

Jucundus Jacobeit

Zur Spätfrostgefährdung im mittleren Etschtal

1. Einleitung

Im mittleren Etschtal zwischen Meran und Bozen, das rund ein Drittel der gesamten Obstanbaufläche Südtirols umfaßt, werden vom Lehrstuhl für Physische Geographie der Universität Augsburg unter der Leitung von Prof. Dr. K. Fischer seit mehreren Jahren agrarklimatologische Untersuchungen zur Spätfrostgefährdung durchgeführt, die dankenswerterweise immer wieder auf Unterstützung und Entgegenkommen bei zahlreichen Ortsansässigen sowie beim Südtiroler Beratungsring für Obst- und Weinbau gestoßen sind. Berichtet wurde bislang über diese Aktivitäten von Fischer (1988) sowie mit Blick auf einige witterungsklimatologische Aspekte von Jacobeit (1987). Im folgenden Beitrag sollen mit gebotener Behutsamkeit einige vorläufige Ergebnisse zur Sprache kommen, die aus Untersuchungen der letzten Jahre resultieren. Dabei sei auch an die zahlreichen Studierenden gedacht, die im Rahmen ihrer Geographieausbildung an der Datengewinnung beteiligt waren. Thematisch wird bei der folgenden Darstellung zu unterscheiden sein zwischen Einflußfaktoren der Spätfrostgefährdung, die konstant gegeben oder zumindest kurz- bis mittelfristig als invariant anzusehen sind, und Einflußfaktoren, die grundsätzlich beständig variieren. Die erste Gruppe umfaßt im wesentlichen das Relief, physikalische Bodeneigenschaften sowie sortentypische Merkmalsausprägungen, die zweite Gruppe vor allem die Gesamtheit der spätfrostrelevanten Wetter- und Witterungsparameter.

2. Invariante Einflußfaktoren

a) Relief

Das mittlere Etschtal, über das etwa bei Fischer und Leidlmair (1975) eine landeskundliche Beschreibung vorliegt, ist schon aufgrund seines markanten Reliefs durch eine besondere Frostgefährdung gekennzeichnet: Seine Randhöhen, die sich bis zu mehr als 1600 m über den Talboden erheben, verursachen durch die starke Horizontüberhöhung eine deutliche Verkürzung der Einstrahlungszeit, während aufgrund der großen Talbreite von 2–3 km die nächtliche Ausstrahlung vor allem im Talsohlenbereich ungehindert wirksam werden kann. So lagen nach unseren Messungen bei frühjährlichem Strahlungswetter die nächtlichen Temperaturminima in Talmitte (Waldthalerhof) bis zu 5–6° C niedriger als auf den randlichen Kegeln (Nals, Terlan) und noch 3–4° C niedriger als selbst schon in mittlerer Hanglage (Unter-Sirmian, Legar). Um den differenzierenden Einfluß des Reliefs nicht nur punkt- und zeitweise, sondern möglichst flächendeckend und für beliebige Zeitpunkte erfassen zu können, sind von uns reliefabhängige Berechnungen der potentiellen Tagessummen terrestrischer Bestrahlung durchgeführt worden. Diese Tagessummen sind deshalb nur potentiell, weil der variable Bewölkungsgrad nicht berücksichtigt werden kann, also jeweils maximal mögliche Werte bei vollkommener Wolkenlosigkeit bestimmt werden. Die Bedeutung derartiger Bestrahlungssummen liegt dennoch vor allem darin, daß sie als Maß für den unterschiedlichen Strahlungsgenuß angesehen werden können, der reliefabhängig von Standort zu Standort variiert und sowohl für die Energieaufnahme vor der nachfolgenden Ausstrahlung als auch für den Entwicklungsfortgang der Vegetation besonders wichtig ist.

Zur Berechnung ist im Vorfeld die Ermittlung folgender Größen an möglichst vielen Geländepunkten erforderlich:

- Höhenlage über Meeresniveau;
- Hangneigung;
- Hangexposition, das heißt Himmelsrichtung, in die man der Falllinie am Hang folgend blickt;
- Horizontüberhöhung, das heißt standortbezogene Bestimmung der tatsächlichen Grenzlinie zwischen Himmelsgewölbe und reliefierter Erdoberfläche.

Mittels dieser Geländeinformationen läßt sich nach Fliri (1978) die terrestrische Bestrahlung an einem Standort in folgenden Schritten errechnen:

- Bestimmung astronomischer Parameter wie Deklination und Solarstrahlung für ein vorgebbares Datum;
- Berechnung der Stundenwinkel (das ist neben der Deklination die zweite Koordinate eines Gestirns im astronomischen Äquatorialsystem) für den Sonnenauf- und -untergangspunkt am überhöhten Horizont;
- Berechnung der Stundenwinkel für hypothetischen Sonnenauf- und -untergang am exponierten und geneigten Hang selbst, ohne Berücksichtigung der Horizontüberhöhung;
- Vergleich der letzten beiden Teilschritte zur Bestimmung der Stundenwinkel für den tatsächlichen Sonnenauf- und -untergangspunkt am betrachteten Standort;
- Berechnung der Weglänge, die die Solarstrahlung durch die Atmosphäre zurückzulegen hat, sowie der dabei zu veranschlagenden Strahlungsverluste;
- Berechnung der täglichen Bestrahlungssumme durch Integration über die Zeitspanne effektiver Sonneneinstrahlung.

Bislang sind etwa 900 Geländepunkte aus dem mittleren Etschtal einschließlich seiner Randhöhen erfaßt, woraus sich interpolativ flächendeckende Karten der reliefabhängigen Bestrahlung zu verschiedenen Terminen im Jahresablauf erstellen lassen werden. Schon jetzt zeichnen sich teils erhebliche Lagedifferenzierungen ab, etwa zwischen den westsüdwest- und den ostnordostexponierten Talseiten, die während der frühjährlichen Blüte- und Spätfrostzeit tägliche Strahlungssummen mit Unterschieden bis zu 800 J/cm^2 empfangen ($1 \text{ J} \approx 0.24 \text{ cal}$). Auch zu anderen Jahreszeiten dürften die intendierten Karten brauchbare Hinweise für den Obst- und Weinbau liefern.

b) Wärmeleitfähigkeit des Bodens

Als weitere Einflußgröße, die das generelle Ausmaß der Spätfrostgefährdung mitbestimmt, sind physikalische Bodeneigenschaften zu nennen, die für den Energieumsatz der Erdoberfläche bedeutungsvoll sind, von der sowohl tagsüber die Erwärmung der darüberliegenden Luftschichten als auch nachts die ausstrahlungsbedingte Abkühlung ausgeht. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang die Wärmeleitfähigkeit des Bodens, die dafür maßgeblich ist, wieviel Energie bei Strahlungsabsorption an der Oberfläche in bestimmter Zeit weiter in die Tiefe eindringen und umgekehrt bei nächtlicher Ausstrahlung als Wärmeschub wieder nach oben gelangen kann. Die bereits von Fischer (1988) angesprochene schlechte Wärmeleitfähigkeit der Böden gerade in den besonders frostgefährdeten flachen Abschnitten des Etschtales läßt sich an einer typischen Tauchchronendarstellung der Bodentemperaturen beim Waldthalerhof für einen frühjährlichen Spätfrosttag belegen (Abb. 1). Dabei werden die vertikalen Temperaturprofile bis in eine Bodentiefe von 30 cm für acht jeweils drei Stunden auseinanderliegende Uhrzeiten graphisch zusammengefaßt. Die schlechte Wärmeleitfähigkeit manifestiert sich in einer Reihe besonderer Merkmale:

- die große Tagesschwankung der Temperatur an der Oberfläche, die schon im Frühjahr fast 35° C betragen kann. Darin äußert sich einmal die geringe Wärmemenge, die tagsüber in die Tiefe geleitet wird, während die Oberfläche sich stark erwärmt; zum anderen kühlen nachts Oberfläche und bodennahe Luftschicht kräftig ab, weil nicht rasch genug hinreichend Wärme aus den tieferen Bereichen nachgeführt werden kann.
- Die nur mehr äußerst geringe Tagesschwankung der Temperatur schon in 30 cm Tiefe bei fast invertiertem Tagesgang: die schlechte Wärmeleitfähigkeit läßt hier erst in der späten Nacht das Temperaturmaximum entstehen, das überdies nur ein halbes Grad über dem nachmittäglichen Temperaturminimum liegt.
- Der wenig ausgebuchtete vertikale Temperaturverlauf am frühen Vormittag und Abend: Böden mit besserer Wärmeleitfähigkeit würden etwa gegen 18 Uhr bei bereits erfolgreicher Oberflächenabkühlung das Temperaturmaximum schon in einigen cm Tiefe zeigen und dort gegen 9 Uhr bei wieder erfolgreicher Oberflächenerwärmung noch ein deutlicheres Minimum aufweisen.

Insgesamt führt also die schlechte Wärmeleitfähigkeit der Böden in den flachen Etschtalabschnitten dazu, daß die dort schon reliefbedingt gegebene besondere Frostgefährdung bodenphysikalisch noch weiter erhöht wird.

c) Blühtermin der Apfelsorten

Der im mittleren Etschtal dominierende Apfelanbau verteilt sich auf eine Vielzahl unterschiedlicher Sorten, die mehr oder weniger voneinander abweichende Blühtermine zeigen. Im einzelnen richten sich diese Termine nach der alljährlich unterschiedlichen Witterung und nach spezifischen Standorteigenschaften, relativ gleichbleibend ist jedoch die zeitliche Abfolge der Blühtermine von den früh- bis zu den spätblühenden Apfelsorten. Diese Zeitverschiebungen sind insofern von Wichtigkeit, als vorverlegte Blütstadien in zweierlei Hinsicht eine Steigerung der Spätfrostgefährdung bedeuten: zum einen vergrößert sich der besonders sensible Zeitraum und damit im Mittel die Frostauftretswahrscheinlichkeit währenddessen, zum anderen erfolgt die Ausweitung ins frühere Frühjahr hinein und damit in eine Zeit durchschnittlich häufigerer Spätfrostfälle. Tab. 1 zeigt die zeitlichen Verschiebungen der Blühtermine für die wichtigsten Apfelsorten, wie sie vom Beratungsring 1990 festgestellt worden sind. Man erkennt, daß z. B. bei der Vollblüte Abstände bis über zwei Wochen auftreten, die in oben genanntem Sinne durchaus ins Gewicht fallen. Standörtlich schlägt sich dies insofern nieder, als spätblühende Sorten wie Morgenduft und Gloster ausschließlich im stärker frostgefährdeten Talbodenbereich vorzufinden sind, während die früher blühende Sorte Golden Delicious eher weniger frostgefährdete Standorte besetzt. Da sie mittlerweile jedoch rund 44 Prozent Anteil am Obstbau des mittleren Etschtales erreicht hat, ist sie genötigt, zu rund einem Drittel ihrer Anbaufläche auch in die ungünstigeren Talbodenbereiche hineinzugehen (freundliche mündliche Mitteilung von Herrn P. Pichler, Beratungsring). Man sieht also, wie Marktabhängigkeiten, die die Anbauaufteilung nach Sorten wesentlich bestimmen, zu Konsequenzen führen können, die nicht mit rein naturhaushaltlichen Gesichtspunkten übereinstimmen.

Tab. 1: Zeitliche Verschiebung der Blühtermine 1990 (in Tagen) für die wichtigsten Apfelsorten im mittleren Etschtal (jeweils bezogen auf die Gravensteiner-Termine).
Quelle: Südtiroler Beratungsring für Obst- und Weinbau

	Aufblühen:	Vollblüte:	Abblühen:
Gravensteiner	(Referenzsorte)	(5 Tage später)	(5 Tage später)
Summerred: Idared:	} 4	} 2	} 4
Jonathan:	5	5	7
Red Delicious: Golden Delicious: Granny Smith: Jonagold:	} 11	} 12	} 11 12
Winesap: Elstar: Gloster: Morgenduft:	} 14	} 16	} 16 18

3. Variierende Einflußfaktoren

Beständige Aufmerksamkeit erfordern diejenigen Einflußfaktoren, die grundsätzlich und auch kurzfristig variieren, also alle spätfrostrelevanten Wetter- und Witterungsparameter. Im Interesse einer möglichst sicheren Faßbarkeit wird man deshalb bemüht sein, tragfähige Prognoseverfahren zu entwickeln, die

eng auf die lokalen Gegebenheiten abgestellt sind. Im folgenden soll zunächst auf die in diesem Zusammenhang häufig zitierte Taupunktregel eingegangen werden, bevor die Grundzüge eines denkbaren Prognoseverfahrens umrissen und die dazu nötige Bestimmung der wichtigsten Meßgrößen diskutiert werden.

a) Problematik der Taupunktregel

Nach der sogenannten Taupunktregel besteht dann nächtliche Frostgefahr, wenn die abends möglichst mehrere Male bestimmte Taupunkttemperatur unter oder nahe 0°C liegt, keine Nachtfrostgefahr dagegen, wenn sie deutlich über 0°C liegt (vgl. Van Eimern und Häckel, 1979, S. 198). Diese Regel unterstellt, daß zumindest bei windschwachen Strahlungswetterlagen, die ja besonders spätfrostträchtig sind, die Taupunkttemperatur als Maß des absoluten Wasserdampfgehalts der Luft annähernd gleich bleibt und deshalb als Untergrenze der nächtlichen Lufttemperatur aufgefaßt werden kann. Beides erweist sich jedoch als nicht generell gültig, wie ein typisches Beispiel aus unseren kontinuierlichen Frühjahrmessungen im Ein-Minuten-Intervall zeigt. Abb. 2 gibt für einige strahlungsintensive Tage in der ersten Maiwoche 1989 den geglätteten Verlauf von Lufttemperatur und Taupunkttemperatur in 2 m Höhe beim Waldthalerhof in zentraler Tallage wieder. Man erkennt, daß trotz allgemein windschwachen Verhältnissen der Taupunkt keineswegs gleichbleibt, sondern Schwankungen bis zu 5°C mit mehreren Phasendurchgängen pro Tag aufweist. Nach einem ersten Anstieg am frühen Morgen, der auf die Verdunstungsbelebung bei beginnendem Temperaturanstieg zurückzuführen ist, erfolgt bereits wenige Stunden später ein vorübergehender Abfall, der sich nach einem erneuten Anstieg gegen Mittag für längere Zeit am Nachmittag wiederholt. Grund hierfür ist die bei zunehmender Erwärmung einsetzende turbulente Durchmischung, die zu einem vertikalen Luftaustausch und damit insbesondere zur Herabmischung etwas trockenerer Luft aus größerer Höhe bis in Bodennähe führt. Der am Vormittag einsetzende Talwind bedingt zwar eine zusätzliche Verdunstungsbelebung, die sich im zwischenzeitlichen Wiederanstieg des Taupunktes gegen Mittag niederschlägt, doch kann sich dieser Effekt bei Erreichen der höchsten Tagestemperaturen nicht mehr gegen den weiter gesteigerten Vertikalaustausch durchsetzen, so daß am Nachmittag wieder ein Taupunkttrückgang zu beobachten ist. Erst gegen Abend, wenn bei niedrigeren Temperaturen der Vertikalaustausch zusammenbricht, die Verdunstung aber noch nennenswert weitergeht, erfolgt ein erneutes Wiederanstiegen des Taupunktes auf ähnlich hohes Niveau wie bereits früher am Tage. Nächtlicher Taufall an den Vegetationsoberflächen läßt dann bei leicht abgeschwächtem Temperaturrückgang den Taupunkt wieder absinken, bis bei Tagesanbruch ein neuer Zyklus einsetzt.

Nun muß zwar nicht immer ein dreifacher Phasendurchgang pro Tag stattfinden, da die Schwankungen zur Einstrahlungszeit vor allem vom Verhältnis zwischen Vertikalaustausch und Talwind abhängen. Aber zumindest doppelte Maxima und Minima sind für Strahlungswetterbedingungen durchaus charakteristisch, woraus sich angesichts der möglichen Amplituden eine hohe prognostische Fragwürdigkeit der Taupunktregel ergibt. Insbesondere der abendliche Taupunktanstieg kann zu einer falschen Beurteilung der nächtlichen Situation führen. Selbst wenn man das abendliche Taupunktminimum heranzieht, zeigt der mittlere Tag in Abb. 2, daß es immer noch von der Lufttemperatur der darauffolgenden Nacht unterschritten werden kann.

b) Grundzüge eines lokalen Prognoseverfahrens

Eine verlässlichere Beurteilung der witterungsklimatologischen Spätfrostgefährdung erfordert also sicherlich die Einbeziehung von mehr als nur einem gewichtigen Parameter. Wie ein derartig ausgeweitetes Prognoseverfahren grundsätzlich beschaffen sein könnte, ist in Anlehnung an eine frühere Arbeit von Faust (1949) bereits bei Jacobeit (1987) zu skizzieren versucht worden. Prinzipiell geht die Überlegung davon aus, auf der Grundlage umfangreichen Datenmaterials eine möglichst wirkungsvolle und statistisch verlässliche Aufteilung von kombinierten Parameterkonstellationen in Bereiche des Frosteintretens und der Frostfreiheit zu erreichen. Beispielsweise könnten alle verfügbaren Daten über die abendliche Luft- und Taupunkttemperatur in ein gemeinsames Diagramm

eingetragen werden (etwa mit dem Taupunkt auf der waagrechten Achse, der Lufttemperatur auf der senkrechten Achse abgetragen) und die resultierende Punktwolke durch eine Gerade in zwei Teile separiert werden, von denen der eine möglichst nur Wertepaare mit nachfolgendem Nachtfrost, der andere möglichst nur Wertepaare mit nachfolgender Frostfreiheit umfaßt. Bei hinreichendem Datenumfang wäre dieses Diagramm prognostisch insofern zu nutzen, als die aktuellen Werte von Luft- und Taupunkttemperatur als Entscheidungsgrundlage dafür verwendet werden könnten, ob man sich gerade im Bereich mit oder ohne statistisch zu erwartendem Nachtfrost befindet.

Da jedoch auch zwei berücksichtigte Größen noch nicht ausreichend sein werden, muß das Verfahren für höhere Dimensionen verallgemeinert werden. Bei drei berücksichtigten Größen tritt dann an die Stelle der Trenn-Geraden eine Trenn-Ebene, bei noch höheren Anzahlen eine entsprechende Hyperfläche. Da dies jedoch nicht mehr anschaulich ist, kann man sich auch derart behelfen, zweidimensionale Diagramme wie oben für mehrere Varianten getrennt zu entwerfen, die zwischen weiteren Witterungszuständen unterscheiden. In der eingangs erwähnten Arbeit (Jacobeit, 1987) wurden beispielsweise Temperatur-Taupunkt-Diagramme für vier verschiedene Strömungslagen und jeweils drei Bewölkungsklassen, insgesamt also zwölf unterschiedliche Witterungszustände erstellt. Hätte auch die Windgeschwindigkeit noch berücksichtigt werden können, wäre diese Anzahl nochmals vervielfacht worden. Als hauptsächliche Einschränkung erwies sich jedoch die Notwendigkeit, zur Frostbeurteilung im Etschtal bei Terlan meteorologische Daten vom Flughafen Bozen heranziehen zu müssen. Um hier zu standortbezogeneren Ergebnissen gelangen zu können, müssen erst hinreichend lange Meßreihen vor Ort vorliegen. Auch die Datenerhebungen während unserer Praktikumsaufenthalte vermögen dies nicht zu leisten, benötigt werden in der Tat kontinuierliche Stationsaufzeichnungen über viele Jahre hinweg. Wozu unsere Datenerhebungen jedoch eingesetzt werden können, ist die empirisch abgesicherte Bestimmung der ausschlaggebenden Meßgrößen unter der Vielzahl aller betrachteten Parameter. Dies hat Bedeutung sowohl für die Festlegung der langfristig kontinuierlich zu messenden Größen als auch für die konkrete Ausgestaltung eines künftigen Prognoseverfahrens im oben dargelegten Sinne.

c) Bestimmung der wichtigsten Meßgrößen

Während jeweils einiger Wochen zwischen Mitte April und Anfang Mai sind von uns in mehreren Jahren beim Waldthalerhof kontinuierliche Messungen zahlreicher Parameter durchgeführt worden, die in fortlaufenden 5-Minuten-Mittelwerten elektronisch abgespeichert vorliegen. Thermische und hygri-sche Größen, die teils direkt gemessen, teils indirekt aus Messungen berechnet worden sind, wurden mit Blick auf möglicherweise wichtige vertikale Differenzierungen in vier verschiedenen Niveaus erfaßt:

- in 10 m Höhe als standardmäßigem Überströmungsniveau, in dem üblicherweise auch die Windmessung erfolgt;
- in 6 m Höhe als kronennahem Zwischenniveau;
- in 2 m Höhe als meteorologischem Standardniveau;
- in 0,7 m Höhe als Beispielniveau innerhalb der bodennahen Luftschicht.

Berücksichtigt wurden dabei jeweils die fünf folgenden Größen:

- Lufttemperatur t (gleich Trockentemperatur);
- Feuchttemperatur f ;
- relative Luftfeuchtigkeit h ;
- Sättigungsdefizit d ;
- Dampfdruck e .

Dabei meint e den Partialdruck des Wasserdampfs, also den Luftdruckanteil, der vom atmosphärischen Wasserdampfgehalt ausgeübt wird, d die Differenz von e zum temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck E und h das prozentual ausgedrückte Verhältnis von e zu E . Die Bedeutung des Dampfdrucks als Maß des absoluten Wasserdampfgehalts der Luft liegt für die Spätfrostproblematik vor allem in der Eigenschaft des Wasserdampfs, ein äußerst wirkungsvoller Absorber infraroter Erdausstrahlung zu sein, so daß bei hohem Dampfdruck wesentlich

weniger nächtliche Wärmestrahlung in den Weltraum entweichen kann als bei niedrigem. Resultiert der Dampfdruck aus der Wasserdampfanreicherung der Luft, so hängt die von der Atmosphäre maximal aufnehmbare Wasserdampfmenge (gemessen im Sättigungsdampfdruck) ausschließlich von der Temperatur ab; deshalb existieren eigene relative Feuchtmaße (als Differenzgröße d oder Quotientgröße h), die insbesondere für den Unterschied zwischen Trocken- und Feuchttemperatur ausschlaggebend sind.

Zusätzlich zu den genannten 20 Größen sind noch folgende Parameter miteinbezogen worden:

- Windrichtung w als Indikator der Strömungslage;
- Windgeschwindigkeit v als horizontale Austauschgröße;
- Luftdruck p als Kenngröße des allgemeinen Witterungscharakters;
- Temperatur o an der Erdoberfläche, die als Hauptenergieumsatzfläche besonders deutliche Schwankungen erzeugt;
- einfallende kurzweilige Strahlung k , die im wesentlichen die zugestrahlte Energie umfaßt;
- einfallende Gesamtstrahlung g , die die gesamte Energieeinnahme an der Erdoberfläche umfaßt (einschließlich langwelliger Atmosphärenstrahlung);
- ausgehende Gesamtstrahlung a , die sowohl reflektierte als auch terrestrisch ausgestrahlte Anteile umfaßt;
- Strahlungsbilanz b , die sich als Differenz von g und a ergibt.

Mit diesen insgesamt 28 Meßgrößen sind die im vorliegenden Zusammenhang hauptsächlich einzubeziehenden Parameter im wesentlichen erfaßt, sieht man von der zwar hochbedeutsamen, aber meßtechnisch nicht ohne weiteres exakt bestimmbareren Bewölkung ab. Immerhin beeinflußt sie jedoch in hohem Maße alle Strahlungsterme und ist somit wenigstens noch indirekt miteinbezogen.

Um zu einer Auswahl der wichtigsten Größen unter den erfaßten 28 Parametern zu gelangen, kann die statistische Methode der sogenannten Faktorenanalyse angewandt werden. Dabei wird aus einer größeren Anzahl von Variablen (hier die 28 Meßgrößen) eine kleinere Anzahl sogenannter Faktoren bestimmt, die die wesentlichen Gesichtspunkte des zeitlichen Schwankungsverhaltens im Ausgangsmaterial repräsentieren. Der Zusammenhang zwischen Variablen und Faktoren wird durch ihre Korrelationskoeffizienten (hier auch Ladungen genannt) wiedergegeben, die Werte zwischen 0 (kein Zusammenhang) und ± 1 (vollkommener Zusammenhang) annehmen können. Am Ergebnis läßt sich also ablesen, welche Meßgrößen ähnlich variieren (hohe Ladungen auf demselben Faktor) und welches charakteristische Schwankungsverhalten von den Faktoren repräsentiert wird (Meßgrößen mit den höchsten Ladungen). Insgesamt ergibt sich eine Auskunft über die wichtigsten Meßgrößen, die untereinander zeitlich jeweils verschiedenartig variieren, für sich jedoch ein Schwankungsverhalten zeigen, das in ähnlicher Form auch bei untergeordneteren Meßgrößen auftritt. Da die Faktorenanalyse unterschiedliche Schwankungsamplituden nicht zu berücksichtigen vermag, kann dieses Vorgehen zwar keine Frostprädiktoren ermitteln, aber aufgrund der Bestimmung der unterschiedlichen Schwankungstypen bei den betrachteten Meßgrößen wird eine begründete Auswahl von Parametern ermöglicht, die die zeitlichen Veränderungen im Zustand der Atmosphäre hinreichend wiedergeben.

In die Analyse eingegangen sind mehr als 200.000 Einzelwerte, die während verschiedener Praktikumsaufenthalte seit 1986 beim Waldthalerhof gemessen bzw. indirekt bestimmt worden sind. Ausgenommen wurden Perioden anhaltender Niederschläge, die leicht abweichende Ergebnisse erbringen (siehe weiter unten), für die Spätfrostproblematik aber auch nicht von nennenswerter Bedeutung sind. In Tab. 2 sind die Ladungen der sechs Faktoren aufgeführt, die sich als Resultat der Analyse ergeben. Dabei werden nur diejenigen Ladungen wiedergegeben, denen inhaltliche Bedeutung zukommt, das sind in erster Linie hohe Ladungen über 0.7 sowie nachgeordnet noch mittlere Ladungen zwischen 0.5 und 0.7, die in einigen Fällen als Sekundärmoment auftreten.

Man erkennt, daß drei der sechs Faktoren denkbar einfach strukturiert sind, da sie jeweils nur genau eine Meßgröße repräsentieren. Erwartungsgemäß handelt es sich dabei um die voneinander unabhängigen Größen Luftdruck, Wind-

richtung und Windgeschwindigkeit. Sehr viele thermische und hygrische Größen laden dagegen den ersten Faktor, wobei bezeichnenderweise alle unterschiedlichen Niveaus vertreten sind. Ihre Differenzierung schlägt sich also primär nur in der Schwankungsamplitude nieder, die hier ja nicht erfaßt wird, bringt aber keine zusätzlichen eigenständigen Schwankungstypen ein. In der allmählichen Abnahme der Ladungen von 10 m Höhe bis zum Bodenniveau drückt sich allerdings die zunehmende Beeinflussung atmosphärischer Zustandsveränderungen durch die Beschaffenheit der Erdoberfläche und ihres Bewuchses schon indirekt aus; die Temperatur an der Oberfläche zeigt dann bereits eine Sekundärladung von Faktor 3.

Erwähnenswert bleibt, daß die relativen Feuchtmaße h und d ähnlich hohe Ladungen zeigen wie die Lufttemperatur t , also Sättigungsdefizit und relative Luftfeuchtigkeit weitgehend gleich- bzw. gegensinnig mit der Temperatur variieren, während die Feuchttemperatur f durchgängig etwas niedrigere Ladungen erbringt und stattdessen bei Faktor 2 noch mittlere Sekundärladungen ausbildet. Diese angedeutete Übergangstellung von f wird dadurch verständlich, daß Faktor 2 im wesentlichen den Dampfdruck e repräsentiert, also den absoluten Wasserdampfgehalt der Luft, der im Unterschied zu den relativen Feuchtmaßen unabhängig von der Temperatur variiert. Bedenkt man die Tatsache, daß sich der Dampfdruck über einen logarithmischen Formelzusammenhang direkt in die Taupunkttemperatur umrechnen läßt, so wird die Übergangstellung der Feucht-

Tab. 2: Ladungen der Faktorenanalyse von 28 Meßgrößen (Abkürzungen siehe Text) für frühjährliche Messungen im mittleren Etschtal (unter Ausschluß kontinuierlicher Regenperioden). Aufgeführt sind nur hohe Ladungen über 0.7 sowie mittlere Ladungen zwischen 0.5 und 0.7 (eingeklammert).

		t	f	h	d	
Faktor 1:	10 m:	0.94	0.80	-0.92	0.95	
	6 m:	0.93	0.75	-0.91	0.93	
	2 m:	0.89	0.74	-0.91	0.92	
	0.7 m:	0.84	0.72	-0.87	0.86	
	0 m:	0.74				
		e	f			
Faktor 2:	10 m:	0.96	(0.52)			
	6 m:	0.93	(0.59)			
	2 m:	0.97	(0.58)			
	0.7 m:	0.81	(0.57)			
		k	g	a	b	o
Faktor 3:	0.90	0.92	0.92	0.91	(0.55)	
		p				
Faktor 4:	0.95					
		w				
Faktor 5:	0.99					
		v				
Faktor 6:	0.84					

temperatur von Faktor 1 zu Faktor 2 als Mittelstellung zwischen Luft- und Taupunkttemperatur noch anschaulicher.

Faktor 3 repräsentiert schließlich im wesentlichen die verschiedenen Strahlungsterme, wobei auch die ausgehende Gesamtstrahlung a gleichsinnig variiert, da die in ihr enthaltene Ausstrahlung von der 4. Potenz der Temperatur des ausstrahlenden Körpers abhängt (negative Strahlungsbilanz und sinkende Temperaturen bei Nacht ergeben sich also bei kleinerer Ausstrahlung als am Tage, die nur nicht mehr durch Einstrahlung kompensiert werden kann). Interessanterweise wird aber ein vom Temperaturfaktor unabhängiger Strahlungsfaktor eigenständig ausgewiesen, worin die zeitliche Verzögerung beim Energieumsatz von Strahlung in Wärme zum Tragen gelangt. Da die Erdoberfläche als Hauptenergieumsatzfläche fungiert, verwundert es auch nicht, daß die Temperatur θ an der Erdoberfläche noch mit einer mittleren Sekundärladung bei Faktor 3 vertreten ist.

Das in Tab. 2 wiedergegebene Bild erfährt nur während andauernder Regenperioden in einer Hinsicht eine gewisse Abwandlung: Die relativen Feuchte maße koppeln sich weitgehend von der Temperatur ab und konstituieren einen eigenen Faktor, während der Dampfdruckfaktor noch in ähnlicher Höhe von der Feuchte-temperatur und etwas schwächer von der Lufttemperatur geladen wird. Verursacht ist diese Umverteilung durch das übermäßige Feuchtigkeitsangebot, das die relative Feuchte auch über Teile des Zeitraums sich ändernder Temperatur nahe der Sättigungsgrenze verbleiben läßt, während der Wasserdampfgehalt der Luft bei ungebrochenem Feuchtigkeitsnachschub mit der Temperatur weiter ansteigen kann. Für die Auswahl der wichtigsten Meßgrößen ist diese Abwandlung jedoch ohne Belang.

Somit ergeben sich aufgrund der Faktorenanalyse als ausschlaggebende Parameter die Lufttemperatur (aus Vergleichbarkeitsgründen bevorzugt im Standardniveau von 2 m), Dampfdruck (bzw. Taupunkttemperatur), eine geeignete Strahlungsgröße (in erster Linie dürfte die Strahlungsbilanz von Interesse sein), Luftdruck, Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Diese sechs Größen bilden eine ausreichende Basis für ein lokales Prognoseverfahren im weiter oben umrissenen Sinn. Feuchte-temperatur und Erdoberflächentemperatur sind dazu nicht unbedingt erforderlich (siehe ihre Übergangstellung in Tab. 2!), wenngleich sie aufgrund besonderer Eigenschaften (f als Maß für die Blattmassentemperatur nach Beregnung bzw. θ als Temperaturgröße mit maximalen Amplituden) wichtige Zusatzinformationen liefern. Die meisten Größen sind mit Standardgeräten (Thermohygrograph, Barometer, kombinierter Windgeber) auch problemlos zu bestimmen, lediglich die Strahlungserfassung bereitet gerätetechnisch nach wie vor erhebliche Schwierigkeiten. Alternativ wäre auch eine fortlaufende Bewölkungsregistrierung äußerst wertvoll, die allerdings neben einer Mengenklassifizierung zumindest noch eine Stockwerksdifferenzierung einschließen sollte.

4. Ausblick

Die bisher vom Augsburger Lehrstuhl erbrachten Vorarbeiten lassen sich vor allem in zweierlei Hinsicht zukünftig umsetzen: i) Erstellung von Karten potentieller terrestrischer Bestrahlungssummen, die für verschiedene Zeitpunkte im Jahr eine quantitative Standortbeurteilung nach dem reliefabhängigen Strahlungsgenuß erlauben. ii) Konkretisierung eines statistischen Prognoseverfahrens lokaler Spätfröste im Talbodenbereich. Voraussetzung dafür ist allerdings das Vorhandensein derartig langer Stationsmeßreihen vor Ort, daß die Spannbreite der kombinierten Parameterkonstellationen möglichst weitgehend erfaßt und hinreichend repräsentiert ist; wahrscheinlich dürfte dies nicht unter einem Jahrzehnt zu erreichen sein. Liegen jedoch erst einmal empirische Aufteilungsdiagramme zwischen Nachtfrost und Frostfreiheit für die vorangehenden Witterungszustände vor (vgl. Kap. 3. b), so läßt sich die statistische Frostgefahr einfach durch die Lage der aktuellen Parameterkonstellation (d. h. ihrer kombinierten Meßwerte laut Momentanablesung etwa am Vorabend) im betreffenden Aufteilungsdiagramm beurteilen. Zieht man anstelle momentaner Werte verlässliche meteorologische Vorhersagen über die entscheidenden Größen heran (nach Kap. 3. c wären das Lufttemperatur, Dampfdruck, Strahlungsbilanz oder Bewölkung, Luftdruck, Windrichtung und Windgeschwindigkeit), so wäre auch eine lokale Spätfrostopprognose für einige Tage im voraus prinzipiell möglich.

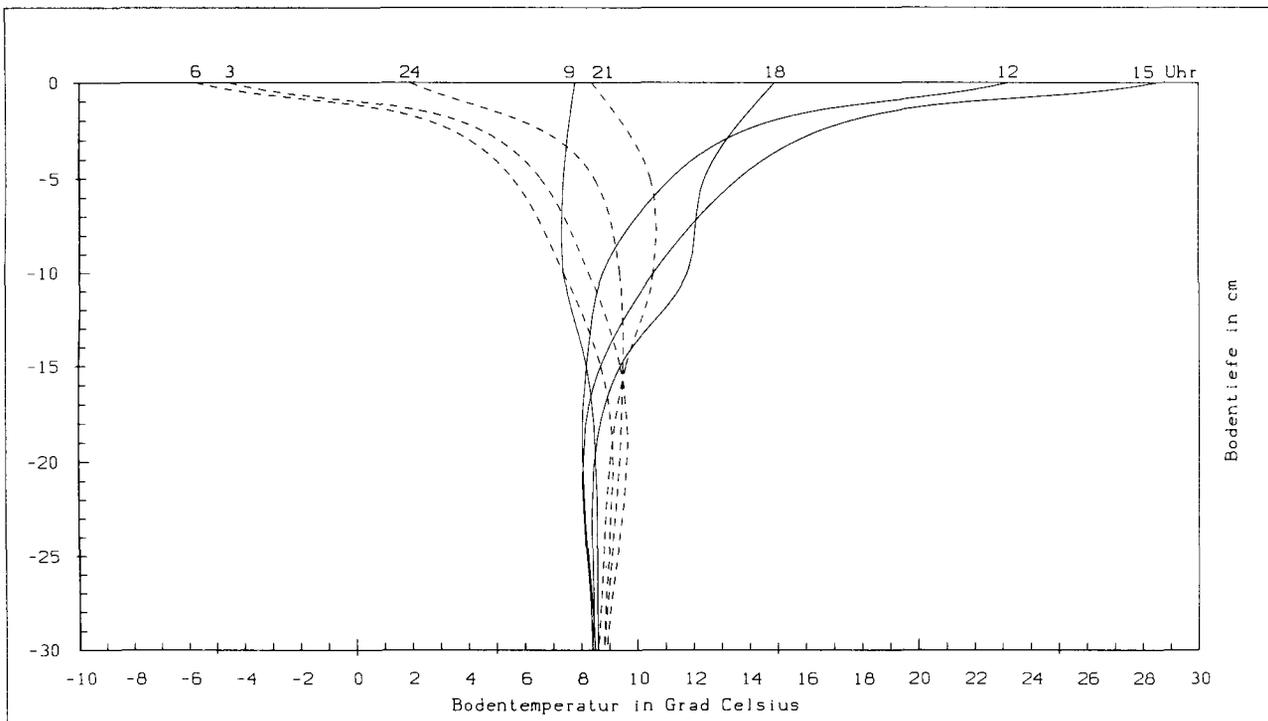


Abb. 1: Tautochronendarstellung der Bodentemperaturen bis 30 cm Tiefe während eines frühjährlichen Spätfrosttages beim Waldthalerhof

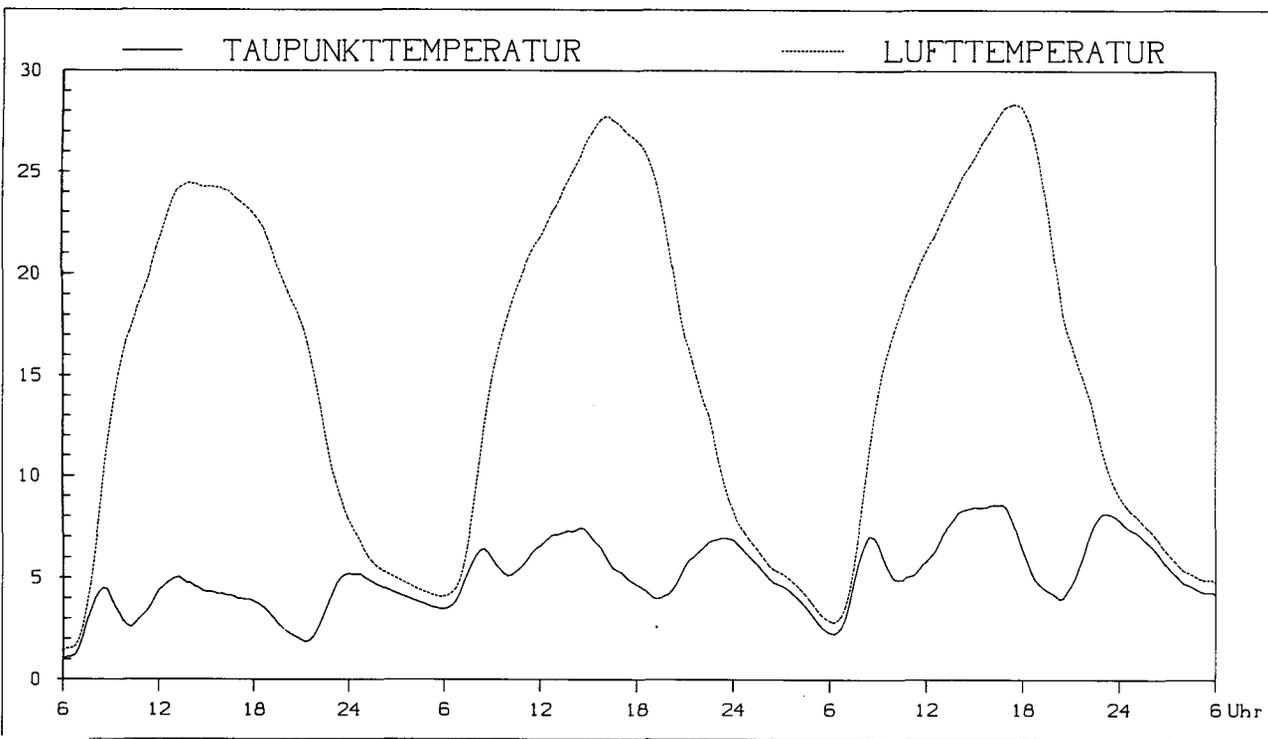


Abb. 2: Geglätteter Verlauf von Luft- und Taupunkttemperatur in 2 m Höhe beim Waldthalerhof in der Zeit vom 3. bis 6. Mai 1989

Literatur:

- Faust, R.: Ein Hilfsmittel zur Nachtfrostvorhersage. In: Annalen der Meteorologie, 2, 1949, S. 105-111.
- Fischer, K.: Zur Entstehung der Spätfröste im Etschtal. In: Obstbau, Weinbau, 25, 1988, S. 107-111.
- Fischer, K. u. A. Leidlmair: Eisacktal – Überetsch – Mittleres Etschtal – Vintschgau. In: Innsbrucker Geographische Studien, 2, 1975, S. 331-368.
- Fliri, F.: Die terrestrische Bestrahlung von Hängen verschiedener Richtung und Neigung bei überhöhtem Horizont. In: Wetter und Leben, 30, 1978, S. 108-120.
- Jacobeit, J.: Witterungsklimatologische Aspekte der Spätfrostdgefährdung im mittleren Etschtal. In: Wetter und Leben, 39, 1987, S. 199-212.
- Van Eimern, J. u. H. Häckel: Wetter- und Klimakunde für Landwirte, Gärtner, Winzer und Landschaftspfleger. Stuttgart 1979.

Anschrift:

**Prof. Dr. J. Jacobeit, Geographisches Institut der Universität, D-8700 Würzburg,
Am Hubland**

