmatazidis 2003) müssen noch ausgearbeitet werden, da die Effekte stark von der betrachteten kognitiven Fähigkeit und dem Schwierigkeitsgrad abhängen (Bröde et al. 2013).

Generell festzuhalten bleibt für die Modellentwicklung und -validierung der dringende Bedarf an einschlägigen Felduntersuchungen bezüglich der Auswirkungen von Kälte und Hitze auf die Produktivität.

#### 5. Literatur

- Brasseur GP, Jacob D, Schuck-Zöller S (2017) Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-50397-3
- Bröde P, Fiala D, Blazejczyk K, Holmér I, Jendritzky G, Kampmann B, Tinz B, Havenith G (2012) Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology* 56 (3):481-494. doi:10.1007/s00484-011-0454-1
- Bröde P, Rinkenauer G, Jaschinski W, Schütte M (2013) Effectiveness in cognitive task performance under time pressure and elevated ambient temperature. In: Cotter JD, Lucas SJE, Mündel T (eds) 15th International Conference on Environmental Ergonomics, Queenstown, New Zealand, 11-15 February 2013 2013. International Society for Environmental Ergonomics, Otago, pp 89-93
- DIN EN ISO 7933 (2004) Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung. Beuth Verlag, Berlin
- Dunne JP, Stouffer RJ, John JG (2013) Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Clim Change* 3 (6):563-566. doi:10.1038/nclimate1827
- Fiala D, Havenith G, Bröde P, Kampmann B, Jendritzky G (2012) UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology* 56 (3):429-441. doi:10.1007/s00484-011-0424-7
- Hancock PA, Vasmatazidis I (2003) Effects of heat stress on cognitive performance: the current state of knowledge. *International Journal of Hyperthermia* 19 (3):355-372. doi:10.1080/0265673021000054630
- ISO/DIS 7243 (2015) Ergonomics of the thermal environment - Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index (ISO/DIS 7243:2015); German and English version prEN ISO 7243. Beuth Verlag, Berlin
- Jacklitsch B, Williams WJ, Musolin K, Coca A, Kim J-H, Turner N (2016) NIOSH criteria for a recommended standard: occupational exposure to heat and hot environments. Cincinnati, OH

- Kampmann B (2000) Zur Physiologie der Arbeit in warmem Klima. Ergebnisse aus Laboruntersuchungen und aus Feldstudien im Steinkohlenbergbau. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal
- Kjellstrom T (2009) Climate change, direct heat exposure, health and well-being in low and middle-income countries. *Glob Health Action* 2:10.3402/gha.v3i4.1958. doi:10.3402/gha.v2i0.1958
- Kjellstrom T, Lemke B, Otto M, Hyatt O, Dear K (2014) Occupational Heat Stress: Contribution to WHO project on "Global assessment of the health impacts of climate change". *Climate Change Health Impact & Prevention (ClimateCHIP, <http://www.climatechip.org>)*. Mapua, New Zealand
- Littell RC, Milliken GA, Stroup WW, Wolfinger RD (1996) SAS® System for Mixed Models. SAS® Institute Inc., Cary, NC
- Malchaire J, Kampmann B, Havenith G, Mehnert P, Gebhardt JH (2000) Criteria for estimating acceptable exposure times in hot working environments: a review. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 73 (4):215-220. doi:10.1007/s004200050420
- Parsons KC (2014) *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate and Cold Environments on Human Health, Comfort and Performance*. 3rd edn. CRC Press, London

**Danksagung:** Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Tord Kjellstrom (Australian National University, Canberra, Australien) und Herrn Dr. Bruno Lemke (Nelson Marlborough Institute of Technology, Nelson, Neuseeland) für die Überlassung der meteorologischen Daten.