



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Untersuchung der Feuchte im Ostalpenraum

Verfasserin

Karin Hennermann

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 415

Studienrichtung lt. Studienblatt: Meteorologie

Betreuer: O.Univ.Prof. Dr. Reinhold Steinacker

Zusammenfassung

Ausgehend von der Tatsache, dass die Lufttemperatur im Alpenraum und damit der Sättigungsdampfdruck in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat, wird in dieser Arbeit die Entwicklung der Luftfeuchte im Ostalpenraum anhand des Mischungsverhältnisses und der relativen Feuchte an sechs verschiedenen Punkten statistisch untersucht. Die gemittelten Feuchteparameter werden saisonal und tageszeitlich getrennt betrachtet, wobei der Fokus auf den Analyseterminen zum tageszeitlichen Temperaturminimum und -maximum liegt. Die Datengrundlage bilden die VERACLIM Gitterpunktzeitreihen der Jahre 1980 bis 2001 sowie die Höhe der Minimumtopographie in einer Auflösung von 20 km.

Die Ergebnisse der Trendanalysen zeigen, dass der Wasserdampfgehalt im Ostalpenraum tendenziell zunimmt, wobei statistisch signifikante Tendenzen vor allem in den Frühlings- und Sommermonaten, sowie an den Gitterpunkten im Norden und Osten Österreichs vorkommen. Die einzig nennenswerten negativen Trends zeigt Klagenfurt im Herbst und Winter, diese sind aber nicht signifikant getestet.

Trotz steigendem Feuchtegehalts ergeben die Auswertungen der relativen Feuchte im Mittel eine Abnahme. Zum tageszeitlichen Temperaturminimum tritt dieser Rückgang geschlossen an allen untersuchten Gitterpunkten und in allen Jahreszeiten auf, wobei der Hauptteil dieser Trends auch signifikant ist. Zum Temperaturmaximum weisen die Orte im Norden und Osten, vor allem in den wärmeren Jahreszeiten, auch positive Trends der relativen Feuchte auf. Den einzig signifikanten, positiven Trend zeigt Wien-Schwechat im Herbst. Die markantesten und auch durchwegs signifikanten, negativen Tendenzen der relativen Feuchte zeigen in allen Jahreszeiten die Gitterpunkte Innsbruck und Klagenfurt.

Abstract

Based on the fact, that air temperature in the alpine region and thereby the saturation vapour pressure increased during the past decades, the subject of this thesis is to examine the development of humidity in the eastern alpine region by means of statistically analysing the mixing ratio and relative humidity at six different locations. The seasonally averaged moisture parameters are examined at 06 UTC and 12 UTC respectively. The data set used in this study consists of VERACLIM analyses from 1980 to 2001 and the altitude of the minimum topography both on a 20 km grid.

The trend analyses show, that on average the water vapour content in the eastern alpine region increases, although statistically significant tendencies mainly occur in spring and summer and at grid points in the northern and eastern parts of Austria. Only Klagenfurt shows noteworthy negative trends in autumn and winter, however these trends are statistically not significant.

Even though the water vapour content increases, on average relative humidity is decreasing. Throughout all seasons all examined grid points show a decline of relative humidity at 06 UTC, the better part of these trends are significant. At 12 UTC, especially during the warmer seasons, grid points in the northern and eastern parts of Austria show an increase in relative humidity as well. The only significant, positive trend exhibits Wien-Schwechat in autumn. The most prominent and significant, negative tendencies show Innsbruck and Klagenfurt throughout all seasons.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
1 Einleitung	1
1.1 Ziel und Motivation	1
1.2 Wasserdampf in der Atmosphäre	1
2 Grundlagen	5
2.1 Luftdruck	5
2.1.1 Isotherme Atmosphäre	6
2.1.2 Polytrope Atmosphäre	7
2.1.3 Reduzierter Luftdruck	7
2.2 Potentielle Temperatur	8
2.3 Äquivalentpotentielle Temperatur	9
2.4 Feuchtemaße	10
2.4.1 Spezifische Feuchte und Mischungsverhältnis	10
2.4.2 Dampfdruck	10
2.4.3 Relative Feuchte	11
3 Datenmaterial	13
3.1 VERA Analyseverfahren	13
3.2 VERACLIM	15
3.2.1 Domäne und Auflösung	15
3.3 Minimumtopographie	16
4 Vorgehensweise	19
4.1 Berechnung der Feuchtemaße	19
4.2 Problembehandlung	21
4.3 Auswahl der Gitterpunkte	22
4.3.1 Klimatologische Beschreibung	24
4.4 Statistische Aufbereitung	28
4.4.1 Median	28
4.4.2 Korrelation und Regression	28
4.4.3 Mutungsbereich	30
4.4.4 Signifikanztest	30

5	Ergebnisse	33
5.1	Winter	34
5.1.1	Innsbruck	34
5.1.2	Salzburg	36
5.1.3	Linz-Hörsching	38
5.1.4	Wien-Schwechat	40
5.1.5	Graz	42
5.1.6	Klagenfurt	44
5.2	Frühling	46
5.2.1	Innsbruck	46
5.2.2	Salzburg	48
5.2.3	Linz-Hörsching	50
5.2.4	Wien-Schwechat	52
5.2.5	Graz	54
5.2.6	Klagenfurt	56
5.3	Sommer	58
5.3.1	Innsbruck	58
5.3.2	Salzburg	60
5.3.3	Linz-Hörsching	62
5.3.4	Wien-Schwechat	64
5.3.5	Graz	65
5.3.6	Klagenfurt	67
5.4	Herbst	69
5.4.1	Innsbruck	69
5.4.2	Salzburg	71
5.4.3	Linz-Hörsching	73
5.4.4	Wien-Schwechat	75
5.4.5	Graz	76
5.4.6	Klagenfurt	78
6	Zusammenfassung und Schluss	81
	Literaturverzeichnis	89
	Abbildungsverzeichnis	92

1 Einleitung

1.1 Ziel und Motivation

Analysen des Temperaturverlaufes haben ergeben, dass dieser im 20. Jahrhundert im globalen Mittel einen markanten Anstieg aufweist. Der menschliche Einfluss bedingt eine Zunahme, die über das Ausmaß einer durch natürliche Klimamechanismen erklärbaren, hinaus geht. Die globale Erwärmung ist mittlerweile eine weitläufig bekannte Tatsache, ihre Ursachen umstrittenes Thema einer lebhaften Diskussion. (ZAMG, 2012)

In Folge der weltweiten Erwärmung der Erdatmosphäre, die im Alpenraum sogar noch über dem globalen Mittel liegt (AUER ET AL., 2007), ist auch der maximal mögliche Feuchtegehalt der Luft durch den exponentiellen Zusammenhang des Sättigungsdampfdruckes mit der Temperatur gestiegen (vgl. Abb. 2.1). Diese erhöhte Feuchtekapazität wird durch vermehrte Verdunstung ausgeglichen, was zu einer Erhöhung des Wasserdampfgehalts in der globalen Atmosphäre führt und gegebenenfalls den Wasserkreislauf der Erde anregt. (ZAMG, 2012)

In dieser Arbeit soll die Entwicklung der Feuchte im Ostalpenraum der Jahre 1980-2001 untersucht werden. Als Datengrundlage dienen die VERACLIM Gitterpunktzeitreihen dieses Zeitraumes. Es werden im Laufe dieser Arbeit unterschiedliche Feuchteparameter aus diesen Daten errechnet und ihr zeitlicher Verlauf an verschiedenen Punkten mit statistischen Methoden untersucht und beschrieben. Die ausgewählten Gitterpunkte sollen Orte mit diversen klimatologischen Verhältnissen repräsentieren, wobei berücksichtigt wird dass die Alpen bei bestimmten Strömungslagen ein Hindernis darstellen, welches die zu untersuchenden Gitterpunkte verschieden stark und auf unterschiedliche Weise beeinflusst.

1.2 Wasserdampf in der Atmosphäre

Die Erdatmosphäre besteht aus einer Vielzahl von Gasen. Ihre chemische Zusammensetzung ist bis in eine Höhe von 80-90 km nahezu konstant. Die Hauptbestandteile sind Stickstoff, Sauerstoff und Argon, die übrigen Gase kommen nur in Spuren vor. (BOHR ET AL., 1987)

Unter den Spurenstoffen hat der Wasserdampf die größte Bedeutung, unter anderem da Wasser in der Atmosphäre in allen drei Aggregatzuständen vorkommt

was die Grundlage des Bergeron-Findeisen-Prozesses in der Wolkenphysik darstellt (BOHR ET AL., 1987). Wasserdampf ist außerdem entscheidend für den Haushalt der latenten Wärme, so wie die Temperatur maßgebend für den der fühlbaren Wärme ist. Durch seine hohen Phasenumwandlungswärmen ist er ein energetisch besonders wichtiger Bestandteil. (REUTER ET AL., 2001)

Zusätzlich weist Wasserdampf starke Absorptionseigenschaften langwelliger Strahlung auf (BOHR ET AL., 1987). In nur zwei schmalen Spektralbereichen lässt er die Abstrahlung von Wärme in den Weltraum zu. Durch diese Strahlungseigenschaften ist der Wasserdampf, trotz seiner vergleichsweise geringen Verweilzeit von nur einigen Tagen in der Atmosphäre, maßgeblich für den planetaren Treibhauseffekt verantwortlich. (ZAMG, 2012)

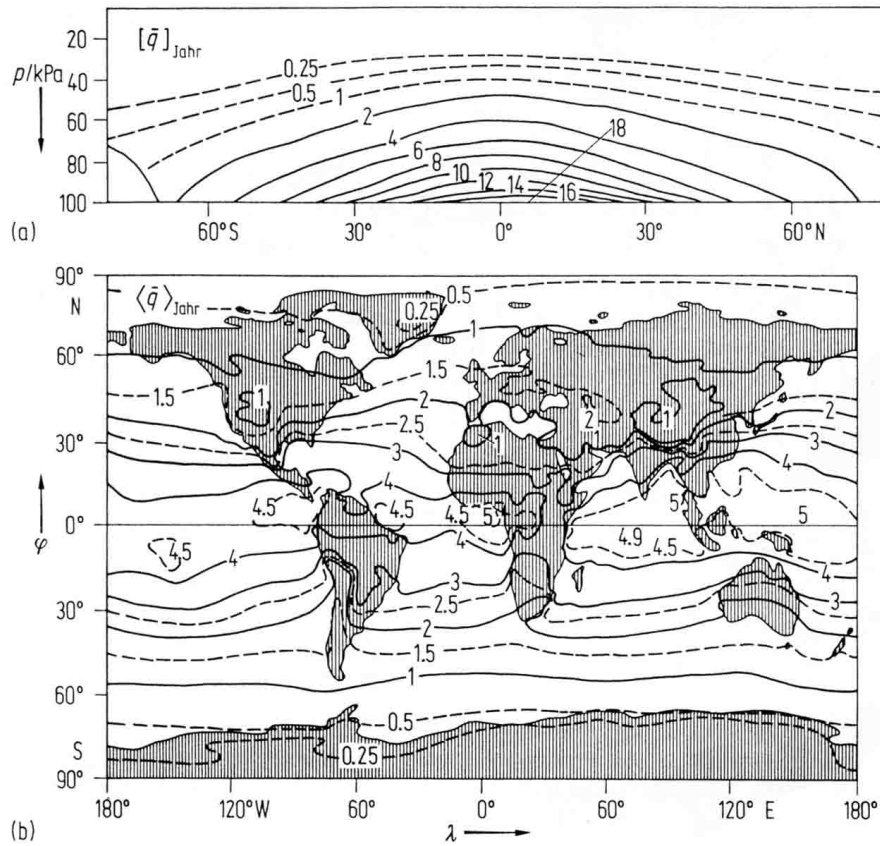


Abbildung 1.1: Jahresmittel der spezifischen Feuchte in der Atmosphäre
 (a) Zonales Mittel der spezifischen Feuchte in g/kg als Funktion von geographischer Breite und Druck. (b) Vertikales Integral der spezifischen Feuchte in 10 kg/m^2 .
 (Quelle: REUTER ET AL. (2001))

Der Anteil des Wasserdampfes in der Atmosphäre unterliegt starken Schwankungen und kann bis zu 4% ausmachen (BOHR ET AL., 1987). Er nimmt, durch die Abhängigkeit des Sättigungsdampfdruckes von der Temperatur, mit der Höhe schnell ab (BOHR ET AL., 1987), sodass sich der größte Teil des Wasserdampfes in den untersten 2 km der Troposphäre befindet (vgl. Abb. 1.1) (REUTER ET AL., 2001).

Wissen über die Menge und Verteilung des Wasserdampfes ist in den meteorologischen Disziplinen von großer Bedeutung. Daher haben sich eine Reihe von Feuchtemaßen eingebürgert, auf die in Abschnitt 2.4 näher eingegangen wird. (BOHR ET AL., 1987)

2 Grundlagen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Grundlagen stammen aus REUTER ET AL. (2001), LILJEQUIST und CEHAK (1984), EMEIS (2000), BOHR ET AL. (1987) und HANTEL und MAYER (2006). Es soll einen Überblick über die meteorologischen Grundlagen bieten, die im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich von Bedeutung sind.

2.1 Luftdruck

Der Luftdruck p ist eine der zentralen Größen in der Meteorologie und ist der Druck, den die Luft unter Einfluss der Schwerkraft auf eine Fläche ausübt (LILJEQUIST und CEHAK, 1984). Wirkt eine Kraft K orthogonal auf eine Fläche F , so bezeichnet man den Quotienten K/F als den Normaldruck $p = K/F$, mit der Einheit Pascal $Pa = N/m^2 = kg\,m^{-1}\,s^{-2}$ (REUTER ET AL., 2001). In der Meteorologie wird als Einheit für den Luftdruck vorwiegend das Hektopascal hPa verwendet, wobei

$$1\,hPa = 10^2\,Pa = 10^{-3}\,bar = 1\,mbar$$

(EMEIS, 2000).

Der Luftdruck ist gleich dem Gesamtgewicht der über dem betrachteten Ort befindlichen Luftsäule mit einer Grundfläche von $1\,m^2$. Er entspricht am Beobachtungsort annähernd dem hydrostatischen Druck der Erdatmosphäre. Die dynamische Komponente des Luftdrucks, welche durch die Anströmung einer Fläche entsteht und von der Geschwindigkeit der Luft und von der Orientierung der Fläche relativ zur Strömung abhängt, ist im Allgemeinen so gering, dass man den Luftdruck dem hydrostatischen Druck gleichsetzen kann. (LILJEQUIST und CEHAK, 1984)

Für den hydrostatischen Druck p einer nicht komprimierbaren Flüssigkeit mit konstanter Dichte ρ in einer Tiefe h gilt

$$p = g\rho h \tag{2.1}$$

wobei

$g \dots$ Schwerebeschleunigung der Erde ($\approx 9.81\,m/s^2$).

Mit der Vertikalkoordinate z , welche nach oben positiv definiert ist und der geometrischen Höhe entspricht, schreibt sich Gleichung (2.1)

$$p - p_0 = g\rho(z_0 - z). \quad (2.2)$$

Da die Erdatmosphäre allerdings eine vertikal variable Dichte aufweist, betrachtet man Gleichung (2.2) als Formel für den Druckzuwachs für hinreichend dünne Schichten der Dicke dz , und bezeichnet sie als hydrostatische Gleichung oder auch statische Grundgleichung

$$dp = -g\rho dz. \quad (2.3)$$

Die statische Grundgleichung besagt, dass die Druckzunahme in einem Geofluid bei gegebener Schichtdicke ausschließlich eine Funktion der Dichte des Mediums ist, und gilt für ein ruhendes Medium exakt, für ein bewegtes in guter Näherung.

(REUTER ET AL., 2001)

2.1.1 Isotherme Atmosphäre

Kombiniert man für den vereinfachten Fall der isothermen Atmosphäre ($T(z) = \textit{konstant}$, $dT(z) = 0$), die statische Grundgleichung (2.3) mit der Gasgleichung

$$p = R\rho T \quad (2.4)$$

so erhält man

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{RT} dz \quad (2.5)$$

wobei

$R \dots$ individuelle Gaskonstante

$\rho \dots$ Dichte der Luft

$T \dots$ Temperatur des Luftpakets in Kelvin

$g \dots$ Schwerebeschleunigung der Erde ($\approx 9.81 \text{ m/s}^2$).

(REUTER ET AL., 2001)

2.1.2 Polytrope Atmosphäre

Tritt in der Atmosphäre bzw. in einer betrachteten Luftschicht ein konstantes vertikales Temperaturgefälle γ auf, bezeichnet man diese Schichtung als polytrop ($dT(z) = \text{konstant}$). Ein typischer Wert für $\gamma = 6.5 \times 10^{-3} \text{ K/m}$, und nennt sich feuchtisentropen Temperaturgradient. Berücksichtigt man nun in Gleichung (2.5) noch ein konstantes vertikales Temperaturgefälle der betrachteten Schicht, so erhält man durch Einsetzen von

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z} \quad \rightarrow \quad T(z) = T_0 - \gamma(z - z_0) \quad (2.6)$$

auf der rechten Seite von Gleichung (2.5) und integrieren von p_0 bis p die barometrische Höhenformel für die polytrope Atmosphäre

$$\log \frac{p}{p_0} = \frac{g_0}{R\gamma} \log \frac{T_0 - \gamma(z - z_0)}{T_0} \quad \rightarrow \quad \left(\frac{p}{p_0} \right) = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{g_0}{R\gamma}} \quad (2.7)$$

mit

p_0 ... Druck auf Niveau z_0

g_0 ... mittlere Schwerebeschleunigung in der Troposphäre ($= 9.80 \text{ m/s}^2$)

R ... individuelle Gaskonstante

γ ... vertikaler Temperaturgradient

T_0 ... Temperatur auf Niveau z_0 .

(HANTEL und MAYER, 2006; REUTER ET AL., 2001)

2.1.3 Reduzierter Luftdruck

Da der Luftdruck vom Gewicht der über dem Messpunkt gelegenen Luftsäule abhängt, ist dieser umso geringer je höher die meteorologische Messstation aufgrund von topographischen Gegebenheiten liegt. Um die Messwerte untereinander vergleichbar zu machen wird der gemessene Wert mittels der barometrischen Höhenformel auf ein Standardniveau reduziert. Die mittlere Meereshöhe dient als Bezugsniveau der so vereinheitlichten Luftdruckwerte. Durch die Annahme eines konstanten vertikalen Temperaturgefälles γ wird bei der Ermittlung der Mitteltemperatur der fiktiven Luftschicht zwischen Beobachtungsort und Meeresniveau ein Reduktionsfehler begangen, welcher mit zunehmender Höhe immer größer wird. Aus diesem Grund wird die beschriebene Reduktion in der Regel nur bei

Stationen, welche unterhalb von 750 m Seehöhe liegen angewandt. (BOHR ET AL., 1987)

2.2 Potentielle Temperatur

Die potentielle Temperatur Θ ist die Temperatur, welche ein Luftpaket mit den Zustandsgrößen Druck p und Temperatur T annähme, wenn es isentrop (adiabatisch reversibel) auf einen Druck von 1000 hPa komprimiert werden würde. Bei einer isentropen Zustandsänderung eines Luftpakets, also einer Änderung bei der keine Entropie durch Absorption von Strahlung, Kondensation oder Verdunstung zu- oder abgeführt wird, bleibt Θ konstant. Sie eignet sich demnach gut zur Charakterisierung von Luftmassen, denn im Gegensatz zur Temperatur ist sie gegen Druckänderungen invariant und ändert sich bei der Hebung und Senkung eines Luftpakets nicht. (REUTER ET AL., 2001)

Die Gleichung für die potentielle Temperatur lautet

$$\Theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^\kappa \quad \text{mit} \quad \kappa = \frac{R}{c_p} \approx \frac{2}{7} \quad (2.8)$$

wobei

T ... Temperatur in Kelvin

p_0 ... Referenzdruck ($= 1000 \text{ hPa}$)

p ... Luftdruck in hPa

R ... individuelle Gaskonstante für trockene Luft ($= 287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

c_p ... spezifische Wärme bei konstantem Druck ($= 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Das bedeutet, dass bei einem Druck von $p = p_0$ die Temperatur T eines Luftpakets gleich seiner potentiellen Temperatur Θ ist. Zusammenfassend kann man also schreiben

$$\begin{aligned} \Theta &< T, & \text{für } p > p_0 \\ \Theta &= T, & \text{für } p = p_0 \\ \Theta &> T, & \text{für } p < p_0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

(REUTER ET AL., 2001)

2.3 Äquivalentpotentielle Temperatur

Die äquivalentpotentielle (oder auch pseudopotentielle) Temperatur Θ_e ist die Temperatur, die ein feuchtes Luftpaket erreichen würde, wenn es zunächst durch Hebung den enthaltenen Wasserdampf durch Auskondensation verlieren und anschließend isentrop auf ein Druckniveau von 1000 hPa gebracht werden würde (EMEIS, 2000). Die äquivalentpotentielle Temperatur ist definiert als

$$\Theta_e = \Theta \exp \left(\frac{Lq}{c_p T} \right) \quad (2.10)$$

mit

Θ ... potentielle Temperatur in Kelvin

L ... Phasenumwandlungswärme ($\approx 2.5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$)

q ... spezifische Feuchte

c_p ... spezifische Wärme bei konstantem Druck ($= 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T ... Temperatur in Kelvin.

(REUTER ET AL., 2001)

Bei isentropen Zustandsänderungen mit Kondensation oder Verdunstung bleibt Θ_e konstant, wohingegen Θ sich verändert, da die Feuchte in der potentiellen Temperatur nicht berücksichtigt wird. Innerhalb einer Luftmasse ist Θ_e damit eine konservative Größe und ein Maß für die enthaltene Energie. Starke horizontale Gradienten der äquivalentpotentiellen Temperatur lassen auf eine Luftmassengrenze schließen und das vertikale Profil gibt Aufschluss über die Stabilität der Atmosphäre. Eine vertikale Schichtung, in der Θ nach oben hin zunimmt, nennt sich trockenstabil, eine mit nach oben hin steigendem Θ_e feuchtstabil. Die globale Atmosphäre ist weitgehend trockenstabil geschichtet und Feuchtlabilität, wie sie zum Beispiel in der unteren Troposphäre der Tropen vorkommt, sorgt für hochreichende Konvektion und große Niederschlagsmengen.

(REUTER ET AL., 2001)

2.4 Feuchtemaße

2.4.1 Spezifische Feuchte und Mischungsverhältnis

Das Mischungsverhältnis m dient wie die spezifische Feuchte q als Maßzahl für den Gehalt von Wasserdampf in der Luft. Das Mischungsverhältnis ist das Verhältnis der Massen von Wasserdampf und trockener Luft

$$m = \frac{\rho_W}{\rho_L} \quad (2.11)$$

und die spezifische Feuchte das Verhältnis der Massen von Wasserdampf und feuchter Luft

$$q = \frac{\rho_W}{\rho} \quad \text{mit} \quad \rho = \rho_L + \rho_W \quad (2.12)$$

mit

$\rho_W \dots$ Dichte des reinen Wasserdampfanteils (absolute Feuchte)

$\rho_L \dots$ Dichte des reinen Luftanteils.

Die spezifische Feuchte und das Mischungsverhältnis lassen sich mit $q = m/(1 + m)$ problemlos ineinander überführen. Ihre Differenz ist im Allgemeinen äußerst gering, so dass sich in guter Näherung

$$q \approx m \quad (2.13)$$

schreiben lässt.

(REUTER ET AL., 2001)

2.4.2 Dampfdruck

Mit Hilfe des Partialdrucks des Wasserdampfes eines feuchten Luftpakets, dem Dampfdruck e

$$e = R_W \rho_W T \quad (2.14)$$

lassen sich Mischungsverhältnis und spezifische Feuchte auch wie folgt schreiben

$$m = \frac{R_L}{R_W} \frac{e}{p - e}; \quad q = \frac{R_L}{R_W} \frac{e}{p - 0,377e} \quad (2.15)$$

wobei

R_L ... individuelle Gaskonstante für trockene Luft ($= 287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

R_W ... individuelle Gaskonstante für reinen Wasserdampf ($= 461.5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

p ... Luftdruck.

(REUTER ET AL., 2001)

2.4.3 Relative Feuchte

Die relative Feuchte f ist eines der bekanntesten Feuchtemaße und gibt den Grad der Wasserdampfsättigung eines Luftpakets bei einer bestimmten Temperatur an. Ändert sich die Lufttemperatur ohne dass Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf zu- oder abgeführt wird, ändert sich auch die relative Feuchte. Bei der Erwärmung eines Luftpakets sinkt die relative Feuchte, bei einer Abkühlung steigt sie. (EMEIS, 2000)

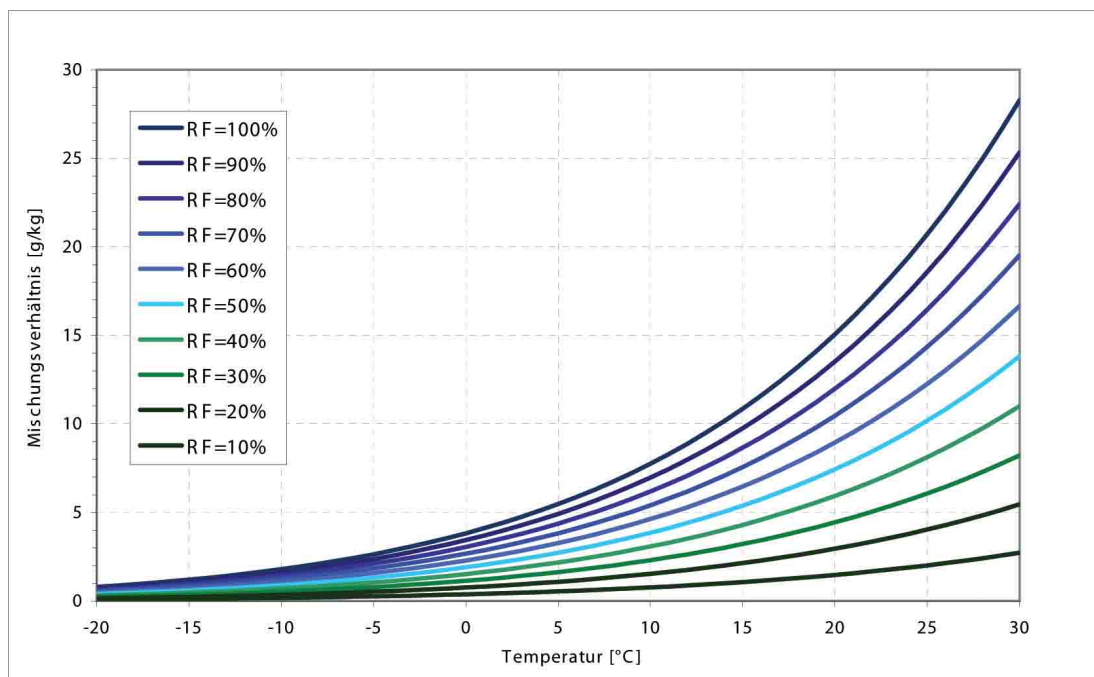


Abbildung 2.1: Relative Feuchte als Funktion von Temperatur und Mischungsverhältnis. Geplottet sind Linien konstanter relativer Feuchte als Funktion der Temperatur in °C (Abszisse) und des Mischungsverhältnisses in g/kg (Ordinate) bei einem Luftdruck von 1000 hPa.

Sie ist definiert als das Verhältnis zwischen Dampfdruck e und Sättigungs-

dampfdruck e_s und wird im Allgemeinen in Prozent angegeben (EMEIS, 2000)

$$f = \frac{e}{e_s}; \quad 0 \leq f \leq 100\%. \quad (2.16)$$

Übersättigungen, also Werte von f über 100%, kommen in der Natur vor allem bei Abwesenheit von ausreichend Kondensationskernen nur in einem Bereich von bis zu 1% vor.

(EMEIS, 2000; REUTER ET AL., 2001)

In Abbildung 2.1 ist der Zusammenhang zwischen relativer Feuchte, Temperatur und Wasserdampfgehalt dargestellt.

3 Datenmaterial

In diesem Kapitel werden das VERA Analyseverfahren, so wie das zur Verfügung stehende Datenmaterial beschrieben. Als Quelle dienen STEINACKER ET AL. (2000), HÄBERLI ET AL. (2004), STEINACKER ET AL. (2006), BICA ET AL. (2007a), BICA ET AL. (2007b) und SUKLITSCH (2004).

Das für die vorliegende Arbeit verwendete Datenmaterial besteht zum größten Teil aus VERACLIM Analysefeldern. Es stehen Minimumtopographie, reduzierter Luftdruck, potentielle und äquivalentpotentielle Temperatur der Jahre 1980-2001 mit einem Gitterpunktabstand von 20 km und einer zeitlichen Auflösung von drei Stunden (jeweils zu den synoptischen Haupt- und Nebenterminen) zu Verfügung.

3.1 VERA Analyseverfahren

Die Vienna Enhanced Resolution Analysis (VERA) ist eine Methode zur automatischen und objektiven Analyse und Qualitätsevaluierung von unregelmäßig verteilten und fehlerbehafteten meteorologischen Beobachtungen. Das Verfahren kann sowohl skalare als auch vektorielle Größen, die an unregelmäßig verteilten und wechselnden Stationen vorhanden sind, auf ein regelmäßiges Gitter abbilden, ist für ein- und zweidimensionale Domänen formuliert und speziell für den Einsatz über komplexer Topographie geeignet. (STEINACKER ET AL., 2000)

Da Fehler in Beobachtungsdaten großen Einfluss auf die Analysen haben können, ist es wichtig die Daten gründlich auf zufällige und systematische Abweichungen zu überprüfen, um die räumliche und physikalische Konsistenz sicher zu stellen. Bei der Datenqualitätskontrolle des VERA Analyseverfahrens wird davon ausgegangen, dass sich jeder Beobachtungswert in einen „wahren Wert“ plus einer Abweichung, welche sich aus zufälligen und systematischen Fehlern zusammensetzt, aufspalten lässt. Die Fehlerkorrektur berechnet im ersten Schritt die Werte für die Abweichung vom „wahren Wert“ an jeder Station und schätzt im zweiten Schritt mit Hilfe von statistischen Verfahren den Beitrag der unterschiedlichen Fehler zur Abweichung. Die Berechnung der Abweichung geschieht im Wesentlichen indem an die Daten mittels eines Variationsansatzes (Methode der finiten Elemente) stückweise derart Polynome angepasst werden, sodass für den so erhaltenen Spline das Integral der Quadrate der zweiten Ableitungen minimal ist. Dies genügt der Annahme, dass die Atmosphäre dem Prinzip des minimalen Auf-

wandes folgt, also dass sie eine minimale Krümmung in der Feldverteilung ihrer Zustandsgrößen anstrebt. Der oben beschriebene Variationsansatz wird in leicht abgewandelter Form auch dazu verwendet, die Beobachtungsdaten auf ein regelmäßiges Gitter zu interpolieren. (STEINACKER ET AL., 2000; HÄBERLI ET AL., 2004)

Zusätzlich können durch das Einbringen von physikalischem Vorwissen über das Verhalten meteorologischer Felder und den Einfluss komplexer Topographie in die Analyse mesoskalige Strukturen aufgelöst werden, die kleiner sind als der durchschnittliche Stationsabstand (downscaling). Das Wissen über die Auswirkungen stark strukturierter Orographie auf meteorologische Parameter gehen in Form der Fingerprints in die Analyse ein. Komplexe Orographie wie die der Alpen kann thermisch und dynamisch induzierte Strukturen (wie z.B. Hitzetiefs, Kältehochs oder Staukeile) hervorrufen, die von den spärlich verteilten Messstationen nur unzureichend aufgelöst werden. Mit konzeptionellen, von den Messdaten unabhängigen Modellen, die die thermischen und dynamischen Prozesse idealisiert wiedergeben, fließen hochaufgelöste Informationen in die Analyse ein. Diese idealisierten Felder berücksichtigen das reduzierte Luftvolumen in Tälern, erhöhte Heizflächen und die Stabilität der Talatmosphäre. Höhen- und Geländeinformationen sowie die Beschaffenheit und Geometrie der Oberfläche werden zur Berechnung der Fingerprints herangezogen. Wenn beim Interpolationsschritt des VERA Analyseverfahrens Anzeichen dieser idealisierten Felder in den Stationsdaten wiedergefunden werden, werden diese Muster der Analyse aufgeprägt um subskalige Strukturen sichtbar zu machen. Es wird angenommen, dass sich jeder gemessene Wert aus einem topographisch induzierten Anteil und einem Anteil, welcher nicht durch den topographischen Einfluss erklärt werden kann, zusammensetzt. Der topographische Fingerprint fließt über einen variablen Gewichtungsfaktor, welcher abhängig ist von Jahreszeit, Tageszeit und Wetterlage, unterschiedlich stark in das Analysefeld ein. Für die Fingerprintmethode ist es äußerst wichtig, dass große und systematische Fehler in den Beobachtungsdaten im Vorfeld korrigiert werden. Der Anteil des Messwerts, der nicht durch den topographischen Einfluss erklärt werden kann, wird wie oben beschrieben behandelt. (STEINACKER ET AL., 2006)

Ein grundlegender Vorteil dieser Methode ist, dass für den Anfangszustand weder ein numerisches Modell noch ein first guess Feld oder klimatologische Information von Nöten ist, und man kein Vorwissen über die Struktur oder Gewichts-

funktionen braucht. So bleibt die Methode unabhängig und kann zur objektiven Validierung numerischer Prognosefelder verwendet werden. (STEINACKER ET AL., 2006)

Detailliertere Ausführungen und Erläuterungen über die Vienna Enhanced Resolution Analysis, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden soll, findet man in STEINACKER ET AL. (2000), HÄBERLI ET AL. (2004) und STEINACKER ET AL. (2006). Beispiele und eine Beschreibung der graphischen Aufbereitung dieses Analyseverfahrens findet man über die Homepage des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien oder direkt unter <http://www.univie.ac.at/amk/vera>.

3.2 VERACLIM

Das Vienna Enhanced Resolution Analysis Climatology (VERACLIM) Projekt war Teil des Mesoscale Alpine Programme (MAP) und lief am European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) im Rahmen eines „Special Project“. Im Verlauf des VERACLIM Projekts wurde der Einfluss von komplexen topographischen Strukturen auf die räumliche Verteilung von meteorologischen Größen im Alpenraum untersucht und klimatologisch ausgewertet, mit dem Ziel einen Satz von zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Analysen (im Bereich der Meso- β Skala, was Phänomenen mit einer räumlichen Ausdehnung von 20-200 km entspricht) ausgewählter Parameter (Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind) zu erstellen. Dazu wurden die hohe räumliche Auflösung, welche das VERA Analyseverfahren ermöglicht und die zeitlich hoch aufgelösten Archiv Daten des ECMWF kombiniert. Der VERACLIM Datensatz umfasst zur Zeit 22 Jahre (1980-2001), die Erweiterung auf eine Klimanormalperiode wird allerdings angestrebt. Während des Projekts wurden sowohl thermisch als auch dynamisch induzierte, mesoskalige Phänomene (wie Kältehochs, Hitzetiefs, mesoskalige Wirbel, lokale Um- und Überströmungseffekte, flow-splitting, Föhn- und Staueffekte) im Detail untersucht und statistisch ausgewertet. (BICA ET AL., 2007a,b)

3.2.1 Domäne und Auflösung

Die Datengrundlage des VERACLIM Datensatzes bilden die dreistündigen Synop Daten des MARS (Meteorological Archival and Retrieval System) und des ERA-

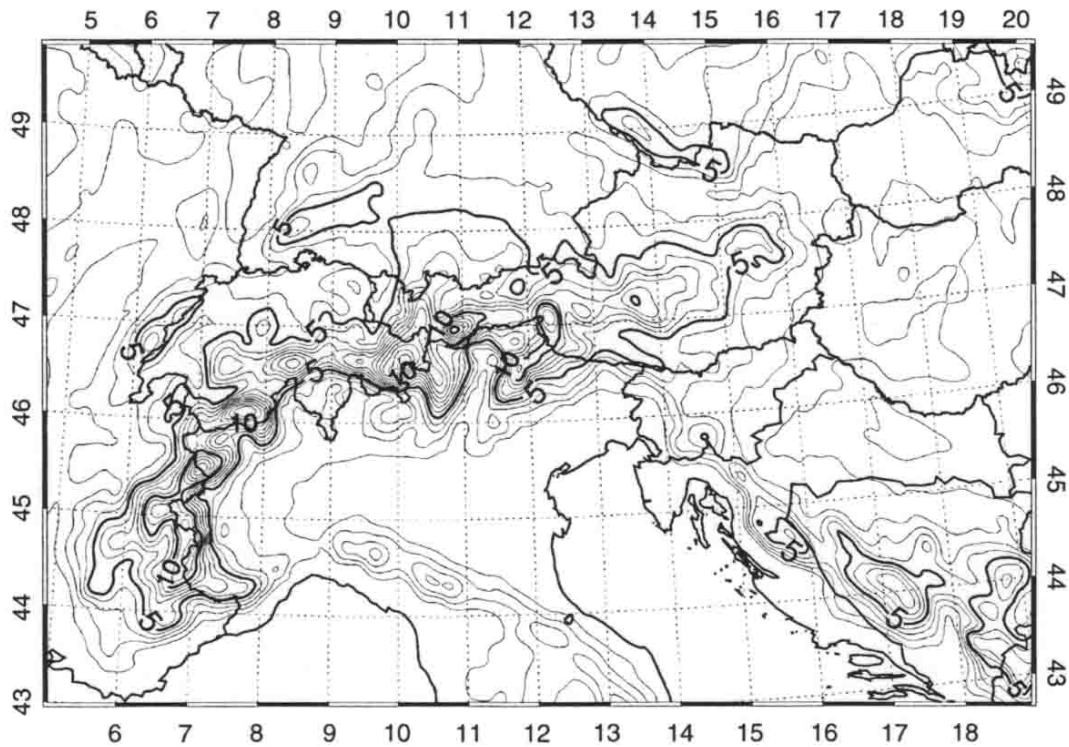


Abbildung 3.1: Minimumtopographie

Minimumtopographie in Hektometer auf einem 20 km Gitter. (BICA ET AL., 2007b)

40 (40 Year Reanalysis) Daten Archivs des ECMWF. Der Datensatz umspannt 22 Jahre, beginnt am 1. Januar 1980 um 00 UTC (Universal Time Coordinated) und endet am 31. Dezember 2001 um 21 UTC. Die synoptischen Daten der ECMWF Archive wurden durch das VERA Analyseverfahren auf ein regelmäßiges Gitter mit 20 km Auflösung interpoliert. Dieses Gitter umspannt 64 Gitterpunkte (1260 km) in zonaler und 43 Gitterpunkte (840 km) in meridionaler Richtung. Es deckt den gesamten Alpenraum ab und reicht von 42.86° bis 49.80° nördlicher Breite, und 5.02° bis 18.91° östlicher Länge. (BICA ET AL., 2007a,b)

3.3 Minimumtopographie

Die Minimumtopographie ist eine idealisierte Topographie, in der Becken und Täler betont und einzelne Gipfel und steile Hänge geglättet dargestellt werden. Sie dient zur Glättung hochaufgelöster Analysefelder (untere Meso- β Skala) meteorologischer Parameter im Rahmen der VERA, welche stark auf den Einfluss

komplexer Orographie reagieren.

Sie wurde als neues Konzept für hochaufgelöste Temperaturanalysen eingeführt, um die Dominanz des vertikalen Gradienten über den horizontalen zu reduzieren und für eine verbesserte horizontale Vergleichbarkeit der analysierten Parameter zu sorgen. Die Minimumtopographie entsteht durch das Ersetzen der geometrischen Höhe eines bestimmten Gitterpunkts, gegeben durch die reale Topographie, durch die geringste vorzufindende Höhe in einem bestimmten Radius um den Gitterpunkt herum. So entsteht eine Topographie der Alpen, deren größte Erhebung nur 1548 m hoch ist (Engadin, Schweiz), obgleich die höchsten Gipfel der Alpen oberhalb von 4500m liegen.

(BICA ET AL., 2007b; SUKLITSCH, 2004)

4 Vorgehensweise

4.1 Berechnung der Feuchtemaße

Die für die Berechnung der verschiedenen Feuchteparameter notwendigen Gleichungen werden in Kapitel 2 erläutert. Sie erfolgt für alle Gitterpunkte sukzessive über die vorhandenen Parameter der VERACLIM Analysen. Es stehen die Höhe der Minimumtopographie z , sowie der reduzierte Luftdruck p_{red} , die potentielle Temperatur Θ und die äquivalentpotentielle Temperatur Θ_e der Jahre 1980 bis 2001 mit einem Gitterpunkt Abstand von 20 km und einer zeitlichen Auflösung von drei Stunden zur Verfügung.

Im ersten Schritt wird unter der Annahme einer polytrop geschichteten Atmosphäre der auf Meeresniveau reduzierte Luftdruck p_{red} auf die Höhe der Minimumtopographie zurück gerechnet. Mittels der barometrischen Höhenformel für die polytrope Atmosphäre (siehe Gleichung (2.7)) und dem Wissen, dass laut Gleichung (2.8) $T = \Theta$, wenn $p = 1000 \text{ hPa}$, lässt sich der Druck auf der Höhe der Minimumtopographie schreiben als

$$p(z) = p_{red} \left(\frac{T_0 - \gamma z}{T_0} \right)^{\frac{g}{R\gamma}} \quad \text{mit} \quad T_0 = \Theta \left(\frac{p_{red}}{1000 \text{ hPa}} \right)^{\frac{R\gamma}{g}} \quad (4.1)$$

mit

$p(z)$... Druck auf Höhe der Minimumtopographie z

T_0 ... Temperatur auf Meeresniveau in Kelvin

γ ... feuchtisentropen Temperaturgradient ($= 6.5 \times 10^{-3} \text{ K/m}$)

g ... Schwerebeschleunigung der Erde ($\approx 9.81 \text{ m/s}^2$)

R ... individuelle Gaskonstante für trockene Luft ($= 287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Dieser Schritt ist nötig, da die bei der Reduktion des Luftdrucks getroffenen Annahmen über die Zusammensetzung und den Zustand der fiktiven Luftmasse zwischen Beobachtungsort und Meeresniveau das Ergebnis der Feuchtebetrachtungen verfälschen würden. Die so bei der Druckreduktion gemachten "Fehler" werden auf diese Weise abgeschwächt bzw. rückgängig gemacht und die alpinen Einflüsse auf die Zustandsgrößen einer Luftmasse wieder betont.

Im zweiten Schritt wird über die potentielle Temperatur Beziehung (siehe Gleichung (2.8)) auf die Temperatur auf Höhe der Minimumtopographie

geschlossen

$$\Theta = T \left(\frac{1000 \text{ hPa}}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad \rightarrow \quad T = \Theta \left(\frac{p}{1000 \text{ hPa}} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (4.2)$$

wobei

T ... Temperatur auf Höhe der Minimumtopographie

c_p ... spezifische Wärme bei konstantem Druck ($= 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Über die Temperatur auf der Höhe der Minimumtopographie und die äquivalentpotentielle Temperatur (siehe Gleichung (2.10)) ist es nun, unter der Annahme der Äquivalenz von spezifischer Feuchte und Mischungsverhältnis (siehe Gleichung (2.13)), möglich auf das Mischungsverhältnis m zurück zu schließen

$$\Theta_e = \Theta \exp \left(\frac{Lm}{c_p T} \right) \quad \rightarrow \quad m = \frac{c_p T}{L} \ln \left(\frac{\Theta_e}{\Theta} \right) \quad (4.3)$$

und in weiterer Folge auf den Dampfdruck e (vgl. Gleichung (2.15))

$$m = 0.622 \frac{e}{p - e} \quad \rightarrow \quad e = \left(\frac{0.622}{p m} + \frac{1}{p} \right)^{-1} \quad (4.4)$$

wobei

L ... Phasenumwandlungswärme ($\approx 2.5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$).

Schließlich lässt sich über die Clausius-Clapeyronsche Gleichung noch der Sättigungsdampfdruck e_s , und in weiterer Folge die relative Feuchte berechnen (vgl. Gleichung (2.16)). Die Gleichung beschreibt die temperaturabhängige Änderung des Sättigungsdampfdruckes und lautet nach REUTER ET AL. (2001) für den speziellen Fall der Phasenübergänge von Wasser und Dampf

$$\frac{de_s}{e_s} = \frac{L}{R_W} \frac{dT}{T^2}. \quad (4.5)$$

Für ihre integrierte Fassung gilt, unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der Phasenumwandlungswärme L ,

$$e_s(T) = e_s(T_0) \exp \left[\frac{L}{R_W} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.6)$$

wobei

$e_s(T_0)$... Sättigungsdampfdruck bei $T_0 = 273.15\text{ K}$ ($= 6.11\text{ hPa}$)

R_W ... individuelle Gaskonstante für reinen Wasserdampf ($= 461.5\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$)
(REUTER ET AL., 2001).

4.2 Problembehandlung

Im Verlauf der Berechnung der Feuchtemaße aus den Parametern der VERA Analysen werden Effekte der univariaten Vorgehensweise des VERA Analyseverfahrens tragend.

In dem für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Datenmaterial treten bisweilen Inkonsistenzen der Form $\Theta > \Theta_e$ auf. Dies kann auf die Methode zur Fehlerkorrektur der Stationsdaten, welche auch ein Überspringen der Analyse verursachen kann (STEINACKER ET AL., 2000), zurückgeführt werden. Am häufigsten tritt diese Inkonsistenz in alpinen Bereichen zu Analyseterminen mit sehr niedriger Temperatur und geringem Feuchtegehalt, also Zeitpunkten mit geringer Differenz zwischen potentieller und äquivalentpotentieller Temperatur, auf.

Dieser Umstand macht es nötig eine Nebenbedingung einzuführen, nach der nur mehr Analysetermine betrachtet werden die $\Theta_e - \Theta \geq 0.5\text{ K}$ erfüllen. Dies wirkt sich unter anderem auf die Auswahl der Gitterpunkte aus, da darauf geachtet wird repräsentative Gitterpunkte zu wählen bei denen das Ausschlusskriterium $\Theta_e - \Theta < 0.5\text{ K}$ so selten wie möglich zutrifft. Analysetermine die diese Ausschlussbedingung erfüllen, werden von der Mittelbildung ausgeschlossen. An den untersuchten Gitterpunkten kommt das Ausschlusskriterium pro Analysetermin und Jahr maximal einmal zum Tragen. Die von der Trendanalyse ausgenommenen Termine sind im jeweiligen Abbildungstext (siehe Kapitel 5) angeführt. Durch die Wahl des Median als Mittelwert hat der Ausschluss einzelner Werte einen vernachlässigbaren Einfluss auf die statistische Auswertung (siehe Abschnitt 4.4).

Die univariate Herangehensweise des VERA Analyseverfahrens bei der Fehlerkorrektur spiegelt sich auch in den Absolutwerten der errechneten Feuchtemaße wider.

Eine durch die Fehlerkorrektur bedingte Änderung des Verhältnisses zwischen potentieller und äquivalentpotentieller Temperatur wirkt sich besonders bei tiefen

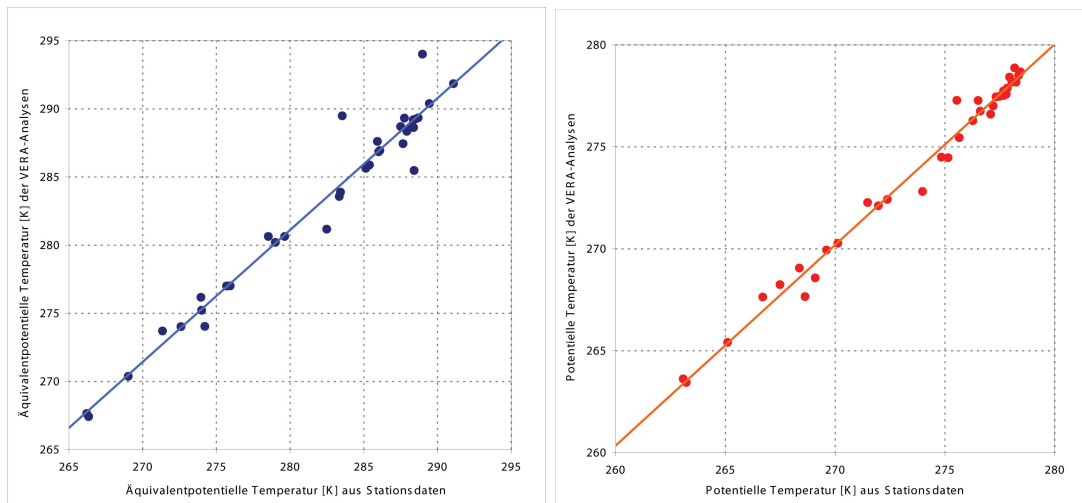


Abbildung 4.1: Streudiagramm Stationsdaten vs. VERA

Äquivalentpotentielle (links) und potentielle Temperatur (rechts) in Innsbruck zum 06 UTC Termin der Wintersaison 1992/93. Aufgetragen ist jeweils die aus den vorhandenen Stationsdaten des Flughafen Innsbruck errechnete äquivalentpotentielle/potentielle Temperatur [K] (Abszisse) und die äquivalentpotentielle/potentielle Temperatur [K] der VERA Analysen des assoziierten VERA-Gitterpunktes (Ordinate).

Temperaturen äußerst stark, vor allem auf den Wert der relativen Feuchte, aus. Am augenscheinlichsten wird dieser Effekt an den Gitterpunkten Innsbruck und Klagenfurt, an denen in den kälteren Jahreszeiten zum Frühtermin der Median der relativen Feuchte teils Werte größer 100% annimmt (siehe Kapitel 5). Das heißt, dass vor allem zu Terminen mit niedrigen Temperaturen eine auf diese Weise (siehe Abschnitt 4.1) aus den VERACLIM Daten gewonnene relative Feuchte nicht für bare Münze genommen werden darf. Dieser Effekt beeinflusst mitunter zwar das Ausmaß der Schwankungen der Amplitude, die Auswirkung auf die langjährigen Trends der Feuchte ist aber vernachlässigbar.

Der Vergleich von VERA Analysewerten mit den aus Stationsdaten berechneten Werten für den Gitterpunkt Innsbruck zum 06 UTC Termin der Wintersaison 1992/93 zeigt deutlich, dass die Ursache für die hohen relativen Feuchten in den bias-korrigierten Werten der VERA Analysen zu finden ist (vgl. Abb. 4.1).

4.3 Auswahl der Gitterpunkte

In diesem Abschnitt sollen die gewählten Gitterpunkte im Hinblick auf ihre klimatologischen Verhältnisse und jeweilige geographische Lage näher beschrieben

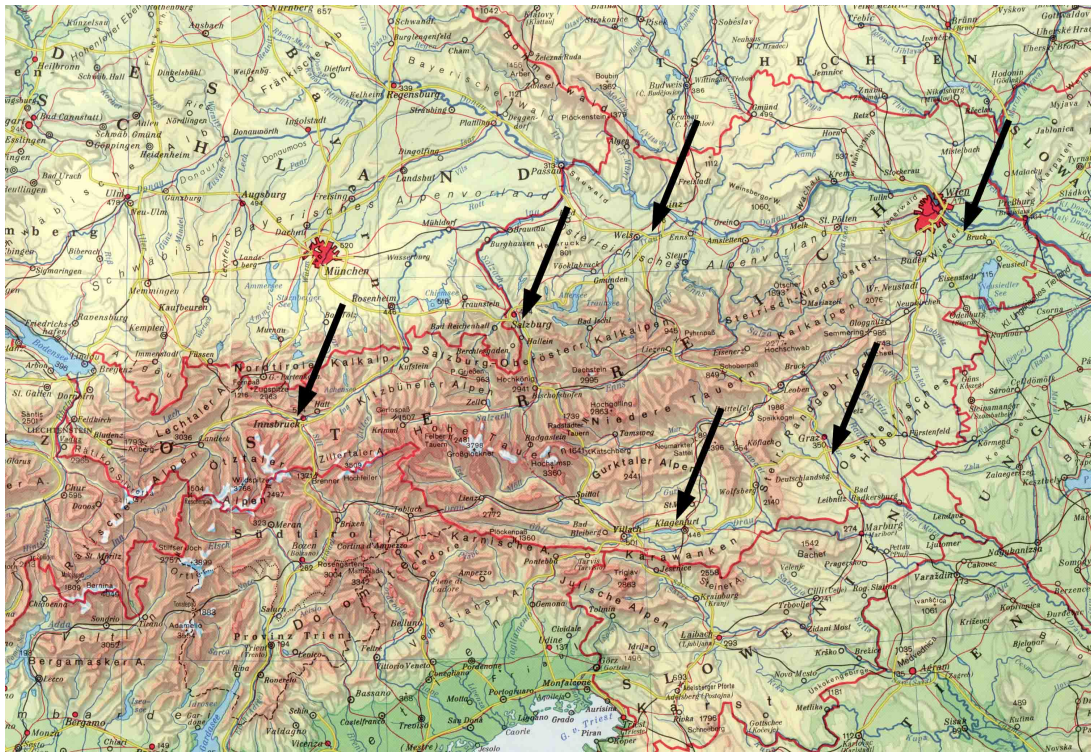


Abbildung 4.2: Kartenausschnitt Ostalpenraum

Die Positionen der untersuchten Gitterpunkte ist durch schwarze Pfeile markiert. (HÖLZEL, 1995)

werden.

Die verwendeten Gitterpunkte werden zum einen aufgrund ihrer klimatologischen Gegebenheiten (vgl. Abschnitt 4.3.1), und zum anderen wegen der Verlässlichkeit der den VERA Analysefeldern zu Grunde liegenden Stationsdaten ausgewählt. Sie stehen stellvertretend für die zivilen Flughäfen in Österreich und würden nicht zuletzt auch einen direkten Vergleich mit Stationsdaten-Zeitreihen ermöglichen, die an diesen Orten eine hohe Datenvollständigkeit aufweisen.

Es wird jeweils der der assoziierten WMO-Station nächstgelegene Gitterpunkt gewählt. Durch den Gitterpunktabstand von 20 km ergeben sich an manchen Punkten etwas größere Distanzen. Die Gitterpunkte Salzburg, Wien-Schwechat und Graz liegen weiter südöstlich, der Gitterpunkt Klagenfurt etwas nordwestlich des Flughafens.

Die verwendeten Gitterpunkte werden verschieden stark und auf unterschiedliche Weise von den Alpen beeinflusst und deren Analyse macht es möglich kleinräumige Unterschiede in den Trends der Feuchteparameter zu erkennen. In

Tabelle 4.1: Eckdaten der ausgewählten Gitterpunkte

Assoziierte Station	ICAO-Code	geographische Breite	geographische Länge	Minimum-topographie
Flughafen Innsbruck	LOWI	47.29 °N	11.36 °E	555 m
Flughafen Salzburg	LOWS	47.75 °N	13.12 °E	409 m
Flughafen Linz-Hörsching	LOWL	48.21 °N	14.17 °E	255 m
Flughafen Wien-Schwechat	LOWW	48.05 °N	16.68 °E	132 m
Flughafen Graz	LOWG	46.95 °N	15.51 °E	269 m
Flughafen Klagenfurt	LOWK	46.69 °N	14.25 °E	425 m

Tabelle 4.1 sind die Eckdaten der Gitterpunkte zusammengefasst.

In der Luftfahrt wird zur Identifizierung eines Flugplatzes der ICAO-Code verwendet. Dieser wird von der International Civil Aviation Organization (ICAO) vergeben. Vor allem in den Kapiteln 5 und 6 wird dieser Code immer wieder verwendet, wobei der letzte Buchstabe in der vorliegenden Arbeit immer gleich dem Anfangsbuchstaben des jeweiligen Ortes ist (LOWI steht beispielsweise für den Flughafen Innsbruck).

4.3.1 Klimatologische Beschreibung

Der Flughafen Innsbruck ist durch seine Lage im von Südwest nach Nordost verlaufenden Inntal repräsentativ für das inner- und nordalpine Klima. Durch die topographische Lage kann es dort sowohl zu Nord- als auch zu Südföhn kommen. Im Norden verläuft das Karwendelgebirge, das den Standort vor atlantischen Einflüssen und damit den intensivsten Stauniederschlägen schützt. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge beträgt in Innsbruck 864 mm, wobei der meiste Niederschlag im Sommer fällt, die mittlere Jahrestemperatur beträgt 9.4°C (vgl. Abb. 4.3). Die Klimaklassifikation nach Köppen beschreibt das vorherrschende Klima als feuchtgemäßig, wobei die mittleren Temperaturen des wärmsten Monats 22°C nicht überschreiten (REUTER ET AL., 2001).

Der Flughafen Salzburg liegt am Nordrand der Alpen, nördlich von Salzburg schließt das Alpenvorland an. Der Standort ist geprägt vom maritimen Einfluss mit größeren Niederschlagsmengen vorwiegend durch Staueffekte. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 1169 mm, wobei der größte Teil in den Sommermo-

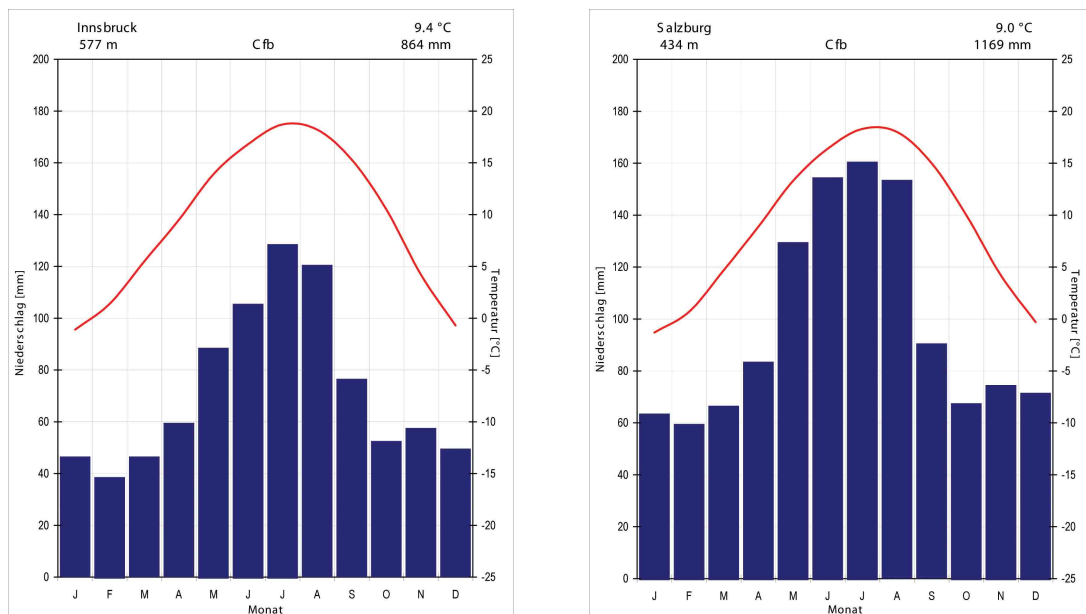


Abbildung 4.3: Klimadiagramme Innsbruck und Salzburg

Verlauf der Monatsmitteltemperatur in °C (rote Linie, rechte Ordinate) und des mittleren Niederschlags in mm (blaue Balken, linke Ordinate), auf der Abszisse sind die Monate aufgetragen. Oben links befindet sich der Name der Station und ihre Seehöhe, oben rechts das Jahresmittel der Temperatur und des Niederschlags, dazwischen ist die Klimaklassifikation nach W. Köppen angegeben. (Datenquelle: <http://www.klimadiagramme.de>)

naten fällt (vgl. Abb. 4.3). Föhn stellt sich dort bei einer Anströmung der Alpen aus südlichen Richtungen ein. Das Jahresmittel der Temperatur beträgt 9°C. Wie Innsbruck beschreibt die Klimaklassifikation nach Köppen Salzburg als feuchtgemäßig, die mittleren Temperaturen des wärmsten Monats liegen unter 22°C (REUTER ET AL., 2001).

Der Flughafen Linz-Hörsching liegt südwestlich der Stadt im Linzer Becken, das im Norden durch die Böhmisches Masse begrenzt wird. Der Standort ist sowohl von maritimen als auch von kontinentalen Einflüssen geprägt. Bei Nordwestwetterlagen kommt es dort im Schnitt zu höheren Windgeschwindigkeiten. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge beträgt in Hörsching 742 mm, wobei der meiste Niederschlag in den Sommermonaten fällt. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 8.8°C (vgl. Abb. 4.4). Die Klimaklassifikation nach Köppen beschreibt Hörsching als feuchtgemäßig, die mittlere Temperatur des wärmsten Monats liegt nicht über 22°C (REUTER ET AL., 2001).

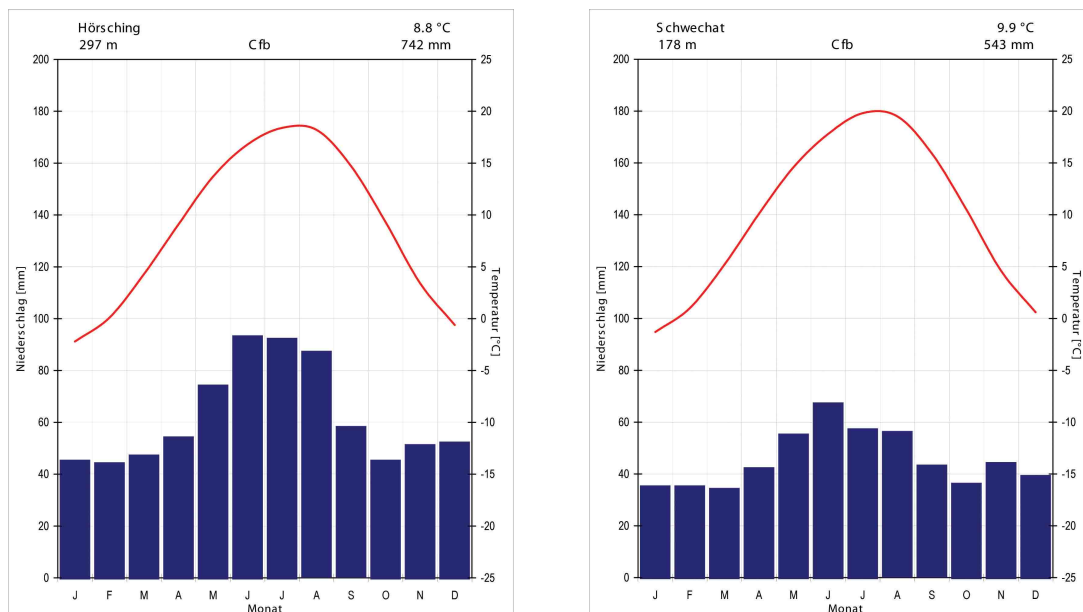


Abbildung 4.4: Klimadiagramme Hörsching und Schwechat
Nähere Beschreibung vgl. Abb. 4.3. (Datenquelle: <http://www.klimadiagramme.de>)

Der Flughafen Wien-Schwechat liegt am Alpenostrand im Wiener Becken, südöstlich von Wien. Der Standort unterliegt sowohl atlantischen Einflüssen als auch den kontinentaleren des pannonischen Klimas. Durch die Beckenlage sind die kälteren Monate teils von langlebigen Inversionslagen mit Hochnebel geprägt. Durch topographische Gegebenheiten werden Winde aus nordwestlichen Richtungen oft kanalisiert, was im Mittel höhere Windgeschwindigkeiten im Wiener Becken zur Folge hat. Die Niederschlagssummen sind hier vergleichsweise gering, obwohl beim Auftreten von Vb-Wetterlagen immer wieder große Niederschlagsmengen möglich sind. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt in Schwechat 543 mm, die Jahresmitteltemperatur 9.9°C (vgl. Abb. 4.4). Die größten Niederschlagsmengen fallen in den Sommermonaten. Auch Wien-Schwechat weist nach Köppen ein ganzjährig feuchtes, warmgemäßigtes Regenklima mit Monatsmitteltemperaturen unter 22°C auf (REUTER ET AL., 2001).

Der Flughafen Graz liegt am südöstlichen Alpenrand im Grazer Becken in der illyrischen Klimazone. Der Standort ist durch seine Lage weitgehend vor atlantischen Einflüssen geschützt, der Hauptteil des Niederschlags kommt wie in Klagenfurt aus mediterranen Regionen. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge beträgt 838 mm, wobei der meiste Niederschlag im Sommer fällt. Die mittlere

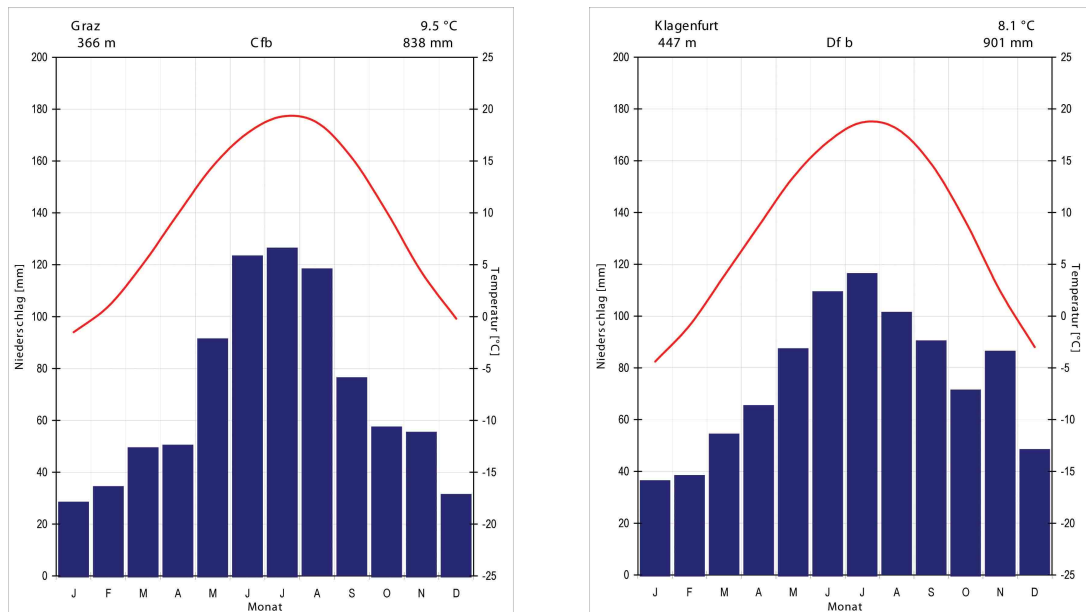


Abbildung 4.5: Klimadiagramme Graz und Klagenfurt

Nähere Beschreibung vgl. Abb. 4.3. (Datenquelle: <http://www.klimadiagramme.de>)

Jahrestemperatur beträgt 9.5°C (vgl. Abb. 4.5). Durch die Lage im Grazer Becken ist auch der Flughafen Graz in den kälteren Jahreszeiten anfällig für beständigen Hochnebel. Die Klimaklassifikation nach Köppen beschreibt Graz als feuchtgemäßig, die mittlere Temperatur des wärmsten Monats liegt unter 22°C (REUTER ET AL., 2001).

Der Flughafen Klagenfurt liegt nordwestlich der Stadt im Klagenfurter Becken und ist repräsentativ für das Klima im Süden Österreichs, das vermehrt auch alpinen Einflüssen ausgesetzt ist. Wie im Wiener Becken können auch hier beständige Inversionslagen in den kälteren Jahreszeiten für andauernden Hochnebel sorgen. Das gemäßigte Kontinentalklima zeigt in Klagenfurt auch mediterrane Charakteristika. Oberitalien-Tiefs und Staueffekte bei Südanströmung sind für einen Großteil der Niederschläge verantwortlich. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 901 mm, die Jahresmitteltemperatur 8.1°C (vgl. Abb. 4.5). Die Klimaklassifikation nach Köppen schreibt Klagenfurt ein feuchtwinterkaltes Klima zu, wobei die mittleren Temperaturen des wärmsten Monats 22°C nicht überschreiten (REUTER ET AL., 2001).

4.4 Statistische Aufbereitung

Die in diesem Abschnitt beschriebenen, statistischen Methoden stammen aus SCHÖNWIESE (2006) und fassen die zur Aufbereitung der Daten verwendeten Methoden zusammen.

4.4.1 Median

Zur Auswertung großer Datenmengen ist es sinnvoll einen Mittelwert zu bilden. Bei streng symmetrisch verteilten Daten fallen das arithmetische Mittel, der Median und der Modus auf den selben Wert, bei einer schiefen (asymmetrischen) Häufigkeitsverteilung der Daten driften diese auseinander. Die Differenz der Mittelungsmaße ist abhängig von der Schiefe der Verteilung. Das arithmetische Mittel wird stark durch die Größe von Ausreißern beeinflusst. Der Median ist im Vergleich zum arithmetischen Mittel unempfindlich gegenüber Ausreißern und eignet sich gut zur Analyse meteorologischer Daten, da er Zeitreihen glättet indem er Schwankungen reduziert.

Der Median teilt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion in zwei Hälften, sodass 50% der Werte oberhalb bzw. unterhalb des Medians liegen. Zur Berechnung des Medians werden die Daten zunächst in eine Rangfolge gebracht, indem sie in der Form nach Größe sortiert werden, dass a_1 dem kleinsten Wert und a_n dem größten Wert entspricht. Für einen ungeraden Stichprobenumfang n gilt exakt

$$Med = a_{\frac{(n+1)}{2}}, \quad (4.7)$$

bei geradem Stichprobenumfang wird der Median geschätzt, und es gilt

$$Med = \frac{1}{2} (a_{\frac{n}{2}} + a_{\frac{n}{2}+1}). \quad (4.8)$$

(SCHÖNWIESE, 2006)

4.4.2 Korrelation und Regression

Zur Aufdeckung und Analyse von Zusammenhängen innerhalb eines Datensatzes bzw. einer Zeitreihe, bedient man sich der Korrelations- und Regressionsrechnung. Damit ist es möglich etwaige Trends zu finden, gefundene Zusammenhänge

mathematisch zu beschreiben und sie auf ihre Plausibilität zu prüfen. Die Korrelationsrechnung geht der Frage nach der Güte des Zusammenhangs nach, die Regressionsrechnung dient dazu den funktionalen Zusammenhang zu ermitteln.

Die Regressionsgleichung ergibt sich aus der Bedingung, dass die quadratischen Abweichungen der Datenpunkte von den Funktionswerten minimal sind. Daraus ergibt sich eine Vielzahl an möglichen mathematischen Zusammenhängen, in dieser Arbeit wird aber stets ein linearer Zusammenhang angenommen, wodurch sich die Beziehungsgleichung als eine Gerade darstellen lässt. Unter diesen Voraussetzungen kann als Maßzahl für die Güte eines gefundenen Zusammenhangs der lineare Korrelationskoeffizient

$$r_{ab} = \frac{\sum a'_i b'_i}{\sqrt{\sum a_i'^2 \sum b_i'^2}}, \quad \text{mit } a'_i = a_i - \bar{a} \text{ und } b'_i = b_i - \bar{b} \quad (4.9)$$

berechnet werden. Dieser Koeffizient liegt zwischen „-1“ und „+1“, wobei $r = 0$ kein Zusammenhang und $|r| = 1$ streng linearer Zusammenhang bedeutet und das Vorzeichen des Koeffizienten das Vorzeichen der Steigung der Geraden angibt. Zur Interpretation ist es oft sinnvoll statt des Korrelationskoeffizienten r seinen quadratischen Wert, das Bestimmtheitsmaß, zu betrachten. Es stellt die durch den gefundenen Zusammenhang relative erklärte Varianz dar und wird meist in Prozent angegeben

$$B = r^2 = \frac{\text{erklärte Varianz}}{\text{Gesamtvarianz}} \quad (4.10)$$

$$B = r^2 \quad \text{bzw.} \quad B = r^2 \cdot 100\%. \quad (4.11)$$

Die Korrelationsanalyse birgt großen Raum für Fehlinterpretationen und sollte nur unter bestimmten Voraussetzungen angewendet werden. Die zu untersuchenden Daten sollen sowohl normalverteilt, als auch unabhängig voneinander sein. Vor allem die Datenunabhängigkeit stellt im Rahmen von Zeitreihenbetrachtungen ein Problem dar, das durch das Ersetzen der Ausgangsdaten durch geeignete Mittelwerte entschärft werden kann. Bei einer signifikanten Abweichung der Stichprobe von der Normalverteilung kann auf andere Methoden wie die verteilungsfreie Korrelationsrechnung oder die Fisher-Transformation zurückgegriffen werden.

(SCHÖNWIESE, 2006)

4.4.3 Mutungsbereich

Nachdem der über Gleichung (4.9) berechnete Korrelationskoeffizient nur für die betrachtete Stichprobe repräsentativ ist, ist es von Interesse den Bereich abzuschätzen in dem der Korrelationskoeffizient der zugehörigen Grundgesamtheit vermutet werden kann. Dazu bedient man sich der Schätzformel für den Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten. Unter der Voraussetzung der Datenu-nabhängigkeit und Normalverteilung gilt für den Grundgesamtheit-Korrelationskoeffizienten

$$\rho_{ab} = r_{ab} \pm z_{\alpha} \frac{1 - r_{ab}^2}{\sqrt{n - 1}}, \quad (4.12)$$

wobei z_{α} der Parameter der standardisierten Normalverteilung bei einer gegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit α ist.

(SCHÖNWIESE, 2006)

Die in Kapitel 5 angegebenen Mutungsbereiche sind auf einem Signifikanzniveau von 95% bzw. mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% errechnet.

4.4.4 Signifikanztest

Ein Signifikanztest ist ein statistisches Prüfverfahren mit dessen Hilfe untersucht wird, ob ein gefundener Zusammenhang zufällig oder überzufällig (signifikant) ist. Dazu wird einer Nullhypothese H_0 eine Alternativhypothese A_1 gegenübergestellt, wobei die Nullhypothese besagt, dass ein Merkmal zufällig ist, die Alternativhypothese behauptet das Gegenteil.

Nach dem Finden eines geeigneten, zur jeweiligen Fragestellung passenden, Prüfverfahrens wird im ersten Schritt die Prüfgröße $\hat{P}$ berechnet. Da diese einer bestimmten theoretischen Verteilung folgt, wird im zweiten Schritt die Prüfgröße mit den Argumenten $P_{\Phi, \alpha}$ dieser Verteilung verglichen, um schließlich eine Aussage über das Signifikanzniveau des gefundenen Zusammenhangs treffen zu können. Die Argumente sind abhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade Φ , welche vom Prüfverfahren und vom Stichprobenumfang n abhängt, und der frei wählbaren Irrtumswahrscheinlichkeit α bzw. Signifikanz Si , wobei $\alpha = 1 - Si$. Für die Irrtumswahrscheinlichkeit α sollten keine Werte größer als 10% bzw. 0.1 gewählt werden, da die daraus folgenden Testentscheide nicht mehr als signifikant be-

zeichnet werden können. Der Testentscheid hat folgende Form:

$$\hat{P} \begin{cases} < P_{\Phi, \alpha} & \rightarrow \text{ negativer Testentscheid, } H_0 \text{ annehmen} \\ > P_{\Phi, \alpha} & \rightarrow \text{ positiver Testentscheid, } A_1 \text{ annehmen} \end{cases} \quad (4.13)$$

Grundsätzlich sind mit statistischen Tests nur Aussagen darüber möglich, ob eine Annahme wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich ist, daher ist auch ein positiver Prüfentscheid kein Beweis für eine Hypothese sonder nur eine Mutmaßung.

Die Signifikanz der Korrelationsanalyse wird in der vorliegenden Arbeit mit einem t-Test geprüft, wobei der Nullhypothese $H_0 = \{\text{keine signifikante Korrelation}\}$ die Alternativhypothese $A_1 = \{\text{signifikante Korrelation}\}$ gegenübersteht. Die Prüfgröße ergibt sich aus

$$\hat{P} = \hat{t} = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad \text{mit} \quad \Phi = n - 2. \quad (4.14)$$

Die Werte der Student-Verteilung sind eine Funktion von Φ und α bzw. Si und können in Tabelle 4.2 nachgeschlagen werden.

(SCHÖNWIESE, 2006)

Tabelle 4.2: Quantile der Student-Verteilung (tV)

Werte der Student-Verteilung als Funktion von Si bzw. α und Φ . Bei einem zweiseitigem Test muss $\frac{\alpha}{2}$ verwendet werden. (Quelle: SCHÖNWIESE (2006))

Si →		75 %	90 %	95 %	97.5 %	99 %	99.5 %	99.9 %	99.95 %
$\alpha \rightarrow$		0.25	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
Freiheitsgrade Φ	1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.309	636.619
	2	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.598
	3	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.214	12.924
	4	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
	5	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
	6	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
	7	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
	8	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
	9	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
	10	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
	11	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
	12	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
	13	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
	14	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
	15	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
	16	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
	17	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
	18	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
	19	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
	20	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
	21	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
	22	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
	23	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.767
	24	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
	25	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
	26	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
	27	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
	28	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
	29	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
	30	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
	35	0.682	1.306	1.690	2.030	2.438	2.724	3.340	3.591
	40	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
	45	0.680	1.301	1.679	2.014	2.412	2.690	3.281	3.520
	50	0.679	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.261	3.496
	60	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
	70	0.678	1.294	1.667	1.994	2.381	2.648	3.211	3.435
	80	0.678	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
	90	0.677	1.291	1.662	1.987	2.368	2.632	3.183	3.402
	100	0.677	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
	150	0.676	1.287	1.655	1.976	2.351	2.609	3.145	3.357
	200	0.676	1.286	1.653	1.972	2.345	2.601	3.131	3.340
	300	0.675	1.284	1.650	1.968	2.339	2.592	3.118	3.323
	500	0.675	1.283	1.648	1.965	2.334	2.586	3.107	3.310
	1000	0.675	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
	∞	0.675	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.290

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Korrelations- und Regressionsanalyse präsentiert. Die angewendeten statistischen Methoden ermöglichen Aussagen über etwaige Trends und deren statistische Signifikanz. Es sei an dieser Stelle noch einmal betont, dass die Absolutwerte der in diesem Kapitel gezeigten Feuchtemaße, speziell die der relativen Feuchte zu den kälteren Terminen, nur Näherungswerte sind und dass diese nicht für eine weitere Verarbeitung, bei der der Betrag dieser Parameter von Bedeutung ist, geeignet sind (für Erläuterungen siehe Abschnitt 4.2).

Aus einer großen Anzahl an Feuchtemaßen, die für alle 64x43 Gitterpunkte und 64288 Termine berechnet wurden, und der daraus resultierenden, riesigen Datenmenge werden im Rahmen der statistischen Untersuchung das Mischungsverhältnis und die relative Feuchte an den unter Abschnitt 4.3 beschriebenen Gitterpunkten näher betrachtet. Diese beiden Feuchtemaße erlauben sowohl die Auswertung der Zu- oder Abnahme des Feuchtegehalts, also die der Zu- oder Abnahme des Wasserdampfanteils einer betrachteten Luftmasse, als auch die der Änderung des temperaturabhängigen, relativen Feuchtegehalts der Luft (siehe Abschnitt 2.4).

In den folgenden Abbildungen ist jeweils der Median dargestellt. Falls Analysetermine bei der Berechnung der Mediane ausgeschlossen wurden (siehe Abschnitt 4.2), ist dies im jeweiligen Abbildungstext festgehalten. Der Ausschluss von Analyseterminen kommt an den untersuchten Gitterpunkten nur im Winter und Frühling, maximal einmal pro Saison vor. Durch die Wahl des Median als Mittelwert hat der Ausschluss einzelner Werte einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Auswertung (siehe Abschnitt 4.4).

Die Feuchteparameter werden saisonal und tageszeitlich getrennt betrachtet. Die Unterteilung erfolgt nach meteorologischen Jahreszeiten (wobei der Median der Wintermonate Dezember, Jänner, Februar immer mit den Dezemberdaten des Vorjahres berechnet wird), das Augenmerk gilt den Tageszeiten mit den im Mittel extremsten Temperaturverhältnissen (06 UTC und 12 UTC). Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten sind die Achsen aller Abbildungen, auf denen der selbe Termin dargestellt ist, gleich skaliert. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass bedingt durch die unterschiedlichen Größenordnungen der betrachteten Parameter

zu den verschiedenen Tages- und Jahreszeiten die Minimum- und Maximumwerte der Ordinaten unterschiedlicher Termine verschieden sein können, die Länge der Ordinaten ist aber in allen Diagrammen gleich.

5.1 Winter

5.1.1 Innsbruck

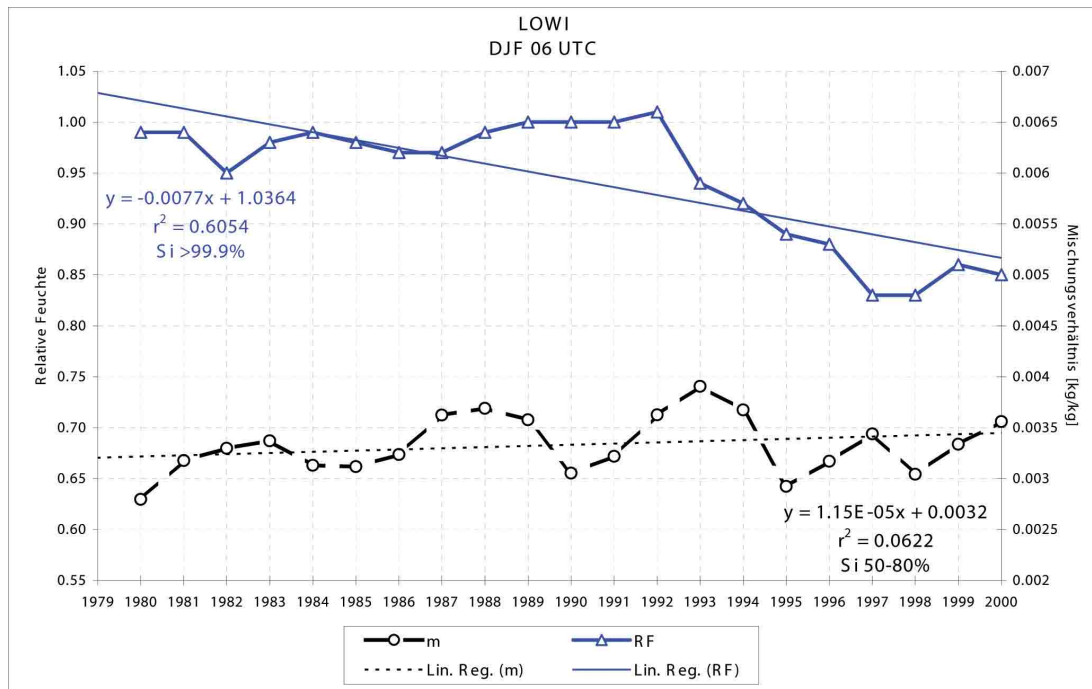


Abbildung 5.1: Flughafen Innsbruck (DJF, 06 UTC)

Verlauf des der Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate), auf der Abszisse ist das Jahr aufgetragen. Zu den Datenreihen sind jeweils die Regressionsgerade, die Geradengleichung, das Bestimmtheitsmaß r^2 und das Signifikanzniveau Si in Prozent geplottet. Die Wintersaison 1979/1980 wird nicht betrachtet, da für diese Saison kein vollständiger Datensatz zur Verfügung steht (siehe Abschnitt 3.2.1).

Der Gitterpunkt Innsbruck weist in den Wintermonaten um 06 UTC einen leicht positiven Trend des Mischungsverhältnisses und einen stark negativen Trend der relativen Feuchte auf (vgl. Abb. 5.1). Während die positive Tendenz des Mischungsverhältnisses, mit einem Anstieg um 0.23 g/kg in 20 Jahren, nicht signifikant ist, lässt die Prüfung der negativen Tendenz der relativen Feuchte, mit einem Signifikanzniveau $Si > 99.9\%$, einen hochsignifikanten Zusammenhang vermuten.

Der 95%-ige Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.78$ ergibt ein Intervall von $[-0.95, -0.61]$ in dem der Korrelationskoeffizient der zugehörigen Grundgesamtheit angenommen werden kann. Mit den durch das Regressionsmodell erklärten Varianzen zwischen 37% und 90% ist ein Absinken der relativen Feuchte statistisch gut abgesichert. Die Regressionsgerade zeigt eine Abnahme der relativen Feuchte um 0.77% pro Jahr, damit sinkt diese vom Winter 1980/81 bis zum Winter 2000/01 um rund 15.4%. Das starke Gefälle der Regressionsgeraden zu diesem Termin ergibt sich aus dem markanten Rückgang der relativen Feuchte ab der Wintersaison 1992/93. Nach Jahren relativ konstantem Niveau, ist ab diesem Zeitpunkt deutlich eine fallende Tendenz zu erkennen.

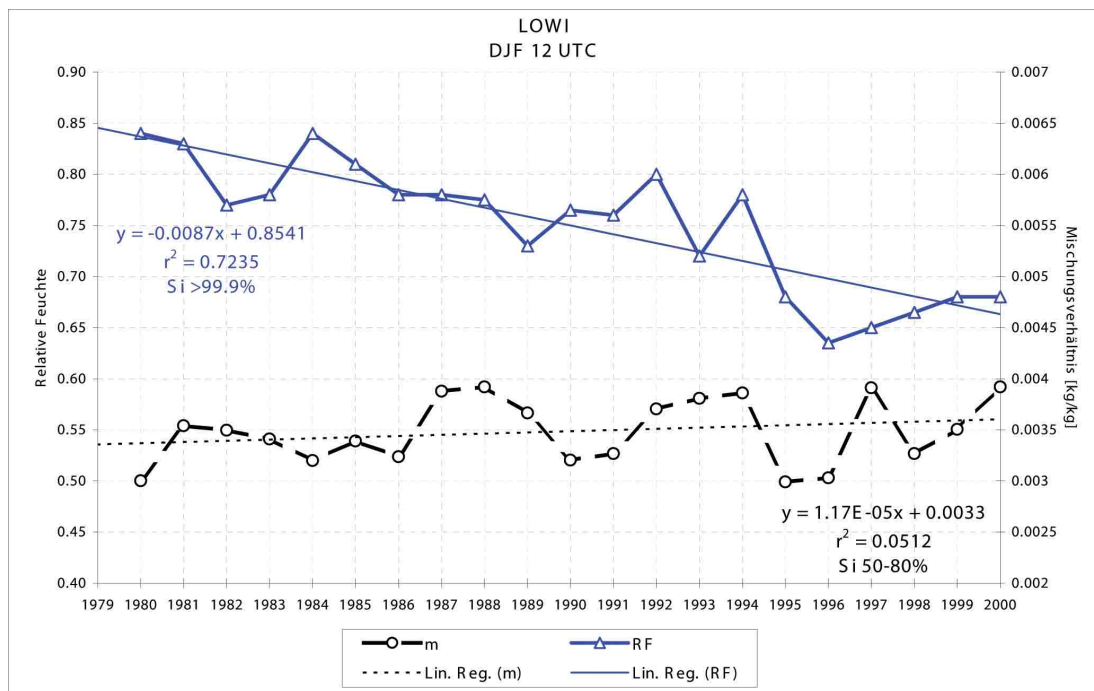


Abbildung 5.2: Flughafen Innsbruck (DJF, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.1.

Auch um 12 UTC (Abb. 5.2) ist am Gitterpunkt Innsbruck, mit einer Zunahme um 0.23 g/kg in 20 Jahren, ein leicht positiver, aber nicht signifikanter Trend des Median des Mischungsverhältnisses zu erkennen. Der deutlich negative Trend

des Median der relativen Feuchte, mit einem jährlichen Rückgang um 0.87%, ist auf einem Niveau von $Si > 99.9\%$ hochsignifikant.

Die Berechnung des Vertrauensbereiches zum Korrelationskoeffizienten $r_{RF} = -0.85$ ergibt ein Intervall von $[-0.97, -0.73]$, die erklärte Varianz der zugehörigen Grundgesamtheit liegt somit zwischen 53% und 94%. Im Gegensatz zum Frühtermin zeigt sich hier ein relativ kontinuierlicher Rückgang der relativen Feuchte seit dem Winter 1980/81, welcher im Verlauf von 20 Jahren rund 17.4% ausmacht. Diese Abnahme am Gitterpunkt Innsbruck stellt das stärkste Absinken der relativen Feuchte unter allen untersuchten Terminen und Gitterpunkten dar.

5.1.2 Salzburg

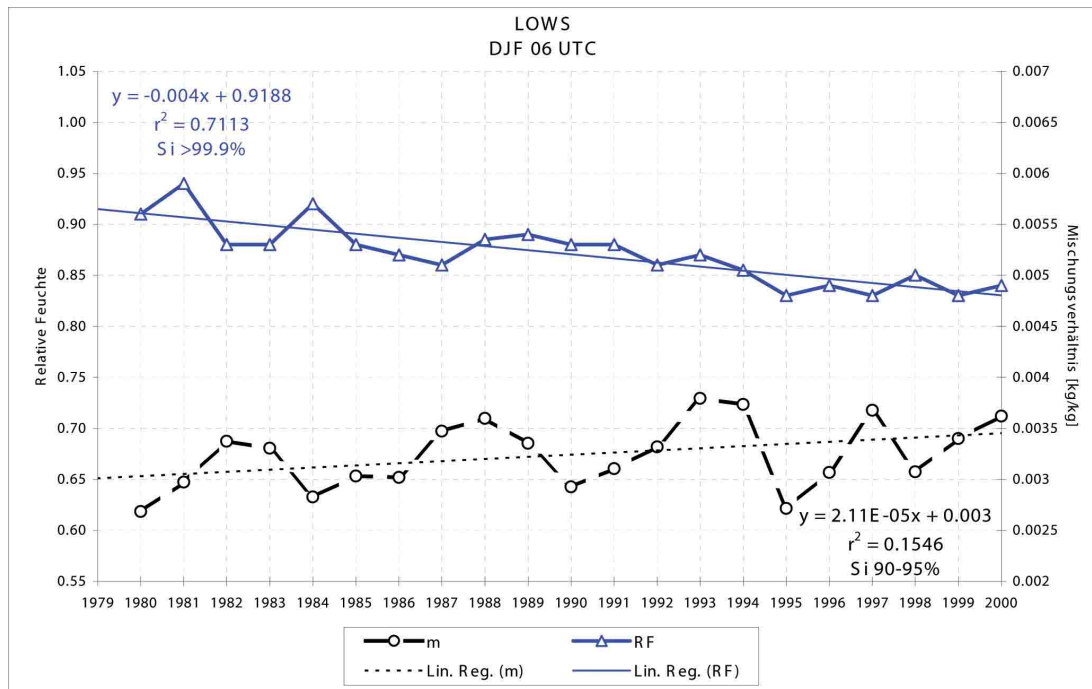


Abbildung 5.3: Flughafen Salzburg (DJF, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.1.

In den Wintersaisons 1980/81, 1984/85 und 1999/2000 wurde jeweils ein Analysetermin ausgeschlossen (9. Jänner 1981, 8. Jänner 1985 und 25. Jänner 2000).

Wie bereits der Gitterpunkt Innsbruck zeigt auch Salzburg zum Frühtermin einen leicht positiven Trend des Mischungsverhältnisses und einen negativen

Trend der relativen Feuchte (vgl. Abb. 5.3). Der Verlauf der relativen Feuchte zu diesem Termin ist in Salzburg aber wesentlich gleichförmiger.

Die steigende Tendenz des Mischungsverhältnisses scheint mit einem Signifikanzniveau von 90 – 95% signifikant, die der relativen Feuchte mit $S_i > 99.9\%$ hochsignifikant. Salzburg ist im Winter zum 06 UTC Termin der einzige unter den untersuchten Gitterpunkten, dessen Tendenz im Mischungsverhältnis signifikant getestet ist.

Der Trend des Mischungsverhältnisses zeigt einen Anstieg um 0.42 g/kg im Verlauf von 20 Jahren. Die Berechnung des Vertrauensbereichs des Korrelationskoeffizienten des Mischungsverhältnisses $r_m = 0.39$ lässt den Grundgesamtheit-Korrelationskoeffizienten in einem Intervall von $[0.02, 0.76]$ vermuten. Durch den nur schwachen Trend und die starken Schwankungen im Verlauf des Mischungsverhältnisses, liegt der Anteil der erklärten Varianz zwischen 0% und 58%, damit ist dieser Anstieg nicht überzuinterpretieren.

Das Konfidenzintervall des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.84$ umspannt einen Wertebereich von $[-0.97, -0.72]$, damit liegt die erklärte Varianz zwischen 51% und 94%, womit der fallende Trend der relativen Feuchte statistisch gut abgesichert ist. Das lineare Modell zeigt ein Absinken der relativen Feuchte um 0.4% pro Jahr, so dass diese im Verlauf von 20 Jahren um 8% abnimmt.

Zum tageszeitlichen Temperaturmaximum weist Salzburg ebenfalls einen schwachen, positiven Trend des Mischungsverhältnisses und einen negativen Trend der relativen Feuchte auf (vgl. Abb. 5.4).

Die steigende Tendenz des Mischungsverhältnisses von rund 0.02 g/kg pro Jahr ist auf einem Signifikanzniveau von 90 – 95% signifikant getestet. Die Berechnung des Konfidenzintervalls zu $r_m = 0.38$ ergibt allerdings wiederum einen sehr weiten Bereich von $[0.01, 0.76]$ in dem der Korrelationskoeffizient der Grundgesamtheit vermutet werden kann. Mit erklärten Varianzen zwischen 0% und 57% ist der schwache Trend, wie schon der zum 06 UTC Termin, nur bedingt aussagekräftig.

Zu diesem Termin ergibt das Regressionsmodell für den Median der relativen Feuchte eine Abnahme um 9.4% in 20 Jahren. Für den Gitterpunkt Salzburg stellt das den stärksten Rückgang der relativen Feuchte unter den betrachteten Terminen dar. Trotz größerer Schwankungen in den 12 UTC Daten ergibt die

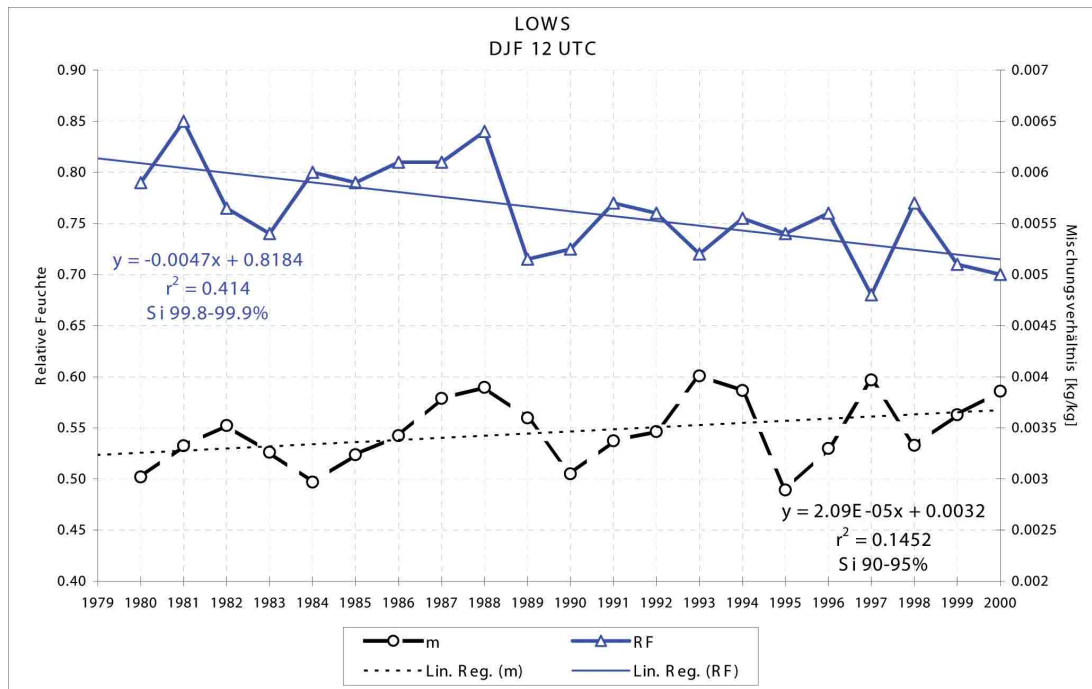


Abbildung 5.4: Flughafen Salzburg (DJF, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.1.

In der Wintersaison 1984/85 wurde ein Analysetermin ausgeschlossen (10. Jänner 1985).

Hypothesenprüfung für diesen Trend einen hochsignifikanten Zusammenhang auf einem Niveau von 99.8–99.9%. Der Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.64$ umspannt einen Bereich von $[-0.9, -0.39]$, die erklärten Varianzen der Grundgesamtheit liegen damit zwischen 15% und 81%.

5.1.3 Linz-Hörsching

Die negative Tendenz der relativen Feuchte am Gitterpunkt Linz-Hörsching im Winter um 06 UTC ist auf einem Signifikanzniveau von 98–99% ebenfalls signifikant. Im Verlauf des Mischungsverhältnisses ist kein signifikanter, linearer Trend erkennbar (vgl. Abb. 5.5). Der schwache Anstieg der Regressionsgeraden, mit einer Zunahme des Feuchtegehalts um rund $0.01 g/kg$ pro Jahr, ist der geringste Anstieg des Mischungsverhältnisses für den Gitterpunkt Linz-Hörsching.

Der 95%-ige Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.52$, ergibt ein Intervall von $[-0.84, -0.21]$ in dem der Korrelationsko-

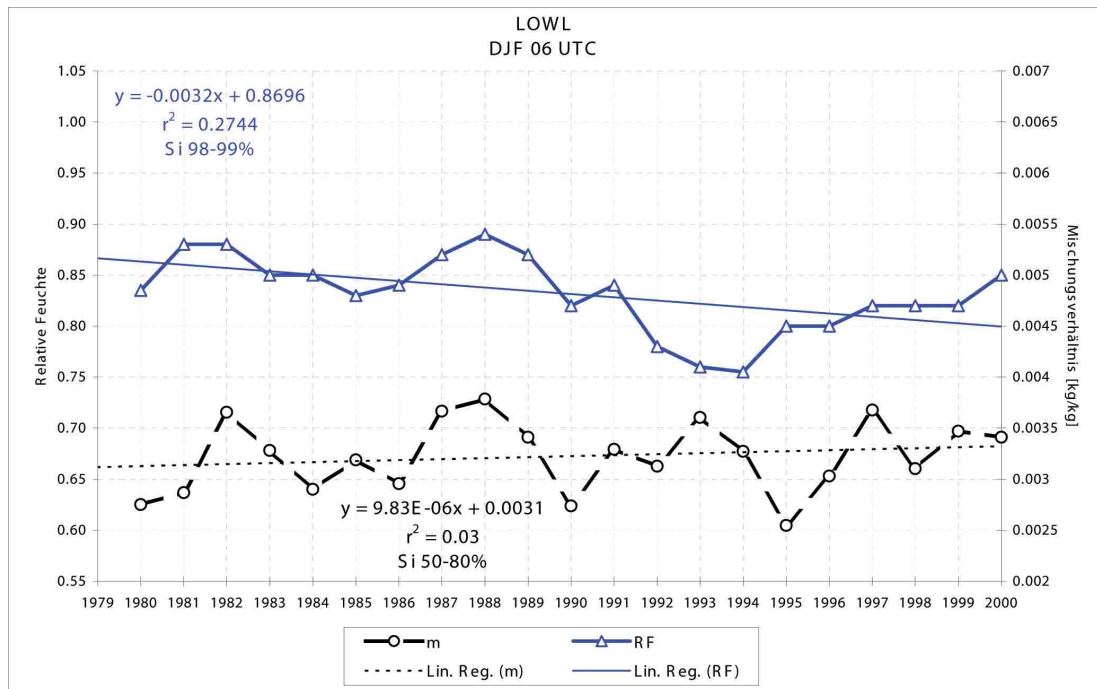


Abbildung 5.5: Flughafen Linz-Hörsching (DJF, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.1.

effizient der Grundgesamtheit angenommen werden kann. Die Regressionsgerade zeigt eine Abnahme der relativen Feuchte um etwa 6.4% in 20 Jahren. Mit der erklärten Varianz zwischen 4% und 71% muss dieses Ergebnis aber mit Vorsicht interpretiert werden.

Der Gitterpunkt Linz-Hörsching zeigt um 12 UTC einen positiven Trend des Mischungsverhältnisses und einen negativen Trend der relativen Feuchte (vgl. Abb. 5.6). Der im Vergleich zu den anderen untersuchten Punkten zu diesem Termin stärkere Anstieg des Mischungsverhältnisses von rund $0.026 g/kg$ pro Jahr ist auf einem Niveau von 95 – 98% sehr signifikant. Aus diesem Anstieg ergibt sich eine Erhöhung des Feuchtegehalts um $0.51 g/kg$ im Verlauf von 20 Jahren. Durch die großen Schwankungen im Verlauf des Mischungsverhältnisses liefert die Berechnung des Konfidenzintervalls für den Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.43$ allerdings einen äußerst weiten Bereich von $[0.08, 0.79]$, damit liegen die durch das Regressionsmodell erklärten Varianzen nur bei 1% bis 62%.

Der leichte Rückgang der relativen Feuchte um 0.23% pro Jahr ist auf ei-

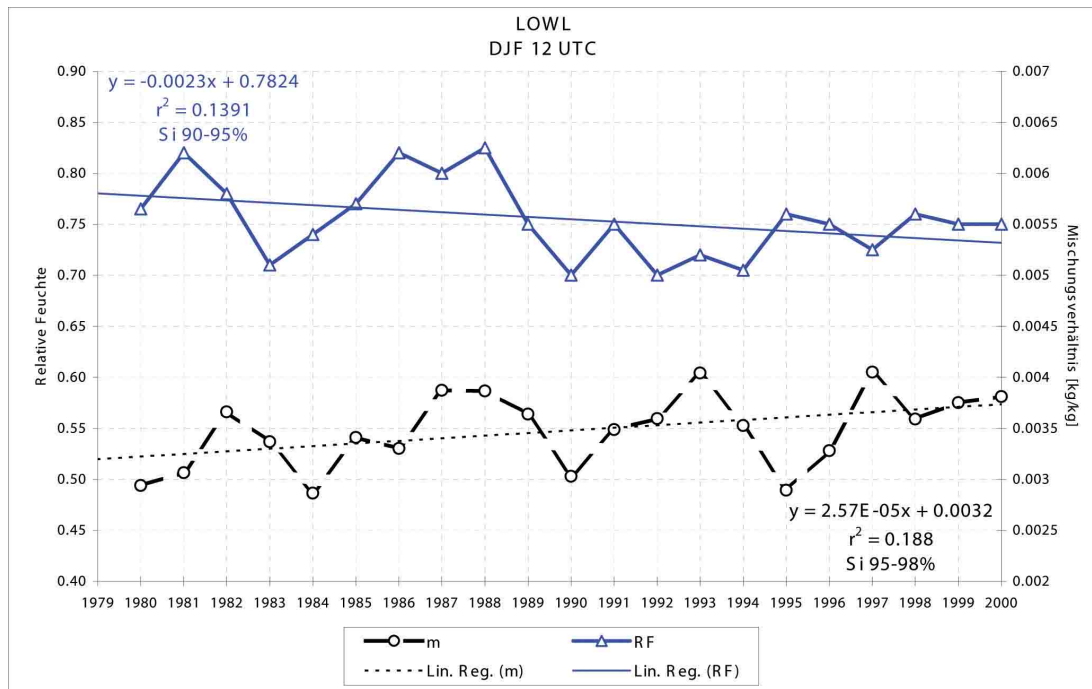


Abbildung 5.6: Flughafen Linz-Hörsching (DJF, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.1.

In den Wintersaisons 1981/82 und 1990/91 wurde jeweils ein Analysetermin ausgeschlossen (6. Februar 1982 und 18. Februar 1991).

nem Signifikanzniveau von 90 – 95% ebenfalls signifikant und stellt die geringste Abnahme der relativen Feuchte für den Gitterpunkt Linz-Hörsching dar. Der Vertrauensbereich zu $r_{RF} = -0.37$ ergibt ein Intervall von $[-0.75, 0]$ in dem der Korrelationskoeffizient der zugehörigen Grundgesamtheit vermutet werden kann. Mit erklärten Varianzen zwischen 0% und 56% ist dieses Ergebnis aber nur bedingt aussagekräftig.

5.1.4 Wien-Schwechat

Am Gitterpunkt Wien-Schwechat weist zu diesem Termin weder der Verlauf des Mischungsverhältnisses, noch der Verlauf der relativen Feuchte einen markanten, linearen Trend auf (vgl. Abb. 5.7). Die relative Feuchte hält über die Jahre ein konstantes Niveau, der schwache Abfall um 0.2% innerhalb von 20 Jahren ist nicht signifikant getestet.

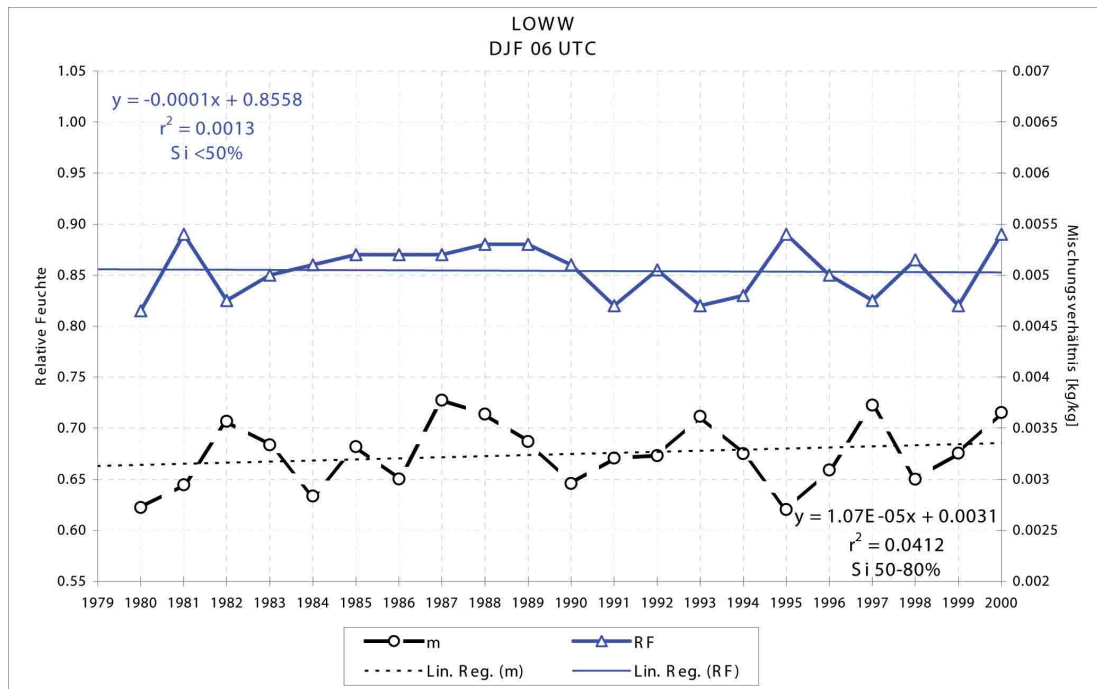


Abbildung 5.7: Flughafen Wien-Schwechat (DJF, 06 UTC)
Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.1.

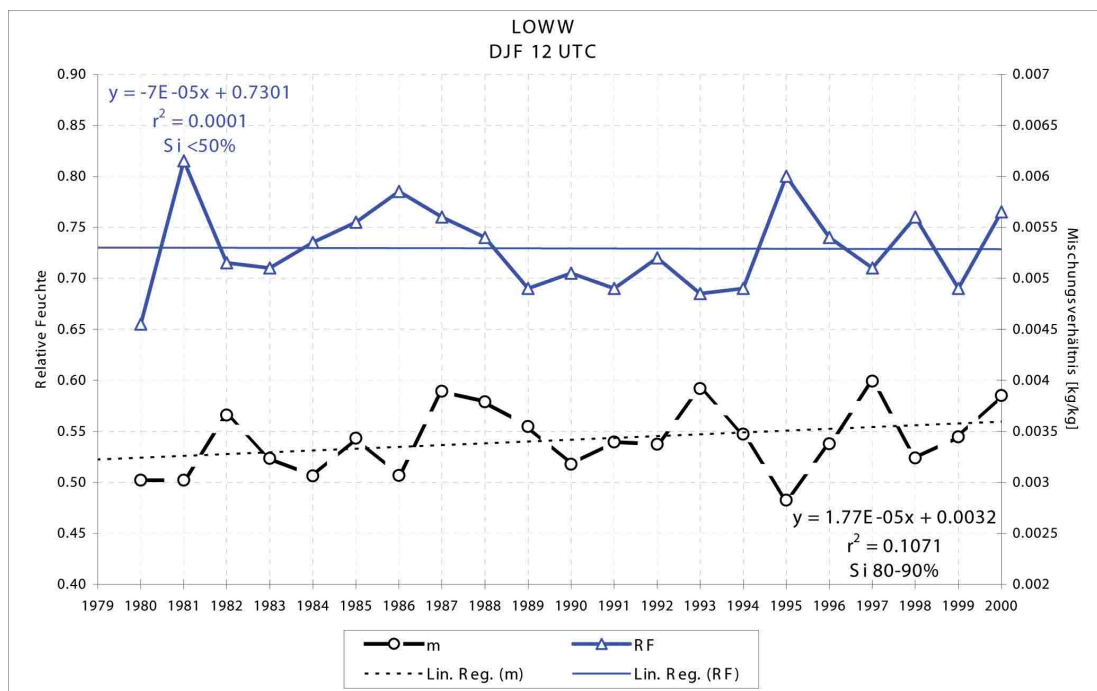


Abbildung 5.8: Flughafen Wien-Schwechat (DJF, 12 UTC)
Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.1.

Der zu diesem Termin durch die Regressionsgerade angedeutete Anstieg des Mischungsverhältnisses im Ausmaß von 0.21 g/kg von der Wintersaison 1980/81 bis zur Wintersaison 2000/2001 ist die geringste Zunahme des Feuchtegehalts für den Gitterpunkt Wien-Schwechat, aber ebenfalls nicht signifikant.

Auch zum tageszeitlichen Temperaturmaximum sind am Gitterpunkt Wien-Schwechat keine signifikanten Tendenzen erkennbar (vgl. Abb. 5.8). Damit ist Wien-Schwechat zu dieser Jahreszeit der einzige unter den untersuchten Orten, der sowohl um 06 UTC als auch um 12 UTC kein deutliches Gefälle der Regressionsgeraden der relativen Feuchte aufweist. Lediglich der Anstieg des Mischungsverhältnisses ist zu diesem Termin, mit rund 0.018 g/kg pro Jahr, stärker als jener um 06 UTC, der t-Test bewertet diesen Trend aber als nicht signifikant.

5.1.5 Graz

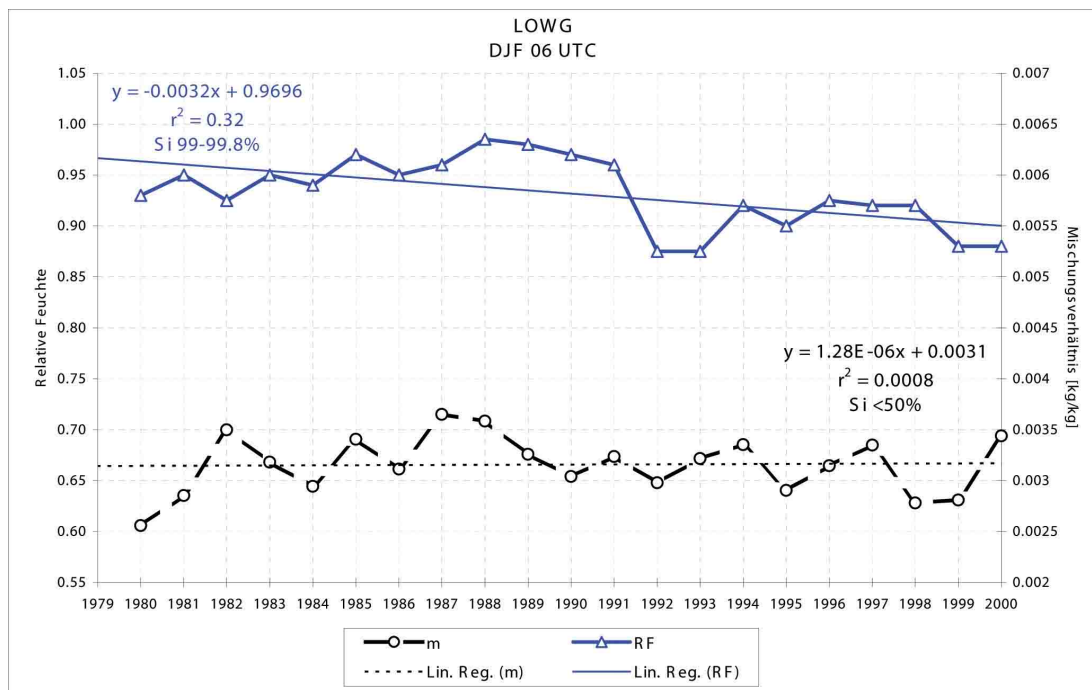


Abbildung 5.9: Flughafen Graz (DJF, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.1.

In den Wintersaisons 1983/84 und 1986/87 wurde jeweils ein Analysetermin ausgeschlossen (12. Jänner 1984 und 18. Dezember 1986).

Der Gitterpunkt Graz weist, abgesehen von der im Mittel höheren relativen Feuchte, einen ähnlichen Trend auf wie der Gitterpunkt Linz-Hörsching. Auch hier ist die fallende Tendenz der relativen Feuchte mit 99 – 99.8% signifikant getestet (Abb. 5.9). Im Verlauf des Mischungsverhältnisses ist kein signifikanter, linearer Trend erkennbar.

Das Konfidenzintervall des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.57$ ergibt einen Bereich von $[-0.86, -0.27]$ in dem der Korrelationskoeffizient der zugehörigen Grundgesamtheit vermutet werden kann. Aus der Regressionsgeraden ergibt sich eine Abnahme der relativen Feuchte um 6.4% in 20 Jahren. Gemeinsam mit dem 12 UTC Termin ist dieser Rückgang der relativen Feuchte für den Gitterpunkt Graz der stärkste unter den betrachteten Terminen. Mit den erklärten Varianzen zwischen rund 7% und 75% ist der Zusammenhang aber nur schwach ausgeprägt.

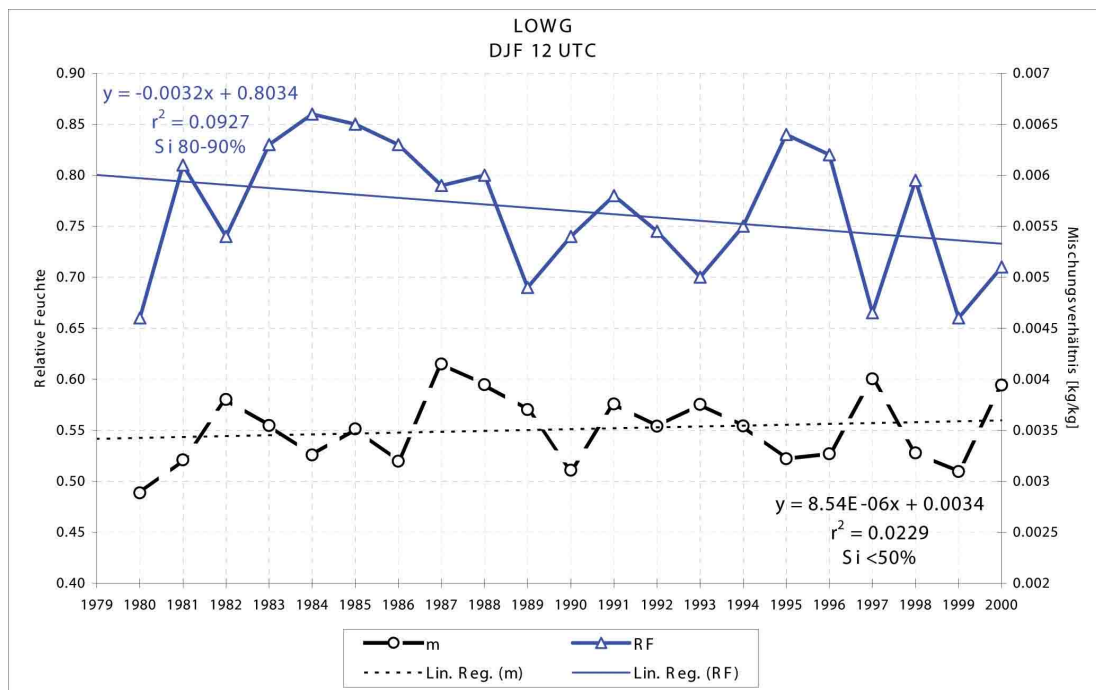


Abbildung 5.10: Flughafen Graz (DJF, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.1.

Der Median der relativen Feuchte unterliegt in Graz um 12 UTC großen Schwankungen. Analog zum Frühtermin weist die Regressionsgerade hier ihr stärk-

tes Gefälle für diesen Gitterpunkt auf (vgl. Abb. 5.10). Durch die große Variabilität der relativen Feuchte und den nur schwach ausgeprägten Trend des Feuchtegehalts ist weder das Absinken der relativen Feuchte um 6.4%, noch der Anstieg des Mischungsverhältnisses um 0.17 g/kg in 20 Jahren signifikant getestet.

5.1.6 Klagenfurt

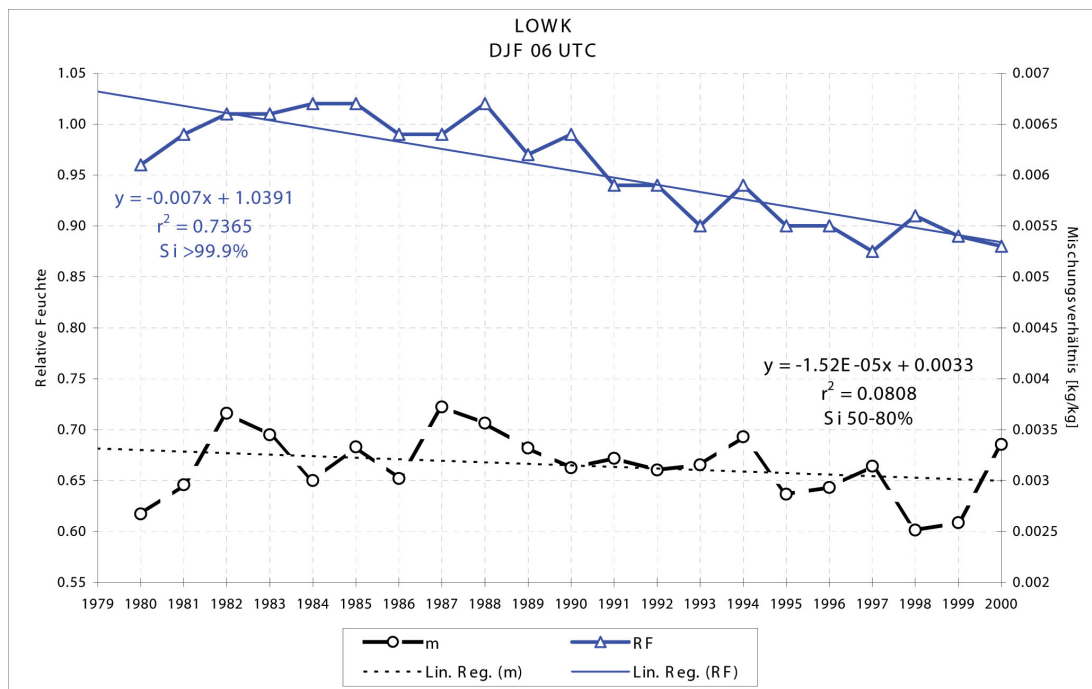


Abbildung 5.11: Flughafen Klagenfurt (DJF, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.1.

In den Wintersaisons 1980/81, 1984/85 und 1986/87 wurde jeweils ein Analysetermin ausgeschlossen (9. Jänner 1981, 10. Jänner 1985 und 31. Jänner 1987).

Wie bereits der Gitterpunkt Innsbruck zeigt Klagenfurt einen markanten negativen Trend der relativen Feuchte. Im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Punkten weist Klagenfurt zu diesem Termin allerdings auch eine fallende Tendenz des Mischungsverhältnisses auf (vgl. Abb. 5.11). Der Trend des Mischungsverhältnisses zeigt ein Abfallen des Feuchtegehalts um 0.3 g/kg im Verlauf von 20 Jahren. Dieser Rückgang ist der markanteste unter den betrachteten Terminen und Gitterpunkten, jedoch nicht signifikant getestet.

Die Signifikanzprüfung des Trends der relativen Feuchte ergibt einen hochsignifikanten Zusammenhang mit einem Signifikanzniveau $Si > 99.9\%$. Die Berechnung des Konfidenzintervalls zu $r_{RF} = -0.86$ ergibt für den Korrelationskoeffizienten der Grundgesamtheit einen Bereich von $[-0.97, -0.74]$, damit liegt die erklärte Varianz zwischen 55% und 95%, was auf einen starken, linearen Zusammenhang schließen lässt. Die Regressionsgerade zeigt ein Absinken der relativen Feuchte um 0.7% pro Jahr, und damit eine Abnahme der relativen Feuchte um 14% im Verlauf von 20 Jahren.

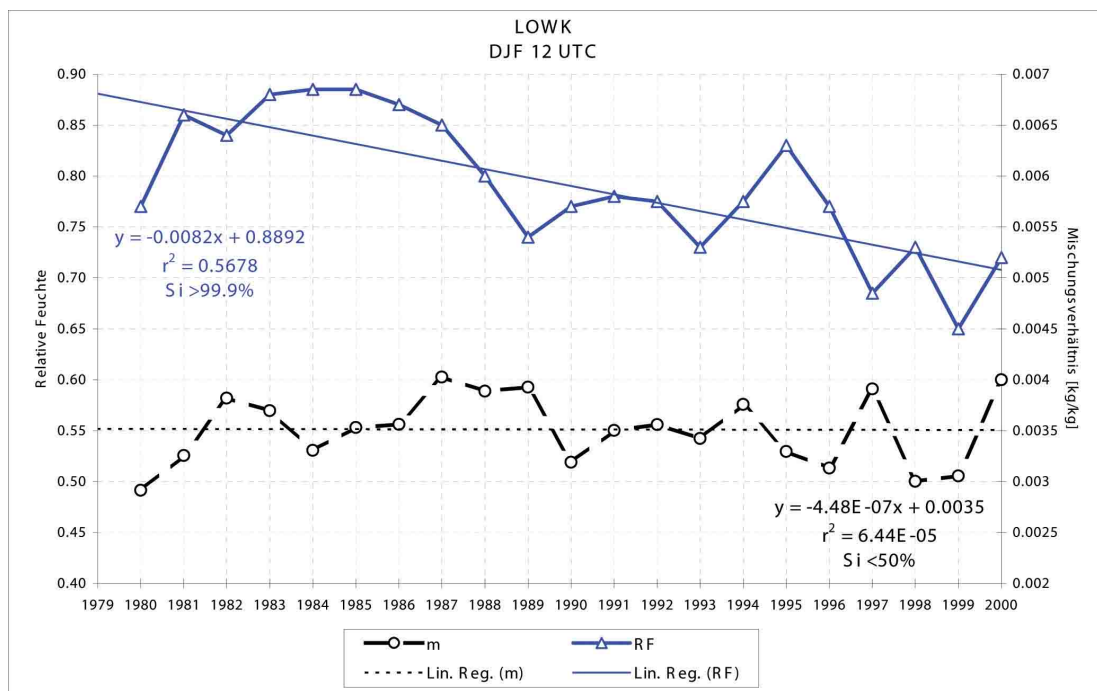


Abbildung 5.12: Flughafen Klagenfurt (DJF, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.1.

Ähnlich dem Gitterpunkt Innsbruck zum Mittagstermin ist in Abbildung 5.12, trotz starker Schwankungen in den Daten, ein deutlich negativer Trend der relativen Feuchte zu erkennen, welcher zugleich den stärksten Rückgang für den Gitterpunkt Klagenfurt darstellt. Im Verlauf des Mischungsverhältnisses ist in Klagenfurt, wie schon zum 06 UTC Termin, als einziges eine fallende Tendenz angedeutet, welche aber äußerst gering und erwartungsgemäß nicht signifikant

ist. Das Absinken der relativen Feuchte um 0.82% pro Jahr ist auf einem Signifikanzniveau $Si > 99.9\%$ hochsignifikant getestet.

Trotz der großen Schwankungen in Verlauf der relativen Feuchte ergibt die Berechnung des Konfidenzintervalls zu $r_{RF} = -0.75$ einen relativ schmalen Bereich von $[-0.94, -0.56]$ in dem der Korrelationskoeffizient der zugehörigen Grundgesamtheit angenommen werden kann. Die durch des Regressionsmodell erklärte Varianz liegt damit zwischen 32% und 89%.

5.2 Frühling

5.2.1 Innsbruck

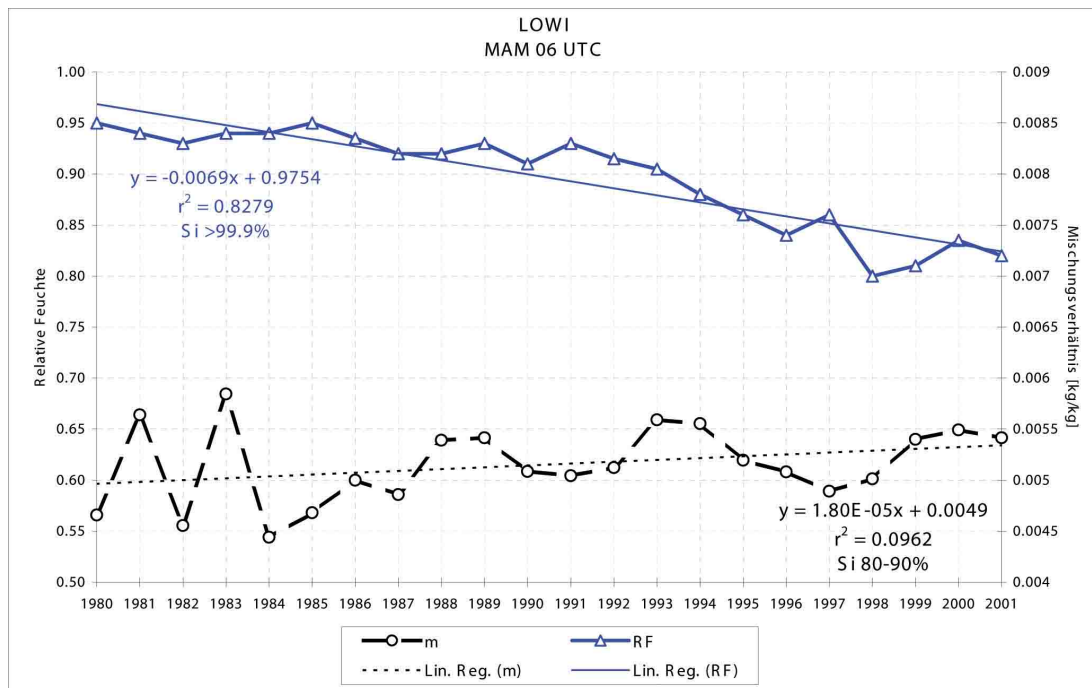


Abbildung 5.13: Flughafen Innsbruck (MAM, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate), auf der Abszisse ist das Jahr aufgetragen. Zu den Datenreihen sind jeweils die Regressionsgerade, die Geradengleichung, das Bestimmtheitsmaß r^2 und das Signifikanzniveau Si in Prozent geplottet.

Ähnlich wie im Winter verhält sich der Gitterpunkt Innsbruck auch im Frühling um 06 UTC. Das Mischungsverhältnis zeigt einen leicht positiven Trend, die relative Feuchte einen starken negativen Trend (Abb. 5.13). Der Anstieg des

Mischungsverhältnisses um 0.38 g/kg vom Frühjahr 1980 bis zum Frühjahr 2001 ist nicht signifikant getestet, die Prüfung der Abnahme der relativen Feuchte um 14.5% ergibt, mit einem Signifikanzniveau $Si > 99.9\%$, einen hochsignifikanten Zusammenhang.

Der Mutungsbereich für den Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.91$ umspannt ein Intervall von $[-0.98, -0.84]$ in dem der Korrelationskoeffizient der zugehörigen Grundgesamtheit angenommen werden kann. Der Anteil der durch das lineare Regressionsmodell erklärten Varianz ist hier mit 70% bis 97% sehr hoch, und damit die Abnahme der relativen Feuchte statistisch äußerst gut abgesichert.

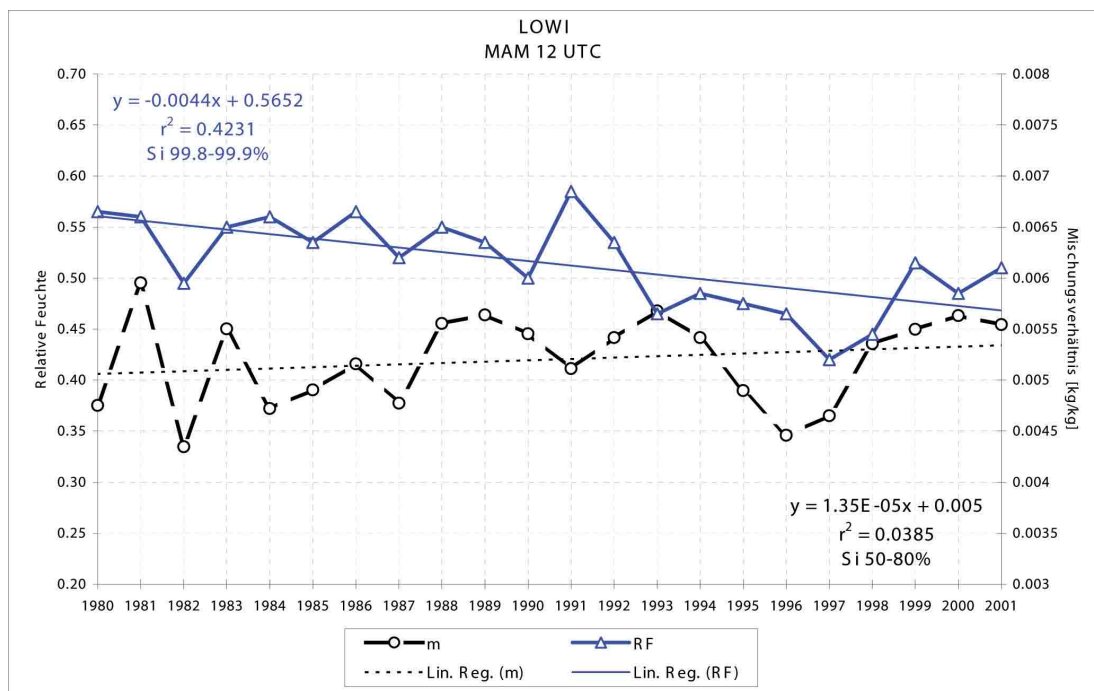


Abbildung 5.14: Flughafen Innsbruck (MAM, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.13.

Wie schon zum 06 UTC Termin ist auch zum Mittagstermin in Innsbruck ein schwach positiver, aber nicht signifikanter Trend des Mischungsverhältnisses, mit einem Anstieg des Feuchtegehalts um 0.28 g/kg und ein negativer Trend der relativen Feuchte, mit einem Rückgang um 9.2% im Verlauf von 21 Jahren, zu erkennen (Abb. 5.14).

Die Prüfung des Trends der relativen Feuchte ergibt einen hochsignifikanten Zusammenhang auf einem Niveau von 99.8–99.9%. Die Berechnung des Vertrauensbereiches auf dem Niveau $Si = 95\%$ ergibt für den Korrelationskoeffizienten $r_{RF} = -0.65$ ein Intervall von $[-0.90, -0.40]$, die erklärte Varianz liegt somit zwischen 16% und 80%. Im Vergleich zum Frühtermin unterliegen die Daten um 12 UTC, speziell die relative Feuchte, wieder stärkeren Schwankungen. Die höhere Variabilität äußert sich, wie schon bei den anderen Gitterpunkten, in einem tendenziell niedrigeren Korrelationskoeffizienten und weiteren Konfidenzintervall.

5.2.2 Salzburg

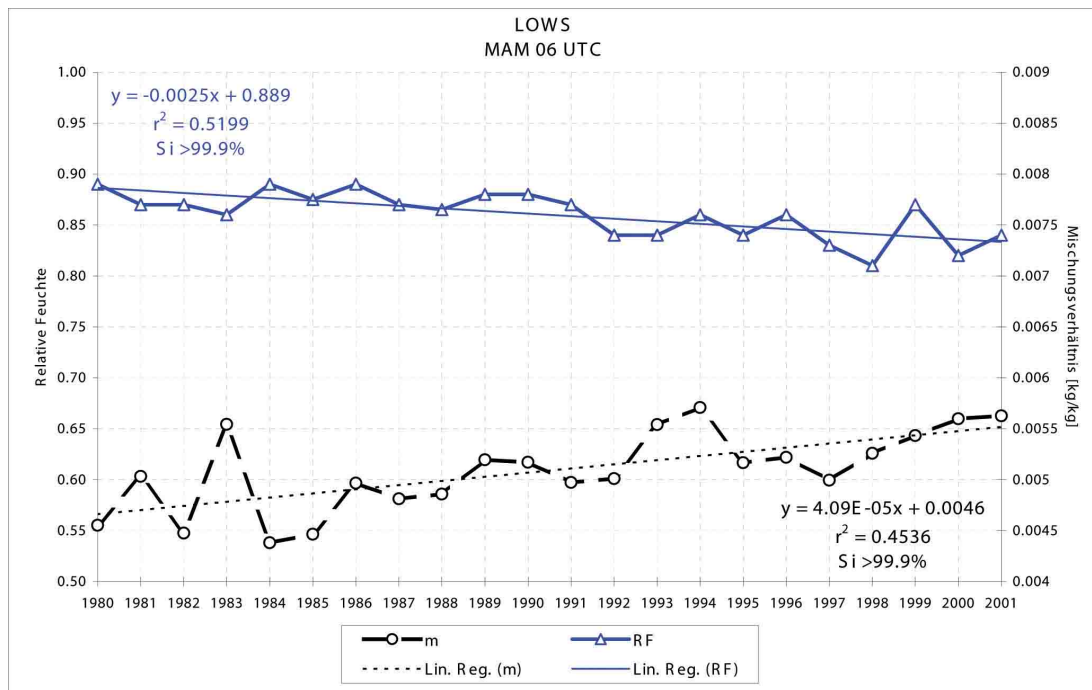


Abbildung 5.15: Flughafen Salzburg (MAM, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.13.

Der Frühlingsfrühtermin am Punkt Salzburg zeigt ein ähnliches Verhalten wie schon der 06 UTC Termin im Winter (Abb. 5.15). Die Steigung der Regressionsgeraden des Median der relativen Feuchte ist negativ, die des Mischungsverhältnisses positiv, sie unterscheiden sich jedoch in der Stärke der Korrelation. Im

Vergleich zu den Wintermonaten präsentiert sich die lineare Regression der relativen Feuchte etwas schwächer, die des Mischungsverhältnisses wesentlich stärker.

Die Zunahme um 0.86 g/kg in 21 Jahren stellt für diesen Gitterpunkt den maximalen Anstieg des Feuchtegehalts über alle Jahreszeiten und Termine hinweg dar. Die Güte des Zusammenhangs erweist sich mit einem Signifikanzniveau von $Si > 99.9\%$ als hochsignifikant, die Berechnung des Konfidenzintervalls zu $r_m = 0.67$ ergibt einen Bereich von $[0.44, 0.91]$ und somit erklärte Varianzen zwischen 19% und 82%.

Der Trend der relativen Feuchte ergibt eine Abnahme um 5.3% binnen 21 Jahren, diese ist auf einem Niveau von $Si > 99.9\%$ hochsignifikant. Der Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten $r_{RF} = -0.72$ umspannt ein Intervall von $[-0.93, -0.52]$, damit liegt die durch das Modell erklärte Varianz zwischen 27% und 86%.

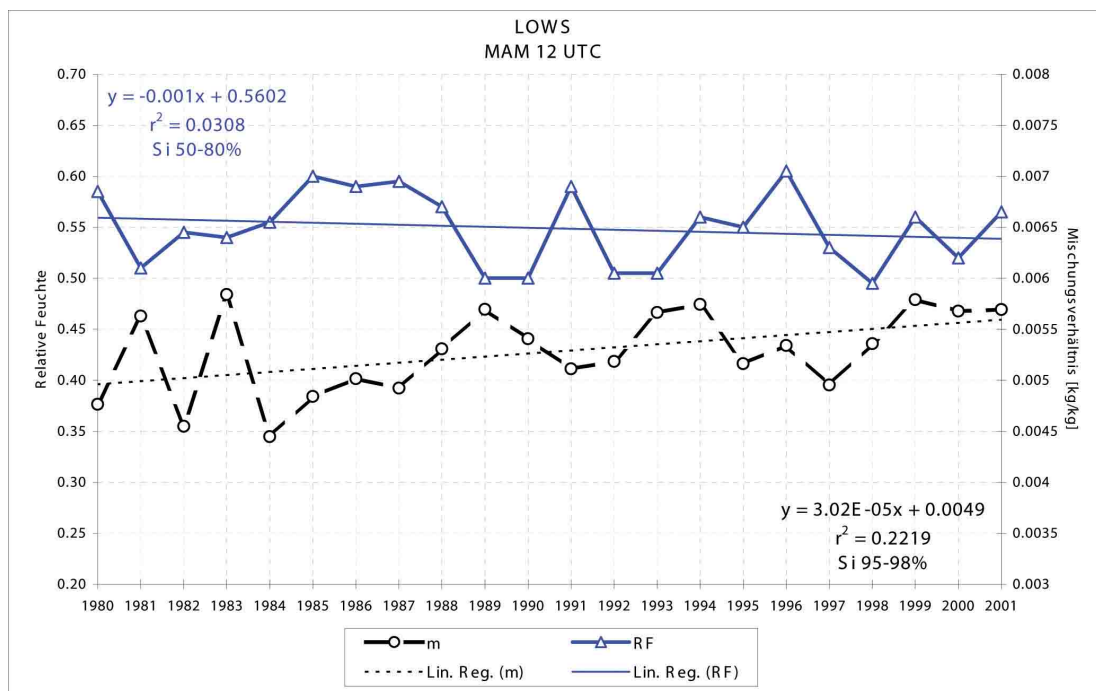


Abbildung 5.16: Flughafen Salzburg (MAM, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.13.

Der Verlauf der relativen Feuchte weist um 12 UTC, mit einem Absinken von 0.1% pro Jahr, keinen markanten bzw. signifikanten Trend auf, wohingegen im

Verlauf des Mischungsverhältnisses ein deutlicher Anstieg der Regressionsgeraden erkennbar ist (Abb. 5.16).

Der positive Trend des Mischungsverhältnisses von 0.03 g/kg pro Jahr ist mit einem Signifikanzniveau von 95 – 98% sehr signifikant und ergibt im Laufe von 21 Jahren eine Zunahme des Feuchtegehalts von 0.63 g/kg . Wie bei den anderen Fällen, die einen nur mittelmäßigen bzw. schwachen Zusammenhang aufweisen, ergibt die Berechnung des Konfidenzintervall zu $r_m = 0.47$ auf dem Niveau $Si = 95\%$ einen großen Bereich von $[0.14, 0.80]$ in dem der Korrelationskoeffizient der Grundgesamtheit vermutet werden kann, die erklärten Varianzen liegen zwischen 2% und 65%.

5.2.3 Linz-Hörsching

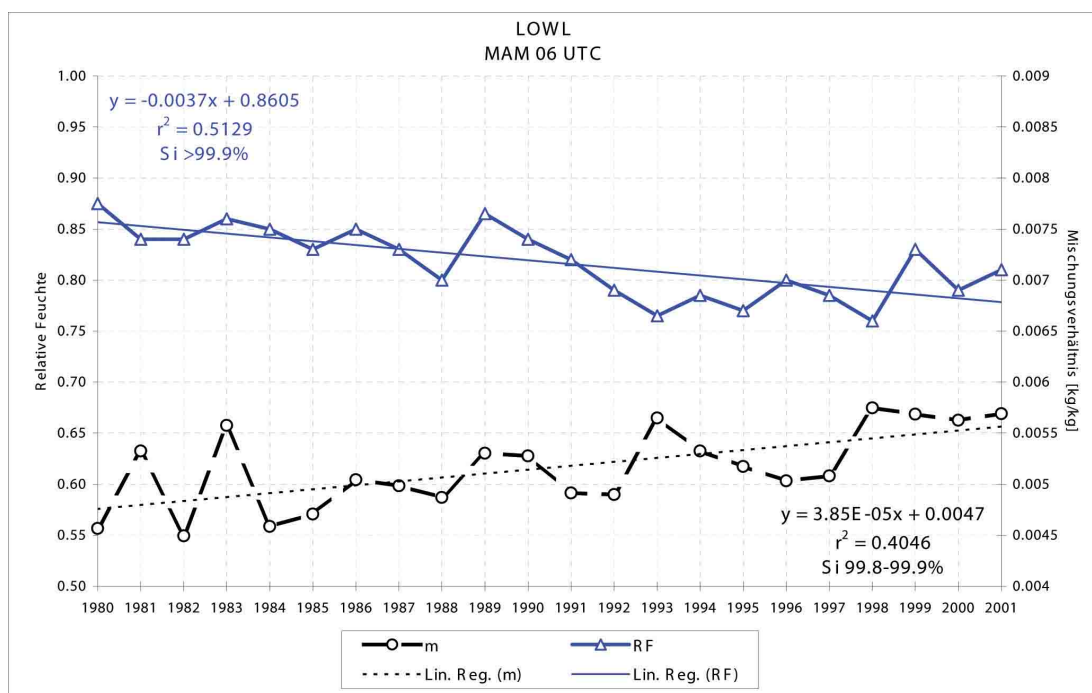


Abbildung 5.17: Flughafen Linz-Hörsching (MAM, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.13.

Die Feuchteparameter stellen sich zum 06 UTC Termin in Linz-Hörsching ähnlich dar wie in Salzburg (Abb. 5.17). Die Steigung der Regression der relativen Feuchte ist negativ, die des Mischungsverhältnisses positiv. Zu keiner anderen

Jahreszeit ist für den Gitterpunkt Linz-Hörsching das Gefälle der Regressionsgeraden so groß wie zu diesem Termin. Der Verlauf der Werte beider Parameter korreliert relativ stark mit dem jeweiligen linearen Regressionsmodell, zudem ergibt der t-Test für beide Trends, mit $Si > 99.9\%$ und $99.8 - 99.9\%$, einen hochsignifikanten Zusammenhang.

Der Anstieg der Regressionsgeraden ergibt eine Erhöhung des Mischungsverhältnisses um 0.81 g/kg in 21 Jahren. Der Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.64$ umspannt ein Intervall von $[0.38, 0.89]$, die zugehörigen erklärten Varianzen bewegen sich zwischen 15% und 79% .

Der negative Trend der relativen Feuchte ergibt einen Rückgang derselben um 7.8% im Laufe von 21 Jahren. Das Konfidenzintervall zu $r_{RF} = -0.72$ erstreckt sich von $[-0.92, -0.51]$ und damit die erklärte Varianz der zugehörigen Grundgesamtheit zwischen 26% und 85% .

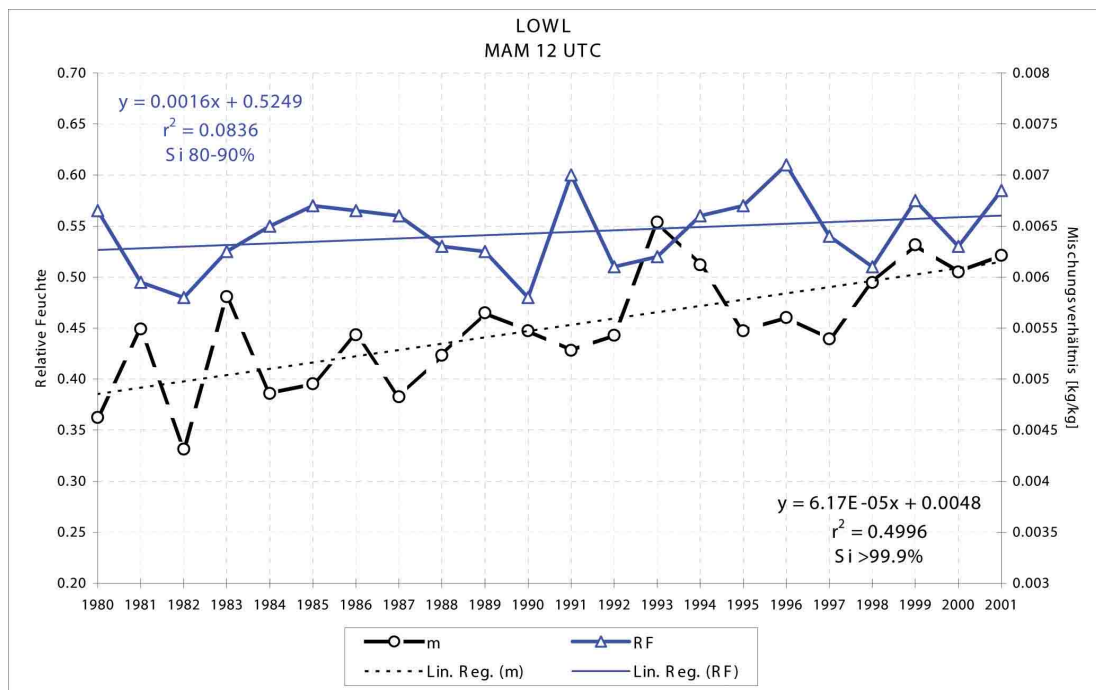


Abbildung 5.18: Flughafen Linz-Hörsching (MAM, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.13.

Wie schon am Gitterpunkt Salzburg ist in Linz-Hörsching zum Mittagstermin im Verlauf der relativen Feuchte keine signifikante Tendenz erkennbar, anzu-

merken ist jedoch dass an diesem Gitterpunkt, mit einem Anstieg der relativen Feuchte um 0.16% pro Jahr, ein positiver Trend angedeutet ist. Neben Wien-Schwechat ist der Gitterpunkt Linz-Hörsching der einzige, der zu dieser Jahreszeit eine positive Steigung der Regressionsgeraden aufweist (Abb. 5.18). Auch das Mischungsverhältnis zeigt hier einen positiven Trend.

Die Zunahme des Feuchtegehalts um 0.06 g/kg pro Jahr ist mit einem Signifikanzniveau von $S_i > 99.9\%$ hochsignifikant und beläuft sich binnen 21 Jahren auf 1.3 g/kg. Die Berechnung des Vertrauensbereiches zum Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.71$ ergibt ein Intervall von $[0.49, 0.92]$ in dem der Korrelationskoeffizient der Grundgesamtheit vermutet werden kann. Die zugehörigen erklärten Varianzen liegen zwischen 24% und 85%. Die starke Zunahme des Mischungsverhältnisses stellt für den Punkt Linz-Hörsching den maximalen Anstieg dieses Parameters über alle untersuchten Termine und Jahreszeiten hinweg dar. Auch die Zunahme der relativen Feuchte, obgleich nicht signifikant getestet, erreicht zu diesem Termin ihr Maximum.

5.2.4 Wien-Schwechat

Auch im Frühjahr ist zum 06 UTC Termin am Gitterpunkt Wien-Schwechat ein positiver Trend des Mischungsverhältnisses erkennbar (Abb. 5.19). Der Anstieg des Mischungsverhältnisses um 0.043 g/kg pro Jahr ist mit einem Signifikanzniveau von 98 – 99% sehr signifikant getestet und summiert sich im Verlauf von 21 Jahren auf 0.91 g/kg. Für den Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.53$ ergibt sich ein Mutungsbereich von $[0.23, 0.84]$ mit den zugehörigen erklärten Varianzen zwischen 5% und 71%.

Für den Median der relativen Feuchte ergibt das Regressionsmodell eine Abnahme von 5.5% in 21 Jahren. Der Rückgang zu diesem Termin ist laut t-Test auf einem Niveau von 99 – 99.8% hochsignifikant und stellt das stärkste Absinken der relativen Feuchte in Wien-Schwechat dar. Das Konfidenzintervall des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.56$ erstreckt sich in einem Bereich von $[-0.85, -0.26]$, die erklärten Varianzen für die zugehörige Grundgesamtheit liegen zwischen 7% und 72%.

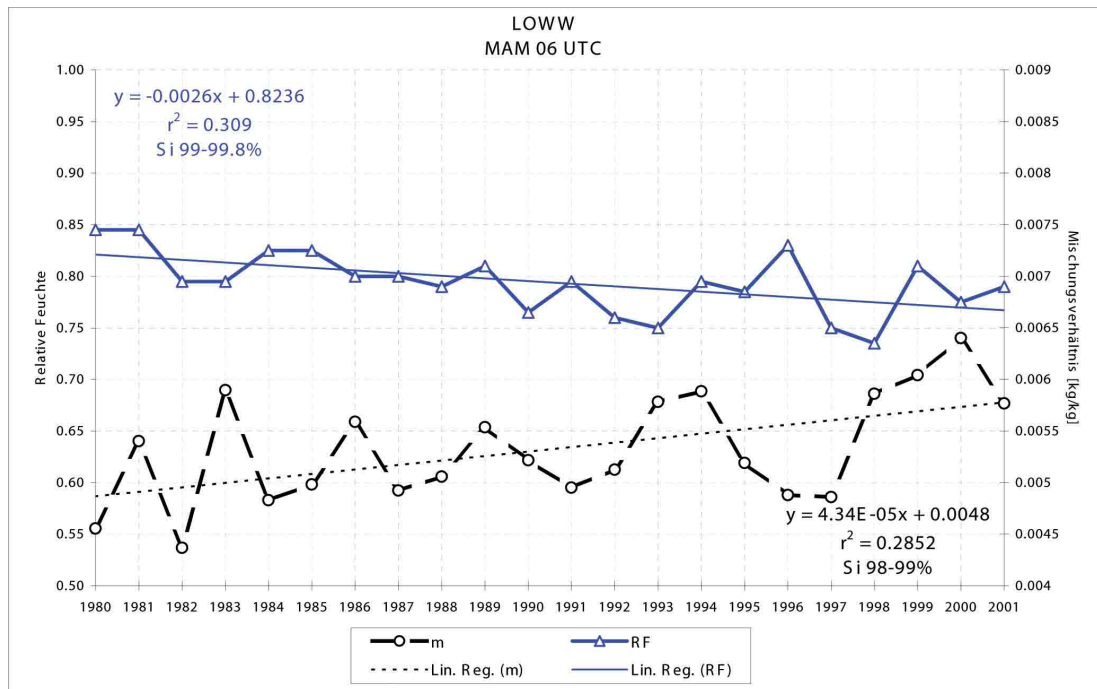


Abbildung 5.19: Flughafen Wien-Schwechat (MAM, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.13.

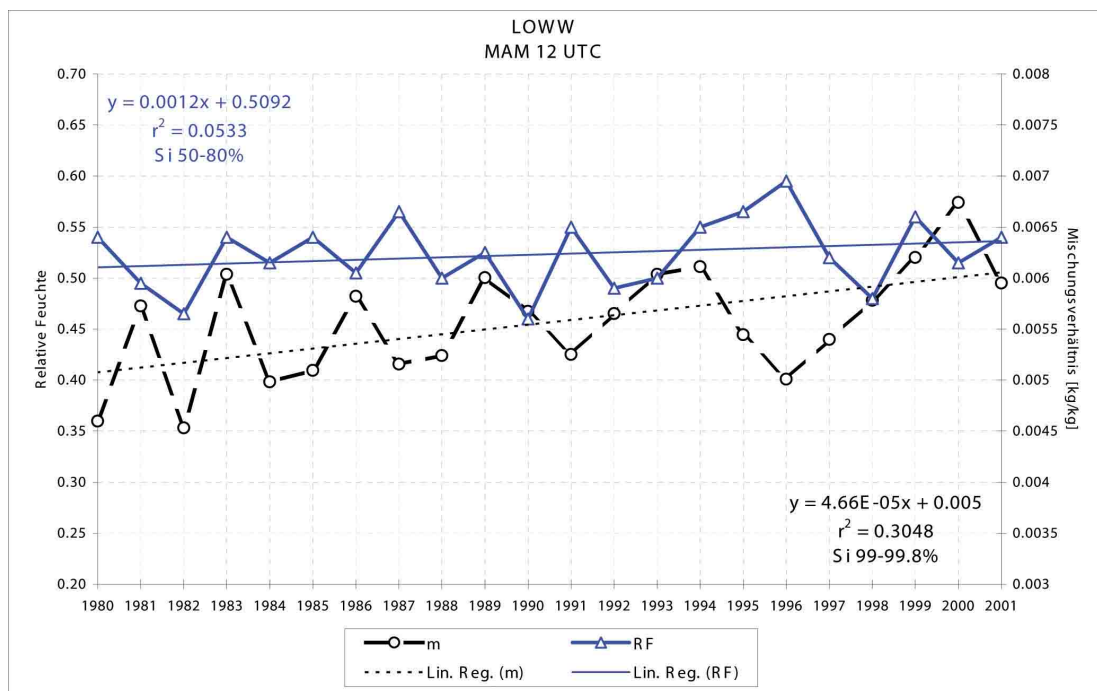


Abbildung 5.20: Flughafen Wien-Schwechat (MAM, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.13.

Der Verlauf der Feuchteparameter in Wien-Schwechat (Abb. 5.20) ist dem in Linz-Hörsching zu diesem Termin sehr ähnlich. Auch hier erkennt man eine deutliche Zunahme des Mischungsverhältnisses und eine geringe Zunahme der relativen Feuchte. Der mit 0.12% pro Jahr verhältnismäßig schwache Anstieg der relativen Feuchte ist allerdings nicht signifikant getestet. Der positive Trend des Feuchtegehalts mit 0.047 g/kg pro Jahr ist auf einem Niveau von 99–99.8% hochsignifikant und ergibt eine Zunahme von 0.98 g/kg im Verlauf von 21 Jahren. Die Berechnung des Konfidenzintervalls zu $r_m = 0.55$ ergibt für den Grundgesamtheit-Korrelationskoeffizienten ein Bereich von $[0.25, 0.85]$ mit der zugehörigen erklärten Varianz von 6% bis 72%.

5.2.5 Graz

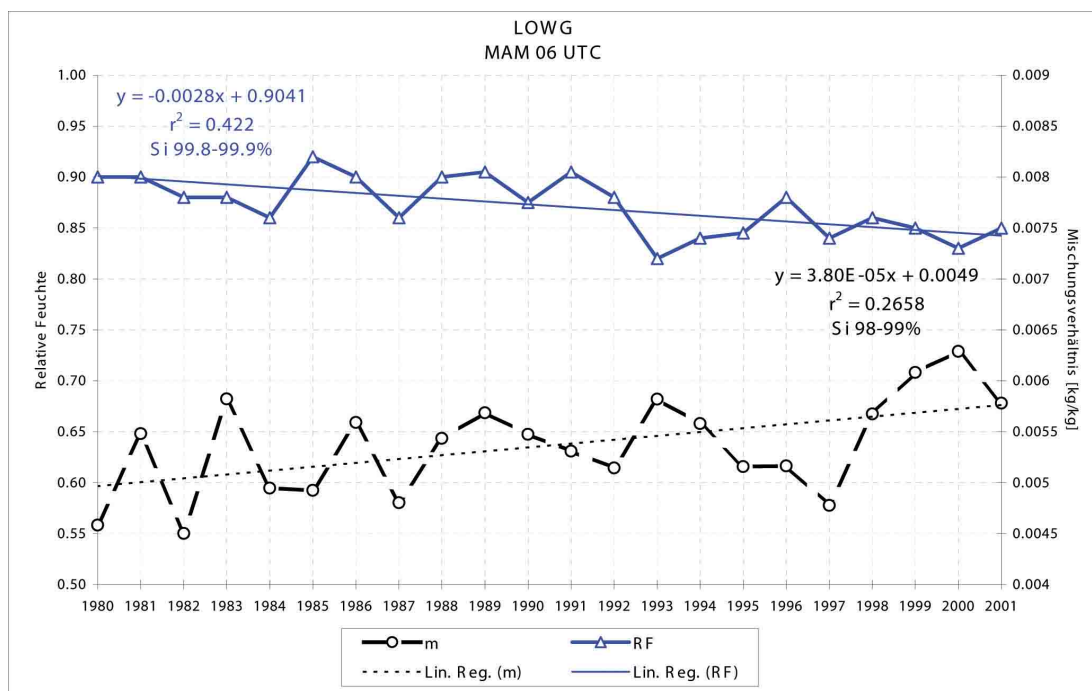


Abbildung 5.21: Flughafen Graz (MAM, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.13.

Im Jahr 1987 wurde ein Analysetermin ausgeschlossen (10. März 1987).

Das Mischungsverhältnis weist in Abbildung 5.21 eine deutliche Zunahme auf, die relative Feuchte zeigt eine fallende Tendenz. Beide Regressionen sind mit

einem Signifikanzniveau von 98 – 99% bzw. 99.8 – 99.9% signifikant getestet.

Der nach oben zeigende Trend des Mischungsverhältnisses ergibt mit einem Anstieg von 0.038 g/kg pro Jahr eine Zunahme des Feuchtegehalts der Luft um 0.8 g/kg im Verlauf von 21 Jahren. Für den Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.52$ ergibt sich ein Mutungsbereich von $[0.20, 0.83]$, mit erklärten Varianzen zwischen 4% und 69%.

Für den Median der relativen Feuchte ergibt die Regression eine Abnahme von 5.9% in 21 Jahren. Das Konfidenzintervall des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.65$ erstreckt sich in einen Bereich von $[-0.90, -0.40]$, die erklärten Varianzen für die zugehörige Grundgesamtheit liegen zwischen 16% und 80%.

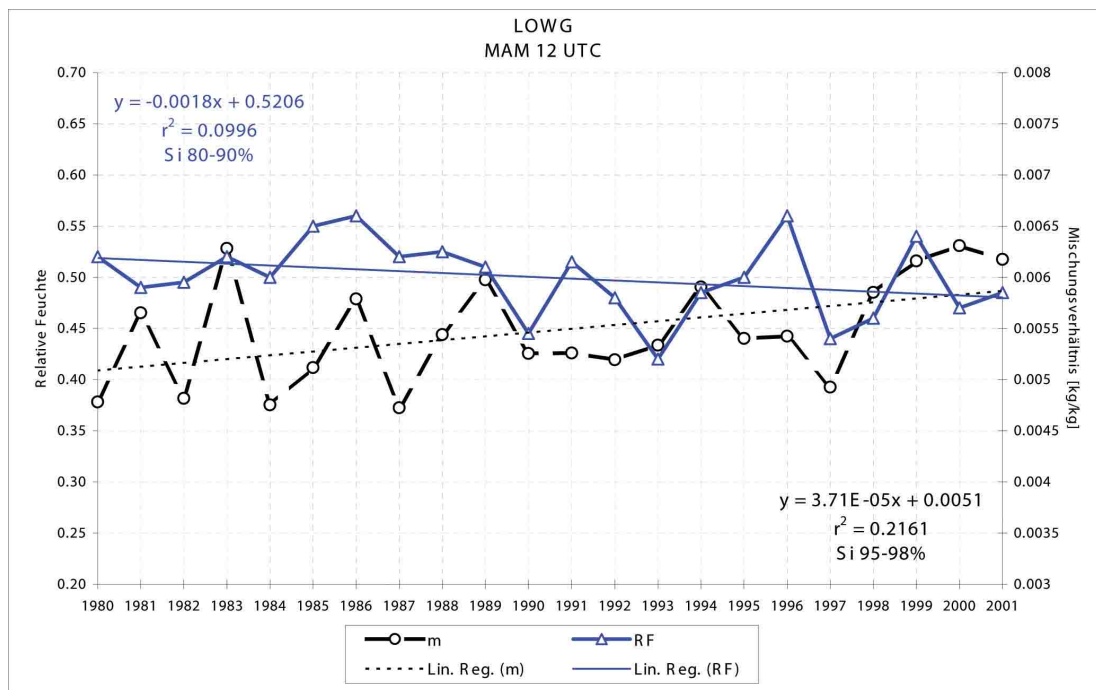


Abbildung 5.22: Flughafen Graz (MAM, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.13.

Die Feuchteparameter am Gitterpunkt Graz verhalten sich zum Mittagstermin ähnlich wie zum Frühtermin (Abb. 5.22). Auch hier zeigt die Regression eine Abnahme der relativen Feuchte und einen Anstieg des Mischungsverhältnisses.

Die Zunahme des Mischungsverhältnisses ist auf einem Niveau von 95 – 98% sehr signifikant, der Rückgang der relativen Feuchte um 3.8% ist nicht signifikant getestet.

Im Laufe von 21 Jahren zeigt der positive Trend des Mischungsverhältnisses eine Erhöhung des Feuchtegehalts um 0.78 g/kg , was einem jährlichen Anstieg von 0.037 g/kg entspricht. Der Mutungsbereich zu $r_m = 0.46$ ergibt ein Intervall von $[0.13, 0.80]$ in dem der Korrelationskoeffizient der Grundgesamtheit vermutet werden kann, die zugehörigen erklärten Varianzen bewegen sich zwischen 2% und 64%.

5.2.6 Klagenfurt

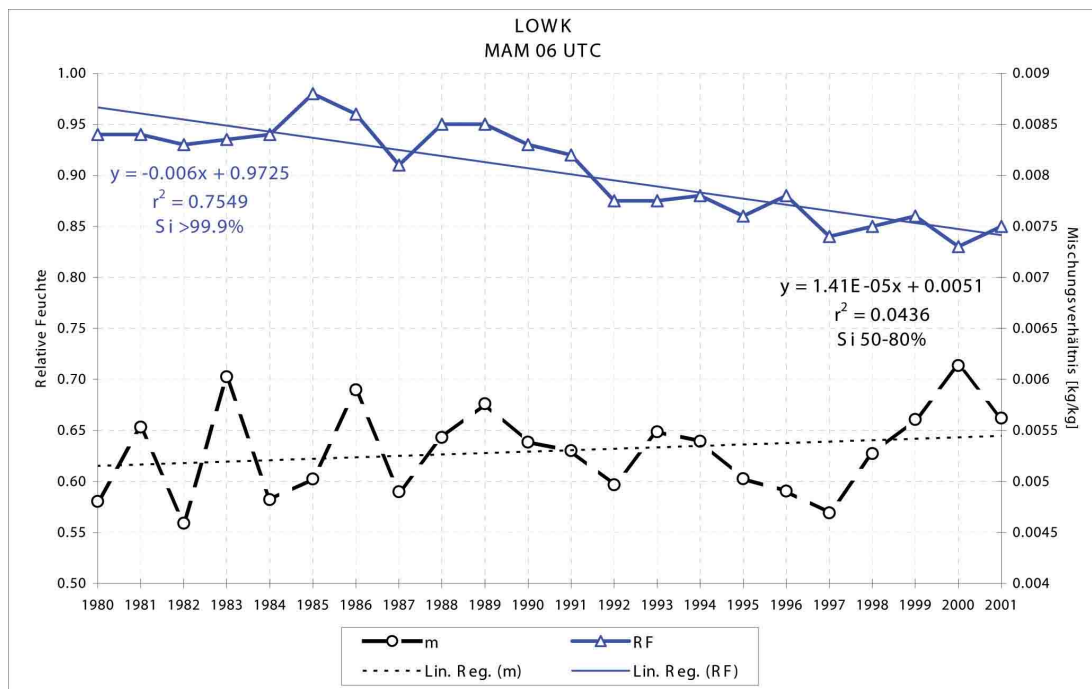


Abbildung 5.23: Flughafen Klagenfurt (MAM, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.13.

Im Jahr 1987 wurde ein Analysetermin ausgeschlossen (10. März 1987).

Der Gitterpunkt Klagenfurt zeigt im Frühjahr um 06 UTC Parallelen zum Verlauf der Feuchteparameter in Innsbruck (Abb. 5.23). Die negative Steigung der Regressionsgeraden der relativen Feuchte ist mit einem Signifikanzniveau

$S_i > 99.9\%$ hochsignifikant, der schwache Anstieg des Mischungsverhältnisses um 0.3 g/kg vom Frühjahr 1980 bis zum Frühjahr 2001 ist nicht signifikant getestet.

Der Mutungsbereich für den Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.87$ ergibt ein Intervall von $[-0.97, -0.76]$ in dem der Korrelationskoeffizient der zugehörigen Grundgesamtheit angenommen werden kann. Die durch das Regressionsmodell erklärte Varianz ist mit 58% bis 95% relativ hoch und damit die Abnahme der relativen Feuchte um 12.6% binnen 21 Jahren statistisch gut abgesichert.

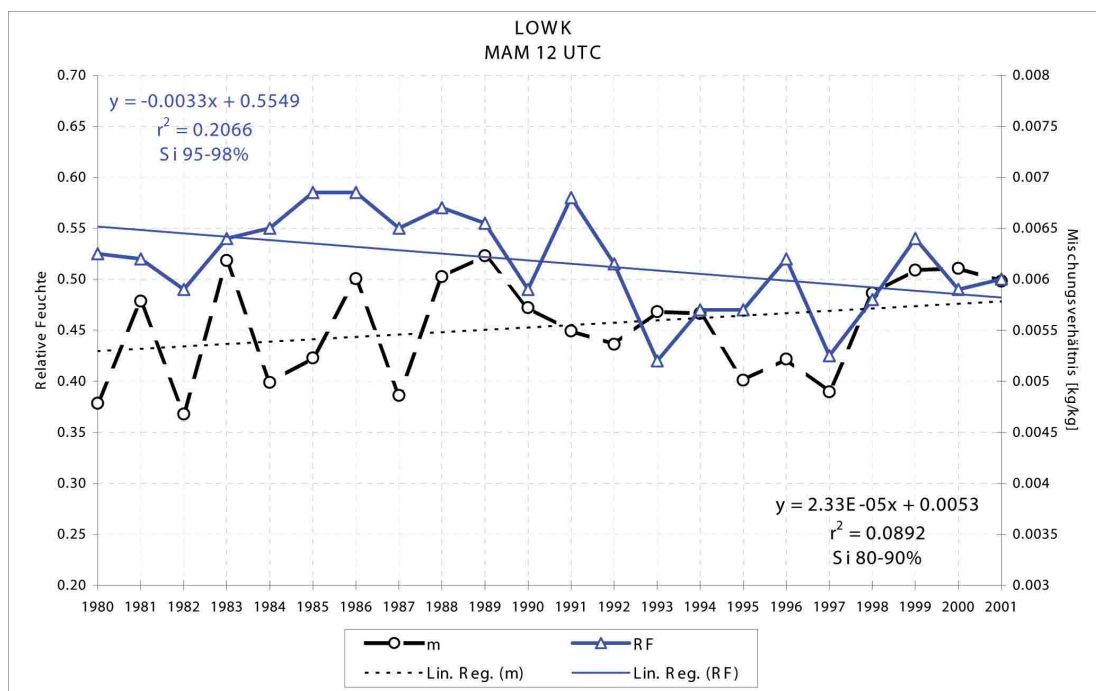


Abbildung 5.24: Flughafen Klagenfurt (MAM, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.13.

Auf Abbildung 5.24 ist ein schwach positiver, aber nicht signifikanter Trend des Mischungsverhältnisses, mit einem Anstieg des Feuchtegehalts um 0.49 g/kg in 21 Jahren, zu erkennen. Durch die hohe Variabilität der Datenreihe weist Klagenfurt zu diesem Termin einen nur geringen, negativen Trend der relativen Feuchte, mit einem Rückgang um 6.9% im Verlauf von 21 Jahren, auf.

Der schwache, fallende Trend der relativen Feuchte ist jedoch auf einem Niveau von 95 – 98% sehr signifikant. Die Berechnung des Vertrauensbereiches ergibt für

den Korrelationskoeffizienten $r_{RF} = -0.45$ ein Intervall von $[-0.79, -0.12]$, die erklärte Varianz der zugehörigen Grundgesamtheit liegt zwischen 1% und 63%.

5.3 Sommer

5.3.1 Innsbruck

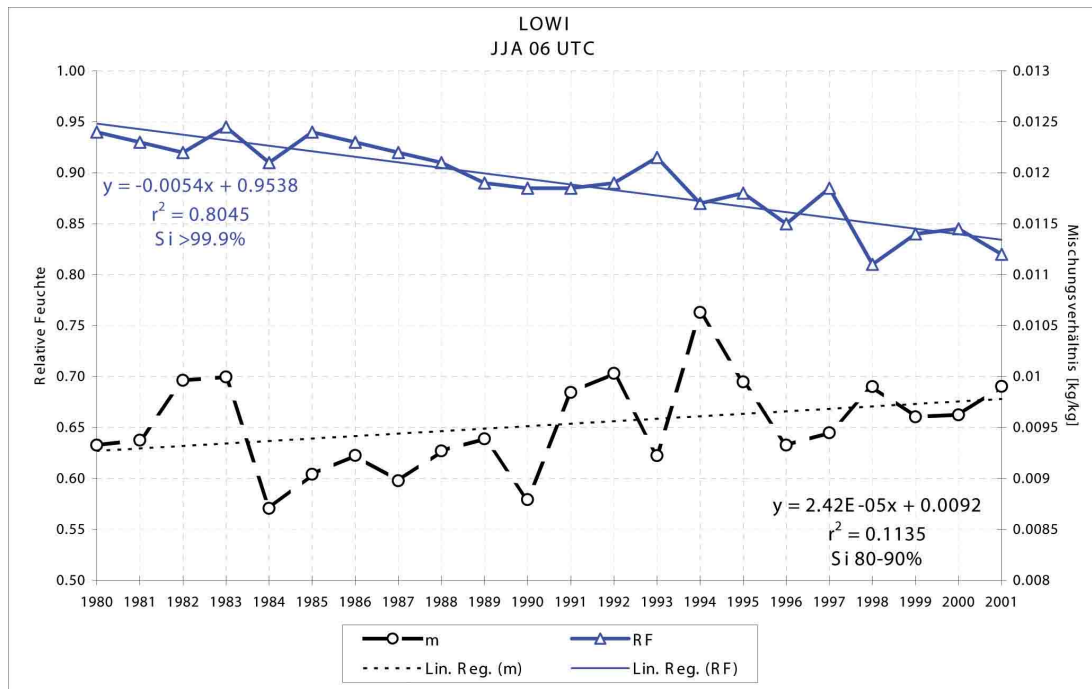


Abbildung 5.25: Flughafen Innsbruck (JJA, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate), auf der Abszisse ist das Jahr aufgetragen. Zu den Datenreihen sind jeweils die Regressionsgerade, die Geradengleichung, das Bestimmtheitsmaß r^2 und das Signifikanzniveau Si in Prozent geplottet.

Im Sommer weist Innsbruck zum 06 UTC Termin wiederum einen stark negativen Trend der relativen Feuchte und einen positiven Trend des Feuchtegehalts auf (Abb. 5.25). Zu keinem anderen Termin nimmt das Mischungsverhältnis am Gitterpunkt Innsbruck so stark zu wie zu diesem, der Anstieg des Mischungsverhältnisses um 0.51 g/kg im Verlauf von 21 Jahren ist allerdings statistisch nicht signifikant. Die Prüfung des Rückgangs der relativen Feuchte ergibt einen hochsignifikanten Zusammenhang auf einem Niveau von $Si > 99.9\%$.

Der 95%-ige Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.90$ ergibt ein Intervall von $[-0.98, -0.81]$ in dem der Korrelationskoeffizient der zugehörigen Grundgesamtheit angenommen werden kann, die erklärten Varianzen liegen zwischen 66% und 96%. Der Rückgang um 0.54% pro Jahr ergibt eine Abnahme der relativen Feuchte um 11.3% binnen 21 Jahren, diese Austrocknung ist statistisch äußerst gut abgesichert.

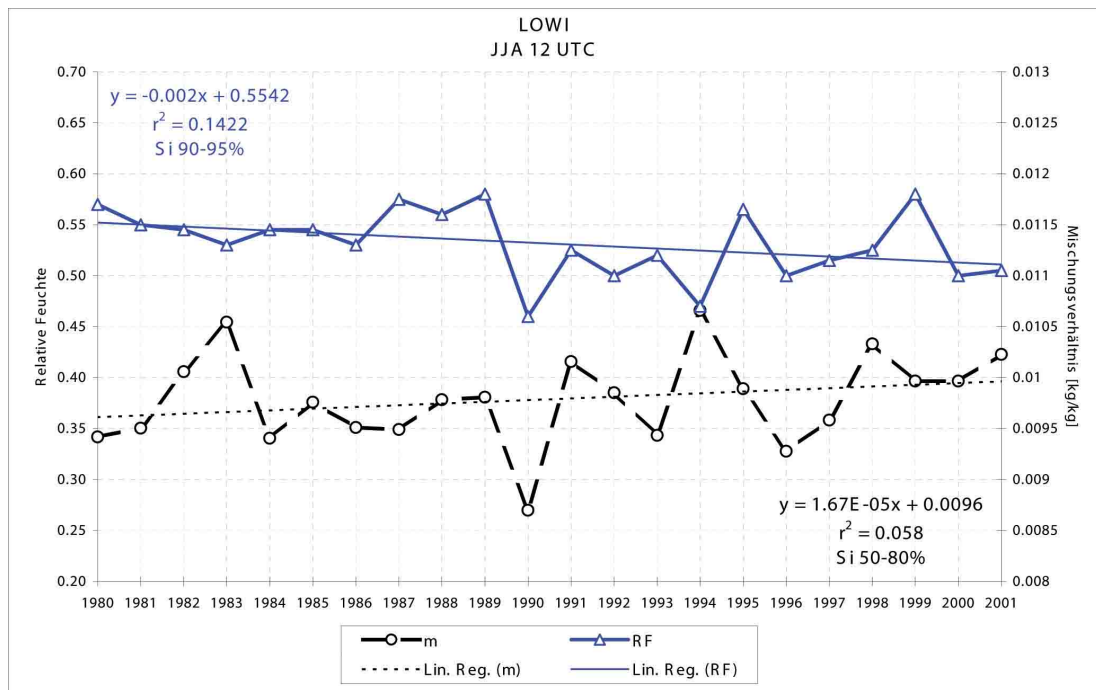


Abbildung 5.26: Flughafen Innsbruck (JJA, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.25.

Auch zum Mittagstermin erkennt man am Gitterpunkt Innsbruck einen positiven Trend des Mischungsverhältnisses und einen negativen Trend der relativen Feuchte (Abb. 5.26). Der Anstieg des Mischungsverhältnisses von $0.017 g/kg$ pro Jahr, also einer Erhöhung um $0.35 g/kg$ im Verlauf von 21 Jahren, ist statistisch nicht signifikant. Der leichte Rückgang der relativen Feuchte von 0.2% pro Jahr, in Summe 4.2% binnen 21 Jahren, stellt in Innsbruck den geringsten Rückgang unter den betrachteten Terminen dar und ist auf einem Niveau von 90 – 95% signifikant getestet.

Der Vertrauensbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.38$ liegt im Intervall $[-0.74, -0.01]$. Die erklärte Varianz liegt damit zwischen rund 0% und 55%, was durch die großen Schwankungen in der Datenreihe ab dem Sommer 1989 erklärt werden kann.

5.3.2 Salzburg

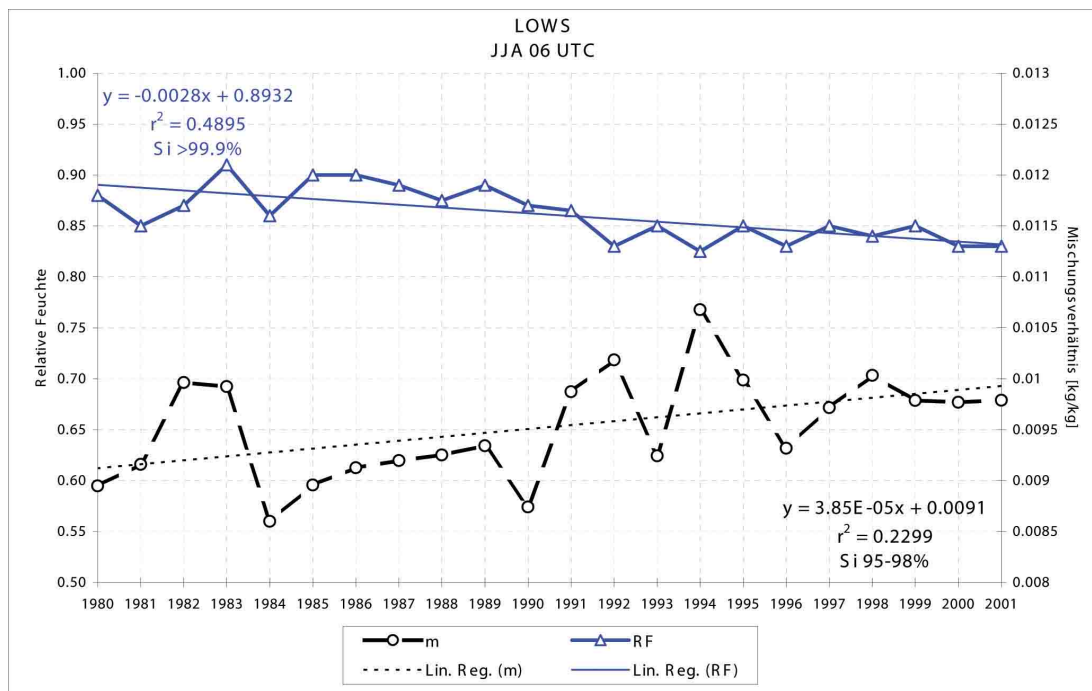


Abbildung 5.27: Flughafen Salzburg (JJA, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.25.

Das Mischungsverhältnis weist in Abbildung 5.27 eine deutliche Zunahme auf, die relative Feuchte zeigt eine fallende Tendenz. Die Regression der relativen Feuchte ist mit einem Signifikanzniveau $Si > 99.9\%$ hochsignifikant, die des Mischungsverhältnisses auf einem Niveau von 95 – 98% sehr signifikant.

Der positive Trend des Mischungsverhältnisses ergibt mit einem Anstieg von rund $0.039 g/kg$ pro Jahr eine Zunahme des Feuchtegehalts um $0.81 g/kg$ im Verlauf von 21 Jahren. Für den Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.48$ ergibt sich ein Mutungsbereich von $[0.15, 0.81]$, mit erklärten Varianzen zwischen 2% und 65%.

Für den Median der relativen Feuchte ergibt die Regression eine Abnahme von 5.9% in 21 Jahren. Das Konfidenzintervall des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.70$ erstreckt sich in einen Bereich von $[-0.92, -0.48]$, die erklärten Varianzen der zugehörigen Grundgesamtheit liegen zwischen 23% und 84%.

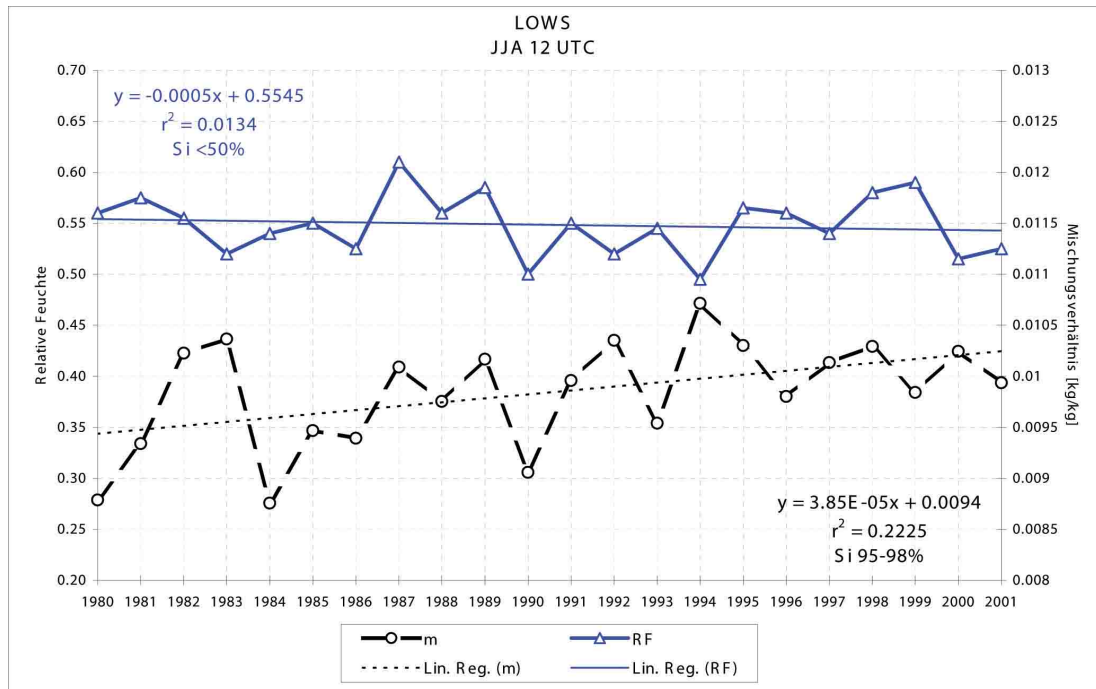


Abbildung 5.28: Flughafen Salzburg (JJA, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.25.

Im Sommer zeigt der Verlauf der relativen Feuchte um 12 UTC die geringste Abnahme für den Gitterpunkt Salzburg über alle betrachteten Termine (Abb. 5.28). Das Absinken von 0.05% pro Jahr ist jedoch statistisch nicht signifikant. Der Verlauf des Mischungsverhältnisses ergibt einen deutlichen Anstieg der Regressionsgeraden. Die Zunahme von rund 0.039 g/kg pro Jahr ist mit einem Signifikanzniveau von 95 – 98% sehr signifikant und ergibt wie schon zum Frühtermin im Laufe von 21 Jahren eine Zunahme des Feuchtegehalts von 0.81 g/kg.

Die Berechnung des Konfidenzintervalls zu $r_m = 0.47$ auf dem Niveau $Si = 95\%$ ergibt wegen der großen Schwankungen des Mischungsverhältnisses

einen weiten Bereich von $[0.14, 0.80]$ in dem der Korrelationskoeffizient der Grundgesamtheit vermutet werden kann, die erklärten Varianzen liegen zwischen 2% und 65%.

5.3.3 Linz-Hörsching

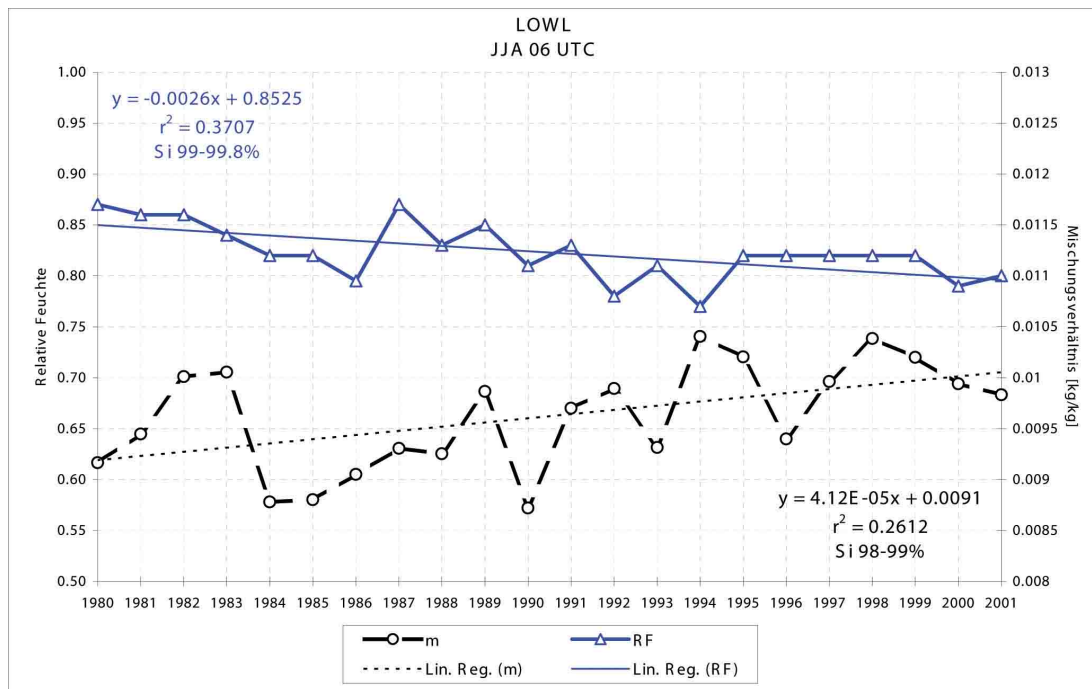


Abbildung 5.29: Flughafen Linz-Hörsching (JJA, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.25.

Im Sommer zum 06 UTC Termin ist am Gitterpunkt Linz-Hörsching ein positiver Trend des Mischungsverhältnisses erkennbar (Abb. 5.29). Der Anstieg des Mischungsverhältnisses um $0.041 g/kg$ pro Jahr ist auf einem Signifikanzniveau von 98 – 99% sehr signifikant und beläuft sich binnen 21 Jahren auf eine Zunahme von rund $0.87 g/kg$. Für den Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.51$ ergibt sich ein Konfidenzintervall von $[0.20, 0.83]$, also erklärten Varianzen zwischen 4% und 68%.

Für den Median der relativen Feuchte ergibt die Regression zu diesem Termin eine Abnahme von 5.5% in 21 Jahren, dieser Rückgang ist laut t-Test auf einem

Niveau von 99 – 99.8% hochsignifikant. Der 95%-ige Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.61$ erstreckt sich in einem Intervall von $[-0.88, -0.34]$, die erklärten Varianzen für die zugehörige Grundgesamtheit liegen zwischen 12% und 77%.

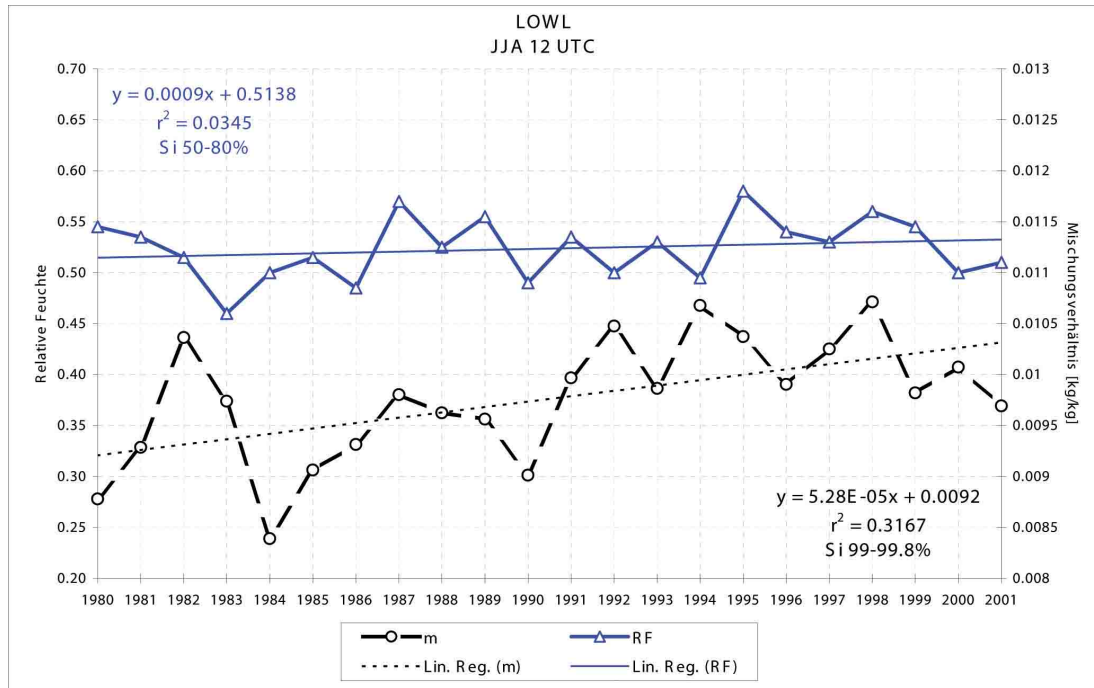


Abbildung 5.30: Flughafen Linz-Hörsching (JJA, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.25.

Wie schon im Frühling zum 12 UTC Termin ist in Linz-Hörsching mit der Zunahme der relativen Feuchte um 1.9% in 21 Jahren ein positiver Trend angedeutet. Zusammen mit den Gitterpunkten Wien-Schwechat und Graz zeigt Linz-Hörsching einen Anstieg der relativen Feuchte zu diesem Termin, dieser Anstieg um 0.09% pro Jahr ist aber statistisch nicht signifikant (Abb. 5.30).

Auch das Mischungsverhältnis zeigt hier einen positiven Trend. Die Zunahme des Feuchtegehalts um 0.053 g/kg pro Jahr ist auf einem Signifikanzniveau von 99 – 99.8% hochsignifikant und beläuft sich binnen 21 Jahren auf 1.11 g/kg . Dies ist der zweitstärkste Anstieg des Mischungsverhältnisses für den Gitterpunkt Linz-Hörsching. Die Berechnung des Vertrauensbereiches zum Korrelationskoeffi-

zienten $r_m = 0.56$ ergibt ein Intervall von $[0.27, 0.86]$ in dem der Korrelationskoeffizient der Grundgesamtheit vermutet werden kann. Die zugehörigen erklärten Varianzen liegen zwischen 7% und 73%.

5.3.4 Wien-Schwechat

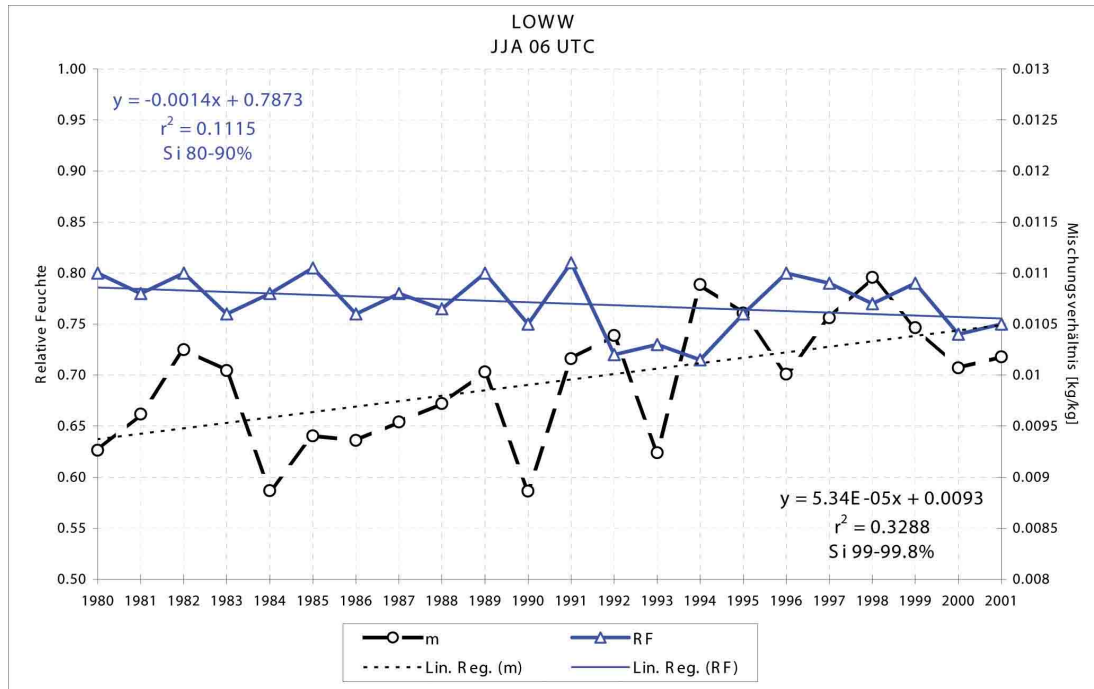


Abbildung 5.31: Flughafen Wien-Schwechat (JJA, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.25.

In den Sommermonaten ist in Wien-Schwechat zum Frühtermin eine deutliche Zunahme des Mischungsverhältnisses und eine Abnahme der relativen Feuchte zu erkennen (Abb. 5.31). Der Rückgang der relativen Feuchte um 0.14% pro Jahr, also 2.9% binnen 21 Jahren, ist nicht signifikant getestet. Der Anstieg des Feuchtegehalts um $0.053 g/kg$ pro Jahr ist auf einem Niveau von 99 – 99.8% hochsignifikant und ergibt eine Zunahme von $1.12 g/kg$ im Verlauf von 21 Jahren. Die Berechnung des Konfidenzintervalls zu $r_m = 0.57$ ergibt für den Grundgesamtheit-Korrelationskoeffizienten ein Bereich von $[0.29, 0.86]$ mit der zugehörigen erklärten Varianz von 8% bis 74%.

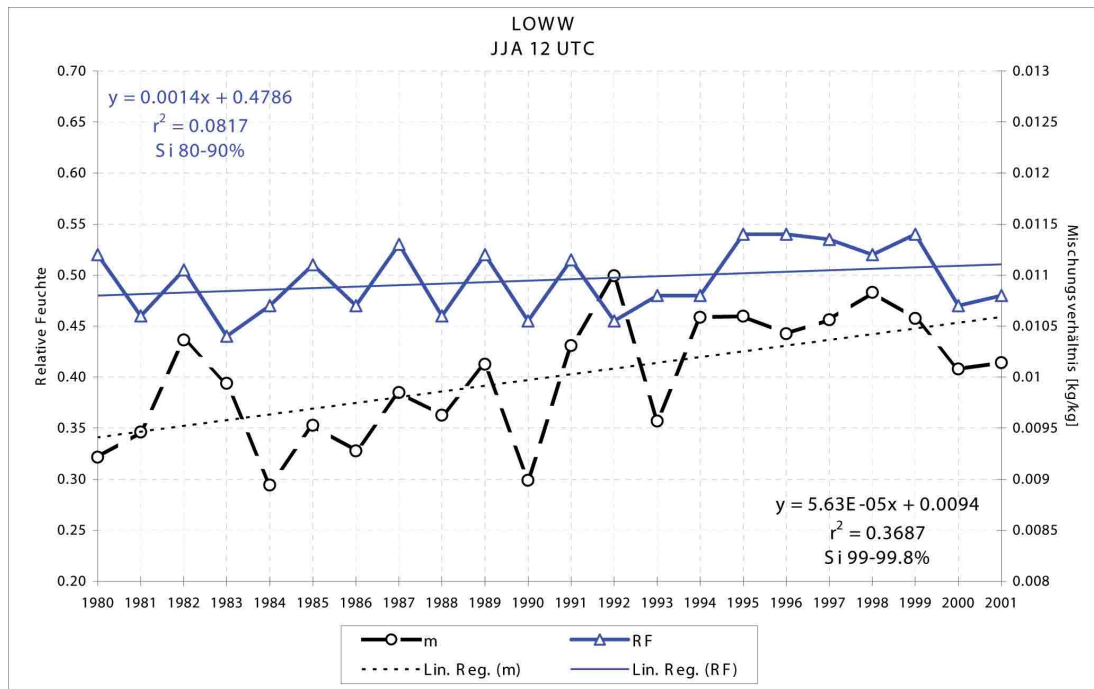


Abbildung 5.32: Flughafen Wien-Schwechat (JJA, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.25.

Der Verlauf der Feuchteparameter zum Mittagstermin ist dem des Gitterpunktes Linz-Hörsching ähnlich und zeigt wie schon im Frühjahr einen Anstieg der relativen Feuchte (Abb. 5.32). Diese Zunahme beläuft sich auf 2.9% in 21 Jahren, ist aber nicht signifikant mit dem t-Test getestet.

Der positive Trend des Mischungsverhältnisses, mit einer Zunahme des Feuchtegehalts um $0.056 g/kg$ pro Jahr, ist auf einem Signifikanzniveau von 99 – 99.8% hochsignifikant und ergibt einen Anstieg um $1.18 g/kg$ in 21 Jahren. Dies ist der stärkste Anstieg des Mischungsverhältnisses für den Gitterpunkt Wien-Schwechat unter den betrachteten Terminen. Die Berechnung des Mutungsbereichs zum Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.61$ ergibt ein Intervall von $[0.34, 0.88]$. Die erklärten Varianzen der zugehörigen Grundgesamtheit liegen zwischen 11% und 77%.

5.3.5 Graz

In den Sommermonaten zum Frühtermin zeigt sich am Gitterpunkt Graz ein positiver Trend des Mischungsverhältnisses (Abb. 5.33). Die Zunahme des Mi-

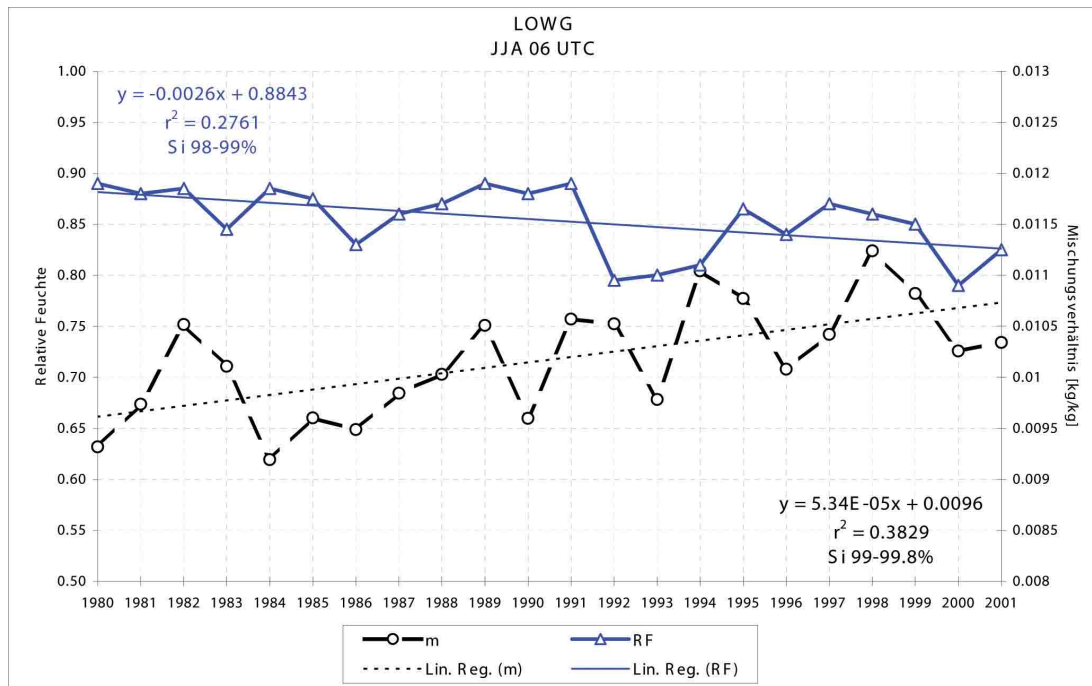


Abbildung 5.33: Flughafen Graz (JJA, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.25.

schungsverhältnisses um $0.053 g/kg$ pro Jahr ist auf einem Signifikanzniveau von 99 – 99.8% hochsignifikant und beläuft sich wie schon am Gitterpunkt Wien-Schwechat auf einen Anstieg des Feuchtegehalts um $1.12 g/kg$ innerhalb von 21 Jahren. Für den Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.62$ ergibt sich ein Konfidenzintervall von $[0.35, 0.88]$ und damit erklärten Varianzen zwischen 13% und 78%.

Die Regression des Median der relativen Feuchte ergibt zu diesem Termin eine Abnahme von rund 5.5% in 21 Jahren, dieser Rückgang ist laut t-Test auf einem Niveau von 98 – 99% sehr signifikant. Der 95%-ige Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.53$ erstreckt sich in einem Intervall von $[-0.84, -0.22]$, die erklärten Varianzen der zugehörigen Grundgesamtheit liegen zwischen 5% und 70%.

Zum Mittagstermin ist in Graz, wie schon bei den Gitterpunkten Linz-Hörsching und Wien-Schwechat, ein Anstieg der relativen Feuchte angedeutet, allerdings ist dieser wesentlich schwächer ausgeprägt (Abb. 5.34). Die Zunahme beläuft sich auf 0.2% in 21 Jahren und ist nicht signifikant getestet.

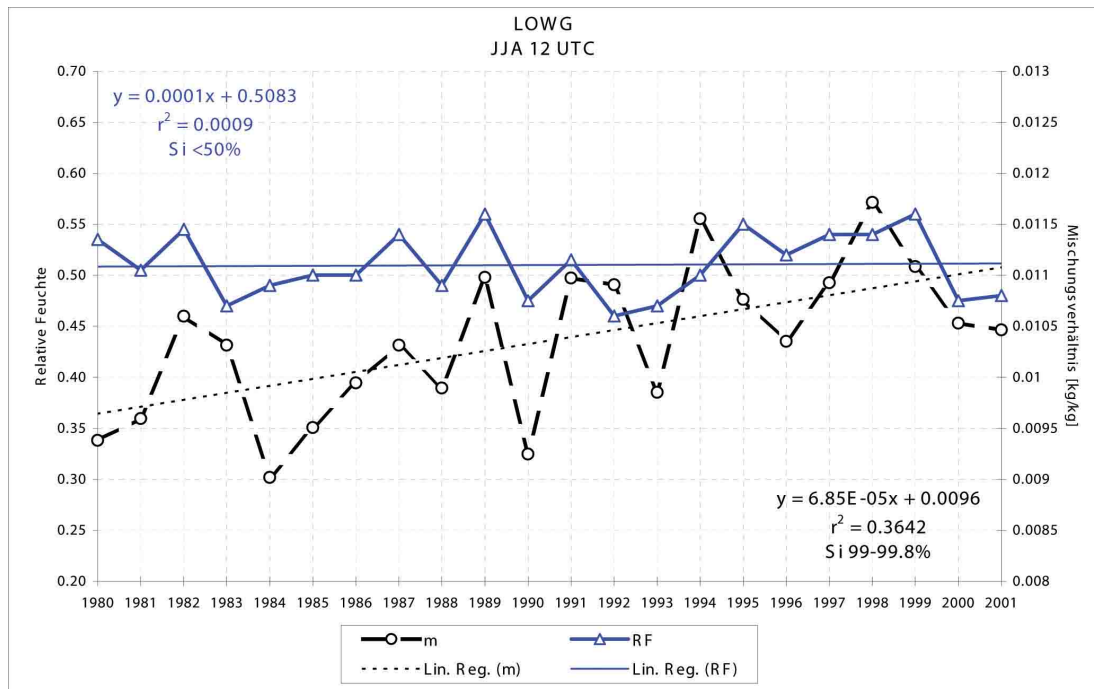


Abbildung 5.34: Flughafen Graz (JJA, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.25.

Der positive Trend des Mischungsverhältnisses, mit einer Zunahme des Feuchtegehalts um rund $0.069 g/kg$ pro Jahr, ist auf einem Signifikanzniveau von 99 – 99.8% hochsignifikant und ergibt einen Anstieg um $1.44 g/kg$ im Verlauf von 21 Jahren. Dieser Anstieg des Mischungsverhältnisses am Gitterpunkt Graz ist der stärkste unter allen betrachteten Terminen und Gitterpunkten. Die Berechnung des Mutungsbereichs zum Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.60$ ergibt ein Intervall von $[0.33, 0.88]$, die erklärten Varianzen der zugehörigen Grundgesamtheit liegen zwischen 11% und 77%.

5.3.6 Klagenfurt

Ähnlich wie am Gitterpunkt Innsbruck gestaltet sich der Verlauf der Feuchte- maße in Klagenfurt während der Sommermonate um 06 UTC (Abb. 5.35). Es ist ein stark negativer Trend der relativen Feuchte und ein positiver Trend des Mischungsverhältnisses zu erkennen. Der Anstieg des Mischungsverhältnisses um $0.16 g/kg$ im Verlauf von 21 Jahren ist nicht signifikant getestet, die Prüfung des

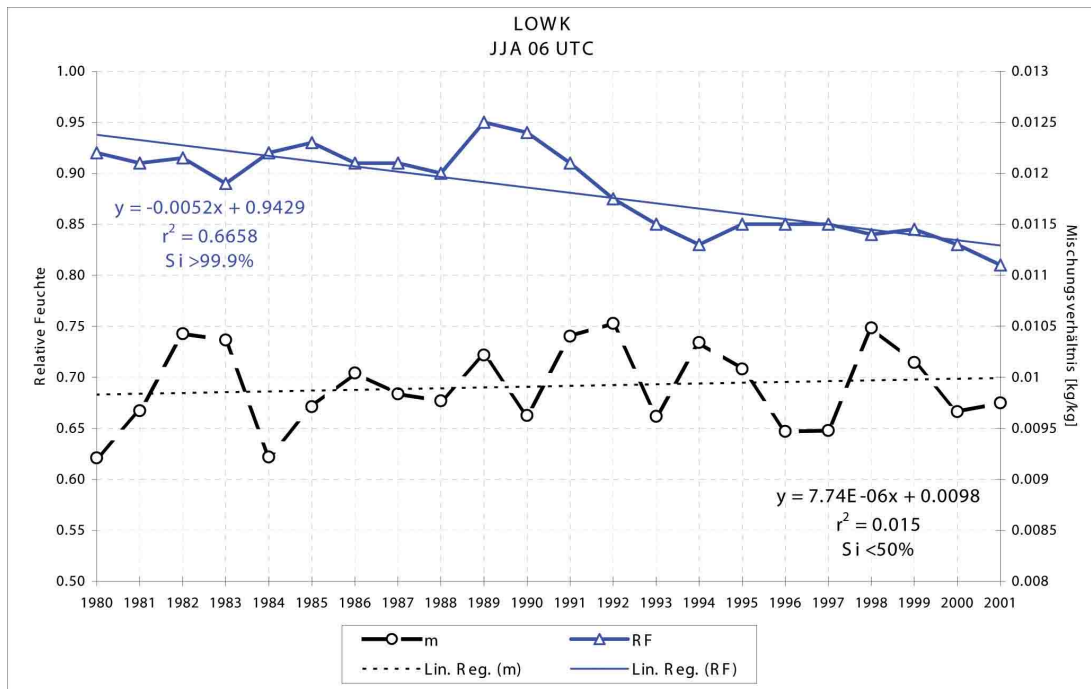


Abbildung 5.35: Flughafen Klagenfurt (JJA, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.25.

Rückgangs der relativen Feuchte um 10.9% in 21 Jahren ergibt einen hochsignifikanten Zusammenhang auf einem Niveau von $Si > 99.9\%$.

Der 95%-ige Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.82$ ergibt ein Intervall von $[-0.96, -0.67]$ in dem der Korrelationskoeffizient der zugehörigen Grundgesamtheit angenommen werden kann. Der Anteil der erklärten Varianz ist mit 45% bis 92% sehr hoch.

Auch um 12 UTC weist der Gitterpunkt Klagenfurt Parallelen zu Innsbruck auf. Beide Orte verzeichnen zu diesem Termin ihren geringsten Rückgang der relativen Feuchte und der Gitterpunkt Klagenfurt zusätzlich seinen größten Anstieg des Feuchtegehalts (Abb. 5.36).

Der Anstieg des Mischungsverhältnisses um $0.03 g/kg$ pro Jahr, in Summe $0.63 g/kg$ in 21 Jahren, ist nicht signifikant getestet. Das leichte Absinken der relativen Feuchte um 0.22% pro Jahr ist auf einem Niveau von 95 – 98% sehr signifikant und ergibt binnen 21 Jahren einen Rückgang um 4.6%. Der Vertrauensbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.46$ liegt

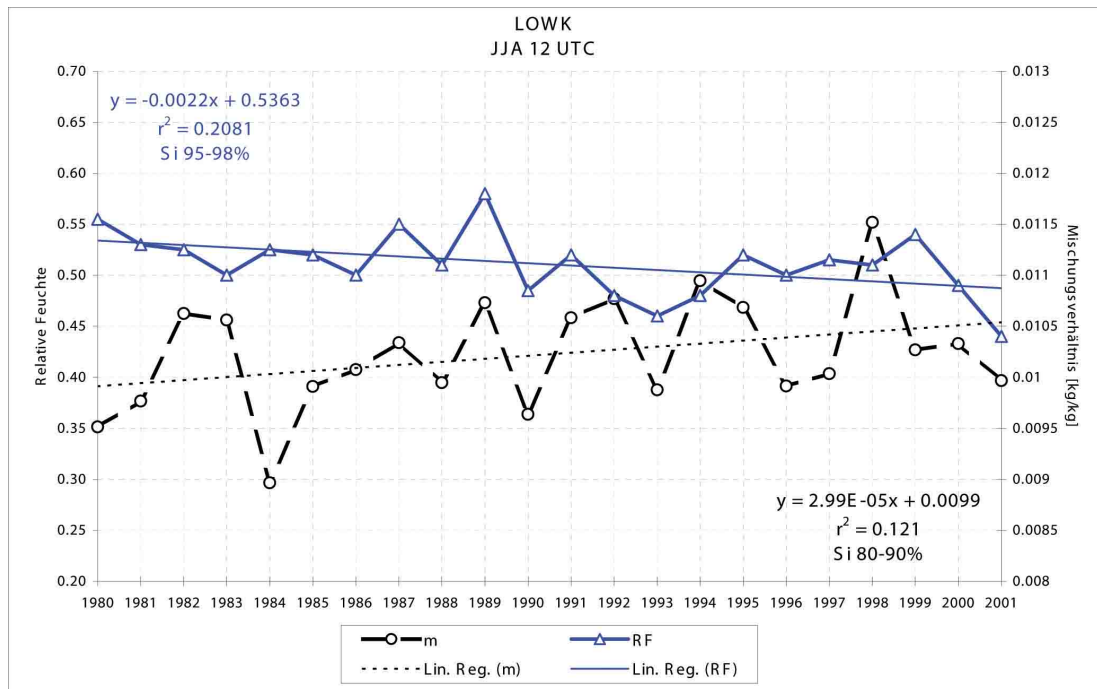


Abbildung 5.36: Flughafen Klagenfurt (JJA, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.25.

im Intervall $[-0.79, -0.12]$, der Anteil der erklärten Varianz damit zwischen 1% und 63%.

5.4 Herbst

5.4.1 Innsbruck

Im Herbst zeigt der Gitterpunkt Innsbruck um 06 UTC wiederum einen deutlich negativen Trend der relativen Feuchte. Im Gegensatz zu den anderen Terminen ist hier auch eine Abnahme des Mischungsverhältnisses angedeutet, diese ist aber mit 0.001 g/kg in 21 Jahren äußerst gering und statistisch nicht signifikant (vgl. Abb. 5.37). Die Prüfung des Rückgangs der relativen Feuchte um 12.6% innerhalb von 21 Jahren ergibt einen hochsignifikanten Zusammenhang auf einem Niveau von $Si > 99.9\%$.

Der Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.85$ ergibt ein Intervall von $[-0.97, -0.73]$, die durch das Regressionsmo-

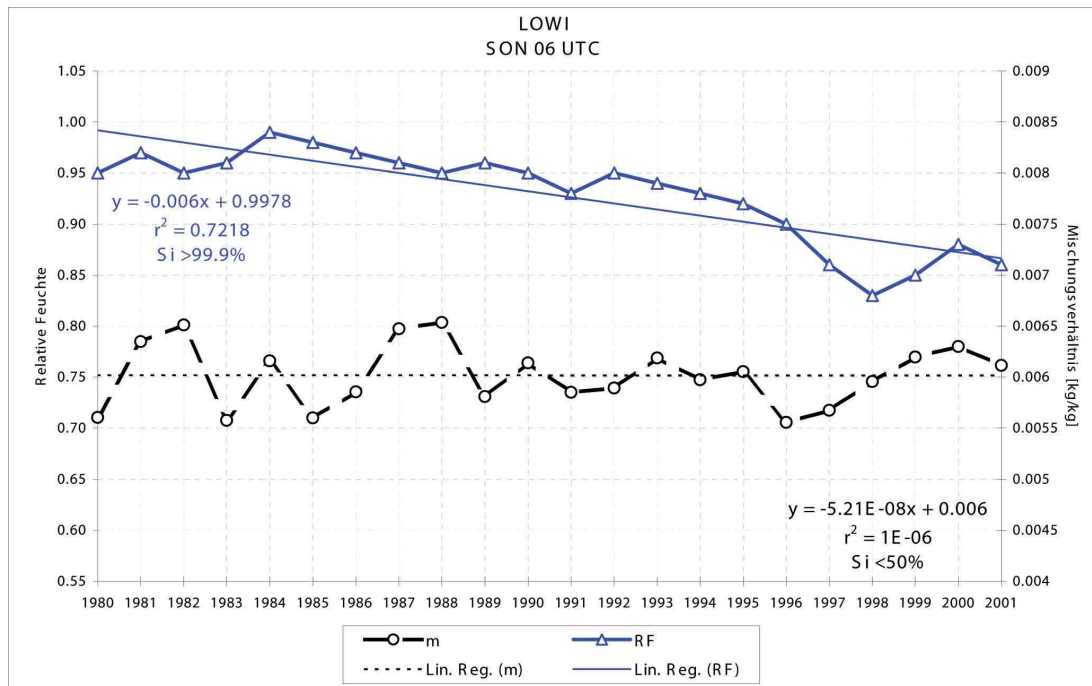


Abbildung 5.37: Flughafen Innsbruck (SON, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate), auf der Abszisse ist das Jahr aufgetragen. Zu den Datenreihen sind jeweils die Regressionsgerade, die Geradengleichung, das Bestimmtheitsmaß r^2 und das Signifikanzniveau Si in Prozent geplottet.

dell erklärten Varianzen der zugehörigen Grundgesamtheit liegen damit zwischen 53% und 94%.

Die Regressionsgerade des Median des Mischungsverhältnisses auf Abbildung 5.38 weist, wie schon die auf Abbildung 5.37, keine markante Steigung auf. Damit stellt der Herbst für den Gitterpunkt Innsbruck die Jahreszeit mit der geringsten Tendenz im Verlauf des Feuchtegehalts dar.

Der negative Trend der relativen Feuchte, mit einem Rückgang um rund 6.1% im Verlauf von 21 Jahren, ist auf einem Niveau von 95 – 98% sehr signifikant. Die Berechnung des Vertrauensbereiches ergibt für den Korrelationskoeffizienten $r_{RF} = -0.43$ ein Intervall von $[-0.78, -0.08]$, die erklärte Varianz der zugehörigen Grundgesamtheit liegt zwischen 1% und 60%.

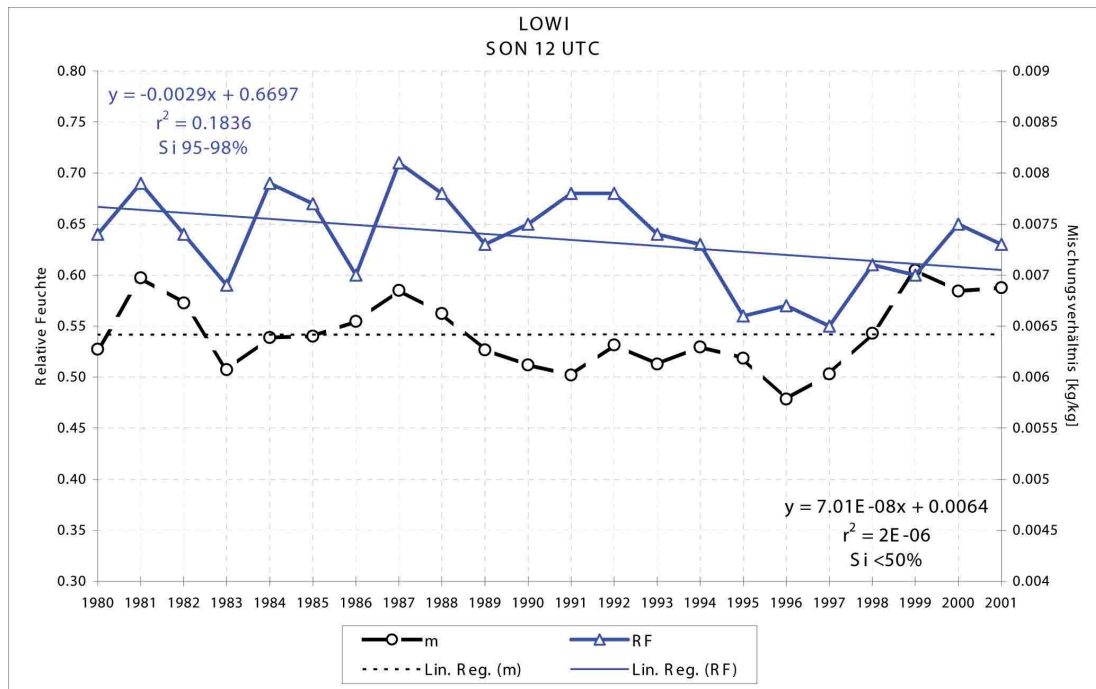


Abbildung 5.38: Flughafen Innsbruck (SON, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.37.

5.4.2 Salzburg

Eine deutliche Zunahme des Mischungsverhältnisses und Abnahme der relativen Feuchte zeigt der Gitterpunkt Salzburg zum Frühtermin im Herbst (vgl. Abb. 5.39). Der Trend der relativen Feuchte ist auf einem Signifikanzniveau $Si > 99.9\%$ hochsignifikant, der des Mischungsverhältnisses auf einem Niveau von 95 – 98% sehr signifikant.

Der positive Trend des Mischungsverhältnisses ergibt, mit einem Anstieg von 0.031 g/kg pro Jahr, eine Zunahme des Feuchtegehalts um rund 0.66 g/kg binnen 21 Jahren. Für den Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.44$ ergibt sich ein Mutungsbereich von $[0.10, 0.78]$, mit erklärten Varianzen zwischen 1% und 62%.

Für den Median der relativen Feuchte ergibt die lineare Regression eine Abnahme von 6.3% in 21 Jahren. Das Konfidenzintervall des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.79$ erstreckt sich in einen Bereich von $[-0.95, -0.62]$, die erklärten Varianzen der zugehörigen Grundgesamtheit liegen zwischen 39% und 90%.

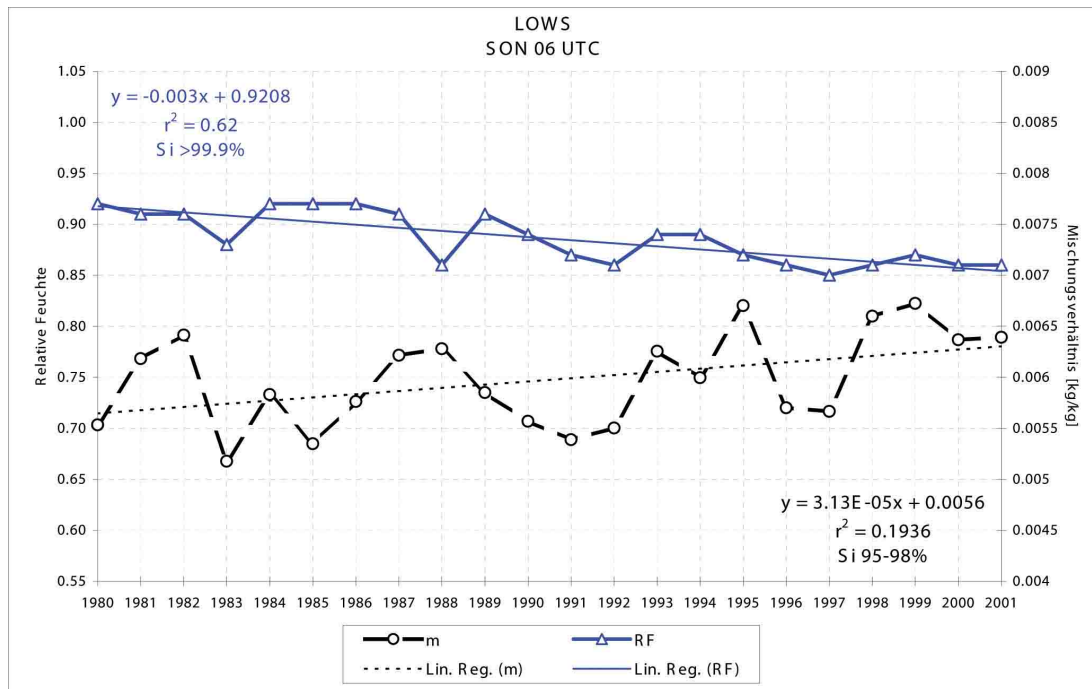


Abbildung 5.39: Flughafen Salzburg (SON, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.37.

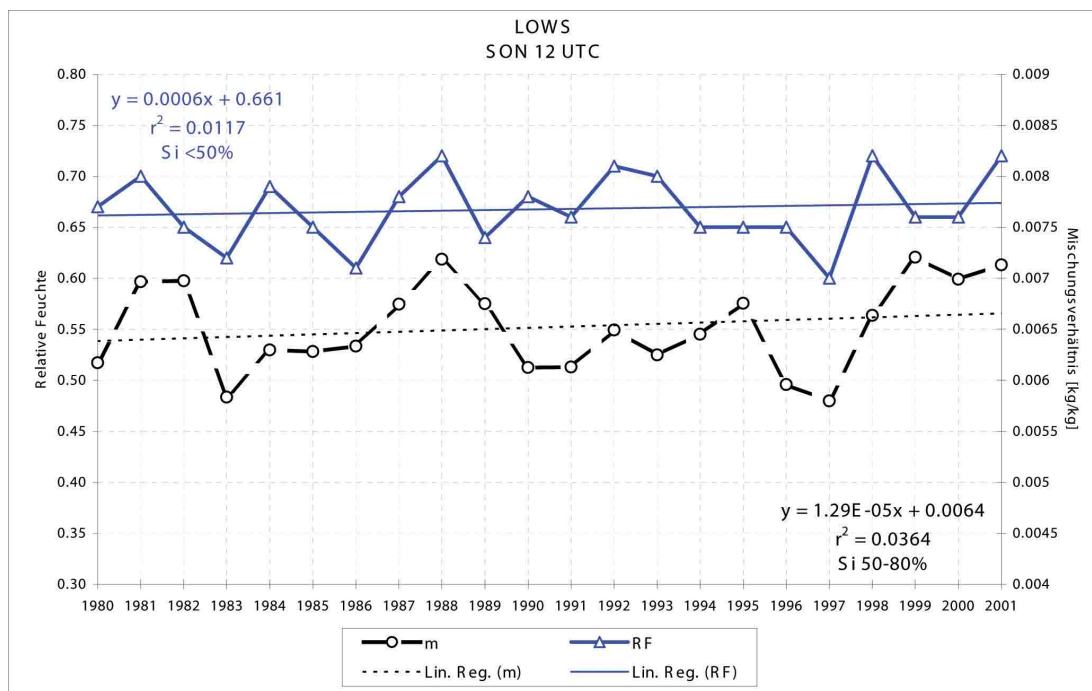


Abbildung 5.40: Flughafen Salzburg (SON, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.37.

Um 12 UTC zeigt der Verlauf des Mischungsverhältnisses und der der relativen Feuchte eine positive Tendenz (vgl. Abb. 5.40). Dieser Termin ist der einzige an dem Salzburg einen Anstieg der relativen Feuchte aufweist, diese Zunahme um 0.06% pro Jahr ist jedoch nicht signifikant getestet. Zusätzlich verzeichnet dieser Gitterpunkt hier, mit 0.013 g/kg pro Jahr, seinen geringsten Anstieg des Feuchtegehalts, aber auch dieser Trend ist nicht signifikant.

5.4.3 Linz-Hörsching

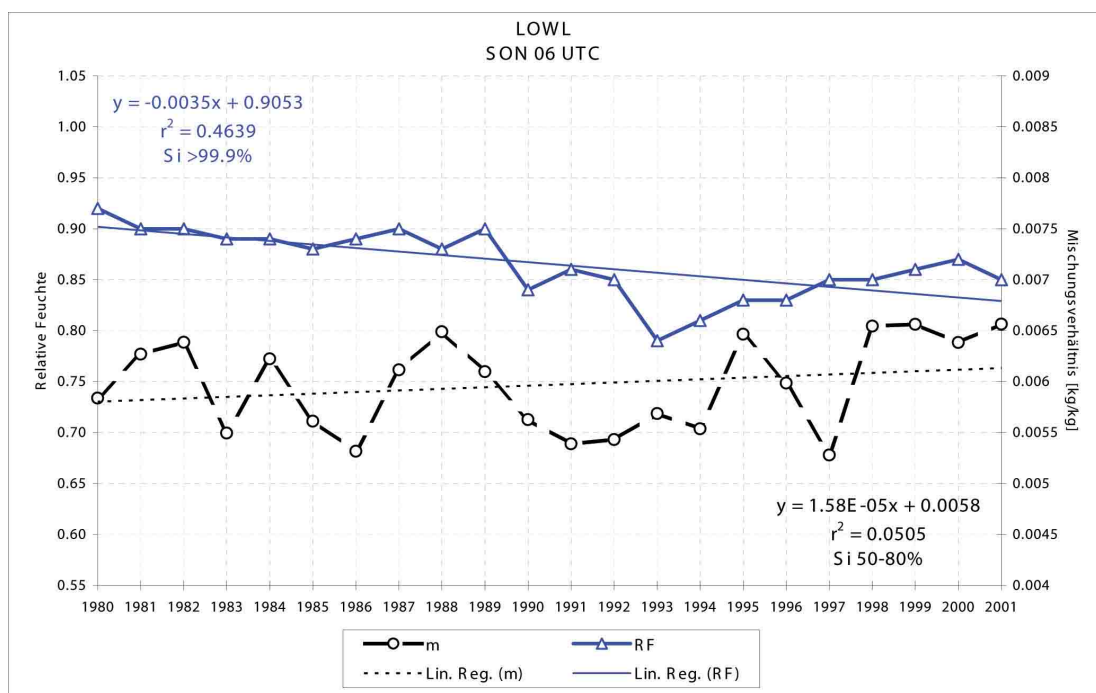


Abbildung 5.41: Flughafen Linz-Hörsching (SON, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.37.

Auch im Herbst ist zum 06 UTC Termin eine Zunahme des Feuchtegehalts und eine Abnahme der relativen Feuchte am Gitterpunkt Linz-Hörsching zu erkennen (vgl. Abb. 5.41). Die negative Tendenz der relativen Feuchte, mit einem Rückgang um 0.35% pro Jahr, ist auf einem Niveau von $Si > 99.9\%$ hochsignifikant. Der Anstieg des Mischungsverhältnisses um 0.33 g/kg in 21 Jahren ist laut t-Test nicht signifikant.

Der 95%-ige Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.68$ ergibt ein Intervall von $[-0.91, -0.45]$ in dem der Korrelationskoeffizient der Grundgesamtheit vermutet werden kann, die daraus resultierenden erklärten Varianzen bewegen sich zwischen 20% und 83%.

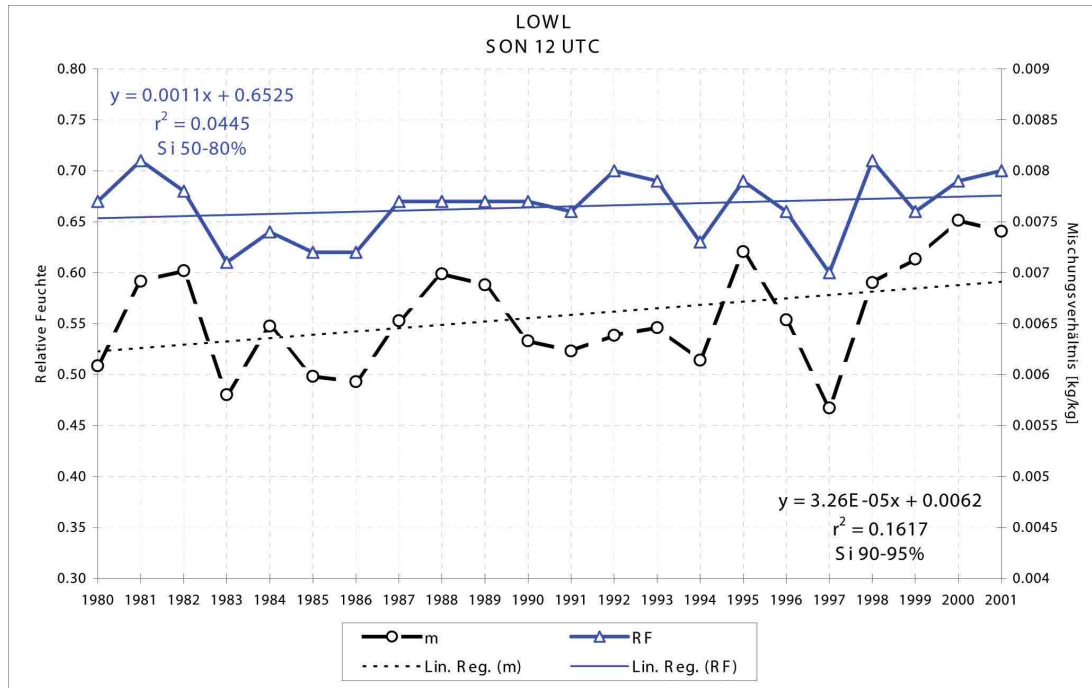


Abbildung 5.42: Flughafen Linz-Hörsching (SON, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.37.

In Abbildung 5.42 ist, wie schon im Frühling und Sommer, ein positiver Trend der relativen Feuchte, mit der Zunahme um 2.3% innerhalb von 21 Jahren, angedeutet. Nach dem Gitterpunkt Wien-Schwechat zeigt Linz-Hörsching im Herbst den größten Anstieg der relativen Feuchte, dieser ist aber nicht signifikant getestet.

Auch das Mischungsverhältnis weist zu diesem Termin einen positiven Trend auf. Der Anstieg des Feuchtegehalts um $0.033 g/kg$ pro Jahr ist auf einem Niveau von 90 – 95% signifikant und beläuft sich innerhalb von 21 Jahren auf eine Zunahme um $0.68 g/kg$. Die Berechnung des Vertrauensbereiches zum Korrelationskoeffizienten $r_m = 0.40$ ergibt ein Intervall von $[0.04, 0.76]$, die erklärten

Varianzen der zugehörigen Grundgesamtheit liegen zwischen 0% und 58%. Damit ist das Ergebnis der Korrelationsrechnung kaum aussagekräftig.

5.4.4 Wien-Schwechat

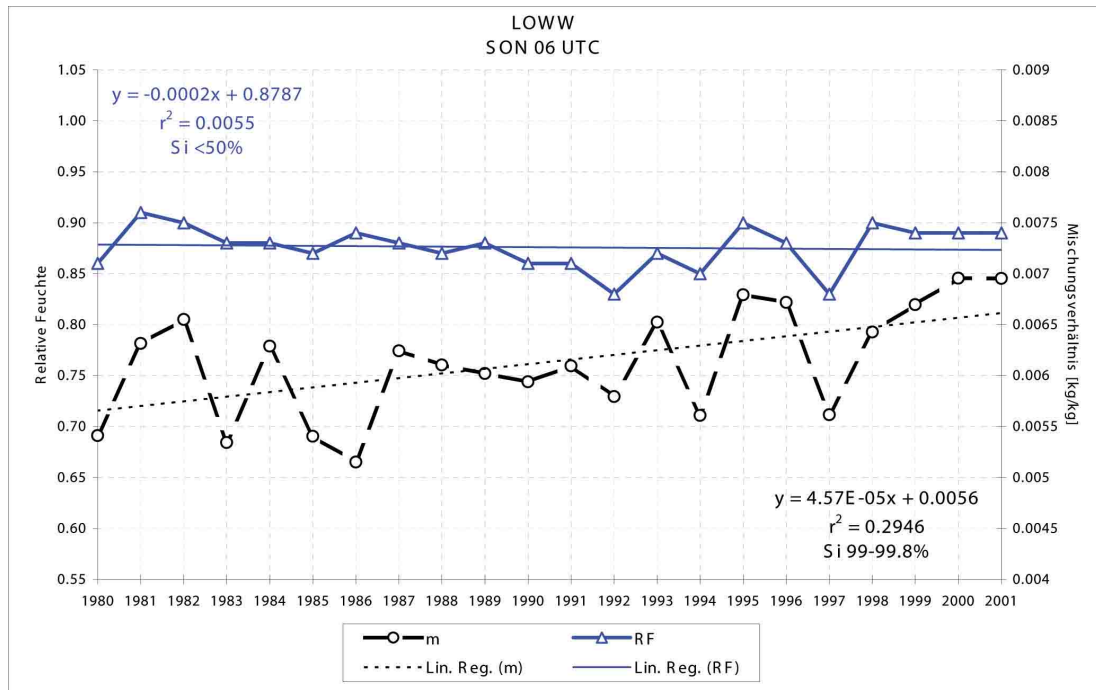


Abbildung 5.43: Flughafen Wien-Schwechat (SON, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.37.

Eine deutliche Zunahme des Mischungsverhältnisses und eine leichte Abnahme der relativen Feuchte ist in Wien-Schwechat im Herbst zum Frühtermin zu erkennen (Abb. 5.43). Der Rückgang der relativen Feuchte um 0.02% pro Jahr ergibt in 21 Jahren eine Abnahme um rund 0.4% und ist nicht signifikant getestet. Der Anstieg des Mischungsverhältnisses um 0.046 g/kg pro Jahr ist mit einem Signifikanzniveau von 99–99.8% hochsignifikant, und beläuft sich im Verlauf von 21 Jahren auf eine Zunahme um 0.96 g/kg . Die Berechnung des Konfidenzintervalls zu $r_m = 0.54$ ergibt für den Grundgesamtheit-Korrelationskoeffizienten ein Bereich von $[0.24, 0.84]$ mit der zugehörigen erklärten Varianz von 6% bis 71%.

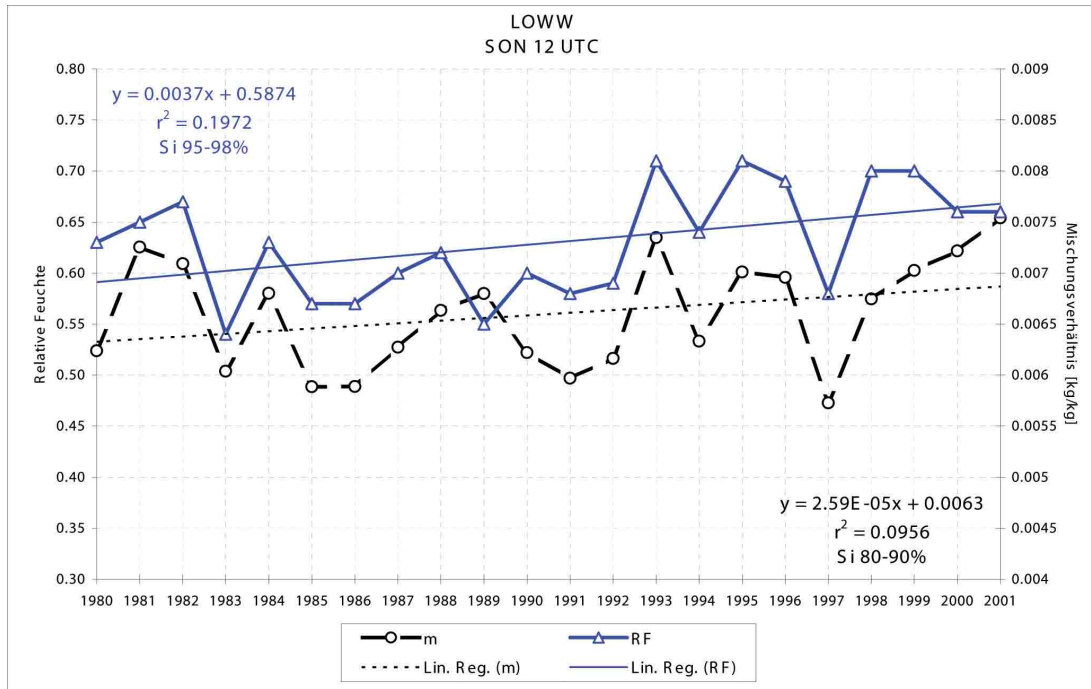


Abbildung 5.44: Flughafen Wien-Schwechat (SON, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau $\triangle$, linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.37.

Zum Mittagstermin zeigt Wien-Schwechat einen markanten Anstieg der relativen Feuchte (vgl. Abb. 5.44). Der positive Trend zu diesem Termin stellt nicht nur für diesen Gitterpunkt die größte Zunahme der relativen Feuchte dar, sondern ist der größte verzeichnete Anstieg der relativen Feuchte unter allen betrachteten Gitterpunkten. Die Zunahme beläuft sich auf rund 7.8% in 21 Jahren und ist auf einem Niveau von 95 – 98% sehr signifikant. Der 95%-ige Mutungsbereich des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = 0.44$ ergibt ein Intervall von $[0.10, 0.79]$ in dem der Korrelationskoeffizient der Grundgesamtheit vermutet werden kann, die erklärten Varianzen bewegen sich zwischen 1% und 62%.

Der positive Trend des Mischungsverhältnisses, mit einer Zunahme des Feuchtegehalts um 0.54 g/kg binnen 21 Jahren, ist nicht signifikant getestet.

5.4.5 Graz

Im Herbst um 06 UTC zeigt sich in Graz wiederum ein negativer Trend der relativen Feuchte und ein positiver Trend des Mischungsverhältnisses (vgl. Abb.

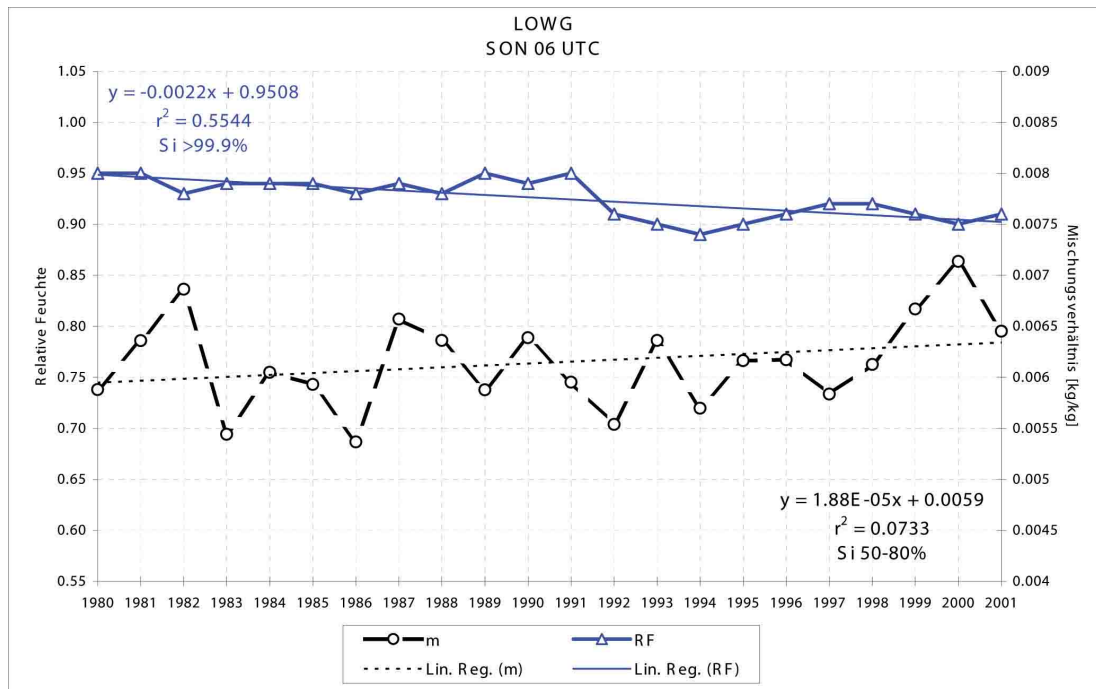


Abbildung 5.45: Flughafen Graz (SON, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.37.

5.45). Die Abnahme der relativen Feuchte um 0.22% pro Jahr, ist auf einem Niveau von $Si > 99.9\%$ hochsignifikant, der Anstieg des Mischungsverhältnisses um 0.019 g/kg pro Jahr ist nicht signifikant getestet.

Das Konfidenzintervall des Korrelationskoeffizienten der relativen Feuchte $r_{RF} = -0.74$ umspannt einen Bereich von $[-0.94, -0.55]$, die erklärten Varianzen für die Grundgesamtheit bewegen sich zwischen 31% und 87%.

Zum Mittagstermin weist Graz einen positiven Trend sowohl des Mischungsverhältnisses also auch der relativen Feuchte auf (vgl. Abb. 5.46). Der leichte Anstieg der relativen Feuchte ist wie schon im Sommer um 12 UTC nicht signifikant, stellt aber mit 1.5% in 21 Jahren die größte Zunahme unter den betrachteten Terminen für den Gitterpunkt Graz dar. Der positive Trend des Mischungsverhältnisses, mit einer Zunahme des Feuchtegehalts um 0.37 g/kg binnen 21 Jahren, ist ebenfalls nicht signifikant getestet.

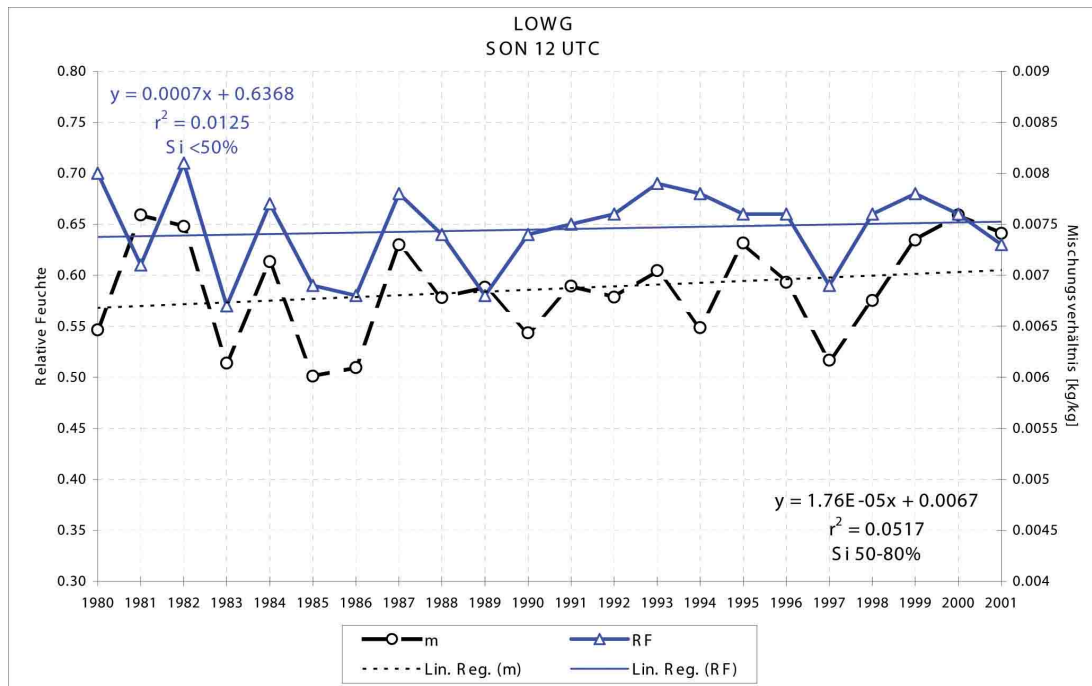


Abbildung 5.46: Flughafen Graz (SON, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.37.

5.4.6 Klagenfurt

Wie bereits in den Wintermonaten zeigt Klagenfurt zum Frühtermin im Herbst einen negativen Trend des Mischungsverhältnisses (vgl. Abb. 5.47). Unter den untersuchten Gitterpunkten und Terminen ist dieser mit $0.21 g/kg$ in 21 Jahren der zweitstärkste Rückgang des Feuchtegehalts, hinter dem in Klagenfurt im Winter zum 06 UTC Termin. Das Absinken des Mischungsverhältnisses ist laut t-Test allerdings nicht signifikant.

Die Prüfung des Trends der relativen Feuchte ergibt einen hochsignifikanten Zusammenhang mit einem Signifikanzniveau $Si > 99.9\%$. Die Berechnung des Konfidenzintervalls zu $r_{RF} = -0.91$ ergibt für den Korrelationskoeffizienten der Grundgesamtheit einen Bereich von $[-0.98, -0.84]$, damit liegt die erklärte Varianz zwischen 70% und 97%. Die Regressionsgerade zeigt ein Absinken der relativen Feuchte um 0.65% pro Jahr, und damit eine Abnahme der relativen Feuchte um 13.7% im Verlauf von 21 Jahren.

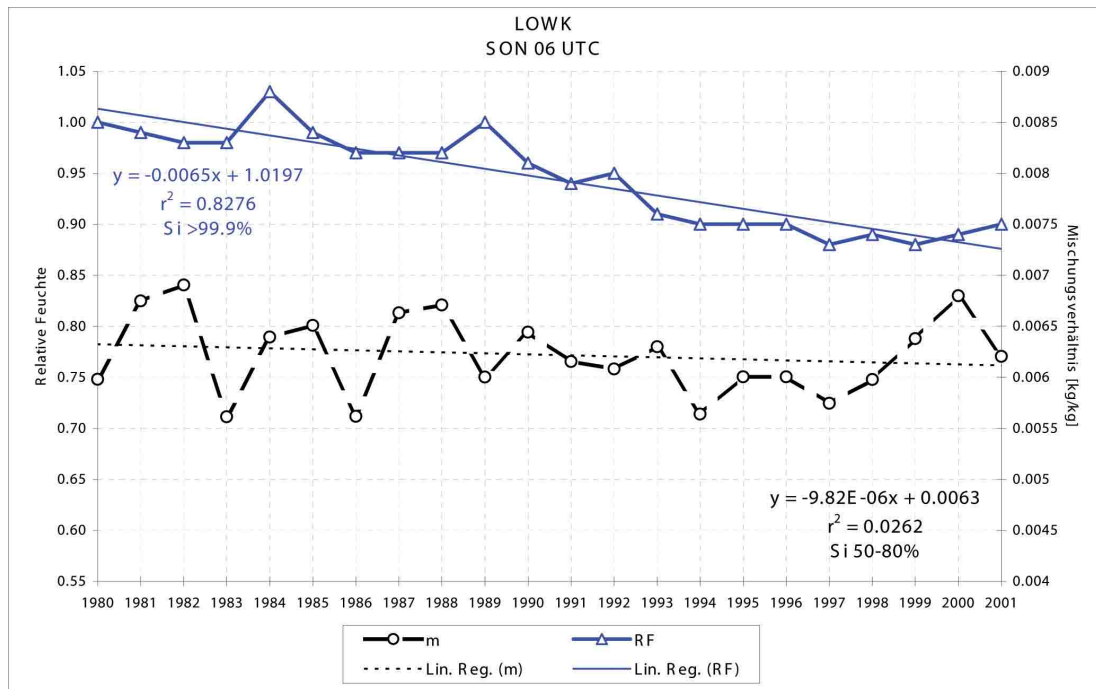


Abbildung 5.47: Flughafen Klagenfurt (SON, 06 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.37.

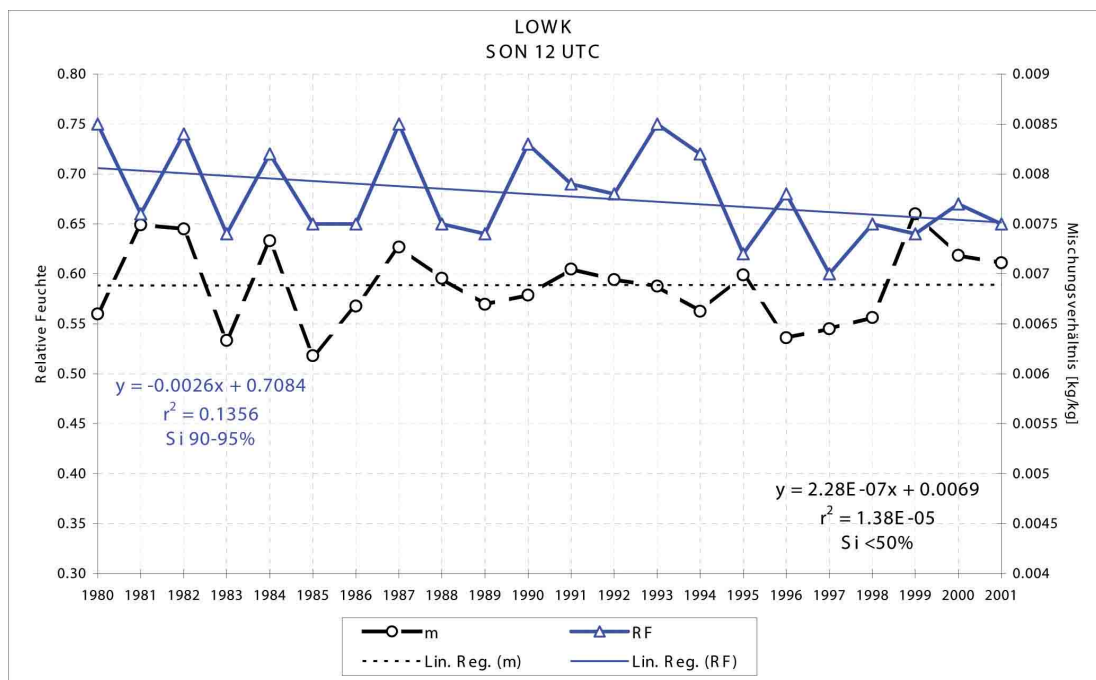


Abbildung 5.48: Flughafen Klagenfurt (SON, 12 UTC)

Verlauf des Medians der relativen Feuchte RF (blau Δ , linke Ordinate) und des Mischungsverhältnisses m [kg/kg] (schwarz $\circ$, rechte Ordinate). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Abb. 5.37.

Die Regressionsgerade des Median des Mischungsverhältnisses auf Abbildung 5.48 weist keine markante Tendenz auf. Der Anstieg des Feuchtegehalts um rund 0.01 g/kg im Verlauf von 21 Jahren ist nicht signifikant.

Der negative Trend der relativen Feuchte, mit einem Rückgang um 5.5% innerhalb von 21 Jahren, ist auf einem Niveau von 90–95% signifikant. Die Berechnung des Vertrauensbereiches ergibt für den Korrelationskoeffizienten $r_{RF} = -0.37$ ein Intervall von $[-0.74, 0.00]$, die erklärte Varianz der zugehörigen Grundgesamtheit liegt damit zwischen 0% und 54%.

6 Zusammenfassung und Schluss

Zum Abschluss sollen hier die Ergebnisse aus Kapitel 5 zusammengefasst und interpretiert werden.

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Absolutwerte der in Kapitel 5 gezeigten Feuchtemaße nur Näherungswerte sind und dass diese nicht für eine weitere Verarbeitung, bei der der Betrag dieser Parameter von Bedeutung ist, geeignet sind. Durch die univariate Vorgehensweise des VERA Analyseverfahrens bei der Bias-Korrektur (siehe Abschnitt 4.2) ist es nicht ohne Weiteres möglich, aus nur reduziertem Druck, potentieller und äquivalentpotentieller Temperatur direkt auf einen genauen Feuchtwert zu schließen. Speziell die Werte der relativen Feuchte in den kälteren Jahreszeiten können sich deutlich vom wahren Wert unterscheiden, auf die Trends hat dies aber einen vernachlässigbaren Einfluss.

Die Tendenzen des Mischungsverhältnisses und der relativen Feuchte, die sich aus der Trendanalyse der Daten der Jahre 1980-2001 ergeben haben, sind in den folgenden Tabellen noch einmal dargestellt.

Die statistische Untersuchung des Mischungsverhältnisses zeigt in den Wintermonaten beinahe an allen untersuchten Gitterpunkten, sowohl zum 06 UTC als auch zum 12 UTC Termin, eine steigende Tendenz. Mit durchwegs sehr niedrigen Korrelationskoeffizienten sind die linearen Zusammenhänge aber äußerst schwach ausgeprägt.

Die stärksten und signifikant getesteten Anstiege weisen die Gitterpunkte nördlich der Alpen auf. Zum Frühtermin ist das der Gitterpunkt Salzburg und zum Mittagstermin die Gitterpunkte Linz-Hörsching und Salzburg.

Die betrachteten Punkte im Süden Österreichs stellen sich anders dar. Am schwächsten fallen die Anstiege des Mischungsverhältnisses zu beiden Terminen in Graz aus. Einen Sonderfall stellt Klagenfurt dar. Dort ergibt die Trendanalyse sogar eine Abnahme des Feuchtegehalts, womit dieser Gitterpunkt eine markante Ausnahme darstellt. Ausschließlich für Klagenfurt zeigt die lineare Regression des Mischungsverhältnisses jemals eine relevante, fallende Tendenz, wobei der Rückgang zum Frühtermin um 0.3 g/kg im Verlauf von 20 Jahren den stärksten darstellt. Die Trends des Mischungsverhältnisses an diesen beiden Gitterpunkten sind jedoch statistisch nicht signifikant.

Tabelle 6.1: Trends des Mischungsverhältnisses um 06 UTC

Trends der Jahre 1980-2001 der Mediane des Mischungsverhältnisses um 06 UTC in g/kg . Fallende Tendenzen sind rot, signifikant mit dem t-Test geprüfte Tendenzen fett dargestellt.

06 UTC	LOWI	LOWS	LOWL	LOWW	LOWG	LOWK
Winter	0.23	0.42	0.20	0.21	0.03	-0.30
Frühling	0.38	0.86	0.81	0.91	0.80	0.30
Sommer	0.51	0.81	0.87	1.12	1.12	0.16
Herbst	-0.00	0.66	0.33	0.96	0.39	-0.21

Tabelle 6.2: Trends der relativen Feuchte um 06 UTC

Trends der Jahre 1980-2001 der Mediane der relativen Feuchte um 06 UTC in Prozent. Fallende Tendenzen sind rot, signifikant mit dem t-Test geprüfte Tendenzen fett dargestellt.

06 UTC	LOWI	LOWS	LOWL	LOWW	LOWG	LOWK
Winter	-15.4	-8.0	-6.4	-0.2	-6.4	-14.0
Frühling	-14.5	-5.3	-7.8	-5.5	-5.9	-12.6
Sommer	-11.3	-5.9	-5.5	-2.9	-5.5	-10.9
Herbst	-12.6	-6.3	-7.4	-0.4	-4.6	-13.7

Betrachtet man die Entwicklung der relativen Feuchte in der Wintersaison, ist auffällig, dass die Steigung der Regressionsgeraden aller untersuchten Gitterpunkte, sowohl um 06 UTC als auch um 12 UTC, negativ ist.

Die Punkte Innsbruck und Klagenfurt zeigen dabei zu beiden Terminen die größte Abnahme der relativen Feuchte, welche auch signifikant mit dem t-Test getestet ist. Zusätzlich weisen die hohen Korrelationskoeffizienten auf einen ausgeprägten linearen Trend hin. Der Rückgang um 17.4% in 20 Jahren zum Mittagstermin in Innsbruck stellt das stärkste gefundene Absinken der relativen Feuchte unter allen Gitterpunkten und in allen Jahreszeiten dar. Der negative Trend der relativen Feuchte des Gitterpunkt Salzburg liegt in der kalten Jahreszeit zu beiden Terminen im Vergleich im Mittelfeld. Diese negativen Tendenzen sind aber ebenfalls durch eine moderate bis starke und signifikant getestete Korrelation statistisch gut abgesichert.

Nur schwache lineare Zusammenhänge zeigen hingegen die übrigen Gitterpunkte. Die geringste, allerdings nicht signifikant getestete, Abnahme der relativen Feuchte weist zu beiden Terminen der Gitterpunkt Wien-Schwechat auf.

Tabelle 6.3: Trends des Mischungsverhältnisses um 12 UTC

Trends der Jahre 1980-2001 der Mediane des Mischungsverhältnisses um 12 UTC in g/kg . Fallende Tendenzen sind rot, signifikant mit dem t-Test geprüfte Tendenzen fett dargestellt.

12 UTC	LOWI	LOWS	LOWL	LOWW	LOWG	LOWK
Winter	0.23	0.42	0.51	0.35	0.17	-0.01
Frühling	0.28	0.63	1.30	0.98	0.78	0.49
Sommer	0.35	0.81	1.11	1.18	1.44	0.63
Herbst	0.00	0.27	0.68	0.54	0.37	0.00

Tabelle 6.4: Trends der relativen Feuchte um 12 UTC

Trends der Jahre 1980-2001 der Mediane der relativen Feuchte um 12 UTC in Prozent. Fallende Tendenzen sind rot, signifikant mit dem t-Test geprüfte Tendenzen fett dargestellt.

12 UTC	LOWI	LOWS	LOWL	LOWW	LOWG	LOWK
Winter	-17.4	-9.4	-4.6	-0.1	-6.4	-16.4
Frühling	-9.2	-2.1	3.4	2.5	-3.8	-6.9
Sommer	-4.2	-1.1	1.9	2.9	0.2	-4.6
Herbst	-6.1	1.3	2.3	7.8	1.5	-5.5

Der Winter ist die Jahreszeit in der der größte Teil der betrachteten Gitterpunkte zu beiden Terminen ihren maximalen Rückgang der relativen Feuchte und ihren geringsten Anstieg bzw. stärksten Rückgang des Mischungsverhältnisses verzeichnen. Die Ausnahme bilden Wien-Schwechat und Linz-Hörsching (06 UTC), welche die maximale Abnahme der relativen Feuchte im Frühling zeigen, sowie Innsbruck (06 und 12 UTC) und Salzburg (12 UTC), die im Herbst noch geringere Werte für den Anstieg des Mischungsverhältnisses aufweisen.

Gerade in der kalten Jahreszeit haben nur geringe Änderungen der Lufttemperatur große Auswirkungen auf die relative Feuchte (vgl. Abb. 2.1). Ihr starkes Absinken auch in Regionen mit steigendem Feuchtegehalt lässt den Schluss zu, dass trotz des erhöhten Feuchtenachschubs die größere Feuchtekapazität der wärmer werdenden Luft, vor allem in alpin beeinflussten Bereichen, nicht abgedeckt werden kann.

Im Frühjahr ergibt die Trendanalyse des Mischungsverhältnisses an allen untersuchten Gitterpunkten zu beiden Terminen ansteigende Tendenzen. Die Zu-

nahme des Feuchtegehalts ist an den Gitterpunkten im Norden und im Osten Österreichs signifikant. Die höchsten Korrelationskoeffizienten weisen Salzburg und Linz-Hörsching zum Frühtermin, und Linz-Hörsching zum Mittagstermin auf. Die übrigen Gitterpunkte zeigen keine nennenswerte oder, aufgrund von größeren Schwankungen in der Zeitreihe, eine nur schwache Korrelation.

Den größten Anstieg zum 06 UTC Termin verzeichnet Wien-Schwechat, dicht gefolgt von Salzburg, Linz-Hörsching und Graz. Zum 12 UTC Termin ergibt sich ein ähnliches Bild. Die größte Zunahme des Feuchtegehalts verzeichnet zum Mittagstermin der Gitterpunkt Linz-Hörsching, gefolgt von Wien-Schwechat, Graz und Salzburg. Jedoch im Gegensatz zum Frühtermin, bei dem sich die Änderungen des Mischungsverhältnisses auf annähernd dem gleichen Niveau bewegen, ist diese Tendenz wesentlich stärker als bei den anderen signifikanten Trends. Die geringsten, allerdings nicht signifikanten, Anstiege weisen zu beiden Terminen die Gitterpunkte Innsbruck und Klagenfurt auf.

Bei den Trends der relativen Feuchte im Frühjahr sind Parallelen zu den Wintermonaten zu erkennen, auch hier zeigen Innsbruck und Klagenfurt zu beiden Terminen den markantesten Rückgang, wenngleich der um 12 UTC um einiges schwächer ausfällt. Beide Tendenzen sind signifikant, und die zum 06 UTC Termin auch noch gestützt durch eine starke Korrelation.

Der Rückgang der relativen Feuchte zum Frühtermin ist auch an den restlichen untersuchten Gitterpunkten signifikant und weist eine zumindest durchschnittliche Korrelation auf. Im Frühling verzeichnet, gemeinsam mit Wien-Schwechat und Graz, Salzburg die geringste Abnahme der relativen Feuchte. Zum Mittagstermin zeigt sich dort ein anderes Bild. Salzburg und Graz weisen hier nur noch eine geringe Abnahme, Linz-Hörsching und Wien-Schwechat sogar eine Zunahme der relativen Feuchte auf. Die schwachen Trends sind aufgrund der großen Schwankungen in den Datenreihen aber nicht signifikant.

Im Frühjahr ist das Ausmaß des Rückgangs der relativen Feuchte zumeist geringer als im Winter, obwohl auch hier vor allem um 06 UTC und in den alpinen Regionen der Feuchtenachschub nicht groß genug ist um einer Austrocknung der Luft entgegen zu wirken. Im nördlichen und östlichen Flachland scheint dies zumindest zum Mittagstermin etwas besser zu funktionieren. Die Gitterpunkte Wien-Schwechat und Linz-Hörsching zeigen dabei ein sehr ambivalentes Verhalten, indem sie von 06 UTC auf 12 UTC das Vorzeichen ihres Trends umkehren.

Auch im Sommer zeigen alle untersuchten Orte geschlossen, zu beiden Terminen einen Anstieg des Mischungsverhältnisses. Außer an den Gitterpunkten Innsbruck und Klagenfurt sind diese positiven Trends auch signifikant, wobei Wien-Schwechat und Graz die stärksten Korrelationen aufweisen. Zu beiden Terminen haben diese zwei Stationen auch den stärksten Trend, wobei der Anstieg des Feuchtegehalts zu Mittag in Graz mit 1.44 g/kg innerhalb von 21 Jahren der stärkste unter allen Gitterpunkten und Jahreszeiten ist. Die geringste Zunahme verzeichnet zum 06 UTC Termin der Gitterpunkt Klagenfurt und zum 12 UTC Termin der Gitterpunkt Innsbruck.

Die relative Feuchte weist auch in der warmen Jahreszeit zum Frühtermin wieder ausschließlich fallende Tendenzen auf. Bis auf den negativen Trend am Gitterpunkt Wien-Schwechat sind diese auch signifikant und besitzen moderate bis hohe Korrelationskoeffizienten. Die Ergebnisse der Trendanalysen sind denen vom Frühjahr zu diesem Termin damit sehr ähnlich, der Rückgang der relativen Feuchte fällt im Schnitt etwas geringer aus und ist in Innsbruck und Klagenfurt am stärksten.

Auch zum Mittagstermin zeigen sich Parallelen zum Frühjahr. Wieder sind nur die negativen Trends von Innsbruck und Klagenfurt signifikant aber schwächer als zum 06 UTC Termin. Die Korrelation der Daten ist zu diesem Termin an allen untersuchten Orten nur schwach. Zusätzlich zu den Gitterpunkten Linz-Hörsching und Wien-Schwechat, die schon im Frühling einen Anstieg der relativen Feuchte verzeichnen, ist zu diesem Termin auch in Graz ein schwacher, positiver Trend angedeutet. Den stärksten Anstieg zeigt der Gitterpunkt Wien-Schwechat, den deutlichsten Rückgang Klagenfurt gefolgt von Innsbruck.

Auch in der warmen Jahreszeit zeichnet sich in Innsbruck und Klagenfurt ein zwar schwächerer, aber eindeutig negativer Trend der relativen Feuchte ab. Trotz erhöhtem Feuchtenachschub, der in Innsbruck und in Klagenfurt zu dieser Jahreszeit sogar sein Maximum erreicht, kann dort das gesteigerte Feuchtepotential der Luft auch im Sommer nicht ausgeglichen werden. Im Gegensatz dazu stehen die Punkte im Norden und Osten Österreichs, wo zum tageszeitlichen Temperaturmaximum die erhöhte Feuchtekapazität kompensiert wird.

Im Herbst zeigt sich in Klagenfurt und Innsbruck zum Frühtermin eine fallende Tendenz des Mischungsverhältnisses, wobei beide nicht signifikant und die in Innsbruck nicht aussagekräftig ist. Die übrigen Gitterpunkte weisen auch in den

Herbstmonaten zu diesem Termin wieder einen positiven Trend auf. Den stärksten Anstieg des Feuchtegehalts verzeichnet Wien-Schwechat. Dieser ist signifikant getestet, die Datenreihe weist aber eine nur durchschnittliche Korrelationen auf. Um 12 UTC ist in Innsbruck und Klagenfurt keine signifikante Tendenz erkennbar, die anderen Gitterpunkte zeigen wieder positive Trends. Den stärksten und auch signifikanten Anstieg hat dabei Linz-Hörsching vorzuweisen.

Wie in den anderen Jahreszeiten sind auch im Herbst um 06 UTC an allen untersuchten Gitterpunkten nur fallende Tendenzen der relativen Feuchte vertreten. Bis auf den Rückgang in Wien-Schwechat sind diese Trends auch signifikant mit dem t-Test geprüft und mit moderaten bis starken Korrelationen statistisch gut abgesichert. Auch zu diesem Termin zeigen Klagenfurt und Innsbruck die stärkste Abnahme der relativen Feuchte, die geringste verzeichnet der Gitterpunkt Wien-Schwechat.

Zum Mittagstermin bietet sich ein anderes Bild. Die Trends der Gitterpunkte Salzburg, Linz-Hörsching, Wien-Schwechat und Graz sind durchwegs positiv, wobei nur Wien-Schwechat eine statistisch signifikante Tendenz zeigt. Dieser Anstieg um 7.8% innerhalb von 21 Jahren ist die stärkste Zunahme der relativen Feuchte unter allen Gitterpunkten und Jahreszeiten. Der geringste Anstieg ist in Salzburg zu finden. In Innsbruck und Klagenfurt sind auch zu diesem Termin die Trends der relativen Feuchte negativ und signifikant. Aber auch unter den signifikant getesteten Trends sind die Korrelationskoeffizienten äußerst niedrig und damit der lineare Zusammenhang nur schwach ausgeprägt.

Der Herbst erweist sich als die Jahreszeit, in der es zum Mittagstermin mehr steigende als fallende Trends der relativen Feuchte gibt. Diese verzeichnen die Gitterpunkte an der Alpennordseite und im Osten des Landes, bei vergleichsweise nur geringem Anstieg des Mischungsverhältnisses.

Im Mittel ist in Österreich sowohl zum tageszeitlichen Temperaturminimum als auch zum tageszeitlichen Temperaturmaximum eine Zunahme des Wasserdampfgehalts zu beobachten, wobei dieser in Innsbruck durchschnittlich am geringsten ausfällt. Nur in Klagenfurt zeigt sich zum Mittagstermin der Winter- und Herbstmonate ein nennenswerter, negativer Trend. Mit der Ausnahme dieser beiden Punkte ist also im Ostalpenraum, gemeinsam mit der Temperaturerhöhung auch ein Anstieg des Wasserdampfgehalts einher gegangen, der sich am markantesten im kontinentaleren Norden und Osten des Landes in den Frühlings- und

Sommermonaten abzeichnet. Die vergleichsweise geringer ausfallenden, positiven Trends des Mischungsverhältnisses in den kälteren Jahreszeiten könnten auf den schwächeren Anstieg der mittleren Temperatur im Winterhalbjahr (AUER ET AL., 2001, 2007) zurückzuführen sein.

Trotz des Anstiegs des Feuchtegehalts zeigt die relative Feuchte um 06 UTC an allen Gitterpunkten und zu allen Jahreszeiten ein Absinken. Der Feuchtenachschub ist zum Temperaturminimum demnach nicht ausreichend um eine Austrocknung der Luft zu kompensieren. Eine Erklärung könnte darin zu finden sein, dass analog zur Zunahme der mittleren Temperatur auch die Minimum- und Maximumwerte im Verlauf der letzten Jahrzehnte gestiegen sind (NEMEC ET AL., 2012; ZAMG, 2012). Da die relative Feuchte auf Änderungen der Temperatur in einem niedrigen Temperaturbereich sehr sensibel reagiert, könnte dies das Ausmaß des Rückgangs zum Frühtermin erklären. Am stärksten von der Austrocknung betroffen sind Innsbruck und Klagenfurt, hier wird die erhöhte Feuchtekapazität der Luft am wenigsten effektiv ausgeglichen. Am besten scheint der Ausgleich im Nordosten Österreichs zu funktionieren.

Auch um 12 UTC ist der Gitterpunkt Wien-Schwechat im Mittel am wenigsten von einer Austrocknung betroffen, im Herbst erfährt dieser sogar eine signifikante Zunahme der relativen Feuchte. Auch Linz hat im Schnitt einen positiven Trend der relative Feuchte, die übrigen Punkte zeigen auch zum Mittagstermin im Mittel ein Abfallen. Die markantesten fallenden Trends zeigen wiederum Innsbruck und Klagenfurt und sind unter den untersuchten Gitterpunkten damit die Spitzenreiter der von der Austrocknung der Luft betroffenen Gitterpunkte.

Die Analysen der beiden Feuchteparameter machen deutlich, dass trotz steigendem Wasserdampfanteils die relative Feuchte ihr Niveau nicht halten kann. Die möglichen Ursachen für diese Entwicklung sind vielfältig. Es ist nicht auszuschließen, dass bedingt durch die globale Erwärmung eine Umstellung der vorherrschenden, dominanten Wetterlagen in unseren Breiten stattfindet, was Einfluss auf den Transport von Feuchte von und zum Alpenraum nimmt. Anzeichen dafür gibt es bereits. So kann man aus den Ergebnissen der Analysen von Luftdruck, Temperatur und Sonnenscheindauer auf eine Verschiebung des subtropischen Hochdruckgürtels nach Norden schließen (AUER ET AL., 2007).

Eine andere Ursache für den Rückgang der relativen Feuchte kann auch in der allmählichen Austrocknung lokaler Feuchtequellen zu finden sein. Die durch die

Erwärmung erhöhte Feuchtekapazität der Luft bedingt höhere Verdunstungsraten die dafür sorgen, dass Böden zunehmend trockener werden und Wasserstände von Flüssen und Seen sinken. Wenn ausreichend Feuchtigkeitsnachschub ausbleibt versiegen dadurch nach und nach die lokalen Feuchtequellen, was eine Austrocknung der Luft zur Folge hat.

Die Frage nach den Konsequenzen, eines steigenden Wasserdampfgehalts bei gleichzeitig fallender relativer Feuchte, für das Wettergeschehen ist nicht trivial, da das Wetter im Alpenraum hauptsächlich von Strömungs- und Wetterlagen abhängig, und nicht nur auf die Verteilung der Feuchte zurückzuführen ist.

Sicher ist, dass mit einem Anstieg der Wasserdampfmenge das wohl wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre zunimmt, während die Rückkopplungseffekte und Wechselwirkungen, zwischen Wasserdampfmenge, Bewölkung und Niederschlag zur Zeit noch unzureichend erforscht und verstanden, und Gegenstand zahlreicher Studien und Klimasimulationen sind. Darum ist es nicht möglich aus den Ergebnissen dieser Arbeit direkt Aussagen über etwa den Bewölkungsgrad, die Niederschlagsmenge oder die Häufigkeit und Verteilung von Gewittern abzuleiten, es wären aber interessante Themen für weitere Vergleichsstudien.

Literatur

- AUER I., BÖHM R., MOHNL H., POTZMANN R., SCHÖNER W. und SKOMOROWSKI P., 2001: *ÖKLIM. Digitaler Klimaatlas Österreichs. Eine interaktive Reise durch die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft des Klimas*, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- AUER I., BÖHM R., JURKOVIC A., LIPA W., ORLIK A., POTZMANN R., SCHÖNER W., UNGERSBÖCK M., MATULLA C., BRIFFA K., JONES P., EFTHYMIADIS D., BRUNETTI M., NANNI T., MAUGERI M., MERCALLI L., MESTRE O., MOISSELIN J., BEGERT M., MÜLLER-WESTERMEIER G., KVETON V., BOCHNICEK O., STASTNY P., LAPIN M., SZALAI S., SZENTIMREY T., CEGNAR T., DOLINAR M., GAJIC-CAPKA M., ZANINOVIC K., MAJSTOROVIC Z. und NIEPLOVA E., 2007: *HISTALP - historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region*, International Journal of Climatology, **27**: 17–46.
- BICA B., KNABL T., STEINACKER R., RATHEISER M., DORNINGER M., LOTTERANER C., SCHNEIDER S., CHIMANI B., GEPP W. und TSCHANNETT S., 2007a: *Thermally and Dynamically Induced Pressure Features over Complex Terrain from High-Resolution Analyses*, Journal of Applied Meteorology and Climatology, **46**: 50–65.
- BICA B., STEINACKER R., LOTTERANER C. und SUKLITSCH M., 2007b: *A new concept for high resolution temperature analysis over complex terrain*, Theoretical and Applied Climatology, **90**: 173–183.
- BOHR P., KATHE G., KNORR M., KURZ M., LANGE K.D., BUSCHNER W. und KASTEN F., 1987: *Leitfäden für die Ausbildung im deutschen Wetterdienst, Nr.1: Allgemeine Meteorologie*, 3. Auflage, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- EMEIS S., 2000: *Hirts Stichwortbücher: Meteorologie in Stichworten*, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- HANTEL M. und MAYER D., 2006: *Wiener Meteorologische Schriften, Heft 3: Skriptum Theoretische Meteorologie I*, Facultas Universitätsverlag.

- HÄBERLI C., GROEHN I., STEINACKER R., PÖTTSCACHER W. und DORNINGER M., 2004: *Performance of the surface observation network during MAP*, Meteorologische Zeitschrift, **13**(2): 109–121.
- HÖLZEL E. (Hg.), 1995: *Hölzel-Weltatlas für die Oberstufe*, Ed. Hölzel Ges. m. b. H., Wien.
- LILJEQUIST G.H. und CEHAK K., 1984: *Allgemeine Meteorologie*, 3. Auflage, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden.
- NEMEC J., GRUBER C., CHIMANI B. und AUER I., 2012: *Trends in extreme temperature indices in Austria based on a new homogenised dataset*, International Journal of Climatology.
- REUTER H., HANTEL M. und STEINACKER R., 2001: *Meteorologie*, in: *Bergmann Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Erde und Planeten*, Band 7, 2. Auflage, Kapitel 3, S. 131–310, Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- SCHÖNWIESE C.D., 2006: *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*, 4. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- STEINACKER R., 1991: *Eine ostalpine Strömungslagenklassifikation*, 2012 verfügbar unter <http://www.univie.ac.at/IMG-Wien/weatherregime/STROMUNGSLAGENKLASSIFIKATION.pdf>.
- STEINACKER R., HÄBERLI C. und PÖTTSCACHER W., 2000: *A Transparent Method for the Analysis and Quality Evaluation of Irregularly Distributed and Noisy Observational Data*, Monthly Weather Review, **128**: 2303–2316.
- STEINACKER R., RATHEISER M., BICA B., CHIMANI B., DORNINGER M., GEPP W., LOTTERANER C., SCHNEIDER S. und TSCHANNETT S., 2006: *A Mesoscale Data Analysis and Downscaling Method over Complex Terrain*, Monthly Weather Review, **134**: 2758–2771.
- SUKLITSCH M., 2004: *Objektive Analyse der Temperatur der Niederungen*, Diplomarbeit, Universität Wien.
- VERA-HOMEPAGE, 2012: Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien, 2012 verfügbar unter <http://www.univie.ac.at/amk/vera>.

ZAMG, 2012: *Informationsportal Klimawandel*, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2012 verfügbar unter <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel>.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Jahresmittel der spezifischen Feuchte in der Atmosphäre	2
2.1	Relative Feuchte als Funktion von Temperatur und Mischungsverhältnis.	11
3.1	Minimumtopographie	16
4.1	Streudiagramm Stationsdaten vs. VERA	22
4.2	Kartenausschnitt Ostalpenraum	23
4.3	Klimadiagramme Innsbruck und Salzburg	25
4.4	Klimadiagramme Hörsching und Schwechat	26
4.5	Klimadiagramme Graz und Klagenfurt	27
5.1	Flughafen Innsbruck (DJF, 06 UTC)	34
5.2	Flughafen Innsbruck (DJF, 12 UTC)	35
5.3	Flughafen Salzburg (DJF, 06 UTC)	36
5.4	Flughafen Salzburg (DJF, 12 UTC)	38
5.5	Flughafen Linz-Hörsching (DJF, 06 UTC)	39
5.6	Flughafen Linz-Hörsching (DJF, 12 UTC)	40
5.7	Flughafen Wien-Schwechat (DJF, 06 UTC)	41
5.8	Flughafen Wien-Schwechat (DJF, 12 UTC)	41
5.9	Flughafen Graz (DJF, 06 UTC)	42
5.10	Flughafen Graz (DJF, 12 UTC)	43
5.11	Flughafen Klagenfurt (DJF, 06 UTC)	44
5.12	Flughafen Klagenfurt (DJF, 12 UTC)	45
5.13	Flughafen Innsbruck (MAM, 06 UTC)	46
5.14	Flughafen Innsbruck (MAM, 12 UTC)	47
5.15	Flughafen Salzburg (MAM, 06 UTC)	48
5.16	Flughafen Salzburg (MAM, 12 UTC)	49
5.17	Flughafen Linz-Hörsching (MAM, 06 UTC)	50
5.18	Flughafen Linz-Hörsching (MAM, 12 UTC)	51
5.19	Flughafen Wien-Schwechat (MAM, 06 UTC)	53
5.20	Flughafen Wien-Schwechat (MAM, 12 UTC)	53
5.21	Flughafen Graz (MAM, 06 UTC)	54
5.22	Flughafen Graz (MAM, 12 UTC)	55
5.23	Flughafen Klagenfurt (MAM, 06 UTC)	56

5.24 Flughafen Klagenfurt (MAM, 12 UTC)	57
5.25 Flughafen Innsbruck (JJA, 06 UTC)	58
5.26 Flughafen Innsbruck (JJA, 12 UTC)	59
5.27 Flughafen Salzburg (JJA, 06 UTC)	60
5.28 Flughafen Salzburg (JJA, 12 UTC)	61
5.29 Flughafen Linz-Hörsching (JJA, 06 UTC)	62
5.30 Flughafen Linz-Hörsching (JJA, 12 UTC)	63
5.31 Flughafen Wien-Schwechat (JJA, 06 UTC)	64
5.32 Flughafen Wien-Schwechat (JJA, 12 UTC)	65
5.33 Flughafen Graz (JJA, 06 UTC)	66
5.34 Flughafen Graz (JJA, 12 UTC)	67
5.35 Flughafen Klagenfurt (JJA, 06 UTC)	68
5.36 Flughafen Klagenfurt (JJA, 12 UTC)	69
5.37 Flughafen Innsbruck (SON, 06 UTC)	70
5.38 Flughafen Innsbruck (SON, 12 UTC)	71
5.39 Flughafen Salzburg (SON, 06 UTC)	72
5.40 Flughafen Salzburg (SON, 12 UTC)	72
5.41 Flughafen Linz-Hörsching (SON, 06 UTC)	73
5.42 Flughafen Linz-Hörsching (SON, 12 UTC)	74
5.43 Flughafen Wien-Schwechat (SON, 06 UTC)	75
5.44 Flughafen Wien-Schwechat (SON, 12 UTC)	76
5.45 Flughafen Graz (SON, 06 UTC)	77
5.46 Flughafen Graz (SON, 12 UTC)	78
5.47 Flughafen Klagenfurt (SON, 06 UTC)	79
5.48 Flughafen Klagenfurt (SON, 12 UTC)	79

Tabellenverzeichnis

4.1	Eckdaten der ausgewählten Gitterpunkte	24
4.2	Quantile der Student-Verteilung (tV)	32
6.1	Trends des Mischungsverhältnisses um 06 UTC	82
6.2	Trends der relativen Feuchte um 06 UTC	82
6.3	Trends des Mischungsverhältnisses um 12 UTC	83
6.4	Trends der relativen Feuchte um 12 UTC	83

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei denjenigen bedanken, die mich während der Jahre meines Studiums und bei der Entstehung dieser Arbeit begleitet und unterstützt haben.

Zu allererst bei meinem Betreuer Professor Dr. Reinhold Steinacker, der es beherrscht die richtigen Fragen zu stellen und auch bei verzwickten Problemen immer eine Lösung parat hat.

Großer Dank gebührt meiner Familie, allen voran meiner Mutter, die mir dieses Studium erst ermöglicht und immer ein offenes Ohr, Rat und aufmunternde Worte für mich hat. Sie ist es, die es vermag die Dinge immer wieder in die richtige Perspektive zu rücken.

Für seine unendliche Geduld und Unterstützung möchte ich besonders meinem Hannes danken. Er ist es, der nicht müde wird mir die Flinte aus dem Korn immer wieder zurück zu werfen.

Zum guten Schluss noch ein großes Dankeschön an meine Freunde und StudienkollegInnen für eine unvergessliche und schöne Studienzeit.

Curriculum Vitae

PERSÖNLICHE DATEN

Name: Karin Ilse Hennermann

Staatsbürgerschaft: Österreich

Geburtstag: 23.10.1981

Geburtsort: Salzburg

Familienstand: ledig

AUSBILDUNG:

1992-1996 Hauptschule Oberndorf

1996-2000 Bundes-Oberstufenrealgymnasium Akademiestraße, Salzburg

2000 Matura mit ausgezeichnetem Erfolg

2000-2003 Studium der Meteorologie und Geophysik an der Universität Wien

seit 2003 Studium der Meteorologie an der Universität Wien

ARBEITSPRAXIS:

seit April 2007 Meteorologin bei der MeteoServe Wetterdienst GmbH

Oktober 2006 - März 2007 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien

Juli 2006 Praktikum in der Abteilung Meteorologie der Austro Control GmbH

März - Juli 2006 Mitarbeiterin im Lehrbetrieb (Tutorin) am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien

August 2005 Praktikum am Institut für Medizinische Physik und Biostatistik der Veterinärmedizinischen Universität Wien