

Witterungsklimatologische Aspekte der Spätfrostgefährdung im mittleren Etschtal

Mit 5 Abbildungen

Von J. Jacobeit, Augsburg/BRD

Zusammenfassung:

Auf der Grundlage meteorologischer Aufzeichnungen für die Monate April und Mai der Jahre von 1968 bis 1985 wird das Auftreten von Spätfrosten im Obstbaugebiet des mittleren Etschtals untersucht. Differenziert nach verschiedenen Strömungslagen und Bedekungsgraden erfolgt eine Unterteilung der aus vorabendlicher Luft- und Taupunkttemperatur erzeugten Punktwolken in Bereiche möglichst hoher Wahrscheinlichkeit von Frost bzw. Frostfreiheit. Abschließend werden die Erfordernisse für die Entwicklung eines lokalen Prognoseverfahrens umrissen.

Summary:

Based on long-term daily records of meteorological parameters the incidence of late frosts during the early vegetative periods of April/May 1968—1985 in the orcharding region of the middle Etsch valley (South Tyrol) will be examined. Subdivided into various types of current and into various degrees of cloudiness, crowds of data points, which have been generated by using daily air and dew-point temperatures, are separated into areas of probability as high as possible concerning incidence or non-incidence of frost during the following night. Finally requirements are outlined for developing procedures of forecast on a local scale.

1. Einführung

Besondere Aufmerksamkeit im Rahmen der Agrarklimatologie haben seit jeher Fragestellungen im Zusammenhang mit Frösten während der Vegetationsperiode (herbstliche Frühfröste, frühjährliche Spätfroste) auf sich gezogen (vgl. Schnelle, 1963 und 1965). Dies erklärt sich sowohl durch das theoretische Interesse am Verständnis dieses auffälligen Witterungsphänomens als auch durch die besondere Gefährdung von Pflanzenbeständen und Sonderkulturen während derartiger Phasen eingeschränkter Kälteresistenz. Seit Jahren wird am Lehrstuhl für Physische Geographie der Universität Augsburg (Prof. Dr. K. Fischer) die Spätfrostgefährdung in einem besonders davon betroffenen Bereich untersucht, dem Talabschnitt der mittleren Etsch zwischen Bozen und Meran. Bei einer ungefähren Talbreite von 2—3 km mit umgebenden Randhöhen bis zu 1600 m oder gar 1800 m relativer Aufragung ergibt sich hier eine topographisch bedingt besonders hohe Frostgefährdung vor allem im Talsohlenbereich, der die ausgedehnten Obstanzpflanzungen (überwiegend verschiedene Apfelsorten) gerade in ihren abgestuft frostempfindlichen phänologischen Blütestadien zur Zeit der alljährlichen Spätfrostgefahr in besonderem Maße ausgesetzt sind. Praktisch wird dieser realen Gefährdung durch ein vom Südtiroler Beratungsring für Obst- und Weinbau organisiertes Überwachungssystem und bei Frostwarnung in Funktion gesetzte Frostschutzberegnungsanlagen weitgehend erfolgreich und wirkungsvoll zu begegnen versucht. Theoretisch stellt sich die Aufgabe, die speziellen lokalen Verhältnisse in übergeordnete Bedingungs- und Verursachungszusammenhänge einzubinden, um zu einem gesteigerten Verständnis und einer verbesserten Beurteilung lokalklimatischer Besonderheiten zu gelangen. Hierfür reicht die klassische Klimatologie in ihrer Beschreibung mittlerer Zustände nicht mehr aus (vgl. Fliri, 1962, S. 7; 1975, S. 281), man wird witterungsklimatologische Differenzierungen heranziehen müssen, die gleichwohl eng auf die örtlichen Verhältnisse abgestellt zu sein haben. Ziel

der Witterungsklimatologie ist es ja (vgl. Schüepp und Fliri, 1967, S. 216f.), Phasen ähnlichen meteorologischen Geschehens herauszukristallisieren, sie näher zu kennzeichnen und so zu Aussagen über lokale Ausprägungen übergreifender atmosphärischer Prozesse zu gelangen. Soweit das verfügbare Datenmaterial es erlaubt, sollen im folgenden zum Problem der Spätfrostgefährdung im mittleren Etschtal einige witterungsklimatologische Aspekte beigetragen werden.

2. Strömungslagen und Spätfrostgefährdung

Als Untersuchungszeitraum konnten für die frühjährlichen Spätfrostmonate April und Mai die Jahre 1968 bis 1985 zugrundegelegt werden, wobei die Angaben über das Auftreten von Spätfrosten im mittleren Etschtal der Zeitschrift Obstbau/Weinbau des Südtiroler Beratungsrings entnommen worden sind. Während des 18-jährigen Untersuchungszeitraums wurde im Wetterhüttenniveau insgesamt in 23.2% aller April- und Mainächte ein Unterschreiten der Nullgradgrenze bei Terlan registriert, das zwar (in Abhängigkeit vom jeweils erreichten Blütestadium der Obstanpflanzungen) durchaus nicht immer Veranlassung zur Frostschutzberegnung gab, lokalklimatisch aber die besondere Spätfrostgefährdung im Talsohlenbereich dieser submediterranen Übergangsregion dokumentiert. Blickt man zunächst auf die großräumigen Strömungsverhältnisse, so läßt sich (in genereller Übereinstimmung mit älteren Arbeiten [Gutsche, 1952; Bürger, 1958] aus Mitteleuropa) ein Vorherrschen von Großwetterlagen mit signifikant nördlicher Komponente 1—2 Tage vor dem Eintrittsdatum von Spätfrosten feststellen: in 82% aller derartigen Fälle sind entsprechende Großwetterlagen nach dem europäischen Katalog von Hess und Brezowsky (1977) ausgebildet, nach der kleinräumiger auf das Ostalpengebiet bezogenen Klassifikation nach Lauscher (1982) sogar 85%. Allerdings ist der Aussagewert derartiger Häufigkeiten recht begrenzt, treten doch die gleichen Großwetterlagen insgesamt in 60% bzw. 63% des Untersuchungszeitraums auf, also zu mehr als zwei Dritteln auch ohne von Spätfrost im Mitteletschtal gefolgt oder begleitet zu werden. Überdies setzen sie sich aus einer größeren Anzahl verschiedener einzelner Großwetterlagen zusammen, die durchaus unterschiedliche Zirkulationsstrukturen repräsentieren und so keine spezifiziertere Bindung an bestimmte großräumige Strömungsverhältnisse erkennen lassen.

Um detailliertere witterungsklimatologische Aussagen zu erreichen, müssen deshalb möglichst ortsnahe und kontinuierliche meteorologische Aufzeichnungen herangezogen werden. Die einzigen verfügbaren Datenreihen in näherer Umgebung des Mitteletschtales stammen vom Land- und Forstwirtschaftlichen Versuchszentrum Laimburg südlich von Bozen sowie vom Flughafen Bozen, der in ca. 10 km Luftlinienentfernung zum Ort der Frostregistrierung bei Terlan gelegen ist (vgl. Abb. 1). Da die Bozener Reihe den gesamten Zeitraum von 1968 bis 1985 abzudecken vermag, zusätzlich auch Angaben über den Bedeckungsgrad enthält und ansonsten (von topographisch bedingten Modifikationen abgesehen) in genereller Übereinstimmung mit der Laimburger Reihe steht, stützt sich die folgende Untersuchung ausschließlich auf Datenangaben vom Flughafen Bozen. Von den 6-stündigen (teils 3-stündigen) Registrierungen sind die Werte von Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Gesamtbedeckung, Lufttemperatur und Taupunkttemperatur verwendet worden. Die Windwerte unterliegen bedauerlicherweise der Einschränkung, erst ab Windstärken über 2 kn angegeben zu sein, so daß etwa zum 0-Uhr-Termin lediglich in 9.1% aller Fälle eine definierte Windrichtung vorliegt.

Zur Bestimmung der Strömungsrichtung wurde jedoch die Angabe vom 18-Uhr-Termin des Vortages herangezogen (nur bei vorhandener und vom Vorabend abweichender Windrichtung um 0 Uhr die letztere), so daß in den nach 8 Hauptwindrichtungssektoren festgelegten Strömungslagen im wesentlichen die den untersuchten Nächten unmittelbar vorausgehende Advektionsrichtung zum Ausdruck gelangt; alle Fälle mit Windstärke unter 2 kn mußten zur Flachdrucklage F zusammengefaßt werden.

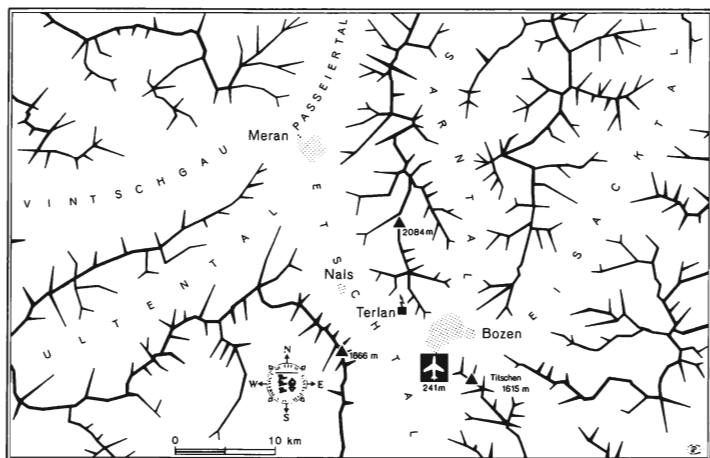


Abb. 1: Übersichtsskizze der Untersuchungsregion

		H	A	P
Flachdrucklage	F	32.2	21.6	15.5
Nordlage	N	6.0	14.5	56.1
Nordostlage	NE	10.7	29.0	62.7
Ostlage	E	1.0	2.4	(54.5)
Südostlage	SE	2.1	1.6	(17.4)
Südlage	S	45.6	29.0	14.8
Südwestlage	SW	0.5	0.4	(20.0)
Westlage	W	0.4	0.0	(0.0)
Nordwestlage	NW	1.1	1.6	(33.3)
Unbestimmt	U	0.4	0.0	(0.0)

Tab. 1: Prozentuale Auftretts häufigkeit H, prozentualer Anteil A an allen Spätfrostnächten (Terlan) und Frostwahrscheinlichkeit P (prozentuale Frosthäufigkeit) für unterschiedliche Strömungslagen (Bozen) im Zeitraum April/Mai 1968—85

Tab. 1 zeigt für diese 9 Strömungslagen ihre prozentuale Auftretts häufigkeit im Gesamtzeitraum, ihren prozentualen Anteil an allen Frostnächten während dieses Zeitraums und ihre Frostwahrscheinlichkeit (prozentuale Frosthäufigkeit). Man erkennt sofort die Dominanz von vier Lagen, der Flachdruck-, Nord-, Nordost- und Südlage (zusammengenommen mit 94.5% Auftretts häufigkeit und 94.1% Anteil an allen Frostnächten). Diese akzentuierte Verteilung resultiert natürlich

aus den speziellen topographischen Verhältnissen (vgl. Abb. 1) mit starker Kanalisierung der Windströmungen durch Etsch-, Eisack- und Sarntal. So werden beispielsweise fast alle Strömungen mit südlicher Komponente auf den Richtungssektor Süd eingeregelt, der damit nicht nur die tagesperiodischen Talwinde bei überörtlich nur schwach ausgebildeten Strömungen umfaßt, sondern auch die Advektion an der Rückseite von Hochdruckgebieten sowie an der Vorderseite von Tiefdruckgebieten. Auffällig ist die geringe Häufigkeit von Nordwestlagen, obwohl das Etschtal zwischen Terlan und Bozen genau in diesem Richtungssektor verläuft. Offensichtlich werden derartige talabwärts gerichtete Strömungen durch die Aufregung des Titschen (vgl. Abb. 1) in N-S-Richtung abgelenkt und finden sich somit unter den Nordlagen am Flughafen Bozen. Die dortigen Nordostlagen dagegen können weder als direkte noch als abgelenkte Strömungen aus dem Eisacktal aufgefaßt werden, sondern repräsentieren echte Überströmungen großräumigen Charakters, die deswegen im folgenden auch weiterhin von den Nordlagen getrennt behandelt werden sollen.

Die prozentuale Frosthäufigkeit differenziert zunächst allerdings nur in zwei Gruppen unter diesen vier Hauptströmungslagen: Süd- und Flachdrucklagen mit einer mittleren Frosthäufigkeit von 15.1% zeigen eine rund viermal geringere Frostwahrscheinlichkeit als Nord- und Nordostlagen (im gewichteten Mittel 60.3%). Diese Differenzierung kann allerdings noch nicht befriedigen, da auch bei den Lagen mit nördlicher Komponente in rund 4 von 10 Fällen kein Nachtfrost auftritt, andererseits bei den Süd- und Flachdrucklagen trotz viermal geringerer Frostwahrscheinlichkeit große absolute Frosthäufigkeiten zu verzeichnen sind (gleich groß z.B. bei Süd- und Nordostlagen mit jeweils 29% Anteil an allen Frostnächten). Tab. 2 untergliedert deshalb die Prozentgrößen aus Tab. 1 für die vier Hauptströmungslagen in drei Klassen unterschiedlichen Bedeckungsgrades während der Nacht (gering: 0—2 Achtel, mittel: 3—5 Achtel, hoch: 6—8 Achtel). Dabei ergeben sich folgende Zusatzaspekte:

	H			A			P		
	g	m	h	g	m	h	g	m	h
F	7.7	5.0	19.5	14.9	3.5	3.1	44.7	16.4	3.7
N	3.8	0.5	1.6	12.2	0.8	1.6	73.8	33.3	28.6
NE	7.3	1.5	1.9	22.7	4.3	2.0	72.5	64.7	23.8
S	18.0	9.7	17.9	18.8	4.3	5.9	24.2	10.4	7.6

Tab. 2: Prozentuale Auftretts Häufigkeit H, prozentualer Anteil A an allen Spätfrostnächten (Terlan) und Frostwahrscheinlichkeit P (prozentuale Frosthäufigkeit) für die vier Hauptströmungslagen (Bozen) und drei Bewölkungsklassen (g: 0—2, m: 3—5, h: 6—8 Achtel) im Zeitraum April/Mai 1968—85

i) trotz des generellen Überwiegens geringer Bewölkung in den Frostnächten bleibt ein beachtlicher Rest von über einem Viertel der Terlaner Frostnächte mit mittlerem oder gar hohem Bedeckungsgrad am nahegelegenen Flughafen Bozen;

ii) während Südlagen etwa gleich häufig von geringer und von starker Bewölkung während der Nacht gefolgt werden, liegt das Übergewicht bei den Flachdrucklagen einseitig zur starken Bewölkung verschoben; Nord- und Nordostlagen werden dagegen zu rund zwei Dritteln von geringer nächtlicher Bewölkung gefolgt;

iii) die relative Frosthäufigkeit nimmt zwar bei allen Lagen mit steigendem Bedeckungsgrad ab, aber in unterschiedlichen Ausmaßen: bei Süd- und Flachdrucklagen auf geringe Werte unter 10%, ausgehend von einem mittleren Niveau (44.7%) bei den Flachdruck-, von einem bereits niedrigeren (24.2%) bei den Südlagen (als Ausdruck der als Teilmenge enthaltenen Fälle mit antizyklonaler Warmluftadvektion aus Süden); vergleichbare Werte werden bei Nord- und Nordostlagen erst unter starker Bewölkung erreicht, während geringe Bewölkung die Frostwahrscheinlichkeit auf über 70% ansteigen läßt. Bei mittlerem Bedeckungsgrad sinkt die relative Frosthäufigkeit der Nordlagen bereits kräftig ab (33.3%), während sie bei den Nordostlagen noch nahezu doppelt so hoch bleibt (64.7%). Soweit dieser Unterschied nicht durch zu geringe Teilkollektiv-Mächtigkeiten bedingt ist, könnte darin ein Eigenschafts-Unterschied der advehierten Luftmassen zum Ausdruck gelangen: Im Mittel etwas kältere, trockenere und damit bei gleichem Bedeckungsgrad und ähnlichem Turbulenzzustand frostanfälliger Luft bei nordöstlicher Advektion aus rein kontinentalen Gebieten gegenüber nördlicher bis nordwestlicher Advektion von Mischluft oder maritim geprägter Luft.

3. Luftmasseneigenschaften und Spätfrostgefährdung

Der höchste vorkommende Frostwahrscheinlichkeitswert liegt bei obiger Aufgliederung immer noch unter 75%, so daß erst die Heranziehung der Wärme- und Feuchtigkeitsmaße als Größen der Luftmasseneigenschaften genauere Aussagen ermöglicht. Die unterschiedlichen Standortbedingungen zwischen dem Freilandbereich bei Terlan und dem stadtnahen, in Nachbarschaft einer Industriezone gelegenen Flughafen Bozen erlauben dabei natürlich keine direkte Übertragung der absoluten Werte, lassen aber als erste Näherung eine Verwendung als relative Unterscheidungsgrößen verschiedener Einzelsituationen zu. Dementsprechend wurden für Lufttemperatur und Taupunkttemperatur aus allen 18-Uhr-Meldungen, die den Ausgangszustand vor der anschließenden Nacht repräsentieren, Mittelwert M und Standardabweichung δ bestimmt und jeweils drei relative Größenordnungs-Klassen gebildet („geringe“ Werte der untersten Klasse $< M - \delta/2$, „normale“ Werte der mittleren Klasse zwischen $M - \delta/2$ und $M + \delta/2$, „hohe“ Werte der obersten Klasse $> M + \delta/2$). Tab. 3 zeigt für die vier Hauptströmungslagen die prozentuale Häufigkeit von Frostnächten bzw. frostfreien Nächten und deren Anteil an ihrer Gesamtheit für zwei Parameterkonstellationen, die dem Auftreten von Nachtfrost bzw. von Frostfreiheit besonders förderlich sind: zum einen das kombinierte Auftreten von geringer nächtlicher Bewölkung, geringem Feuchtigkeitsgehalt der Luft (gemessen an Taupunkttemperaturen in der unteren Relativklasse) und normalen bis unterdurchschnittlichen Ausgangstemperaturen, zum anderen das kombinierte Auftreten von mittlerem bis hohem Bedeckungsgrad und Feuchtigkeitsgehalt oder von geringem Bedeckungsgrad und hohem Feuchtigkeitsgehalt. In der frostbegünstigenden Konstellation steigt die Frostwahrscheinlichkeit bei Nord- und Nordostlagen auf über 85%, bei Süd- und Flachdrucklagen nur auf 60—68%; der Erfassungsgrad sämtlicher Frostnächte ist bei letzteren mit 31% äußerst gering, bei ersteren mit etwas über 60% zwar rund doppelt so hoch, aber immer noch bemerkenswert niedrig. In der Frostfreiheit begünstigenden Konstellation dagegen fallen Auftrittswahrscheinlichkeit und Erfassungsgrad (hier der frostfreien Nächte) bei den Süd- und Flachdrucklagen höher aus als bei den Nord- und Nordostlagen; insbesondere letztere zeigen einen auffällig niedrigen Erfassungsgrad (29.5%).

	K_F		K_{NF}	
	P_F	E_F	P_{NF}	E_{NF}
F	68.0	30.9	94.1	84.9
S	60.5	31.1	94.1	66.7
N	85.7	64.9	89.5	58.6
NE	88.2	60.8	81.3	29.5

Tab. 3: Prozentuale Wahrscheinlichkeit für Frost (P_F) bzw. Frostfreiheit (P_{NF}) und prozentualer Erfassungsgrad sämtlicher Nächte mit (E_F) bzw. ohne Frost (E_{NF}) für die vier Hauptströmungslagen und zwei verschiedene Parameterkonstellationen:

K_F : Bewölkung und Taupunkt in unterer, Temperatur in mittlerer oder unterer Relativklasse (siehe Text);

K_{NF} : (Bewölkung und Taupunkt in mittlerer oder oberer Relativklasse) oder (Bewölkung in unterer und Taupunkt in oberer Relativklasse)

Um sprunghafte Veränderungen durch starre Klassengrenzen in der Festlegung von Parameterkonstellationen zu reduzieren, wurde im weiteren auf eine Methode zurückgegriffen, die Faust bereits 1949 zur Beurteilung der Frostwahrscheinlichkeit in Münster verwendet hat (weitere Anwendungen und Erweiterungen siehe bei Sch nelle, 1963, S. 332 ff.): mit Taupunkt- und Temperaturwert des Vortages (je nach Einzelfallstudie von 14 oder von 18 Uhr) als x- bzw. y-Koordinate wird eine Punktwolke aller betrachteten Fälle erzeugt, die durch eine Gerade möglichst wirkungsvoll in Bereiche möglichst hoher Wahrscheinlichkeit für Nachtfrost bzw. Frostfreiheit zu separieren versucht wird. Faust operierte mit Temperatur- und Taupunktangaben von 14 Uhr, bezog sich auf sog. Strahlungsnächte (mit geringem Bedeckungsgrad und geringer Windstärke) und erzielte das beste Ergebnis bei Betrachtung möglicher nachfolgender Fröste in Bodennähe. Das vorliegende Datenmaterial zwingt dazu, Fröste in 2 m Höhe über Grund zu betrachten und Ausgangswerte der Temperatur und des Taupunktes von 18 Uhr zu verwenden (die 12-Uhr-Werte liegen noch vor dem thermischen Tagesmaximum und geben kein gesichertes Bild der Ausgangssituation wieder). Die Punktwolken sind getrennt für die vier Hauptströmungslagen und die drei Klassen unterschiedlichen Bedeckungsgrades erstellt worden (vgl. Abb. 2 — 5 und Tab. 4), so daß die Abbildungen für geringe Bewölkung von wenigen windstärkeren Fällen abgesehen (4.5% mit nächtlicher Windstärke ≥ 6 kn) im wesentlichen die sog. Strahlungsnächte repräsentieren. Die Separierung der Punktwolken in Bereiche möglichst hoher Umfassung von Frost- bzw. frostfreien Nächten erfolgt durch diejenige Gerade, bei der die Summe der beiden Aufteilungsquoten [Prozentanteil der Frostnächte (frostfreien Nächte) auf der „Frostseite“ („frostfreien Seite“) an allen jeweiligen Frostnächten (frostfreien Nächten)] ihr Maximum erreicht; bei mehreren derartigen Geraden wurde diejenige mit mittlerem Steigungswinkel bei mittlerem Ordinatenabschnitt gewählt. Zusätzlich wurden auch noch diejenigen Geraden bestimmt, bei denen unter wenigstens 50%-igen Aufteilungsquoten die prozentualen Häufigkeiten von Frostnächten bzw. frostfreien Nächten ihr Maximum erreichen. Soweit derartige Geraden in den Abb. 2 — 5 nicht eingezeichnet und in Tab. 4 nicht aufgeführt sind, fallen sie entweder mit der Hauptgeraden zusammen, existieren überhaupt nicht oder gliedern nur Bereiche mit zu geringer Repräsentanz (unter 1% aller Fälle) aus.

Abb. 2—5: Punktwolken aus Lufttemperatur T und Taupunkttemperatur τ (τ : kein Frost, + Frost in der nachfolgenden Nacht) sowie Geraden optimierter Aufteilung

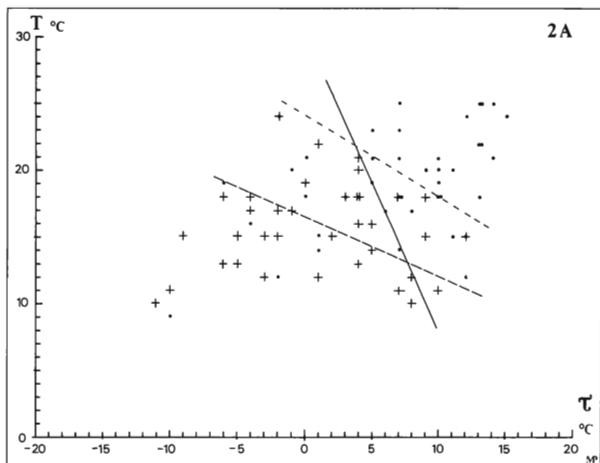
(durchgezogene Linien) und maximierter Wahrscheinlichkeit für Frost bzw. Frostfreiheit bei mindestens 50%-igen Aufteilungsquoten (gestrichelte Linien). Explizite Werte siehe Tab. 4.

Tab. 4: Gleichungen der Geraden (T: Temperatur, τ : Taupunkt 18 Uhr) optimierter Punkt- wolken- Aufteilung (G_O), maximaler Frost- (G_F) und Frostfreiheits- (G_{NF}) Wahrscheinlichkeit bei mind. 50%igen Aufteilungsquoten, prozentuale Frost- (P_F) und Frostfreiheits- (P_{NF}) Wahrscheinlichkeit auf der „Frostseite“ ($T + a\tau < b$) bzw. der „frostfreien Seite“ ($T + a\tau \geq b$) sowie prozentuale Aufteilungsquoten aller Nächte mit (Q_F) bzw. ohne Frost (Q_{NF}) für jeweils drei Bewölkungsklassen (g: 0–2, m: 3–5, h: 6–8 Achtel nächtlicher Bewölkung) der vier Hauptströmungslagen des Vorabends (F: Flachdrucklage, S: Südlage, N: Nordlage, NE: Nordostlage). Aufteilungsquote meint den Prozentanteil der Frostnächte (frostfreien Nächte) auf der „Frostseite“ („frostfreien Seite“) an allen jeweiligen Frostnächten (frostfreien Nächten). Eingeklammerte Wahrscheinlichkeiten basieren auf zu geringen Teilkollektiv-Mächtigkeiten unter 1% aller Fälle. Punkt- wolken- Verteilungen siehe Abb. 2–5.

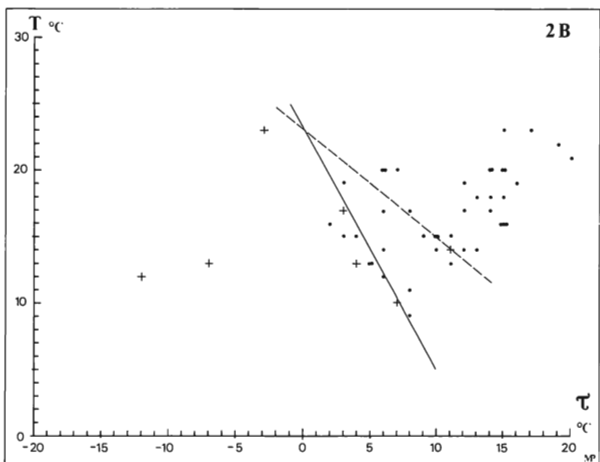
		$T+a\tau=b$	P_F	P_{NF}	Q_F	Q_{NF}	Q_F+Q_{NF}
F_g	G_O	$T+2.25\tau=30.0$	68.1	86.1	86.5	67.4	153.9
	G_F	$T+0.41\tau=16.5$	75.9	72.2	59.5	84.8	144.3
	G_{NF}	$T+0.61\tau=24.0$	61.7	100.0	100.0	50.0	150.0
F_m	G_O	$T+1.84\tau=23.0$	54.5	97.4	85.7	88.4	174.1
	G_{NF}	$T+0.81\tau=23.0$	33.3	100.0	100.0	67.4	167.4
F_h	G_O	$T+0.03\tau=11.0$	14.6	98.8	75.0	82.6	157.6
	G_{NF}	$T+1.54\tau=26.5$	9.2	99.2	87.5	65.7	153.2
S_g	G_O	$T+1.54\tau=26.0$	55.2	91.5	77.1	79.7	156.8
	G_F	$T+2.61\tau=23.0$	65.8	85.4	52.1	91.2	143.3
	G_{NF}	$T+1.00\tau=29.0$	40.9	98.8	97.9	54.1	152.0
S_m	G_O	$T+0.24\tau=19.5$	27.5	100.0	100.0	68.8	168.8
S_h	G_O	$T+1.96\tau=30.0$	11.5	95.9	73.3	52.5	125.8
N_g	G_O	$T+1.96\tau=9.0$	95.2	47.6	64.5	90.9	155.4
	G_{NF}	$T+0.05\tau=18.5$	86.7	58.3	83.9	63.6	147.5
N_m	G_O	$T+1.00\tau=14.0$	(100.0)	(100.0)	100.0	100.0	200.0
N_h	G_O	$T+0.65\tau=14.5$	(66.7)	100.0	100.0	85.7	185.7
NE_g	G_O	$T+1.96\tau=17.5$	89.3	66.7	86.2	72.7	158.9
	G_F	$T+6.31\tau=4.0$	90.9	50.0	69.0	81.8	150.8
	G_{NF}	$T+0.85\tau=22.5$	83.8	91.7	98.3	50.0	148.3
NE_m	G_O	$T+2.25\tau=19.5$	90.9	(83.3)	90.9	83.3	174.2
NE_h	G_O	$T+0.61\tau=9.0$	(80.0)	93.8	80.0	93.8	173.8

Mit Ausnahme der Flachdrucklagen existieren derartige Extremalgeraden nur in den Klassen geringer Bewölkung. Dabei besteht die Tendenz zu flacheren Steigungswinkeln auf der „frostfreien Seite“, zu steileren auf der „Frostseite“ (vgl.

F_g



F_m



F_h

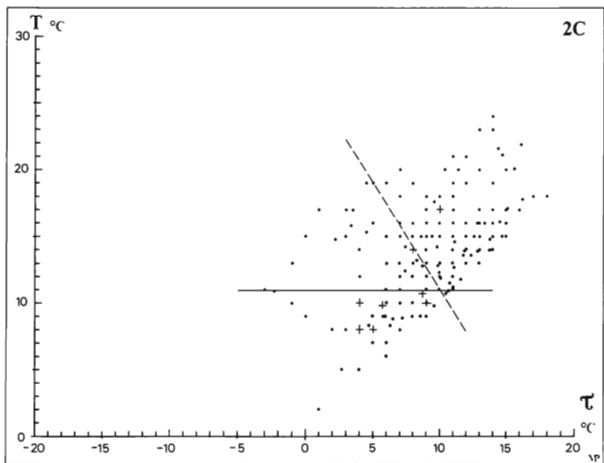
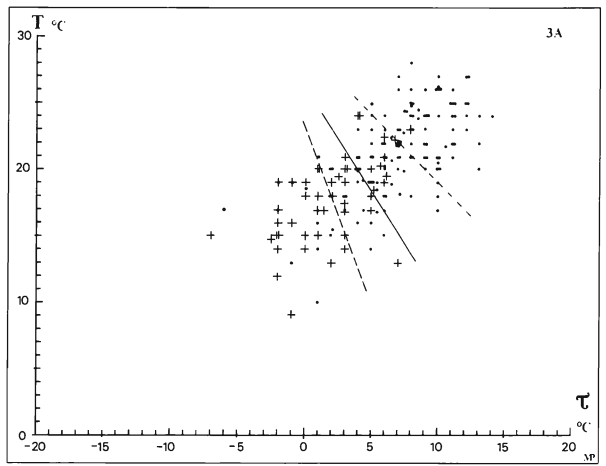
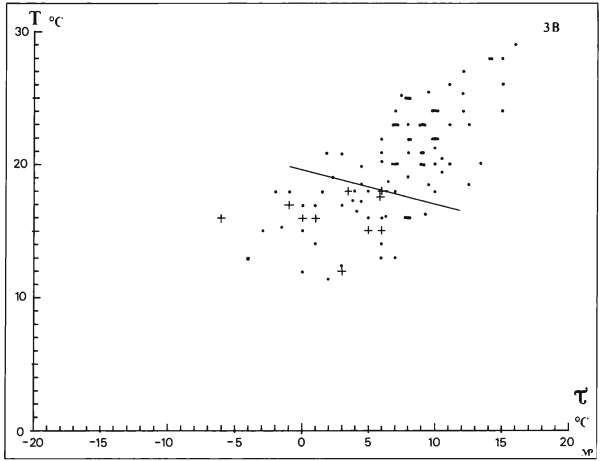


Abb. 2:
Flachdrucklagen (F)

S_g



S_m



S_h

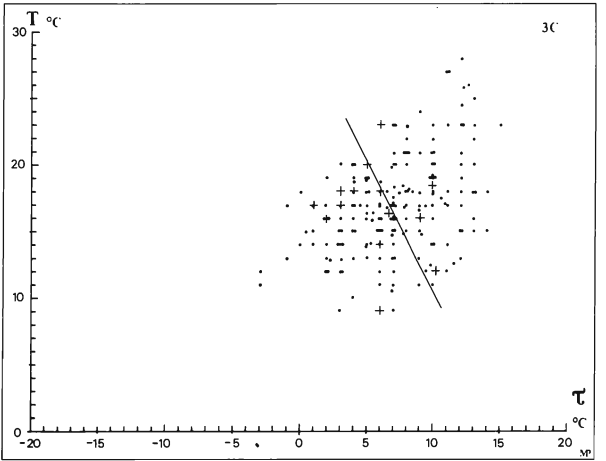
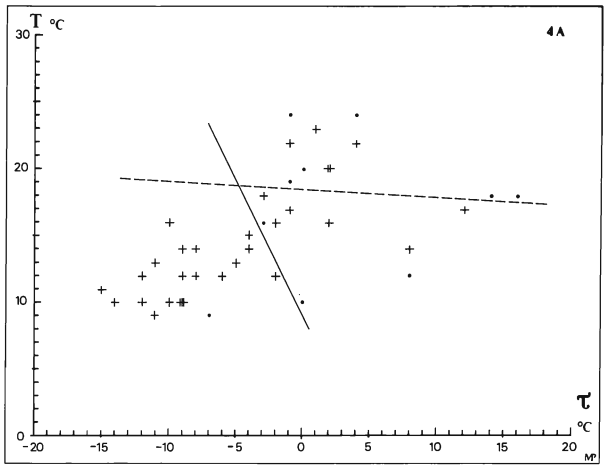
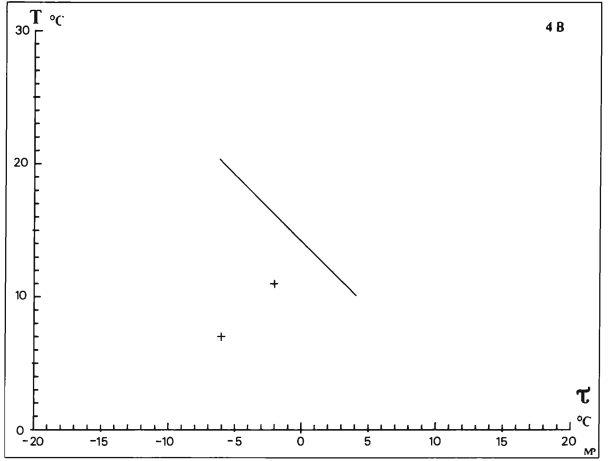


Abb. 3:
Südlagen (S)

N_g



N_m



N_h

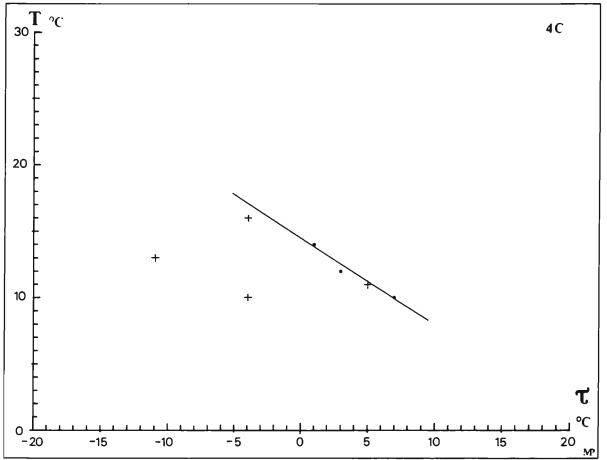
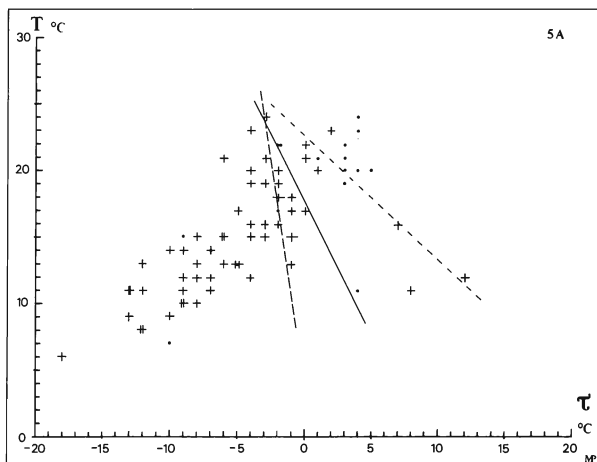
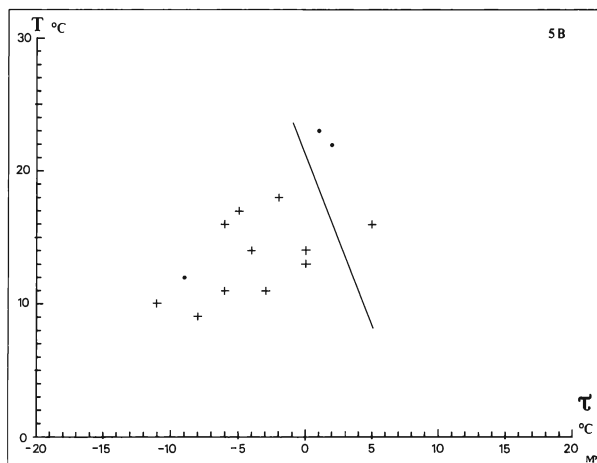


Abb. 4:
Nordlagen (N)

NE_g



NE_m



NE_h

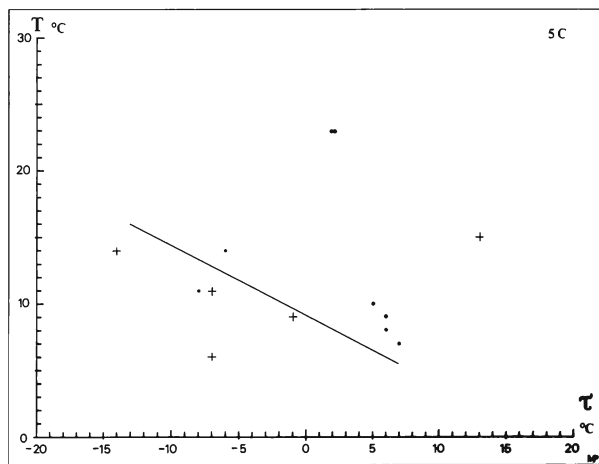


Abb. 5:

Nordostlagen (NE)

- a: geringer nächtlicher Bedeckungsgrad (g)
- b: mittlerer nächtlicher Bedeckungsgrad (m)
- c: hoher nächtlicher Bedeckungsgrad (h)

Abb. 2 — 5 und Tab. 4), d.h. zu einer relativ stärkeren Gewichtung der Ausgangstemperatur bei der Bereichsausgrenzung maximaler Frostfreiheits-Wahrscheinlichkeit bzw. des Feuchtigkeitsgehalts bei derjenigen maximaler Nachtfrost-Wahrscheinlichkeit. Ausnahmen davon treten bei den Flachdrucklagen auf mit steilerer Gerade maximaler Frostfreiheitshäufigkeit unter starker Bewölkung (bei allerdings schon äußerst flacher Gerade optimierter Aufteilung) sowie mit flacherer Gerade maximaler Frosthäufigkeit unter geringer Bewölkung (als mögliches Indiz einer besonders heterogenen Zusammensetzung aus verschiedenen Einzelwetterfällen). Die Zunahme des Bedeckungsgrades (im Mittel von einer Abnahme der Lufttemperatur und einem leichten Ansteigen der Taupunkttemperatur begleitet) scheint sich in einem tendenziellen Rückgang der Steigungswinkel niederzuschlagen, also in einer zunehmenden Bedeutsamkeit der Ausgangstemperatur: bei ohnehin durch stärkere Bewölkung schon herabgesetzter effektiver Ausstrahlung spielt der Feuchtigkeitsgehalt der Luft keine so ausschlaggebende Rolle für die nachfolgende Temperaturentwicklung mehr wie das Ausgangstemperaturniveau, von dem aus bei reduzierter Ausstrahlung noch eine Nullpunktsunterschreitung stattfinden kann. Ausnahme davon ist die Klasse starker Bewölkung bei den Südlagen mit außergewöhnlich steiler Separationsgerade: hier erreicht auch die (bestmögliche) Summe der Aufteilungsquoten ($Q_F + Q_{NF}$) einen wesentlich geringeren Wert als sonst, d.h. die Unterteilung in Frost- und Frostfreiheitsbereich gelingt bei vielen ungewöhnlich gelagerten Fällen insgesamt nur mit eingeschränkter Güte. In der nordöstlichen Klasse mittlerer Bewölkung dagegen wäre auch eine flachere Gerade gleicher Aufteilungsgüte (etwa mit Steigungskoeffizient 1.00) zu ziehen gewesen, die eingetragene steilere Gerade resultiert lediglich aus der Wahl inmitten des Intervalls aller möglichen Steigungswinkel.

Bei den vorliegenden Aufteilungen werden teilweise bereits brauchbare Wahrscheinlichkeiten erreicht: vorwiegend allerdings für Frostfreiheit mit weiter steigender Güte bei zunehmendem Bedeckungsgrad (Ausnahme: S_h), lediglich in der nördlichen Klasse geringer Bewölkung steigt diese Wahrscheinlichkeit selbst bei Maximierung nicht einmal auf 60% (vgl. Tab. 4). Die Frostwahrscheinlichkeiten sinken vor allem bei Süd- und Flachdrucklagen mit zunehmendem Bedeckungsgrad rapide ab und erreichen nur bei Nord- und Nordostlagen (soweit ausreichend repräsentiert) Werte um oder über 90%. Insgesamt sind also bei letzteren Bereiche mit deutlich höherer Frostwahrscheinlichkeit festzulegen als bei Süd- und Flachdrucklagen (Maxima selbst bei geringer Bewölkung von nur 65.8% bzw. 75.9%); diese andererseits gestatten bis zu den geringbewölkten Fällen hin Bereiche mit höherer Wahrscheinlichkeit der Frostfreiheit zu bestimmen (abgesehen von S_h über 98% gegenüber 92—94% bei NE sowie 58% und nur einmal 100% bei N). Bleiben bei diesen Geraden maximierter Wahrscheinlichkeit ggf. größere Zwischenbereiche gemischten Auftretens von Frost- und frostfreien Nächten, so separieren die Geraden optimierter Aufteilung ($Q_F + Q_{NF}$ maximal) die gesamte Punktwolke in nur zwei Bereiche entgegengesetzter Charakteristik; dabei reduzieren sich allerdings die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten in den Klassen geringer Bewölkung meist zwischen 7 und 14%, bei den frostkritischsten Nordostlagen auf der „frostfreien Seite“ sogar um 25%, auf der „Frostseite“ nur um 1.6% (vgl. Tab. 4).

4. Folgerungen

Die für prognostische Zwecke teils immer noch großen verbleibenden Unsicherheiten lassen sich im wesentlichen auf drei Punkte zurückführen:

a) *Lokale Unterschiede zwischen den Orten der meteorologischen Meßwert-erfassung (Flughafen Bozen) und der Spätfrostregistrierung (Etschtal bei Terlan).* Dabei fallen nicht so sehr die Abweichungen in der topographischen Strömungskanalisation und im vorabendlichen Absolutniveau von Temperatur und Taupunkt ins Gewicht (beides läßt sich durchaus als Indikator für bestimmte Strömungslagen bzw. Luftmassenbeschaffenheiten verwenden) als vielmehr kleinräumige Unterschiede im Bedeckungsgrad und in der Windstärke, die gerade unter Ausstrahlungsbedingungen für das auch kleinräumig differenzierte Verteilungsbild von Nachtfrosten ausschlaggebend sein können (vgl. Geiger, 1961, S. 127 ff.; Van Eimern und Häckel, 1979, S. 151).

b) *Ungenügende Genauigkeit bei der registrierten Windstärke:* die fehlende Auflösung gerade bei den in der Nacht bei weitem am häufigsten (90,9%) vorkommenden Windgeschwindigkeiten unter 2 kn erlaubt keine weitere Differenzierung der nächtlichen Luftbewegung als kritischer Größe aus- oder fortgesetzter (wenngleich abgeschwächter) Advektion oder unterschiedlich starker turbulenter Durchmischung.

c) *Diskontinuierliche Veränderungen des atmosphärischen Zustandes im Laufe der Nacht:* nicht selten treten stärkere Veränderungen beider Vorzeichen etwa beim Bedeckungsgrad oder beim Feuchtigkeitsgehalt auf, die in einem Teil der Nacht ganz andere Bedingungen schaffen, als sie durch die hier zugrundegelegten Werte des mitternächtlichen Bedeckungsgrades und der vorabendlichen Taupunkttemperatur repräsentiert werden. So etwa zeigen von den insgesamt 15 Frostnächten, die bei vorabendlicher Südströmung und mitternächtlich noch hohem Bedeckungsgrad auftreten, sechs nur noch geringe und weitere zwei nur noch mittlere Bewölkung in der zweiten Nachthälfte. Unter den sechs Tagen, die trotz besonders großer Ausgangsfeuchtigkeit (Taupunkttemperatur um 18 Uhr $> 10^{\circ}\text{C}$) zu Nachtfrost geführt haben, sind drei Tage zu finden, bei denen mit nächtlich einsetzender Advektion aus Nord oder Nordost eine kräftige Taupunkterniedrigung eingeleitet wird (Taupunkt um 0 Uhr zwischen 9 und 16°C niedriger als um 18 Uhr). Und unter den 13 Tagen, die trotz besonders geringer Ausgangsfeuchtigkeit (Taupunkt $< -5^{\circ}\text{C}$) nicht zu Nachtfrost geführt haben, finden sich fünf Tage mit kräftiger nächtlicher Taupunkterhöhung um wenigstens 6°C , fünf weitere Tage mit nächtlich auflebender Luftbewegung und zwei Tage mit zusätzlich noch aufziehender Bewölkung in der zweiten Nachthälfte. Derartige Entwicklungen können die ursprüngliche Ausgangssituation gänzlich verändern und je nach Intensität und Eintrittszeitpunkt noch ein andersartiges Ergebnis bewirken als anfänglich absehbar.

Dennoch berechtigen die vorliegenden Ergebnisse zu der Annahme, auf der Grundlage von längeren, wenigstens zehnjährigen Meßreihen möglichst nahe am Problemort ein gegenüber dieser ersten Näherung hinreichend verbessertes witterungsklimatisches Beurteilungsverfahren der lokalen Spätfrostgefährdung erstellen zu können. Erforderlich sind hierfür kontinuierliche Angaben zumindest über Windrichtung und Windstärke (mit möglichst niedriger Anlaufschwelle), über Lufttemperatur und Taupunkt (der auch unter Hinzuziehung von Feuchttemperatur oder relativer Luftfeuchtigkeit und Luftdruck zu bestimmen wäre) sowie über den Gesamtbedeckungsgrad, jeweils möglichst direkt aus dem primär betroffenen Talsohlenbereich. Bei zusätzlicher Verwendung meteorologischer Vorhersagen über Strömungsverhältnisse und Luftmasseneigenschaften ließe sich dann ein lokales Prognoseverfahren für die Spätfrostzeit entwickeln.

Literatur

- (1) Bürger, K.: Zur Klimatologie der Großwetterlagen. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 6 (45), 79 (1958).
- (2) Faust, R.: Ein Hilfsmittel zur Nachtfrostvorhersage. Annalen der Meteorologie 2, 105—111 (1949).
- (3) Fliri, F.: Wetterlagenkunde von Tirol. Tiroler Wirtschaftsstudien, 13, 436 (1962).
- (4) Fliri, F.: Das Klima der Alpen im Raume von Tirol. Monographien zur Landeskunde Tirols, I, 454 (1975).
- (5) Geiger, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Die Wissenschaft, 78, 646 (1961).
- (6) Gutsche, A.: Über das Auftreten von Frösten bei verschiedenen Großwetterlagen im Frühling und Herbst. Berichte des Deutschen Wetterdienstes US-Zone, 7, Nr. 42, 288—292 (1952).
- (7) Hess, P. u. H. Brezowsky: Katalog der Großwetterlagen Europas. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 15, Nr. 113 (1977).
- (8) Lauscher, F.: Anwendungen der ostalpinen Wetterlagenklassifikation. Wetter und Leben 34 (1), 20—28 (1982).
- (9) Schnelle, F., (Hrsg.): Frostschutz im Pflanzenbau. Band 1: Die meteorologischen und biologischen Grundlagen der Frostschadensverhütung. 488 (1963).
- (10) Schnelle, F., (Hrsg.): Frostschutz im Pflanzenbau. Band 2: Die Praxis der Frostschadensverhütung. 604 (1965).
- (11) Schüepf, M. u. F. Fliri: Witterungsklimatologie. Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentral-Anstalt 4, 215—229 (1967).
- (12) Südtiroler Beratungsring für Obst- und Weinbau: Obstbau/Weinbau. Mitteilungen 1968—85.
- (13) Van Eimern, J. u. H. Häckel: Wetter- und Klimakunde für Landwirte, Gärtner, Winzer und Landschaftspfleger. 269 (1979).

Anschrift des Verfassers:

Dr. J. Jacobeit

c/o: Lehrstuhl für Physische Geographie d. Univ. Augsburg

Universitätsstraße 10

D-8900 Augsburg, BRD