

**Bewertung des Klimas von Österreich auf der Grundlage
von human-biometeorologischen Indizes und geo-statistischen Methoden für Zwecke des
Fremdenverkehrs**

Diplomarbeit im Fach Meteorologie

am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

von

Markus Zygmuntowski

angefertigt am

Meteorologischen Institut
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

betreut von PD Dr. Andreas Matzarakis, Freiburg
und Prof. Dr. Mojib Latif, Kiel

vorgelegt im Juli 2004

VORWORT

Die Wirkung des Klimas auf den Menschen ist in den vergangenen Dekaden zu einem der wichtigsten Untersuchungsgebiete der heutigen Zeit geworden. Aufgrund der rasanten Entwicklung im Bereich der elektronischen Datenverarbeitung ist es derzeit möglich die gesammelten Klima- und Synopdaten mittels modernster Technik auszuwerten. Diese Diplomarbeit zeigt anschaulich nicht nur den Weg von einer großen Ansammlung an Klima- und Synopdaten über deren Bearbeitung hin zur Erstellung bioklimatischer Karten, sondern liefert auch anhand der Datenauswertung einen Beitrag zur aktuellen Forschung. Damit soll Wissenschaftlern, aber auch Raum- und Städteplaner und insbesondere dem bioklimatisch interessierten Laien ein schneller informativer Weg präsentiert werden, wie aus einem scheinbaren chaotischen Verhalten von unterschiedlichen meteorologischen Parametern eine eloquente Informationsplattform entsteht.

„Wir können das Wetter nicht machen, aber einen Ort mit besserem Klima aufsuchen.“

Walter Ludin

*(*1945), Schweizer Journalist, Redakteur, Aphoristiker und Buchautor*

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
VORWORT	1
INHALTSVERZEICHNIS	2
ZUSAMMENFASSUNG	5
SUMMARY	7
1. EINLEITUNG	8
1.1 Motivation	8
1.2 Wissenschaftliche Konzeption	8
2. PROBLEMSTELLUNG	11
3. ARBEITSHYPOTHESEN UND ZIELSETZUNGEN	12
4. STAND DER WISSENSCHAFT	13
4.1 Thermophysiologie des Menschen	13
4.2 Human-biometeorologische Wirkungskomplexe	15
4.3 Energiebilanz des Menschen	17
4.3.1 Metabolische Rate	18
4.3.2 Mechanischer Wirkungsgrad der Arbeitsleistung	21
4.3.3 Turbulenter Fluss fühlbarer Wärme	21
4.3.4 Wasserdampfdiffusion	25
4.3.5 Latenter Wärmefluss durch Schweißverdunstung	26
4.3.6 Respirationsluft	28
4.3.7 Wärmeaustausch durch Nahrungsaufnahme	29
4.3.8 Speicherwärmefluss	29
4.4 Kurz- und langwellige Strahlungsflüsse	30
4.4.1 Solare Strahlung	31
4.4.2 Terrestrische Strahlung	32
4.5 Mittlere Strahlungstemperatur	32
4.6 Meteorologische Parameter	36
4.6.1 Bewölkung	36
4.6.2 Lufttrübung	36
4.6.3 Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit	37
4.7 Veraltete Verfahren	37
4.7.1 Äquivalenttemperatur	37

4.7.2	Effektivtemperatur	38
4.7.3	Abkühlungsgröße	38
4.8	Moderne Modell-Entwicklungen	39
4.8.1	Menschliche Energiebilanzmodelle	39
4.8.2	Behaglichkeitsgleichung nach Fanger	39
4.8.3	Predicted Mean Vote	40
4.8.4	Klima-Michel Modell	42
4.8.5	Münchener Energiehaushaltsmodell für Individuen	42
4.8.6	Physiologisch Äquivalente Temperatur	44
4.8.7	Standard Effektive Temperatur	45
4.9	Regionale Visualisierung bioklimatischer Größen	46
4.9.1	Räumliche Darstellung des Bioklimas	46
4.9.2	Relevanz von Bioklimakarten	47
5.	UNTERSUCHUNGSMETHODIK	48
5.1	Standortbeschreibung	48
5.2	Datengrundlage	50
5.3	Das RayMan Modell	52
5.4	Datenbearbeitung	54
5.5	Auswahlkriterien zur Bestimmung der Analysegruppe	57
5.6	Modellierung	58
5.6.1	Datenprüfung	58
5.6.2	Multiple Lineare Regression	60
5.6.3	Regionalisierung	62
6.	ERGEBNISSE	64
6.1	Beschreibung ausgewählter Stationen	64
6.1.1	Innsbruck	64
6.1.2	Sonnblick	66
6.1.3	Salzburg	68
6.2	Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET	71
6.2.1	Monatskarten von PET	71
6.2.2	PET-Klassen in Tagen pro Jahr	77
7.	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	82
7.1	Räumliche Tendenzen der PET-Verteilung	83
7.2	Vergleich von Klima- und Synopdaten basierend auf Bioklimakarten	88

7.2.1 Kalendermonate	88
7.2.2 PET-Klassen	98
7.3 Lokaler Vergleich von Klima- und Synopstationen	99
7.4 Vergleich mit anderen Bioklimakarten	105
7.4.1 Bestehende Bioklimakarte von Österreich	105
7.4.2 Bioklimakarten anderer Länder	107
8. ABSCHLIESSENDE BETRACHTUNG	109
8.1 Schlussfolgerungen und Anmerkungen	109
8.2 Aussichten	113
LITERATURVERZEICHNIS	115
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	121
VERZEICHNIS DER TABELLEN	126
VERZEICHNIS DER VERWENDETEN SYMBOLE	127
ANHANG A PET-VERLAUF AUSGEWÄHLTER STATIONEN	132
ANHANG B BIOKLIMAKARTEN	138
ANHANG C VARIABLE BEKLEIDUNG	150
DANKSAGUNG	154
ERKLÄRUNG	155

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Austrian Climate and Health Tourism Initiative (ACTIVE) liefert diese Arbeit einen Beitrag zur Bereitstellung von wissenschaftlichen Grundlagen zur verbesserten Nutzung des natürlichen Heilmittels "Klima" in Österreich. Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) stellte anhand von Stationen innerhalb Österreichs einen Klimadatensatz, sowie durch Stationen innerhalb und außerhalb Österreichs einen Synopdatensatz zur Verfügung. Für den Untersuchungszeitraum vom 1. Januar 1996 bis 31. Dezember 2000 liegen Messreihen von 201 Klimastationen und 278 Synopstationen vor. Schwerpunkt der Analyse ist der Vergleich dieser beiden Stationstypen anhand der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET). Sie berücksichtigt die Einflüsse von Lufttemperatur, Dampfdruck, Windgeschwindigkeit, sowie kurz- und langwellige Strahlungsflüsse aus der Umgebung zum Körper des Menschen in Form der mittleren Strahlungstemperatur auf die Energiebilanz des Menschen. Das Strahlungs- und Bioklimamodell RayMan ermöglicht die Modellierung dieser thermischen bzw. biometeorologischen Kenngröße. PET, angegeben in der Einheit Grad Celsius, erlaubt eine Einteilung in einzelne Temperaturintervalle, denen Klassen thermischen Empfindens gegenüberstehen. Der Vergleich beider Stationstypen erfolgt für den Mittagstermin anhand Häufigkeitsverteilungen von PET-Klassen bezüglich der Kalendermonate in Prozent und in Tagen pro Jahr. Diese Tageszeit ist für den Touristen als auch für den gesundheitlich orientierten Menschen ausschlaggebend bezüglich der Auswahl einer Region, da zu dieser Zeit die meisten Aktivitäten verrichtet werden. Des weiteren wird eine Regionalisierung basierend auf einer Regressionsanalyse durchgeführt. Diese Methode stellt PET in Beziehung zu den Größen geographische Breite, geographische Länge, Höhe über dem Meeresspiegel, Hangneigung, Hangrichtung und Landnutzung und ermöglicht die Übertragung von PET in die Fläche. Die erstellten Karten geben sowohl die PET-Verteilung in den Kalendermonaten wieder, als auch die Verteilung einzelner Klassen jeweils basierend auf Klima- und Synopdaten. Anhand des Kartenmaterials erfolgt ein regionaler Vergleich beider Datensätze mit einer Beschreibung des Bioklimas. Dieser zeigt, dass sowohl Klima- als auch Synopdaten räumliche und zeitliche Tendenzen ähnlich wiedergeben und beide Stationstypen sich kaum unterscheidende hochsignifikante Regressionskoeffizienten vorweisen. Aufgrund der geringeren Messausfälle der Klimastationen und den abweichenden Messzeitpunkten mit 13 Uhr MEZ für Synopstationen und 14 Uhr MOZ für Klimastationen entstehen Unterschiede,

die sich in der mittleren Strahlungstemperatur und der Lufttemperatur widerspiegeln und zu niedrigeren PET-Werten in den Karten basierend auf Synopdaten gegenüber den Karten basierend auf Klimadaten führen. Insgesamt zeigen die erzeugten Karten im Vergleich zu früheren Untersuchungen deutlich feinere Strukturen mit einer hohen Auflösung von 1 km.

SUMMARY

Within the context of the Austrian Climate and Health Tourism Initiative (ACTIVE) this research supports a contribution from scientific basis to the improved use of the healthy effect of climate to Austria. The Central Institute of Meteorology and Geodynamics (ZAMG) provided us climate data records available by stations within of Austria, as well as a synoptical data records available by stations within and outside of Austria. For the investigation period of 1. January 1996 until 31. December 2000 series of measurements of 201 climatic stations and 278 synoptical stations are available. Emphasis of the analysis is the comparison of these two station types on the basis of the Physiological Equivalent Temperature (PET). It considers the influences on the Energy Balance of Humans by air temperature, vapour pressure, wind velocity, as well as short and long-wave radiant fluxes from the environment to the human body as the mean radiant temperature. This characteristic is to be modelled by RayMan, a model for the mean radiant temperature and thermal indices in urban structures and divided into individual temperature ranges according to the unit degrees Celsius. It makes a classification possible which can be set into relation to comfort stages. The confrontation of both station types at midday takes place via frequency distributions from PET classes concerning the calendar months in per cent and in days per year. This time of day is for tourists and healthy oriented people decisive of choosing an climatic adequate region which is caused of a high activity rate in this hours. Further a regionalization is accomplished based on a regression analysis. This method places PET in relationship with geographical latitude, geographical length, height over the sea level, slope, aspect ratio and land use. So it makes the transferring of PET into the space possible. The generated maps show both the PET distribution in the calendar months and the distribution of individual classes based in each case on climatic and synoptical data records. The maps include a description of the bioclimate and makes a regional comparison of both data records possible. It shows similarly spatial and temporally tendencies in both kind of data records which have nearly the same high significant regression coefficients. A smaller data lack in climate data records and different measurement times at 14 o'clock LST for climate stations and at 13 o'clock CET for synoptical stations cause minor changes which can be observed in the mean radiant temperature and air temperature of both kind of stations. They lead to a lower PET in maps generated by synoptical data records. At all both show more detailed maps with a high resolution of 1 km as it was possible in former studies.

1. EINLEITUNG

1.1 Motivation

Der Fremdenverkehr ist für die heutige Tourismusindustrie ein wirtschaftlich relevanter Faktor, welcher auch von den vorherrschenden klimatischen Bedingungen abhängt. Sie gelten als Auswahlkriterium der Touristen für oder gegen einen Urlaubsort.

Die hohen physischen und psychischen Belastungen des beruflichen Alltags erfordern eine genaue Planung der Freizeit, um optimale Erholung zu gewährleisten. Sie orientiert sich an der vorhandenen Infrastruktur zur Freizeitbetätigung und dem lokalen Klima am Wohn- oder Urlaubsort. Neben der Erholung steht ebenso der gesundheitliche Aspekt im Vordergrund, der sich vornehmlich auf Heil- und Kurorte bezieht. Die örtlichen klimatischen Bedingungen sind für sie von besonderer Bedeutung.

Im Rahmen der Austrian Climate and Health Tourism Initiative (ACTIVE) ist diese Untersuchung Teil einer interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Ärzten, Klimatologen und Tourismusbeauftragten, welche für alle Parteien verwert- und umsetzbare Ergebnisse liefern soll. Österreich bietet aufgrund seines reich gegliederten Reliefs trotz relativ geringer Breitenunterschiede ein äußerst differenziertes Klima, so dass die Mannigfaltigkeit der Klimabereiche es vernünftig erscheinen lässt Flachland-, Becken-, Tal- und Hochgebirgsklima einer bioklimatischen Feinanalyse zu unterziehen (Rudel et al., 1983). Die zentrale geographische Lage in Europa steigert zusätzlich die Attraktivität des Landes für ein breites Bevölkerungsspektrum hinsichtlich seiner Erreichbarkeit. Die hohe Anzahl von Regionen mit heilklimatischen Bedingungen wird derzeit kaum genutzt, da wesentliche österreichspezifische Klimakurkonzepte fehlen. Dieser konzeptionelle Mangel soll im Projekt ACTIVE durch Schaffung einer breiten Wissensbasis behoben werden, wobei die bioklimatische Landschaftszonierung von Österreich in dieser Arbeit ihren Beitrag zur Bereitstellung von wissenschaftlichen Grundlagen zur verbesserten Nutzung des natürlichen Heilmittels „Klima“ in Österreich liefert.

1.2 Wissenschaftliche Konzeption

Ausgangsobjekt einer human-biometeorologischen Untersuchung ist der Mensch. Zunächst werden seine physiologischen Grundlagen betrachtet und die Eigenschaft des Menschen als Wärmeproduktionsmaschine erläutert. Es erfolgt die Einordnung in seine Umgebung, welche

in verschiedene human-biometeorologische Wirkungskomplexe eingeteilt ist. Der thermische Wirkungskomplex, welcher die meteorologischen Elemente Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit als auch die kurz- und langwellige Strahlungsflüsse und ihre thermophysiologische Relevanz bezüglich des Menschen im Freien und in geschlossenen Räumen beinhaltet (VDI, 1998), bildet den physikalischen Schwerpunkt dieser Untersuchung.

Bereits 1938 beschrieb Büttner, dass man die gesamten Auswirkungen aller thermischen Parameter berücksichtigen muss, um den thermischen Einfluss der Umgebung auf den Menschen zu berechnen.

Er postulierte folgendes:

„If one wants to assess the influence of climate on the human organism in the widest sense, it is necessary to evaluate the effects not only of a single parameter but of all thermal components. This leads us to the necessity of modelling the human heat balance“

(Büttner, 1938).

Erst in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts fing man an diese Aussage in Form von Energiebilanz-Modellen des menschlichen Körpers umzusetzen und hielt diese Methoden in der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2 Teil I (VDI, 1998) fest. Alle Modelle basieren auf der menschlichen Energiebilanzgleichung (Höppe, 1984, 1993):

$$M + W + R_n + Q_H + Q_L + Q_{Sw} + Q_{Re} = 0 \quad (W) \quad (1)$$

mit

- M: Gesamtenergieumsatz (metabolische Rate)
- W: Energieumsatz infolge mechanischer Leistung
- R_n: Strahlungsbilanz
- Q_H: Fluss fühlbarer Wärme
- Q_L: Fluss latenter Wärme durch Wasserdampfdiffusion
- Q_{Sw}: Fluss latenter Wärme durch Verdunstung von Schweiß
- Q_{Re}: Energieumsatz infolge von Erwärmung und Wasserdampfsättigung der Atemluft

Die Einheit aller Terme ist die Leistung (W), mit positiv gewerteten Flüssen, wenn sie zu einem Energiegewinn des menschlichen Körpers führen und negativ im Falle eines Energieverlustes.

Indizes, die sich lediglich auf einzelne meteorologische Parameter stützen, wie die einfachen Komplexgrößen, die eine quantitative Unterteilung in einen kalten Bereich, bezeichnet als Abkühlungsgrößen zur Beschreibung des turbulenten Transportes von fühlbarer Wärme und in einen warmen Bereich aus einer Kombination aus Lufttemperatur und verschiedenen Feuchtemaßzahlen vornehmen (Jendritzky et al., 1990), lassen nur eine mangelhafte Interpretation des bioklimatischen Einflusses auf den Menschen zu.

Die Behaglichkeitsgleichung nach Fanger stellt das bekannteste Energiebilanzmodell dar (Fanger, 1972). Aus ihr folgen die thermischen Indizes Predicted Mean Vote“ (PMV) und Predicted Percentage Dissatisfied“ (PPD) für das Klima in Innenräumen (Höppe, 1999). Mit der Erweiterung der Behaglichkeitsgleichung nach Fanger durch kurz- und langwellige Strahlungsströme im Freien wurde PMV für Freilandbedingungen bekannt als Klima-Michel-Modell (KMM) (Jendritzky et al. 1979, 1990). Realitätsnahe Modelle müssen aber die thermophysiologicalen Prozesse bezogen auf die Wechselwirkung Mensch-Umwelt mit berücksichtigen, wie es im Münchner Energiebilanzmodell für Individuen (MEMI) (Höppe, 1984, 1994), mit der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) als Ausgabegröße geschieht (Höppe, 1999, Matzarakis et al., 1999). Die Modellierung der thermophysiological relevanten Strahlungsprozesse im kurz- und langwelligen Bereich erfolgt über die Parametrisierung der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt} (Höppe, 1992, VDI, 1998, Matzarakis et al., 2000, Matzarakis, 2001).

Die graphische Darstellung von PET in Form einer Bioklimakarte (Matzarakis et al., 1999, Röckle et al., 2003) lässt nicht nur eine flächendeckende Analyse des Untersuchungsgebietes zu, sondern unterstützt auch wegen ihrer elementaren Beschreibung eine Handhabung durch ein breites Interessentenspektrum. Es wird gezeigt, wie zum Beispiel mittels eines Regressionsansatzes, basierend auf den vorgegebenen Daten, die Übertragung von lokalen PET-Werten in die Fläche erfolgt.

2. PROBLEMSTELLUNG

Der Fremdenverkehr verlangt aufgrund seiner unterschiedlichen Interessengruppen nach einer möglichst einfachen Lösung zur Beschreibung des Klimas, die es jedem erlaubt sich mit minimalem Aufwand einen Überblick über die bioklimatischen Verhältnisse an einem gewählten Ort zu verschaffen.

Die hier vorgeschlagene Methodik der Bioklimakartierung ist kein neues Verfahren, sondern wurde bereits in den vergangenen Jahrzehnten erfolgreich angewendet (Jendritzky et al., 1979, 1990, Matzarakis und Mayer, 1997). Aufgrund der technischen Entwicklung ist es möglich geworden mittels Satellitenaufnahmen immer größere Auflösungen von Erdregionen zu erhalten. Da die letzte Bioklimakartierung von Österreich bereits vor über 20 Jahren nach dem damaligen Stand der Wissenschaft von Rudel et al. (1983) durchgeführt wurde existiert der Bedarf an einer modernen Bioklimakarte.

Thermische Indizes bilden die Grundlage dieser Kartenerstellung. Im Gegensatz zu älteren Karten soll hier nur PET als moderner Index untersucht werden, beruhend auf der Energiebilanz des Menschen. Berechnungsgrundlage stellen die meteorologischen Größen Lufttemperatur, Wasserdampfdruck, Windgeschwindigkeit, die mittlere Strahlungstemperatur (umfasst die kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse) und die thermo-physiologischen Größen Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung und Aktivität des Menschen dar.

Die zur Verfügung gestellten Daten liefern lediglich Eingangsparemeter, so dass deren Aufbereitung als erstes in dieser Untersuchung durchzuführen ist, da hinreichend kontinuierliche Messreihen vorhanden sein sollten, die flächendeckend sind, um Aussagen über das gesamte österreichische Gebiet treffen zu können. Teilweise auftretende Datenlücken machen es notwendig entsprechende Methoden zu entwickeln und anzuwenden, die diese Mängel bei der Auswertung berücksichtigen. Über ganz Österreich verteilt lässt sich derzeit nicht für jeden geographischen Ort eine Messstation finden, so dass auch hier ein geeignetes Verfahren verwendet werden muss, um flächendeckende PET-Karten zu erstellen.

Zur Verfügung stehen ein Klima- und ein Synopdatensatz, in denen für einzelne Größen nicht nur verschiedene Messverfahren, sondern auch andere Messzeitpunkte verwendet werden. Die Anwendung ausschließlich eines Datensatzes ist daher nicht zu rechtfertigen, da es keine Informationen bezüglich seiner Realitätstreue gibt, ohne diesen durch eine ausgiebige Untersuchung verifiziert zu haben. Der Vergleich beider Stationstypen stellt aus den genannten Gründen den Schwerpunkt dieser Arbeit dar.

3. ARBEITSHYPOTHESEN UND ZIELSETZUNGEN

Die Untersuchung des Bioklimas von Österreich anhand zweier Datensätze bestehend aus 201 Klimastationen und 278 Synopstationen dient dem Vergleich beider Stationstypen mittels zu erstellender aktueller PET-Karten für jeden Kalendermonat als auch für einzelne PET-Klassen, die eine Aussage über eine mögliche thermische Belastung zulassen. Ein Vergleich mit bereits angefertigten Bioklimakarten von Rudel et al. (1983) wird durchgeführt.

Hinsichtlich der beiden unterschiedlichen Datensätze soll eine Gegenüberstellung von Klima- und Synopmesswerten durchgeführt werden, so dass eine Beurteilung ihrer Messqualität gegeben ist. Der Vergleich bezieht sich auf den mittäglichen Klimatermin. Hierzu sind Standorte ausfindig zu machen, die sowohl Klima- als auch Synopstationen besitzen um lokale Unterschiede aufzuzeigen.

Im Sinne des Fremdenverkehrs soll eine Beschreibung des thermischen Komforts der einzelnen Regionen Österreich anhand erzeugter Bioklimakarten durchgeführt werden. Aufgrund des stark gegliederten Relief Österreichs wird es notwendig sein, einzelne Regionen gemäß ihres bioklimatischen Schwerpunktes zu unterteilen und detailliert zu beschreiben.

Insbesondere zu erwähnen sind die vorliegenden Gitterdaten mit einer Auflösung von 1 km für das österreichische Bundesgebiet, sowie Mitteleuropa, welche die Grundlage für die Erzeugung der Bioklimakarten bilden. Diesbezüglich ist es zunächst sinnvoll topographische Karten zu produzieren, um einen Eindruck der Höhenverteilung des Landes zu erhalten.

Die hohe Auflösung der Karten von 1 km führt vermutlich zu einer qualitativ hochwertigeren Betrachtung des Bioklimas als 1983. Zwischen Klima- und Synopkarten wird es während des Mittagtermins zu Abweichungen in den PET-Werten kommen, da die Klimamessungen um 14 Uhr MOZ und die Synopmessungen um 13 Uhr MEZ stattfanden und damit unterschiedliche Bedingungen für mittlere Strahlungstemperatur und Lufttemperatur liefern. In Anbetracht der vielfältigen Strukturierung der Topographie ist zu erwarten, dass diese ebenfalls deutlich im Kartenmaterial zu erkennen ist. Besonders die Alpenlandschaft bietet mit großen Höhenunterschieden in kleinen horizontalen Ausdehnungen die Möglichkeit zu stark veränderlichen PET-Werten, während in flacheren ausgedehnten Regionen die horizontalen PET-Variationen schwächer ausfallen dürften. Typischerweise in Tälern auftretende Inversionen während des Winters sind eventuell anhand PET- und Höhenwerten der Stationen identifizierbar.

4. STAND DER WISSENSCHAFT

4.1 Thermophysiologie des Menschen

Der menschliche Organismus besitzt als Warmblüter die Fähigkeit der Temperaturregulation (Benzinger, 1961), so dass er in der Lage ist seine Kerntemperatur, die Temperatur im Körperinneren, nahezu konstant auf 37 °C zu halten. Abweichungen belaufen sich auf wenige zehntel Grad Celsius nach oben und nach unten von diesem Wert. Auf den Menschen einwirkende wechselnde thermische Umweltbedingungen und unterschiedliche körpereigene Wärmeproduktionsraten in Abhängigkeit von der Aktivität werden ausgeglichen. Diese Eigenschaft, die Kerntemperatur innerhalb eines kleinen Schwankungsbereichs konstant zu halten bezeichnet man als Thermoregulation, welche durch physiologische Mechanismen umgesetzt wird.

Den physikalischen Gesetzen folgend müsste die Temperatur des Organismus in einer warmen Umgebung ansteigen und in einer kalten abnehmen. Die Regelmechanismen im Körper, die dies verhindern sind physiologisch im Gehirn- und Nervensystem angesiedelt mit dem Zentrum der physikalischen Regulation im Hirnstamm (Benzinger, 1961). Die Haut mit ihren Rezeptoren für „Kalt“ und „Warm“ ist nach Anregung durch die Umgebung nicht Auslöser der Regulation. Schwitzen als Mittel zur Abkühlung des Körpers aufgrund des Entzugs von latenter Wärme zur Verdunstung ist mit der Hauttemperatur nicht positiv korreliert. Die Kerntemperatur des Menschen ist hier verantwortlich. Im vorderen Hypothalamus befindet sich das sogenannte „Temperaturaug“ (Abb. 4.1), ein Thermostat, das als Wärmeempfänger gilt. Physiologisch gesehen gleicht es der Netzhaut mit terminalen Neuronen für den Empfang von Licht, hier aber von Wärme. Der Temperaturreiz wird über den Blutkreislauf an das Körperinnere übertragen. Beim Überschreiten eines individuell abhängigen Schwellenwertes der Kerntemperatur gibt der Körper über Schwitzen Wärme an die Umgebung ab. Thermisches Unbehagen, empfunden

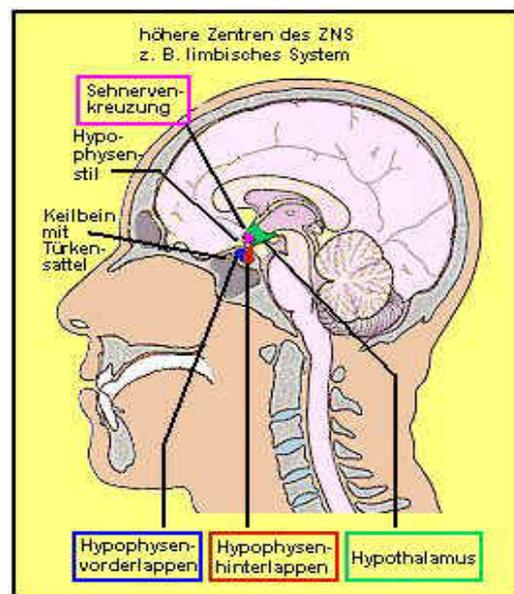


Abb. 4.1: Der Hypothalamus
(aus <http://www.medizinfo.de/endokrinologie/anatomie/hypo.htm>)

als Überwärmung tritt nur dann auf, wenn die Temperatur im Körperinneren bestimmte Schwellenwerte übersteigt (Benzinger, 1961). Die Haut ist somit lediglich für Wärmempfindungen zuständig, nicht aber für die Wärmeregulation.

Um sich gegen Unterkühlung zu schützen steigert der Körper die Stoffwechselrate, welche sich physiologisch durch einen erhöhten Sauerstoffverbrauch und ein erhöhte Produktion von Kohlendioxyd messen lässt (Benzinger, 1961). Das Krehl-Isenschmidt-Zentrum im hinteren Hypothalamus gilt als Kältezentrum und erhält Kältereize über die Nervenbahnen von den Kälte-Rezeptoren der Haut, wodurch die chemische Produktion von Wärme proportional zur Kalt-Impulsrate aktiviert wird. Der Stoffwechsel hängt von der Haut- als auch von der Kerntemperatur ab. Bei 20 °C Hauttemperatur ist ein Maximum sämtlicher Stoffwechselgrößen zu finden, unterhalb dieser Temperatur nimmt auch der Mensch bewusst kein kühleres Empfinden wahr.

Das Erreichen des sogenannten Einstellpunktes des Thermostaten mit dem beginnenden Schwitzen führt zu einer vollständigen Hemmung der Kälte-Erregung, die durch keine noch

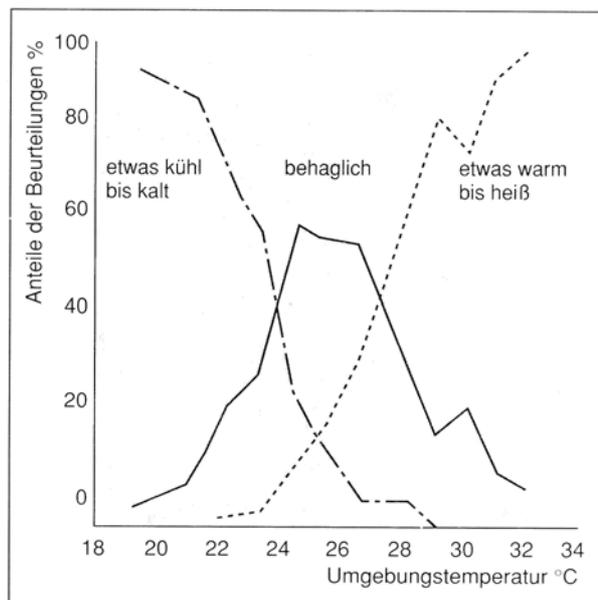


Abb. 4.2: Individuelle Unterschiede thermischer Empfindungen. Beurteilung verschiedener Umgebungstemperaturen durch einheitlich bekleidete und sitzende Personen (relative Luftfeuchtigkeit 50 %, Luftbewegung 0.1 m/s, Lufttemperatur = mittlere Strahlungstemperatur) (Fanger, 1972)

so geringe Hauttemperatur durchbrochen werden kann. Wichtig für den Körper ist die fehlende Hemmung der Kalt-Empfindung durch die zentrale Erwärmung. Dadurch tritt ein

weiterer Abwehrmechanismus in Kraft, der uns auffordert bei einer Kalt-Warnung durch die Haut für eine Steigerung der Wärmeproduktion zu sorgen, indem der Mensch seine Bewegung bzw. seine Muskelarbeit erhöht oder wärmere Plätze aufsucht. Dies geschieht noch vor dem eigentlichen Abfall der Innentemperatur, so dass vorsorglich ein Auskühlen verhindert wird. Ähnliches ist im Falle von Kältestress zu beobachten, wenn windgeschützte und besonnte Bereiche aufgesucht werden (VDI, 1998).

Änderungen des Behaglichkeitsempfinden treten zwar täglich auf, aber die interindividuelle Streuung ist etwa doppelt so groß wie die intraindividuelle (Fanger und Langkilde, 1975), da jeder Mensch seinen Organen entsprechend gleich aufgebaut ist, aber individuell sehr starke Schwankungen in der Ausprägung der Physiologie vorhanden sind (Abb. 4.2).

Extreme thermische Umgebungsbedingungen können die Thermoregulation überfordern. Dies geschieht durch Behinderung der Verdunstung, fehlende Ventilation bei hohem Wasserdampfgehalt der Luft, ungeeignete Bekleidung, unangepasste Aktivität und intensive Sonnenbestrahlung (VDI, 1998). Ebenfalls führt ein nicht den klimatischen Bedingungen angepasstes Verhalten des Menschen dazu. Ältere und kreislaulabile Menschen stellen eine besondere Risikogruppe dar (Hensel, 1981; Jungmann, 1987). Bereits geringe Abweichungen von den Behaglichkeitsbedingungen führen zu einer Beeinträchtigung des Wohlbefindens der Gesamtbevölkerung (VDI, 1998). Durch Akklimatisation ändert sich die Thermoregulation des menschlichen Organismus, so dass sich dieser auf die wechselnden Jahreszeiten einstellen kann. Gesundheits-, Ernährungs- und Trainingszustand, Stress, Konstitution, Geschlecht, Lebensalter und weitere Adaptan beeinflussen die Fähigkeit der Akklimatisation, welche nicht stabil ist und sich bei Ausbleiben des Reizes wieder zurückbildet (Jendritzky et al., 1990).

4.2 Human-biometeorologische Wirkungskomplexe

Die Wechselwirkungen der atmosphärischen Bedingungen mit dem Menschen lassen sich in folgende Wirkungskomplexe unterteilen (Jendritzky, 1992):

Der thermische Wirkungskomplex bezieht sich auf die meteorologischen Elemente Lufttemperatur, Wasserdampfdruck, Windgeschwindigkeit als auch kurz- und langwellige Strahlungsflüsse. Der menschliche Körper ist diesen Größen fortwährend, sowohl im Freien, wie auch in geschlossenen Räumen ausgesetzt und muss zum Erhalt einer konstanten Körperkerntemperatur ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Wärmeproduktion und

Wärmeabgabe aufbauen. Dies geschieht durch Thermo- und Kreislaufregulationsmechanismen.

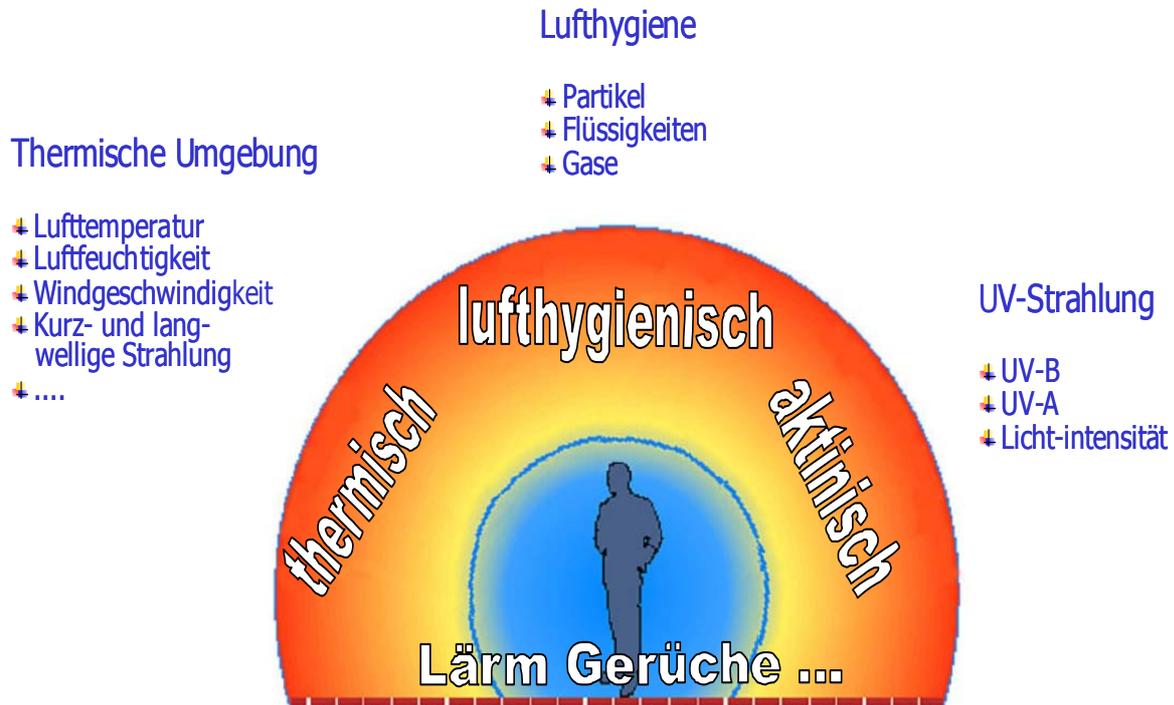


Abb. 4.3: Die human-biometeorologischen Wirkungskomplexe (nach Matzarakis, 2001)

Der lufthygienische Wirkungskomplex befasst sich mit den festen, flüssigen und gasförmigen natürlichen und anthropogenen Luftbeimengungen, die gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen im Freien und in geschlossenen Räumen aufweisen (Abb. 4.3). Die Belastung durch Immissionen hängt dabei von den Emissionsquellen und den Transmissionsverhältnissen entsprechend der Ausbreitung, Verdünnung, mögliche chemische Umwandlung, washout und rainout ab, die von der atmosphärischen Schichtung (Turbulenzzustand), Wind, Niederschlag als auch relative Luftfeuchtigkeit und Sonnenstrahlung bestimmt werden.

Der aktinische Wirkungskomplex umfasst alle Komponenten der biologisch wirksamen Strahlung, die über die reine Wärmewirkung hinausgeht. Hierzu gehört der sichtbare Spektralbereich mit seinen Auswirkungen auf das Sehvermögen, den Hormonhaushalt und die Stimmungslage, als auch der ultraviolette Spektralbereich. UV-Strahlung kann in entsprechenden Mengen die Widerstandsfähigkeit verbessern, sich positiv auf die Leistungsfähigkeit und die Stimmungslage auswirken. Größere Dosen an UV-B-Strahlung

stellen allerdings einen starken Reiz auf den Organismus des Menschen dar, sie wirken gesundheitsschädlich.

Neben diesen drei spezifischen Komplexen treten weitere Faktoren auf, welche die menschliche Physiologie beeinflussen.

Geruchsbelästigungen können das Wohlbefinden der Menschen mindern, wobei die Geruchsausbreitung wesentlich von den lokalen meteorologischen Bedingungen, insbesondere der thermischen Schichtung und den Windverhältnissen abhängt (VDI, 1993).

Lärm ist für den Menschen eine physiologische Belastung, welche mit ansteigender Lärmdauer und -intensität zunimmt (BMV, 1992; TA Lärm, 1998; VDI, 1985).

Der Windkomfort wird modifiziert durch unterschiedliche Gebäudetypen und -anordnungen, wobei bisher nur erste Bewertungsansätze existieren (IMBW, 1990; Bottema, 1992).

4.3 Energiebilanz des Menschen

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik bildet die Grundlage zur Berechnung der Energiebilanz des Menschen. Die Energieflüsse zur Körperoberfläche des Menschen werden in der Energiebilanzgleichung positiv gewertet und von der Körperoberfläche weg negativ (Höppe, 1984). Unter der Annahme von stationären Bedingungen müssen sich die Komponenten dieser Energiebilanzgleichung ausgleichen (Abb. 4.4).

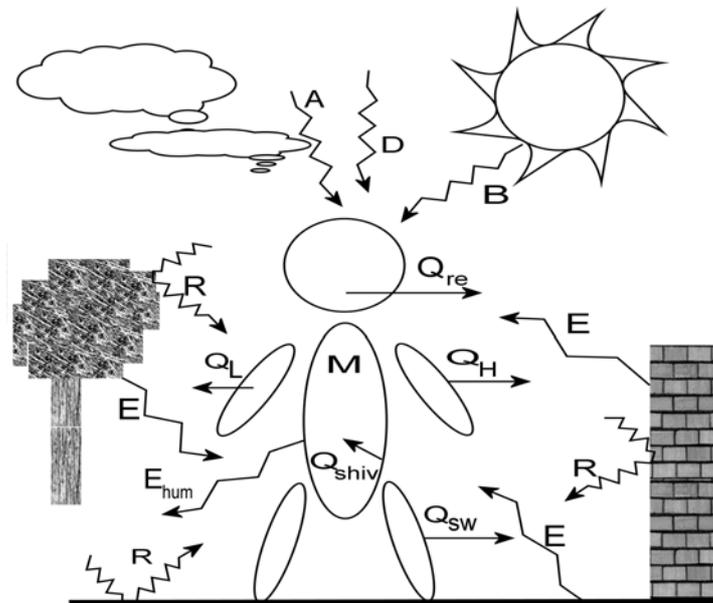


Abb. 4.4: Die Komponenten des menschlichen Energiehaushaltes

E_{hum} ist die langwellige Strahlung des Menschen, E der festen Oberflächen und A der Atmosphäre. B stellt die direkte kurzwellige Strahlung dar, D die diffuse und R die reflektierte kurzwellige Strahlung. Alle Größen sind in W/m^2 angegeben.

Man erhält folgende Darstellung für die Energiebilanzgleichung (Jendritzky et al., 1990):

$$M + Q_{\text{shiv}} + W + Q^* + Q_{\text{H}} + Q_{\text{L}} + Q_{\text{sw}} + Q_{\text{re}} + N + S = 0 \quad (\text{W}) \quad (2)$$

mit:	M:	Gesamtenergieumsatz (metabolische Rate)
	Q_{shiv} :	Reaktive Wärmebildung durch Kälte
	W:	Energieumsatz infolge mechanischer Leistung
	Q^* :	Strahlungsbilanz
	Q_{H} :	Fluss fühlbarer Wärme
	Q_{L} :	Fluss latenter Wärme durch Wasserdampfdiffusion
	Q_{sw} :	Fluss latenter Wärme durch Verdunstung von Schweiß
	Q_{re} :	Energieumsatz infolge von Erwärmung und Wasserdampfsättigung der Atemluft
	N:	Wärmeübertragung durch Nahrungsaufnahme
	S:	Nettowärmespeicher

Alle Größen besitzen die Einheit der Leistung (W).

4.3.1 Metabolische Rate

Die metabolische Rate gibt an, wieviel innere Wärme erzeugt und wieviel Energie zur Arbeitsleistung nach außen zur Verfügung gestellt wird. Selbst im Ruhestadium produziert der Körper Energie aus der aufbereiteten Nahrung. Formal ergibt sie sich aus (Höppe, 1984):

$$M = \text{GRU} + \text{AKT} \quad (\text{W}) \quad (3)$$

GRU stellt den Grundumsatz dar und AKT den Aktivitätsumsatz (Tab. 4.1). Ersterer gibt die minimale metabolische Rate an, die notwendig zur Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen ist. Der Grundumsatz wird deshalb auch als Ruheumsatz bezeichnet. Kleiber (1967) entwickelte folgende empirische Ansätze basierend auf Untersuchungen mit mehreren hundert Probanden:

für Männer:

$$\text{GRU} = 3.45 * \text{GE}^{0.75} * (1 + 0.004 * (30 - \text{AL}) + 0.01 * (\text{Z} - 43.4)) \quad (\text{W}) \quad (4)$$

für Frauen:

$$\text{GRU} = 3.19 * \text{GE}^{0.75} * (1 + 0.004 * (30 - \text{AL}) + 0.018 * (\text{Z} - 42.1)) \quad (\text{W}) \quad (5)$$

mit:

$$\text{Z} = \text{GR} * 100 / \text{GE}^{0.33} \quad (\text{m/kg}) \quad (6)$$

GE, das Körpergewicht, ist in den Gleichungen in kg angegeben, GR, die Körpergröße in m und AL, das Alter in a. Für einen 30-jährigen Mann, 80 kg schwer und 1.80 m groß erhält man demnach einen Grundumsatz von 90.8 W. Im Vergleich dazu eine 30-jährige Frau, 60 kg schwer und 1.60 m groß mit 67.3 W. Mit dem empirischen Ansatz von DuBois und DuBois (1915):

$$\text{A}_{\text{DU}} = 0.203 * \text{GE}^{0.425} * \text{R}^{0.725} \quad (\text{m}^2) \quad (7)$$

ist es möglich die Körperoberfläche zu berechnen, wodurch man eine darauf normierte Leistung erhält:

$$\text{GRU}_0 = \text{GRU} / \text{A}_{\text{DU}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (8)$$

Dadurch ist die Gegenüberstellung mit anderen Werte in der Literatur möglich.

Beim Verrichten einer Tätigkeit wird zu dem Grundumsatz der Aktivitätsumsatz addiert. Dabei ist die Größe der additiven Energieumwandlung abhängig von den Körpermerkmalen, der Aktivität und den dazugehörigen Bewegungsabläufen (Höppe, 1984). Bei gleicher Aktivität soll die metabolische Rate von Frauen, auch wenn sich die Körpermasse beider Geschlechter nicht unterscheiden, um 15 % niedriger sein, als beim Mann, so Lehmann (1953). Aktivitätsumsätze unterscheiden sich bei gleicher Aktivität von Mann und Frau nicht signifikant. Körpermassen führen nur dann zu Abweichungen, wenn diese mitbewegt werden müssen. Die Aussage Lehmanns ist lediglich für leichtere Aktivitäten verifizierbar, da hier der Grundumsatz den bedeutendsten Anteil des Gesamtumsatzes ausmacht. Kleiber (1967) ermöglicht mit seiner Methode eine individuelle Berechnung der metabolischen Rate, indem er die Faktoren Geschlecht, Alter, Körpergröße und -masse im Grundumsatz berücksichtigt. Diese Normierung auf die Masse in Kilogramm ist gegenüber der Normierung auf die Körperoberfläche in m² vorteilhafter, da letztere je nach Aktivität keine oder nur eine indirekte Abhängigkeit des Arbeitsumsatzes von der Oberfläche über die Abhängigkeit von

der Körpermasse aufweist. Zusätzlich entsteht ein Fehler durch die irrtümliche Annahme, der Grundumsatz verhalte sich proportional zur Oberfläche (Höppe, 1984).

Die Bestimmung der metabolischen Rate erfolgt über die Zusammensetzung der Nahrung. Hauptenergieträger sind Kohlenhydrate und Fette, welche in den Muskeln und inneren Organen oxidativ gespalten und zu Kohlensäure und Wasser umgewandelt werden. Der Energiegewinn liegt durch die Oxidation von 1 g Kohlenhydrat bei 17.2 kJ und von 1 g Fett bei 38.9 kJ. Eine Darstellung der momentanen Werte der Energieflüsse für eine bestimmte Situation in Form der Leistung wird indirekt ermittelt, indem man den Brennstoff O_2 und die Abfallprodukte CO_2 der Oxidation quantitativ bestimmt (Höppe, 1984).

Tab. 4.1: Aktivitätsumsatz AKT und metabolische Rate M zweier Personen bei verschiedenen Tätigkeiten (Kleiber, 1967)

Art der Tätigkeit	AKT (W)	M Mann (W)	M Frau (W)
a) unabhängig von der Körpermasse			
Schlafen	0	87	72
Sitzen auf einem Stuhl	25	112	97
Ruhig stehen	43	130	115
b) abhängig von der Körpermasse			
Gehen, verschiedener Boden mit 4km/h			
Landstraße	3.1/kg	320	274
Grasweg	3.3/kg	334	287
Fichtelnadelboden	4.4/kg	417	358
Morastiger Untergrund	9.2/kg	777	670

Mann: Alter 30 Jahre, Masse 75 kg, Größe 1.80 m;

Frau: Alter 30 Jahre, Masse 65 kg, Größe, 1.65 m;

Der Mensch besitzt keine Depots beider Verbindungen. Sauerstoff wird vollständig der Atemluft entnommen und Kohlendioxid sofort mit der nächsten Expiration ausgeschieden. Unter Berücksichtigung der chemischen Reaktionsgleichungen der Oxidationsprozesse und durch die Analyse der Inspirations- und Expirationsluft kann bestimmt werden, welcher Energieträger an der Verbrennung beteiligt ist. Bei reiner Kohlenhydratverbrennung stehen gebildete CO_2 -Moleküle den verbrauchten O_2 -Molekülen im Verhältnis 1:1 gegenüber. Es ergibt sich ein respiratorischer Quotient (RQ) von 1.0. Bei reiner Fettverbrennung beträgt der RQ 0.7 (Munn, 1970). Eiweiß besitzt zwar einen RQ von 0.8 aber nur einen geringen Anteil

in der Nahrung, so dass der dadurch entstehende Fehler in den Berechnungen kleiner ist als der Messfehler bei der Analyse der Respirationsluft (Höppe, 1984).

4.3.2 Mechanischer Wirkungsgrad der Arbeitsleistung

In Ruhe leistet der menschliche Körper Reibungsarbeit aufgrund des ständig aktiven Blutkreislaufs, die im Körperinneren in Wärme umgewandelt und dem Anteil innerer Wärme in der Energiebilanz gutgeschrieben wird (Höppe, 1984). Eine Erhöhung der Bewegungsrate führt zur Arbeitsleistung nach außen, anteilig ausgehend von der metabolischen Rate, so dass diese Energie dem Körper nicht mehr als Wärme zur Verfügung steht. Man beschreibt diesen Wert durch den Wirkungsgrad der Arbeitsleistung, der aus dem Verhältnis der Arbeitsleistung nach außen (-W) zu der eingesetzten Leistung (M) definiert ist (Höppe, 1984):

$$\eta = -W/M \quad (9)$$

Für das Ruhestadium gilt ein Wirkungsgrad von Null. Allgemein berechnet sich die Arbeit aus dem Produkt von Kraft und Weg, entlang dem die Arbeit verrichtet wird. Da viele Bewegungsabläufe komplex sind, setzen sie sich aus Anteilen von Hebe-, Druck- und Reibungsarbeiten zusammen, was eine genaue Erfassung erschwert. Da der Wirkungsgrad der Arbeit nie über 20 % steigt, wirkt sich die Unsicherheit in W auf die anderen Energieflüsse nur unbedeutend aus (Fanger, 1972; Gonzales, 1981; Höppe, 1984; Nishi, 1981).

Nicht umgewandelte Anteile der metabolischen Rate in Arbeit werden dem Körper als innere Wärme H zugeführt (Höppe, 1984):

$$H = M + W = M \cdot (1 - \eta) \quad (W) \quad (10)$$

Hohe körperliche Anstrengungen führen aufgrund des geringen Wirkungsgrad zu einer ebenfalls hohen Zufuhr an innerer Wärme, die wegen Überhitzungsgefahr abgegeben werden muss.

4.3.3 Turbulenter Fluss fühlbarer Wärme

Der turbulente Fluss fühlbarer Wärme setzt sich aus dem turbulenten und molekularen Wärmeaustausch des menschlichen Körpers mit der Umgebung durch Konvektion und Konduktion zusammen (Höppe, 1984) (Abb. 4.5):

$$Q_H = C_{Be} + C_{Un} + C_{Kd} \quad (W) \quad (11)$$

Mit C_{Be} als konvektiven Anteil von Bekleidungsflächen, C_{Un} als konvektiven Anteil von unbedeckten Hautoberflächen und C_{Kd} als konduktiven Anteil. Alle Größen werden in W angegeben. Er wird als negativ in der Energiebilanzgleichung gewertet, soweit die Temperatur der Umgebungsluft oder der Kontaktflächen des Körpers nicht über der jeweiligen Oberflächentemperatur des Menschen liegt.

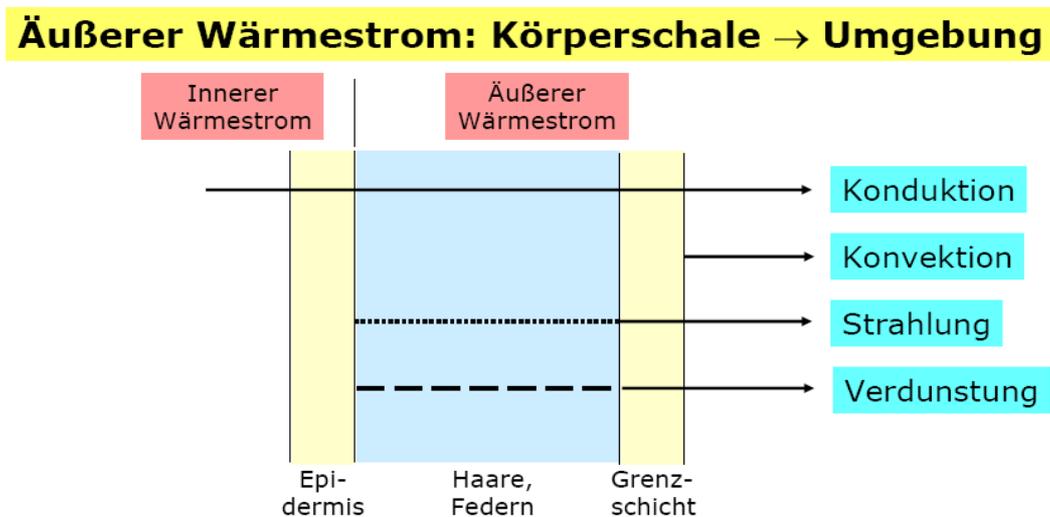


Abb. 4.5: Der Wärmestrom durch die Haut
(aus http://www.tiho-hannover.de/einricht/phys/lehre_tiermedizin/vorlesungen_tiermedizin/thermoregulation/thermo_1.pdf)

Konvektion ist ein turbulenter Wärmeaustausch zwischen einer Oberfläche und einem gasförmigen oder flüssigem Medium verbunden mit Strömungen des Übertragungsmediums, wobei unterschieden wird zwischen freier und erzwungener Konvektion (Höppe, 1984). Freie Konvektion ist gekennzeichnet durch Strömungen, die aufgrund von Temperatur- und damit verbundenen Dichteunterschieden der Luft entstehen. Erzwungene Konvektion erfordert eine Eigenströmung des Wärmeübertragungsmediums. Zwischen beiden Konvektionsarten existiert ein Übergangsbereich, in dem sie sich additiv verhalten. Die Menge der übertragenen Energie ist bei der freien Konvektion abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Körperoberfläche und dem Medium, während die erzwungene Konvektion eine Funktion der Temperaturdifferenz und der Strömungsgeschwindigkeit des umgebenden Mediums ist (Höppe, 1984).

Die Bekleidung beeinflusst den Wärmedurchgangswiderstand I_{cl} zwischen Haut- und Bekleidungsoberfläche und damit die Bedingungen der Wärmeabgabe (VDI, 1998). I_{cl} entspricht nach Fanger (1972) dem mittleren Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung, bezogen auf die gesamte Körperoberfläche (Tab. 4.2). Da einige Körperteile große unbedeckte Oberflächen aufweisen, die entsprechend wärmer sind als die Kleidungsoberfläche, ist es sinnvoll eine Unterteilung des konvektiven Wärmeflusses in einen Fluss von der bekleideten und der unbekleideten Körperoberfläche durchzuführen.

Tab. 4.2: Vergrößerungsfaktor der Oberfläche f_{cl} in Abhängigkeit von Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung I_{cl} nach Fanger (1972)

I_{cl} (clo) (1 clo = 0.155 W/m ² K)	f_{cl}
0.0 - 0.2	1.00
0.3 - 0.4	1.05
0.9 - 1.4	1.15
3.0 - 4.0	1.30 - 1.50

Allgemein gilt für den konvektiven Wärmefluss:

$$C = A_{Du} * f_{cl} * h_c * (T_a - T_0) \quad (\text{W}) \quad (12)$$

mit: A_{Du} : Oberfläche nach DuBois (m²)
 f_{cl} : Vergrößerungsfaktor der Oberfläche durch die Bekleidung
 h_c : Wärmeübergangszahl nach Gonzales et al. (1974) (W/m²K)
 T_a : Lufttemperatur (°C)
 T_0 : Oberflächentemperatur der Kleidung oder der Haut (°C)
 (an unbekleideten Stellen)

Gilt der Faktor z als Quotient aus der von Kleidung bedeckten Hautoberfläche und der gesamten Hautoberfläche nach DuBois, so lässt sich eine empirische Beziehung als Funktion von I_{cl} angeben (Morgan und Baskett, 1974):

$$z = -2.36 + 173.51 * I_{cl} - 100.76 * I_{cl}^2 + 19.28 * I_{cl}^3 \quad (13)$$

Man beachte, dass bei Werten von $I_{cl} \geq 2.4 \text{ clo}$ $z > 1$ gilt, was nicht realistisch ist.

Damit gilt für die Kleidungsoberfläche A_{Be} :

$$A_{Be} = A_{Du} * (f_{cl} - 1.0 + z) \quad (\text{m}^2) \quad (14)$$

und für die unbedeckte Körperoberfläche A_{Un} :

$$A_{Un} = A_{Du} * (1.0 - z) \quad (\text{m}^2) \quad (15)$$

Es folgt schließlich für den konvektiven Wärmefluss von der bedeckten Oberfläche:

$$C_{Be} = A_{Be} * h_c * (T_a - T_{cl}) \quad (\text{W}) \quad (16)$$

mit T_{cl} als Temperatur der Kleidung in Grad Celsius und für die unbedeckte Oberfläche:

$$C_{Un} = A_{Un} * h_c * (T_a - T_{sk}) \quad (\text{W}) \quad (17)$$

mit T_{sk} als Temperatur der Haut in Grad Celsius, so dass sich der gesamte konvektive Wärmefluss ergibt nach:

$$C = C_{Be} + C_{Un} \quad (\text{W}) \quad (18)$$

Besteht Körperkontakt zu einer Oberfläche, so muss die Kleidungsoberfläche um die Auflagefläche in A_{Be} verringert werden, da kein turbulenter Wärmeaustausch stattfinden kann. Zu berücksichtigen ist nach Steadman (1979), dass die Wärmeübergangszahlen bedeckter und unbedeckter Oberflächen deutlich divergieren, da die Krümmungsradien der unbedeckten Oberflächen kleiner sind als die der bedeckten.

Konduktion bezeichnet den molekularen Wärmeaustausch, wie er durch oben beschriebene Kontaktflächen auftritt. Formal beschrieben wird er durch:

$$C_{Kd} = A_{Ko} * h_k * \Delta T \quad (\text{W}) \quad (19)$$

mit A_{K_0} als Kontaktfläche in m^2 , h_k als konduktive Wärmeübergangszahl von der Körperoberfläche zum Festkörper in W/m^2K und ΔT als Temperaturdifferenz in $^\circ C$.

A_{K_0} kann sowohl ein Teil von A_{Be} als ein Teil von A_{Un} sein. Da der Flächenanteil der Körperoberfläche mit festem Kontakt meist sehr klein und in starkem Maße vom Körperbau und der Elastizität des Kontaktmaterials abhängt sowie die Wärmeleitfähigkeiten der als Sitz- oder Liegeflächen benutzten Materialien relativ klein sind, kann der Wärmeverlust durch Konduktion vernachlässigt werden (Höppe, 1984). Mittels eines Mehrschichtenmodells ist es allerdings möglich, den molekularen Wärmefluss der einzelnen Schichten über die separaten Wärmeleitwiderstände entsprechend den Gesetzen der Reihenschaltung elektrischer Widerstände zu berechnen.

4.3.4 Wasserdampfdiffusion

Die energetische Betrachtung der Wasserdampfdiffusion geschieht durch die Untersuchung der Verdunstung des Wassers in Wasserdampf mit der Leistungsangabe nach Fanger (1972) wie folgt:

$$Q_L = L_d * m * A_{DU} * (E(T_{sk}) - VP) \quad (W) \quad (20)$$

mit	L_d :	Verdunstungswärme von Wasser	(J/kg)
	m :	Wasserdampfdurchlässigkeitskoeffizient	(kg / s m hPa)
	A_{DU} :	Körperoberfläche nach Dubois	(m^2)
	$E(T_{sk})$:	Sättigungsdampfdruck bei mittlerer Hauttemperatur	(hPa)
	VP :	Dampfdruck der Umgebungsluft	(hPa)

Q_L ist abhängig von dem Durchlässigkeitskoeffizienten für Wasserdampf, bestehend aus einem Koeffizienten für die Haut und einem für die Kleidung, von der Größe der Körperoberfläche und vom Dampfdruckgefälle zwischen Hautoberfläche und der Umgebungsluft. Die Widerstände zur Wasserdampfdiffusion von Haut und typischer Bekleidung unterscheiden sich um den Faktor 10, was die Vernachlässigung des Diffusionswiderstandes der Kleidung bei der großen Unsicherheit des Widerstandes der menschlichen Haut in vielen Fällen vertretbar macht. Ausnahmen bilden beispielsweise Neoprenanzüge, die eine Wasserdampfdiffusion durch einen nahezu unendlich großen Diffusionswiderstand der Bekleidung an der bedeckten Körperoberfläche zum Erliegen bringen.

Die Wasserdampfdiffusion gehört zur Perspiratio Insensibilis, die nicht von der Thermoregulation kontrolliert wird. Den Wasserverlust des Körpers aufgrund der gasförmigen Diffusion des H_2O durch die äußeren Hautschichten und die Kleidung nimmt der Mensch nicht wahr, da es zu keiner Benetzung der Haut oder der Bekleidung und keiner spürbaren Abkühlung der Hautoberfläche kommt (Höppe, 1984). Die Verdunstungsenergie entstammt tieferen Gewebeschichten der Haut, die keine Thermorezeptoren besitzen.

Schweißbildung kann durch vollständige Benetzung von Hautpartien die Diffusion von Unter- durch Oberhaut in Umgebungsluft verhindern, da zwischen den beiden Hautschichten kein Dampfdruckgefälle mehr besteht (Höppe, 1984).

4.3.5 Latenter Wärmefluss durch Schweißverdunstung

Laut Böll (1978) besitzt der Mensch auf fast der gesamten Hautoberfläche Schweißdrüsen mit einer Anzahl von ca. 2 Millionen und einer durchschnittlichen Dichte von $125 /cm^2$, welche unter mitteleuropäischen Bedingungen ca. 800 ml Schweiß pro Tag absondern. Verdunstet der gesamte produzierte Schweiß ohne abzutropfen, wird dem Menschen dadurch eine mittlere Verdunstungsleistung von ca. 22 W bis 279 W entzogen (Höppe, 1984). Nach Wenzel und Piekarski (1980) beträgt die maximale stündliche Schweißrate 4 l/h mit einem latenten Wärmefluss von 2678 W. Laut Wyndham et al. (1965) unterscheiden sich die Schweißraten von Männern und Frauen selbst bei Normierung auf die Körpermasse oder Körperoberfläche, was Fox (1974) mit den unterschiedlichen hormonellen Steuerungsmechanismen erklärt, da die Diskrepanzen erst nach der Pubertät auftreten. Weiterhin wird die Schweißrate durch Aktivität, Bekleidung und die thermischen und hygrischen Parameter der Umgebung beeinflusst (Höppe, 1984). Im Falle eines längeren Zeitraums großer Schweißraten kommt es zur Hydromeiosis, einem Aufquellen der Poren, und dadurch einer Behinderung des Austritts von Schweiß (Sargent, 1962). Die Trinkmenge beeinflusst die Schweißrate bei ausreichender Wassermenge des Körpers nicht (Wenzel und Piekarski, 1980).

Neben dem thermoregulatorischen Schwitzen treten nach Böll (1978) noch das emotionelle Schwitzen, welches nervös gesteuert und rein psychischer Natur ist, das gustatorische Schwitzen als Reaktion bestimmter Gewürze während der Nahrungsaufnahme und unerklärliche krankhafte Schweißausbrüche auf.

Für die Energetik betrachtet man den Wärmefluss durch Verdunstung des gesamten Schweißes und die physikalisch maximal mögliche Schweißverdunstung (E_{pot}) von der Körperoberfläche. SW ist die Menge des produzierten Schweißes, welche von der

Hauttemperatur T_{sk} und der Kerntemperatur T_c abhängt. Laut Saltin und Gagge (1971) wird folgender Ansatz am häufigsten verwendet:

Die Schweißproduktion wird von einer mittleren Körpertemperatur T_B gesteuert (Snellen, 1966; Gagge et al., 1969; Saltin und Gagge, 1971):

$$SW = a * (T_B - T_B') \quad (\text{kg/s}) \quad (21)$$

mit a als individuelle Konstante, T_B als gewichtetes Mittel aus der mittleren Haut- und Kerntemperatur in $^{\circ}\text{C}$ und T_B' als Auslösetemperatur in $^{\circ}\text{C}$.

SW ist eine rein physiologische Größe und nicht zwingend ein Maß für den Energieentzug des Körpers durch Schweißverdunstung (Höppe, 1984). Dieser latente Wärmefluss hängt auch von den Umgebungsbedingungen und von der potentiellen Verdunstung am menschlichen Körper ab. Die potentielle Verdunstung gibt unter den vorgegebenen Bedingungen bei optimaler Wasserversorgung die maximal mögliche Verdunstung an. Liegt die Schweißrate unter der potentiell verdunstenden Schweißmenge, so kann der gesamte produzierte Schweiß verdunsten und der vom Körper fließende Wärmestrom E_{phys} berechnet sich zu (Höppe, 1984):

$$E_{phys} = SW * L_d \quad (\text{W}) \quad (22)$$

Ist die Schweißrate größer als die potentiell verdunstende Wassermenge, so tropft ein Teil des Schweißes vom Körper ab, ohne ihm Energie zu entziehen. Die potentielle Verdunstung E_{pot} ist dann ein Maß für die Transpiration. Gagge (1981) gibt die potentielle Schweißverdunstung unter Verwendung des Durchlässigkeitskoeffizient der Kleidung für Wasserdampf F_{ec} wie folgt an:

$$E_{pot} = A_{DU} * F_{ec} * 0.623 * h_c / (p * c_p) * (E(T_{sk}) - VP) \quad (\text{W}) \quad (23)$$

mit c_p als spezifische Wärmekapazität der Luft in $\text{J/kg} * \text{K}$.

Die Berechnung des latenten Wärmeflusses, der dem Körper durch Schweißverdunstung Energie entzieht erfolgt aus dem Vergleich von potentieller Schweißverdunstung und physiologisch möglicher. Beide Größen sind limitierend, so dass der kleinere Wert von beiden jeweils den gesuchten Energieverlust angibt.

4.3.6 Respirationsluft

Der menschliche Körper gleicht die eingeatmete Luft auf die Kerntemperatur zum Schutz des Gewebes der Lunge und Bronchien vor Temperatur- und Feuchteschwankungen an (Höppe, 1984). In Experimenten hat sich gezeigt, dass die Temperatur der Atemluft beim Verlassen des Körpers von der Temperatur der Umgebungsluft abhängt (Leß und Pfeleiderer, 1935; Seeley, 1940; McCutchan und Taylor, 1951; Webb, 1951; Aikas und Piironen, 1963; Höppe, 1979). Viele Autoren nehmen allerdings eine konstante Expirationstemperatur zur Berechnung der Atemwärmeflüsse an, was in extremen Außenklimaten oder unter hoher Atemfrequenz nicht legitim ist (Höppe, 1984). Der Energiefluss Q_{re} zur Anwärmung und Anfeuchtung der Atemluft berechnet sich aus der Enthalpiedifferenz der Luft zwischen Eintritt und Verlassen der Atemwege (Abel et al., 1977). Der Anteil fühlbarer Wärme an dieser Enthalpiedifferenz ist eine Funktion der Inspirationstemperatur T_{in} in °C und der mittleren Expirationstemperatur bei Nasenatmung T_{exN} in °C. Damit erhält man den Fluss fühlbarer Wärme (Höppe, 1984):

$$Q_{ref} = c_p * (T_a - T_{exN}) * \rho_l * AZV \quad (W) \quad (24)$$

mit ρ_l als Dichte der Atemluft in kg/l und AZV als Atemzeitvolumen l/h.

Die Inspirationstemperatur zu Beginn der Inspiration ist immer etwas höher, als die Lufttemperatur T_a und gleicht sich ihr nur langsam an, da bei der schnellen Abfolge von Inspiration und Expiration ein Teil der ausgeatmeten Luft wieder eingeatmet wird (Höppe, 1979). Das Überströmen von wärmeren Hautoberflächen vor dem Eintritt in den Atemtrakt führt ebenso zu höheren Inspirationstemperaturen, allerdings zu keinem Fehler in der Energiebilanz, da die erwärmende Energie bereits aus dem Körper stammt. Für die Expirationstemperatur wird ebenfalls ein experimenteller Wert nach Höppe (1979) bestimmt. Der latente Anteil des Atemwärmeflusses nimmt den größten Anteil am Energieaustausch durch die Atmung unter gewöhnlichen Klimabedingungen ein. Er wird definiert als Funktion der Differenz aus den Wasserdampfdrücken der Expirations- und Inspirationsluft. Der Dampfdruck der Inspirationsluft entspricht dem der Umgebungsluft V_P , der Dampfdruck der Expirationsluft wird als Sättigungsdampfdruck bei Expirationstemperatur angenommen, unter der Berücksichtigung, dass die entlang der feuchten Schleimhaut abkühlende Luft bis zum Verlassen des Körpers immer gesättigt ist. Die Flüssigkeit auf den Schleimhäuten besitzt als Lösung einen geringeren Sättigungsdampfdruck als Wasser. Indem man den Sättigungsdampfdruck bei der linear gemittelten Expirationstemperatur verwendet, der

Sättigungsdampfdruck aber exponentiell von der Temperatur abhängt und somit einen geringeren mittleren Wasserdampfdruck durch die lineare Mittelung erhält wird der Fehler durch den Lösungseffekt berücksichtigt (Höppe, 1984).

Der gesamte Atemwärmefluss Q_{re} bei Nasenatmung ergibt sich als Summe des fühlbaren Q_{ref} und Q_{rel} Anteils zu (Höppe, 1984):

$$Q_{re} = (c_p * (T_a - T_{exN}) + 0.623 * L_d/p * (E(T_{exN}) - e_i)) * \rho_l * AZV \quad (W) \quad (25)$$

4.3.7 Wärmeaustausch durch Nahrungsaufnahme

Der Wärmeaustausch des Körpers mit der Nahrung beschreibt hier nicht die in der Nahrung gebundene Energie, sondern die fühlbare Wärme, die durch Temperaturunterschiede zwischen Nahrung und dem Inneren des menschlichen Körpers ausgetauscht wird. Dieser Wärmefluss tritt nur kurzzeitig während und nach der Nahrungsaufnahme auf, kann aber in einigen Situationen die Größenordnung anderer Terme der Energiebilanz erreichen und übersteigen. Wasser ist der Hauptbestandteil unserer Nahrung, so dass ihre Wärmekapazität in guter Näherung als die von Wasser angenommen wird. Dadurch ergibt der Wärmefluss von der Nahrung N zum Körper wie folgt (Höppe, 1984):

$$N = m_N * c_N * (T_N - T_c) * t^{-1} \quad (N) \quad (26)$$

mit	m_N :	Masse der aufgenommenen Nahrung	(kg)
	c_N :	spezifische Wärmekapazität der aufgenommenen Nahrung	(J/kg * K)
	T_N :	Temperatur der Nahrung	(°C)
	T_c :	Kerntemperatur	(°C)
	t :	charakteristische Zeit bis zur thermischen Anpassung	(s)

4.3.8 Speicherwärmefluss

Der Speicherwärmefluss S fühlbarer Wärme im menschlichen Körper ist eine Folge der „gestörten“ Energiebilanz, d.h. einer ungenügenden Entwärmung oder eines unzureichenden Schutzes vor Auskühlung (Höppe, 1984). Er bezeichnet ausschließlich den fühlbaren Wärmefluss zur Erwärmung und Abkühlung der Körpermasse, nicht die Speicherung von potentieller Energie durch Fettdepots. Physiologische Auswirkungen der Wärmespeicherung werden hinsichtlich Temperaturänderungen des Körpers und den damit verbundenen physiologischen Prozessen im menschlichen Körper betrachtet. Als Schutzmaßnahme vor

derartigen Änderungen besitzt der Mensch zur Pufferung von Energieüberschüssen oder -defiziten eine quasi poikilotherme bzw. wechselwarme Körperschale, deren Temperaturänderungen in einem großen Schwankungsbereich keine physiologischen Nachteile für die Gesamtfunktion des Körpers haben.

Der Wärmefluss S berechnet sich als Funktion der Änderung der mittleren Körpertemperatur T_M wie folgt (Höppe, 1984):

$$S = c_K * GE * \Delta T_M / \Delta t \quad (\text{W}) \quad (27)$$

mit c_K : mittlere spezifische Wärme des Körpers (J/kg * K)
 GE : Masse des Körpers (kg)
 T_M : mittlere Temperatur des Körpers (°C)
 mit: $T_M = 0.65 T_c + 0.35 T_{sk}$ nach Burton (1935)

Für die mittlere Wärmekapazität des Menschen wird ein Wert von 3.4 kJ/kg * K angenommen. Die unterschiedlichen Angaben in der Literatur sind durch verschiedene Bestimmungsverfahren und individuelle Unterschiede des Gewebes und des Körperbaus zu erklären. Die Wärmekapazität des Wassers ist von großer Relevanz, da der menschliche Körper bis zu 65% aus ihm besteht. Entscheidend für die Körperfunktionen sind die Temperaturänderungen ΔT_M :

$$\Delta T_M = S / (GE * c_K) * \Delta t \quad (^\circ\text{C}) \quad (28)$$

Im Regelfall wird S allerdings als Restglied aus der Energiebilanzgleichung nach Berechnung aller anderen Terme bestimmt (Höppe, 1984).

4.4 Kurz- und langwellige Strahlungsflüsse

Strahlungsprozesse müssen beim Wärmeaustausch des menschlichen Körper mit seiner Umgebung betrachtet werden. Dazu ist es nötig eine Strahlungsbilanz aufzustellen bestehend aus der direkten, diffusen und reflektierten kurzwelligen Sonnenstrahlung sowie der langwelligen Infrarotstrahlung von festen Oberflächen der Umgebung, der Gegenstrahlung der Atmosphäre und der körpereigenen Abstrahlung. Wird dem Körper Energie entzogen, so ist die Strahlungsbilanz negativ. Positive Werte erhält man an sonnigen Tagen im Freien oder bei Strahlungsheizung in geschlossenen Räumen. Der große Nachteil der Strahlungsflussbestimmung ist der Mangel an flächendeckenden Messungen sämtlicher

Komponenten der Strahlungsbilanz (Jendritzky et al., 1990). Um die Datenlücken zu füllen wurde ein Strahlungsmodell entwickelt, das lediglich die meteorologischen Eingangsparameter zur Berechnung der Komponenten benötigt. Der heutige Bedarf an Strahlungsinformationen wird durch entsprechende Sammlungen von Gleichungen gedeckt (Jendritzky et al., 1979).

4.4.1 Solare Strahlung

Die direkte Sonnenstrahlung gibt die Menge Sonnenstrahlungsenergie an, welche pro Zeiteinheit durch die Flächeneinheit, senkrecht zur Strahlrichtung ausgerichtet, hindurchgeht. Mittels des Lambertischen Kosinusetzes:

$$F = (I/r^2) * \cos(\gamma) \quad (\text{W/m}^2) \quad (29)$$

mit F als Strahlungsfluss durch die betrachtete Fläche in W/m^2 , I als Intensität der Strahlungsquelle in W und r als Abstand von der Strahlungsquelle in m^2 , erhält man die direkte Sonnenstrahlung gegen eine horizontale Einheitsfläche mit $I \sin(h)$, wobei h die Sonnenhöhe repräsentiert. Addiert man zu diesem Strahlungsfluss die diffuse Strahlung D der Wolken und des blauen Himmels, so erhält man die Globalstrahlung G :

$$G = I * \sin(h) + D \quad (\text{W/m}^2) \quad (30)$$

Sie ergibt sich somit aus der direkten und gestreuten oder diffus reflektierten Sonnenstrahlung (Cehak und Liljequist, 1974). Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen bewirkt eine Abschwächung der direkten Strahlung, ebenso wie die Absorption durch Wasserdampf, Ozon und Sauerstoff in der Atmosphäre. Gleiches gilt für das Absorption- und Streuverhalten an Aerosolen, welche für eine Trübung verantwortlich sind. Diese hängt von der Herkunft und dem Alter des Luftkörpers ab und ist durch einen ausgeprägten Tages- und Jahresgang gekennzeichnet. Berücksichtigt wird die Trübung mittels des Linkeschen Trübungsfaktors T (Kasten, 1980).

Man bezeichnet die diffuse Sonnenstrahlung auch als kurzweilige Reflexstrahlung und nimmt an, dass sich diese isotrop verhält. Damit soll eine Überbetonung der Vorwärtsstreuung ausgeschlossen werden, so dass die Einfallstrahlung nur bei der direkten Sonnenstrahlung relevant ist.

4.4.2 Terrestrische Strahlung

Terrestrische oder langwellige Strahlung ist die Temperaturstrahlung der Erdoberfläche und der Atmosphäre mit allen darin enthaltenen suspendierten Partikeln wie Staubteilchen, Kondensationskernen, Wolkentröpfchen und Niederschlagsteilchen. Nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz erhält man die langwellige Abstrahlung der Erdoberfläche durch σT_0^4 mit T_0 als Oberflächentemperatur in Kelvin und σ , der Stefan-Boltzmannschen Konstante mit einem Wert von $5.6696 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Da die Atmosphäre und ihre Suspensionen ebenfalls eine Temperaturstrahlung aussenden muss dieser Strahlungsfluss A bei der Bilanzierung berücksichtigt werden. Es ergibt sich die effektive Ausstrahlung E_{eff} zu:

$$E_{\text{eff}} = \sigma \cdot T_0^4 - A \quad (\text{W/m}^2) \quad (31)$$

Allgemein erhält man langwellige Ausstrahlung Umgebungsoberflächen mit dem Stefan-Boltzmannschen-Gesetz wie folgt:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_S^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (32)$$

mit T_S als Oberflächentemperatur in K und ε als Emissionskoeffizient der individuellen Oberfläche.

4.5 Mittlere Strahlungstemperatur

Zur Beschreibung der Wirkung der einzelnen Strahlungsflüsse auf den Wärmehaushalt des Menschen verwendet man die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} . Definiert wird sie bezüglich eines Menschen in festgelegter Körperhaltung und Kleidung als die einheitliche Temperatur einer schwarz strahlenden Umgebung, bei welcher ein gleicher Strahlungsverlust oder -gewinn auftritt, wie unter den gegebenen Verhältnissen (Jendritzky et al., 1979). In Innenräumen entspricht sie für gewöhnlich der Lufttemperatur, kann an besonnten Stellen im Freien jedoch mehr als 30 K darüber liegen (VDI, 1998). Die Berechnung von T_{mrt} verlangt Kenntnis von den Eigenschaften und Abmessungen der strahlenden Oberflächen einschließlich des Himmels (Kotz, 1984). Die räumliche Orientierung und Körperhaltung ist bei zu betrachtenden Person zu beachten (Sinn, 1983).

Für die Berechnung benötigt man Angaben über die direkte und diffuse Sonnenstrahlung sowie die Reflexstrahlung als solare Komponente und aus dem terrestrischen Bereich die Wärmestrahlung der Atmosphäre bzw. atmosphärische Gegenstrahlung und die Wärmestrahlung des Bodens und anderer Umschließungsflächen als terrestrische Komponenten (VDI, 1994). Die Absorptionseigenschaften von Kleidung und Hautfarbe beeinflussen im kurzwelligen Bereich die mittlere Strahlungstemperatur (Jendritzky et al. 1990).

Formal berechnet sich T_{mrt} , indem die gesamte Umgebung des Menschen in n isotherme Oberflächen mit den Temperaturen T_i ($i = 1$ bis n) und Emissionskoeffizienten ε_i unterteilt wird, denen Raumwinkelanteile F_{p-i} (Winkelfaktoren) als Wichtungsfaktoren zuzuordnen sind (VDI, 1998). Nimmt man an, dass die von einer der i -ten Flächen der Umgebung ausgehenden diffuse lang- und kurzwellige Strahlung wie folgt definiert ist (Jendritzky et al., 1990):

$$E_i = \varepsilon_i * \sigma * T_i^4 + \alpha_{ir} * D_i \quad (\text{W/m}^2) \quad (34)$$

mit α_{ir} als kurzwelliger Absorptionskoeffizient ($1 - \alpha$) der bestrahlten Körperoberfläche und D_i als diffuse Sonnenstrahlung und diffus reflektierte Globalstrahlung, dann erhält man die Definitionsgleichung:

$$\varepsilon_p * \sigma * (T_{mrt}^4 - T_{cl}^4) = \sum(\varepsilon_p * \varepsilon_i * \sigma * T_i^4 + \alpha_{ir} * D_i) * F_{p-i} - \varepsilon_p * \sigma * T_{cl}^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (35)$$

mit ε_p als langwellige Emissionszahl der Bezugsperson und T_{cl} als wirksame Oberflächentemperatur von Haut bzw. Bekleidung der Bezugsperson. Damit ist die Strahlungsbilanz der Körperoberfläche gleich der Differenz aus der Summe der von einzelnen Umgebungsflächen empfangenen Strahlungsflüsse B_i und der Emission an der Körperoberfläche. Aus obiger Gleichung folgt für die mittlere Strahlungstemperatur:

$$T_{mrt} = (\sum(\varepsilon_i * T_i^4 + \alpha_{ir} * D_i / (\varepsilon_p * \sigma)) * F_{p-i})^{0.25} \quad (\text{K}) \quad (36)$$

Langwellige Reflexstrahlung wird dabei nicht berücksichtigt, aber der dadurch entstehende Fehler ist lediglich von kleiner Größenordnung und obige Gleichung kann verwendet werden (Jendritzky et al., 1990). Sind die Temperaturunterschiede der einzelnen Oberflächen gering, so lässt sich die Gleichung entsprechend linearisieren (Jendritzky et al., 1979):

$$T_{\text{mrt}} = \sum_{i=1}^n T_i * F_{p-i} \quad (\text{K}) \quad (37)$$

Man erhält die mittlere Strahlungstemperatur als Summe der einzelnen Oberflächentemperaturen gewichtet mit ihrem entsprechenden Raumwinkelanteil.

Tritt direkte Sonnenstrahlung auf, dann erhöht sich T_{mrt} zu T_{mrt}^* :

$$T_{\text{mrt}}^* = \left(T_{\text{mrt}}^4 + f_p * \alpha_{\text{ir}} * I / (\epsilon_p * \sigma) \right)^{0.25} \quad (\text{K}) \quad (38)$$

mit f_p als Projected Area Factor.

Der Projected Area Factor ist eine Funktion der Einstrahlungsrichtung und der Körperhaltung. In der Bioklimatologie führt man eine Mittelung über den Sonnenazimut durch, damit f_p unabhängig von der Ausrichtung der Person zur Sonne ist. Underwood und Ward (1966) haben aus Vermessungen eine analytische Form entwickelt, die bei niedrigem Sonnenstand höhere und bei hochstehender Sonne niedrigere Werte liefert.

Die Bestimmung des Winkelfaktors F_{p-i} vereinfacht sich für eine große ebene Fläche ohne Horizont einschränkung derart, dass nur noch ein oberer und ein unterer Halbraum existieren, wodurch die jeweiligen Winkelfaktoren den Wert $F_{p-o}, F_{p-u} = 0.5$ annehmen (Jendritzky et al., 1990).

Mittels eines integralen Messverfahrens ist es möglich T_{mrt} zu bestimmen. Man verwendet für die integrale Strahlungsmessung ein Pyrgeometer und ein Pyranometer (Abb. 4.6). Ersteres misst die terrestrische Strahlung des betrachteten Halbraumes, letzteres die solare Strahlung. Daraus lassen sich alle benötigten Strahlungskomponenten berechnen (Höppe, 1992, Matzarakis, 2001). Die Anordnung erlaubt es dabei, durch drehen der Messgeräte um jeweils 90° , Strahlungsflüsse in den vier Himmelsrichtungen und nach oben und unten zu messen, bei einer Messhöhe von 1.1 m über dem Boden, der Höhe des Schwerpunktes eines stehenden Menschen. Gerätespezifische Einstellzeiten sind zu berücksichtigen, so dass die Gesamtmessdauer bei weniger als 10 min liegt. Mittels Wichtungsfaktoren W_i ($i = 1$ bis 6) werden die sechs Einzelmessungen auf die Oberfläche eines stehenden oder sitzenden Menschen bezogen.

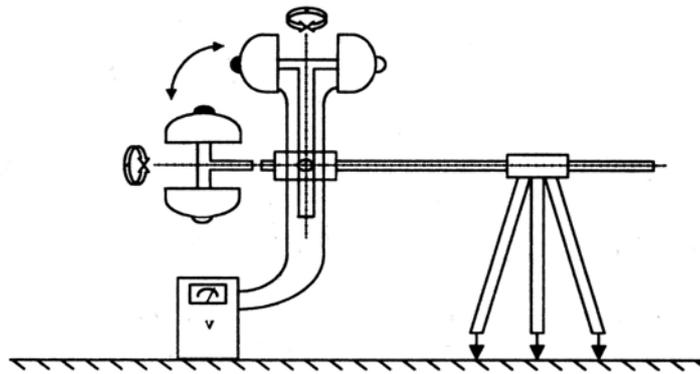


Abb. 4.6: Anordnung zur räumlichen Erfassung von kurzwelligen Strahlungsflüssen über den Einsatz eines drehbaren Pyranometer-Pyrgeometer-Messsystems (Matzarakis, 2001)

Als Basis ihrer Quantifizierung dienen die von Fanger (1972) berechneten Projektionsfaktoren mit denen für die Himmelsrichtungen ein Wichtungsfaktor von 0.22 vorliegt und für die Messungen nach oben und unten ein Wichtungsfaktor von 0.06.

$$S_{\text{Str}} = \sum_{i=1}^6 W_i * (a_k * K_i * a_l * L_i) \quad (\text{W/m}^2) \quad (39)$$

mit K_i als kurzwellige solare Strahlungsflüsse, L_i als langwellige terrestrische Strahlungsflüsse und a_l , a_k als Absorptionskoeffizienten für langwellige und kurzwellige Strahlung.

Obige Gleichung beschreibt die im Mittel vom Körper eines Menschen absorbierte Strahlungsflussdichte S_{Str} in W/m^2 . In Modellrechnungen werden die Werte der Absorptionskoeffizienten für Haut und Kleidung für terrestrische Strahlung (a_l) mit 0.97 und für solare Strahlung (a_k) mit 0.7 angesetzt (VDI, 1998).

Bei direkter Sonnenstrahlung erhöht sich die mittlere Strahlungstemperatur, erreicht ihr Maximum bereits bei 27° Sonnenhöhenwinkel, da mit zunehmendem Sonnenstand die bestrahlte Fläche kleiner wird, so dass sich auch T_{mrt} verringert. Bei Windstille bedeutet eine Änderung der mittleren Strahlungstemperatur von 1 K eine Temperaturänderung von 0.5 K. In Straßenschluchten mit Unterschieden von T_{mrt} zwischen Sonnen- und Schattenseite von über 30 K bedeutet dies thermophysiologisch einen Temperaturunterschied von mehr als 15 K (Jendritzky et al., 1990).

4.6 Meteorologische Parameter

4.6.1 Bewölkung

Die Bewölkung führt ebenfalls zu einer Beeinträchtigung der direkten Sonnenstrahlung durch den Effekt der Abschattung, welche abhängig ist von der Sonnenhöhe, der Transparenz, der Struktur und der Menge der Bewölkung. Diverse Wolkenarten und -formen müssen berücksichtigt werden. Dabei betrachtet man lediglich die hohen Wolken als eine Gruppe, die mittelhohen und tiefen Wolken als eine zweite. Während erstere bei einer großflächigen Cirrusbewölkung lediglich zu einer Abschwächung der direkten Sonnenstrahlung führt, sind in der zweiten Gruppe Sonnenhöhe und Form der Wolken entscheidende Größen, die eine totale Abschattung ermöglichen. Korrekturfaktoren müssen zur strukturellen Unterscheidung eingeführt werden (Jendritzky et al., 1979). Für die zweite Gruppe wird der Korrekturfaktor beschrieben durch einfache geometrische Überlegungen als Funktion von Sonnenhöhe γ , Bedeckungsgrad N in Zehntel und Wolkenform h : Für die Cirrusbewölkung wurde ein Korrekturfaktor verwendet, der eine Verlaufsform der Abschwächung der direkten Sonnenstrahlung durch den Einfluss der Bewölkung nach Schulze (Däke, 1972) hinzuzieht, welche aus klimatologischem Material für Globalstrahlung stammt. Als Annahme gilt, dass bei vollständig mit Cirren bedecktem Himmel 70% der direkten Sonnenstrahlung abgeschirmt werden (Jendritzky et al., 1979). Messtechnisch ist es leider nicht möglich eine genau Erfassung der Bewölkung vorzunehmen, so dass man diese Ansätze verwendet. Die Bewölkung entnimmt man den Aufzeichnungen der meteorologischen Beobachtungen, welche mittels eines geeigneten Ansatzes einen neuen Gesamtbedeckungsgrad und eine charakteristische Bewölkungsart in einer Zusammenfassung der niederen und mittelhohen Wolken sowie separat der Cirrusbewölkung ergeben.

4.6.2 Lufttrübung

Zunehmende Trübung erhöht den Anteil diffuser Himmelsstrahlung während gleichzeitig die Intensität direkter Sonnenstrahlung abnimmt. Die vermehrt auftretende kurzwellige diffuse Strahlung fällt aus allen Richtungen auf den Körper einschließlich in schattigen Bereichen ein. Abschattung in klarer Luft vermindert die Globalstrahlung stärker. Die trübe und wolkenlose Atmosphäre führt bei gleichmäßiger Verteilung der Globalstrahlung zu einer „Aufhellung“ des Schattens, wodurch eine Verringerung der Temperaturunterschiede zwischen direkt bestrahlten und beschatteten Flächen besteht. Damit werden die thermisch

bedingten Austauschbewegungen der Luft in der bodennahen Schicht gedämpft (Jendritzky et al., 1979).

4.6.3 Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit

Die Werte für Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in der bodennahen Schicht, 2 m über Grund, werden den synoptischen und klimatologischen Meldungen der Messstationen entnommen.

4.7 Veraltete Verfahren

Die Ergebnisse der Entwicklung von charakteristischen Maßzahlen zur Erfassung der wichtigsten Einflussgrößen auf den Wärmehaushalt des Menschen lieferten erste Bewertungsmöglichkeiten des thermischen Milieus (Jendritzky et al., 1979). Aufgrund der unterschiedlichen Definitionen und spezifischen Fragestellungen existiert eine Vielzahl von Größen, die lediglich mit entsprechenden Einschränkungen eingesetzt werden konnten. Exemplarisch sollen gängige Größen erläutert werden.

Einfache Komplexgrößen beschreiben die thermischen Bedingungen für den kalten Bereich aus einer Kombination von Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit und für den warmen Bereich aufgrund der dabei wichtigen Verdunstung aus einer Kombination von Lufttemperatur und verschiedenen Feuchtezahlen (Jendritzky et al., 1990).

4.7.1 Äquivalenttemperatur

Die Äquivalenttemperatur gibt den Gesamtinhalt der Luft an fühlbarer und latenter Wärme an (Jendritzky et al., 1979, Hammer et al., 1986).

$$T_{\text{eq}} = T_a + M \cdot L_d / (c_p + M_i \cdot c_w) \quad (^\circ\text{C}) \quad (40)$$

Mit M_i als Mischungsverhältnis, L_d Verdampfungswärme des Wassers in J/kg und c_w als spezifische Wärme des Wassers in J/kg K. In der Praxis genügt mit hinreichender Genauigkeit folgender Ansatz

$$T_{\text{eq}} = T_a + 1.5 \cdot v_p \quad (^\circ\text{C}) \quad (41)$$

Als Grenze zum thermisch belastenden Empfinden bei hoher Luftfeuchtigkeit und hohen Lufttemperaturen wurde ein Wert von 56 °C festgelegt, den man auf 49 °C für Kurortklimata erniedrigte.

4.7.2 Effektivtemperatur

Die Effektivtemperatur wurde von der ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) eingeführt als die Temperatur, bei der unter vorherrschender Windstille wasserdampfgesättigte Luft für einen sitzenden Menschen in adäquater Bekleidung das gleiche Behaglichkeitsempfinden bewirkt, wie die aktuellen Bedingungen durch das Zusammenwirken von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit (Hammer et al., 1986). Missnard (1948) macht folgenden Ansatz:

$$T_{\text{eff}} = T_a - 0.4 * (T_a - 10) * (1 - \text{RH}/100) \quad (^\circ\text{C}) \quad (42)$$

mit RH als relative Luftfeuchtigkeit in %.

4.7.3 Abkühlungsgröße

Die Abkühlungsgröße bezeichnet die Gesamtwärmebilanz eines wohldefinierten Körpers von 36.5 °C mit der Differenz der Wärmeströme, die pro Zeit- und Flächeneinheit bei einer bestimmten Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung, sowie Ein- und Ausstrahlung aufgenommen bzw. abgegeben werden (Stone, 1943; Flach, 1964; Steinhauser, 1964). Man erhält eine Beschreibung der menschlichen Energiebilanz ohne die physiologischen Kenngrößen zu berücksichtigen. Aufgrund messtechnischer Schwierigkeiten ermittelte Hill eine empirische Formel zur Bestimmung der Abkühlungsgröße aus einfachen meteorologischen Kenngrößen:

$$\text{AG} = (1 + j * u^k) * (36.5 - T_a) \quad (\text{J/s} * \text{cm}^2) \quad (43)$$

mit u als Windgeschwindigkeit in m/s und l, j, k als empirische Konstanten.

Damit berechnet sich lediglich die Wärmemenge, die einem Körper bei gleichbleibender Oberflächentemperatur pro Zeit- und Flächeneinheit durch turbulente Scheinleitung entzogen wird, ein einzelnes Glied der Energiebilanzgleichung (Hammer et al., 1986). Eine Verbindung zwischen Abkühlungs- und Empfindungsklassen unterliegt individuellen Schwankungen, die berücksichtigt werden müssen. Faktoren wie die Bekleidung erfahren nur eine Relevanz hinsichtlich ihrer Anpassung an Witterung und Aktivität.

4.8 Moderne Modell-Entwicklung

4.8.1 Menschliche Energiebilanzmodelle

Die Untersuchung des thermischen Einflusses der Umgebung auf den Menschen bedarf nach Büttner (1938) der Berücksichtigung aller meteorologischen Parameter. Hierzu benötigt es sogenannter „Human-Energy-Balance-Models“. Bewertungsgrößen, die lediglich einen oder nur wenige Parameter verwenden sind immens eingeschränkt in ihrer Aussagefähigkeit und können nur auf bestimmte Bedingungen angewendet werden (Höppe, 1999). Da der menschliche Körper keine spezialisierten Sensoren zur Erfassung der einzelnen klimatischen Parameter besitzt, sondern die beschriebenen Mechanismen der Thermoregulation, die von der Gesamtheit aller meteorologischen Grundgrößen abhängen, ist es notwendig ein auf den Menschen bezogenes Energiebilanzmodell zu verwenden.

4.8.2 Behaglichkeitsgleichung nach Fanger

Eines der ersten Energiebilanzmodelle stellt die thermische Komfortgleichung von Fanger dar (Fanger, 1972). Er gibt die erste Anforderung für thermischen Komfort als diejenigen meteorologischen Bedingungen an, die der Energiebilanzgleichung genügen. Dies bedeutet thermoregulatorische Arbeit, um die den Umgebungseinflüssen entsprechende konstante Kerntemperatur zu erhalten. Ebenso müssen für eine bestimmte Aktivität Hauttemperatur und Schweißrate unter Berücksichtigung der Bekleidung abgeglichen werden. Da das thermoregulatorische System variabel auf Eingangsparameter reagiert, ergibt sich aufgrund der Menge an bestimmenden Größen ein Intervall, in dem die Energiebilanzgleichung für thermischen Komfort erfüllt ist. Ebenso liegen die Umgebungsvariablen und physiologischen Parameter in einem Intervall.

Mittels einer Regressionsanalyse entwickelte Fanger einen formalen Ausdruck für die Abhängigkeit der mittleren Hauttemperatur T_{mean_s} und dem Aktivitätsniveau sowie der mittleren Schweißproduktion $Q_{\text{mean}_{sw}}$ zum Aktivitätsniveau:

$$T_{\text{mean}_s} = 35.7 - 0.032 * H/A_{DU} \quad (^\circ\text{C}) \quad (44)$$

$$Q_{\text{mean}_{sw}} = 0.42 * A_{DU} * (H/A_{DU} - 50) \quad (\text{kcal/h}) \quad (45)$$

Damit wird deutlich, dass für thermischen Komfort die Hauttemperatur mit ansteigender Aktivität abnimmt, während die Schweißrate moderat zunimmt (Fanger, 1972). In Berechnungen vor 1972 nahm man thermischen Komfort bei einer Hauttemperatur zwischen

33 °C und 34 °C und keiner Schweißproduktion an, was nur für ruhende Personen gilt. Die gemittelten Werte sollen sicher stellen, dass die beiden Parameter innerhalb ihres Intervalls für thermischen Komfort $a < t_s < b$ und $c < E_{sw} < d$ mit a, b, c, d als Anfangs- und Endpunkte individuell abhängig, unter Mittelung von $0.5 * (a + b)$ und $0.5 * (c + d)$, liegen. Dieser lineare Zusammenhang zwischen der mittleren Hauttemperatur bzw. der Schweißsekretion und der inneren Wärmeproduktion liefert beim Einsetzen in die Energiebilanzgleichung die Behaglichkeitsgleichung nach Fanger. Ergänzen sich sämtliche Terme zu Null, so herrscht thermischer Komfort (Jendritzky et al., 1979).

Fanger (1972) gibt die allgemeine Komfortgleichung wie folgt an:

$$f(H/A_{DU}, I_{cl}, T_a, T_{mrt}, VP, v, T_{sk}, Q_{sw}/A_{DU}) = 0 \quad (46)$$

mit v als relative Windgeschwindigkeit in m/s.

4.8.3 Predicted Mean Vote

Die Behaglichkeitsgleichung nach Fanger gibt lediglich Auskunft über das Zusammenwirken der einzelnen Variablen betreffend des thermischen Komforts. Für die individuell physiologisch strukturierte Gesellschaft bedarf es einer weiteren Bearbeitung dieser Daten. Anhand der Komfortgleichung nach Fanger und der psycho-physikalischen siebenstufigen ASHRAE-Skala, die eine Beziehung zwischen dem subjektiven Empfinden und jeder möglichen Kombination von Aktivitätsniveau, Bekleidungswert und den vier thermischen Umgebungsvariablen liefert, wurde folgende Einteilung entwickelt (Tab. 4.3):

Tab. 4.3: Empfindung des Menschen skaliert nach Fanger (1972)

Skalenwert	Empfindung
-3	kalt
-2	kühl
-1	leicht kühl
0	neutral
1	leicht warm
2	warm
3	heiß

Sie liefert das sogenannte Predicted Mean Vote (PMV), das angibt, welche Einschätzung das thermische Milieu im Mittel durch ein großes Kollektiv von Personen erfährt. In allgemeiner

Form wurde von Fanger folgende Beziehung für den PMV-Wert entwickelt (Jendritzky et al., 1990):

$$\text{PMV} = f(H/A_{\text{DU}}, I_{\text{cl}}, T_a, T_{\text{mrt}}, \text{VP}, v) \quad (47)$$

Aufgrund des linearen Zusammenhanges zwischen mittlerer Hauttemperatur bzw. Schweißsekretion und innerer Wärmeproduktion ist die Elimination der beiden physiologischen Parameter erlaubt (Jendritzky et al., 1979).

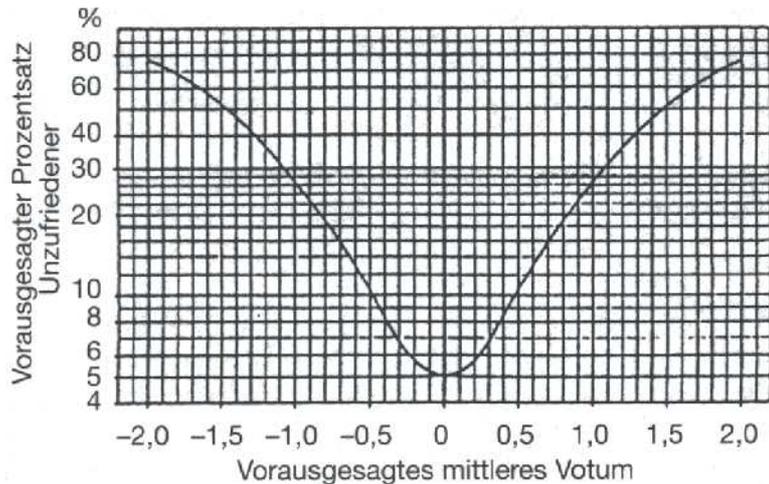


Abb. 4.7: Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener Personen (PPD) als eine Funktion des vorausgesagten mittleren Votums (PMV) (aus http://www.uni-kassel.de/fb6/agluft/seminar/SemWS0203_Bioklima2.pdf)

Die Behaglichkeitsgleichung gilt nur für stationäre Bedingungen. Ergebnisse der PMV-Auswertungen können nur im Mittel für eine größere Zahl von Personen gelten. In der Abbildung ist zu erkennen, dass sich selbst bei einem PMV-Wert von Null noch 5% der Personen im Diskomfort befinden (Abb. 4.7). Steigt der PMV-Betrag, so nimmt auch die Anzahl der sich im Diskomfort befindenden Personen an. Die interindividuelle Varianz physiologischer Größen führt dazu, dass sich bei $\text{PMV} = \pm 0.8$ gleichzeitig in einem Kollektiv Personen im Warm- und Kaltdiskomfort befinden. Oberhalb von $\text{PMV} = \pm 2.0$ empfindet sogar ein Viertel des Kollektivs noch Komfort. Über diesen Wert hinaus muss beachtet werden, dass im extremen Warmdiskomfort Schweiß nicht mehr auf der Hautoberfläche verdunstet und wirkungslos abtropfen kann, wodurch die Voraussetzungen für die Gültigkeit der Bedingungsgleichungen für Behaglichkeit verletzt werden (Jendritzky et al., 1990). Der Einfluss von Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit oder des Wasserdampfes ist nur äußerst gering. PMV ist zwar direkt proportional zur aktuellen

Umgebungstemperatur, berücksichtigt jedoch nicht die Wasserdampfdurchlässigkeit der Bekleidung, was zu beachten ist (Gagge et al., 1986).

4.8.4 Klima-Michel-Modell

Ursprünglich wurde die Behaglichkeits- und PMV-Gleichung für Innenraumverhältnisse entwickelt. Unter Freilandbedingungen müssen vor allem die komplizierteren Strahlungsverhältnisse berücksichtigt werden (Jendritzky et al., 1990). Die wesentlichen Anforderungen an ein biometeorologisches Analyse- und Bewertungsverfahren sind physiologische Relevanz und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Identische PMV-Werte sollen auch thermophysiologisch gleich sein, unabhängig von der Kombination der Eingangsgrößen. Dies lässt sich über einen Norm-Menschen, den Klima-Michel, männlich, 1.75 m groß, 75 kg schwer mit einer Oberfläche $A_{Du} = 1.91 \text{ m}^2$ erreichen, der festgelegte Eigenschaften bezüglich seiner Aktivität, Bekleidung und Exposition zur Strahlungsquelle besitzt (Jendritzky et al., 1977). Die Emissionskoeffizienten der Bekleidung bzw. der Haut betragen $\varepsilon_p = 0.97$, der kurzwellige Absorptionskoeffizient liegt bei $a_{ir} = 0.7$. Dabei bleibt die interindividuelle Varianz im Empfinden voll erhalten. Als meteorologische bzw. geophysikalische Variablen gehen in das Modell Lufttemperatur, Wasserdampfdruck, Windgeschwindigkeit in 1 m Höhe, Art und Bedeckungsgrad der Bewölkung, atmosphärische Trübung, Solarkonstante, Ortskoordinaten, Datum und Uhrzeit, Raumwinkelanteile der Umschließungsflächen, Albedo und Emissionskoeffizienten der Umschließungsflächen ein (Jendritzky et al., 1990). Mit der Kopplung der Behaglichkeitsgleichung nach Fanger mit kurz- und langwelligen Strahlungsströmen im Freien, wird PMV für Freilandbedingungen als Klima-Michel-Modell berechnet. Im Bereich der Stadtplanung wurde das KMM zum urbanen Bioklimamodell UBIKLIM erweitert (VDI, 1998), so dass eine thermophysiologische Bewertung von einzelnen Stadtstrukturen bis hin zu ganzen Städten mit einer räumlichen Auflösung von 10 m möglich ist.

4.8.5 Münchner Energiehaushaltsmodell für Individuen

Das Münchner Energiebilanzmodell für Individuen (MEMI) stellt ein thermophysiologisches Energiebilanzmodell dar. Es basiert auf der Wärmebilanzgleichung des Menschen und teilweise auf das Zwei-Schichten-Modell von Gagge (Gagge et al., 1971). Die mittlere Oberflächentemperatur der Bekleidung, die mittlere Hauttemperatur und die Schweißrate sind

in der Energiebilanzgleichung enthalten und stellen mit zwei weiteren Gleichungen ein lösbares Gleichungssystem mit drei Unbekannten dar.

Eine weitere Gleichung beschreibt den Wärmefluss vom Körperinneren zur Hautoberfläche:

$$F_{\text{csk}} = v_b * \rho_b * c_b * (T_c - T_{\text{sk}}) \quad (48)$$

mit v_b als Blutfluss vom Körperinneren zur Haut in l/sm^2 , abhängig vom Niveau der Haut- und Kerntemperatur, ρ_b als Dichte des Blutes in kg/l und c_b als spezifische Wärme des Blutes in Ws/kgK sowie den Wärmefluss von der Hautoberfläche durch die Kleidungsschichten hindurch zur Bekleidungsoberfläche:

$$F_{\text{scl}} = I_{\text{cl}}^{-1} * (T_{\text{sk}} - T_{\text{cl}}) \quad (49)$$

Mit diesen Gleichungen ist es möglich iterativ durch vorgegebene Umgebungsbedingungen jeweils die Bekleidungstemperatur T_{cl} zu berechnen, mit der die Energiebilanz erfüllt ist. Anschließend können die mittlere Hauttemperatur, die Kerntemperatur und alle weiteren Größen der Energiebilanz quantifiziert werden (Höppe, 1984). Als Eingangsparameter benötigt das Modell die meteorologischen Größen Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Wasserdampfdruck der Luft, Windgeschwindigkeit und Luftdruck, die Körperparameter Größe, Gewicht, Alter, Geschlecht, Körperposition und Aktivität sowie die Kleidungsparameter Wärmedurchgangswiderstand und den Vergrößerungsfaktor der Körperoberfläche durch die Bekleidung. MEMI liefert die Basis für eine thermophysiologische Einschätzung der thermischen Komponente des Klimas. Im Gegensatz zum Klima-Michel-Modell wird ein Individuum behandelt. Die Ergebnisse beider Modelle sind jedoch sehr ähnlich (Bründl et al., 1986), was darauf zurückzuführen ist, dass zwecks universeller Interpretation der Analysen auch beim MEMI Standardisierungen verwendet werden und in beiden Modellen die Variablen der mittleren Strahlungstemperatur die dominierenden Faktoren sind (Jendritzky et al., 1990).

Da sowohl das Klima-Michel-Modell, als auch UBIKLIM und MEMI ausschließlich auf stationäre Verhältnisse angewendet werden können, was für anwendungsorientierte Zwecke ausreichend ist, liefert das in der VDI-Richtlinie 3787 (Blatt 2, Teil 1) enthaltene instationäre Energiebilanzmodell IMEM (Höppe, 1984, 1993) zusätzliche Informationen.

4.8.6 Physiologisch Äquivalente Temperatur

Die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) ist wie das Predicted Mean Vote (PMV) ein universeller thermischer Index zur Beschreibung des thermischen Bioklimas (Matzarakis et al., 1999). Betrachtet man einen Menschen im Freien mit einer metabolischen Rate von 80 W und einem Bekleidungsfaktor von 0.9 clo, so erhält man die Wärmebilanz nach Höppe mit den entsprechenden Komponenten für die reaktive Wärmebildung durch Kälte, die Strahlungsbilanz, den turbulenten Fluss fühlbarer Wärme und latenter Wärme durch Wasserdampfdiffusion, den Fluss latenter Wärme durch Verdunstung von Schweiß, den Wärmetransport über die Atmung, die Wärmeübertragung durch Nahrungsaufnahme und die Nettowärmespeicherung für Freilandbedingungen.

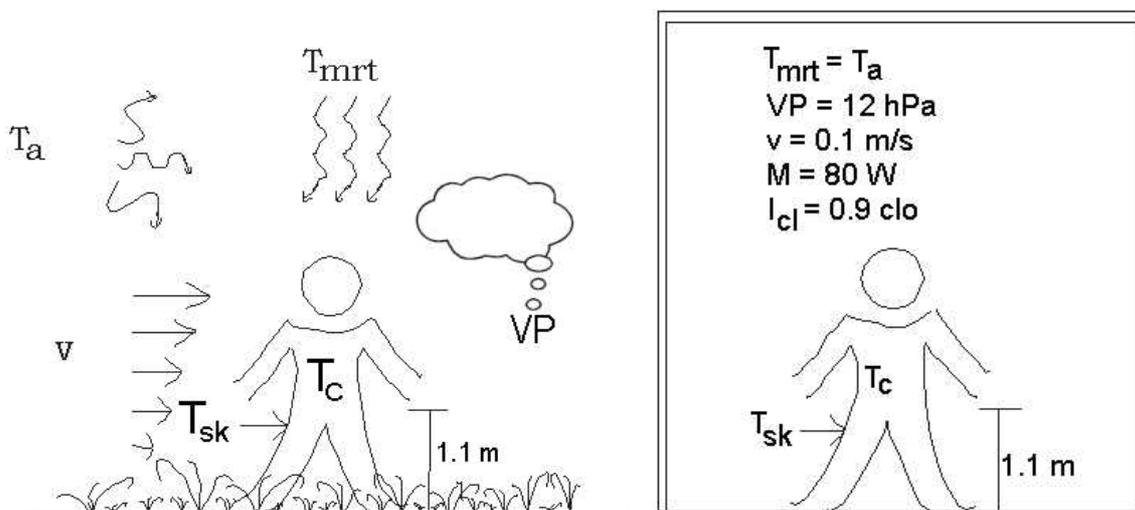


Abb. 4.8: PET-Definition: Außenbedingungen (links), Innenraumbedingungen (rechts)

Unter diesen Einflüssen liegt eine entsprechende Kern- und Hauttemperatur vor, mit denen der Mensch in einen Raum mit folgenden Eigenschaften transportiert wird: Strahlungsflüsse durch die Außenbedingungen treten nicht auf, so dass die Lufttemperatur gleich der mittleren Strahlungstemperatur ist. Die Windgeschwindigkeit wird auf 0.1 m/s gesetzt, der Wasserdampfdruck auf 12 hPa, was einer relativen Feuchte von 50% bei einer Lufttemperatur von 20 °C entspricht. PET entspricht nun der Lufttemperatur, bei der die Wärmebilanz des Menschen mit der Kern- und Hauttemperatur für Außenbedingungen im Innenraum den gleichen Wert erreicht, wie unter Außenbedingungen (Höppe, 1999) (Abb. 4.8).

Berechnet wird PET mittels MEMI für eine gegebene Kombination an meteorologischen Parametern. Durch Einsetzen der Werte für die mittlere Haut- und Kerntemperatur in MEMI und Auflösen des oben beschriebenen Gleichungssystems nach der Lufttemperatur unter den

vorgeschriebenen Bedingungen des Innenraumklimas laut Definition erhält man PET, welche äquivalent zur Lufttemperatur ist.

Es hat sich als wesentlicher Vorteil von PET herausgestellt, dass im Gegensatz zu anderen thermischen Indizes wie PMV die Einheit Grad Celsius verwendet wird. Dadurch ist dieser Index einem breiten und auch nicht fachspezifischen Spektrum an Nutzern verständlich und zugänglich.

4.8.7 Standard Effektive Temperatur (SET*)

Die Standard Effektive Temperatur (SET*), definiert als moderner thermischer Komfort Index für Innenräume, ist die Temperatur einer hypothetischen Isotherme in einer Referenzumgebung mit der Bedingung, dass die mittlere Strahlungstemperatur gleich der Lufttemperatur ist, die relative Luftfeuchtigkeit 50% beträgt, die Windgeschwindigkeit 0.15 m/s, die Person eine Bekleidung mit 0.6 clo trägt und ein metabolische Rate von 1.2 mets (1 met = 58.2 W/m²) besitzt im Vergleich zur tatsächlichen komplexen Umgebung mit den gleichen Werte für mittlere Hauttemperatur und Schweißrate. Die beiden zuletzt genannten Größen sind stark mit dem subjektiven Komfortempfinden korreliert. Zur Berechnung von SET* benötigt man die Voraussagen von mittlerer Hauttemperatur und Schweißproduktion aus dem Zwei-Schichten-Modell nach Gagge für die Person in der aktuellen komplexen Umgebung (Pickup und de Dear, 2000).

Die Anwendung von SET* auf Freilandbedingungen bedarf einiger Anpassungen, die durch den OUT_SET* Index gemacht werden, der Aussagen zulässt bezüglich einer großen Variation der Eingangsparameter Luft- und mittlerer Strahlungstemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Bekleidung und metabolischer Rate. Die komplexeren Eigenschaften der Strahlungsflüsse unter Freilandbedingungen werden durch ein weiteres Modell zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur, dem OUT_MRT, berücksichtigt.

4.9 Regionale Visualisierung bioklimatischer Größen

4.9.1 Räumliche Darstellung des Bioklimas

Das Bioklima eines Ortes wird durch die natürlichen Klimafaktoren bestimmt (Schirmer, 1981). Hierzu gehören die geographische Breite und die geographische Länge sowie die Höhe über dem Meeresspiegel. Die Orographie mit Form, Neigung und Exposition des Geländes,

die Bodenart und -bedeckung sowie Flächennutzung führen zur lokalen Ausprägung des Klimas (Wanner, 1984). Mit der Kenntnis des funktionellen Zusammenhanges zwischen Klima und Klimafaktoren könnte man das Klima eines jeden Ortes berechnen (Jendritzky et al., 1990). Die entsprechenden unbekannt mathematischen Formulierungen lassen sich über die Methode der schrittweisen Regression zu einem Modell entwickeln (Vent-Schmidt, 1980), das zum Beispiel für jeden Monat getrennt anhand des nichtlinearen Einflusses der Klimafaktoren die Eintrittswahrscheinlichkeit für Kältereize bzw. Wärmebelastung zu berechnen gestattet (Jendritzky et al., 1990). Eine objektive Beschreibung der Orographie auf der Basis einer digitalen Geländedatei mit einer Auflösung von 1 km ist aufgrund des Azimutmittels aus dem Winkel zwischen der Höhe an dem Bezugspunkt und den Höhenwerten der umliegenden 8 Rasterpunkte zu berechnen. Bei Stationen niedriger Seehöhe sind die Winkel nahe an Null liegend, während für Stationen in mittleren Höhenlagen die größten Unterschiede auftreten und über 1000 m NN nehmen negative Winkelwerte fast linear mit der Höhe zu, die Bergkuppen werden „spitzer“ (Jendritzky et al., 1990).

Beispielsweise wurde für die Erstellung einer Bioklimakarte von Europa aus Synopdaten von 921 Wetterstationen 12 Uhr MOZ-Monatsmittel für die Gefühlte Temperatur berechnet (Jendritzky und Tinz, 2003). Anhand eines multiplen nichtlinearen Regressionsmodells konnten diese in die Fläche übertragen werden (Jendritzky und Vollweiter, 1993). Man erhielt folgende Regressionsgleichung:

$$GT = a_0 + a_1 * \sin\phi + a_2 * \lambda + a_3 * \operatorname{atan}((z-H_0)/h_s) + a_4 * M \quad (50)$$

mit

- GT: Gefühlte Temperatur (°C/10)
- a₀: Regressionskonstante
- a₁,..., a₄: Regressionskoeffizienten
- φ: Geographische Breite (°)
- λ: Geographische Länge (°)
- z: Stationshöhe (m)
- H₀, h_s: empirisch bestimmte Konstanten
- M: Meeresindex

In dieser Untersuchung soll das Verfahren zur Erstellung eines multiplen linearen Regressionsmodells ebenfalls angewendet werden.

4.9.2 Relevanz von Bioklimakarten

Die Motivation zur Entwicklung der beschriebenen Modelle bestand in dem Wunsch ein objektives und physiologisch relevantes Verfahren zur Verfügung zu haben, mit dem Aussagen über die räumliche Verteilung von Wärmebelastung und Kältereiz möglich werden (Jendritzky, 1984). Bioklimakarten sollen Ärzten bei der Wahl eines geeigneten Klimamilieus für Patienten zur Kur oder Erholungszwecken helfen. Im medizinmeteorologischen Beratungsdienst unterstützen sie bei der Suche nach einem günstigeren Klimamilieu für Menschen, die aus gesundheitlichen Gründen einen Wohnungswechsel vollziehen müssen. Fremdenverkehrs- und Heilbäderverbände erhalten wichtige Informationen betreffend des Erholungswertes und der Behandlungsmöglichkeiten gewisser Krankheiten in ihrer Region. Gesundheitsbewussten Erholungssuchenden und Urlaubern, vor allem aber kranken Menschen bieten sie die Möglichkeit ein geeignetes Klimamilieu zu finden. Planungen aller Art werden qualitativ aufgewertet, da einerseits eine Verschlechterung des Lokalklimas durch menschliche Eingriffe vermeidbar ist und andererseits die Standortsuche für Krankenhäuser, Sanatorien, Kurkliniken und Erholungsheimen in günstigere Klimaregionen gewährt ist. Forstbehörden erhalten bei der Ausweisung von Klimaschutz eine bessere Beratung. Da die Witterung in den gemäßigten Breiten stark variabel ist, kann die aktuelle Witterung während einer Kur oder eines Urlaubs von den in Bioklimakarten dargestellten mittleren Verhältnissen abweichen (Trenkle, 1992).

5. UNTERSUCHUNGSMETHODIK

5.1 Standortbeschreibung

Österreich befindet sich zwischen $46^{\circ} 30'N$ und $49^{\circ}N$, sowie $9^{\circ} 30'E$ und $17^{\circ}E$ auf einer Fläche von 83855 km^2 (Abb. 5.9). Die südlichen und westlichen Landesteile werden von den Alpen geprägt, deren höchste Erhebung der Großglockner mit 3797 m ist. Im Norden erstreckt sich das bewaldete Hochland des Böhmisches Massivs entlang der Grenze zur Tschechischen Republik. Im Osten bildet die Donau ein fruchtbares Tal und eine Ebenenlandschaft, in der sich der Großteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche befindet. Die Bundesländer Kärnten und Salzburg verfügen über zahlreiche Seen.

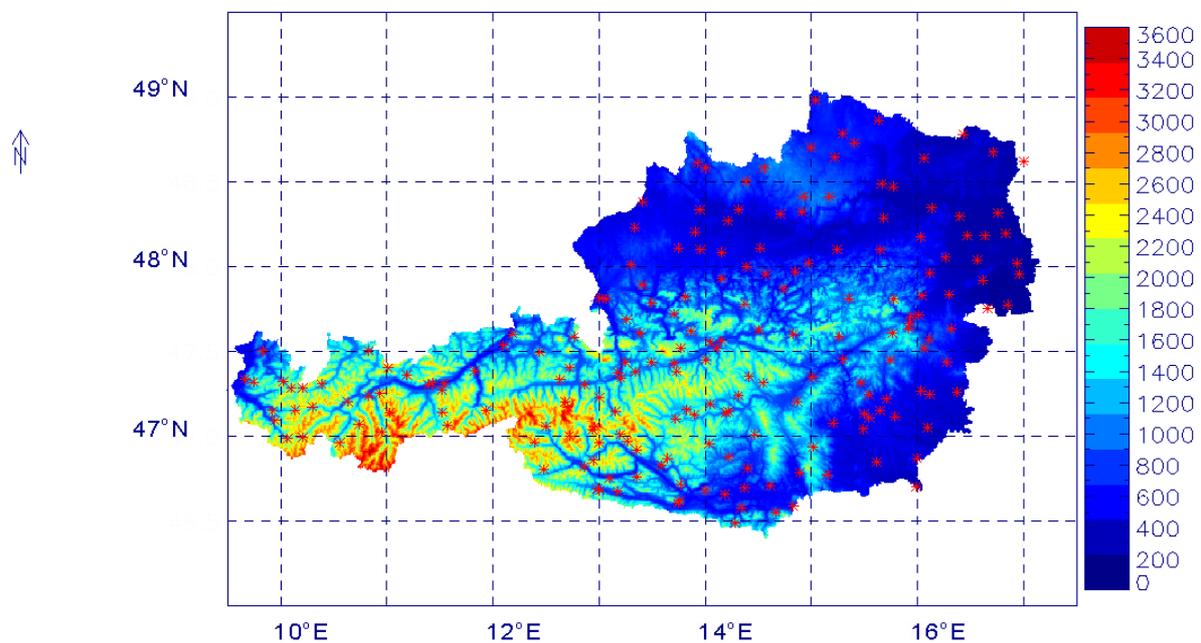


Abb. 5.9: Klimastationen Österreichs (*) in der Topographie Österreichs mit 1 km Auflösung und Höhenstufen in m

Das Klima ist kühlgemäßigt mit alpiner Prägung, entsprechend seiner Lage am Südostrand Mitteleuropas und gemäß der Gebirgsnatur des Landes (etwas 60% des Landes sind gebirgig). Nach Osten hin nimmt das Klima zunehmend kontinentale Züge an. Daher ist es in einzelne Teilräume mit eigener Klimaausprägung zu unterscheiden. Österreich hat vorwiegend gemäßigttes Übergangsklima, das in den Alpen (mit Ausnahme der inneralpinen Trockengebiete), im Alpenvorland und im Nordwesten (Mühlviertel) vom mitteleuropäisch-ozeanischen Klima mit feuchten Westwinden, im Nordosten, Osten und Südosten (Waldviertel, Weinviertel, Wiener Becken, Burgenland, Oststeirisches Hügelland,

Klagenfurter Becken) vom niederschlagsarmen pannonisch- bzw. illyrisch-kontinentalen Klima mit heißen Sommern und kalten Wintern, in den südlichsten Gebieten (Kärnten, Osttirol), auch von den Mittelmeerniederschlägen beeinflusst wird (Abb. 5.10).

Die Alpen wirken als Wetterscheide, die im Westen mit der Zentralalpenkette, im Osten im Winter mit den Nördlichen Kalkalpen, im Sommer mit dem Kamm der Niederen Tauern und Eisenerzer Alpen zusammenfällt. Die Niederschlagsmenge nimmt von Westen nach Osten ab und steigt meist mit zunehmender Höhe (Steigungsregen). Zu den niederschlagsreichsten Gebieten (Jahresmittel 2000 - 2500 mm und mehr) zählen die Außenrandgebiete der Gebirge (Nördliche und Südliche Kalkalpen) und die Käme der Hohen Tauern, zu den niederschlagsärmsten (Jahresmittel unter 600 mm) der Seewinkel im Burgenland, der nordöstliche Teil des Wiener Beckens und das Marchfeld, lokal das Weinviertel sowie das zentrale und nördliche Waldviertel, im besonderen das untere Kamptal (300 - 400 mm).



Abb. 5.10: Karte der Bundesländer Österreichs
(aus <http://www.archive.nrw.de>)

Die größte Schneemenge fällt im Januar in den Alpengebieten unter 1200 m, in den höheren Lagen verschiebt sich dies auf März und April, in den höchsten Lagen auf Mai bis Juni. Die Grenze des ewigen Schnees liegt in den Nördlichen Kalkalpen bei 2700 m, in den Hohen Tauern bei 2900 m und in den Ötztaler Alpen bei 3000 - 3100 m Seehöhe, rund 100 - 200 m höher als noch vor 100 Jahren.

In abgeschlossenen Becken, Tälern und Mulden unter 1200 m tritt im Winter häufig eine Inversionswetterlage auf. Darüber liegen jedoch in diesen Räumen die Orte mit der längsten

Sonnenscheindauer, so die Hungerburgterrasse und Seegrube bei Innsbruck und das Tiroler Mittelgebirge, die Terrassen um Aflenz, die Stolzalpe und die Südabdachung der Kärntner Mittelgebirge. Ebenso sonnenscheinreich sind das Neusiedler-See-Gebiet und das zentrale Waldviertel mit 1900-2000 h/a (vergleiche dazu: Wien 1838 h/a, Zürich 1760 h/a, Davos 1814 h/a, Berlin 1630 h/a, Hamburg 1522 h/a, Bonn 1460 h/a, Freiburg i. Brsg. 1890 h/a). Die Kältepole sind der Lungau (oberes Murtal, Tamsweg, St. Michael), das Mitterennstal und das Kamptal unterhalb von Zwettl. Lokale und regionale Windsysteme haben in den Alpen eine große Bedeutung, vor allem der Föhn, der austrocknend wirkt und ungünstigen Einfluss auf die Gesundheit vieler Menschen hat. Der Trend der Niederschläge ist in den Trockengebieten des Nordostens und Ostens weiter abnehmend, in den Alpen eher konstant oder leicht zunehmend; die Lufttemperaturen zeigen vor allem im Winter im Mittel eine deutliche Zunahme, im Sommer sind vor allem Hitze- und Trockenperioden häufiger als früher (Nagel, 1981).

5.2 Datengrundlage

Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Österreichs (ZAMG) stellte von 201 Klimastationen innerhalb der Grenzen Österreichs (Abb. 5.9) und 278 Synopstationen, die sich auf österreichischem als auch auf das Gebiet der angrenzenden Staaten verteilen (Abb. 5.11) Messwerte zur Verfügung.

Klimadaten werden in Österreich um 7 Uhr, 14 Uhr und 19 Uhr mittlerer Ortszeit (MOZ) entsprechend Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) +/- 4 Minuten pro Längengrad westlich bzw. östlich vom Bezugsmeridian 15 °E beobachtet bzw. gemessen. Für Bregenz im äußersten Westen Österreichs sind die entsprechenden Beobachtungstermine demnach 7.21 Uhr MEZ (entspricht 7.00 Uhr MOZ), für Andau im Burgenland 6.52 Uhr MEZ (entspricht 7.00 Uhr MOZ). Die Daten von Klimastationen sind nicht Online, sondern werden zweimal monatlich als Hardcopy an die ZAMG geschickt, mit dem Computer erfasst, geprüft und archiviert. Sie dienen der Aufzeichnung längerer Zeiträume. Die sogenannten Augenbeobachtungen wie Schätzung der Sichtweite, Bewölkungsschätzung in Zehntel und die besonderen Erscheinungen werden immer noch von einem Beobachter durchgeführt. Bis zu 60 % der Klimastationen sind mit teilautomatischer Datenerfassung für Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer ausgestattet.

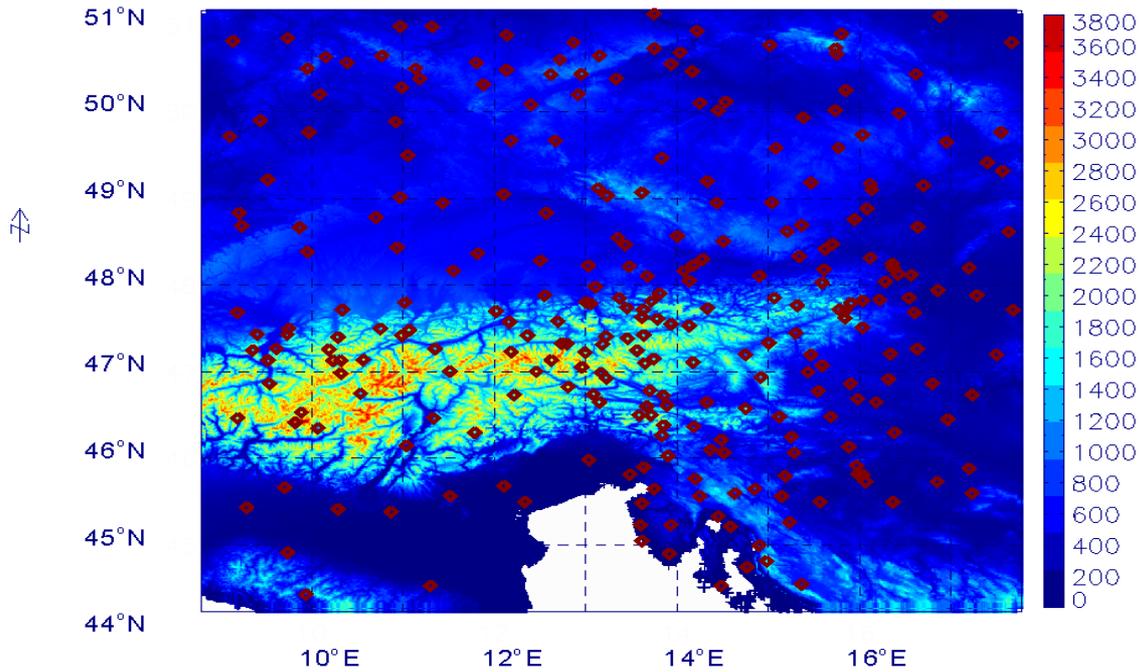


Abb. 5.11: Synopstationen als rote Diamanten dargestellt in der Topographie Mitteleuropas mit 1 km Auflösung und Höhenstufen in m

Synopstationen sollen im Gegensatz zu Klimastationen täglich Daten für die Wetterprognose liefern. Beobachtungen bzw. Messungen werden um 6 Uhr, 12 Uhr und 18 Uhr UTC (entspricht MEZ – 1 Stunde) durchgeführt und sofort an die ZAMG gesendet. Der Bewölkungsgrad wird im Gegensatz zu den Klimastationen in Achteln angegeben.

Klimastationen können auch gleichzeitig als Synopstationen genutzt werden. In dem Fall liegt sowohl ein Klimadatensatz (MOZ) als auch ein Synopdatensatz (UTC) vor. Die Messgeräte an Klima- und Synopstationen sind gleich und erlauben mittlerweile eine teilautomatische Datenerfassung. Zu den herkömmlichen Messgeräten zählen unter anderem Stationsthermometer, Max/Min-Thermometer und Ombrometer.

Jede Station liefert ein ASCII Text File, das spaltenweise Stationsnummer, Datum, Uhrzeit, Lufttemperatur in °C, relative Luftfeuchtigkeit in %, Windgeschwindigkeit in m/s und Bedeckungsgrad in 1/8 darstellt. Letzterer wurde vor den Berechnungen für Klimadaten in 1/8 umgewandelt. Der Untersuchungszeitraum beträgt fünf Jahre, beginnend vom 1. Januar 1996 bis zum 31. Dezember 2000. Messfehler oder Fehlwerte wurden mit 9999.00 bzw. NaNs belegt.

Zusätzlich zu den Messdaten lieferte die ZAMG für die betreffenden Stationen Informationen über die geographische Breite und geographische Länge in ° auf Hekto umgerechnet in vier Nachkommastellen genau, Höhe über dem Meeresspiegel in m, die Zeitzone in UTC + 1,

Hangneigung und Hangrichtung in ° auf zwei Nachkommastellen genau und Landnutzung eingeteilt in 15 Klassen (Tab. 5.4).

Tab. 5.4: Einteilung der Landnutzung in Klassen

Klasse	Nutzungsart
1	Dicht verbaut
2	locker verbaut
3	Industrie
4	Rohstoffabbau
5	Ackerland
6	Weingarten
7	Grünland
8	Wald
9	Natürliche Vegetation
10	Fels
11	Gletscher
12	Wasser
13	Park
14	heterog. Landw. Nutz.
15	Feuchtfleichen

Für das gesamte österreichische Landesgebiet liegen mit einem Gitterpunktsabstand von 1 km die geographische Breite, geographische Länge, Höhe über dem Meeresspiegel, Hangneigung, Hangrichtung und Landnutzung vor.

5.3 Das Modell RayMan

RayMan, entwickelt am Meteorologischen Institut der Universität Freiburg (Matzarakis et al., 2000), ist eine Software zur Modellierung der mittleren Strahlungstemperatur in urbanen Gebieten und zur Berechnung von thermischen Indizes. Das Modell berechnet die Strahlungsflüsse unter Berücksichtigung der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, des Bedeckungsgrades der Bewölkung, der Transmissivität der Luft und der Uhrzeit des Tag des Jahres. Verwendet werden dabei unter anderem die bereits beschriebenen Formeln (Kapitel 4) mit entsprechend eingestellter Albedo der Umgebungsflächen und ihren Neigungswinkeln. RayMan ist in der Lage die Abschattung durch Gebäude und natürliche Hindernisse bei der Berechnung der direkten und diffusen Strahlung miteinzubeziehen und dadurch komplexe Horizontstrukturen verschiedenartiger Terrains einfließen zu lassen. Anhand der Software ist es möglich beliebige Strukturen zu entwerfen und lassen damit die Bestimmung verschiedener Sky View Factors zu.

Zu Beginn der Untersuchung wurden die geographische Länge, die geographische Breite, die Höhe über NN und die Zeitzone der jeweiligen Station anhand eines Location-Files eingelesen. Der Timecode der synoptischen Stationsdateien muss vor der Modellierung mit RayMan von UTC auf MEZ synchronisiert werden, damit ein Vergleich mit den Ergebnissen aus der Berechnung der Klimastationen möglich ist. Die Beschreibung der einzelnen Spaltenparameter kann über einzelne Menü-Funktionen von RayMan vorgenommen werden (Abb. 5.12).

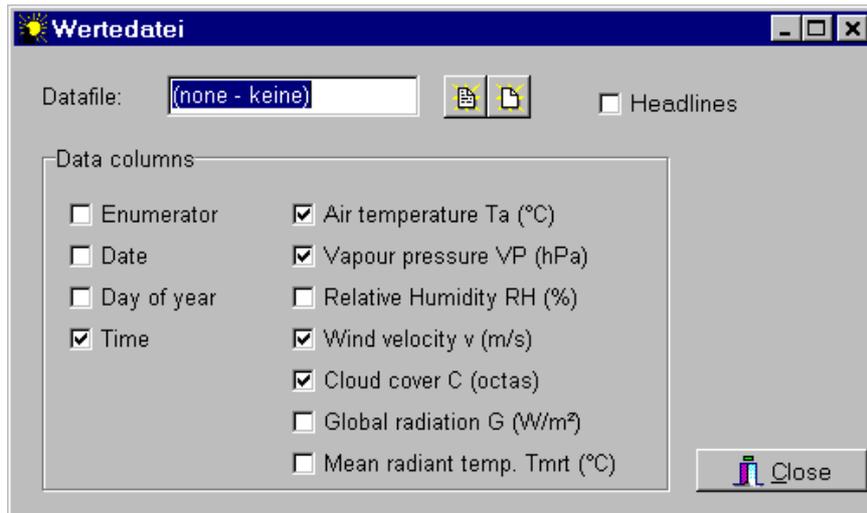


Abb.5.12: Einlesemenü der Stationsdatei

(aus <http://www.mif.uni-freiburg.de/rayman/index.htm>)

Neben dem Standard für fehlende Werte, wird die Albedo mit 20% und das Bowen-Verhältnis mit 0.5 vorgegeben. Die Berechnung von PET erfolgt unter der Annahme einer männlichen Person, 1.75 m groß, 75 kg schwer und 35 Jahre alt mit einem Bekleidungsfaktor von 0.9 clo und einer Aktivität von 80 W. Diese Größen sind für andere Untersuchungen variable einstellbar, aber wurden in diesen Berechnungen konstant gehalten. Als Ergebnis produziert RayMan eine Datei im ASCII-Format mit folgenden Informationen:

Datum, Tag des Jahres, Sonnenaufgang, Sonnenuntergang, maximale Sonnenscheindauer, tatsächliche Sonnenscheindauer, tatsächliche Globalstrahlung, tatsächliche direkte Strahlung, tatsächliche diffuse Strahlung, atmosphärische Gegenstrahlung, Eigenstrahlung, Oberflächentemperatur, Lufttemperatur, Dampfdruck, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Bedeckungsgrad, mittlere Strahlungstemperatur, PET, PMV und SET*. Es können noch weitere Ausgabeparameter deklariert werden. RayMan ist in der Lage

nicht nur verschiedene komplexe Horizonte zu berücksichtigen, sondern auch die Exposition eines Objektes gegenüber dem Strahlungsfeld seiner Umgebung.

Schwerpunkt des RayMan Modells ist unter anderem die Simulation der kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse nach der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2 (VDI, 1998). Die oben genannten Spaltenparameter dienen der Berechnung der mittlere Strahlungstemperatur. Sie ist für die Berücksichtigung der gesamten Strahlungsflüsse in der Berechnung der Energiebilanzgleichung des Menschen und den daraus folgenden thermischen Indizes wie PET nötig (Matzarakis et al., 2000). Durch Vergleich mit Messwerten konnten von RayMan modellierte Ergebnisse bezüglich ihrer realitätstreue verifiziert werden (Abb. 5.13).

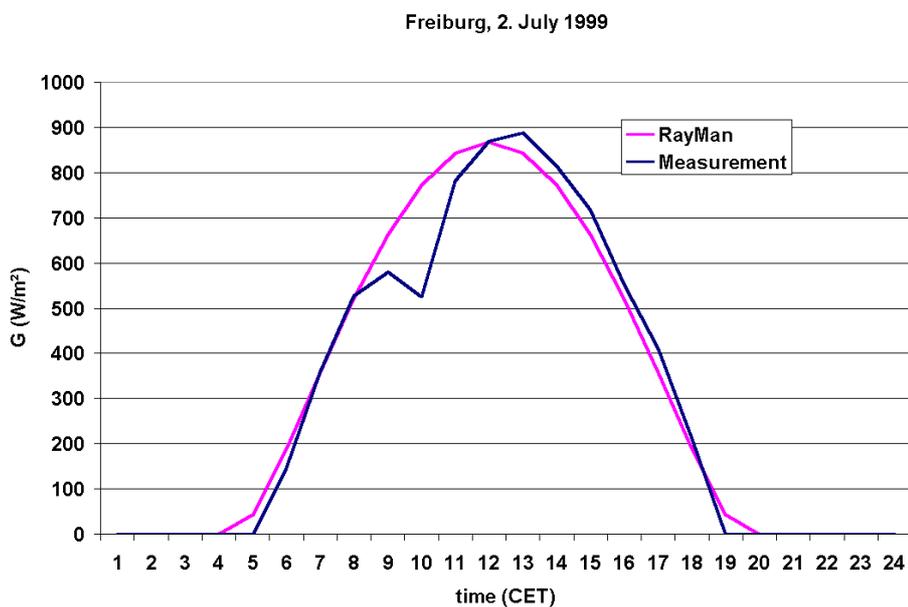


Abb. 5.13: Output der gemessenen und berechneten Globalstrahlung mit RayMan für den 2. Juli 1999 in Freiburg (Matzarakis et al., 2000)

5.4 Datenbearbeitung

Die beschriebene RayMan Ausgabedatei im ASCII-Format enthält alle notwendigen Informationen für die weitere Auswertung, welche mit Excel durchgeführt wurde. In Anbetracht des Umfangs der vorliegenden Datenmenge hat es sich als sinnvoll erwiesen die Analyse durch entsprechende Masken zu vereinfachen. Diese bieten eine Vorlage, in welche die entsprechenden Stationsdaten lediglich einzufügen sind und dann automatisch alle weiteren Größen berechnen.

In der Berechnungsmaske werden Monatsmittelwerte auf Tagesbasis für die drei Tageszeiten und für jedes Jahr von den Größen Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit,

Wasserdampfdruck, mittlere Strahlungstemperatur, Windgeschwindigkeit, PET, absolutes PET-Monatsmaximum und PET-Monatsminimum erzeugt. Anschließend erfolgt die Mittelbildung für jede Uhrzeit über die Monatsmittel der fünf Untersuchungsjahre. Über die daraus folgenden drei Mittelwerte pro Kalendermonat, entsprechend für den Zeitraum morgens, mittags und abends wurde über den Tag gemittelt, so dass man eine Jahresverteilung mit Monatsmitteln für die einzelnen Kalendermonate erhielt (Tab. 5.5). Die Berechnung der PET-Häufigkeiten auf Tagesbasis für jeden Kalendermonat hat es

Tab. 5.5: Auszug aus der Berechnungsmaske für PET-Monatsmittel für Wien – Hohe Warte

PET - Monatsmittel													
	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7 Uhr	1996	-10.2	-11.8	-5.9	5.1	13.5	19.4	17.8	15.7	6.0	3.6	-0.8	-9.8
	1997	-9.7	-4.8	-2.0	1.9	13.3	17.7	17.4	18.2	10.0	0.4	-2.1	-4.8
	1998	-5.2	-3.8	-2.7	7.2	13.6	18.9	18.1	18.2	8.4	4.4	-4.8	-8.9
	1999	-6.8	-8.0	-0.7	7.1	13.8	16.3	19.5	17.5	12.0	2.9	-4.0	-6.5
	2000	-8.5	-4.1	-1.8	8.7	15.0	18.6	16.3	19.0	9.1	5.2	-0.2	-4.5
14 Uhr	1996	-6.7	-4.0	2.5	13.8	21.3	27.2	25.6	25.9	13.0	11.9	5.3	-6.5
	1997	-6.2	4.0	7.3	10.3	21.2	25.4	24.2	29.0	22.9	10.0	4.0	-1.3
	1998	-0.3	6.6	6.1	15.2	21.7	27.2	27.0	29.4	17.2	10.9	0.9	-4.9
	1999	-2.0	-1.9	8.3	16.0	7.6	24.3	28.1	26.3	23.5	11.1	0.6	-2.4
	2000	-4.6	4.1	7.6	18.5	25.1	28.6	23.8	31.3	19.1	13.7	6.7	-1.6
19 Uhr	1996	-9.7	-9.3	-4.4	4.9	10.9	15.3	14.7	14.2	6.4	5.3	0.6	-9.6
	1997	-8.7	-2.9	-0.4	1.6	11.6	15.2	15.3	16.2	10.4	1.7	-0.5	-4.1
	1998	-4.8	0.2	-1.2	6.4	11.0	16.2	16.9	16.6	9.3	5.0	-3.9	-7.4
	1999	-6.0	-6.3	1.4	6.3	11.7	13.8	17.1	14.9	12.9	4.3	-3.2	-5.8
	2000	-7.9	-1.8	-0.1	8.8	12.8	17.5	14.7	17.6	9.8	7.4	1.7	-4.1
Jahresmonatsmittel													
7 Uhr		-8.1	-6.5	-2.6	6.0	13.9	18.2	17.8	17.7	9.1	3.3	-2.4	-6.9
14 Uhr		-4.0	1.8	6.4	14.7	19.4	26.5	25.7	28.4	19.1	11.5	3.5	-3.4
19 Uhr		-7.4	-4.0	-0.9	5.6	11.6	15.6	15.7	15.9	9.7	4.7	-1.0	-6.2
Mittel		-6.5	-2.9	0.9	8.8	14.9	20.1	19.8	20.7	12.7	6.5	0.0	-5.5
Jahresmonatsmax		-0.3	6.6	8.3	18.5	25.1	28.6	28.1	31.3	23.5	13.7	6.7	-1.3
Jahresmonatsmin		-10.2	-11.8	-5.9	1.6	7.6	13.8	14.7	14.2	6.0	0.4	-4.8	-9.8
Absolutes Max		8.3	16.0	19.5	29.2	34.3	50.0	41.6	45.9	36.6	25.5	15.2	10.4
Absolutes Min		-18.4	-22.0	-13.2	-7.2	-0.3	1.3	4.2	5.6	0.7	-11.7	-15.4	-25.5

erforderlich gemacht die PET-Tageswerte nach Monaten sortiert mit anschließender Angabe der Uhrzeiten 7 Uhr, 14 Uhr (Klima) und 13 Uhr (Synop) und 19 Uhr zusätzlich anzugeben. Dies geschieht in der Berechnungsmaske automatisch. Aufgrund der hohen Anzahl an PET-Werten im negativen Bereich ist zur Verbesserung der Klassenauflösung die Einteilung erweitert worden (Tab. 5.6). Allerdings ist unterhalb vom Empfinden extremer Kälte keine physiologisch gesteigerte Kältewahrnehmung mehr möglich.

Neben der Berechnung von PET für die ausgewählten Stationen und der Bestimmung der mittleren monatlichen PET-Verhältnisse sowie der Extrema wurden wie im Konzeptpunkt B3 des ACTIVE Zwischenberichts I zur bioklimatischen Landschaftszonierung Österreichs auch

Tab. 5.6: Links: Einteilung der PET-Klassen nach Matzarakis und Mayer (1996), Rechts: Differenzierte Einteilung der PET-Klassen

PET	Thermisches Empfinden	Thermophysiologicalische Belastungsstufe	PET	Temperaturintervall (°C)	Thermisches Empfinden
4 °C	sehr kalt	extreme Kältebelastung	-10 °C	≤ -10.0	PET_max_neg
8 °C	kalt	starke Kältebelastung	0 °C	(-10.0 - 0.0]	extremkalt
13 °C	kühl	mäßige Kältebelastung	4 °C	(0.0 - 4.0]	sehr kalt
18 °C	leicht kühl	schwache Kältebelastung	8 °C	(4.0 - 8.0]	kalt
23 °C	behaglich	keine thermische Belastung	13 °C	(8.0 - 13.0]	kühl
29 °C	leicht warm	schwache Wärmebelastung	18 °C	(13.0 - 18.0]	leicht kühl
35 °C	warm	mäßige Wärmebelastung	23 °C	(18.0 - 23.0]	behaglich
41 °C	heiß	starke Wärmebelastung	29 °C	(23.0 - 29.0]	leicht warm
	sehr heiß	extreme Wärmebelastung	35 °C	(29.0 - 35.0]	warm
			41 °C	(35.0 - 41.0]	heiß
			50 °C	>41	sehr heiß

mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent (Abb.5.14) und Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr für den Mittagstermin (Abb.5.15) in der Berechnungsmaske ausgegeben.

Zur besseren Übersicht werden Monatsmittelwerte, mittlere Monatsmaxima und –minima von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Wasserdampfdruck, Windgeschwindigkeit, mittlerer Strahlungstemperatur und PET aus den einzelnen Berechnungsabschnitten herausgelesen und separat angegeben.

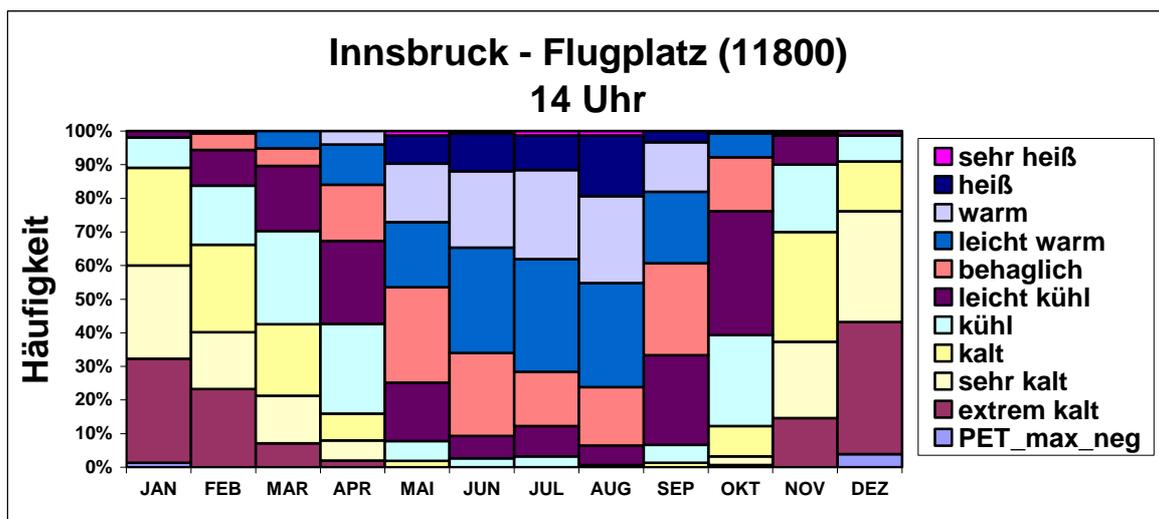


Abb. 5.14: Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 14 Uhr MOZ

Die vollständige Berechnungsmaske liefert alle Daten, die für weitere Analysen verwendet wurden. Eine Erweiterung dieser Maske enthält die bereits erwähnten grafischen Darstellungen, sowie den Jahresgang der Parameter und den Verlauf über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren, als auch im Fünfjahresmittel.

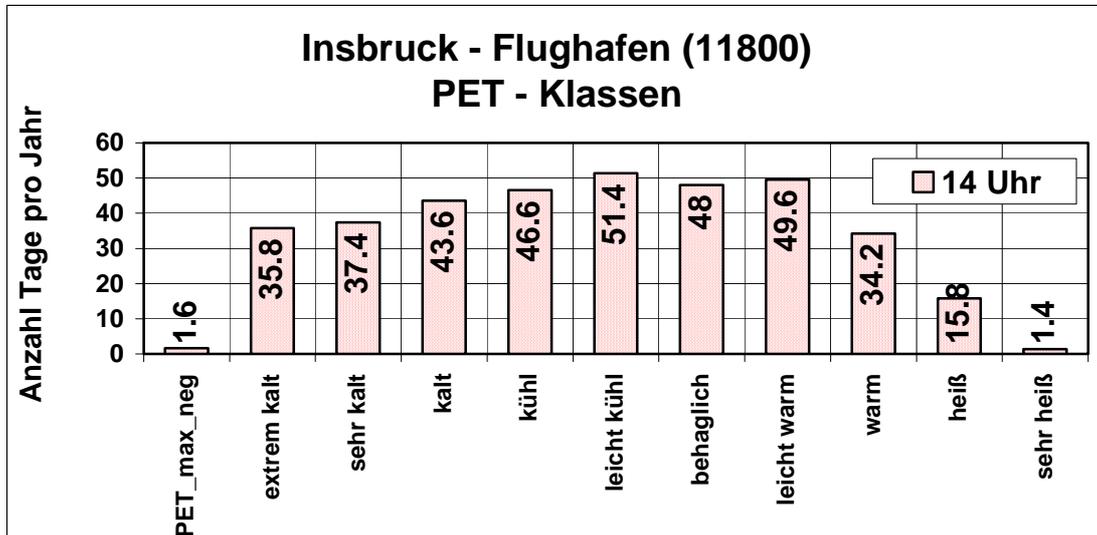


Abb. 5.15: Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr 14 Uhr MOZ

5.5 Auswahlkriterien zur Bestimmung der Analysegruppe

Bevor eine Analyse anhand der Stationen durchgeführt werden kann ist es notwendig diese betreffend ihrer Fehltag zu prüfen. Klimadaten als auch Synopdaten besitzen teilweise größere Lücken in den Messreihen, die außerdem unregelmäßig auftreten und dadurch nur eine problemorientierte Auslese von Stationen bzw. einzelnen Zeiten zulassen, um eine maximale Datenausbeute zu gewährleisten.

Die Datenvorgaben erzwingen eine Unterteilung in Klima- und Synopstationen, so dass ihr Vergleich den Untersuchungsschwerpunkt darstellt. Zweckmäßig ist die Auswahl von Standorten, die sowohl eine Klima- als auch eine Synopstation und genügend Messdaten besitzen. Daher war es notwendig, die Datenquantität anhand einer 1 % Grenze festzulegen. Zunächst wurden gemeinsame Klima- und Synopstationen ausgewählt, um anschließend zu prüfen wie viele Fehltag beide jeweils besitzen. Diese anteilig in Prozent auf die gesamte Menge der Messtage für den Zeitraum von fünf Jahren umgerechnet darf bei beiden Stationstypen nicht größer als 1 % sein (Tab. 5.7). Die Fülle des Datenmaterials überschreitet allerdings bei weitem die Vorgaben dieser Arbeit, so dass exemplarisch nur diese drei

Stationen verteilt über Österreich für eine detaillierte Untersuchung ausgewählt wurden anstatt der insgesamt 19 Stationen, die obige Bedingung erfüllen.

Tab. 5.7: Ausgewählte gemeinsame Klima- und Synopstationen nach der 1 % Regel

Klimastation	Fehlwerte (Tage)	Datenanteil (%)	Synopstation	Fehlwerte (Tage)	Datenanteil (%)
11800-INNSBRUCK-FLUGPLATZ	0	0.00	11120-INNSBRUCK-FLUGHAFEN	0	0.00
15410-SONNBLICK	0	0.00	11146-SONNBLICK	17	0.31
6300-SALZBURG-FLUGHAFEN	0	0.00	11150-SALZBURG-FLUGHAFEN	1	0.02

Mit Ausnahme von Sonnblick sind diese Stationen auch Kurorte. Die drei Stationen wurden unter Berücksichtigung der regionalen Strukturierung exemplarisch ausgewählt. Salzburg liegt im Westen Oberösterreichs im östlichen Alpenvorland auf einer Höhe von 430 m. Der klimatische Einfluss ist hier leicht maritim. Innsbruck liegt im Flusstal des Inns innerhalb der Alpen auf einer Höhe von 579 m und befindet sich in einer der Hauptföhnregionen Österreichs. Sonnblick ist mit 3105 m eine der höchsten Stationen des Landes in den Alpenregionen.

5.6 Modellierung

5.6.1 Datenprüfung

Eine Datenprüfung wurde bereits wie beschrieben bei Eingang der Messwerte bei der ZAMG durchgeführt. Als einheitliche Konvention ist 9999.00 zur Füllung von Messfehlern bzw. Datenlücken vereinbart worden. Die Klimastationen (Abb. 5.16) weisen im Vergleich zu den Synopstationen (Abb. 5.17) vollständigere Zeitreihen vom 1. Januar 1996 bis 31. Dezember 2000 auf. Zurückzuführen ist dies vermutlich auf den in Kapitel 5 beschriebenen Verwendungszweck der Datensätze und die räumliche Verteilung der Daten. Die größtenteils automatische Erfassung der Klimadaten sichert im Gegensatz zu den individuell getätigten Messungen der Synopstationen ein höheres Maß an Kontinuität. Länderspezifische Variationen der Messqualität können nur bei den Synopstationen auftreten, da sich diese auch außerhalb Österreichs befinden.

Das Erstellen von vorgefertigten Masken unter Excel war insbesondere für die Synopstationen nicht ohne zusätzlichen Aufwand möglich. Jede Station enthielt unterschiedliche Zeiträume, an denen keine Messungen vorhanden waren. RayMan gibt mit

zeilenfortlaufendem Datum die gewünschten Größen aus, so dass anschließend entsprechende Fehltag durch Leerstellen nachträglich aufgefüllt werden müssen.

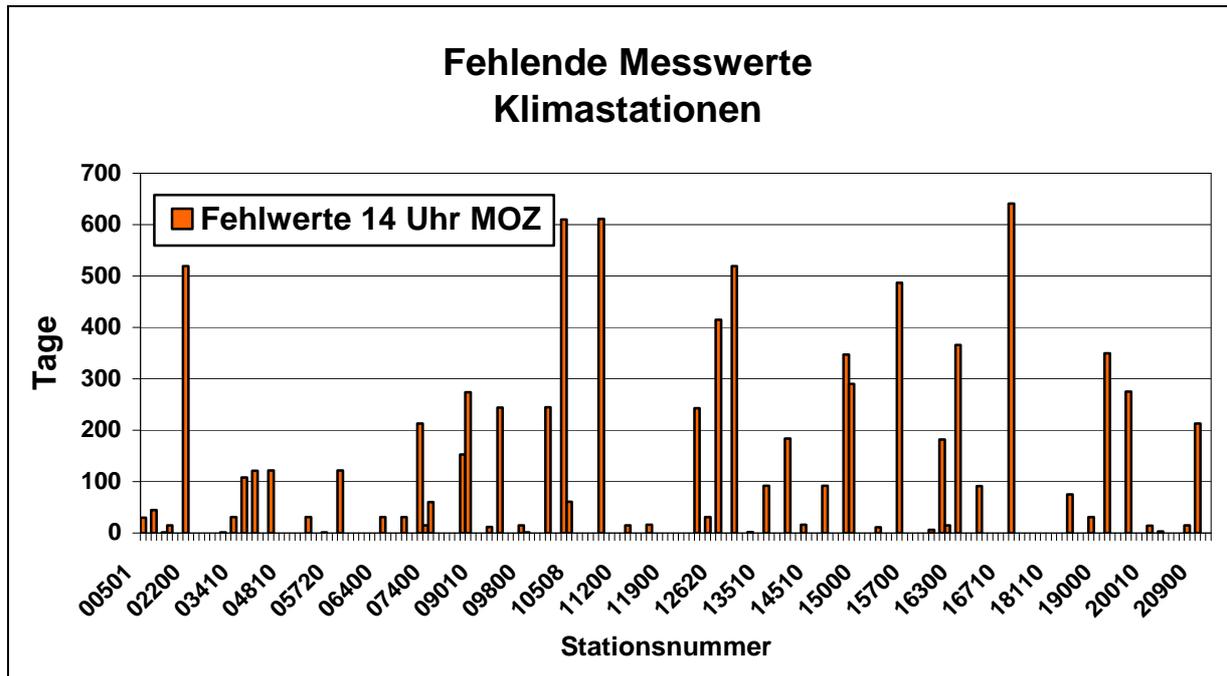


Abb. 5.16: Fehlende Messwerte aller Klimastationen für 14 Uhr MOZ des gesamten Untersuchungszeitraumes

Die große Datenmenge und zahlreiche Berechnungsprozesse haben es erforderlich gemacht Kontrollgrößen zu ermitteln. In der Berechnungsmaske wird zu allen Mittelwerten auch das mittlere Monatsmaximum und Monatsminimum angegeben. Dies ist nötig, um das Intervall zu bestimmen, in dem sich die Mittelwerte befinden und um größere Abweichungen durch Messfehler oder falsche Berechnungen sichtbar zu machen bzw. auszuschließen. Für die Berechnungen von PET wurde zusätzlich das absolute Maximum bzw. Minimum anhand der Tageswerte bestimmt.

Die Häufigkeitsverteilung der PET-Klassen bezüglich der Kalendermonate konnte auf Integrität geprüft werden, indem aus der Verteilung von PET für jeden Monat die Tagesanzahl berechnet wurde. Dadurch lassen sich Fehltag oder falsche Zellenzuweise in der Software von PET-Tageswerten leicht auffinden. Zur Ermittlung der gesamten Datengröße für eine Uhrzeit bzw. für die mittlere Angabe auf ein Jahr wurden die Tage addiert, so dass man eine Information über Datenlücken erhielt. Die Summe der einzelnen PET-Klassen in der Häufigkeitsverteilung pro Monat wurde verglichen mit den Werte in der Häufigkeitsverteilung der PET-Klassen für die drei Uhrzeiten. Da sich letztere direkt auf die

Daten bezog konnte ein Verlust von Daten während der verschiedenen Berechnungen ausgeschlossen werden.

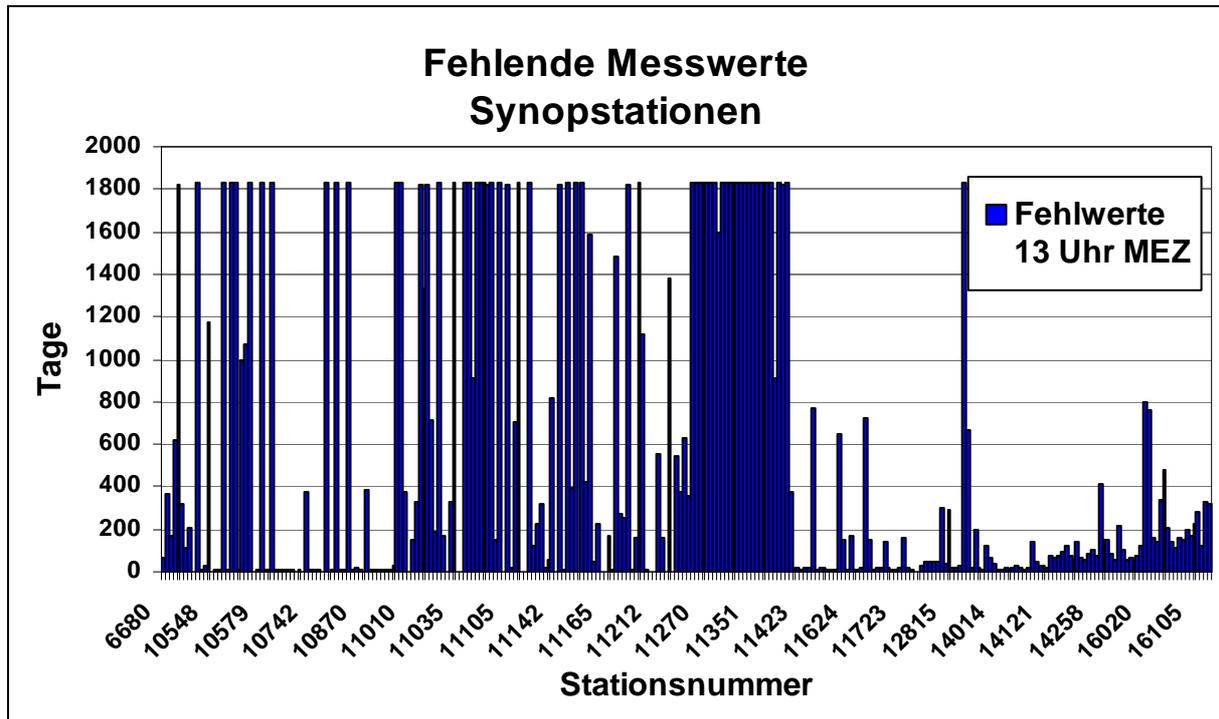


Abb. 5.17: Fehlende Messwerte aller Synopstationen für 13 Uhr MEZ des gesamten Untersuchungszeitraumes

Neben Mittel- und Absolutwerten wurden für alle Stationen Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Wasserdampfdruck, mittlere Strahlungstemperatur, Windgeschwindigkeit, Bedeckungsgrad und PET Standardabweichung, Varianz und Variationskoeffizient ermittelt. Dies ermöglicht die Kontrolle der Werte auf Plausibilität und gibt das Intervall wieder, in dem die einzelnen Größen aufzufinden sind.

5.6.2 Multiple Lineare Regression

Die beschriebene Methodik der multiplen linearen Regression wurde hier angewendet. Ziel ist es einen Regressionsansatz zu erhalten, der die Möglichkeit bietet mit den entsprechenden Regressionskoeffizienten PET auf die Fläche zu übertragen. Excel liefert eine vorgefertigte Funktion zur multiplen linearen Regression, welche auf die Termine 14 Uhr (Klima) und 13 Uhr (Synop) angewendet wurde. Zur Verfügung standen sechs Größen: geographische Breite, geographische Länge, Höhe über dem Meeresspiegel, Hangneigung, Hangrichtung und Landnutzung, die gegenüber PET einer Regressionsanalyse unterzogen wurden.

Die Regressionsgleichung unter Excel hat folgende allgemeine Form:

$$\text{PET} = m_1 * x_1 + m_2 * x_2 + m_3 * x_3 + m_4 * x_4 + m_5 * x_5 + m_6 * x_6 + b_0 \quad (^\circ\text{C}) \quad (51)$$

Die Steigungen m_1, \dots, m_6 stellen die Regressionskoeffizienten dar, b_0 den Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Ordinate und x_1, \dots, x_6 die sechs einzulesenden Größen für jeden Gitterpunkt. Neben den Koeffizienten der Gleichung enthält die Ausgabematrix noch den Standardfehler der sechs Größen und der Regressionskonstanten, sowie des prognostizierten PET-Wertes, das Bestimmtheitsmaß, eine F-Statistik mit Freiheitsgraden, die Regressionsquadratsumme und die Residual-Quadratsumme. Unterschieden wurde bei der Berechnung nach Klima- und Synopstationen, sowie nach PET-Monatsmitteln für jeden Kalendermonat und nach Anzahl der Tage für PET-Klassen (Tab. 5.8)

Tab. 5.8: Zusammengeführte PET-Klassen

PET-Klassen
<= -10
<= 0
<= 8
(8 bis 13]
(13 bis 23]
> 23
> 29
> 35

Die Korrelationskoeffizienten (Tab. 5.9) zeigen in allen Kalendermonaten einen starken bis sehr starken positiven gleichgerichteten linearen Zusammenhang. Basierend auf den Klimadaten um 14 Uhr MOZ werden in den Sommermonaten die größten Korrelationskoeffizienten erreicht und in den Wintermonaten die kleinsten. Auf Basis der Synopdaten ist ein dem umgekehrtes Verhalten zu erkennen. Für die PET-Klassen ist ein ähnlich starker bis sehr starker positiver gleichgerichteter linearer Zusammenhang sichtbar. Lediglich das PET-Intervall größer 13 °C bis 23 °C und größer 35 °C des Klimadatensatzes um 14 Uhr zeigen nur einen mittleren positiv gleichgerichteten linearen Zusammenhang.

Tab. 5.9: Bestimmtheitsmaß COR^2 und Korrelationskoeffizient COR der multiplen linearen Regression für Kalendermonate und PET-Klassen

	Klimastationen um 14 Uhr MOZ		Synopstationen um 13 Uhr MEZ	
	R^2	r	R^2	r
Januar	0.5143	0.7171	0.6922	0.8320
Februar	0.6768	0.8227	0.8213	0.9062
März	0.7655	0.8749	0.8239	0.9077
April	0.7645	0.8743	0.7701	0.8776
Mai	0.7258	0.8519	0.6964	0.8345
Juni	0.7424	0.9354	0.6476	0.8047
Juli	0.7623	0.8731	0.6667	0.8165
August	0.7343	0.8569	0.6201	0.7874
September	0.7177	0.8472	0.6912	0.8314
Oktober	0.7180	0.8474	0.8001	0.8945
November	0.6960	0.9257	0.8424	0.9178
Dezember	0.5935	0.7704	0.7569	0.8700
<= 0	0.6967	0.8347	0.8173	0.9041
(13 bis 23]	0.2045	0.4523	0.4776	0.6911
> 35	0.2069	0.4549	0.4974	0.7053

5.6.3 Regionalisierung

Die Berechnung der Regressionskoeffizienten ist in der oben beschriebenen Weise mit Excel möglich. Allerdings lässt sich mit dieser Software die Interpolation von PET in die Fläche nicht durchführen, da die Datenmenge zu groß. IDL ist in der Lage mit umfangreichen Datensätzen umzugehen und kann graphisch qualitativ hochwertige Outputs erzeugen.

Es hat sich als sinnvoll erwiesen Datensätze derart zu minimieren, dass sie lediglich die Werte eines meteorologischen Parameters besitzen. Dadurch erhält man zwar eine größere Anzahl kleinerer Dateien, die aber wesentlich schneller eingelesen werden können. Außerdem stehen die einzelnen Parameter damit zahlreichen weiteren Anwendungen zur Verfügung und müssen nicht aus Speicherplatz belastenden großen Dateien erneut herausgelesen werden. Geographische Breite, geographische Länge, Höhe über dem Meeresspiegel, Hangneigung, Hangrichtung und Landnutzung stellen die Größen x_1, \dots, x_6 der Regressionsgleichung dar, die jeweils in eine separate Datei geschrieben wurden. Messfehler oder Fehlwerte sind als 9999.0 in der jeweiligen Datei deklariert. Für jeden Kalendermonat bzw. jede PET-Klasse liegt eine Regressionsgleichung vor, mit der die Interpolation von PET in die Fläche für jeden Satz Regressionskoeffizienten separat durchgeführt werden muss. Dabei ist darauf zu achten, dass

die eingelesenen Größen x_1, \dots, x_6 auf Messfehler bzw. Fehlwerte untersucht werden. Sollte dies auf nur eine der Größen zutreffen, so muss PET mit 9999.0 deklariert werden. Für die weitere Handhabung ist es notwendig eine zweite Datei mit interpolierten PET-Werten zu erzeugen, in denen die Messfehler in NaNs umgeschrieben sind, damit IDL sie als solche erkennt. Die Datei mit PET-Werten von 9999.0 dient der Farbskalierung. Alle Fehlwerte werden aus der Datei herausgeschrieben, so dass nur noch interpolierte PET-Werte vorhanden sind, welche dann einer Farbestufe zugewiesen werden können. Zur Darstellung von PET in der Fläche muss zunächst das Gitter eingelesen werden, auf das die Werte zu projizieren sind. Jeder Gitterpunkt setzt sich aus einem Wert der Datei mit den Angaben der geographischen Breite und geographischen Länge zusammen. Bei einer Auflösung von 1 km sind dies 424000 Gitterpunkte. Jedem dieser Gitterpunkte kann nun der entsprechende interpolierte PET-Wert aus der Datei mit den aufgefüllten NaNs zugewiesen werden, so dass sich eine zweidimensionale Grafik mit der Fläche Österreichs ergibt. Die NaNs werden von dem Programm als Fehlwerte interpretiert und nicht dargestellt.

Das Gittermodell ist nicht an die Übertragung von PET gebunden, sondern kann ebenso genutzt werden, um anderen Variablen, wie zum Beispiel die Höhe über dem Meeresspiegel in einer zweidimensionalen Falschfarbengrafik zu visualisieren.

6. ERGEBNISSE

Der Schwerpunkt dieser Untersuchung konzentriert sich auf den Mittagstermin. Für den Menschen, insbesondere für den Gesundheits- oder Urlaubstouristen, prägen die klimatischen Bedingungen gegen Mittag die Auswahl eines Kur- oder Urlaubsortes, da innerhalb dieser Tageszeit Maxima in Lufttemperatur und mittlerer Strahlungstemperatur erreicht werden.

6.1 Beschreibung ausgewählter Stationen

Der thermische Komfort der Klima- und Synopstationen Innsbruck, Sonnblick und Salzburg wird im folgenden anhand des grafischen Auswertungsmaterials geschildert.

Die ausgewählten Stationen besitzen bis auf Sonnblick (11146) mit 17 Fehlwerten und Salzburg-Flughafen (11150) mit einem Fehlwert kontinuierliche Messreihen vom 1. Januar 1996 bis 31. Dezember 2000.

Deutlich ist bei allen Stationen ein periodischer Verlauf von PET innerhalb des gesamten Messzeitraums zu erkennen (Abbildungen Anhang A), mit jeweils einem Minimum innerhalb der Wintermonate und einem Maximum in den Sommermonaten. Beide Extrema unterscheiden sich in ihrer Ausprägung und ihrem zeitlichen Verlauf an jeder Station. Gegen Mittag werden im gesamten Zeitraum für die ausgewählten Stationen die höchsten PET-Werte erreicht.

Der mittlere Jahresgang zeigt tendenziell für alle Stationen hohe PET-Werte im Sommerhalbjahr und niedrige im Winterhalbjahr (Abbildungen Anhang A). Unterschiedlich stark ausgeprägt ist eine Doppelwelle des mittleren Verlaufs mit einem Maximum im Juni und einem im August. Einzelne Stationen unterliegen diesbezüglich einer geringen zeitlichen Varianz.

6.1.1 Innsbruck

Die Klimastation Innsbruck-Flugplatz (11800) befindet sich 579 m über NN bei 11° 21'E und 47° 16'N ebenso wie die Synopstation Innsbruck-Flughafen (11020).

PET liegt im Winter zwischen -8 °C und 15 °C (Abb. A.62 und Abb. A.64), wobei diese Grenzen vereinzelt unter- bzw. überschritten werden. 1998 bis 2000 sind geringfügig mehr Tage mit niedrigen PET-Werten aufgetreten als im Vergleich zu den Jahren davor. Im Dezember 1997 wurde der absolute Tiefstwert mit -15 °C erreicht. Im Sommer liegt ein

Großteil der PET-Werte zwischen 20 °C und 40 °C mit einem absoluten Höchstwert im Juli 1998 von 47 °C der Klimastation, während die Synopstation nur 42 °C zeigt.

Der mittlere Jahrgang von PET zeigt ganzjährig positive Werte (Abb. A.63 und Abb. A.65), während das absolute Minimum nur in den Sommermonaten positiv ist und das absolute Maximum 14 °C in keinem Monat unterschreitet.

Insgesamt zeigen beide Stationstypen eine ähnliche Verteilung der PET-Klassen auf (Abb. 5.14 und Abb. 6.18). Von November bis März überwiegen die Wahrnehmungen unterhalb der Behaglichkeitsstufe, während in den verbleibenden Monaten die PET-Klassen darüber zunehmen. In den Wintermonaten sind für die Synopstation prozentual leicht höhere Werte betreffend der kalten Wahrnehmungen zu erkennen, während in mit dem Übergang zu den Sommermonaten die jeweils obersten PET-Klassen der Klimastation stärker ausgeprägt sind. Markant für beide Stationstypen sind die Monate Juni bis August, in denen über 90 % des Monats von PET-Klassen oberhalb des leicht kühlen bis teilweise sehr heißen Empfindens auftreten.

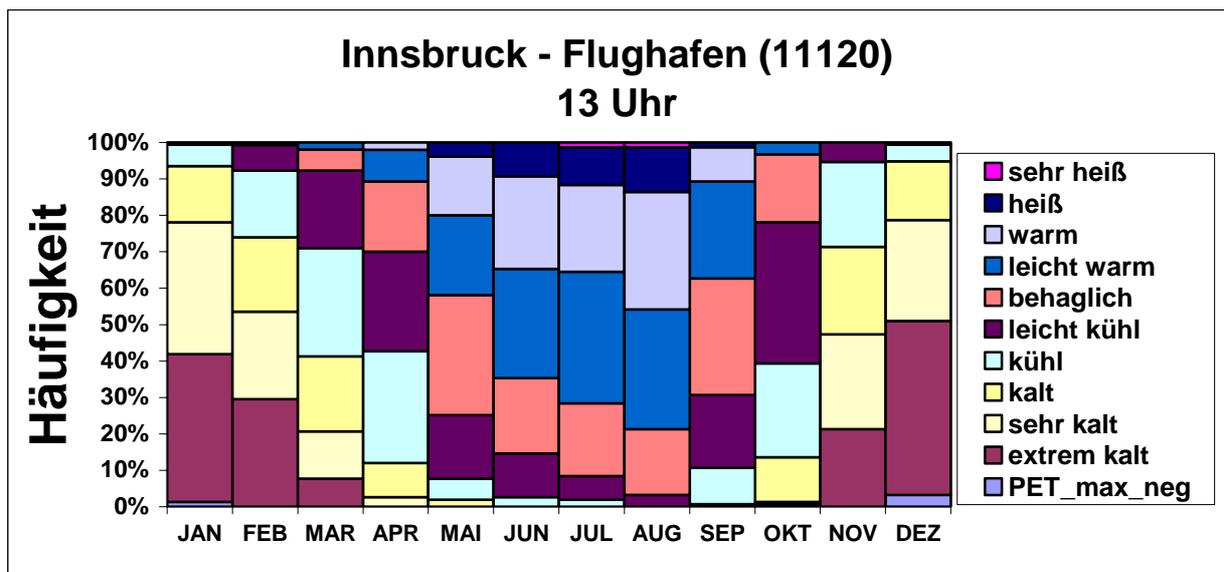


Abb. 6.18: Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 13 Uhr MEZ

Für 14 Uhr MOZ fallen 216.4 Tage im Jahr unterhalb des Behaglichkeitsempfindens (Abb. 5.15). 48 Tage werden als behaglich wahrgenommen, während 83.8 Tage als leicht warm und warm einzustufen sind und 17.2 Tage im Jahr heiß und sehr heiß sind.

219 Tage im Jahr fallen für 13 Uhr MEZ auf Klassen unterhalb des Behaglichkeitsempfindens (Abb. 6.19). 51.4 Tage werden als behaglich wahrgenommen, während 82.8 Tage warmen Klassen und 12.2 Tage im Jahr heißen Klassen zuzuordnen sind.

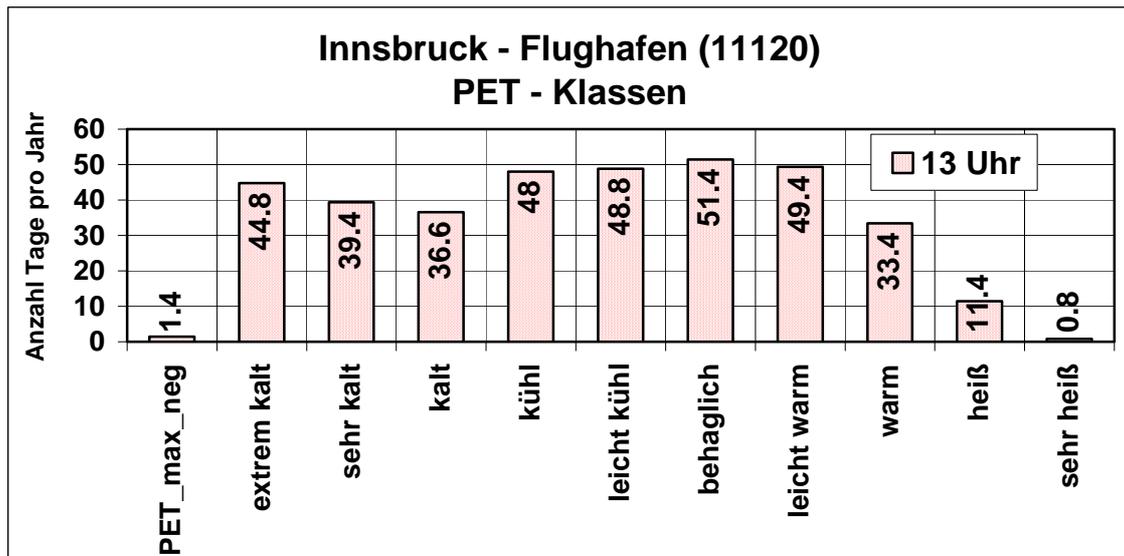


Abb. 6.19: Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr um 13 Uhr MEZ

6.1.2 Sonnblick

Die Klimastation Sonnblick (15410) befindet sich 3105 m über NN bei 12° 57'E und 47° 3'N, wie auch die Synopstation (11146).

In den Wintermonaten werden in beiden Stationstypen größtenteils PET-Werte zwischen -10 °C und -30 °C erreicht (Abb. A.66 und A.68). Die Synopstation zeigt in den Jahren 1996 bis 1998 an einzelnen Tagen PET-Werte, die bis auf 0 °C ansteigen. Im Dezember 1997 wird mit fast -40 °C in beiden Stationstypen der niedrigste PET-Wert von Sonnblick für den gesamten Untersuchungszeitraum erreicht

Der mittlere Jahresgang von PET liegt von Juni bis August zwischen -0.1 °C und 3 °C während er im verbleibenden Jahr negativ ist (Abb. A.67 und A.69). Das absolute Minimum ist in beiden Stationstypen ganzjährig negativ. Das absolute Maximum der Klimastation verläuft zwischen Januar und März fast indifferent, erreicht im Mai ein sekundäres Maximum und im August den Höchstwert, während die Synopstation Maxima im März, Juni und August zeigt.

In beiden Stationen dominieren für jeden Kalendermonat Empfindungsstufen unterhalb von kalt (Abb. 6.20 und Abb. 6.21). Deutlich sichtbar wird allerdings auch hier die Zunahme von höheren PET-Klassen, wenn sich das Jahr dem Sommer nähert. Behagliche Tage treten in beiden Stationen lediglich im August auf und liegen insgesamt unter 5 % des Monats. Die Klimastation zeigt allerdings einen geringfügig höheren Prozentsatz an.

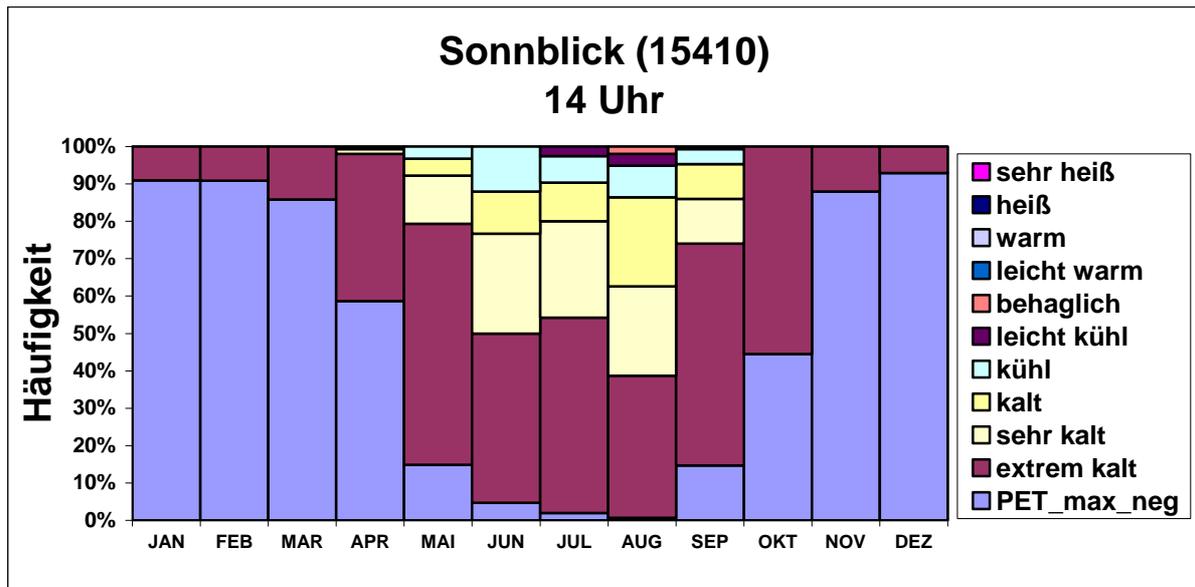


Abb. 6.20: Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 14 Uhr MOZ

Leicht kühles und behagliches Empfinden werden als höchste PET-Klassen im Sommer mit unter 7 % der Monate erreicht. Während dies für die Klimastation von Juli bis September eintritt, hat sich dieser Zeitraum für die Synopstation um einen Monat nach vorne auf Juni bis August verlagert.

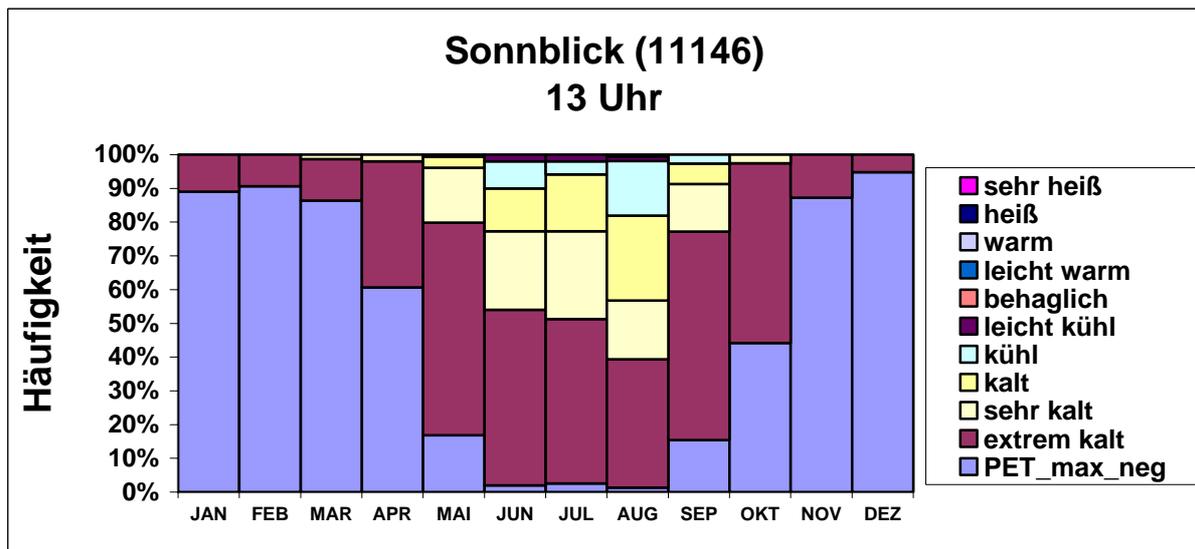


Abb. 6.21: Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 13 Uhr MEZ

364.8 Tage im Jahr liegen für die Klimastation unterhalb des Behaglichkeitsempfindens (Abb. 6.22) von denen 333.4 Tage unterhalb der PET-Klasse kalt zu finden sind. Lediglich 0.6 Tage können als behaglich eingestuft werden.

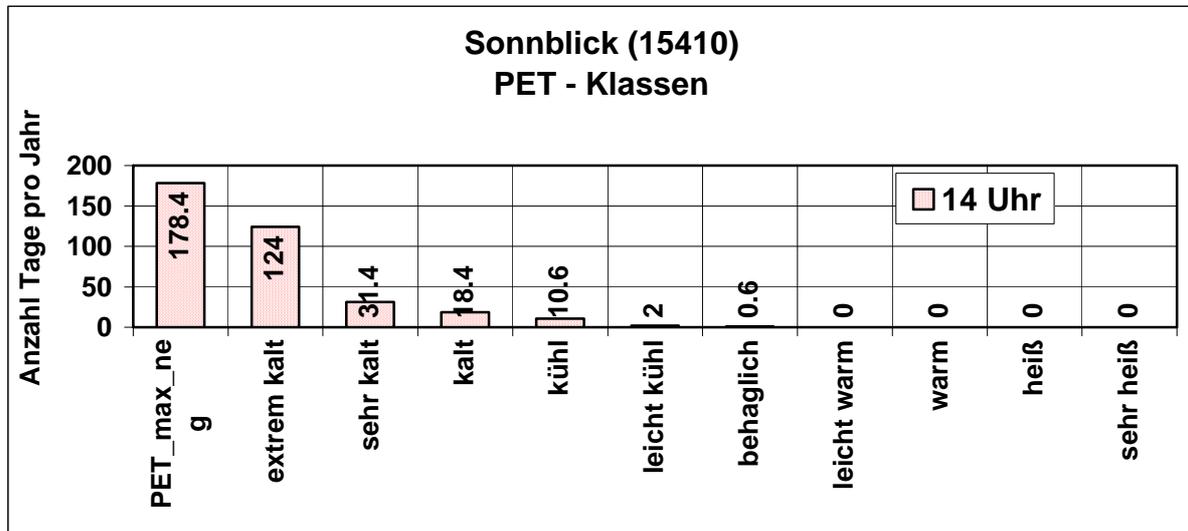


Abb. 6.22: Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr für 14 Uhr MOZ

363.4 Tage der Synopstation sind PET-Klassen unterhalb der Behaglichkeitsstufe zuzuordnen (Abb. 6.23). Davon entfallen 332.6 Tage auf Klassen unterhalb von kaltem Empfinden. Nur 0.2 Tage werden als behaglich wahrgenommen.

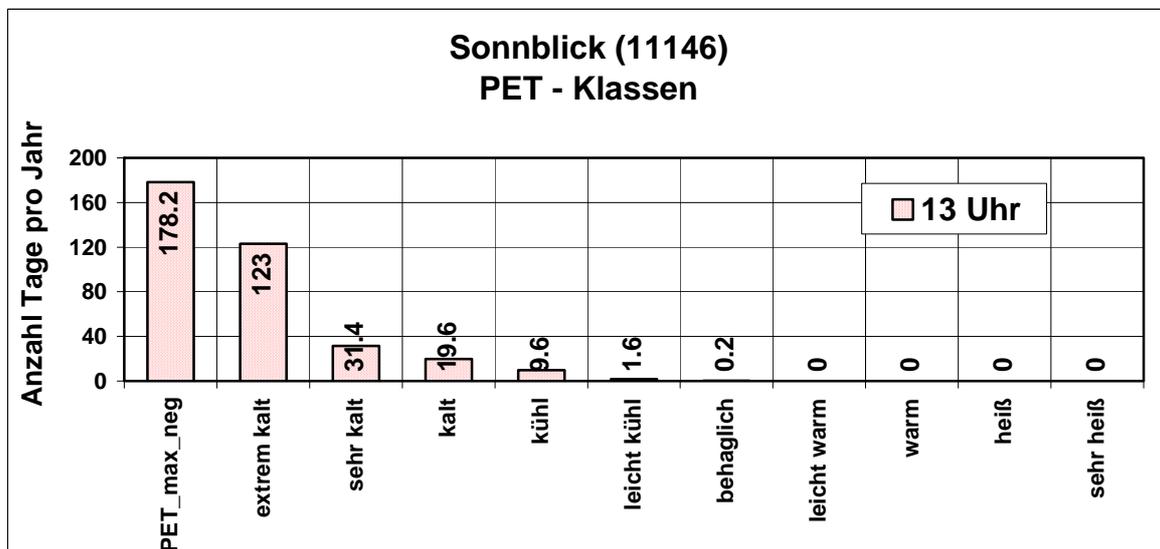


Abb. 6.23: Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr für 13 Uhr MEZ

6.1.3 Salzburg

Die Klimastation Salzburg-Flughafen (6300) befindet sich 430 m über NN bei 13°E und 47° 48'N wie auch die Synopstation Salzburg-Flughafen (11150).

Für beide Stationstypen liegt ein Großteil der PET-Werte im Winter zwischen -10 °C und 10 °C (Abb. A.70 und A.72). Der niedrigste PE-Wert im Untersuchungszeitraum für Salzburg-Flughafen wird im Dezember 1997 mit -14 °C erreicht. Die meisten PET-Werte in den Sommermonaten liegen zwischen 20 °C und 40 °C . Die Klimastation zeigt 1998 und 2000 sogar deutliche Überschreitungen der 40 °C .

Der mittlere Jahrgang von PET ist, bis auf minimale Unterschreitungen der 0 °C im Dezember und Januar, nahezu ganzjährig positiv (Abb. A.71 und A.73). Das absolute Minimum erreicht lediglich von Mai bis September positive PET-Werte bis 8 °C , während das absolute Maximum ganzjährig oberhalb von 10 °C liegt. Die Synopstation weist im Gegensatz zur Klimastation in der ersten Jahreshälfte eine Wellenstruktur mit Maxima im Februar und April auf.

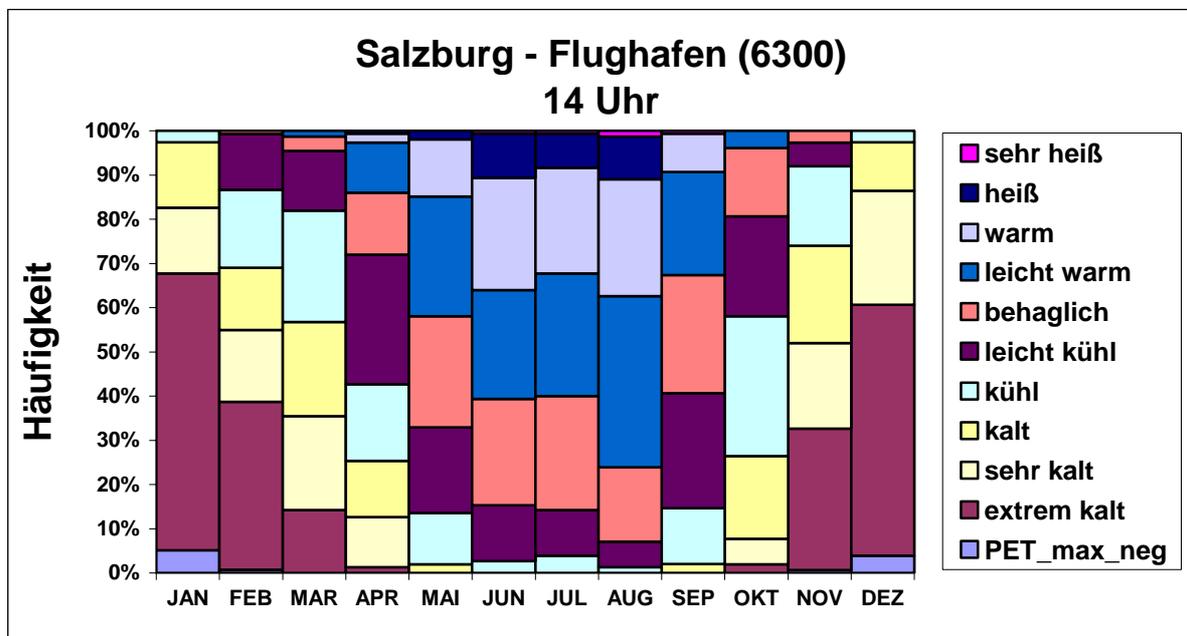


Abb. 6.24: Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 14 Uhr MOZ

Innerhalb eines Jahres werden in Salzburg alle PET-Klassen erreicht (Abb. 6.24 und 6.25). Beide Stationstypen zeigen einen deutlichen Jahresgang mit PET-Klassen unterhalb von leicht kühl überwiegend in den Wintermonaten und oberhalb von leicht kühl überwiegend in den Sommermonaten. Die Klimastation stellt von Mai bis September heiße und im August sogar sehr heiße Tage dar, während diese in der Synopstation schwächer ausgeprägt sind. Hier treten heiße Tage nur von Juni bis August auf und sehr heiße Tage werden niemals erreicht.

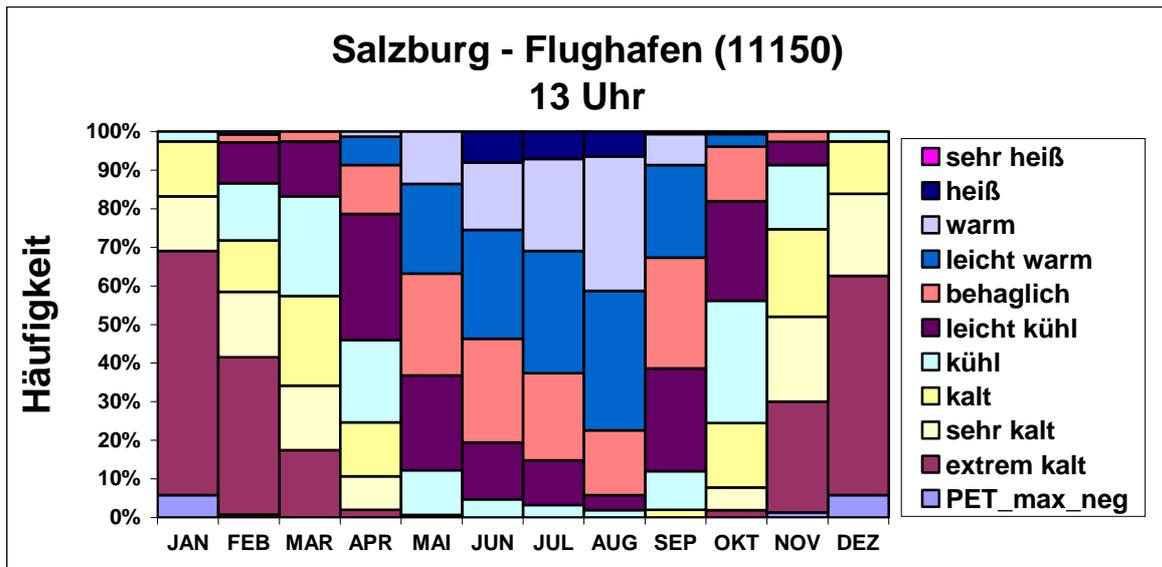


Abb. 6.25: Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 13 Uhr MEZ

229.2 Tage im Jahr werden an der Klimastation von Empfinden unterhalb der Behaglichkeitsstufe für 14 Uhr MOZ eingenommen (Abb. 6.26). 47.2 Tage werden als behaglich eingestuft und 78.8 Tage als leicht warm und warm. 10.2 Tage werden als heiß und sehr heiß empfunden.

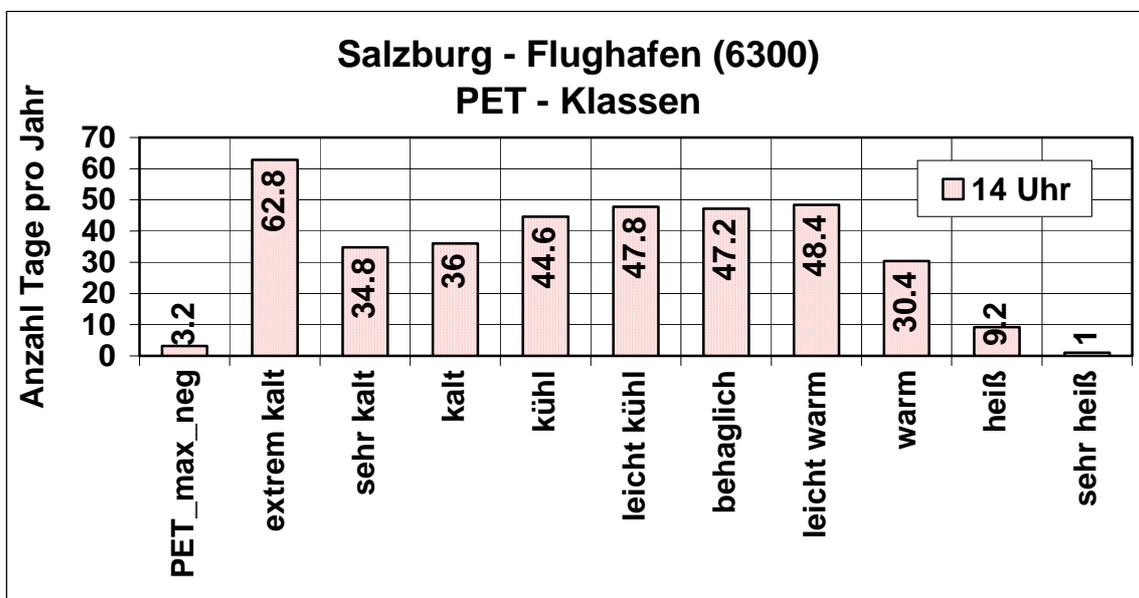


Abb. 6.26: Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr für 14 Uhr MOZ

An der Synopstation liegen 233.2 Tage im Jahr unterhalb des Behaglichkeitsempfindens und 47.4 Tage sind behaglich (Abb. 6.27). 77.8 Tage werden als leicht warm und warm sowie 6.8 Tage als heiß empfunden.

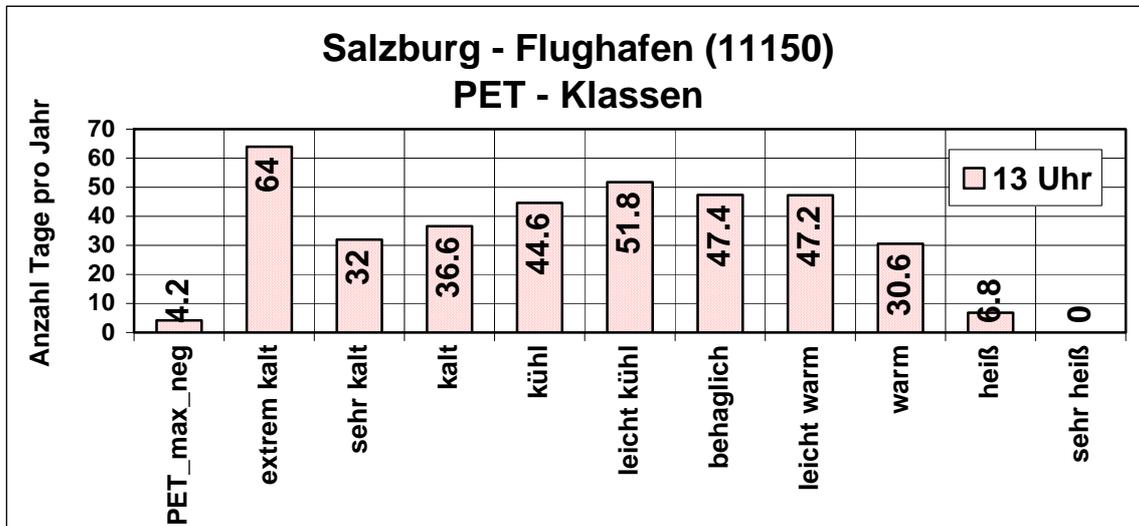


Abb. 6.27: Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr für 13 Uhr MEZ

6.2 Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET

Anhand der in Kapitel 5 beschriebenen Methodik zur Visualisierung von PET bzw. Übertragung von PET in die Fläche wurden für jeden Kalendermonat entsprechende Monatskarten erstellt, welche die Verteilung der Monatsmittelwerte wiedergeben. Die erzeugten Monatskarten liegen für 14 Uhr MOZ basierend auf Klimadaten und für 13 Uhr MEZ basierend auf Synopdaten vor.

6.2.1 Monatskarten von PET

JANUAR

Die PET-Werte der Monatskarte, basierend auf Klimadaten, liegen innerhalb eines Intervalls von -12 °C bis 4 °C (Abb. B.74). Wald- und Mühlviertel im Nordosten fallen mit minimalen Werten zwischen -2 °C und -6 °C auf. Südlich dieser Regionen bis 48 °N werden im Mittel -1 °C erreicht. Mit Beginn der Alpen sind deutlich differenzierte Strukturen zu erkennen. Im Westen werden entlang des Rheins und der Ill maximale PET-Werte erreicht. Ähnlich hohe Werte sind entlang des Inns zwischen 10 °E und $12\text{ ° }30\text{ 'E}$, der Salzach zwischen $12\text{ ° }12\text{ 'E}$ und $13\text{ ° }12\text{ 'E}$, sowie entlang der Drau und Gail in Kärnten sichtbar. Der Südosten der Steiermark zeichnet sich durch ebenfalls hohe PET-Werte bis 2 °C aus. Zwischen den beiden

Bundesländern sind bei $14^{\circ} 36' E$ und $15^{\circ} E$ stärkere Rückgänge von PET zu erkennen, die in allen nachfolgenden Karten markant als Zunge niedrigerer PET-Werte auffallen. Entlang aller Linien hoher PET-Werten befinden sich in fraktalähnlichem Verlauf kleinere Arme mit Werten knapp unterhalb des Maximums. Im Bereich der Alpen nimmt PET bei geringen horizontalen Änderungen stark ab.

PET, basierend auf Synopdaten, verläuft im Januar innerhalb eines Intervalls von $-14^{\circ} C$ bis $4^{\circ} C$ (Abb. B.75). Ein Großteil der negativen PET-Werte befindet sich innerhalb des Alpenraumes zwischen $46^{\circ} 42' N$ und $47^{\circ} 36' N$. Über $3^{\circ} C$ werden im Westen erreicht. Weitere Höchstwerte sind in Kärnten und der Steiermark zu erkennen. Zahlreiche Arme hoher PET-Werte mit einer Vielzahl von Verzweigungen dringen in den Alpenraum vor und sind in allen Karten sichtbar. Der Übergang zu geringen PET-Werten geschieht sehr abrupt. Im Süden Ober- und Niederösterreichs werden $-2^{\circ} C$ bis $1^{\circ} C$ erreicht, während im Mühl- und Waldviertel deutlich niedrigere Grade herrschen. Dieses Verhalten ist auch in den restlichen Kalendermonaten markant sichtbar. Zwei Zungen geringer PET-Werte dringen in allen Karten in den Süden Kärntens und den Südwesten der Steiermark vor.

FEBRUAR

PET liegt in der Monatskarte, basierend auf Klimadaten, zwischen $-16^{\circ} C$ und $9^{\circ} C$. Die im Januar beschriebenen Tendenzen haben sich weiter verstärkt (Abb. B.76). Wald- und Mühlviertel zeigen zwischen $-1^{\circ} C$ und $2^{\circ} C$. Sie sind umgeben von Werten zwischen $2^{\circ} C$ und $6^{\circ} C$ die südlich bis 500 m über NN vordringen, und dann nur durch einzelne Vorstöße in die Alpen weiter sichtbar sind. Die höchsten PET-Werte treten im Westen entlang des Rheins und im Südosten Kärntens, der Steiermark und des Burgenlandes auf. Die niedrigsten PET-Werte sind entlang der Südwestgrenze Österreichs, sowie geringfügig in Mittelösterreich zu erkennen.

PET verläuft in der Monatskarte, basierend auf Synopdaten, innerhalb eines Intervalls von $-17^{\circ} C$ bis $7^{\circ} C$ (Abb. B.77). Ein Großteil der negativen PET-Werte befindet sich innerhalb des Alpenraumes zwischen $46^{\circ} 42' N$ und $47^{\circ} 36' N$. Über $6^{\circ} C$ werden im Westen erreicht. Weitere Höchstwerte sind in Kärnten, der Steiermark und dem Burgenland zu erkennen. Die zahlreiche Vorstöße hoher PET-Werte und deren Verzweigungen im Alpenraum befinden sich oberhalb von $1^{\circ} C$. Im Süden Ober- und Niederösterreichs werden $0^{\circ} C$ bis $5^{\circ} C$ erreicht und im Süden Kärntens sowie im Südosten der Steiermark sind feine Strukturen höchster PET-Werte sichtbar.

MÄRZ

PET variiert in der Monatskarte, basierend auf Klimadaten, zwischen -17 °C und 15 °C (Abb. B.78). Wald- und Mühlviertel treten hervor durch geringere PET-Werte zwischen 2 °C und 6 °C , während in ihrer näheren Umgebung hauptsächlich 6 °C bis 10 °C zu erkennen sind. Dies trifft auf das anschließende südliche Ober- und Niederösterreich bis 500 m über NN zu. Weiter südlich oberhalb von 500 m sind nur einzelne Ausläufer sichtbar, die schnell in Regionen mit negativem PET übergehen. Entlang der genannten Flussläufe und Regionen im Süden Österreichs treten über 9 °C auf. Die höchsten PET-Werte werden im äußersten Westen entlang des Rheins erreicht. Gebiete mit minimalen PET-Werten stimmen mit denen der vorherigen Monate überein.

PET liegt in der Monatskarte, basierend auf Synopdaten, zwischen -16 °C und 11 °C mit den niedrigsten Werten innerhalb des Alpenraumes zwischen $46\text{ ° } 42\text{ 'N}$ und $47\text{ ° } 30\text{ 'N}$ (Abb. B.79). Über 10 °C werden im Westen erreicht. PET-Werte über 4 °C sind im Süden Kärnten, im Südosten der Steiermark und dem Burgenland zu erkennen sowie im Süden Ober- und Niederösterreichs. Die zahlreiche Vorstöße hoher PET-Werte und deren Verzweigungen im Alpenraum befinden sich oberhalb von 2 °C .

APRIL

Es treten PET-Werte in der Monatskarte, basierend auf Klimadaten, zwischen -13 °C und 20 °C auf (Abb. B.80). Im Wald und Mühlviertel werden bis zu 14 °C erreicht, während entlang der Bundesländergrenze von Ober- und Niederösterreich, die diese beiden Viertel voneinander trennt, nur 9 °C anzutreffen sind. Im Umland bis 48 °N ist PET auf über 16 °C angestiegen. Südlich davon haben sich die einzelnen Vorstöße von 16 °C geringfügig verbreitert. Die höchsten PET-Grade treten im Westen entlang des Rheins auf, im Südosten Kärntens, der Steiermark und des Burgenlandes. Im Bereich der Alpen sind die Ausläufer hoher PET-Werte auf über 14 °C angestiegen.

PET nimmt Werte zwischen -12 °C und 16 °C in der Monatskarte, erstellt mittels Synopdaten, an (Abb. B.81). Ein Großteil der negativen PET-Werte befindet sich innerhalb des Alpenraumes zwischen $46\text{ ° } 42\text{ 'N}$ und $47\text{ ° } 24\text{ 'N}$. Dies ist in der umschriebenen Region bis September festzustellen. Über 15 °C werden im Westen erreicht. PET-Werte über 11 °C sind in Kärnten, der Steiermark und dem Burgenland zu erkennen, sowie im Süden Ober- und Niederösterreichs. Die zahlreiche Vorstöße hoher PET-Werte und deren Verzweigungen im Alpenraum befinden sich oberhalb von 9 °C . Deutlich sichtbar sind feine Strukturen mit maximalen PET-Werten im Süden Kärntens, im Südosten der Steiermark, dem Burgenland,

sowie großen Teilen Niederösterreichs und dem Osten Oberösterreichs. Diese Regionen treten in den nachfolgenden Monaten mit mittleren bis hohen PET-Werten, entsprechend dem jeweiligen PET-Intervall markant auf.

MAI

Die PET-Werte liegen in der Monatskarte, basierend auf Klimadaten, zwischen -8 °C und 24 °C (Abb. B.82). Deutlich sichtbar ist im Nordosten ein Bereich von 16 °C bis 20 °C , der dem Wald- und Mühlviertel entspricht. Südlich bis unter 48 °N sind PET-Werte oberhalb von 20 °C anzutreffen sowie im gesamten Burgenland, im Südosten der Steiermark und in Kärnten. Innerhalb des Alpenraumes überwiegen die Ausläufer hoher PET-Werte ab 20 °C . Negative Werte sind hauptsächlich in Tirol entlang der Südgrenze in fraktalähnlicher Form zu erkennen. Höchstwerte werden im Westen Vorarlbergs dargestellt, sowie im Süden Kärntens beginnend entlang der östlichen Bundesländer bis $48\text{ ° }30\text{ 'N}$. Einzelne Arme mit maximalen Werten reichen von 17 °E bis knapp unter 14 °E und befinden sich ausschließlich innerhalb von 48 °N und $48\text{ ° }30\text{ 'N}$.

Die PET-Werte sind in der Monatskarte, basierend auf Synopdaten, von -7 °C bis 20 °C anzutreffen (Abb. B.83). Über 19 °C werden im Westen und in den naheliegenden Regionen mehr als 16 °C erreicht. Die zahlreiche Vorstöße hoher PET-Werte im Alpenraum befinden sich oberhalb von 13 °C .

JUNI

Es werden zwischen -2 °C und 32 °C in der Monatskarte, basierend auf Klimadaten, erreicht (Abb. B.84). Im Wald- und Mühlviertel treten maximal 26 °C auf, während entlang der sie trennenden Bundesländergrenze von Ober- und Niederösterreich lediglich 20 °C zu erkennen sind. Südlich bis knapp unter 48 °N , sowie entlang den östlichen Bundesländern sind über 26 °C zu verzeichnen. Die Vorstöße einzelner Ausläufer liegen oberhalb von 26 °C und haben sich leicht ausgebreitet sowie teilweise zusammengeschlossen. Markant an der Westgrenze bzw. entlang der östlichen Bundesländer bis $48\text{ ° }30\text{ 'N}$ sind maximale Werte von 32 °C zu sehen. Zwischen 14 °E und 17 °E sowie 48 °N und $48\text{ ° }30\text{ 'N}$ ist erneut ein Zweig mit fast 32 °C sichtbar. In der Alpenregion liegt ein Großteil niedriger PET zwischen 5 °C und 10 °C . PET-Werte von -2 °C bis 28 °C der Monatskarte, basierend auf Synopdaten, bestimmen den Monat (Abb. B.85). Über 27 °C werden im Westen erreicht und in den naheliegenden Regionen mehr als 23 °C . Zahlreiche Vorstöße hoher PET-Werte im Alpenraum befinden sich oberhalb von 19 °C .

JULI

Der Juli zeigt gegenüber dem Juni nur geringfügige Veränderungen in der Monatskarte, basierend auf Klimadaten (Abb. B.86). Das Maximum ist auf 33 °C angestiegen und die Zunge höherer PET-Werte zwischen 14 °E und 17 °E, sowie 48 °N und 48 ° 30'N nimmt ähnlich hohe Temperaturen wie die Umgebung an und hebt sich dadurch nicht mehr markant von ihr ab.

PET verläuft für die Monatskarte, basierend auf Synopdaten, innerhalb eines Intervalls von -2 °C bis 29 °C (Abb. B.87). Über 28 °C werden im Westen und in den naheliegenden Regionen mehr als 23 °C erreicht. Im Alpenraum entlang der Täler sind mehr als 20 °C anzutreffen.

AUGUST

Im August werden zwischen 0 °C und 33 °C in der Monatskarte, basierend auf Klimadaten, erreicht (Abb. B.88). Die Verteilung von PET ist nahezu identisch zum Juni, mit der Ausnahme, dass im August keine negativen PET-Werte mehr auftreten und maximale Werte um fast 1 °C höher liegen.

PET erreicht 0 °C bis 30 °C mit den höchsten Werten im Westen in der Monatskarte, basierend auf Synopdaten und in den naheliegenden Regionen mehr als 25 °C (Abb. B.89). Die Täler im Alpenraum zeigen bereits mehr als 22 °C. In diesem Monat sind Jahreshöchstwerte anzutreffen.

SEPTEMBER

PET liegt in der Monatskarte, basierend auf Klimadaten, zwischen -4 °C und 28 °C mit maximalen Werten im Westen und im Südosten Kärntens, der Steiermark und dem Burgenland (Abb. B.90). Im Mühl- und Waldviertel geht PET auf 11 °C bis 20 °C zurück. Südlich davon bis 48 °N, werden größtenteils über 20 °C erreicht. Die einzelnen Hauptausläufer in die Alpenregion nehmen ähnliche Werte an, sind jetzt aber wieder deutlicher zu erkennen, da schwächere Seitenarme bezüglich PET eindeutig geringer auftreten. Gebiete mit ehemals um 0 °C liegen wieder im negativen Bereich.

PET nimmt in der Monatskarte, basierend auf Synopdaten, wieder ab und verläuft innerhalb eines Intervalls von -4 °C bis 23 °C (Abb. B.91). Über 22 °C werden im Westen erreicht, während es in den Tälern des Alpenraums nur noch 16 °C sind.

OKTOBER

Im Oktober liegen die PET-Werte in der Monatskarte, basierend auf Klimadaten, zwischen -10 °C und 19 °C (Abb. B.92). Wald- und Mühlviertel heben sich durch bis zu 5 °C geringere Temperaturen gegenüber ihrer südlichen Umgebung mit 9 °C bis 18 °C ab. Südlich von 48 °N sind nur noch einzelne Ausläufer hoher PET-Werte zu erkennen, während entlang der östlichen Bundesländer bis Kärnten noch großflächig über 14 °C auftreten. Im südlichen Tirol, in Osttirol, sowie Salzburg und nördlichen Steiermark treten die tiefsten PET-Werte auf, abgegrenzt durch Ausläufer hoher PET-Werte. Im Westen Vorarlbergs, sowie in südlichen Teilen Kärntens, der Steiermark und dem Burgenland sind Höchstwerte vorzufinden.

PET liegt in der Monatskarte, basierend auf Synopdaten, zwischen -9 °C und 16 °C (Abb. B.93). Über 15 °C werden im Westen und in der nahen Umgebung mehr als 10 °C erreicht. Täler im Alpenraum zeigen mehr als 8 °C .

NOVEMBER

Es liegen PET-Werte zwischen -15 °C und 8 °C in der Monatskarte, basierend auf Klimadaten, vor (Abb. B.94). Das Wald- und Mühlviertel grenzt sich durch PET zwischen -1 °C und 4 °C gegenüber der südlichen Umgebung mit 4 °C bis 8 °C ab. Südlich von 48 °N sind nur noch einzelne Ausläufer hoher PET-Werte zu erkennen, während entlang der östlichen Bundesländer bis Kärnten großflächig über 3 °C auftreten. Die niedrigsten PET-Werte treten in den gleichen Regionen wie in den vorangehenden Monaten mit deutlich geringeren Werten auf. Ausläufer hoher PET-Werte sind markant sichtbar. Im Westen Vorarlbergs, sowie in Teilen Süd-Kärntens und in der Süd-Steiermark werden Höchstwerte erreicht.

PET verläuft in der Monatskarte, basierend auf Synopdaten, innerhalb eines Intervalls von -16 °C bis 7 °C (Abb. B.95). Über 6 °C werden im Westen und in der Umgebung mehr als 1 °C erreicht. Innerhalb des Alpenraums sind entlang der Täler maximal 0 °C zu erkennen.

DEZEMBER

PET liegt in der Monatskarte, basierend auf Klimadaten, zwischen -15 °C und 3 °C (Abb. B.96). Wald- und Mühlviertel zeigen PET zwischen -2 °C und -5 °C , während südwestlich bis 48 °N -2 °C bis 0 °C auftreten, wie auch im südlichen Niederösterreich und im Burgenland. Kärnten und Steiermark besitzen mit -1 °C bis 2 °C deutlich höhere PET-Werte. Im Westen treten mit 3 °C die höchsten Werte auf, sowie entlang des Inns. Ausläufer

geringerer PET-Werte sind im ganzen Alpenraum mit zahlreichen Seitenarmen zu erkennen. Die niedrigsten PET-Werte sind in den höheren Lagen zu finden.

Die PET-Werte liegen in der Monatskarte, basierend auf Synopdaten, zwischen -16 °C und 4 °C (Abb. B.97). Über 3 °C werden im Westen und in den näheren Umgebung bis zu -2 °C erreicht, wie auch in den Tälern des Alpenraums.

6.2.2 PET-Klassen in Tagen pro Jahr

PET > 35 °C

Tage mit PET größer 35 °C treten in der Karte, erzeugt mittels Klimadaten, überwiegend unterhalb von 1000 m auf (Abb. 6.28). Zwischen 21 und 31 Tage sind im Süden Kärntens, im Südosten der Steiermark und in östliche Burgenland zu erkennen. Deutlich werden sie durch feine Strukturen, die in ihrem Innenbereich die höchsten Werte annehmen und nach außen fraktalartig zurückgehen. Zwischen 12 und 21 Tage sind im Süden Nieder- und Oberösterreichs sichtbar. Das Mühl- und Waldviertel zeichnet sich durch im Mittel 5 Tage weniger im Jahr als das Umland aus. An der Westgrenze Österreichs sind maximale 24 Tage im Jahr möglich. In den Alpenraum dringen zahlreiche Arme mit einer Vielzahl kleinerer Verzweigungen an 15 bis 21 Tage über PET größer 35 °C vor. In einem Großteil des Gebirges sind aber gar keine vorhanden. Südlich von $47\text{ ° }15'\text{N}$ bei $14\text{ ° }36'\text{E}$ und 15 °E ist ein starker Rückgang der Tage zu verzeichnen, was in den folgenden PET-Klassen ebenso hervorsteicht.

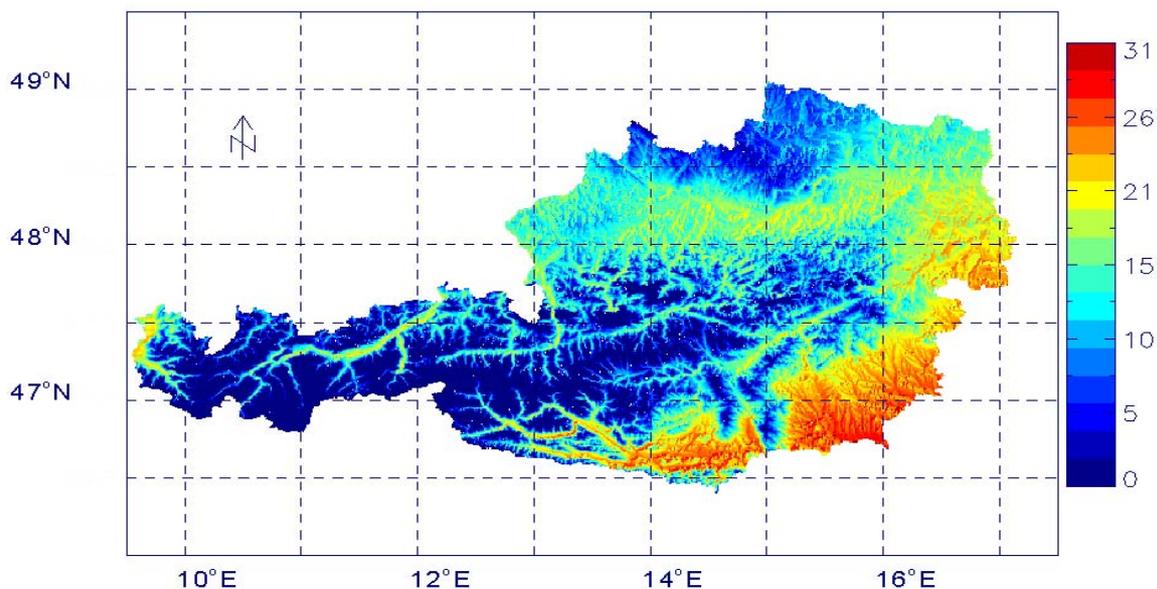


Abb. 6.28: Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET > 35 °C um 14 Uhr MOZ

Tage mit PET größer 35 °C treten in der Karte, erzeugt mittels Synopdaten, überwiegend unterhalb von 1000m auf (Abb. 6.29). Zwischen 17 und 26 Tage sind im Süden Kärntens, im Südosten der Steiermark und im östlichen Burgenland zu erkennen. Der Bereich des Neusiedler See setzt sich deutlich von seiner Umgebung mit hohen Werten ab. Strukturen erscheinen eher grobkörnig. 10 bis 17 Tage sind im Süden Nieder- und Oberösterreichs zu erkennen. Mühl- und Waldviertel zeichnen sich durch im Mittel 5 Tage weniger im Jahr als das Umland aus, mit niedrigsten Tageszahlen entlang der Bundesländergrenze Nieder- und Oberösterreichs. Der Westen Österreichs zeigt maximale 24 Tage an. In den Alpenraum dringen deutlich mehr Verzweigungen mit nur 12 bis 18 Tagen von PET größer 35 °C vor. Südlich von 47 ° 15 'N bei 14 ° 36 'E und 15 °E ist ein starker Rückgang der Tage zu verzeichnen, was in den folgenden PET-Klassen ebenso hervorsteicht.

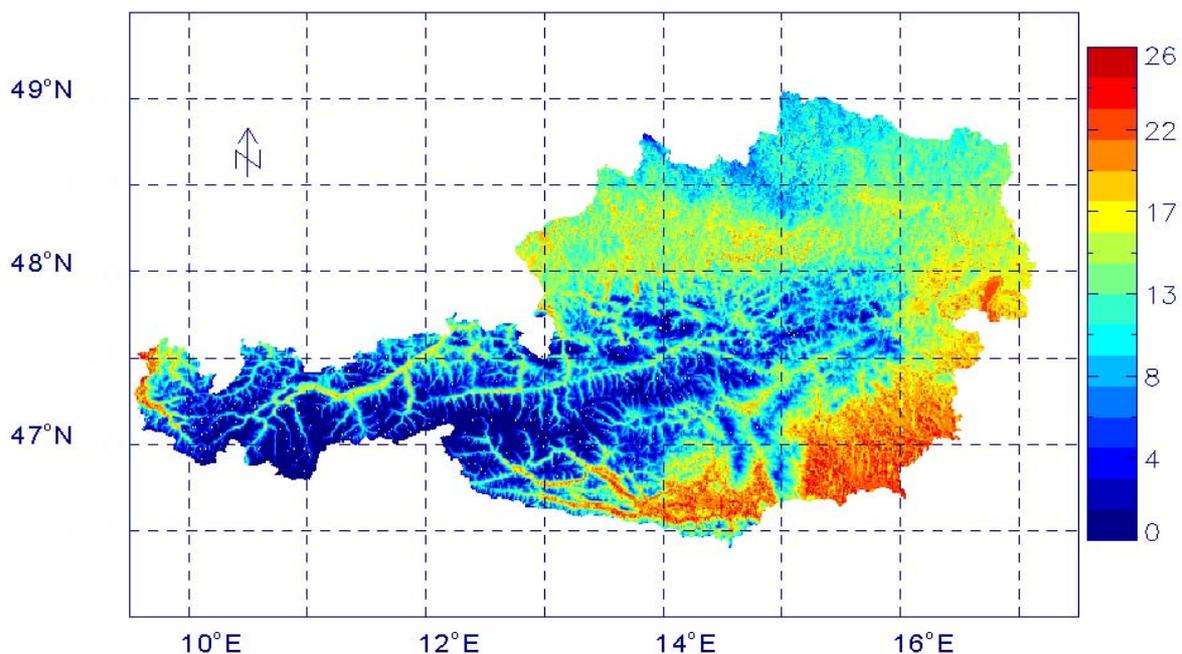


Abb. 6.29: Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET > 35 °C um 13 Uhr MEZ

PET (13 °C bis 23 °C)

PET größer 13 °C bis 23 °C ist mit 108 Tagen pro Jahr entlang des Rhein und Ill-Verlaufs im äußersten Westen in der Karte, basierend auf Klimadaten, zu erkennen (Abb. 6.30). 98 bis 103 Tage deuten in den Alpen die Region des Inn an, sowie im Süden Kärntens Teile der Drauf. Der Südosten der Steiermark liegt zwischen 80 und 95 Tagen noch im obigen PET-

Intervall. Der Süden Oberösterreich mit 87 bis 95 Tage und der Südosten Niederösterreichs mit 77 bis 90 Tagen schließen sich dem an. Wald- und Mühlviertel liegen bereits unter 87 bis 70 Tagen. Insgesamt sind in diesen Regionen die ehemals feinen Strukturen unkenntlicher geworden. Lediglich die fraktalähnlichen Vorstöße in den Alpenraum mit 80 bis 100 Tagen sind deutlich sichtbar. Auffallend sind in den Alpen Regionen, in denen bisher die meisten minimalen Temperaturen angezeigt wurden. Sie befinden sich zu mindestens 46 Tagen innerhalb der obigen Intervallgrenzen.

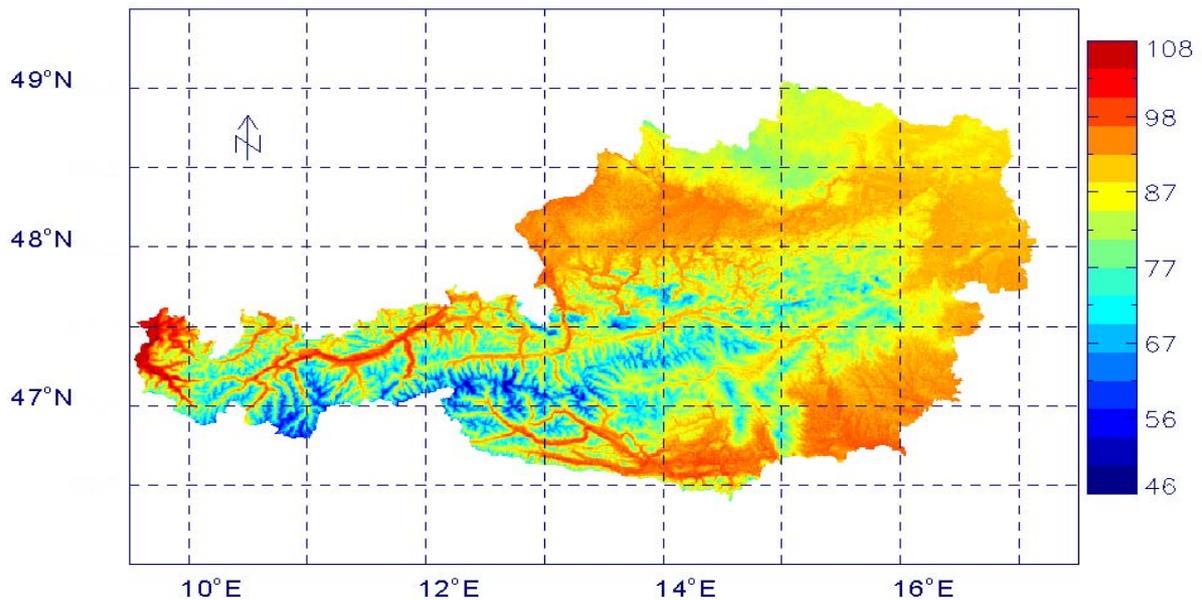


Abb. 6.30: Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET von 13 °C bis 23 °C um 14 Uhr MOZ

104 Tage im Jahr mit PET größer 13 °C bis 23 °C sind entlang des Rhein in der Karte, basierend auf Synopdaten, zu erkennen (Abb. 6.31). 85 bis 95 Tage deuten in den Alpen die Region des Inn an, sowie im Süden Kärntens Teile der Drauf, als auch der Südosten der Steiermark. Der Süden Oberösterreich und der Südosten Niederösterreichs mit 76 bis 98 Tagen schließen sich dem an. Wald- und Mühlviertel liegen unter 87 bis 61 Tagen. Insgesamt sind in dieser Karte gut erkennbare Reliefstrukturen vorhanden. Fraktalähnliche Vorstöße in den Alpenraum mit 61 bis 90 Tagen wirken etwas grobkörnig. Regionen, in denen bisher die meisten minimalen Temperaturen angezeigt wurden befinden sich zu mindestens 18 Tagen innerhalb der obigen Intervallgrenzen.

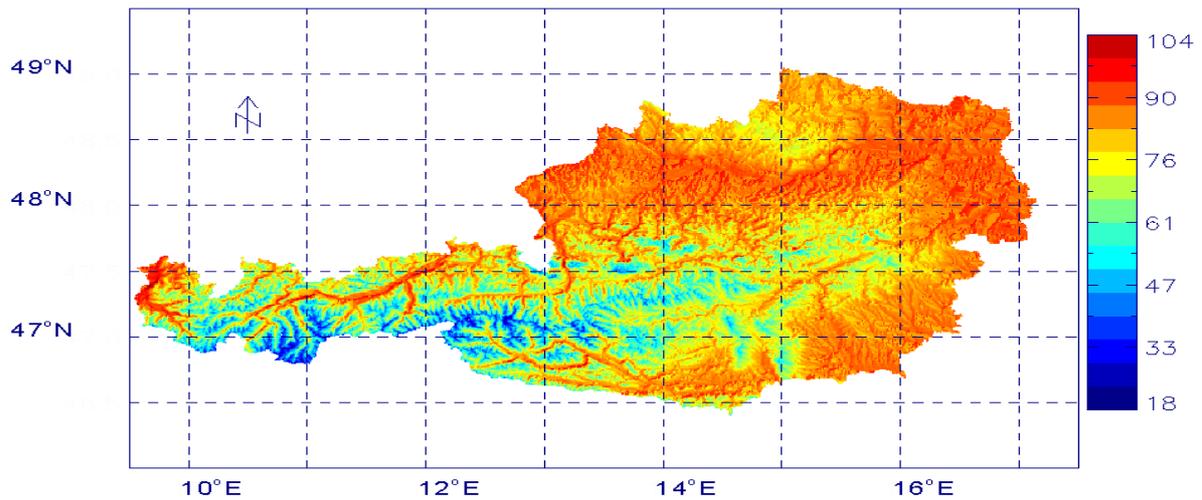


Abb. 6.31: Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET von 13 °C bis 23 °C um 13 Uhr MEZ

PET < 0 °C

Tage mit PET unter 0 °C treten hauptsächlich in den Alpen sowie entlang der Bundesländergrenze von Ober- und Niederösterreich in der Karte, erzeugt anhand Klimadaten, auf (Abb. 6.32). Tirol und Osttirol sind mit bis zu 254 Tagen und Salzburg bei 47 ° 30 'N und 13 °E am auffälligsten. Im Norden Kärntens und Nordosten der Steiermark sind 170 bis 200 Tage innerhalb des PET-Intervalls anzutreffen. Im äußersten Westen Österreichs sind die wenigsten Tage zu sehen. Unter 43 Tage im Jahr liegen im Süden Kärntens, im Südosten der Steiermark und dem Burgenland unter 0 °C. Sie stehen im leichten Gegensatz zum Süden Ober- und Niederösterreichs, wo zwischen 35 und 90 Tage unterhalb dieser Grenze liegen und deutliche reliefartige Strukturen zum Vorschein kommen. Zahlreiche Verzweigungen in den Alpenraum weisen eine geringe Tagesanzahl vor.

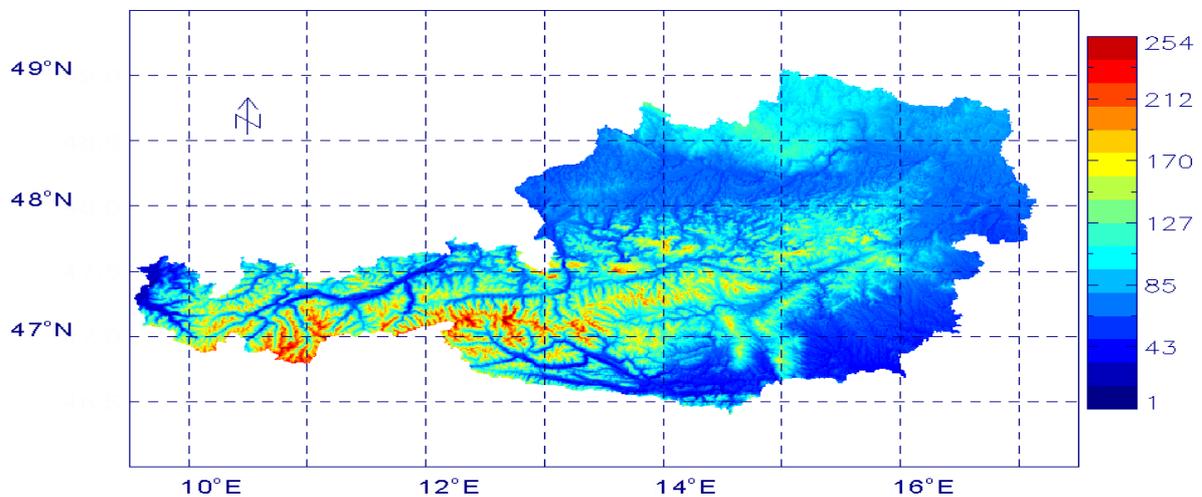


Abb. 6.32: Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET < 0 °C um 14 Uhr MOZ

Tage mit PET unter 0 °C treten hauptsächlich in den Alpen sowie entlang der Bundesländergrenze von Ober- und Niederösterreich in der Karte, basierend auf Synopdaten, auf (Abb. 6.33). Tirol und Osttirol sind mit bis zu 277 Tagen und Salzburg bei 47 ° 30 'N und 13 °E am auffälligsten. Im Norden Kärntens und Nordosten der Steiermark sind 190 bis 250 Tage innerhalb des PET-Intervalls anzutreffen. Im äußersten Westen Österreichs sind die wenigsten Tage zu sehen. Unter 70 Tage im Jahr liegen im Süden Kärntens, im Südosten der Steiermark und dem Burgenland unter 0 °C. Sie stehen im leichten Gegensatz zum Süden Ober- und Niederösterreichs, wo zwischen 60 und 120 Tage unterhalb dieser Grenze liegen. Zahlreiche Verzweigungen in den Alpenraum weisen eine geringe Tagesanzahl vor.

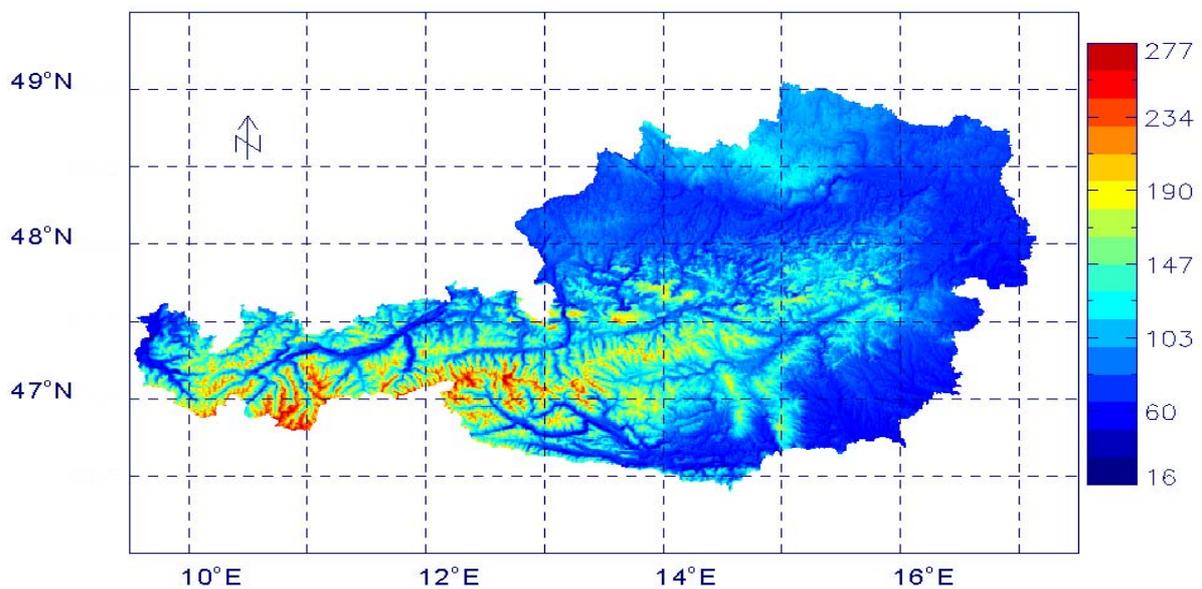


Abb. 6.33: Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET < 0 °C um 13 Uhr MEZ

7. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die in Kapitel 6 aufgeführten regionalen Verteilungen von PET für die Kalendermonate, als auch für die PET-Klassen zeigen bezüglich ihrer Größenordnung und Tagesanzahl Unterschiede zwischen klima- und synopbasierenden Karten auf. Jedoch stimmen sie tendenziell bezüglich ihrer räumlichen Verteilung gut überein und geben die reliefartige Struktur Österreichs passend wieder. Daher wird folgende Erörterung durchgeführt:

- Insgesamt zeigt sich anhand des Kartenmaterials, dass einzelne Regionen im Jahresmittel Eigenschaften aufweisen, die sie gegenüber ihrer Umgebung von dieser separat betrachten lassen. Dem entsprechend wurde eine regionale Einteilung Österreichs, basierend auf gemeinsamen Tendenzen von PET, durchgeführt (Kap. 7.1). Dadurch ist es möglich die Verteilung von PET überschaubarer darzustellen und gleichzeitig auch eine Einteilung nach den verursachenden Faktoren bezüglich des PET-Verhaltens vorzunehmen. Man erhält eine bioklimatische Beschreibung von Österreich auf der Grundlage von PET.
- Der Vergleich von Klima- und Synopdaten wird für jeden einzelnen Kalendermonat durchgeführt (Kap. 7.2.1). Dadurch sollen nicht nur die Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen erläutert werden, sondern auch das saisonale Verhalten der Differenzen. Diese stellen nur absolute Abweichungen dar und können keine positiven oder negativen Tendenzen berücksichtigen. Aufgrund der erzeugten Karten und der berechneten PET-Werte der einzelnen Stationen waren die tendenziellen Unterschiede deutlich zu erkennen, so dass lediglich die Größenordnung der Abweichungen in °C betrachtet wird.
- Um die bioklimatischen Auswirkungen der Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen zu veranschaulichen werden drei PET-Bereiche regional diskutiert (Kap. 7.2.2). Regionen mit Tagen in denen PET größer als 35 °C ist, sollen die Abweichungen in Gebieten starker Wärmebelastung auf den menschlichen Körper wiedergeben. Das PET-Intervall größer 13 °C bis 23 °C dient der Erfassung eines thermischen Bereichs, in dem, unter Berücksichtigung individueller physiologischer Schwankungen, Behaglichkeit empfunden wird. Die PET-Klasse mit Werten kleiner als 0 °C soll die unterschiedliche Verteilung von Regionen mit möglichem Kältestress in beiden Datensätzen wiedergeben.

- Die drei aufgeführten Orte besitzen sowohl eine Klima- als auch eine Synopstation (Kap. 7.3). Sie bieten die Möglichkeit lokal einen direkten Vergleich zwischen beiden Datensätzen anhand der Messungen und Berechnungen durch RayMan durchzuführen. Ausgewählt wurden diese Stationen, um exemplarisch eine Beschreibung einer Region außerhalb der Alpen, innerhalb der Alpentäler und auf den höchsten Bergen mit den unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zu liefern. Eine Betrachtung der Eingangsparameter aller gemeinsamen Stationen soll die Gründe für Abweichungen in den Datensätzen zeigen.
- Der Vergleich der Resultate dieser Arbeit mit bisherigen Untersuchungsergebnissen ermöglicht Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Verbesserungen darzustellen und bereits bestehende Kenntnisse zu validieren (Kap. 7.4.1). Die Gegenüberstellung zu Bioklimakarten anderer Länder dient der Erläuterung unterschiedlicher Vorgehensweisen (Kap. 7.4.2).

7.1 Räumliche Tendenzen der PET-Verteilung

Anhand des erzeugten Kartenmaterials ist es möglich Österreich in 6 Regionen entsprechend ihrer PET-Größe und Struktur zu unterteilen (Abb.7.34).



Abb. 7.34: Einteilung Österreichs in Regionen gleicher PET-Charakteristik

Die Region R1 befindet sich im äußersten Westen Österreichs innerhalb des Bundeslandes Vorarlberg. In allen Karten sind entlang der Grenze mit zwei Vorstößen ins Landesinnere die höchsten Temperaturen in jedem Monat zu erkennen. Diese Vorstöße verlaufen nahezu exakt entlang des Flusslaufs von Rhein und Ill, sowie durch das Tal im Bregenzer Wald. Diese

Region wird allgemein als Rheintal bezeichnet und gehört als Föhn-gasse zu den wichtigsten Föhnregionen Österreichs. Der Föhn ist ein warmer und trockener Fallwind, der vom Gebirge her in die Täler und ins Gebirgsvorland weht (Malberg, 1997).

Im Alpenraum unterscheidet man zwischen dem Südföhn im nördlichen Alpenvorland und dem Nordföhn südlich der Alpen, wenn aus dem Norden Luftmassen über die Alpen drängen (Harlfinger, 1985). Beim Südföhn kommt es im nördlichen Alpenvorland zum trockenadiabatische Absinken der Luftmassen, da während des feuchtadiabatischen Aufstiegs der Luftmassen auf der Luvseite ein Teil des Wasserdampfes oder sogar der gesamte kondensiert und ausgereget. Dies führt zu einer Erwärmung der Lufttemperatur auf der Leeseite der Alpen und ist mit einer Wolkenauflösung verbunden, so dass vermehrt kurzwellige Sonnenstrahlung zur Erdoberfläche gelangen kann.

Damit verstärkt der Föhn das milde Klima des Rheintals, welches durch den Bodensee als Wärmespeicher und seiner damit verbundenen Fähigkeit die Temperaturschwankungen zu minimieren begünstigt ist. Erhöhte Lufttemperatur und implizit kurzwellige Strahlung anhand der mittleren Strahlungstemperatur sind beides Parameter, die sich bei der Berechnung von PET positiv auf diese auswirken.

Die Region R2 bezieht sich auf den gebirgigen Alpenraum mit den höchsten Erhebungen Österreichs. Besonders in diesem Gebiet mit seinen zahlreichen Tälern ist, wie auch anderen Teilen Österreichs mit ähnlichem Relief, im Winter ein bioklimatisch relevantes Phänomen zu erkennen.

Bis 500 m nimmt PET mit der Höhe im Winter zu (Abb. 7.36) und in den darüber liegenden Luftschichten oberhalb von 500 m ist wieder eine Abnahme von PET zu erkennen (Abb. 7.35). Abstrahlung in der Nacht führt zum Auskühlen der Hänge, so dass die Temperatur der daraufliegende Luft abnimmt. Dadurch wird diese schwerer und gleitet in Form großer Tropfen hangabwärts (Häckel, 1993). Kommt es zu keinem Abtransport der kalten Luft, sammelt sich diese im Tal an und bildet einen Kaltluftsee. Oberhalb des Kaltluftsees liegt unter anderem aufgrund der täglichen Erwärmung durch die Sonne wärmere Luft mit geringerer Dichte.

Diese Schichtung mit kalter Luft in Bodennähe und einer darüber liegenden warmen Luftschicht wird als Inversionslage bezeichnet und tritt besonders in den Herbst- und Wintermonaten auf, da sie sich mangels ausreichender Tageserwärmung nicht auflösen kann. Unterhalb der Inversion ist die Abkühlung der Luft bis zum Erreichen der Taupunkttemperatur begünstigt, so dass die enthaltene Luftfeuchtigkeit kondensiert und Nebel entsteht, wie es oft im Rheintal, aber auch in vielen Tälern der Alpen zu beobachten ist.

Dieser Nebel verhindert zusätzlich eine Erwärmung, da ihn die Sonnenstrahlung kaum durchdringen kann. Aufgrund des geringen Luftaustausches unterhalb der Inversion können sich hier Luftschadstoffe ansammeln, die sich nachteilig auf das Bioklima auswirken.

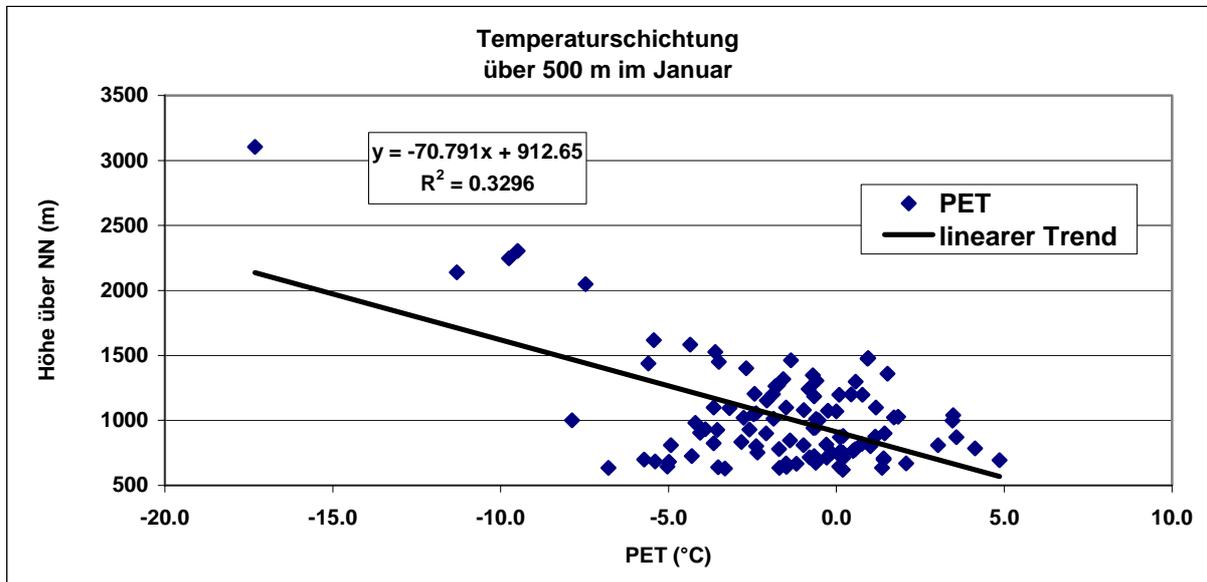


Abb. 7.35: Temperaturschichtung oberhalb von 500 m im Januar für 14 Uhr MOZ

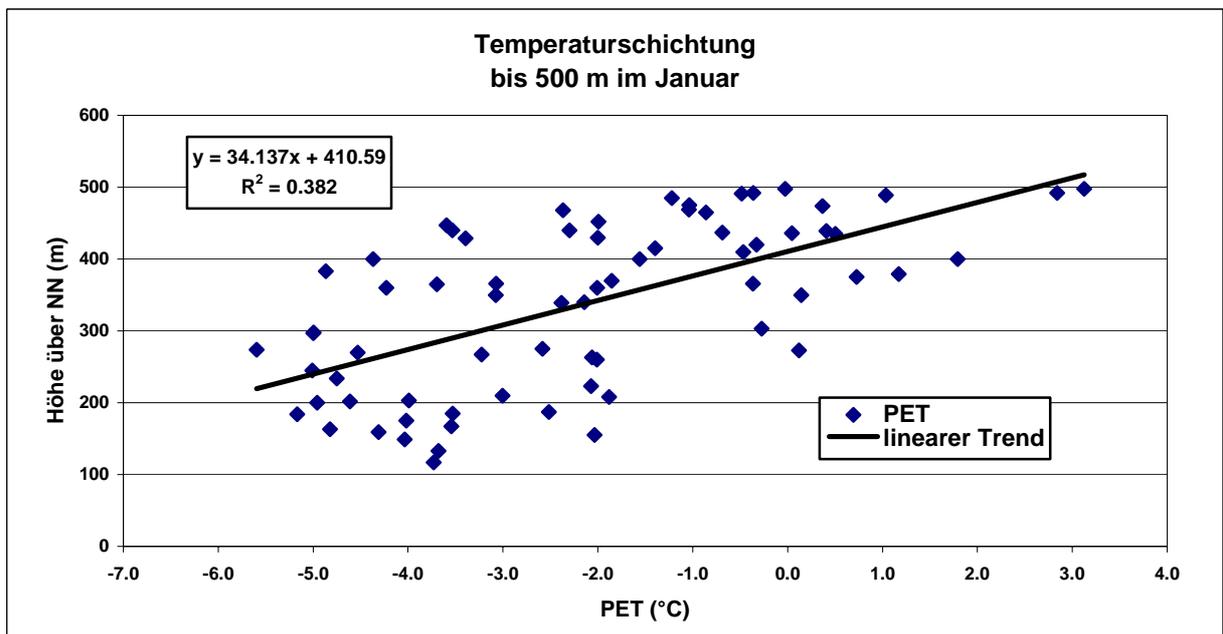


Abb. 7.36: Temperaturschichtung unterhalb von 500 m im Januar für 14 Uhr MOZ

Innerhalb der Region R2 zeigen sich in jedem Kalendermonat zahlreiche Vorstöße mit einer Vielzahl kleiner Seitenarme, die einen höheren PET-Wert als ihre Umgebung besitzen. Örtlich erfolgt der Übergang zu niedrigeren PET-Werten sehr abrupt. Führt man einen Vergleich mit der Topographie durch, so liegen diese Verästelungen entlang der Täler,

Mulden und Flussläufe. Das Lambertsche Kosinusgesetz zeigt, dass der Strahlungsfluss bezogen auf eine geneigte Fläche größer ist als auf eine ebene. Deshalb erfahren die Hänge eine stärkere Erwärmung, welche an die Lufttemperatur weitergegeben wird.

Da die Region R2 im Föhngebiet liegt ist auch durch entsprechende Absinkbewegungen der Luft ein Anstieg der Lufttemperatur in den Tälern zu erwarten. Bei vorhandener Inversionslage im Tal sorgt diese für einen wolkenfreien Himmel oberhalb der Inversion, so dass vermehrte Sonnenstrahlung in die entsprechenden Höhen gelangen kann.

Dabei wirken die umliegenden Gebirge als Schutz vor hohen Windgeschwindigkeiten und Niederschlägen und verhindern einen Abtransport der Wärme.

R2* kennzeichnet Regionen mit auffallend hohen PET-Werten wie das Flusstal des Inns als eines der bedeutsamsten Föhngebiete Österreichs sowie das Flusstal der Salzach, der Drau, der Enns und der Mur. Minimale PET-Werte treten in großen Höhen der Alpen auf. Hierfür sind wahrscheinlich die geringen Lufttemperaturen, sowie hohe Windgeschwindigkeiten und Niederschläge verantwortlich.

Die Region R3 wird durch zwei Gebiete niedriger PET-Werte (R3*) in einen Westteil, im Süden Kärntens und einen Ostteil im Südosten der Steiermark liegend, gespalten. Vergleicht man die Lage von R3* mit der Topographie, so findet man in diesen Gebieten Erhebungen oberhalb von 2000 m, die als Saualpe, Koralpe und Gleinalpe bezeichnet werden und mit den oben genannten Bedingungen für eine niedrige PET verantwortlich sind.

Die westliche Region R3 zeigt ganzjährig im Verhältnis zu ihrer Umgebung die höchsten PET-Werte entsprechend dem jeweiligen Kalendermonat. Die besondere geographische Lage ist hierfür verantwortlich. Im Norden wirken der Hohe und Niedere Tauern als Grenze, im Südwesten die Karnischen Alpen, im Südosten die Karawanken und im Osten die Saualpe. Sie umschließen das Klagenfurter Becken, in dem sich zahlreiche Seen befinden. Im Sommer schützen die umgebenden Gebirge vor Niederschlag und starken Winden, so dass eine Durchmischung der Seen verhindert wird und sie über einen längeren Zeitraum hohe Wassertemperaturen besitzen, welche zur Erwärmung der darüber liegenden Luftschichten beitragen. Dies erklärt Strukturen höchster PET-Werte in diesem Bereich. Zusätzlich herrscht in dieser Region mäßiger bis starker Föhn. Im Winter bildet sich ein Kaltluftsee, der zu dem beschriebenen Phänomen der winterlichen Inversionslage führt. Oberhalb der Inversion kann die Luft allerdings ungehindert von der Sonne erwärmt werden.

Die östliche Region R3 im Südosten der Steiermark und südliche Burgenland weist ganzjährig ähnlich hohe PET-Werte wie die westliche Region auf mit feinen Strukturen maximaler Werte. Dieser Teil Österreichs ist weitgehend föhnfrei. Er gehört zum

pannonischen Becken der Ungarischen Tiefebene und stellt als solcher einen besonderen Klimatyp in Form des Pannonischen Klimas in Österreich dar. Kontinental geprägt zeichnet es sich durch heiße Sommer und kalte Winter aus. Im Sommer wird außerdem vermehrt Wärme vom Schwarzen Meer entlang der Donau über das Rumänische ins Ungarische Tiefland transportiert. Die Hänge liegen in Nord-Süd- bzw. Nordwest-Südost-Richtung, so dass sie durch die aufgehende Sonne im Osten ganzjährig eine schnelle Erwärmung erfahren. Im Winter tritt die oben beschriebene Inversion auf mit hoher Sonnenstrahlung oberhalb der Sperrschichtgrenze. Diese Faktoren erklären die ganzjährig relative hohe PET-Werte gegenüber ihrer Umgebung.

Die Region R4 liegt im Bereich Ober- und Niederösterreichs, sowie des nördlichen Burgenlandes und gehört zum nordöstlichen Alpenvorland bzw. Wiener Becken mit Höhen unterhalb von 700 m. Auf der jeweiligen Monatsskala zeigt PET mittlere bis hohe Werte. Dabei sind in den Wintermonaten im Westen verstärkt höhere PET-Werte als im Osten zu erkennen. Dies stimmt überein mit dem Wandel vom maritimen Klima im Westen mit milden feuchten Wintern und Sommern zum kontinentalen im Osten.

Die Bedeutung von Tälern, Mulden und Flussläufen wird anhand dieser Region besonders deutlich. Im Gegensatz zu den Alpen, wo diese Vertiefungen des Geländes markant sichtbar durch hohe PET-Werte auf kleinem Raum werden ist dies in großen Teilen von R4 nicht der Fall. Die Donau durchquert mit zahlreichen Nebenarmen diesen Landstrich und tritt im Westen nicht besonders hervor. Die Höhenunterschiede zur benachbarten Umgebung sind zu gering. Erst mit dem Abfall im Wiener Becken und dem Bereich um den Neusiedler See sind diese natürlichen Erscheinungen durch höhere PET-Werte als ihre nahe Umgebung wieder sichtbar.

Region R5 im Bereich von Mühl- und Waldviertel grenzt sich durch niedrigere PET-Werte gegenüber Region R4 ab. Der Grund hierfür ist der Anstieg der Topographie auf über 1000 m mit maximaler Höhe entlang der Bundesländergrenze von Ober- und Niederösterreich, die beide Viertel voneinander trennt, wo die niedrigsten PET-Werte zu finden sind. Zurückzuführen ist dies auf das vor hohen Windgeschwindigkeiten ungeschützte Terrain in Verbindung mit geringeren Lufttemperaturen.

Die schraffierte Region R6 kennzeichnet Strukturen maximaler PET-Werte, die im Sommer deutlich zum Vorschein kommen. Im Süden Kärntens werden diese durch die beschriebene Stellung der Gewässer und des Föhns hervorgerufen. Im Südosten der Steiermark und dem südlichen Burgenland sind sie dem oben erläuterten kontinentalen Klima und Erwärmungseffekten von Hangrichtung und Hangneigung zuzuordnen. Das Territorium um

Wien und Neusiedler See ist ebenfalls kontinental geprägt und unterliegt den Wärmespeicherfähigkeiten des Gewässers.

7.2 Vergleich von Klima- und Synopdaten basierend auf Bioklimakarten

Das folgende Kapitel zeigt die Unterschiede zwischen den Karten basierend auf Klima- und Synopdaten auf. Aus praktischen Gründen wird in diesem Kapitel die PET-Verteilung auf der Basis von Klimadaten als KK (Klima-Karte) bezeichnet und analog dazu die Abkürzung SK (Synop-Karte) verwendet. Diskutiert werden die Unterschiede der Kalendermonate im einzelnen.

7.2.1 Kalendermonate

JANUAR

Es treten zwischen der KK und SK Differenzen von über 2.7 °C im Süden Tirols und Vorarlberg in den höchsten Bergregionen auf sowie im Nordosten mit über 1 °C (Abb. 7.37). In dem Bereich dazwischen liegen die Abweichungen unter 1 °C. Deutlich zu erkennen ist in R2, dass die SK mit -14 °C niedrigere PET-Werte als die KK anzeigt, während das Maximum mit 4 °C in beiden nahezu identisch ist. Diese werden in R1, R2* und R3 erreicht. Im Südosten der Steiermark und im Süden des Burgenlandes geben die SK das Relief hoher PET-Werte nur grobkörnig wieder, während in der KK feine Strukturen zu erkennen sind. Beide zeigen in R4 zwischen -4 °C und 0 °C, in R5 -1 °C bis -5 °C. In R3* ist es extrem kalt.

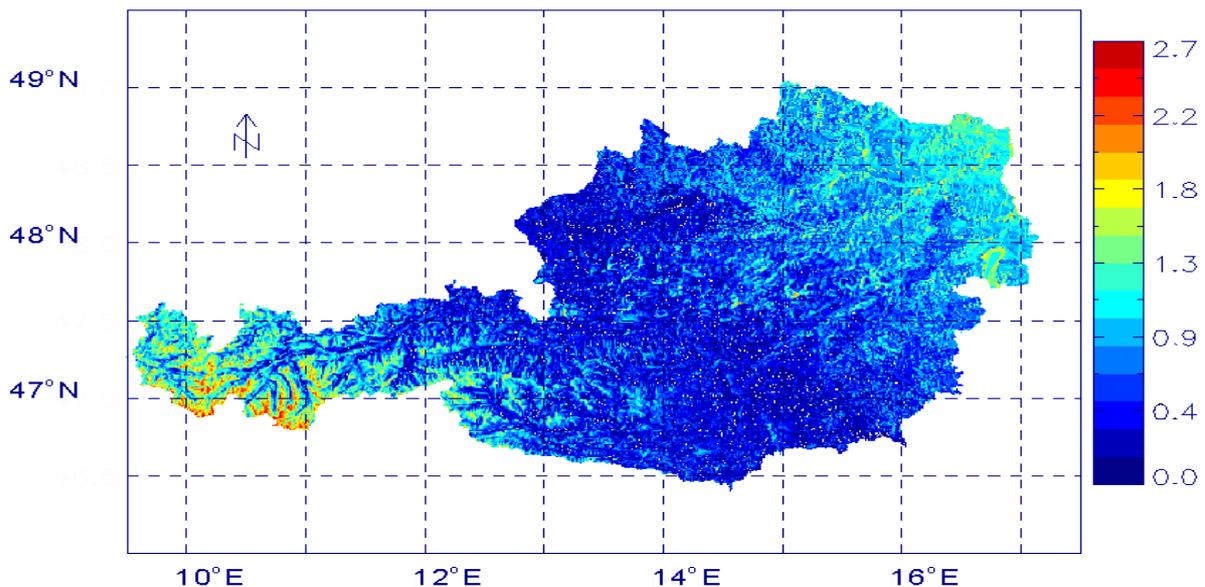


Abb. 7.37: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Januar

FEBRUAR

Differenzen von über 3.3 °C entlang des Rheins und der Ill, über 2 °C entlang des Inn und dem Süden der Steiermark sowie in Kärnten entlang der Seenlandschaft über 2.5 °C sind sichtbar (Abb. 7.38). Im Westen Oberösterreichs und in zahlreichen Tälern der Alpen zeigt die SK bis zu 1.4 °C weniger an. In R5 liegen die Differenzen unter 0.5 °C während in den Höheren Lagen der Alpen PET in der KK im Mittel um 1 °C höher ist als in der SK, wo minimale -16 °C auftreten. Kühle 9 °C werden entlang des Rheins und der Ill sowie in den beschriebenen Gebieten Kärntens und der Steiermark in der KK erreicht, während es in der SK maximal 7 °C sind. In den Tälern der Alpenregion ist es mit 5 °C bis 6 °C der KK noch kalt. Mit 2 °C bis 4 °C ist es in R4 in beiden Karten sehr kalt. R5 ist in den West- und Ostbereichen als sehr kalt einzustufen und in der Mitte als extrem kalt. In R3* herrscht extreme Kälte.

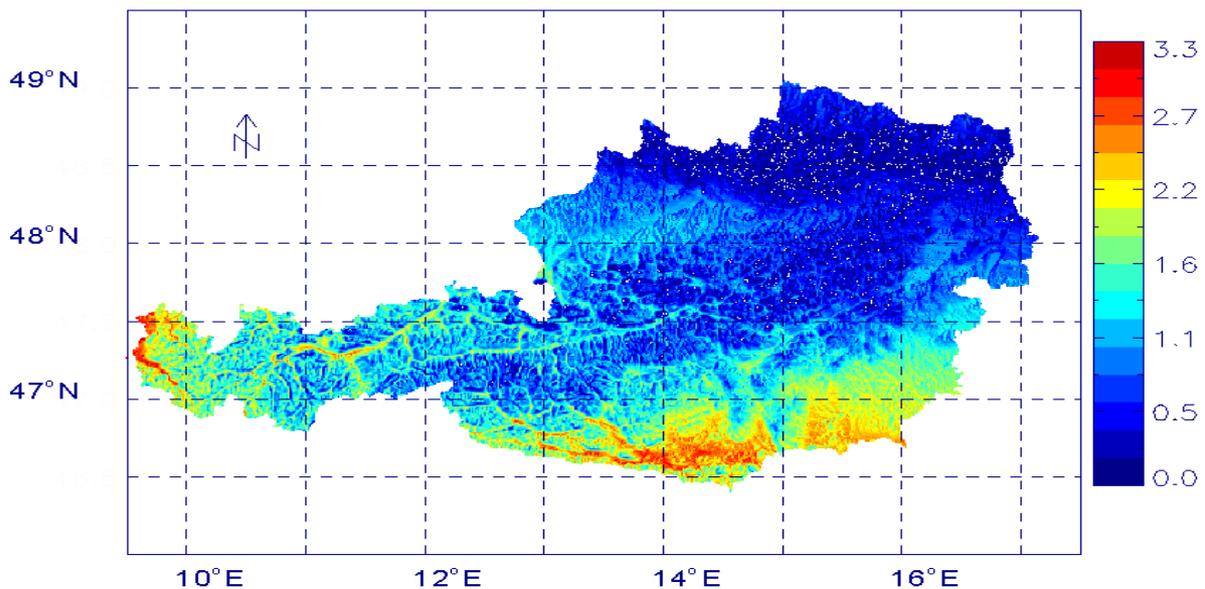


Abb. 7.38: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Februar

MÄRZ

Differenzen von über 4.8 °C sind entlang des Rheins und der Ill, über 3 °C entlang des Inns und in Kärnten entlang der Seenlandschaft sowie über 2 °C im Süden der Steiermark zu erkennen (Abb. 7.39). Im Westen Oberösterreichs und in zahlreichen Tälern der R2* zeigt die SK bis zu 2.4 °C weniger an. In R5 liegen die Differenzen unter 1 °C. In den Höheren Lagen der Alpen sind die Tiefsttemperaturen in den KK um 0.8 °C unter denen der SK und werden als extrem kalt empfunden. Leicht kühle 15 °C sind in der KK entlang des Rheins und der Ill vorhanden. In Kärnten und der Steiermark ist es in der Klimakarte kühl bis leicht kühl, in der

SK kalt bis kühl. Die Täler der Alpenregion sind als kalt bis kühl einzustufen. Insgesamt liegt R4 in einem kalten bis kühlen Bereich. Randgebiete in R5 sind kalt, in der Mitte sehr kalt. In R3* ist es extrem kalt.

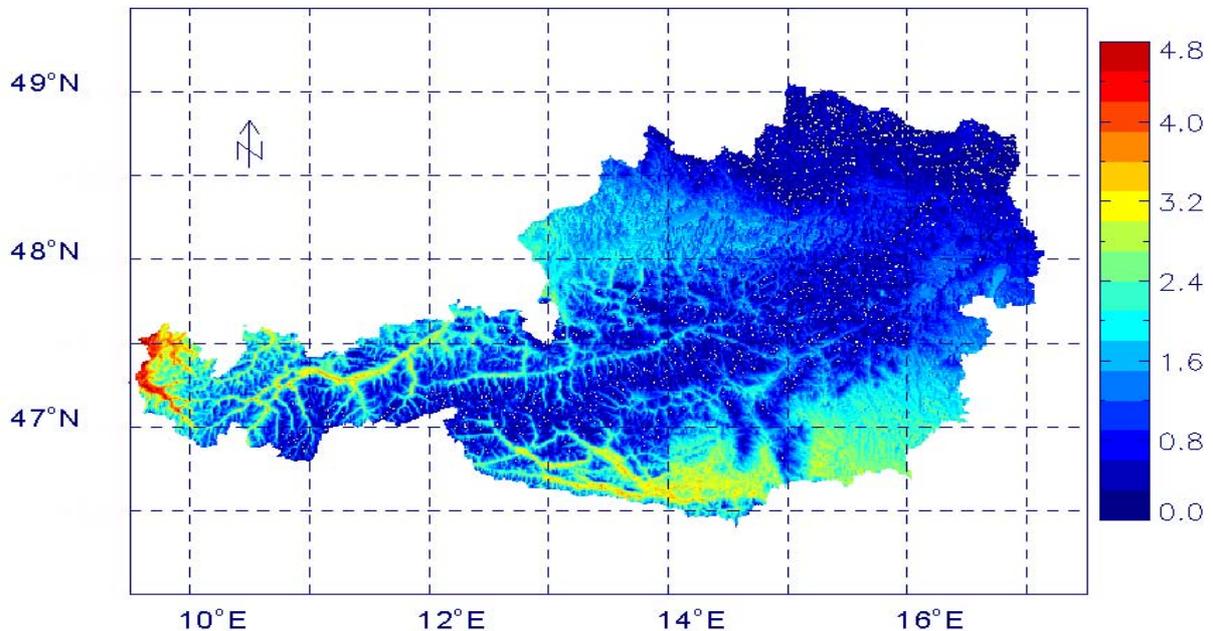


Abb. 7.39: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für März

APRIL

Es treten Differenzen von über 4.8 °C entlang des Rheins und der Ill auf, über 4 °C entlang des Inns und in Kärnten entlang der Seen- und Flusslandschaft sowie über 2 °C im Süden der Steiermark (Abb. 7.40). Im Westen Oberösterreichs und in zahlreichen Tälern der R2* zeigt die SK 2.4 °C bis 3.3 °C weniger an. In R5 liegen die Differenzen unter 1 °C. In den Höheren Lagen der Alpen sind die Tiefstemperaturen in den KK um 0.8 °C unter denen der SK und werden als extrem kalt empfunden. Behagliche 20 °C sind entlang des Rheins und der Ill in der KK vorhanden, in der SK ist es hier noch leicht kühl. In Kärnten und der Steiermark ist es in der KK behaglich, in der SK leicht kühl. Die Täler der Alpenregion sind als kühl bis leicht kühl einzustufen. Insgesamt liegt R4 in einem leicht kühlen Bereich laut KK und in einem kühlen laut SK. R5 ist kühl, mit den niedrigsten PET-Werten in der Mitte. Erstmals ist R6 in der SK deutlich zu erkennen. Die Darstellung feinerer Strukturen in den SK ist auf das

kleinere PET-Intervall im Vergleich zu den KK zurückzuführen, so dass Unterschiede in der PET-Verteilung differenzierter abgebildet werden. In R3* ist es sehr kalt.

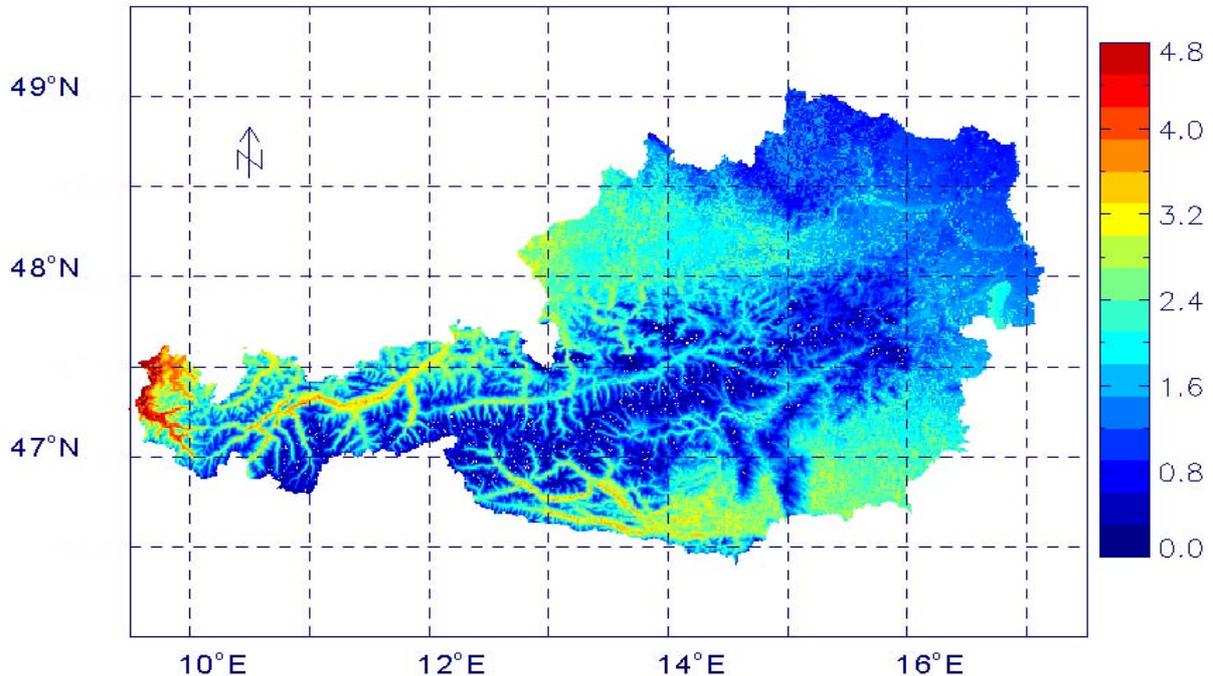


Abb. 7.40: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für April

MAI

Differenzen von über 4.9 °C entlang des Rheins und der Ill, über 4 °C entlang des Inns und in Kärnten entlang der Seen- und Flusslandschaft sowie über 2.4 °C im Süden der Steiermark werden sichtbar (Abb. 7.41). Im Westen Oberösterreichs und in zahlreichen Tälern der R2* zeigt die SK 2.4 °C bis 3.8 °C weniger an. In R5 werden in den Randgebieten bis zu 3.3 °C erreicht, in der Mitte unter 2 °C. In den Höheren Lagen der Alpen sind die Tiefsttemperaturen in den SK um 0.8 °C unter denen der KK und werden als extrem kalt empfunden. Leicht warm ist es entlang des Rheins und der Ill, sowie in R6 laut KK. In der SK wird hier das Klima als behaglich empfunden. In Kärnten, der Steiermark und dem Burgenland ist es in beiden Karten behaglich mit höheren Temperaturen in der KK. Täler der Alpenregion sind als leicht kühl in der SK und behaglich in der KK einzustufen. R4 ist in einen leicht kühlen Bereich laut SK und in einen behaglichen laut KK zu unterteilen. In R5 ist es laut SK leicht

kühl in den Randgebieten und kühl in Mitte. Die KK zeigt in den in den Randgebieten behagliches und in der Mitte leicht kühles Empfinden an. In R3* ist es kalt.

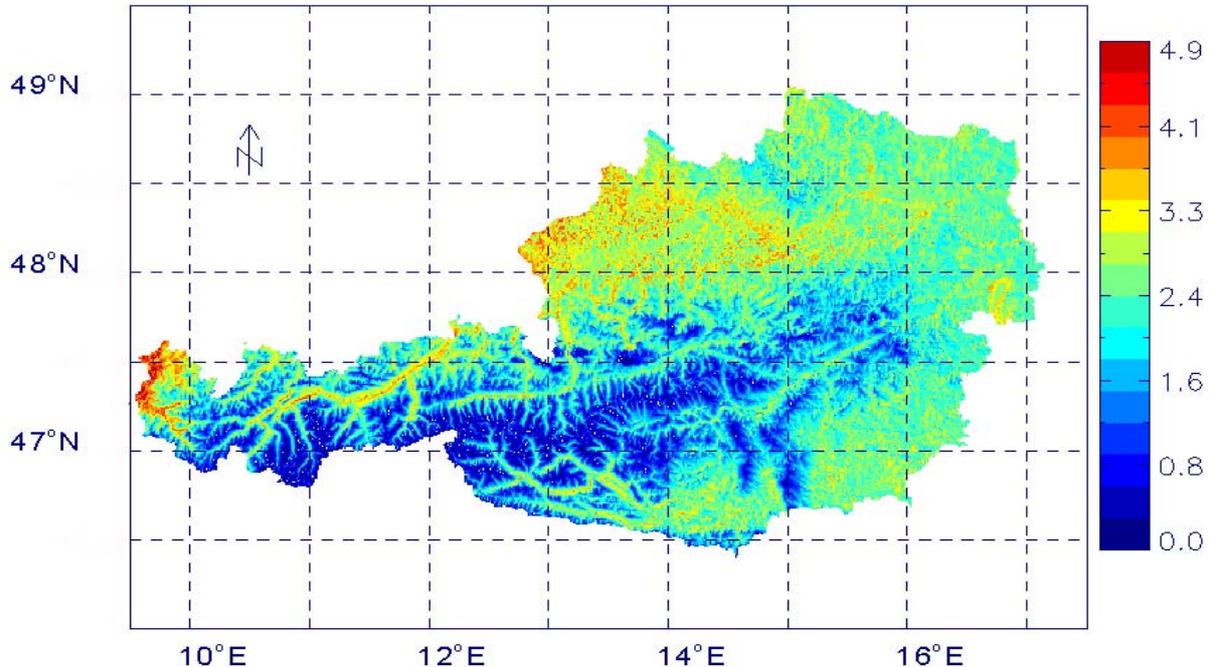


Abb. 7.41: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Mai

JUNI

Differenzen über 6.1 °C entlang des Rheins und des Ills, über 4 °C entlang des Inns mit Maxima im Inn-Delta und in Kärnten entlang der Seen- und Flusslandschaft sowie über 2.5 °C im Süden der Steiermark werden deutlich (Abb. 7.42). In Oberösterreichs und in zahlreichen Tälern der R2* zeigt die SK 2.5 °C bis 4.5 °C weniger an. In R5 werden in den Randgebieten bis zu 2.5 °C erreicht, in der Mitte unter 1 °C. In den Höheren Lagen der Alpen sind die Tiefsttemperaturen in den SK um 0.2 °C unter denen der KK und werden als extrem kalt empfunden. Leicht warm ist es entlang des Rheins und der Ill sowie in R6 laut SK. In der KK wird das Rheintal als warm empfunden sowie auch große Teile von R6. In Kärnten, der Steiermark und dem Burgenland ist es in der SK leicht warm, in der KK bereits warm. Die Täler der Alpenregion sind als behaglich bis leicht warm in der SK und als leicht warm laut KK einzustufen. R4 ist in einen leicht warmen Bereich laut SK und in einen leicht warmen bis

warmen Bereich laut KK einzuteilen. In R5 ist es in den Randgebieten behaglich bis leicht warm, in der Mitte behaglich und in R3* kühl.

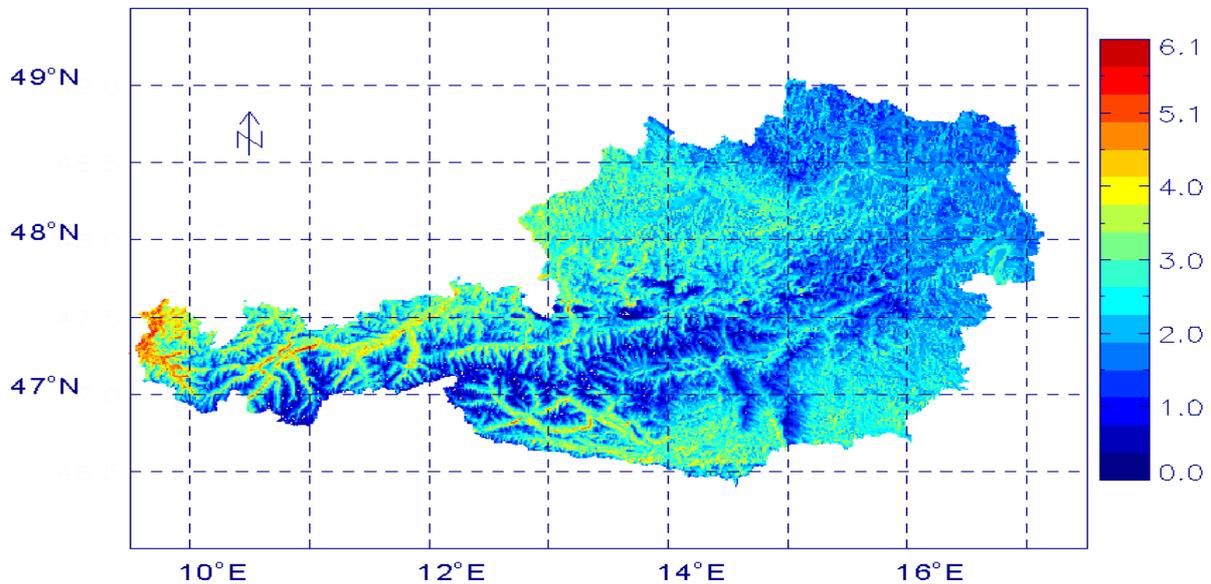


Abb. 7.42: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Juni

JULI

Differenzen von bis zu 6.4 °C entlang des Rheins, des Ills sowie des Inn-Deltas treten auf. Über 4.3 °C entlang des Inns und in Kärnten entlang der Seen- und Flusslandschaft sowie über 3.2 °C im Süden der Steiermark und des Burgenlands (Abb. 7.43). In Oberösterreichs und in zahlreichen Tälern der R2* zeigt die SK 2.5 °C bis 4.5 °C weniger an. In R5 werden im westlichen Randgebiet bis zu 3 °C erreicht, im östlichen unter 2.1 °C und in der Mitte unter 1 °C. Der Neusiedler See zeigt Abweichungen um 3.2 °C. In den Höheren Lagen der Alpen sind die Tiefsttemperaturen in den SK um 0.2 °C unter denen der KK und werden als extrem kalt empfunden. Die weiteren Regionen stimmen im Empfinden mit denen des Junis überein. Gut zu erkennen sind in der SK die reliefartige Vielfalt des Landes mit einer feinen Struktur der Hänge im Südosten Österreichs und im Wiener Becken die flache Ebene. In R3* ist es leicht kühl.

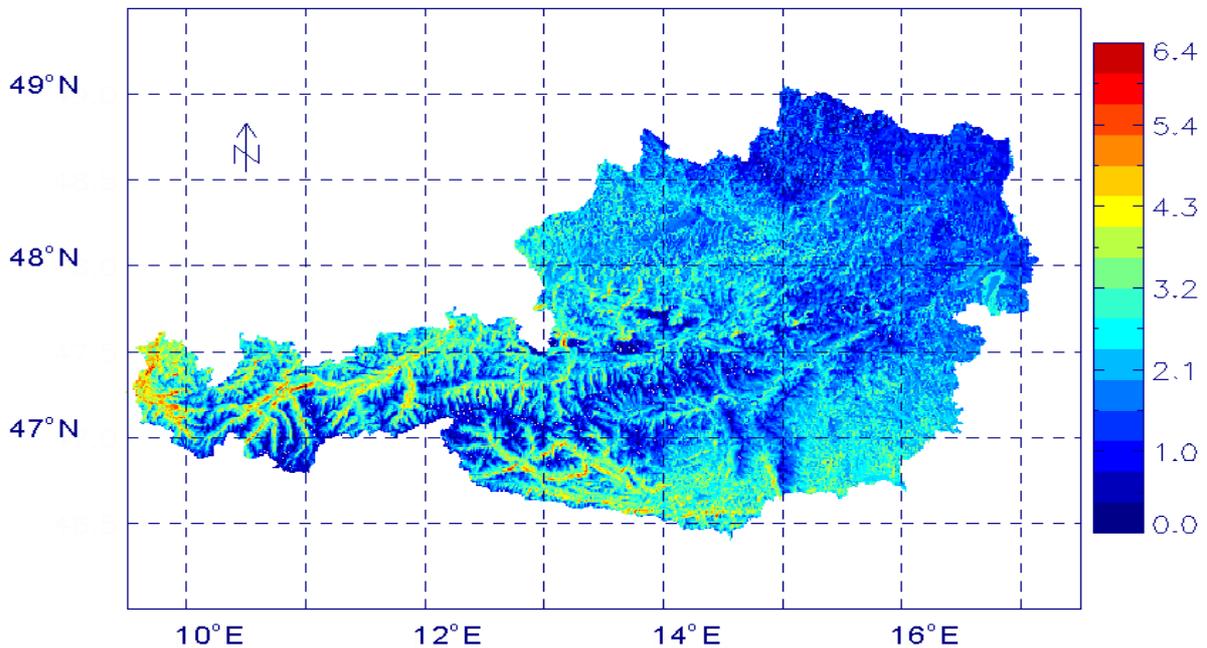


Abb. 7.43: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Juli

AUGUST

Differenzen von über 5.6 °C entlang des Rheins und des Ill treten auf, über 3.7 °C entlang des Inns mit Maxima im Inn-Delta, in Kärnten entlang der Seen- und Flusslandschaft sowie im Südwesten Oberösterreichs (Abb. 7.44). In den Höheren Lagen der Alpen sind die Tiefsttemperaturen in den SK bis unter 0.9 °C unter denen der KK und werden als extrem kalt empfunden. In den übrigen Regionen Österreichs liegt PET in der SK lokal um 1°C bis 2.5 °C unterhalb den Werten der KK. Der August zeigt in beiden Karten die höchsten PET-Werte im Jahr. Warm ist es entlang des Rheins und der Ill, sowie in der gesamten Region R6. Letztere kommt besonders in der SK zur Geltung. In R3 und R4 ist es leicht warm bis warm. Die Täler der Alpenregion sind als leicht warm einzustufen. In R5 ist es in den Randgebieten leicht warm in der Mitte behaglich, in R3* leicht kühl.

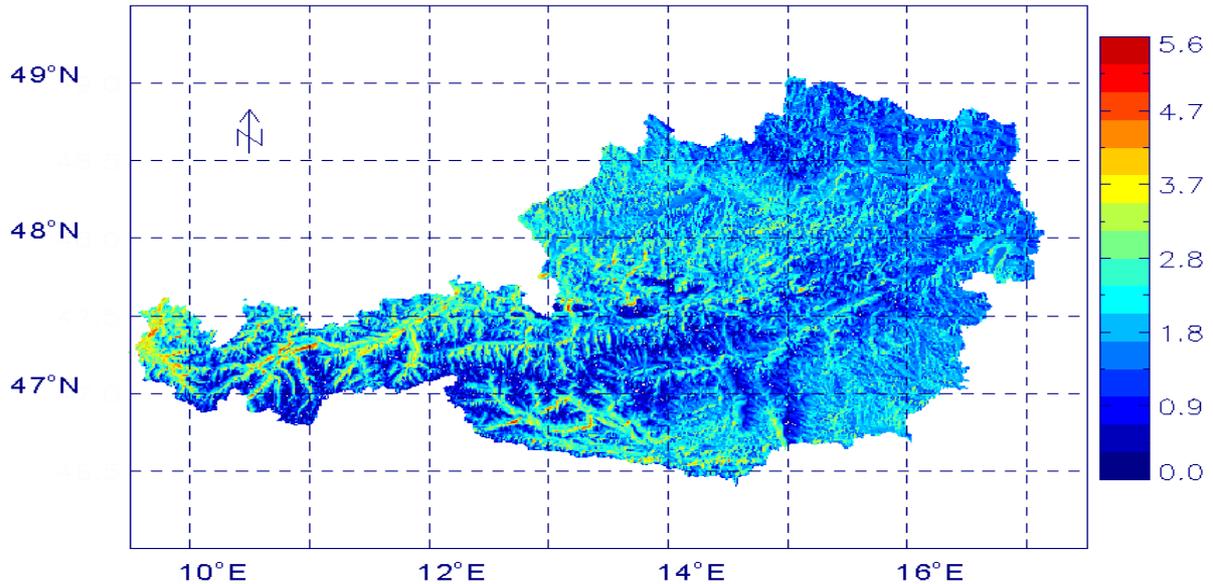


Abb. 7.44: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für August

SEPTEMBER

Differenzen von über 4.8 °C entlang des Rheins und des Ill, über 3.2 °C entlang des Inns mit Maxima im Inn-Delta, in Kärnten entlang der Seen- und Flusslandschaft sowie im Südwesten Oberösterreichs sind zu erkennen (Abb. 7.45). In zahlreichen Tälern der R2* zeigt die SK 0.8 °C bis 2.8 °C weniger an. In R5 werden im westlichen Randgebiet bis zu 1.8 °C erreicht, im östlichen unter 1 °C und in der Mitte unter 0.8 °C. Der Neusiedler See zeigt Abweichungen um 2 °C. In den Höheren Lagen der Alpen sind die niedrigsten PET-Werte in den SK fast 0.8 °C unter denen der KK und werden als extrem kalt empfunden. Behaglich bis leicht warm ist es entlang des Rheins und der Ill sowie in R6 laut SK. In der KK wird das Rheintal als leicht warm empfunden, sowie auch große Teile von R6. In Kärnten, der Steiermark und dem Burgenland ist es in beiden Karten behaglich bis leicht warm. Die Täler der Alpenregion sind als leicht kühl bis behaglich, R4 als behaglich einzustufen. In R5 ist es in den Randgebieten leicht kühl in der Mitte kühl, in R3* deutlich kühl.

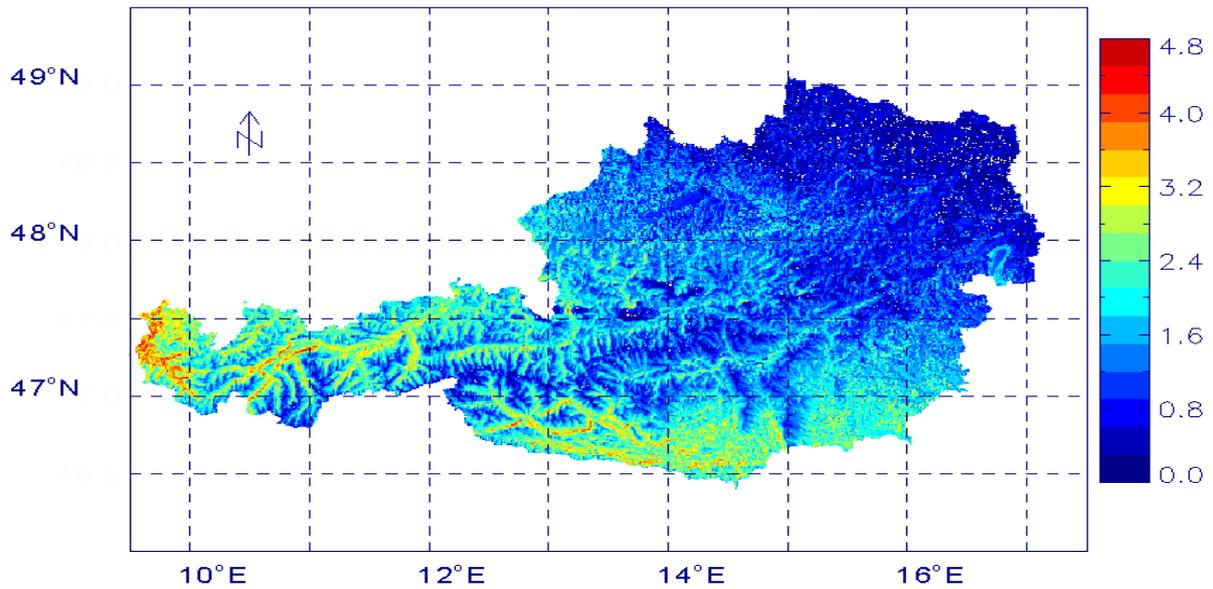


Abb. 7.45: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für September

OKTOBER

Differenzen von über 3.5 °C entlang des Rheins und des Ill, über 2.3 °C entlang des Inns treten auf (Abb. 7.46). In Kärnten entlang der Seen- und Flusslandschaft sowie im Südwesten Oberösterreichs liegt PET der SK unter 1.1 °C bis 2 °C unterhalb der KK. In zahlreichen Tälern der R2* zeigt die SK 1.4 °C weniger an. In R5 werden im westlichen Randgebiet bis zu 0.9 °C erreicht, im östlichen unter 0.3 °C und in der Mitte unter 0.2 °C. In den höheren Lagen der Alpen sind die Tiefsttemperaturen in den SK unter 0.8 °C unter denen der KK und werden als extrem kalt empfunden. Leicht kühl ist es entlang des Rheins und der Ill, sowie in R6 laut SK. In der KK wird das Rheintal als leicht kühl bis behaglich empfunden, sowie auch große Teile von R6. In Kärnten, der Steiermark und dem Burgenland ist es in den SK kühl bis leicht kühl, während die KK noch leicht kühles bis behagliches Empfinden zeigen. Die Täler der Alpenregion sind als kühl bis leicht kühl einzuteilen. R4 ist in einen leicht kühlen Bereich einzuteilen. In R5 ist es in den Randgebieten kühl in der Mitte kalt. In R3* ist es sehr kalt.

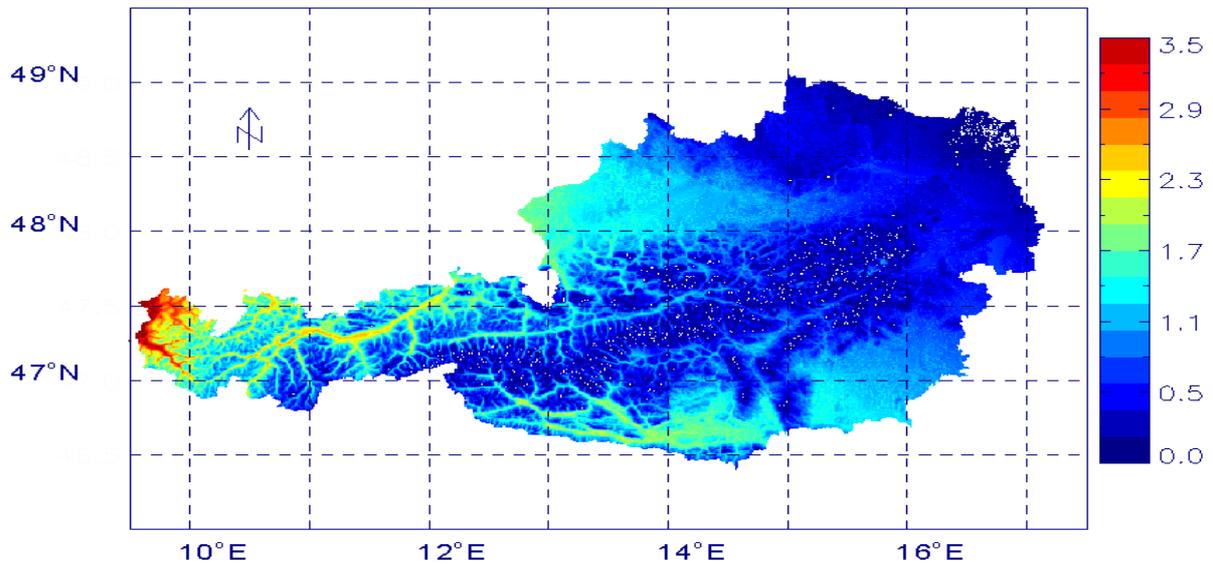


Abb. 7.46: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Oktober

NOVEMBER

Es treten Differenzen von über 2 °C entlang des Rheins und des Ill, über 1 °C entlang des Inns auf (Abb. 7.47). In Kärnten entlang der Seen- und Flusslandschaft, im Südwesten Oberösterreichs und vereinzelt Punkten im Süden Niederösterreichs, dem Osten Vorarlbergs und dem Wesen Tirols liegt PET der SK bis 1 °C unterhalb der KK. Im verbleibenden Österreich treten punktuelle Differenzen bis 0.7 °C auf. Die höheren Lagen der Alpen werden als extrem kalt empfunden. Sehr kalt bis kalt ist es entlang des Rheins und der Ill. In Kärnten, der Steiermark und dem Burgenland ist es sehr kalt bis kalt, wie auch in den Tälern der Alpenregion und R4. In R5 ist es in den Randgebieten sehr kalt, in der Mitte extrem kalt. In R3* ist es extrem kalt.

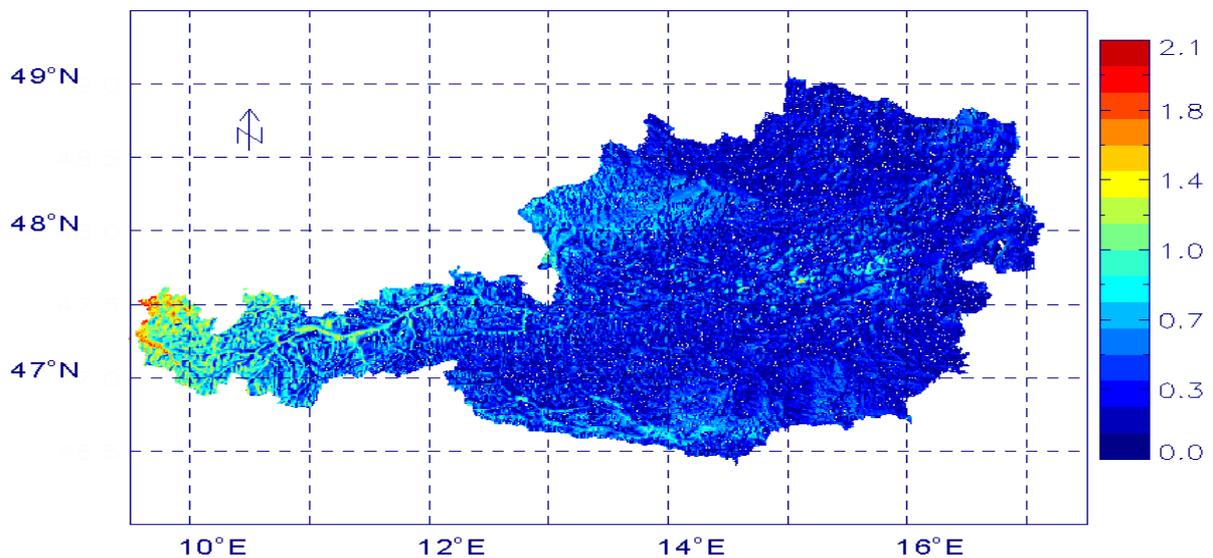


Abb. 7.47: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für November

DEZEMBER

Differenzen von über 2.4 °C sind vereinzelt im Westen Österreichs sowie im Osten zu erkennen (Abb. 7.48). Hier fällt markant der Neusiedler See auf. Von beiden Himmelsrichtungen ins Landesinnere liegen die Differenzen zwischen 11 °E und 14 °E unter 1 °C. Die höheren Lagen der Alpen werden als extrem kalt empfunden. Sehr kalt ist es entlang des Rheins und des Ill, im Süden Kärntens sowie der Steiermark und dem Burgenland. Hier sind die höchsten PET-Werte zwischen -1 °C und maximal 4 °C zu finden. Sehr kalt bis extrem kalt ist es in den Tälern der Alpenregion und R4. In R5 ist es extrem kalt mit den niedrigsten Temperaturen in der Gebietsmitte. In R3* ist es extrem kalt.

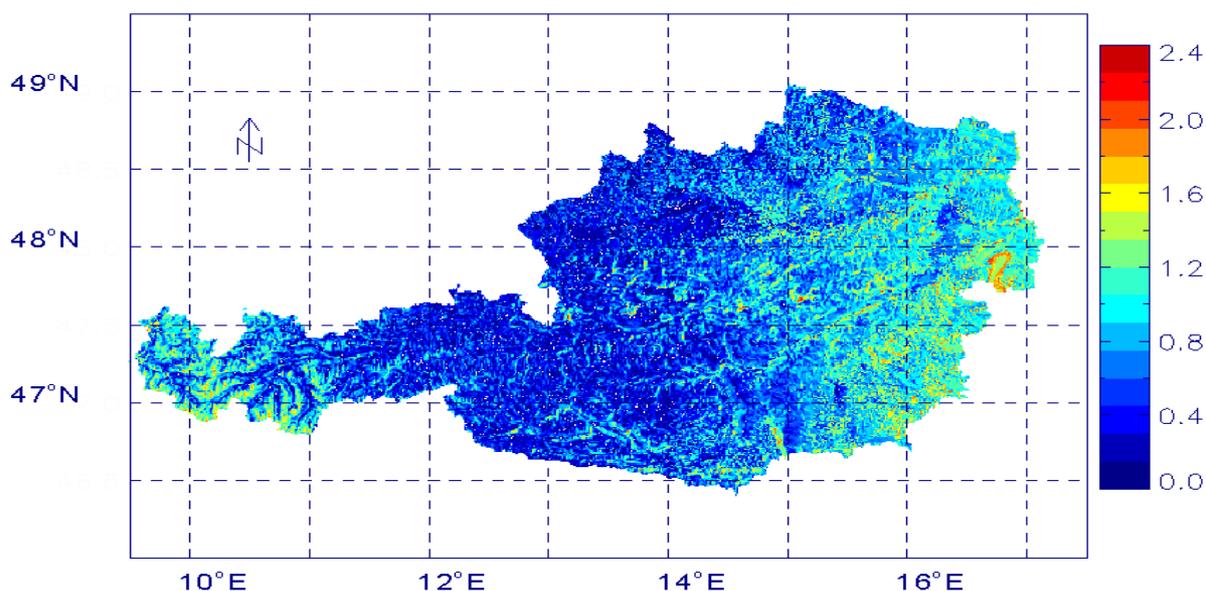


Abb. 7.48: Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Dezember

7.2.2 PET-Klassen

Die KK zeigt Gebiete mit bis zu 5 Tagen mehr im Jahr größer PET 35 °C als die SK an. Die Regionen R2 und R3* sind in beiden mit annähernd gleicher Tagesanzahl von unter 10 Tagen zu erkennen. Diese Gebiet in höheren Lagen sind in den Monatskarten bereits durch geringe PET-Werte aufgefallen, deren Differenzen zwischen Klima- und SK ganzjährig minimal sind. Damit ist nicht nur die geringe Anzahl an Tagen größer 35 °C zu erklären, sondern auch die annähernd gleich Menge. Region R2* zeigt in der KK 2 Tage mehr an als die SK. Für höhere PET-Werte hat sich herausgestellt, dass Karten auf der Basis von Synopdaten deutlich geringere Werte erreichen als auf den KK dargestellt. Dies ist auch in der Region R1 zu erkennen, wo die SK bis zu 3 Tage weniger anzeigen. Die Region R3 sowie das Gebiet um den Neusiedler See zeigen die höchsten PET-Tage größer 35 °C. Hier liegen die SK bis zu 5

Tage unterhalb der KK. In R4 treten lokal maximal 1 bis 2 Tage in den SK weniger auf. In R5 betragen die Unterschiede maximal einen Tag.

Die KK zeigt im Maximum 4 Tage mehr im Jahr zwischen leicht kühl und behaglich an als die SK, im Minimum sogar 28 Tage. Dies stimmt überein mit dem Verhalten der SK, die mit steigenden PET-Werte zunehmend negativ von den KK abweichen und deshalb in niedrigere PET-Klassen abfallen, was die hohe Differenz im Minimum erklärt. Die höchsten Gebiete in R2 und R3* weichen um bis zu 20 Tage ab, während es in den niederen Lagen 15 ebenso wie in R2*. In R1, R3 und R4 divergieren die Maxima um bis zu 4 Tage, während die Minima um 14 Tage unter denen der KK liegen. In R5 werden maximal gleich viele Tage erreicht, das Minimum liegt in den SK allerdings 13 Tage unterhalb der Angaben der KK.

In der SK werden mindestens 16 Tage in einigen Regionen als extrem kalt empfunden, während es in der KK lediglich einer ist. Im Maximum sind 23 Tage mehr Tage unter 0 °C in der SK zu erkennen als in der KK. Dies stimmt mit den bisherigen Beobachtungen über, das in den SK deutlich geringere PET-Werte erreicht werden. Die größten Differenzen sind in R2 und R3* mit den maximalen Höhenlagen vorzufinden und in R1 entlang des Rheintals. Im letzteren werden im Jahr die höchsten PET-Werte erreicht, so dass gerade die Abweichungen in dem negativen Gradbereich schlüssig sind. In R3 und R4 liegen die Abweichungen zwischen 20 und 30 Tagen, während sich in R5 beide Karten wieder annähern.

7.3 Lokaler Vergleich von Klima- und Synopstationen

Die in Kapitel 6 beschriebenen Stationen Innsbruck, Sonnblick und Salzburg zeigen alle einen typischen Jahresgang in der relativen Häufigkeitsverteilung mit vermehrt auftretendem leicht kühlem bis extrem kalten Empfinden in den Wintermonaten und zunehmenden behaglichem bis sehr heißem Empfinden in den Sommermonaten. Dieser Jahresgang verläuft parallel zum Jahresgang der Sonne.

Deutlich sichtbar wird der Einfluss der Höhenlage einer Station anhand der Verteilung von Sonnblick. Hier werden im August die einzigen behaglichen Tage in kleiner Prozentzahl angezeigt, während im verbleibenden Jahr PET-Klassen unterhalb von kalt überwiegen. In einer Höhe von 3105 m in den Alpen sind die Windgeschwindigkeiten sehr hoch und nehmen zum August hin ab (Abb. 7.49).

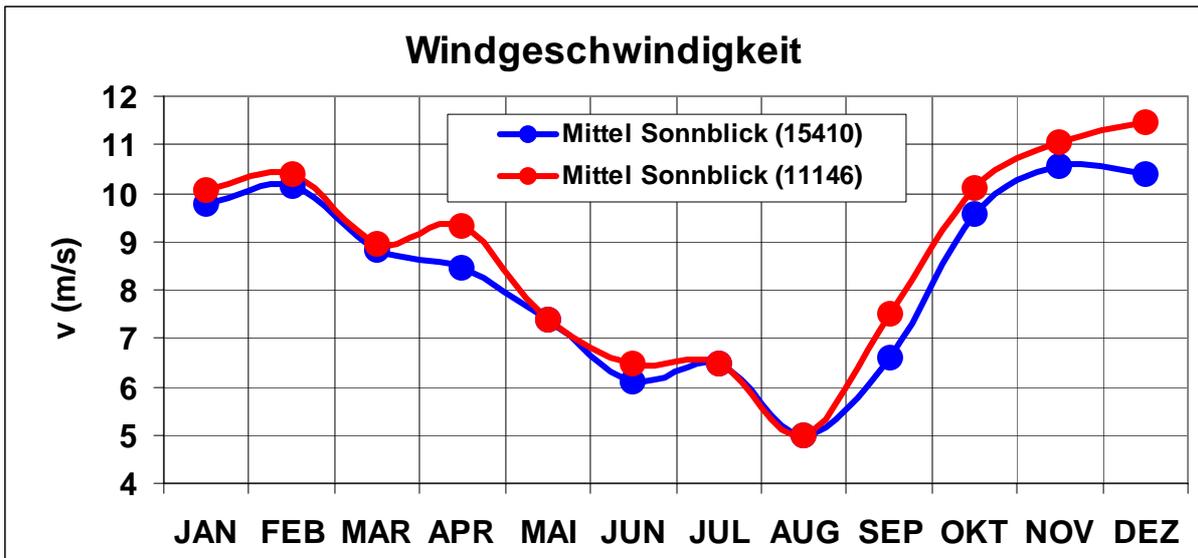


Abb. 7.49: Mittlerer Jahresgang der Windgeschwindigkeit für die Klimastation Sonnblick (15410) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Sonnblick (11146) um 13 Uhr MEZ

Deutlich zu erkennen ist auch das Maximum von T_{mrt} in den Sommermonaten (Abb. 7.50), dass in der Synopstation größer ist als in der Klimastation.

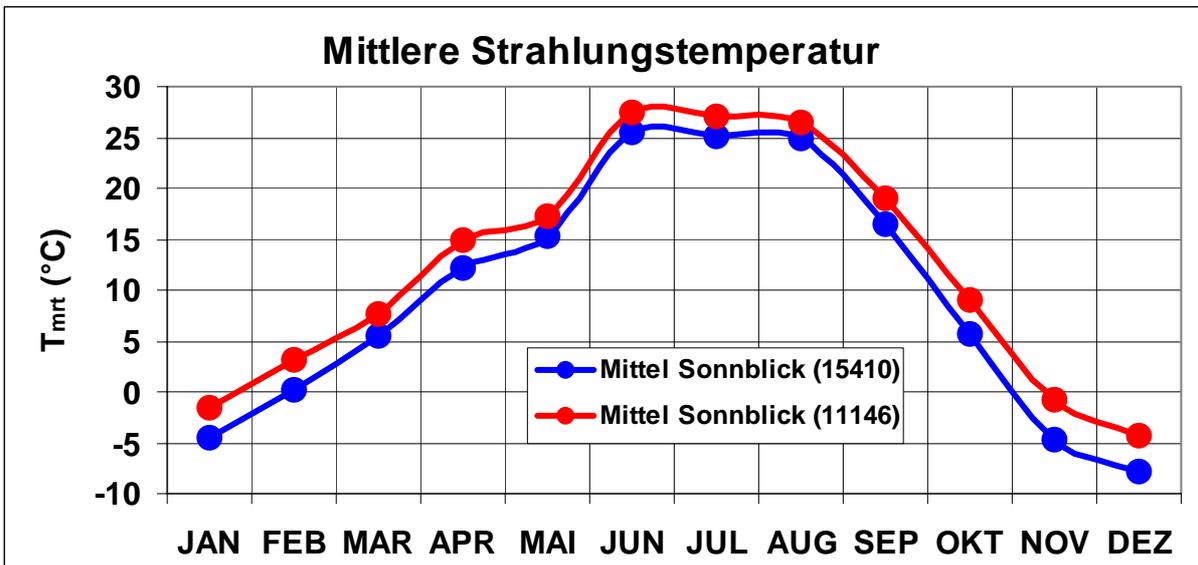


Abb. 7.50: Mittlerer Jahresgang der mittleren Strahlungstemperatur für die Klimastation Sonnblick (15410) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Sonnblick (11146) um 13 Uhr MEZ

T_a erreicht ebenso im August sein Maximum (Abb. 7.51), während die Unterschiede beider Stationstypen minimal sind.

Insgesamt erklären diese Größen den Jahresgang von PET. Betrachtet man die Tage der PET-Klassen im Jahr, so fällt zwar auf, dass in den oberen Empfindungsstufen die Klimastation höhere Werte anzeigt, aber diese Differenz ist insgesamt verhältnismäßig klein und kann in Anbetracht der ebenfalls geringen Unterschiede in den darunter liegenden PET-Klassen keinem Muster zugeordnet werden. Vielmehr wird wie in den Bioklimakarten deutlich, dass die Unterschiede zwischen Klima- und Synopstationen in den höheren Lagen minimal sind und aufgrund der extremen Umgebungsbedingungen dazu führen, dass beide Datensätze fast identische Ergebnisse produzieren.

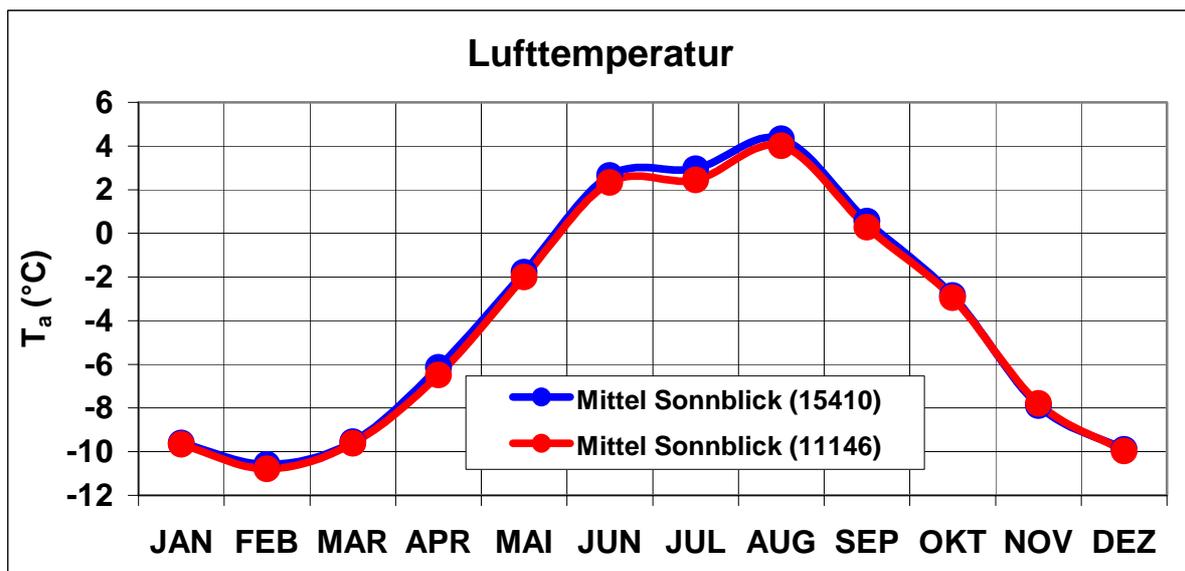


Abb. 7.51: Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur für die Klimastation Sonnblick (15410) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Sonnblick (11146) um 13 Uhr MEZ

Innsbruck liegt in den Alpen am Inn im Haupt-Föhngebiet und zeigt deutliche Unterschiede zwischen Synop- und Klimastation. PET-Klassen über dem Behaglichkeitsempfinden treten in der Klimastation häufiger als in der Synopstation auf. Da in der Klimastation die höheren PET-Klassen überwiegen treten weniger behagliche Tage auf, wie auch weniger Tage in den Klassen darunter. Deutlich sichtbar ist die Verschiebung von PET auf niedrigere Empfindungsstufen. T_{mrt} weicht in den Stationen nur geringfügig voneinander ab (Abb. 7.52)

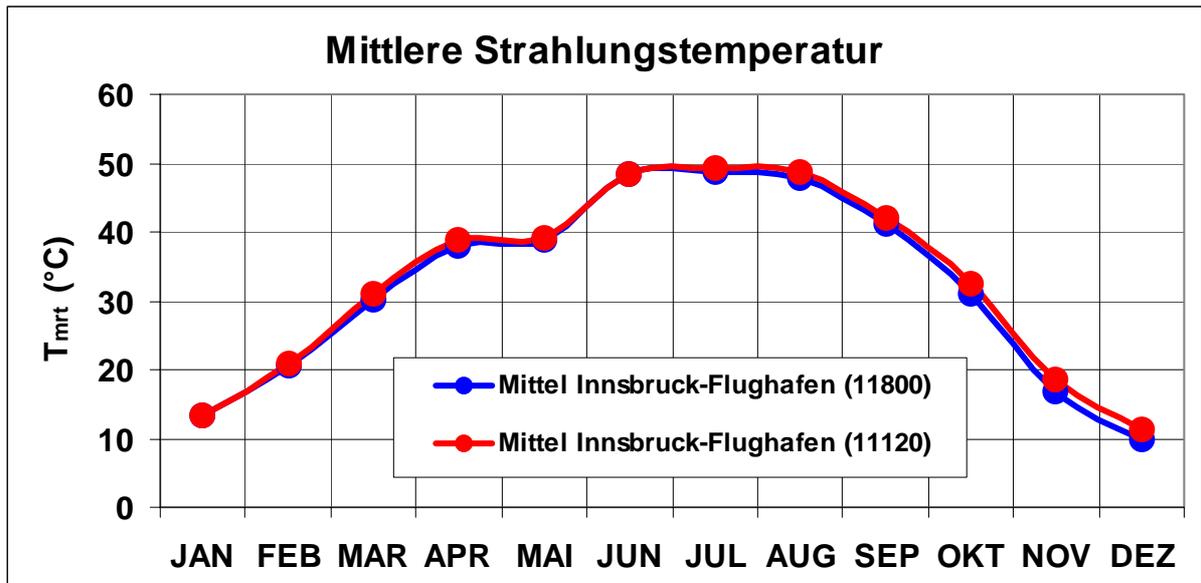


Abb. 7.52: Mittlerer Jahresgang der mittleren Strahlungstemperatur für die Klimastation Innsbruck-Flughafen (11800) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Innsbruck-Flughafen (11120) um 13 Uhr MEZ

Die Lufttemperatur zeigt deutlich höhere Werte für die Klimastation (Abb 7.53).

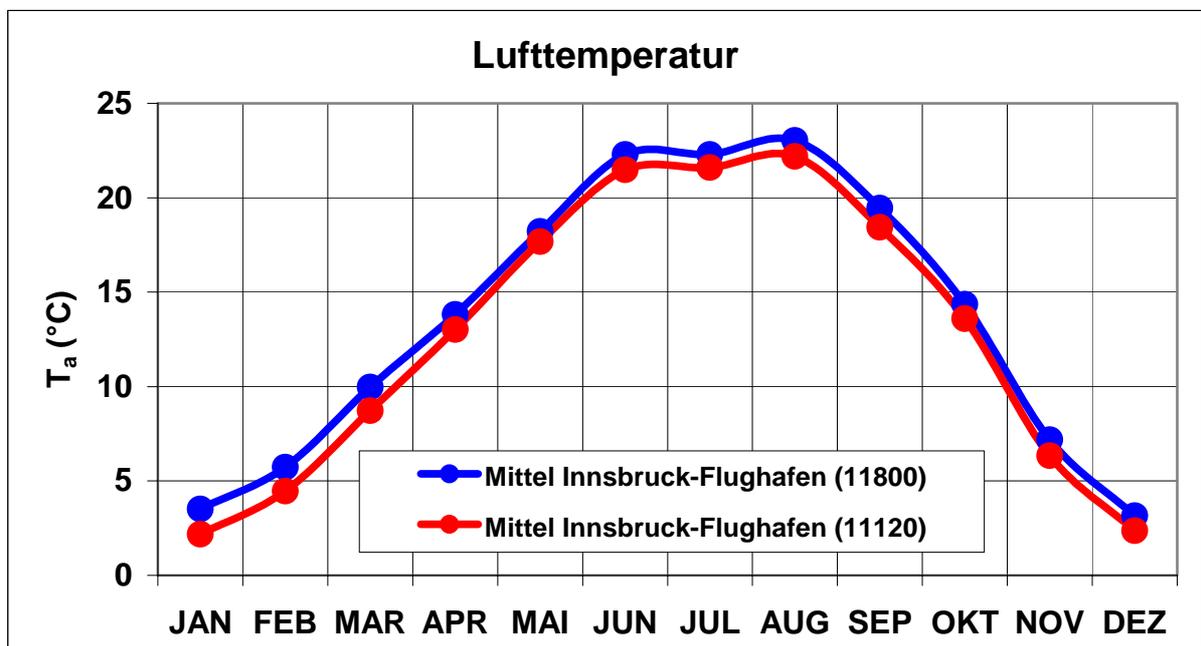


Abb. 7.53: Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur für die Klimastation Innsbruck-Flughafen (11800) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Innsbruck-Flughafen (11120) um 13 Uhr MEZ

Im Vergleich ist die Windgeschwindigkeit der Klimastation ganzjährig größer als in der Synopstation (Abb. 7.54).

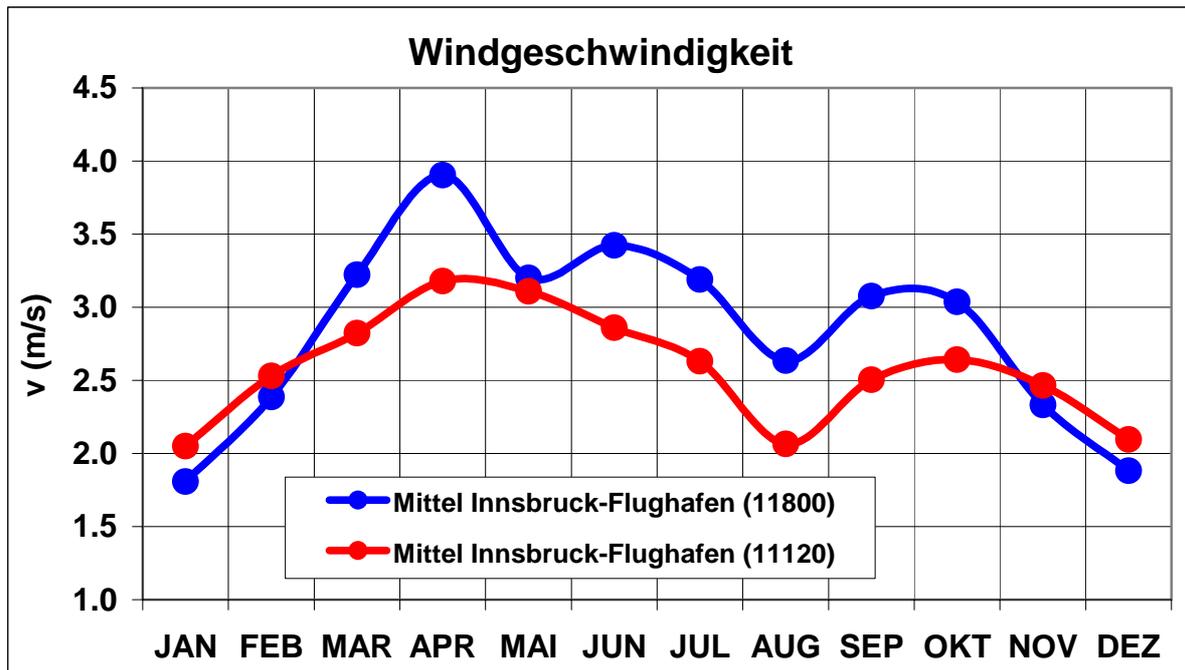


Abb. 7.54: Mittlerer Jahresgang der Windgeschwindigkeit für die Klimastation Innsbruck-Flughafen (11800) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Innsbruck-Flughafen (11120) um 13 Uhr MEZ

Dies impliziert eine Dämpfung des Effektes der höheren Lufttemperaturen in der Klimastation, welche sich denen der Synopstation angleichen müssten, was nicht geschieht. Man erkennt zwar in beiden Stationstypen den Abfall der Windgeschwindigkeit im August mit den hier maximalen Lufttemperaturen und PET-Werten, aber trotz höherer Windgeschwindigkeit werden deutlich mehr Tage im Jahr von PET-Klassen oberhalb der Behaglichkeitswahrnehmung durch die Klimastation wiedergegeben. Dies lässt vermuten, dass die Windgeschwindigkeit bei der Berechnung des thermischen Komforts eine untergeordnete Rolle spielt.

Die beiden Stationen Salzburgs zeigen ein ähnliches Verhalten bezüglich der Verteilung der PET-Klassen wie in Innsbruck. T_{mrt} liegt für die Synopstation wie erwartet leicht oberhalb der Werte der Klimastation (Abb. 7.55), während T_a (Abb. 7.56) leicht unterhalb anzutreffen ist. Die Windgeschwindigkeit zeigt nur sehr geringe Abweichungen was die bisherige Vermutung unterstützt, dass sie keinen direkten Einfluss auf die Differenzen zwischen den beiden Stationstypen hat (Abb. 7.57).

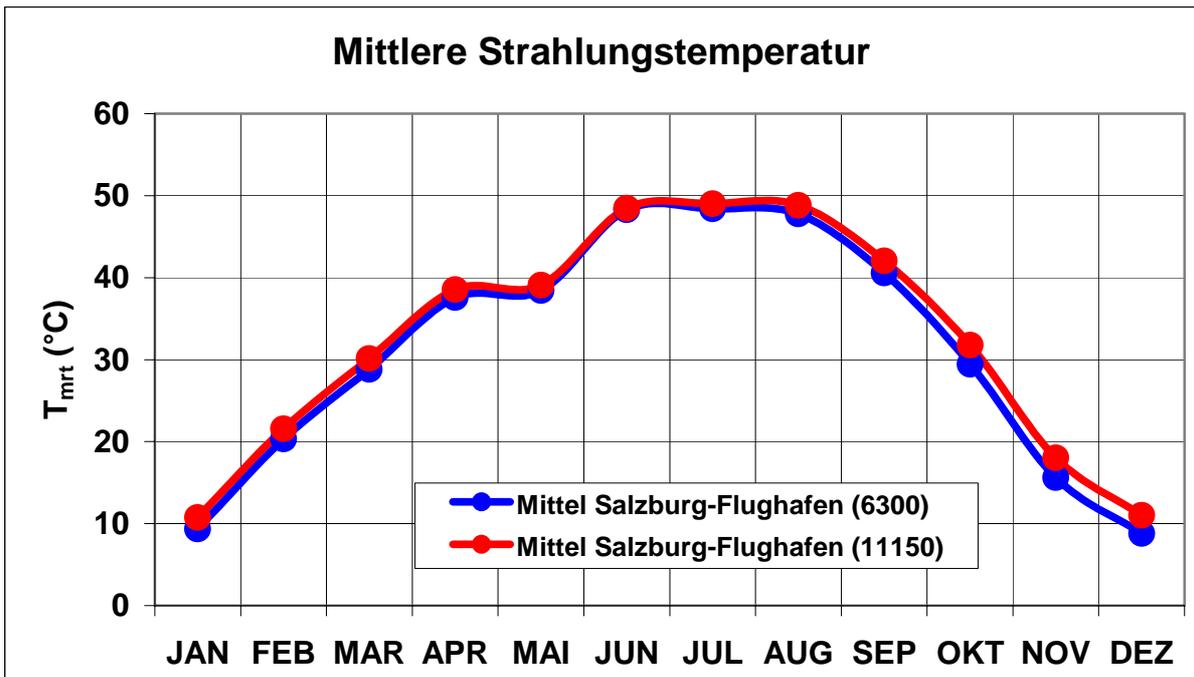


Abb. 7.55: Mittlerer Jahresgang der mittleren Strahlungstemperatur für die Klimastation Salzburg-Flughafen (6300) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Salzburg-Flughafen (11150) um 13 Uhr MEZ

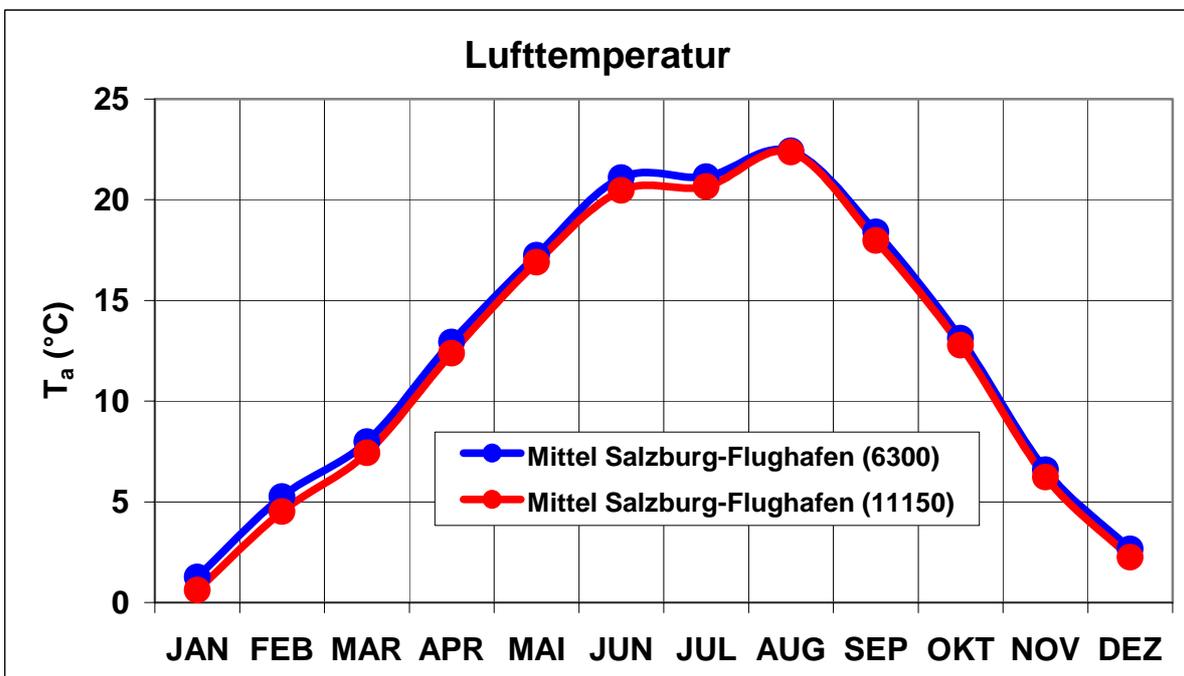


Abb. 7.56: Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur für die Klimastation Salzburg-Flughafen (6300) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Salzburg-Flughafen (11150) um 13 Uhr MEZ

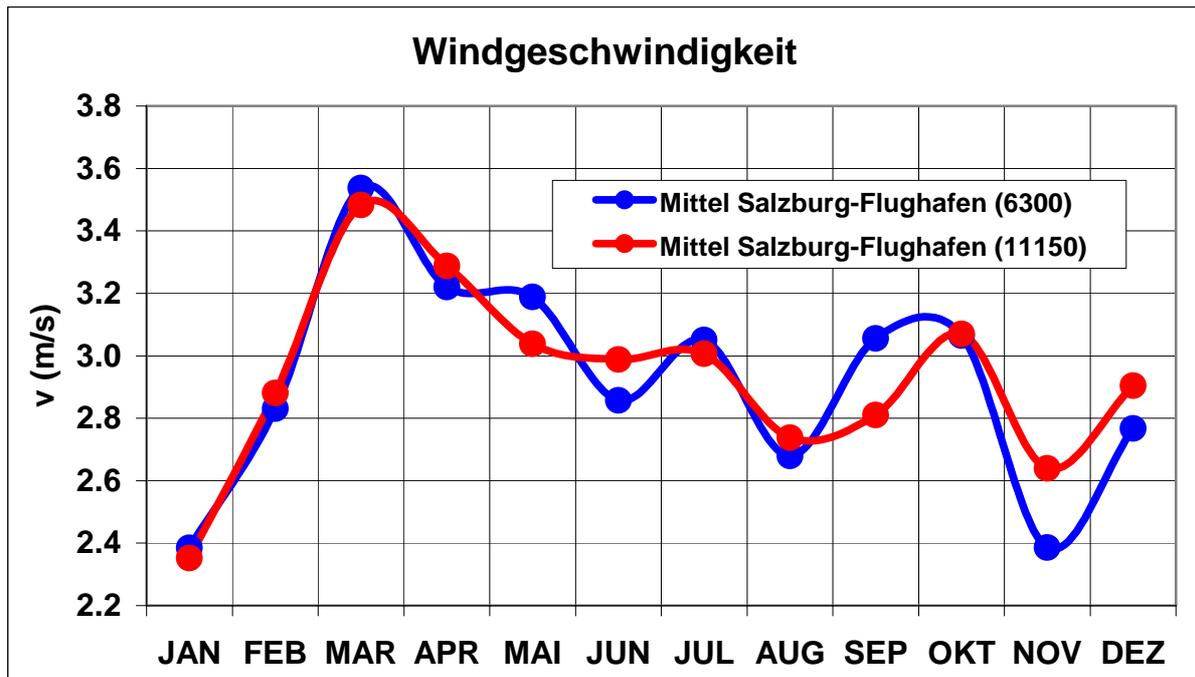


Abb. 7.57: Mittlerer Jahresgang der Windgeschwindigkeit für die Klimastation Salzburg-Flughafen (6300) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Salzburg-Flughafen (11150) um 13 Uhr MEZ

Die Lufttemperatur scheint damit den höheren Strahlungsanteil in der Berechnung von PET nicht nur zu kompensieren, sondern ist auch dafür verantwortlich, dass höhere PET-Klassen in der Klimastation im Vergleich zur Synopstation vermehrt auftreten.

7.4 Vergleich mit anderen Bioklimakarten

Zunächst erfolgt die Gegenüberstellung zur bisher einzigen Bioklimakarte von Österreich nach Rudel et al. (1983). Anschließend werden einige vergleichende Betrachtungen zur Bioklimakarte von Griechenland nach Matzarakis und Mayer (1997) und zur Bioklimakarte von Deutschland nach Jendritzky (1988, 1995) durchgeführt.

7.4.1 Bestehende Bioklimakarte von Österreich

Die erste Bioklimakarte von Österreich nach Rudel et al. (1983) wurde, wie auch die hier dargestellten Karten, für Zwecke der Kur-, Rekonvaleszenz- und Ferienplanung entwickelt. In Übereinstimmung beider Arbeiten hat sich gezeigt, dass die geographische Breite, die Höhe eines Ortes über dem Meeresspiegel und die Lage im Gelände das Klima eines Ortes bzw. einer Landschaft bestimmen. Dies ist anhand fast identischen Regionen gleicher

bioklimatischer Relevanz im Vergleich nachzuvollziehen. Sowohl 1983 als auch heute hat sich gezeigt, dass Niederungen, Becken und Täler zu hohen Temperaturen und einem belastenden Bioklima führen, dass im Sommer seine maximaler Ausprägung erfährt und im Winter aufgrund der auftretenden Inversion unterstützt wird.

Es lassen sich jedoch auch grundlegende Unterschiede im Vergleich zur Untersuchung von 1983 feststellen. Rudel et al. (1983) entwickelten eine Bioklimakarte basierend auf den sommerlichen Werten des thermischen Wirkungskomplexes, die auch auf den Winter übertragbar sein soll. Gebiete mit einem belastenden Klima im Sommer können durchaus auch ein solches im Winter vorweisen (Rudel et al., 1983). Allerdings wird gleichzeitig angemerkt, dass diese Aussage zu pauschal und auch falsch sein kann. Demnach stellt die Karte lediglich bioklimatische Bereiche dar, die im langjährigen Mittel als am häufigsten auftretenden Bioklimastufen zu verstehen sind und kann nur aus diesem Grund als Ganzjahreskarte angesehen werden. Des weiteren wurde eine Unterteilung in Belastungs-, Schon- und Reizstufen nach Becker (1973) durchgeführt, sowie bioklimatische Allgemeinkenntnisse, basierend auf umfangreiche Messungen und Beobachtungen in den österreichischen Kurorten und „Heilklimahoffnungsgebieten“. Objektives Grundlagenmaterial stellen alle von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik gemessenen Klimadaten von 1951 bis 1980 dar. Nicht gemessene Parameter wurden berechnet (Auer et al., 1982). Zusätzlich zog man folgende weitere Karten und Publikation als Grundlagenmaterial hinzu (Rudel et al., 1983).

Im Gegensatz dazu liefert diese Arbeit nicht eine Ganzjahreskarte, sondern für jeden Kalendermonat eine entsprechende Karte, so dass eine dynamische Entwicklung innerhalb des Jahres sichtbar wird. Grundlage der Karten bilden zwei verschiedene Datensätze, Klima- und Synopdaten, die vom 1. Januar 1996 bis 31. Dezember 2000 Messwerte für 7 Uhr, 14 Uhr, 19 Uhr MOZ bzw. 7 Uhr, 13 Uhr, 19 Uhr MEZ liefern. Im Gegensatz zu 1983 wurde keine Einteilung des Landes in bioklimatische Stufen durchgeführt, sondern eine Regionalisierung anhand von PET-Klassen. Diese sind eingeteilt in physiologisch äquivalente Temperaturintervalle, denen eine Empfindungsstufe des Klimas durch den Menschen betreffend des thermischen Komforts zuzuordnen ist. Die Darstellung erfolgte aufgrund moderner Satellitenmessungen in einer Auflösung von 1 km. Anhand der Messwerte erfolgte die Modellierung des thermischen Index für die einzelnen Stationen und aus den berechneten Monatsmittelwerten ergab sich durch die beschriebene Regressionsanalyse die computergestützte Übertragung von PET in die Fläche. Aufgrund der höheren Auflösung im Vergleich zu 1983 sind die vielfältigen Reliefstrukturen in den Darstellungen von PET

deutlicher sichtbar. Dadurch fallen gerade im Bereich der Alpen zahlreiche Arme und Verzweigungen von einzelnen PET-Klassen auf, die in der Karte von Rudel et al. (1983) nicht differenziert zu erkennen sind. Dies wird besonders im Bereich des Zusammenschlusses zahlreicher kleiner Flüsse in den Alpen sichtbar, die den Inn bilden. Gleichzeitig sind in dieser Region die höchsten Erhebungen mit den niedrigsten Temperaturen und höchsten Windgeschwindigkeiten in der Karte von Rudel et al. nicht deutlich sichtbar. Zwischen Berge und vielen höher liegenden Tälern kann nicht unterschieden werden. Die thermische Belastung in den Talregionen tritt in den Klima- und Synopkarten auch bezüglich der Intensität stärker hervor. Im Süden der Steiermark, des Burgenlandes, sowie Südkärntens entlang der Seenlandschaft treten die Reliefstrukturen mit den höchsten PET-Werten besonders deutlich hervor, was bei Rudel et al. nicht sichtbar wird. Nur tendenziell lässt sich dort der Effekt durch die Wärmespeicherung der Seenlandschaft bzw. der Übergang zum kontinentalen Klima erkennen. Die klimatische Unterschied von westlichen Oberösterreich zum östlichen Niederösterreich ist damals als auch heute zu erkennen. Allerdings werden in den Wintermonaten die Strukturen des östlichen Alpenvorlandes differenzierter durch eine höhere Anzahl an PET-Klassen aufgelöst und zeigen die Schwäche der ersten Bioklimakarte von Österreich auf große Gebiete nur allgemein zu beschreiben. Das Wiener Becken und speziell die Region um den Neusiedler See treten in den aktuellen Darstellung durch besonders hohe PET-Werte in den Vordergrund, was bei Rudel et al. nicht der Fall ist. Ähnliches thermisches Verhalten ist entlang des Rheintals, im Mühl- und Waldviertel, sowie den Gebirgen der Region R3* zu erkennen.

7.4.1 Bioklimakarten anderer Länder

Im Gegensatz zu dieser Untersuchung verwenden Matzarakis und Mayer (1997) PMV als thermischen Index zur Beschreibung des Bioklimas. Die zur Verfügung gestellten Daten stammten ausschließlich von synoptischen Stationen des griechischen Wetterdienstes. Während der Messzeitraum vom 1. Januar 1980 bis 31. Dezember 1989 für die Griechenland-Karte um fünf Jahre länger gewesen ist als in dieser Untersuchung, so stimmen doch die Messzeitpunkte mit 12 Uhr UTC überein. Als Eingabeparameter in das Klima-Michel-Model wurde ebenfalls eine Aktivität von 80 W vorausgesetzt. Der Bekleidungsdurchgangswiderstand betrug im Sommer 0.5 clo, während im Winter und den dazu gehörigen Übergangsjahreszeiten eine thermophysiologisch Anpassung der Bekleidung erfolgte. Ebenfalls durchgeführt wurde eine multiple lineare Regression, welche es ermöglichte für jeden Gitterpunkt PMV als eine Funktion von geographischer Breite, Grad der

Kontinentalität, Höhe über dem Meeresspiegel, Hangneigung und Hangrichtung sowie Bedeckungsgrad von Land- und Meeresoberfläche zu berechnen. Dies lieferte entsprechende monatliche Bioklimakarten von Griechenland. Analog zu dieser Untersuchung treten auch in Griechenland in Höhen über 1500 m Regionen mit Kältestress auf. Deutlich sichtbar wurde auch der mediterrane Effekt an den Küstengebieten, wo keine oder kaum thermische Belastungen auftreten. Mit dem Übergang zu Landesinneren ändert sich dies und das zunehmende kontinentale Klima führt zu hohen thermischen Belastungen mit Maxima im Juli und August. Damit zeigen sich auch in dieser Untersuchung ähnliche Verhaltensmuster im Vergleich zur Regionalisierung von Österreich, die durch klimatische und geographische Vorgaben beeinflusst werden.

Die Bioklimakarte nach Jendritzky (1995) wurde ebenfalls auf der Grundlage von PMV erstellt. Konstante Eingangsparameter sind der Bekleidungsdurchgangswiderstand mit 0.9 clo und die Aktivität des Menschen mit 116 W/m². Ausgangspunkt der Modellierung ist ebenfalls die multiple lineare Regressionsanalyse, welche PMV in Beziehung zur Landnutzung, Höhe über dem Meeresspiegel, Geländeform und Exposition stellt. Allerdings erfolgt keine Darstellung einzelner Monate, sondern eine Verteilung der thermischen Bedingungen um 14 Uhr an einem schwachwindigen, wolkenlosen Sommertag. Die Einteilung der thermischen Belastung ist in 18 verschiedenen Stufen des Kälte- und Wärmestresses vorgenommen worden. Es ergeben sich aber ähnliche Verteilungsmuster bezüglich Gebiete mit schwachen oder starken Belastungen, wie in der Regionalisierung von Österreich, was unter anderem wieder den klimatischen und geographischen Vorgaben zuzuschreiben ist.

8. ABSCHLIEßENDE BETRACHTUNG

8.1 Schlussfolgerungen und Anmerkungen

Der Vergleich von Klima- und Synopdaten anhand der Regionalisierung von PET hat gezeigt, dass beide Datensätze betreffend der räumlichen PET Verteilung tendenziell ähnliche Ergebnisse wiedergeben. Daraus lässt sich folgern, dass die kleinräumigen klimatischen und geographischen Verhältnisse durch die multiple linear Regression einheitlich interpretiert werden können. Allerdings zeigt sich in allen erzeugten Karten, dass auf der Basis von Klimadaten im Vergleich zu den Synopdaten höhere PET-Werte erreicht werden.

Die Differenz der beiden Messzeitpunkt von 14 Uhr MOZ der Klimadaten zu 13 Uhr MEZ der Synopdaten liefert einige Erklärungsansätze. Betrachtet man die absolute Differenz der

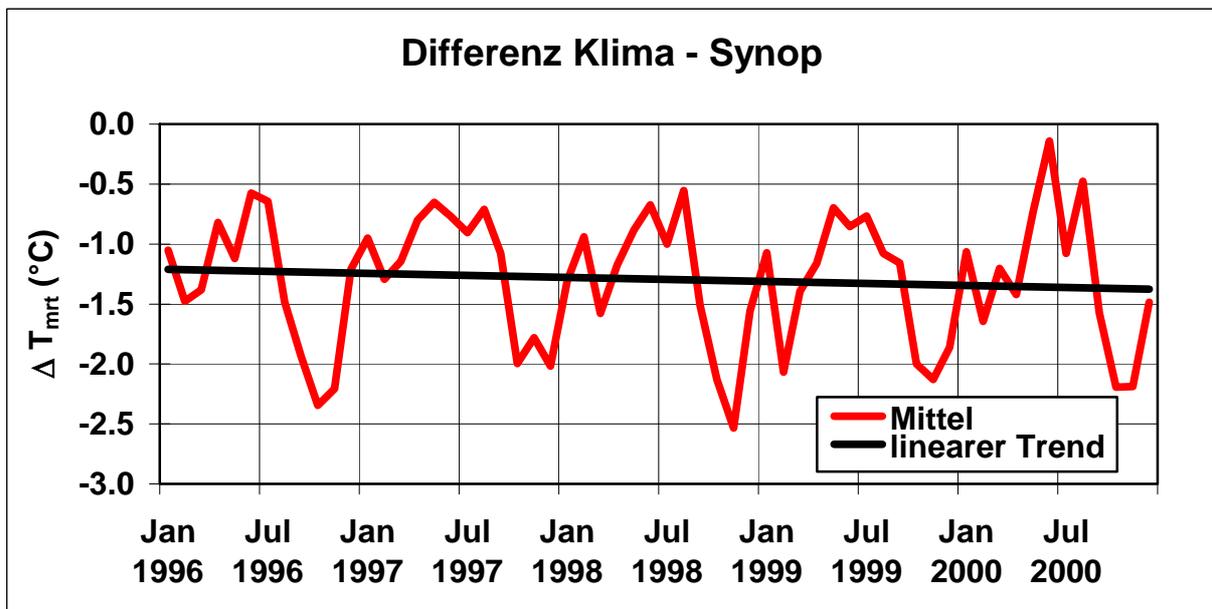


Abb. 8.58.: Mittlere Differenz der mittlere Strahlungstemperatur von 19 Standorten gemeinsamer Klimastationen (14 Uhr MOZ) und Synopstationen (13 Uhr MEZ)

mittleren Strahlungstemperatur der beiden Datensätze so pendelt diese während des gesamten Untersuchungszeitraums um -1.2 °C (Abb. 8.58). Dies ist auf das Maximum des Tagesganges der Sonne zurückzuführen, welches näher am Messzeitpunkt der Synopstationen liegt und diese durch die vermehrt auftretende solare Strahlung insgesamt eine höhere mittlere Strahlungstemperatur besitzen. Der Jahresgang des Sonnenhöhenwinkels ist an dem

periodischen Verlauf des Mittels zu erkennen, mit maximaler Sonneneinstrahlung in den Sommermonaten und minimaler in den Wintermonaten.

Betrachtet man analog dazu die mittlere absolute Differenz der Lufttemperatur so ist diese für die Klimastationen während des gesamten Untersuchungszeitraumes zwischen 0.4 °C und 0.6 °C höher als für die Synopstationen (Abb. 8.59). Dies ist der Trägheit der Lufterwärmung zuzuordnen, so dass das Tagesmaximum der Lufttemperatur ca. eine Stunde hinter dem der mittleren Strahlungstemperatur liegt und damit näher am Messzeitpunkt der Klimastationen.

Auffällig ist der große Anstieg der Lufttemperatur Anfang 1998, der mit einem entsprechenden Absinken des Wasserdampfdruckes im gleichen Zeitraum verbunden sein muss, was auch zu erkennen ist (Abb. 8.60). Die großen Unterschiede in der Lufttemperatur ergeben sich durch deutlich geringere Messwerte der Synopstationen. Ein gerätebedingter Messfehler lässt sich allerdings ausschließen, da es unwahrscheinlich erscheint zeitgleich an 19 Stationen verschiedener Standorte die gleiche Fehlerquelle vorzufinden. Die unter 0.1 hPa nahezu konstante Differenz des Wasserdampfdruckes beider Stationstypen lässt ansonsten vermuten, dass sich der Parameter während der beiden Mittagstermine nicht verändert hat und somit für die Unterschiede in PET nicht verantwortlich sein kann.

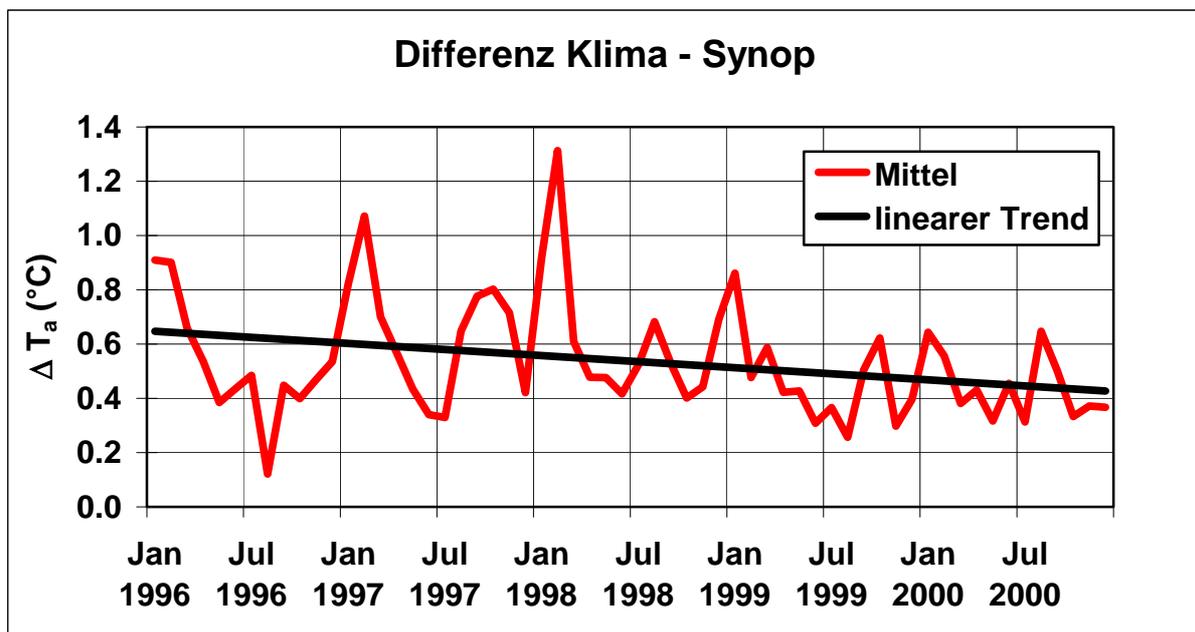


Abb. 8.59: Mittlere Differenz der Lufttemperatur von 19 Standorten gemeinsamer Klimastationen (14 Uhr MOZ) und Synopstationen (13 Uhr MEZ)

Die mittlere absolute Differenz der Windgeschwindigkeit (Abb. 8.61) zeigt ebenfalls nur geringe Abweichungen, die von 1996 bis 1999 bei 0.2 m/s und für den verbleibenden Zeitraum bei -0.2 m/s liegen. Da dieser Schwankungsbereich minimal ist zeigt er keine

Auswirkungen auf den thermischen Komfort. Besonders der Vorzeichenwechsel der Windgeschwindigkeiten müsste bei einer Relevanz in PET dort deutlich zu erkennen sein. Er ist vermutlich den Messunsicherheiten in der Windmessung zuzuordnen.

Von den genannten Größen zeigen T_a und T_{mrt} markante Abweichungen zwischen den Stationstypen auf. Die Abweichungen der Parameter liefern somit eine Erklärung für das Auftreten der Differenz zwischen Klima- und Synopkarten. Die Tendenz der deutlich höheren PET-Werte in den Klimakarten während der Sommermonate und den geringen Unterschieden in den niedrigsten PET-Klassen lässt sich nur bedingt erklären. Ebenso das diesbezüglich inverse Verhalten während der Wintermonate, denn die Abweichungen geben in guter Näherung im Mittel fast konstante Differenzen wieder. Lediglich anhand der mittleren Strahlungstemperatur ist zu erkennen, dass diese in den Sommermonaten für die Synopstationen Höchstwerte annimmt. Da hier aber maximale Abweichungen in den oberen PET-Klassen auftreten liegt die Vermutung nahe, dass die höhere Lufttemperatur höhere PET-Werte unterstützt. Dies kann allerdings nicht der einzige Grund sein, da die Abweichungen der Parameter zur Berechnung von PET sehr gering ausfallen. Sie liefern wahrscheinlich nur die Tendenz zur Größe der PET-Differenz, die vermutlich erst durch die Eigenschaften der Topographie und den lokalen Wetterphänomenen forciert wird.

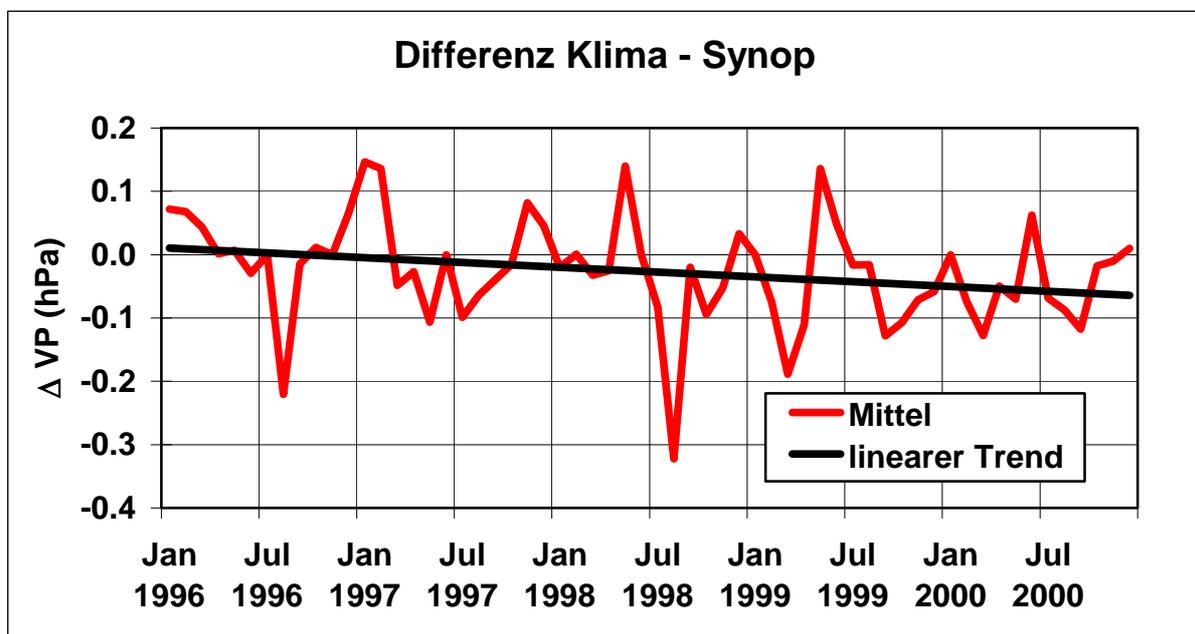


Abb. 8.60: Mittlere Differenz des Wasserdampfdruckes von 19 Standorten gemeinsamer Klimastationen (14 Uhr MOZ) und Synopstationen (13 Uhr MEZ)

Die Ergebnisse dieser Untersuchung liefern im Vergleich zu bisherigen Arbeiten die detailliert differenzierte Möglichkeit der Gegenüberstellung von Klima- und Synopdaten zur

Bestimmung der thermischen Komforts anhand PET und führen implizit eine Beschreibung des österreichischen Klimas durch. Allerdings ist es notwendig einige einschränkende Anmerkungen bezüglich der Resultate zu machen. Der gesamte Messzeitraum beträgt lediglich 5 Jahre. Dadurch ist es nur bedingt möglich saisonale Schwankungen aufeinanderfolgender Jahre zu berücksichtigen. Klimatische Schwankungen auf dekadischen Zeitskalen können nicht aufgelöst werden. Selbst geringe Veränderungen in den PET-Monatsmitteln führen aufgrund der hohen Anzahl an Nachkommastellen der Regressionskoeffizienten zu Abweichungen in diesen, was geringfügige Veränderungen in den dargestellten Regionen zur Folge hat.

Da nicht alle Stationen kontinuierliche Messreihen lieferten muss berücksichtigt werden, dass unter den beschriebenen Auswahlkriterien Mittelwerte verwendet wurden, die bei vollständigen Datenreihen möglicherweise leichten Abweichungen unterlägen.

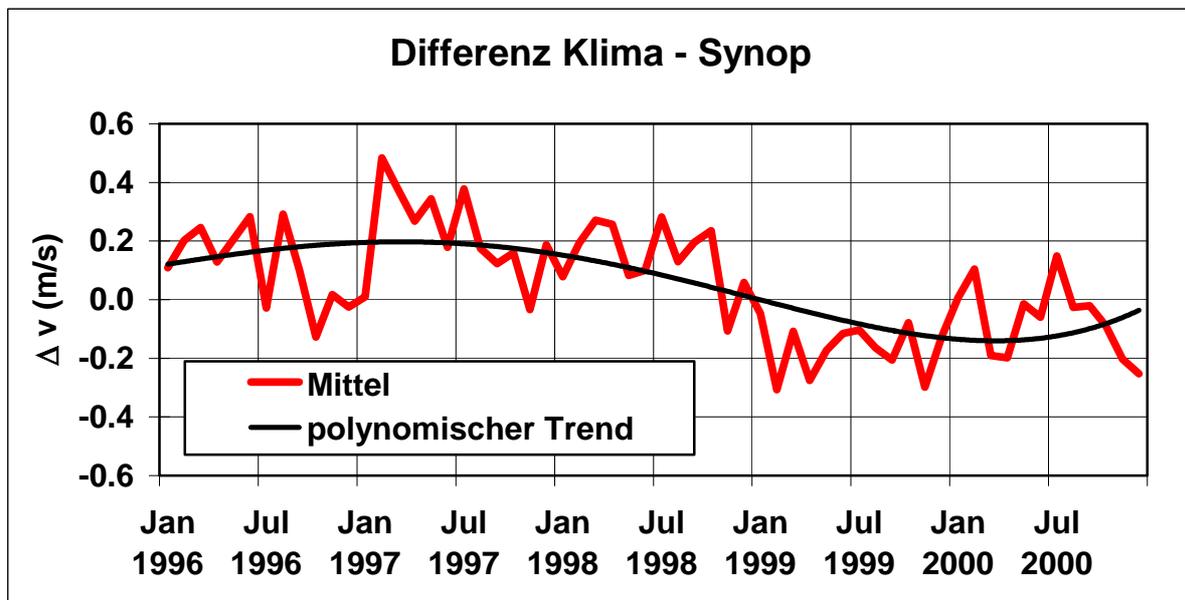


Abb. 8.61: Mittlere Differenz der Windgeschwindigkeit von 19 Standorten gemeinsamer Klimastationen (14 Uhr MOZ) und Synopstationen (13 Uhr MEZ)

Auch aufgrund der Anzahl der Stationen kann eher eine realitätsnahe als eine realitätstreue Darstellung erfolgen.

Der Schwerpunkt dieser Untersuchung liegt bei dem Vergleich der beiden Stationstypen, so dass zweckmäßig erscheinende Standardisierungen bei der Berechnung von PET, beschrieben in Kapitel 5.3, vorgenommen wurden. Diese orientieren sich an einem normierten Individuum mit normierter Bekleidung und sind ausschließlich unter dieser Einschränkung zu verwenden. Selbstverständlich führt eine Änderung der Bezugsperson in Körpergewicht, Körpergröße,

Geschlecht und Alter zu einem veränderten thermischen Empfinden ausgedrückt durch entsprechende PET-Grade, die von denen in dieser Untersuchung abweichen. Ohne die Bezugsperson in ihren Körpereigenschaften zu verändern ist es auch möglich den Bekleidungsdurchgangswiderstand zu variieren, um den thermischen Komfort zu verändern. In der Praxis bedeutet dies an- oder ablegen von Kleidungsstücken, die vor kühleren Umgebungsbedingungen schützen oder in wärmeren etwas Abkühlung vermitteln. Dementsprechend lässt sich das individuelle Klima über die Bekleidung manipulieren, wodurch es möglich wird die Anzahl der Behaglichkeitstage zu erhöhen. Die Variation der Bekleidung anhand einem I_{cl} von 0.5 clo und 1.5 clo durch die Verteilung der PET-Klassen in Tagen pro Jahr ist für Innsbruck exemplarisch durchgeführt worden (Abb. C.98 und Abb. C.99). Ein hoher Bekleidungsdurchgangswiderstand führt wie erwartet in einer der wärmsten Regionen Österreichs zu einer Häufung an Tagen mit leicht warmen und warmen Empfindungen, während ein geringerer die Behaglichkeit noch zu steigern vermag. Die Vermutung liegt nahe, dass es für jede Region entsprechend den klimatischen Verhältnissen eine adequate Bekleidung gibt, die den größt möglichen thermischen Komfort bietet. Zieht man als Vergleich die Station Sonnblick für beide Bekleidungsdurchgangswiderstände hinzu, so sind nur geringe Unterschiede sichtbar, was darauf hindeutet, dass den vorliegenden Umgebungsbedingungen eine dickere Bekleidung anzuraten ist, um thermische Behaglichkeit zu erzeugen (Abb. C.100 und Abb. C.101). Erzeugte Karten mit einem variierenden I_{cl} wären aber auch nur unter Einschränkungen anwendbar, da sie nicht die individuellen Schwankungen der menschlichen Physiologie berücksichtigen. Vergleicht man bei verändertem I_{cl} die Klima- und Synopstationen so zeigt sich das gleiche Verhalten von allgemein höheren PET-Werten in den Klimastationen mit insgesamt übereinstimmenden Tendenzen in beiden Stationstypen wie bei einem konstanten I_{cl} (Abb. C.102 bis Abb. C.105). Aus diesem Grund erschien es nicht sinnvoll für die Zielsetzung der Arbeit eine solche Variation zu untersuchen.

8.2 Aussichten

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden auch Teil des derzeit erstellten Endberichtes zum ACTIVE-Projekt sein und stehen der Öffentlichkeit in absehbarer Zeit zur Verfügung.

Ansätze für weitere Forschungsvorhaben auf diesem Gebiet bestehen bereits. Es erscheint zunächst sinnvoll den Untersuchungszeitraum auf mehrere Dekaden auszudehnen, sofern Messreihen vorhanden sind. Dies könnte zu einer Verbesserung der Regressionskoeffizienten

infolge der höheren Datenmenge führen. Langskalige klimatische Schwankungen könnten damit besser erfasst werden. Die Auflösung des Untersuchungsgebietes sollte weiter erhöht werden, so dass horizontal stark veränderliche Reliefstrukturen detaillierter zu analysieren sind. Sofern die Rechnerleistung dies zulässt kann die hier angewandte Methode auch auf andere Länder und sogar ganze Kontinente angewendet werden. Voraussetzung sind allerdings lange kontinuierliche Zeitreihen, damit die produzierten Ergebnisse möglichst nahe an den tatsächlichen Bedingungen liegen. Für Zukunftsszenarien könnten die entsprechenden Eingangparameter modelliert und zur Berechnung der Regressionskoeffizienten verwendet werden, um Prognosen für die Entwicklung des thermischen Komforts zu erstellen.

Eine Variation der Eingangparameter, insbesondere der Berücksichtigung der individuellen Physiologie und der Bekleidung ist aufgrund der hohen Vielfalt beider Faktoren momentan noch nicht möglich.

LITERATURVERZEICHNIS

- Abel, H.; Baumgartner, A.; Donle, W., 1977: Energie und Wasserumsätze bei der Atmung. Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München Nr. **28**.
- Aikas, E.; Piironen, P., 1963: Thermal Exchanges of the Human Body in extreme Heat. Tech. Rep. No. AMRL-TDR-63-86, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- Auer, I.; Hammer, N.; Koch, E.; Mohnl, H.; Rudel, E., 1982: Das Bioklima von Weyer. Publikation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.
- Becker, F., 1973: Zur Landschaftsbewertung für die Erholung. F. Ber. Akad. F. Raumforschung und Landschaftsplanung **76**, 45-61, 1973.
- Benzinger, T.H., 1961: The human thermostat. Scientific American **204**, 134-147.
- BMV, 1992: Richtlinie für den Verkehrslärm an Bundesfernstraßen. Bundesminister für Verkehr.
- Böll, K., 1978: Circumskriptes Schwitzen. Inaug. Diss., Fachber. Med. Julius Maximilians Univ., Würzburg.
- Bottema, M., 1992: Wind climate and urban geometry. Tech. Univ. Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, Vakgroep Fago, Rapport Nr. 92.63.K.
- Büttner, K., 1938: Physikalische Bioklimatologie. Akad. Verlagsgesell. Leipzig.
- Cehak, K.; Liljequist, G. H., 1974: Allgemeine Meteorologie. Vieweg Verlag.
- Däke, C.U., 1972: Über ein neues Modell des Strahlungsbilanzmessers nach Schulze.
- Dubois, D.; Dubois, E., 1915: A Formula to Estimate the Approximate Surface Area if Height and Weight be Known. Arch. Intern. Med. **17**, 863-871.
- Fanger, P.O., 1972: Thermal comfort. McGraw Hill, New York.
- Fanger, P.O.; Langkilde, G., 1975: Individual Differences in Ambient Temperature preferred by Seated Persons. ASHRAE Trans. **81**, No. 2367, II: 140-147.
- Flach, E., 1964: Die Bedeutung der Abkühlungsgröße für die Kurortklimatologie. Z. f. angew. Bäder- und Klimaheilk. **11**, 463-475.
- Fox, R.H., 1974: Heat Acclimatisation and the Sweating Response. Heat Loss from Animals and man, Ed. J.L. Monteith, Butterworth, London.
- Gagge, A.P.; Stolwijk, J.A.J.; Nishi, Y., 1969: The Prediction of Thermal Comfort, when Thermal Equilibrium is Maintained by Sweating. ASHRAE Trans. **75**, Part 2.

- Gagge, A.P.; Stolwijk; J.A.J.; Nishi, Y., 1971: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Trans.* **77**, 247-257.
- Gagge, A.P., 1981: Rational Temperature Indices of Thermal Comfort. Bioengineering, Eds.: Cena, K.; Clark, J.A., Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York.
- Gagge, A.P.; Fobelets, A.P.; Berglund, L.G., 1986: A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment. **92**, 709-731.
- Gonzales, R.R., 1981: Exercise Physiology and Sensory Response. Bioengineering. Eds.: Cena, K.; Clark, J.A., Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York.
- Häckel, H., 1993: Meteorologie. UTB für Wissenschaft: Uni-Taschenbücher 1338.
- Hammer, N.; Koch, E.; Rudel, E., 1986: Die Beurteilung der thermisch-hygrischen Befindlichkeit des Menschen nach verschiedenen Methoden. *Arch. Met. Geoph. Biocl., Ser. B* **36**, 343-355.
- Harlfinger, O., 1985: Bioklimatischer Ratgeber für Urlaub und Erholung. Gustav Fischer Verlag.
- Hensel, H., 1981: Thermoreception and Temperature Regulation, Academic Press, London.
- Höppe, P. 1979: Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen den Umgebungsluftbedingungen und thermo-hygrischen Vorgängen bei der menschlichen Atmung. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Bioklim. und Angew. Meteorol. der Universität München.
- Höppe, P., 1984: Die Energiebilanz des Menschen. *Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München* Nr. **49**.
- Höppe, P., 1992: Ein neues Verfahren zur Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur im Freien. *Wett. Leben* **44**, 147-151.
- Höppe, P.R., 1993: Heat balance modelling. *Experientia* **49**, 741-746.
- Höppe, P., 1994: Die Wärmebilanzmodelle MEMI und IMEM zur Bewertung der thermischen Beanspruchung am Arbeitsplatz. *Verh. Dtsch. Ges. Arbeitsmed. Umweltmed.* **34**, 153-158.
- Höppe, P., 1999: The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. of Biometeorol.* **43**, 71-75.
- IMBW, 1990: Städtebauliche Klimafibel. Innenministerium Baden-Württemberg.

- Jendritzky, G., 1984: Bioclimatic Maps of Heat and Cold Stress of Man. Kirchhofer, W.; Ohumura, A.; Wanner, H. (eds.): Appl. Climatol., Zürcher Geogr. Schriften **14**, ETH Zürich, 101-102.
- Jendritzky, G., 1988: Das Bioklima in der Bundesrepublik Deutschland. Textbeilage zur Bioklimakarte, Flöttmann, Gütersloh, **19**.
- Jendritzky, G., 1992: Wetter und Klima (Wirkungen auf die Gesundheit des Menschen): Handbuch der Umweltmedizin, Kap. VII-3, ecomed, Landsberg, 1-14.
- Jendritzky, G., 1995: Das Bioklima in Deutschland. Bioklimakarte mit Informationsbroschüre. Flöttmann Verlag, Gütersloh, 2. überarb. Auflage.
- Jendritzky, G.; Vollweiter, A., 1993: Bioklimakarte Europa. Abschlussbericht K17. DWD-ZMMF, **28**.
- Jendritzky, G., Tinz, B., 2003: Europa- und Weltkarten der Gefühlten Temperatur. Beiträge zur Klima- und Meeresforschung, Berlin und Bayreuth, 2003, 113-123.
- Jendritzky, G.; Sönning, W.; Swantes, H.J., 1977: Ein Verfahren zur bioklimatischen Bewertung des thermischen Milieus. Ann. Met. **12**, 209-210.
- Jendritzky, G.; Sönning, W.; Swantes, H.J., 1979: Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung (Klima Michel-Modell). Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan. Nr. **28**.
- Jendritzky, G.; Menz, G.; Schirmer, H.; Schmidt-Kessen, W., 1990: Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan. Nr. **114**.
- Jungmann, H. 1987: Response to meteorological stress as a function of age. Experientia **43**, 19-27.
- Kasten, F., 1980: A simple parametrization of the pyrheliometric formula for determining the Linke turbidity factor. Meteorol. Rdsch. **33**, 124-127.
- Kleiber, J., 1967: Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier. Verlag Paul Parey, Hamburg-Berlin.
- Kotz, A., 1984: Humanbiometeorologische Bewertung des thermischen Milieus innerhalb verschiedener Stadtstrukturen. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Biokl. und Angew. Meteorol. Uni. München, **131**.
- Lehmann, G., 1953: Praktische Arbeitsphysiologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Leß, L.; Pfeleiderer, H., 1935: Die klimatischen Ansprüche an die Atemwege des menschlichen Körpers. Biokl. Beibl. **2**, 1-4.

- Malberg, H., 1997: Meteorologie und Klimatologie, Eine Einführung.
- Matzarakis, A., 2001: Assessing climate for tourism purposes: Existing methods and tools for the thermal complex. Proceedings of the First International Workshop on Climate, Tourism and Recreation. Ed. A. Matzarakis and C. R. de Freitas. International Society of Biometeorology, Commission on Climate Tourism and Recreation. December 2001. WP08, 1-11.
- Matzarakis, A., 2001: Die thermische Komponente des Stadtklimas. Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg Nr. **6**.
- Matzarakis, A., Mayer, H., 1996: Another Kind of Environmental Stress: Thermal Stress. NEWSLETTERS No. **18**, 7-10. WHO Collaborating Centre for Air Quality Management and Air Pollution Control.
- Matzarakis, A., Mayer, H., 1997: Heat stress in Greece. Int. J. Biometeor. **41**, 34-39.
- Matzarakis, A.; Mayer, H.; Iziomon, M.G., 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. Int. J. Biometeorol. **43**, 76-84.
- Matzarakis, A.; Rutz, F.; Mayer, H., 2000: Estimation and calculation of the mean radiant temperature within urban structures. In: Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millenium (ed. by R.J. de Dear, J.D. Kalma, T.R. Oke and A. Auliciems): Selected Papers from Conference ICB-ICUC'99, Sydney. WCASP-50, WMO/TD No. 1026, 273-278.
- McCutchan, J.; Taylor, C., 1951: Respiratory Heat Exchange with Varying Temperature and Humidity of Inspired Air. J. of appl. Physiol. **4**, 121-133.
- Missenard, H., 1948: Equivalences thermiques des ambiances; equivalences de passage, equalences de sejour. In: Cal. Et Indust. **24**, 124-133.
- Morgan, D.L.; Baskett, R.L., 1974: Comfort of Man in the City - An Energy Balance Model of Man - Environment Coupling. Int. J. Biometeorol. **18**, 3, 184-198.
- Munn, R.E., 1970: Biometeorological Methods. Academic Press, New York-London.
- Nagl, H., 1981: Klima- und Wasserbilanztypen Österreichs. Geographischer Jahresbericht aus Österreich XL.
- Nishi, Y., 1981: Measurement of Thermal Balance of Man. Bioengineering. Eds.: Cena, K.; Clark, J.A., Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York.
- Pickup, J.; de Dear, R., 2000: An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT_SET*) - Part I -The model and its assumptions. In: Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millenium (ed. By R.J. de Dear, J.D. Kalma, T.R. Oke and A. Auliciems): Selected

- Papers from the Conference ICB-ICUC'99, Sydney. WCASP-50, WMO/TD No. 1026, 279-283.
- Röckle, R.; Richter, C.-J.; Höfl., H.-C.; Matzarakis, A., 2003: Ansatz zur Objektivierung von Planungshinweisen im Rahmen der Flächennutzungsplanung am Beispiel der Stadtklimauntersuchung Freiburg i. Brsg. Fachtagung Mettools V, 6. bis 6. Oktober 2003, Universität Duisburg – Essen. 22-25.
- Rudel, E.; Auer, I.; Bernhofer, C.; Hammer, N.; Koch, E., 1983: Eine Bioklimakarte von Österreich. Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft **125**.
- Saltin, B.; Gagge, A.P., 1971: Sweating and Body Temperatures During Exercise. Int. J. Biometeorol. **15**, 189-194.
- Sargent, F., 1962: Depression of Sweating in Man: so Called Sweat Gland Fatigue. Advances in Biology of Skin. Eds.: W. Montagna, R. A. Ellis, I. A., Silver, Pergamon, London **3**, 163-212.
- Schirmer, H., 1981: Die klimatologischen Wirkungsfaktoren und ihre Bedeutung für die Planung. Jahrb. J. Regionalwiss. **2**, 140-148.
- Seeley, L., 1940: Study of Changes in the Temperature and Water Vapor of the Respired Air in the Nasal Cavity. ASHRAE Trans., 1159.
- Sinn, M., 1983: Berechnung der solaren Bestrahlung einer Kugel sowie des menschlichen Körpers aus Wert der Global- und Himmelsstrahlung. Berichte aus dem Inst. F. Meereskunde, Uni. Kiel, **89**.
- Snellen, J.W., 1966: Mean Body Temperature and the Control of Thermal Sweating. Acta physiol. Pharmacol. **14**, 99-174.
- Steadman, R.G., 1979: The Assessment of Sultriness, Part I: A Temperature Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science. J. of Appl. Met. **18**, 861-873.
- Steinhauser, F.; 1964: Die Abkühlungsgröße als bioklimatischer Faktor. Z. f. angew. Bäder- und Klimaheilk. **6**.
- Stone, R.; 1943: On the Practual Evaluation and Interpretation of the Cooling Power in Bioclimatology. Bull. of the Americ. Meteorolog. Societ.
- TA Lärm, 1998: Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm. GMBI. **26**.
- Underwood, C.R.; Ward, E.J., 1966: The Solar Radiation Area of man, ergonomics, **9**, 2, 155-168.
- VDI, 1985: Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft. VDI-Richtlinie 2058, Blatt 1.

- VDI, 1993: Wirkung und Bewertung von Gerüchen. Ermittlung von Belästigungsparametern durch Befragungen; Wiederholte Kurzbefragung von ortsansässigen Probanden. VDI-Richtlinie 3883, Blatt 2.
- VDI, 1994: Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen: Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlung. VDI-Richtlinie 3789 Blatt 2.
- VDI, 1998: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima. VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2.
- Vent-Schmidt, V., 1980: Analytische und synthetische Klimakarten. Klima und Planung I, *Promet* **10**, Heft 3, 27-31.
- Wanner, H., 1984: Methods in Applied Topoclimatology. Kirchhofer, W., Ohmura, A., Wanner, H. (eds): Applied Climatology. Züricher Geogr. Schriften **14**, ETH Zürich, 5-17.
- Webb, P., 1951: Air Temperature in the Respiratory Tracts of Resting Subjects in Cold. *J. of Appl. Physiol.* **4**, 378-382.
- Wenzel, H.G.; Piekarski, C., 1980: Klima und Arbeit. Veröffentlichung des Bayerischen Staatsministeriums für Arbeit und Sozialordnung, München.
- Wyndham, C.H.; Morrison, J.F.; Williams, C.G., 1965: Heat Reactions of Male and Female Caucasians. *J. Appl. Physiol.* **20**, 357-364.
- Trenkle, H., 1992: Klima und Krankheit. Wiss. Buchges. Darmstadt.
- Medizin Info: Medizin und Gesundheit. <http://www.medizinfo.de/endokrinologie/anatomie/hypo.htm>.
- Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover, 2003: Vorlesung der Tiermedizin zur Thermoregulation. http://www.tiho-hannover.de/einricht/phys/lehre_tiermedizin/vorlesungen_tiermedizin/thermoregulation/thermo_1.pdf.
- Universität Kassel: Klima, Luft und Lärm in der Planung. http://www.uni-kassel.de/fb6/agluft/seminar/SemWS0203_Bioklima2.pdf.
- Archive in Nordrhein-Westfalen. <http://www.archive.nrw.de/index.asp>.
- RayMan: Modelling the Mean Radiation Temperature and Thermal Indices in Urban Structures. <http://www.mif.uni-freiburg.de/rayman/>.
- IDL, 2003: IDL Version 6.0, Microsoft Windows (Win32 x86 m32). Research Systems, Inc. <http://www.rsinc.com/>.

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

	Seite
Abb. 4.1: Der Hypothalamus (aus http://www.medizininfo.de/endokrinologie/anatomie/hypo.htm)	13
Abb. 4.2: Individuelle Unterschiede thermischer Empfindungen. Beurteilung verschiedener Umgebungstemperaturen durch einheitlich bekleidete, sitzende Personen (relative Luftfeuchtigkeit 50 %, Luftbewegung 0.1 m/s, Lufttemperatur = mittlere Strahlungstemperatur) (Fanger, 1972)	14
Abb. 4.3: Die human-biometeorologischen Wirkungskomplexe (nach Matzarakis, 2001)	16
Abb. 4.4: Die Komponenten des menschlichen Energiehaushaltes	17
Abb. 4.5: Der Wärmestrom durch die Haut (aus http://www.tiho-hannover.de/einricht/phys/lehre_tiermedizin/vorlesungen_tiermedizin/thermoregulation/thermo_1.pdf)	22
Abb. 4.6: Anordnung zur räumlichen Erfassung von kurzwelligen Strahlungsflüssen über den Einsatz eines drehbaren Pyranometer-Pyrgeometer-Messsystems (Matzarakis, 2001)	35
Abb. 4.7: Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener (PPD) als eine Funktion des vorausgesagten mittleren Votums (PMV) (aus http://www.uni-kassel.de/fb6/agluft/seminar/SemWS0203_Bioklima2.pdf)	41
Abb. 4.8: PET-Definition: Außenbedingungen (links), Innenraumbedingungen (rechts)	44
Abb. 5.9: Klimastationen Österreichs als rote Sterne in der Topographie Österreichs mit 1 km Auflösung und Höhenstufen in m	48
Abb. 5.10: Karte der Bundesländer Österreichs (aus http://www.archive.nrw.de/index.asp)	49
Abb. 5.11: Synopstationen als rote Diamanten dargestellt in der Topographie Mitteleuropas mit 1 km Auflösung und Höhenstufen in m	51
Abb. 5.12: Einlesemenü der Stationsdatei (aus http://www.mif.uni-freiburg.de/rayman/index.htm)	53
Abb. 5.13: Output der gemessenen und berechneten Globalstrahlung mit RayMan für den 2. Juli 1999 in Freiburg (Matzarakis et al., 2000)	54
Abb. 5.14: Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 14 Uhr MOZ	56
Abb. 5.15: Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr um 14 Uhr MOZ	57
Abb. 5.16: Fehlende Messwerte aller Klimastationen für 14 Uhr MOZ des gesamten Untersuchungszeitraumes	59
Abb. 5.17: Fehlende Messwerte aller Klimastationen für 13 Uhr MEZ es gesamten Untersuchungszeitraumes	60
Abb. 6.18: Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 13 Uhr MEZ	65
Abb. 6.19: Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr um 13 Uhr MEZ	66

Abb. 6.20:	Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 14 Uhr MOZ	67
Abb. 6.21:	Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 13 Uhr MEZ	67
Abb. 6.22:	Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr für 14 Uhr MOZ	68
Abb. 6.23:	Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr für 13 Uhr MEZ	68
Abb. 6.24:	Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 14 Uhr MOZ	69
Abb. 6.25:	Mittlere monatliche Häufigkeiten auf Tagesbasis von PET-Klassen in Prozent für 13 Uhr MEZ	70
Abb. 6.26:	Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr für 14 Uhr MOZ	70
Abb. 6.27:	Häufigkeiten von PET-Klassen in Anzahl der Tage pro Jahr für 13 Uhr MEZ	71
Abb. 6.28:	Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET > 35 °C um 14 Uhr MOZ	77
Abb. 6.29:	Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET > 35 °C um 13 Uhr MEZ	78
Abb. 6.30:	Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET von 13 °C bis 23 °C um 14 Uhr MOZ	79
Abb. 6.31:	Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET von 13 °C bis 23 °C um 13 Uhr MEZ	80
Abb. 6.32:	Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET < 0 °C um 14 Uhr MOZ	80
Abb. 6.33:	Regionale Verteilung der Tage pro Jahr für PET < 0 °C um 13 Uhr MEZ	81
Abb. 7.34:	Einteilung Österreichs in Regionen gleicher PET-Charakteristik	83
Abb. 7.35:	Temperaturschichtung oberhalb von 500 m im Januar für 14 Uhr MOZ	85
Abb. 7.36:	Temperaturschichtung unterhalb von 500 m im Januar für 14 Uhr MOZ	85
Abb. 7.37:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Januar	88
Abb. 7.38:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Februar	89
Abb. 7.39:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für März	90
Abb. 7.40:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für April	91
Abb. 7.41:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Mai	92
Abb. 7.42:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Juni	93
Abb. 7.43:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Juli	94
Abb. 7.44:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für August	95
Abb. 7.45:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für September	96
Abb. 7.46:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Oktober	97

Abb. 7.47:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für November	97
Abb. 7.48:	Absolute Differenz KK 14 Uhr MOZ - SK 13 Uhr MEZ in PET für Dezember	98
Abb. 7.49:	Mittlerer Jahresgang der Windgeschwindigkeit für die Klimastation Sonnblick (15410) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Sonnblick (11146) um 13 Uhr MEZ	100
Abb. 7.50:	Mittlerer Jahresgang der mittleren Strahlungstemperatur für die Klimastation Sonnblick (15410) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Sonnblick (11146) um 13 Uhr MEZ	100
Abb. 7.51:	Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur für die Klimastation Sonnblick (15410) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Sonnblick (11146) um 13 Uhr MEZ	101
Abb. 7.52:	Mittlerer Jahresgang der mittleren Strahlungstemperatur für die Klimastation Innsbruck-Flughafen (11800) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Innsbruck-Flughafen (11120) um 13 Uhr MEZ	102
Abb. 7.53:	Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur für die Klimastation Innsbruck-Flughafen (11800) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Innsbruck-Flughafen (11120) um 13 Uhr MEZ	102
Abb. 7.54:	Mittlerer Jahresgang der Windgeschwindigkeit für die Klimastation Innsbruck-Flughafen (11800) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Innsbruck-Flughafen (11120) um 13 Uhr MEZ	103
Abb. 7.55:	Mittlerer Jahresgang der mittleren Strahlungstemperatur für die Klimastation Salzburg-Flughafen (6300) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Salzburg-Flughafen (11150) um 13 Uhr MEZ	104
Abb. 7.56:	Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur für die Klimastation Salzburg-Flughafen (6300) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Salzburg-Flughafen (11150) um 13 Uhr MEZ	104
Abb. 7.57:	Mittlerer Jahresgang der Windgeschwindigkeit für die Klimastation Salzburg-Flughafen (6300) um 14 Uhr MOZ und die Synopstation Salzburg-Flughafen (11150) um 13 Uhr MEZ	105
Abb. 8.58:	Mittlere Differenz der mittlere Strahlungstemperatur von 19 Standorten gemeinsamer Klimastationen (14 Uhr MOZ) und Synopstationen (13 Uhr MEZ)	109
Abb. 8.59:	Mittlere Differenz der Lufttemperatur von 19 Standorten gemeinsamer Klimastationen (14 Uhr MOZ) und Synopstationen (13 Uhr MEZ)	110
Abb. 8.60:	Mittlere Differenz des Wasserdampfdruckes von 19 Standorten gemeinsamer Klimastationen (14 Uhr MOZ) und Synopstationen (13 Uhr MEZ)	111
Abb. 8.61:	Mittlere Differenz der Windgeschwindigkeit von 19 Standorten gemeinsamer Klimastationen (14 Uhr MOZ) und Synopstationen (13 Uhr MEZ)	112
Abb. A.62:	Verlauf von PET um 14 Uhr MOZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Klimastation Innsbruck-Flugplatz	132
Abb. A.63:	Mittlerer Jahresgang von PET für die Klimastation Innsbruck-Flugplatz auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten	132
Abb. A.64:	Verlauf von PET um 13 Uhr MEZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Synopstation Innsbruck-Flughafen	133

Abb. A.65: Mittlerer Jahresgang von PET für die Synopstation Innsbruck–Flugplatz auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten	133
Abb. A.66: Verlauf von PET um 14 Uhr MOZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Klimastation Sonnblick	134
Abb. A.67: Mittlerer Jahresgang von PET für die Klimastation Sonnblick auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten	134
Abb. A.68: Verlauf von PET um 13 Uhr MEZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Synopstation Sonnblick	135
Abb. A.69: Mittlerer Jahresgang von PET für die Synopstation Sonnblick auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten	135
Abb. A.70: Verlauf von PET um 14 Uhr MOZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Klimastation Salzburg-Flughafen	136
Abb. A.71: Mittlerer Jahresgang von PET Größen für die Klimastation Salzburg–Flughafen auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten	136
Abb. A.72: Verlauf von PET um 13 Uhr MEZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Synopstation Salzburg-Flughafen	137
Abb. A.73: Mittlerer Jahresgang von PET für die Synopstation Salzburg–Flughafen auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten	137
Abb. B.74: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Januar	138
Abb. B.75: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Januar	138
Abb. B.76: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Februar	139
Abb. B.77: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Februar	139
Abb. B.78: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für März	140
Abb. B.79: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für März	140
Abb. B.80: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für April	141
Abb. B.81: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für April	141
Abb. B.82: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Mai	142
Abb. B.83: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Mai	142
Abb. B.84: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Juni	143
Abb. B.85: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Juni	143
Abb. B.86: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Juli	144
Abb. B.87: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Juli	144
Abb. B.88: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für August	145
Abb. B.89: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ	145

	für August	
Abb. B.90:	Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für September	146
Abb. B.91:	Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für September	146
Abb. B.92:	Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Oktober	147
Abb. B.93:	Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Oktober	147
Abb. B.94:	Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für November	148
Abb. B.95:	Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für November	148
Abb. B.96:	Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Dezember	149
Abb. B.97:	Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Dezember	149
Abb. C.98	Verteilung der PET-Klassen für Innsbruck um 14 Uhr MOZ mit $I_{cl} = 0.5 \text{ clo}$	150
Abb. C.99:	Verteilung der PET-Klassen für Innsbruck um 14 Uhr MOZ mit $I_{cl} = 1.5 \text{ clo}$	150
Abb. C.100:	Verteilung der PET-Klassen für Sonnblick um 14 Uhr MOZ mit $I_{cl} = 0.5 \text{ clo}$	151
Abb. C.101	Verteilung der PET-Klassen für Sonnblick um 14 Uhr MOZ mit $I_{cl} = 1.5 \text{ clo}$	151
Abb. C.102	Verteilung der PET-Klassen für Innsbruck um 13 Uhr MEZ mit $I_{cl} = 0.5 \text{ clo}$	152
Abb. C.103	Verteilung der PET-Klassen für Innsbruck um 13 Uhr MEZ mit $I_{cl} = 1.5 \text{ clo}$	152
Abb. C.104:	Verteilung der PET-Klassen für Sonnblick um 13 Uhr MEZ mit $I_{cl} = 0.5 \text{ clo}$	153
Abb. C.105:	Verteilung der PET-Klassen für Sonnblick um 13 Uhr MEZ mit $I_{cl} = 1.5 \text{ clo}$	153

VERZEICHNIS DER TABELLEN

	Seite
Tab. 4.1: Aktivitätsumsatz AKT und metabolische Rate M zweier Personen bei verschiedenen Tätigkeiten (Kleiber, 1967)	20
Tab. 4.2: Vergrößerungsfaktor der Oberfläche f_{cl} in Abhängigkeit von Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung I_{cl} nach Fanger (1972)	23
Tab. 4.3: Empfindung des Menschen skaliert nach Fanger (1972)	40
Tab. 5.4: Einteilung der Landnutzung in Klassen	52
Tab. 5.5: Auszug aus der Berechnungsmaske für PET-Monatsmittel für Wien – Hohe Warte	55
Tab. 5.6: Links: Einteilung der PET-Klassen nach Mayer (1996), Rechts: Differenzierte Einteilung der PET-Klassen	56
Tab. 5.7: Ausgewählte gemeinsame Klima- und Synopstationen nach der 1 % Regel	58
Tab. 5.8: Zusammengeführte PET-Klassen	61
Tab. 5.9: Bestimmtheitsmaß COR^2 und Korrelationskoeffizient COR der multiplen linearen Regression für Kalendermonate und PET-Klassen	62

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN SYMBOLE

a	Individuell abhängige Anfangs- und Endpunkte eines Intervalls	
A	Langwellige Strahlung der Atmosphäre	(W/m ²)
α	Albedo	
a ₀	Regressionskonstante	
a _{1,...} , a ₄	Regressionskoeffizienten	
A _{Be}	Bekleidungsfläche	(m ²)
A _{DU}	Körperoberfläche nach DuBois und DuBois	(m ²)
AG	Abkühlungsgröße	(J/(s * cm ²))
α_{ir}	Kurzweiliger Absorptionskoeffizient	
a _k	Absorptionskoeffizienten für kurzwellige Strahlung	
A _{Ko}	Kontaktfläche	(m ²)
AKT	Aktivitätsumsatz	(W)
a _l	Absorptionskoeffizienten für langwellige Strahlung	
AL	Alter	(a)
A _{Un}	Unbekleidete Körperoberfläche	(m ²)
AZV	Atemzeitvolumen	(l/h)
b	Individuell abhängige Anfangs- und Endpunkte eines Intervalls	
B	Direkte Sonnenstrahlung	(W/m ²)
b ₀	Regressionskonstante	
c	Individuell abhängige Anfangs- und Endpunkte eines Intervalls	
C	Gesamter konvektiver Wärmefluss	(W)
c _b	Spezifische Wärme des Blutes	(W * s/(kg * K))
C _{Be}	Konvektiver Anteil des turbulenten Flusses fühlbarer Wärme von Bekleidungsflächen	(W)
c _K	mittlere spezifische Wärme des Körpers	(J/(kg * K))
C _{Kd}	Konduktiver Anteil des turbulenten Flusses fühlbarer Wärme	(W)
c _N	Spezifische Wärmekapazität der aufgenommenen Nahrung	(J/(kg * K))
COR	Korrelationskoeffizient	
COR ²	Bestimmtheitsmaß	
c _p	Spezifische Wärmekapazität der Luft	(J/(kg * K))

C_{Un}	Konvektiver Anteil des turbulenten Flusses fühlbarer Wärme von unbedeckten Hautoberflächen	(W)
c_w	Spezifische Wärme des Wassers	(J/(kg * K))
d	Individuell abhängige Anfangs- und Endpunkte eines Intervalls	
D	Diffuse Strahlung	(W/m ²)
ΔT	Temperaturdifferenz	(°C)
ϵ	Emissionskoeffizient der individuellen Oberflächen	
E	Langwellige Strahlung der Oberflächen	(W/m ²)
$E(T_{sk})$	Sättigungsdampfdruck bei mittlerer Hauttemperatur	(hPa)
E_B	Strahlungsbilanz der Erde	(W/m ²)
E_{eff}	Effektive Ausstrahlung	(W/m ²)
E_{hum}	Langwellige Strahlung des Menschen	(W/m ²)
ϵ_p	Langwellige Emissionszahl der Bezugsperson	
E_{phys}	Physiologisch mögliche Schweißverdunstung	(W)
E_{pot}	Potentielle Schweißverdunstung des Körpers	(W)
ϕ	Geographische Breite	(°)
F	Strahlungsfluss durch die betrachtete Fläche	(W/m ²)
$f(H/A_{DU}, I_{cl}, T_a, T_{mrt}, v_p, v, T_s, Q_{sw}/A_{DU})$	Allgemeine Komfortgleichung nach Fanger (1972)	
f_{cl}	Vergrößerungsfaktor der Oberfläche durch die Bekleidung	
F_{csk}	Wärmefluss vom Körperinneren zur Hautoberfläche	(W/1 m ²)
F_{ec}	Durchlässigkeitskoeffizient der Kleidung für Wasserdampf	
f_p	Projected Area Factor	
F_{p-i}	Raumwinkelanteile bzw. Winkelfaktoren	
F_{p-o}	Winkelfaktor für den oberen Halbraum	
F_{p-u}	Winkelfaktor für den unteren Halbraum	
F_{scl}	Wärmefluss von der Hautoberfläche durch die Kleidungsschichten hindurch zur Bekleidungsfläche	(K/clo)
γ	Einfallswinkel	(°)
G	Globalstrahlung	(W/m ²)
GE	Körpergewicht	(kg)
GR	Körpergröße	(m)
GRU	Grundumsatz	(W)

GRU ₀	Grundumsatz auf die Körperoberfläche normiert	(W/m ²)
GT	Gefühlte Temperatur	(°C/10)
η	Mechanischer Wirkungsgrad	
h	Sonnenhöhenwinkel	(°)
H	Innere Wärme	(W)
H ₀ , h _s	empirisch bestimmte Konstanten	
h _c	Wärmeübergangszahl	(W/(m ² * K))
h _k	konduktive Wärmeübergangszahl von der Körperoberfläche zum Festkörper	(W/(m ² * K))
I	Intensität der Strahlungsquelle	(W)
I _{cl}	Mittleren Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung, bezogen auf die gesamte Körperoberfläche	(clo)
j	empirische Konstante	
k	empirische Konstante	
K _i	Kurzwellige solare Strahlungsflüsse der i-ten Messung	(W/m ²)
λ	Geographische Länge	(°)
L	konvektiver Wärmestrom	(W)
l	empirische Konstante	
L _d	Verdampfungswärme des Wassers	(J/kg)
L _i	Langwellige terrestrische Strahlungsflüsse der i-ten Messung	(W/m ²)
m	Wasserdampfdurchlässigkeitskoeffizient	(kg/(s * m * hPa))
M	Gesamtenergieumsatz (metabolische Rate)	(W)
M _i	Mischungsverhältnis	
m _{1, ..., m₆}	Regressionskoeffizienten	
m _N	Masse der aufgenommenen Nahrung	(kg)
v _b	Blutfluss vom Körperinneren zur Haut	(l/(s * m ²))
NN	Höher über dem Meeresspiegel	(m)
p	Luftdruck	(hPa)
PMV	Predicted Mean Vote	
Q _H	Turbulenter Fluss fühlbarer Wärme	(W)
Q _L	Strom latenter Wärme infolge von Wasserdampfdiffusion durch die Haut	(W)
Q _{mean_sw}	Mittleren Schweißproduktion	(kcal/h)
Q _{Re}	Energieumsatz infolge von Erwärmung und Wasserdampfsättigung der Atemluft	(W)
Q _{ref}	Fühlbarer Anteil von Q _{re}	(W)
Q _{rel}	Latenter Anteil von Q _{re}	(W)

Q_{Sw}	Strom latenter Wärme infolge der Schweißverdunstung	(W)
r	Abstand von der Strahlungsquelle	(m)
R	Kurzwellige Reflexstrahlung	(W/m ²)
RQ	Respiratorischer Quotient	
ρ_b	Dichte des Blutes	(kg/l)
ρ_l	Dichte der Atemluft	(kg/l)
R_n	Strahlungsbilanz	(W)
σ	Stefan-Boltzmannsche Konstante	(W/(m ² * K ⁴))
S_{Str}	Mittlere vom Körper eines Menschen absorbierte Strahlungsflussdichte	(W/m ²)
SW	Schweißproduktion	(kg/s)
t	charakteristische Zeit bis zur thermischen Anpassung	(s)
T_0	Oberflächentemperatur der Kleidung oder der Haut, an unbedeckten Stellen	(°C)
T_a	Lufttemperatur	(°C)
T_B	Gewichtetes Mittel aus der mittleren Haut- und Kerntemperatur	(°C)
T_B'	Auslösetemperatur	(°C)
T_c	Kerntemperatur	(°C)
T_{cl}	Temperatur der Kleidung	(°C)
T_{cl}	wirksame Oberflächentemperatur von Haut bzw. Bekleidung der Bezugsperson	(K)
T_{eq}	Äquivalenttemperatur	(°C)
T_{exN}	Mittlere Expirationstemperatur bei Nasenatmung	(°C)
T_i	Temperatur der i-ten Oberfläche	(K)
T_{in}	Inspirationstemperatur	(°C)
T_M	mittlere Temperatur des Körpers	(°C)
T_{mean_s}	Mittlere Hauttemperatur	(°C)
T_{mrt}	Mittlere Strahlungstemperatur	(K)
T_{mrt}^*	Mittlere Strahlungstemperatur bei direkter Sonnenstrahlung	(K)
T_N	Temperatur der Nahrung	(°C)
T_{sk}	Temperatur der Haut	(°C)
u	Windgeschwindigkeit	(m/s)
v	Relative Windgeschwindigkeit	(m/s)
VP	Dampfdruck der Umgebungsluft	(hPa)
W	Energieumsatz infolge mechanischer Leistung	(W)

W_i	Wichtungsfaktor der i-ten Messung	
x_1, \dots, x_6	Einzulesende Variablen	
z	Verhältnis der bekleideten zur unbekleideten Körperoberfläche	
z	Stationshöhe	(m)
Z	Verhältnis modifizierter Körpergröße zu Körpergewicht	(m/kg)

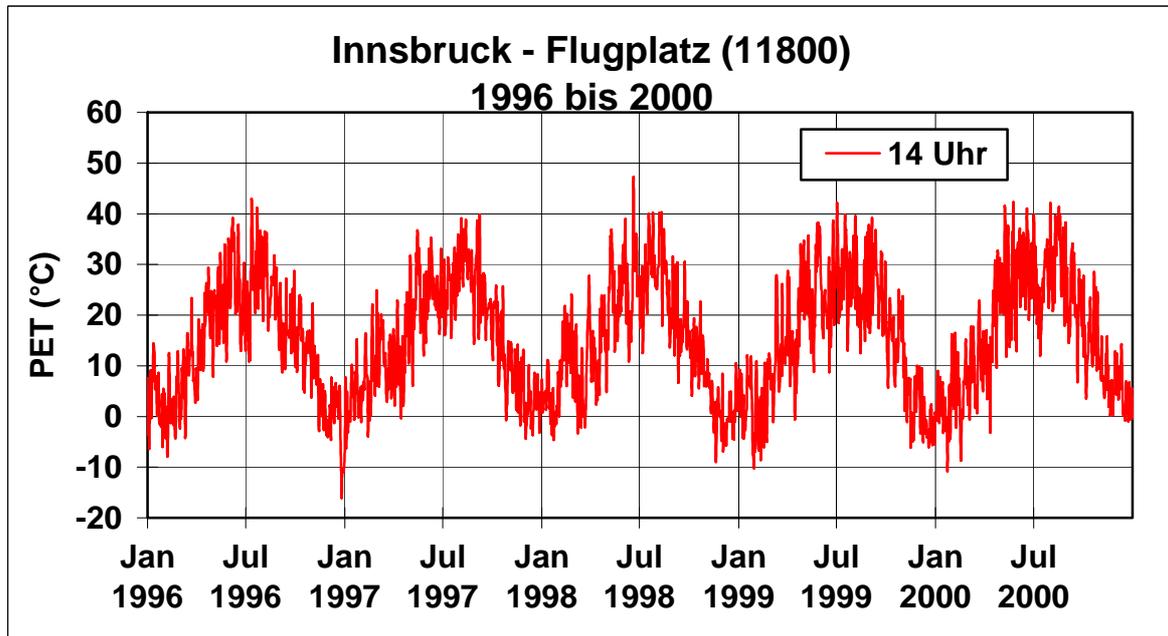


Abb. A.62: Verlauf von PET um 14 Uhr MOZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Klimastation Innsbruck-Flugplatz

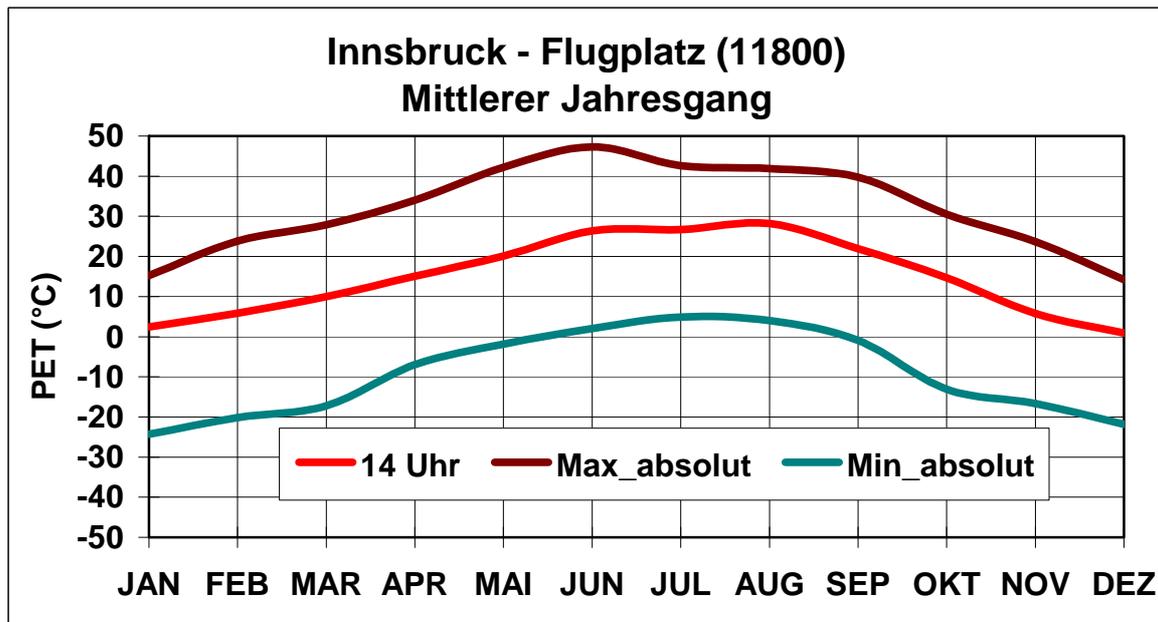


Abb. A.63: Mittlerer Jahresgang von PET für die Klimastation Innsbruck-Flugplatz auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten

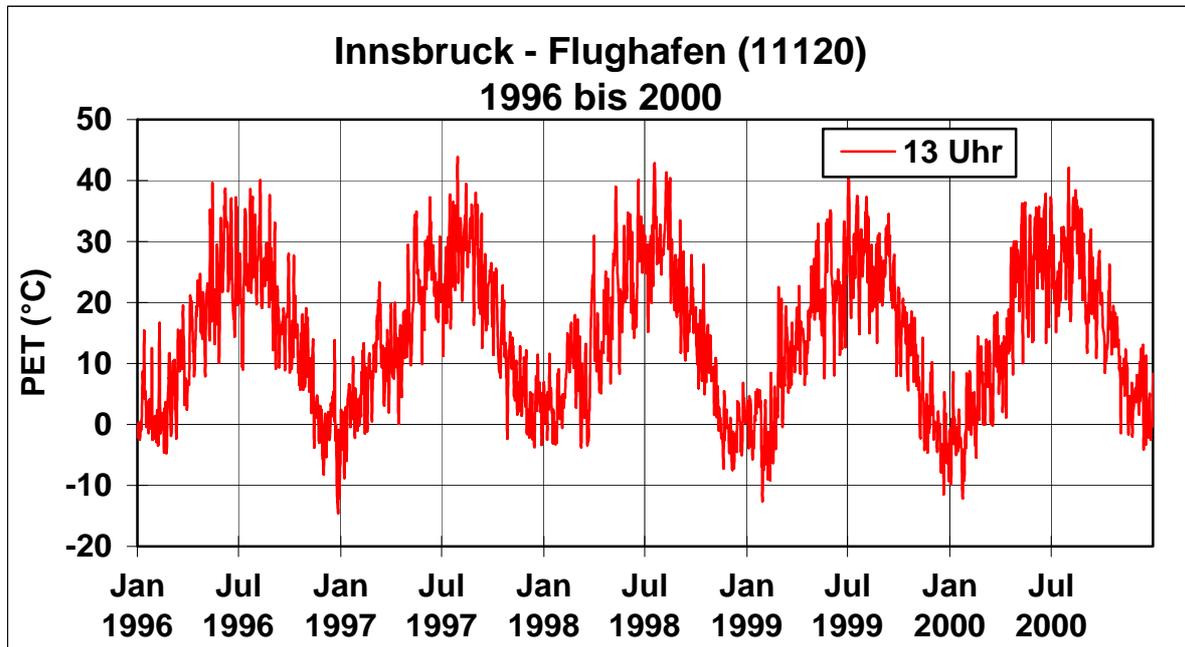


Abb. A.64: Verlauf von PET um 13 Uhr MEZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Synopstation Innsbruck-Flughafen

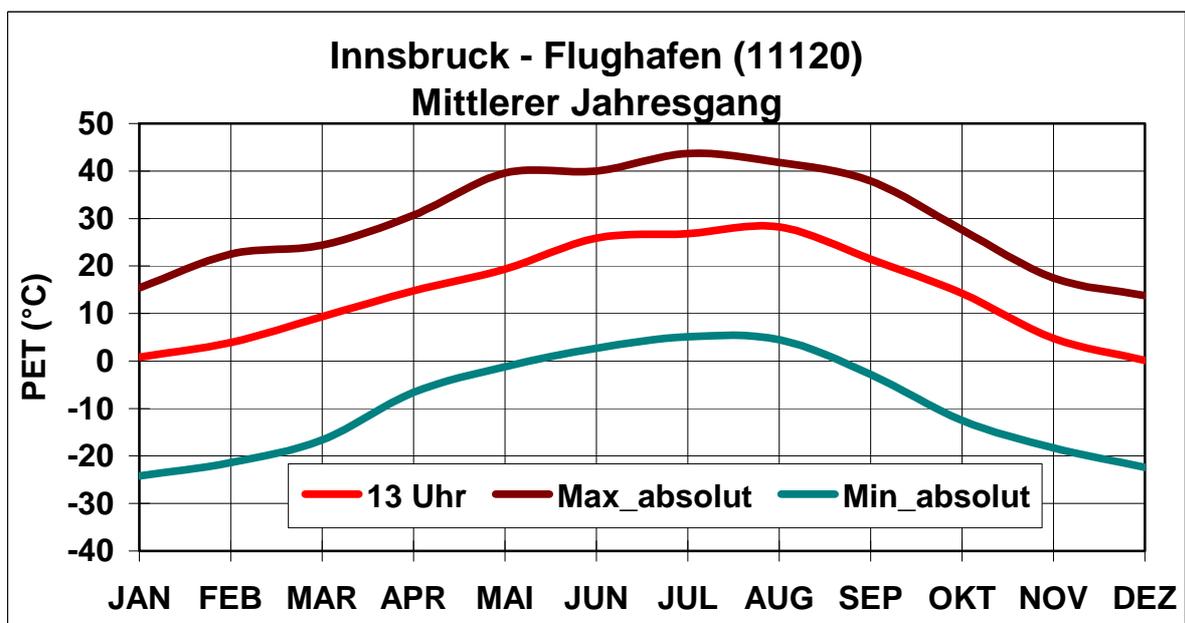


Abb. A.65: Mittlerer Jahrgang von PET für die Synopstation Innsbruck-Flugplatz auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten

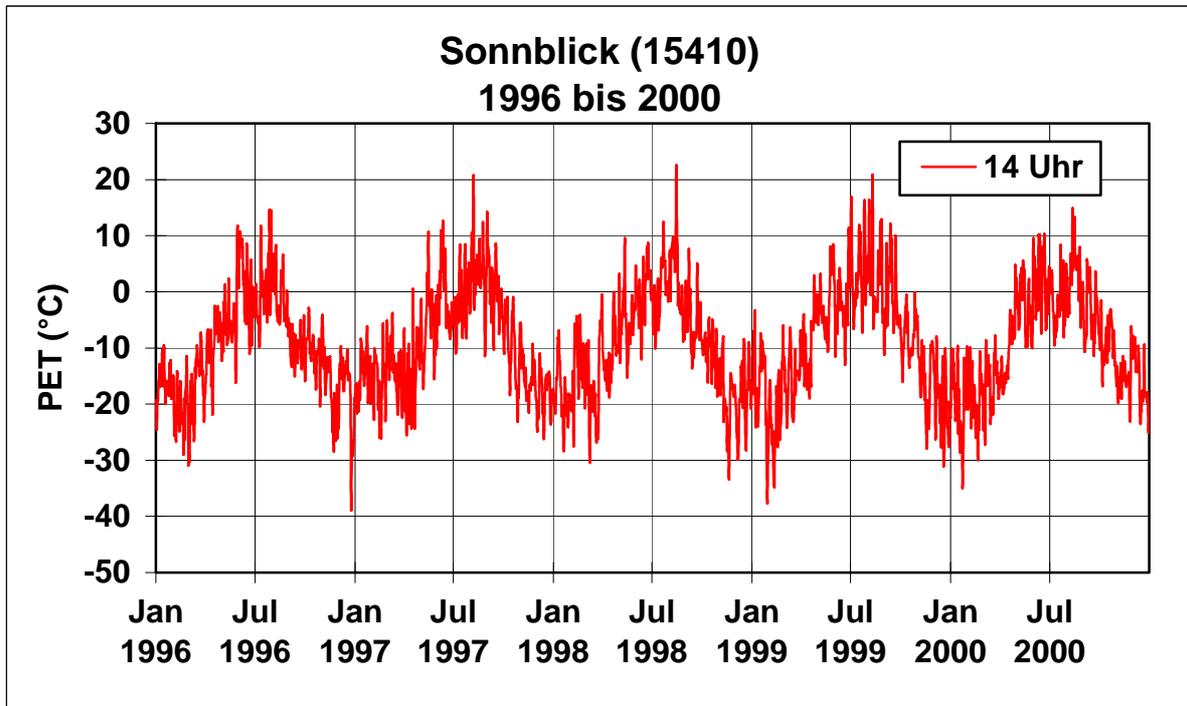


Abb. A.66: Verlauf von PET um 14 Uhr MOZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Klimastation Sonnblick

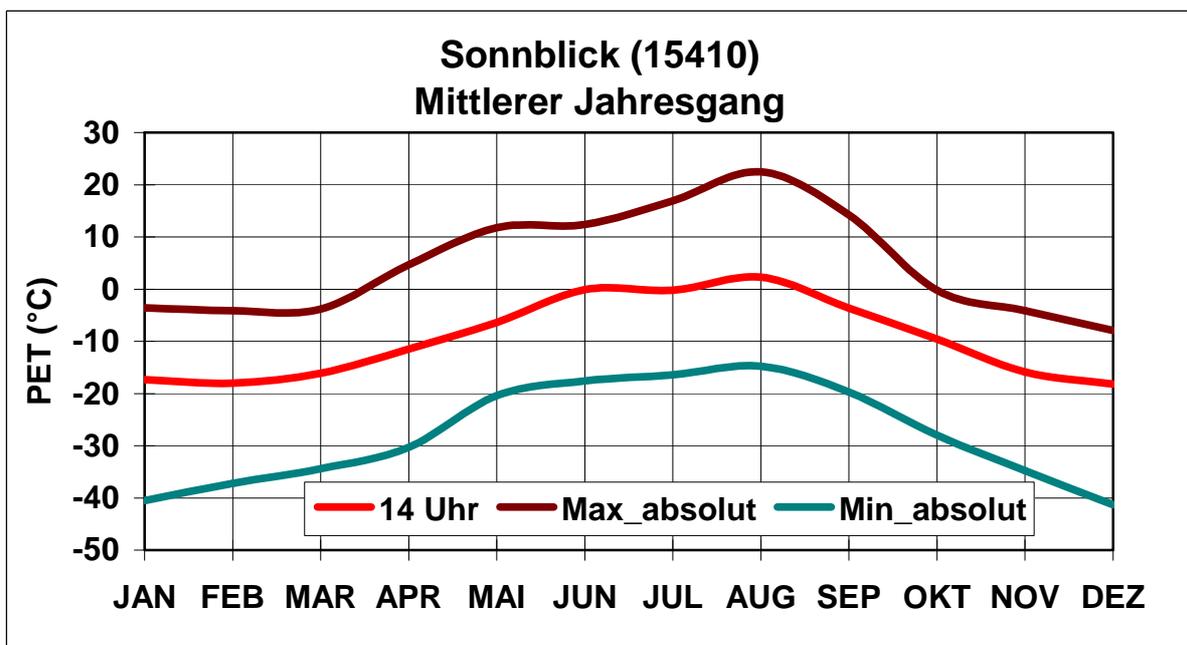


Abb. A.67: Mittlerer Jahresgang von PET für die Klimastation Sonnblick auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten

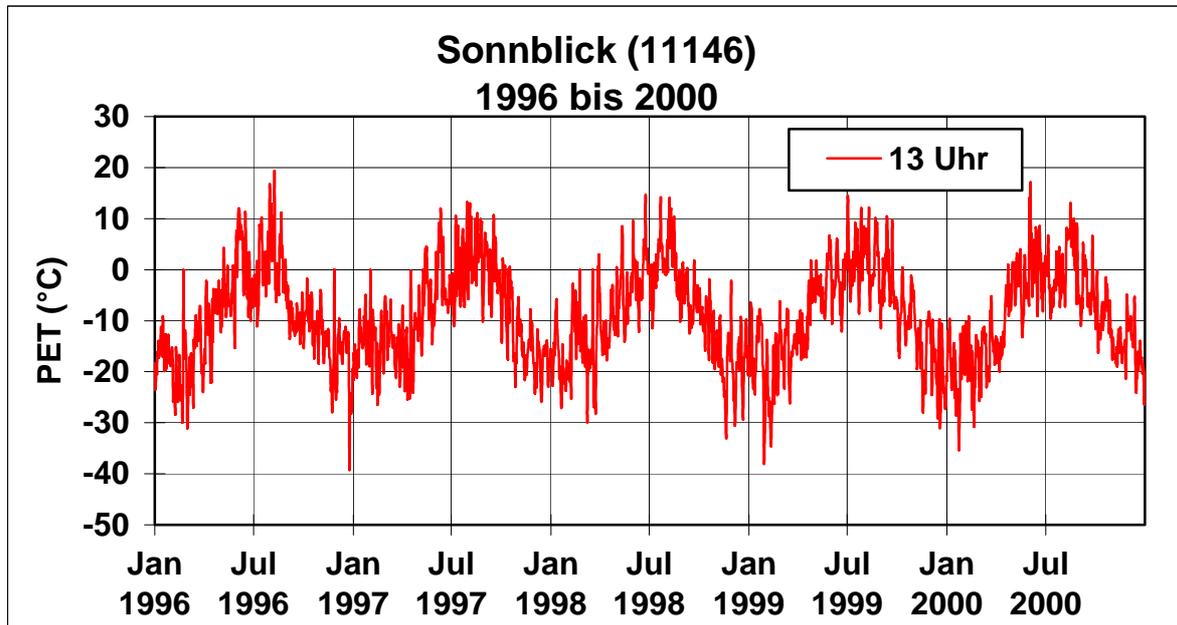


Abb. A.68: Verlauf von PET um 13 Uhr MEZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Synopstation Sonnblick

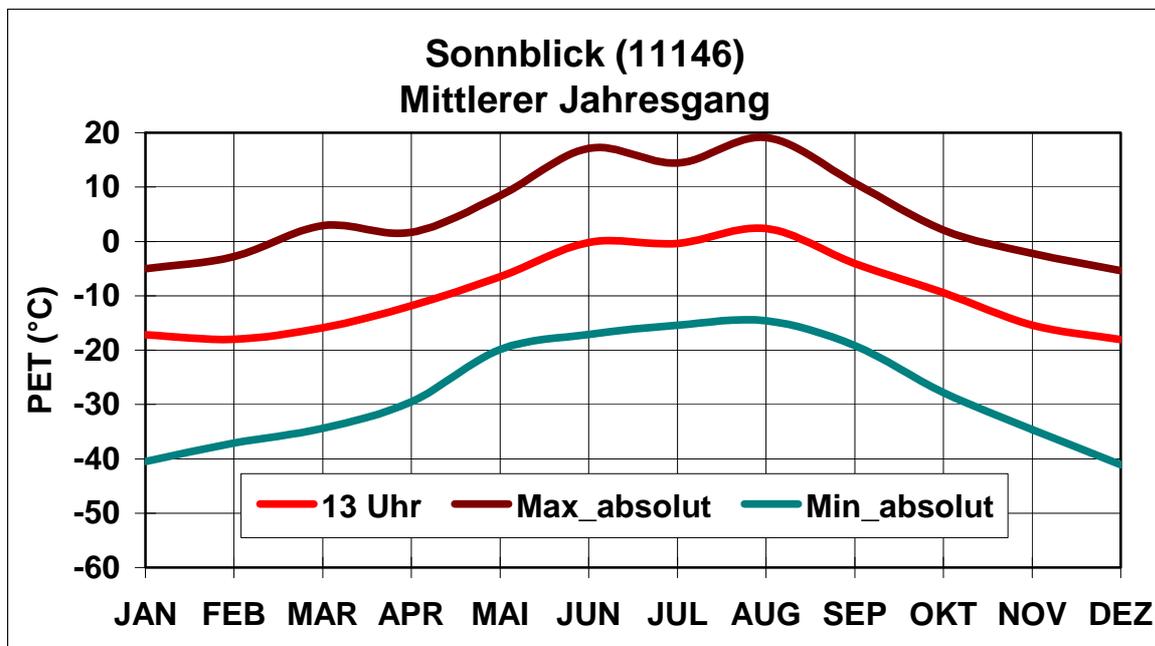


Abb. A.69: Mittlerer Jahresgang von PET für die Synopstation Sonnblick auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten

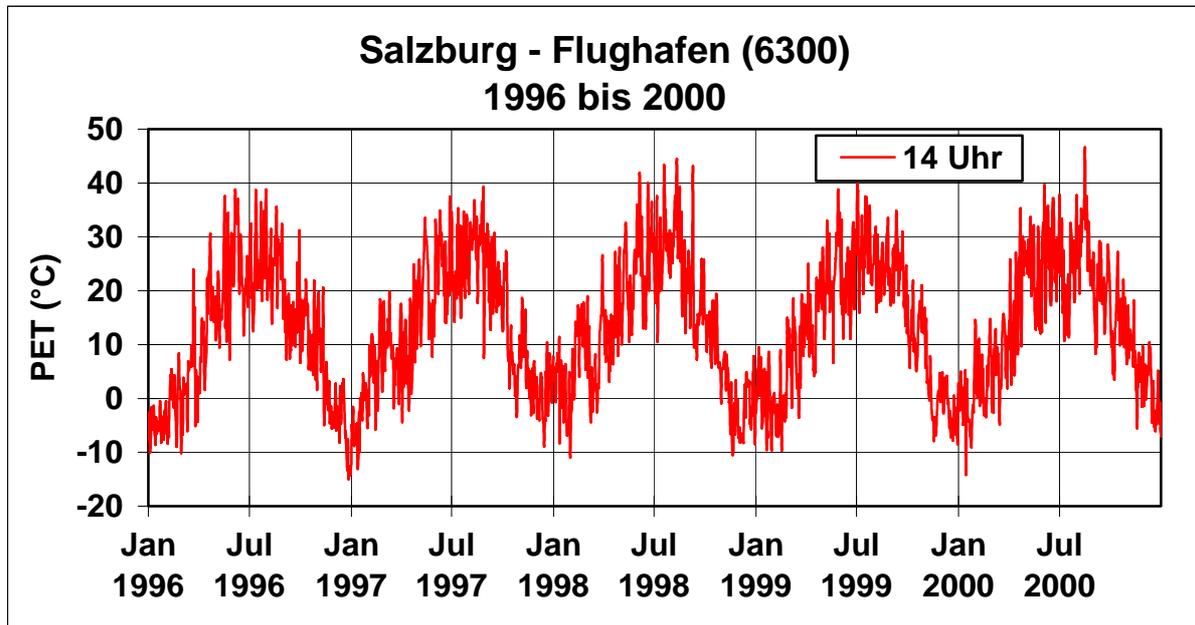


Abb. A.70: Verlauf von PET um 14 Uhr MOZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Klimastation Salzburg-Flughafen

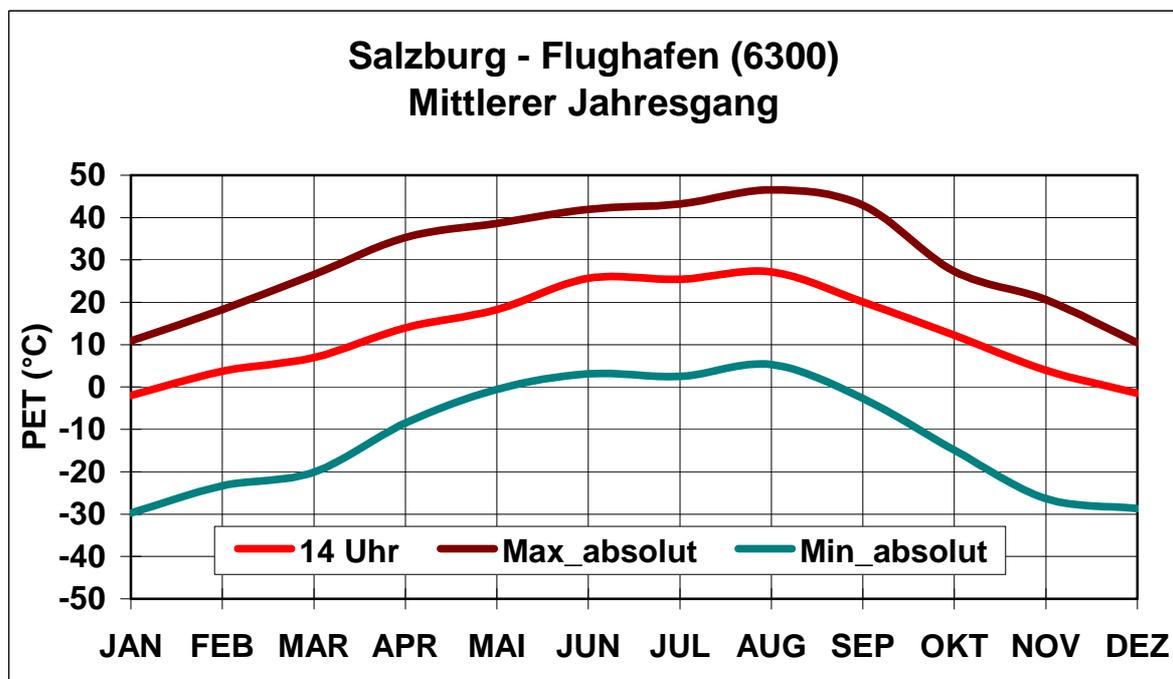


Abb. A.71: Mittlerer Jahresgang von PET Größen für die Klimastation Salzburg-Flughafen auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten

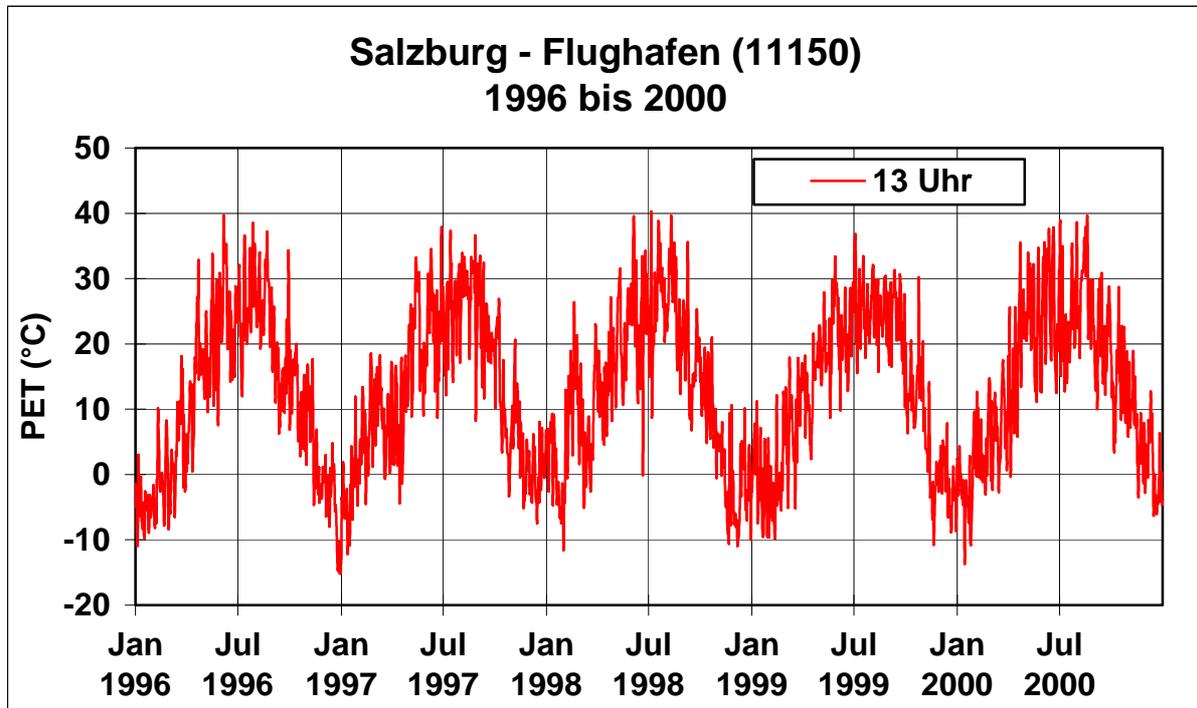


Abb. A.72: Verlauf von PET um 13 Uhr MEZ über den gesamten Zeitraum von fünf Jahren für die Synopstation Salzburg-Flughafen

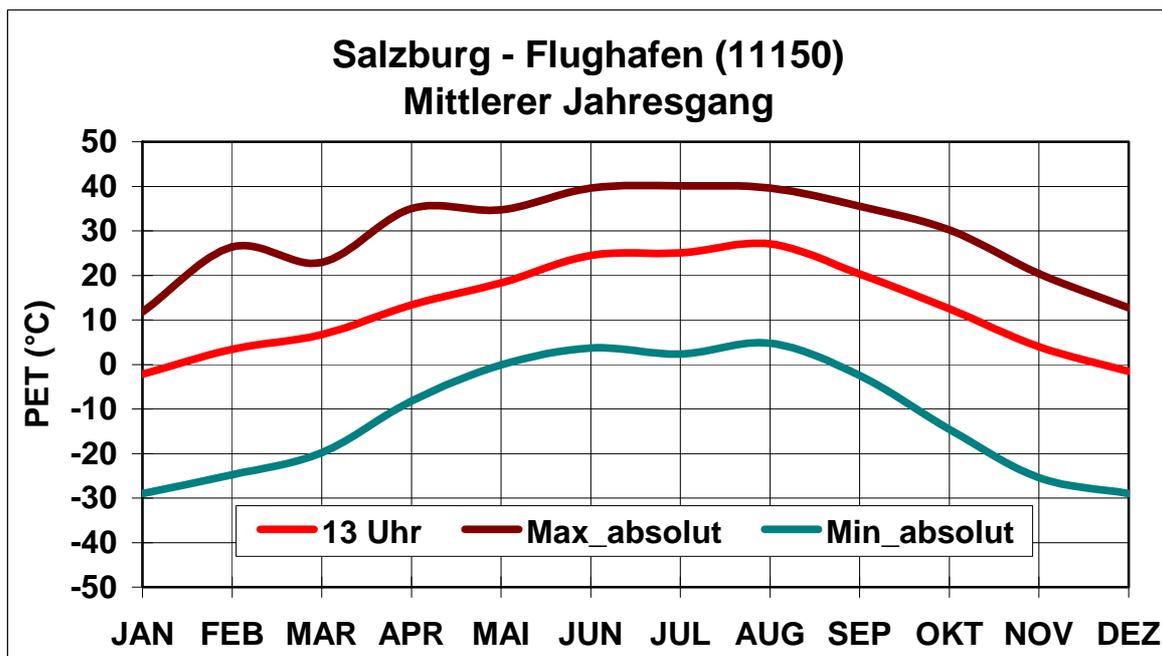


Abb. A.73: Mittlerer Jahresgang von PET für die Synopstation Salzburg-Flughafen auf der Basis von Monatsmitteln und absoluten Tageswerten

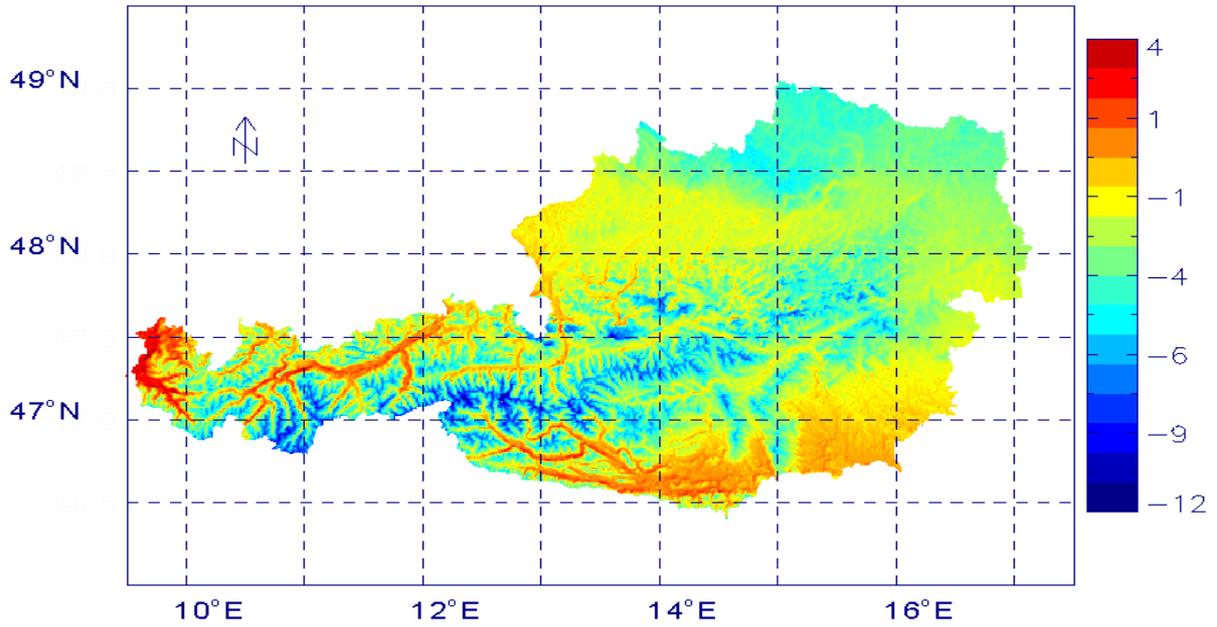


Abb. B.74: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Januar

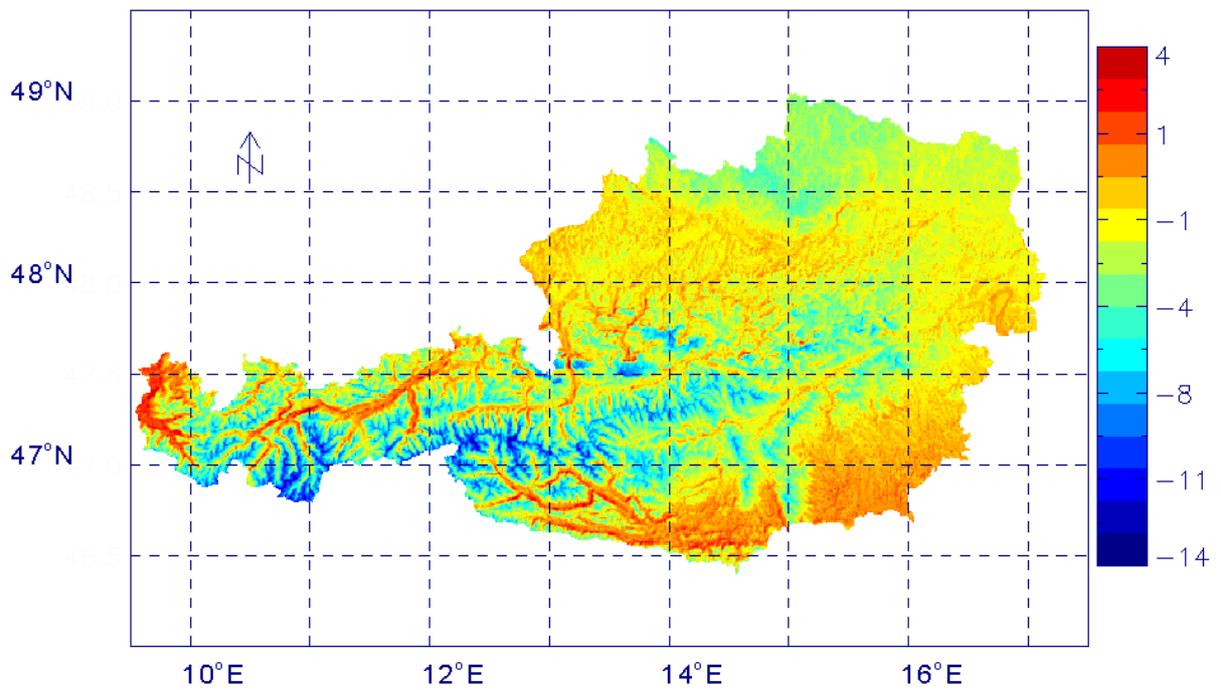


Abb. B.75: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Januar

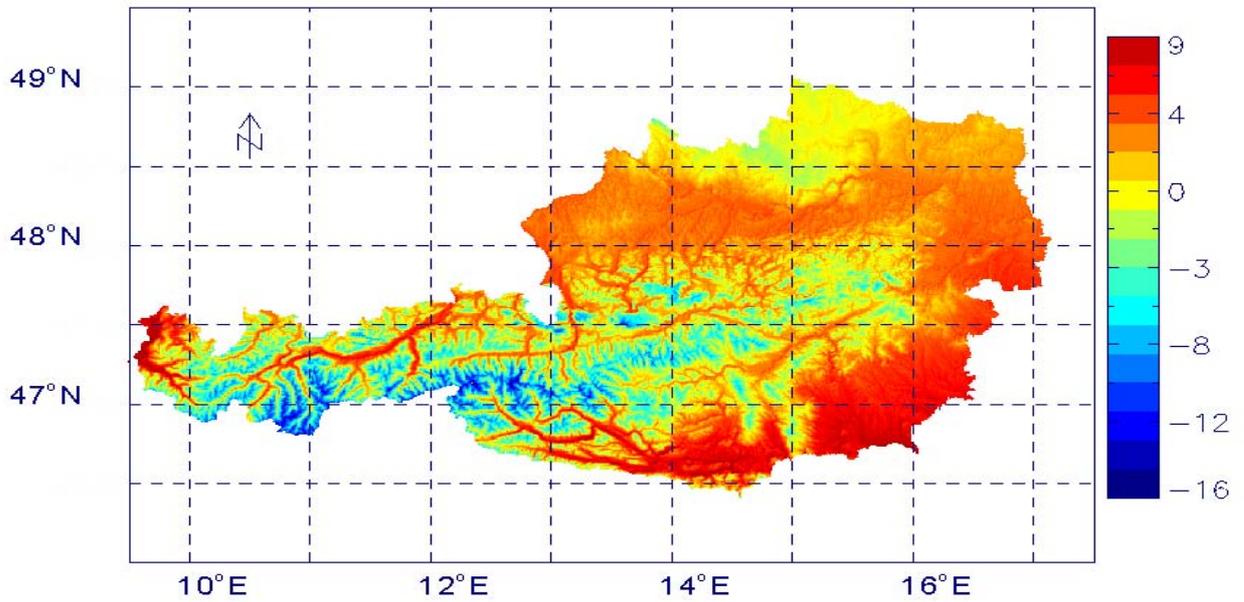


Abb. B.76: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Februar

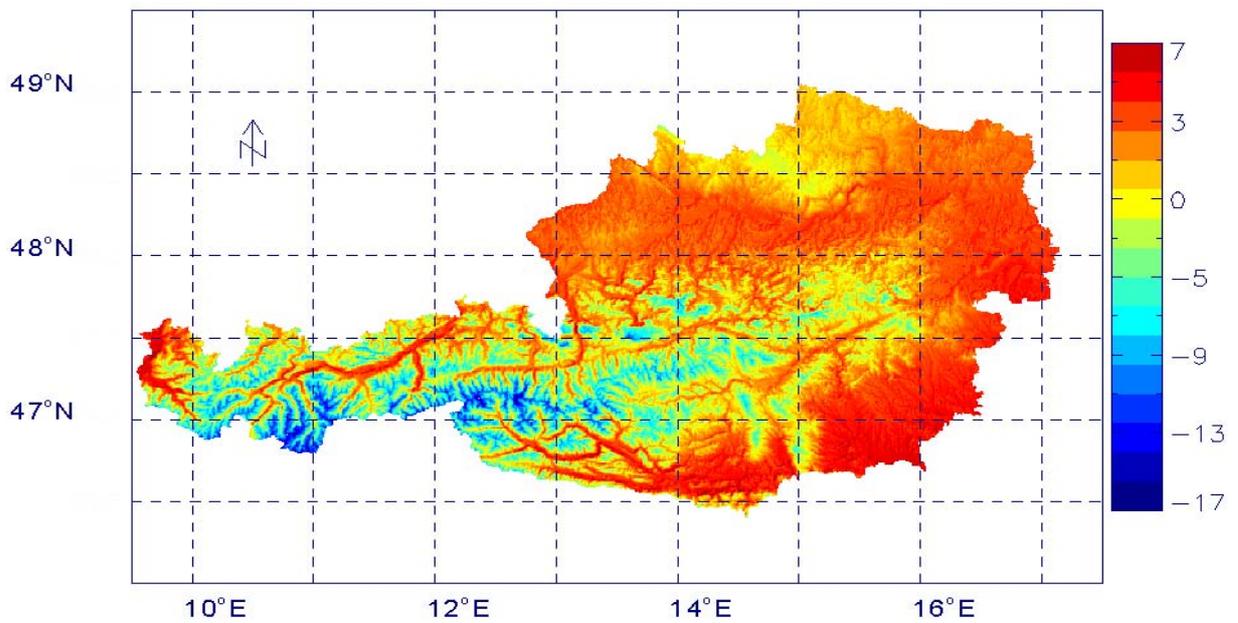


Abb. B.77: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Februar

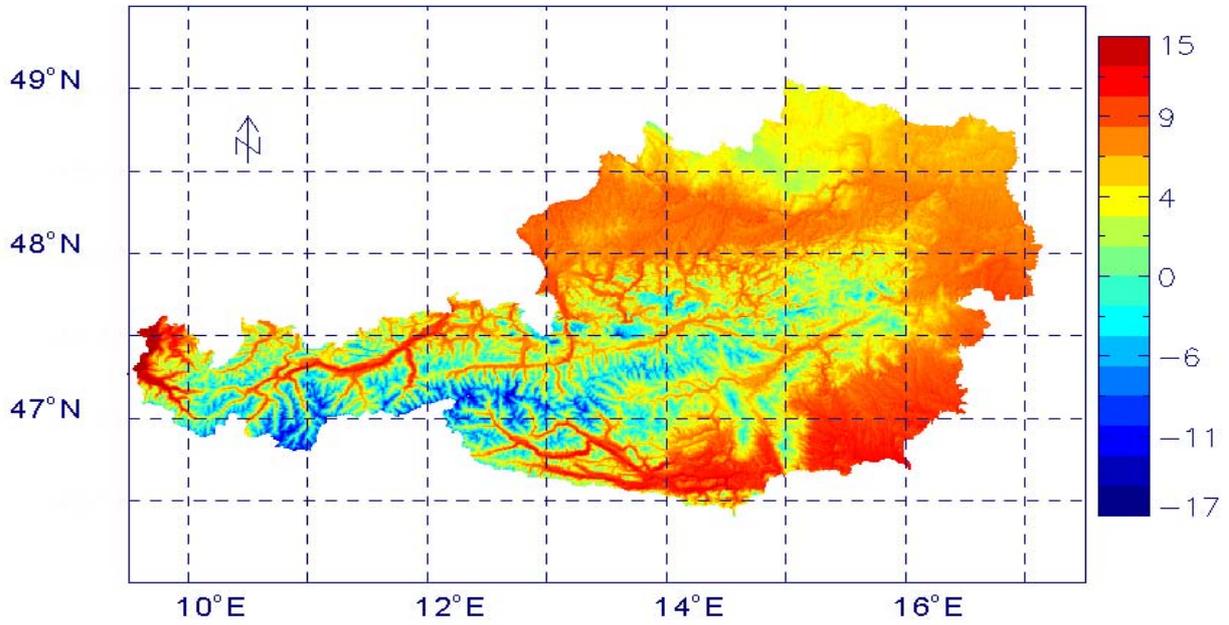


Abb. B.78 : Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für März

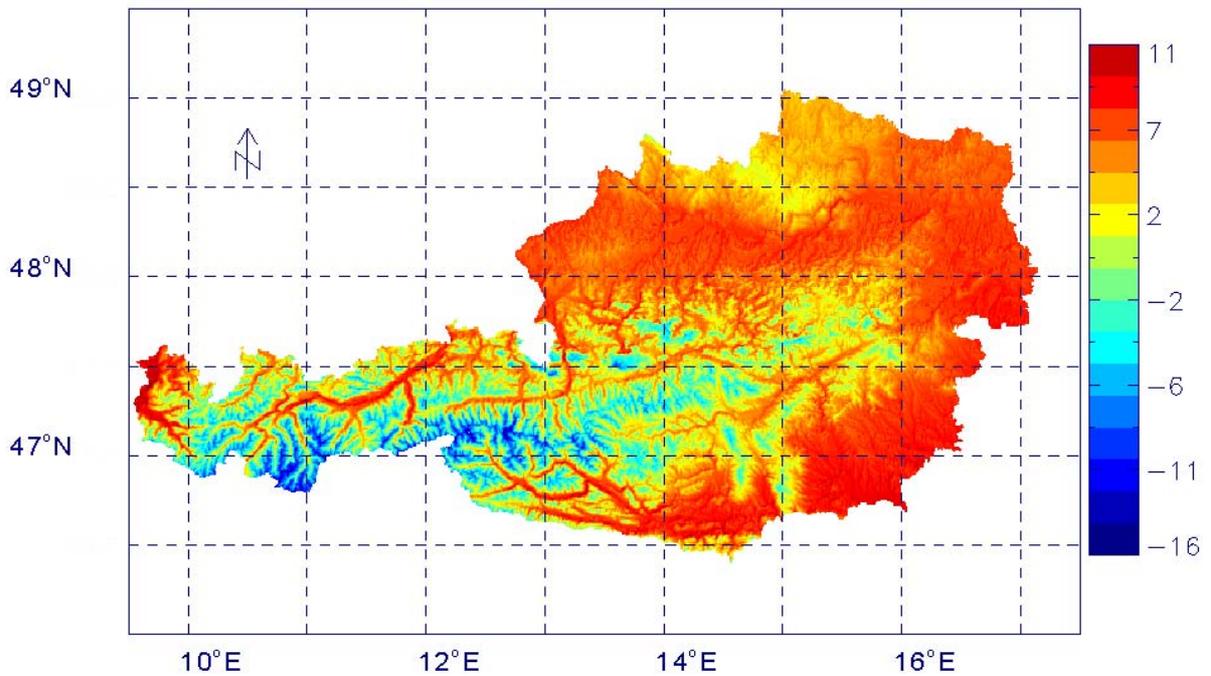


Abb. B.79: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für März

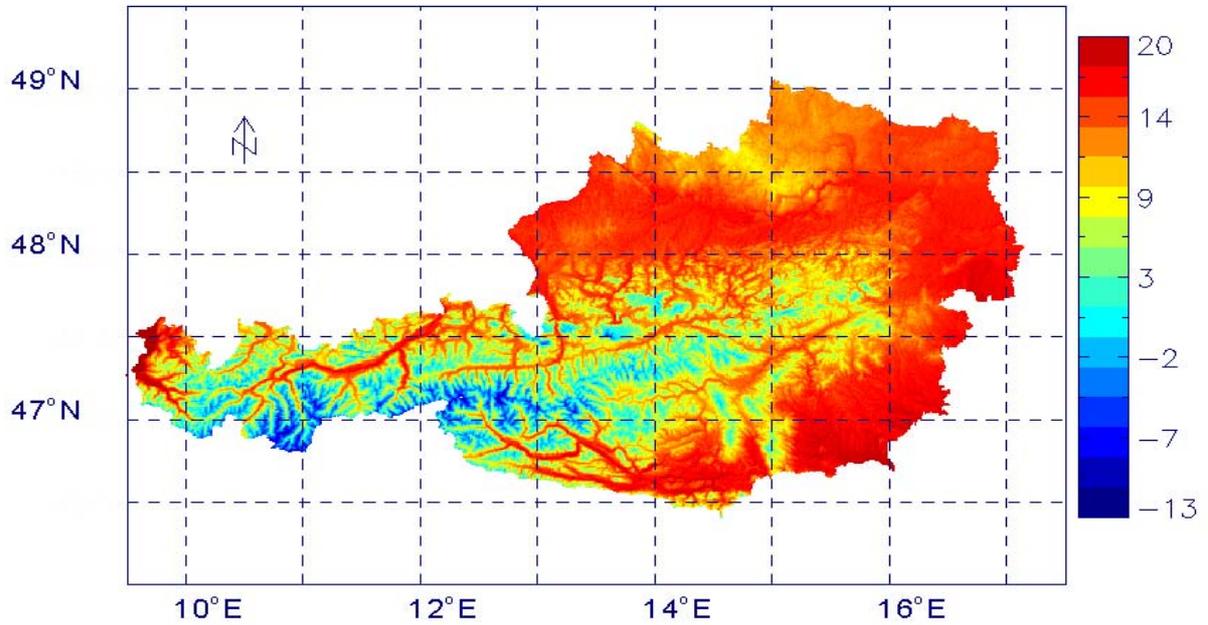


Abb. B.80: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für April

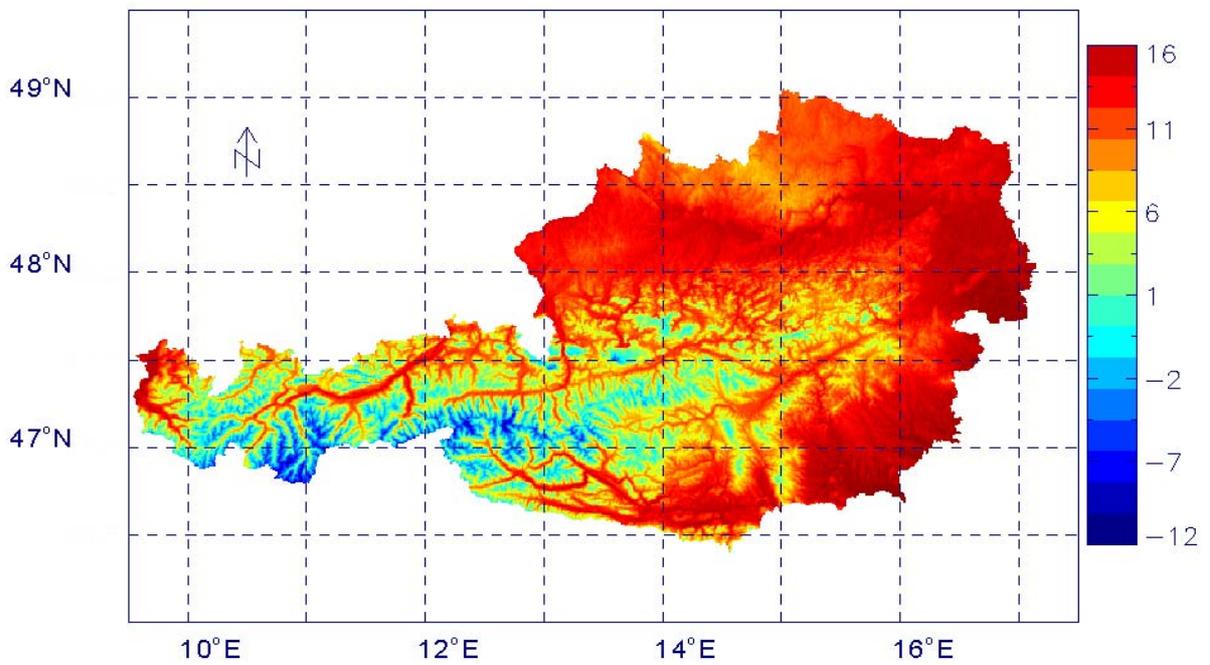


Abb. B.81: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für April

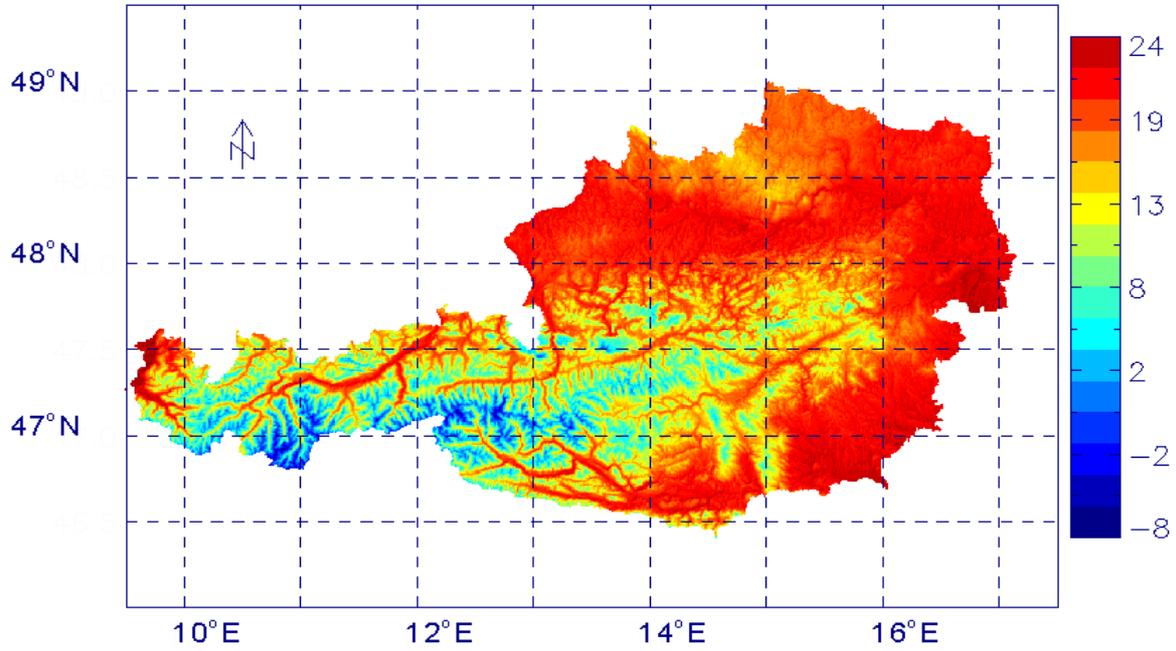


Abb. B.82: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Mai

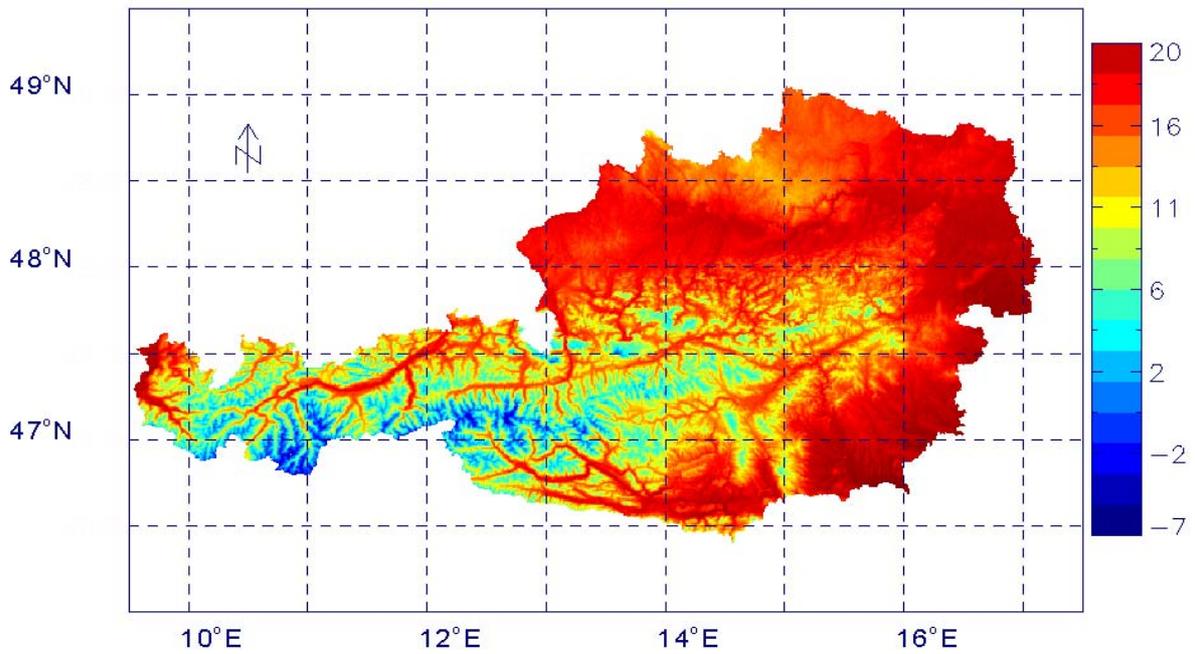


Abb. B.83: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Mai

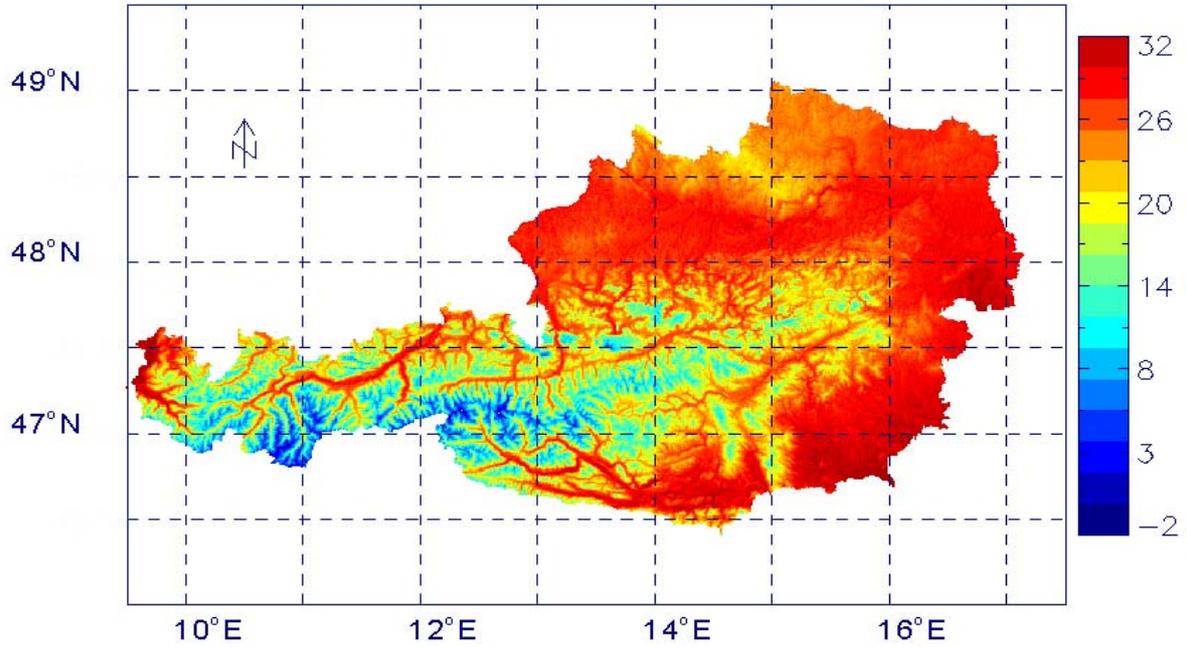


Abb. B.84: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Juni

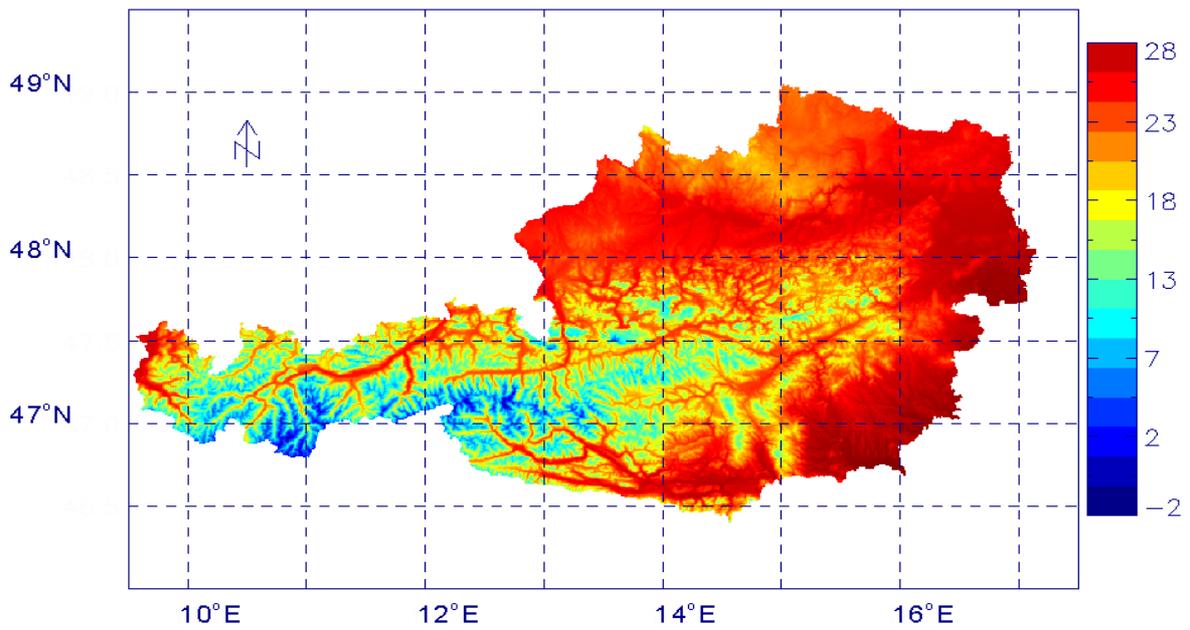


Abb. B.85: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Juni

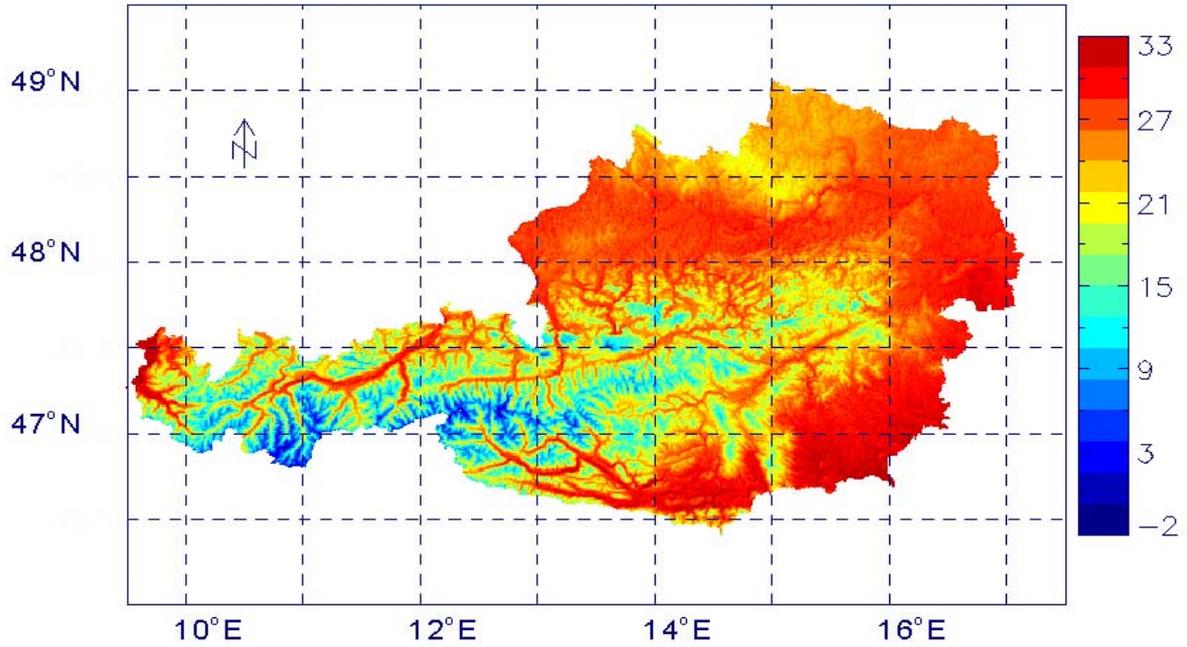


Abb. B.86: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Juli

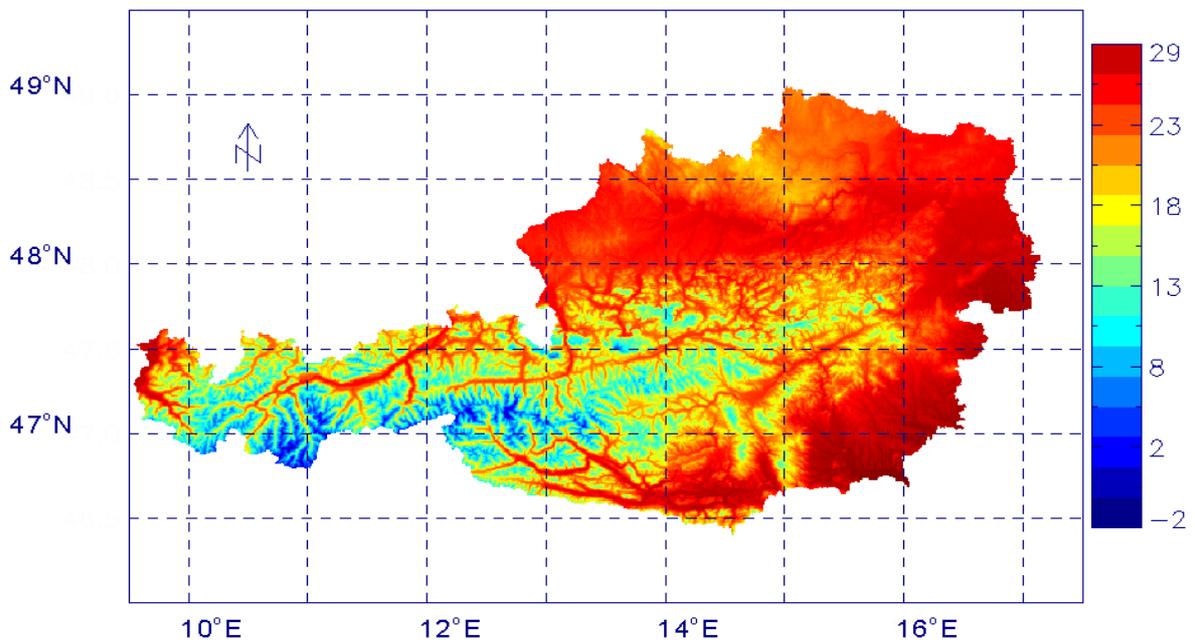


Abb. B.87: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Juli

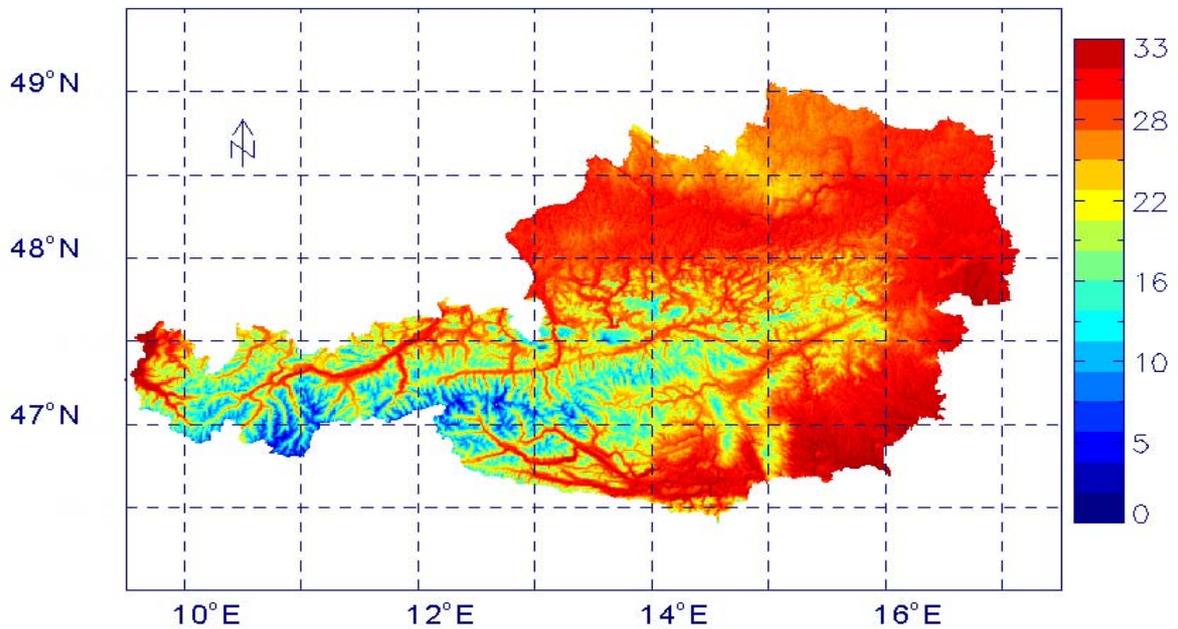


Abb. B.88 : Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für August

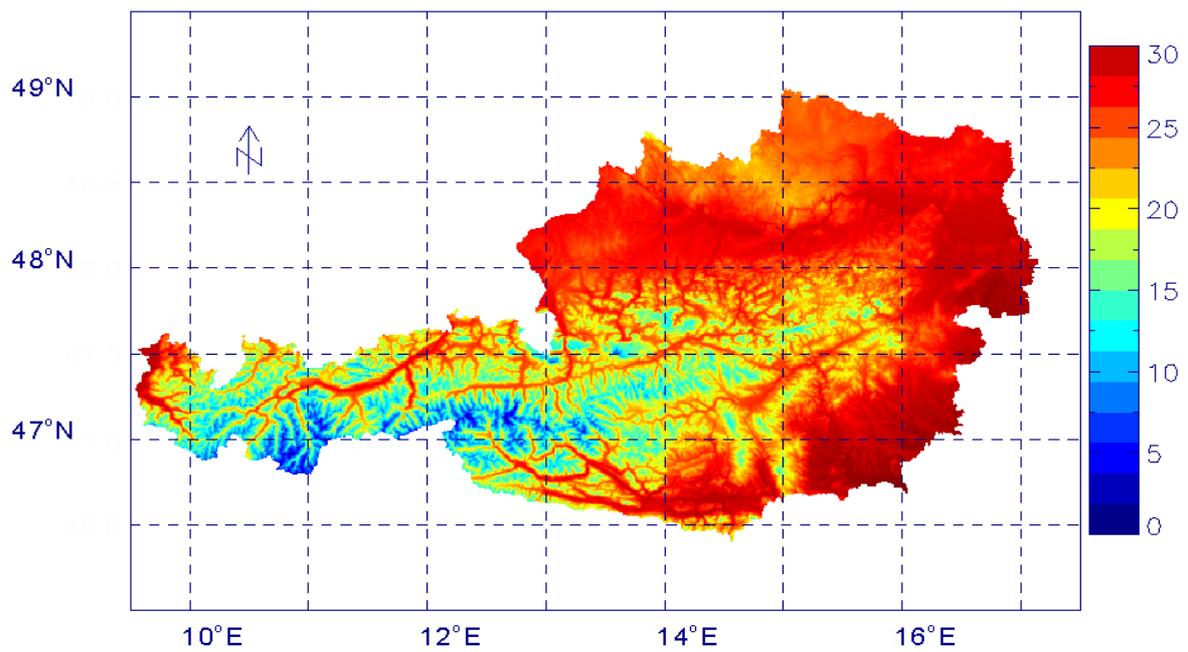


Abb. B.89: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für August

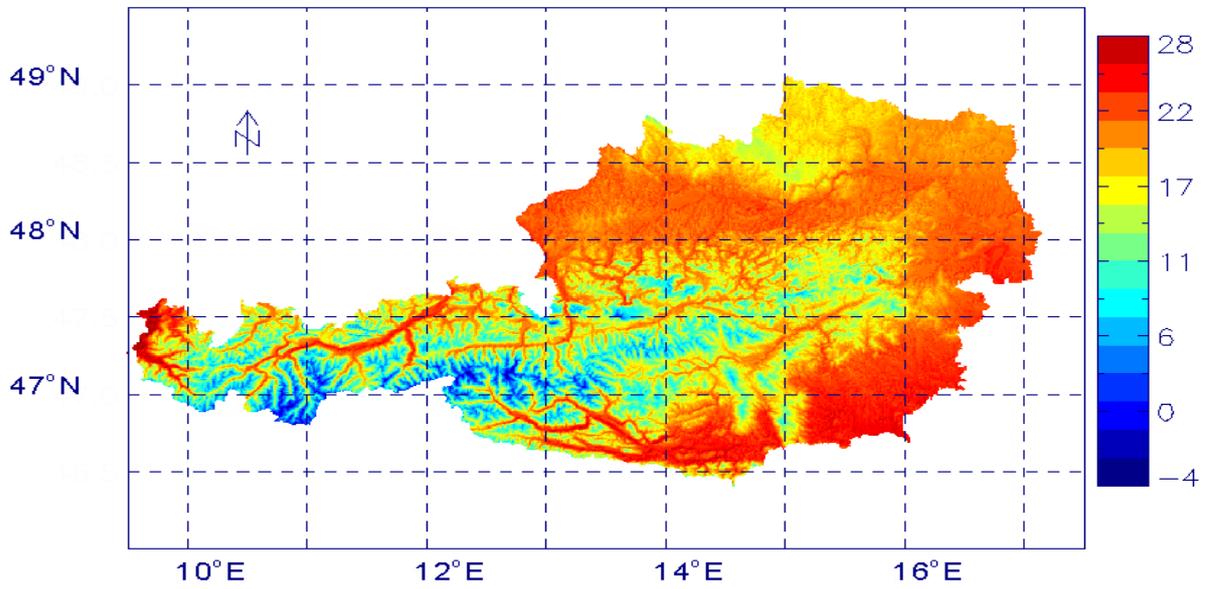


Abb. B.90 : Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für September

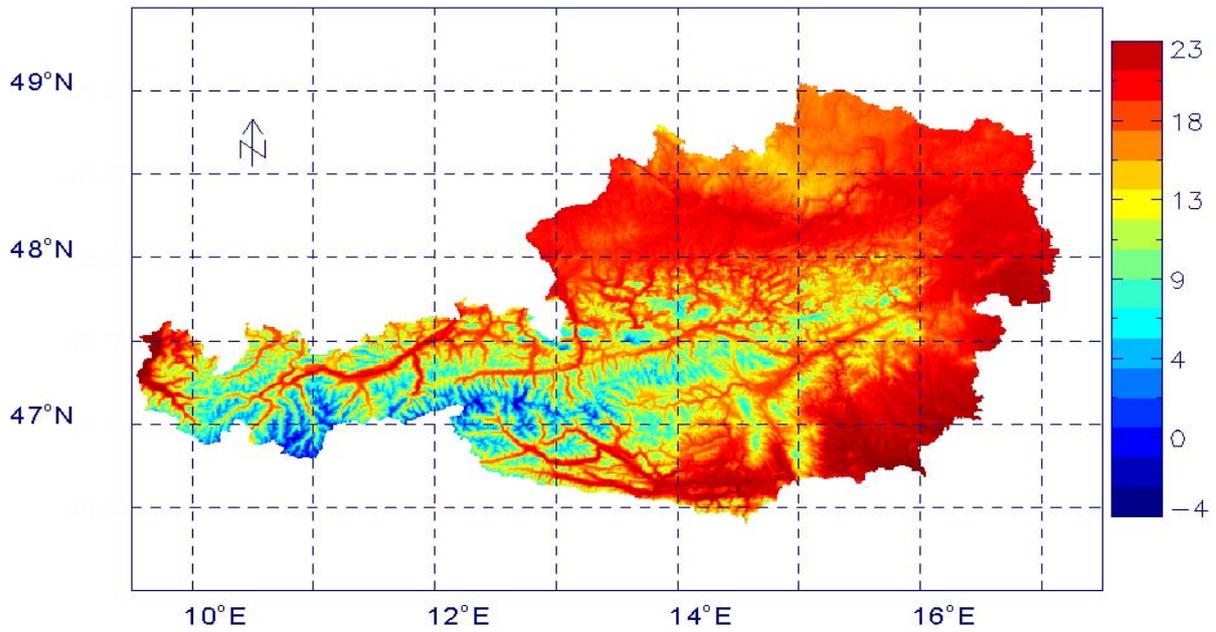


Abb. B.91: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für September

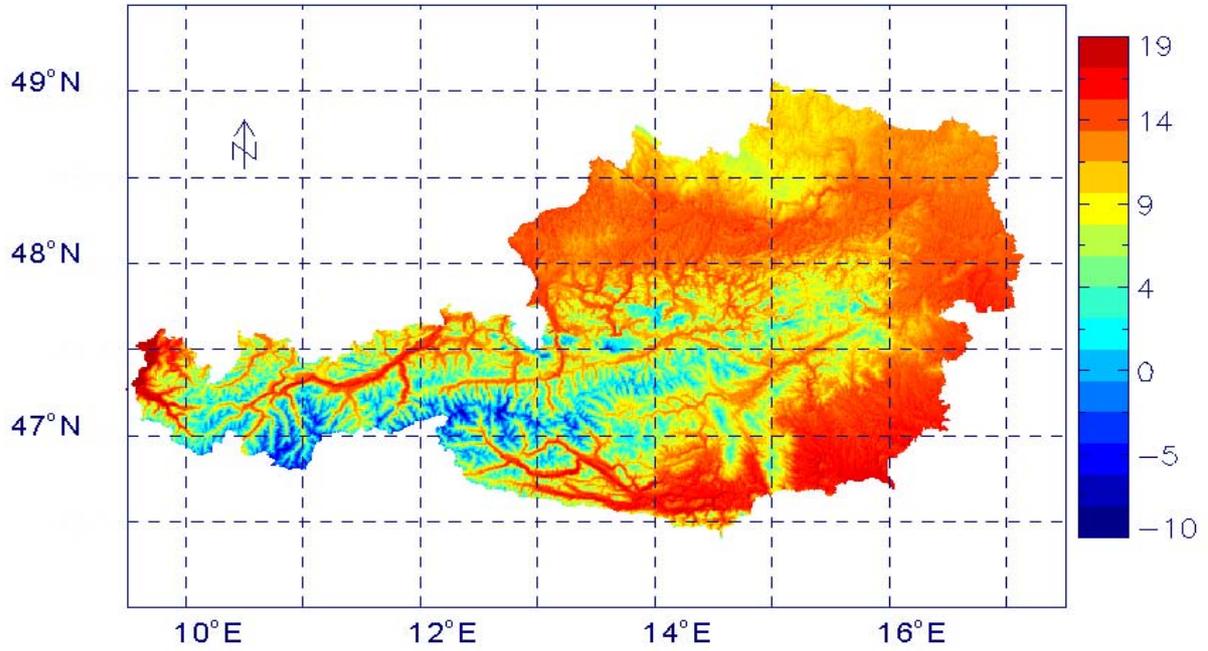


Abb. B.92: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Oktober

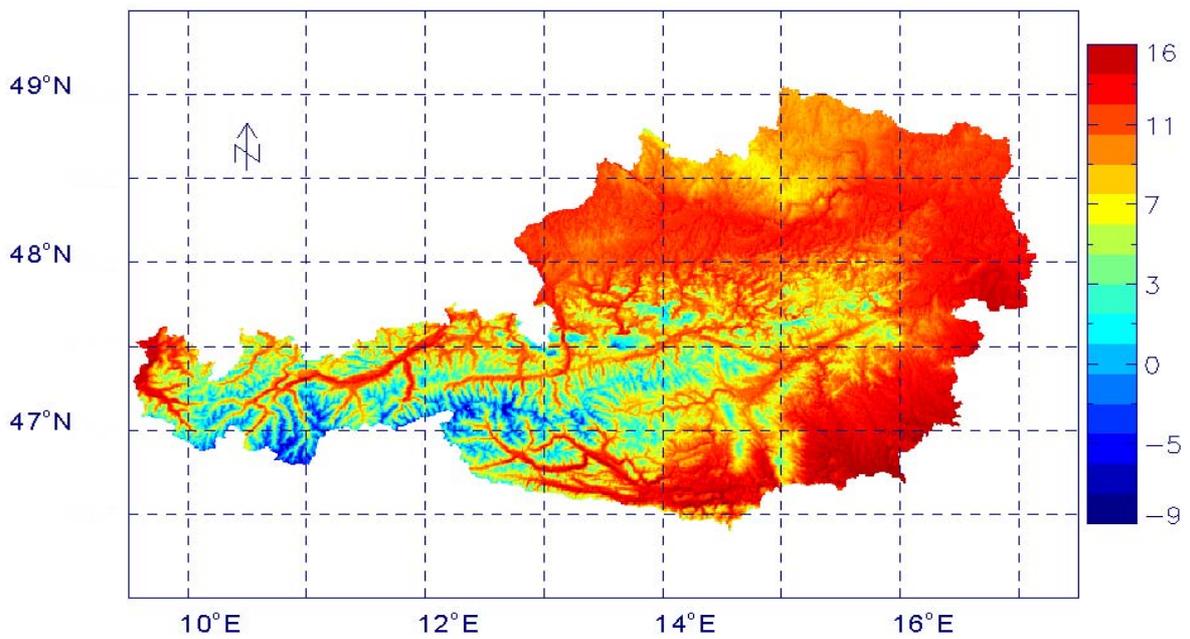


Abb. B.93: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Oktober

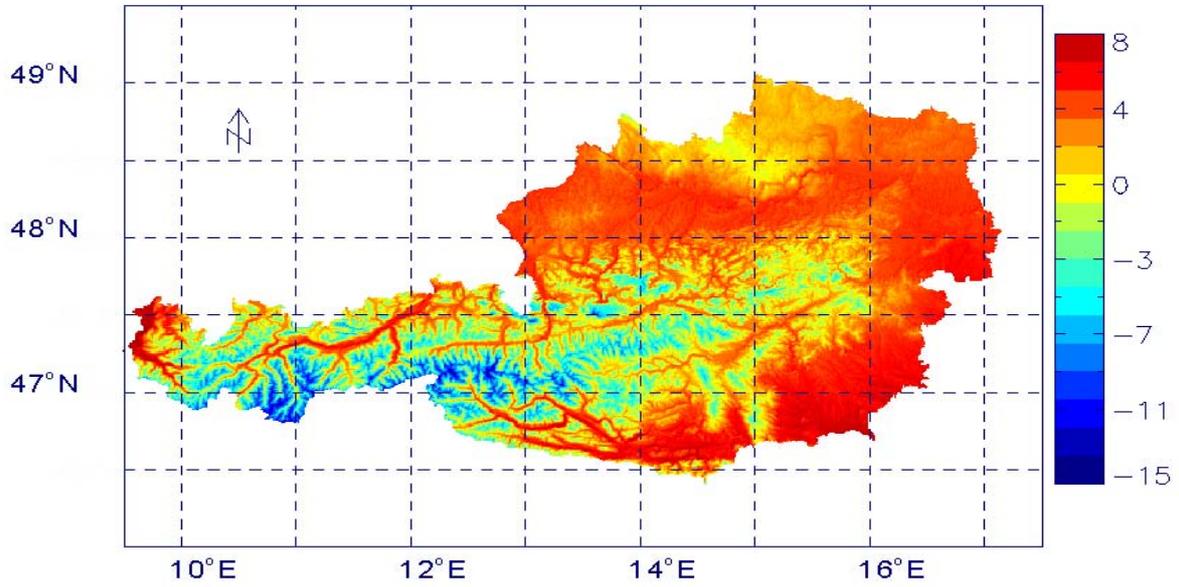


Abb. B.94: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für November

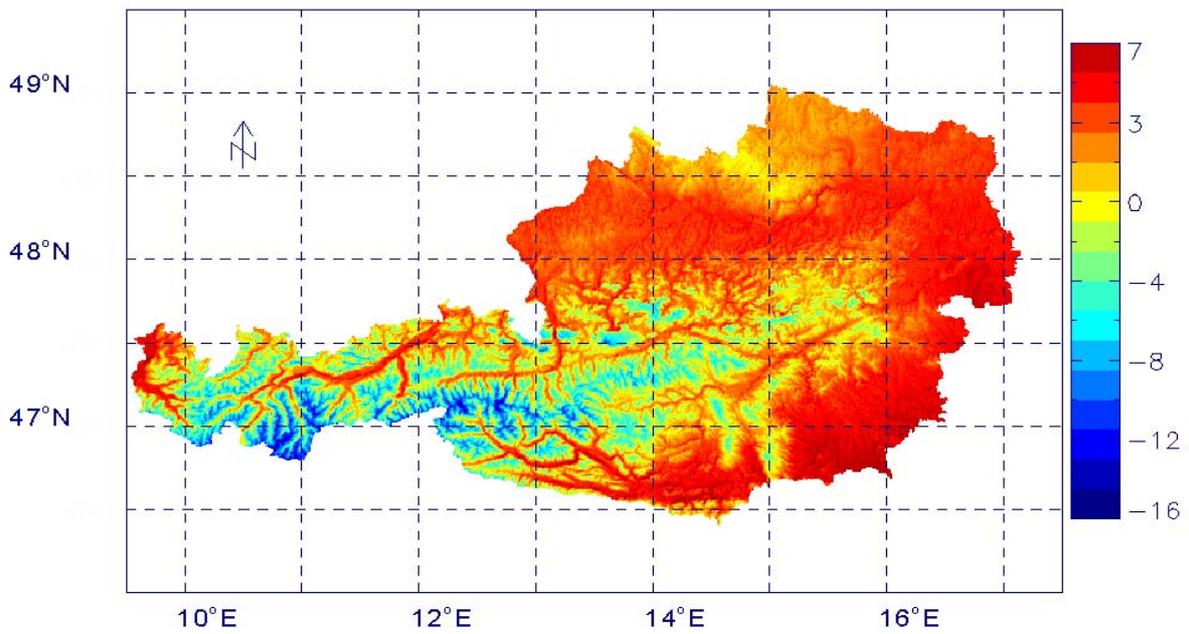


Abb. B.95: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für November

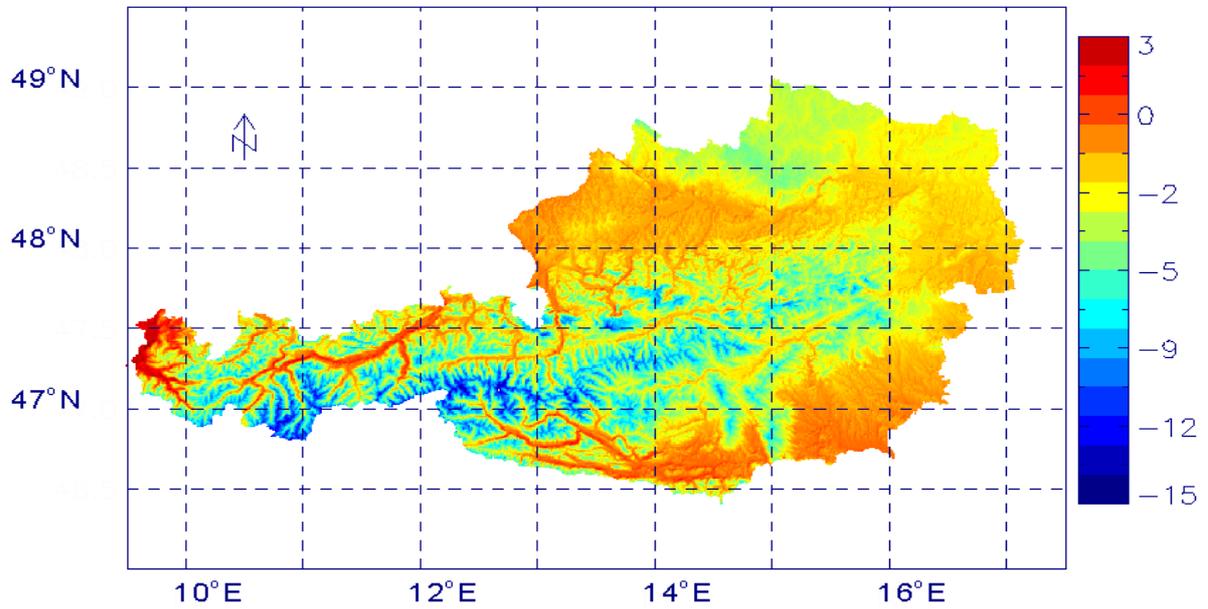


Abb. B.96: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 14 Uhr MOZ für Dezember

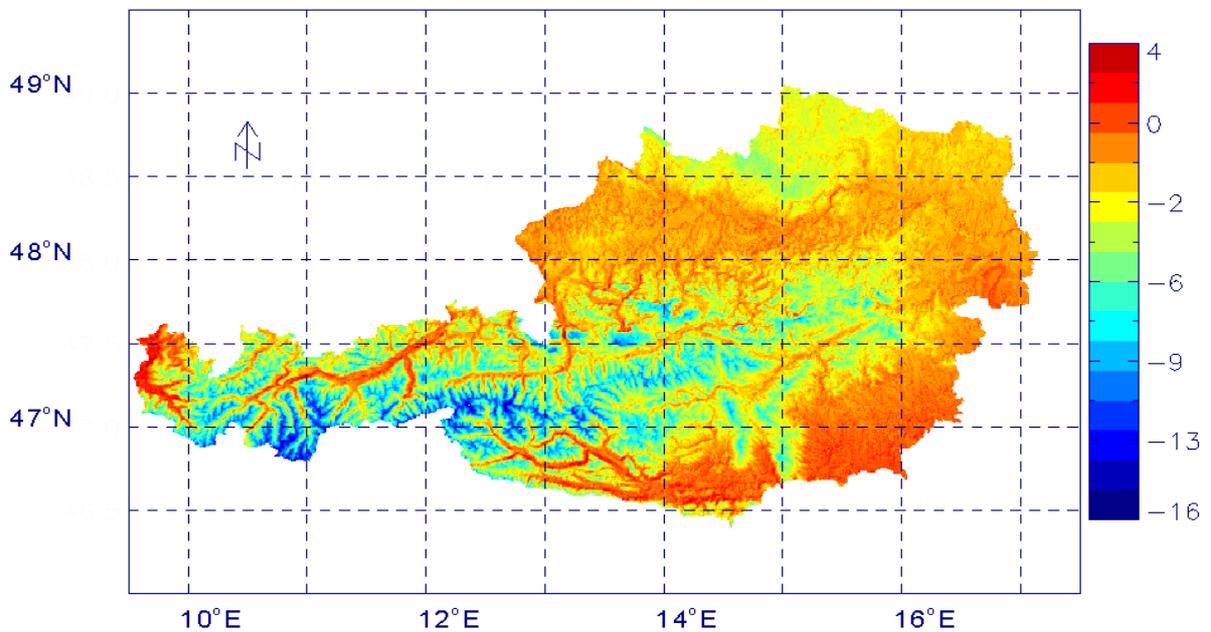
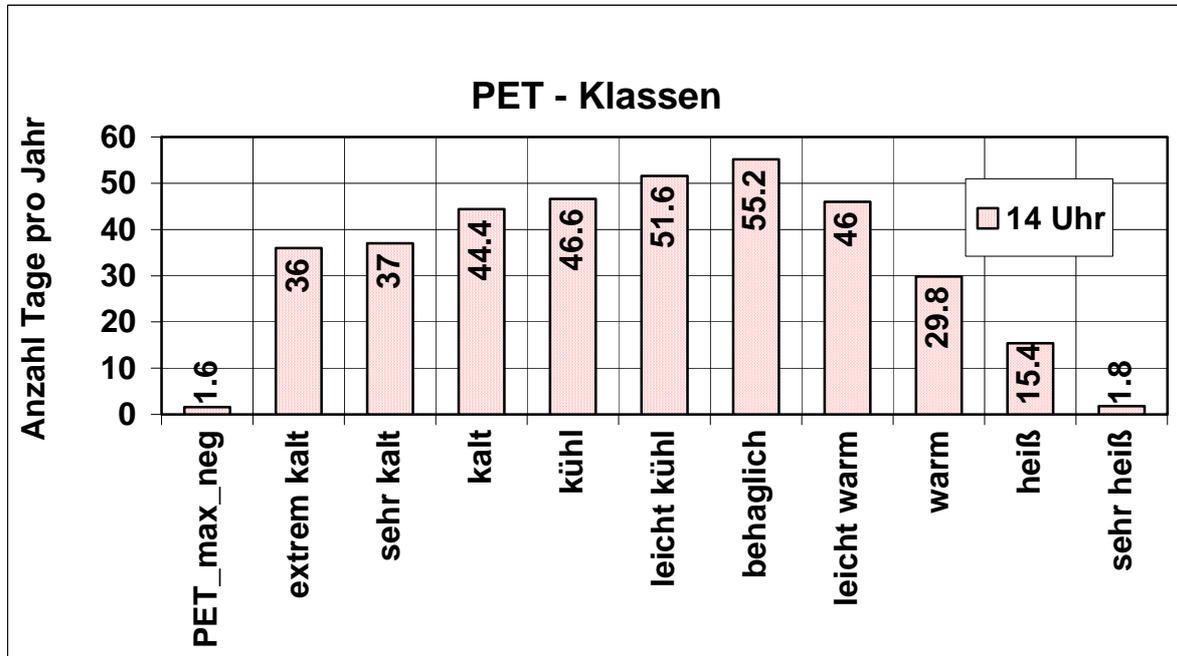
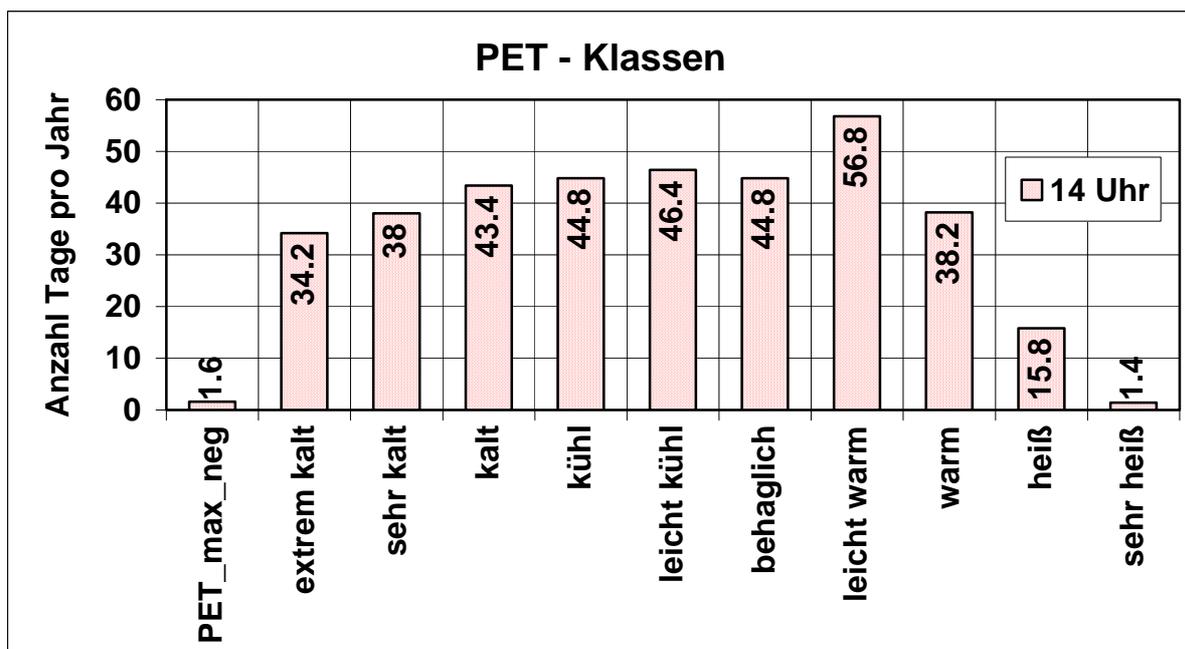
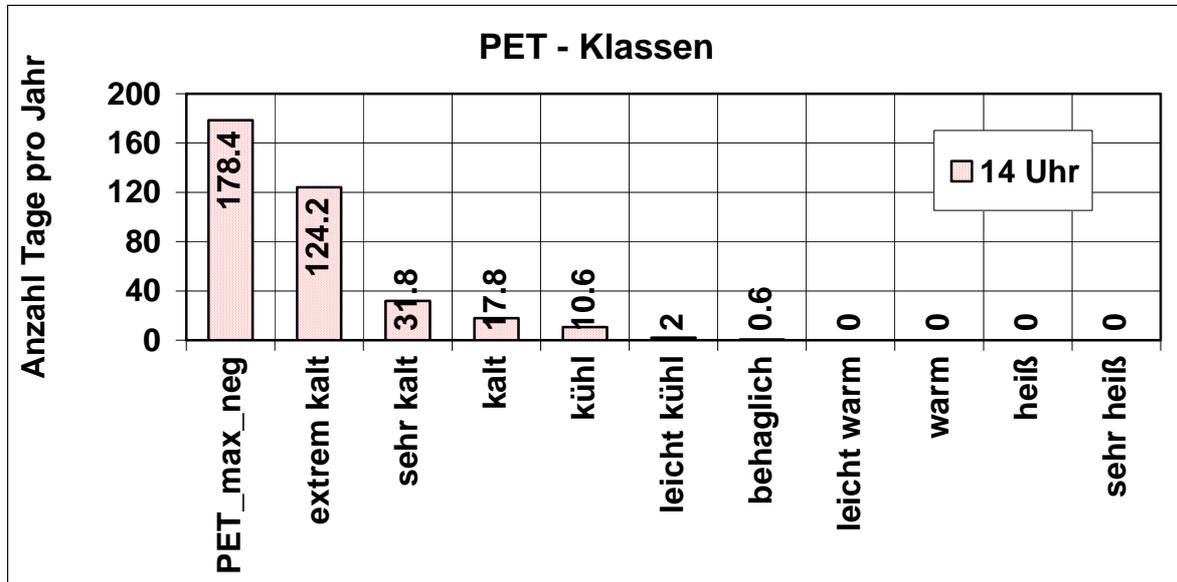
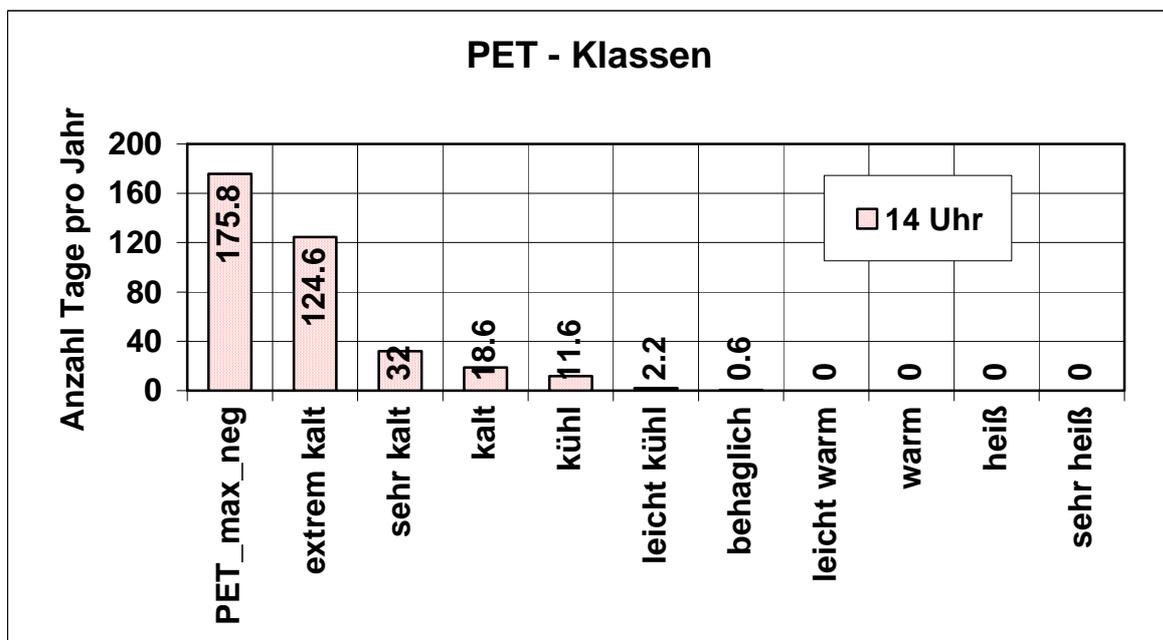


Abb. B.97: Regionale Verteilung des Monatsmittels von PET in °C um 13 Uhr MEZ für Dezember

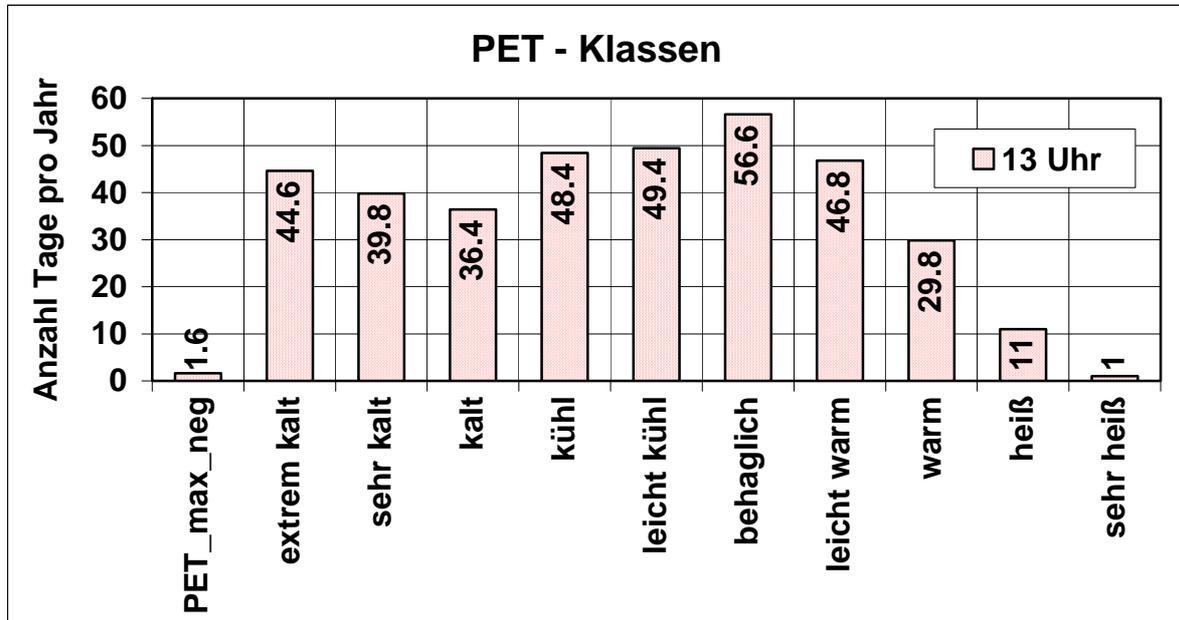
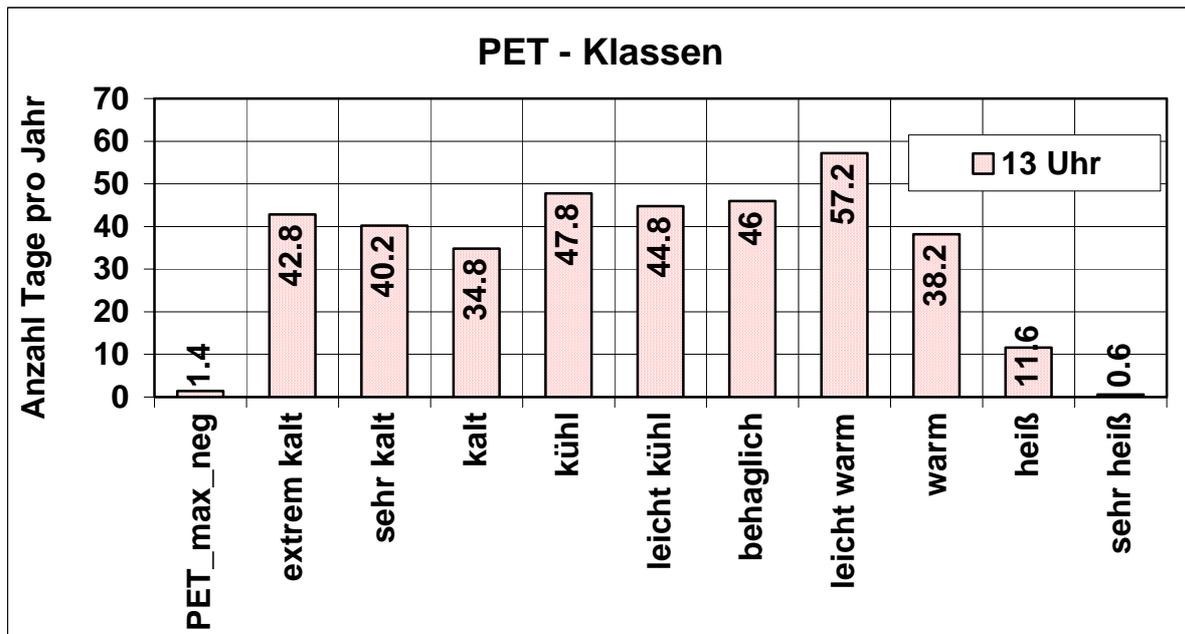
Innsbruck - Klimastation

Abb. C.98: Verteilung der PET-Klassen für Innsbruck um 14 Uhr MOZ mit $I_{cl} = 0.5$ cloAbb. C.99: Verteilung der PET-Klassen für Innsbruck um 14 Uhr MOZ mit $I_{cl} = 1.5$ clo

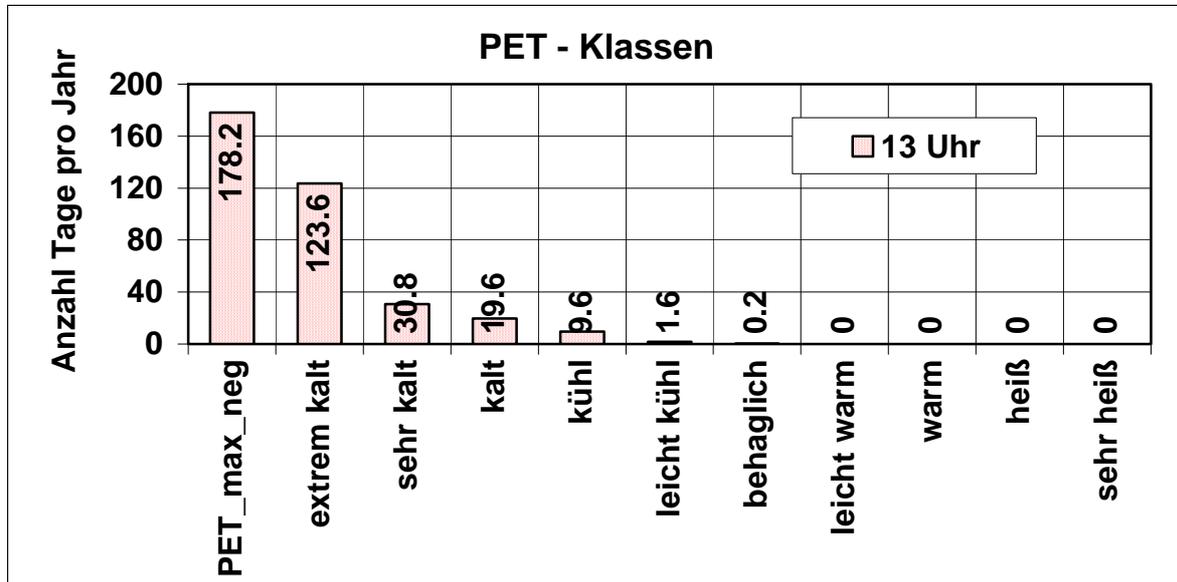
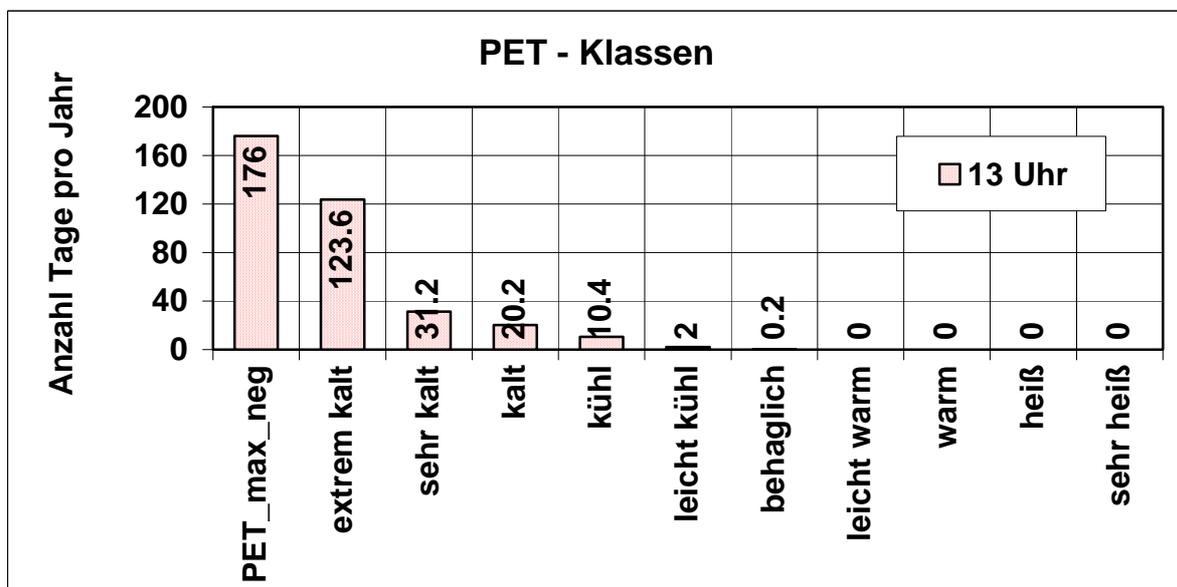
Sonnblick - Klimastation

Abb. C.100: Verteilung der PET-Klassen für Sonnblick um 14 Uhr MOZ mit $I_{cl} = 0.5$ cloAbb. C.101: Verteilung der PET-Klassen für Sonnblick um 14 Uhr MOZ mit $I_{cl} = 1.5$ clo

Innsbruck - Synopstation

Abb. C.102: Verteilung der PET-Klassen für Innsbruck um 13 Uhr MEZ mit $I_{cl} = 0.5$ cloAbb. C.103: Verteilung der PET-Klassen für Innsbruck um 13 Uhr MEZ mit $I_{cl} = 1.5$ clo

Sonnblick - Synopstation

Abb. C.104: Verteilung der PET-Klassen für Sonnblick um 13 Uhr MEZ mit $I_{cl} = 0.5$ cloAbb. C.105: Verteilung der PET-Klassen für Sonnblick um 13 Uhr MEZ mit $I_{cl} = 1.5$ clo

DANKSAGUNG

Mein Dank gilt Herrn PD Dr. Andreas Matzarakis, der mir dieses interessante Thema nicht nur zur Verfügung stellte, sondern durch die täglichen Gespräche Einblicke in das wissenschaftliche Arbeiten vermittelte, die weit über diese Untersuchung hinausgingen. Dank seiner Unterstützung konnte ich mich als halbe Kieler Studie-Sprotte gut im süddeutschen Ländle einleben.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Mojib Latif, der netter Weise die Betreuung an meiner Kieler Heimatuniversität übernahm.

Dipl.-Geogr. Florian Imbery und Dipl.-Hydr. Axel Wellpott möchte ich für die IDL-Tipps danken, Dr. Jutta Rost und Dipl.-Met. Thomas Holst für den leichten Nordlichterflair und allen verbleibenden des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg für die Aufnahme und Bereitstellung der Ressourcen.

MBA Rechtsanwältin Tanja Zimmerlin gebührt mein Dank für das Korrekturlesen und für die kreativen Intermezzi.

Wissenschaftliche Arbeit fordert nicht nur geistige, sondern auch körperlich Höchstleistungen. Daher fällt mein besonderer Dank auf meine beiden Kieler Physiotherapeutinnen Urte Schmeling und Sandra Peetz, die mich damaligen Bechterewler während meiner Prüfungsphase gelehrt haben, dass ein gesunder Geist nur in einem gesunden Körper leben kann. Eure zahlreichen Tipps, Ratschläge und Übungen haben mir das Leben angenehmer gemacht und ich werde sie immer beherzigen.

Antonia, Sabine, Steffi,..., der ganzen Kieler Clique danke ich dafür gemeinsam einen der schönsten Lebensabschnitte gemeinsam erlebt zu haben.

Meine Eltern, Hildegard und Johann Zygmuntowski sind zwei Menschen in meinem Leben denen ich nicht genug danken kann. Sie gaben mir die Möglichkeit einen Weg im Leben einzuschlagen, den ich ohne sie niemals hätte meistern können und haben mir gezeigt, dass es das Wichtigste im Leben ist sein Glück im Herzen zu finden. Ich hoffe durch meine Taten eure Leistung in Ehren zu halten.

Diese Arbeit ist euch beiden gewidmet !

ERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich diese Arbeit selbst verfasst zu haben. Es wurden von mir keine weiteren Hilfsmittel und Quellen außer den angegebenen verwendet.

Freiburg im Breisgau, den 1. Juli 2004