

*Aus dem Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München*

## Identifikation von Witterungsereignissen mit pflanzenphysiologischer Streßwirkung für Waldbäume

Von H. MAYER, C. KÖNIG und ANNIE RALL

### 1 Einleitung

Bei der Diskussion über die Ursachen der neuartigen Waldschäden scheint es manchmal, daß die Rolle des Klimas, und damit auch der Gesamtheit von Witterungssequenzen mit teilweise extremer Ausprägung, in die Ecke wissenschaftlich unhaltbarer Überlegungen abgedrängt ist. Doch wenn wir uns mit der Bereitstellung von meteorologischen Basisinformationen unter dem Aspekt „Streßbelastung von Waldbäumen“ befassen, dann ist darunter nicht zu verstehen, daß wir für die neuartigen Waldschäden das Klima oder die Witterung allein verantwortlich machen. Vielmehr unterstützen wir den Ansatz der multifaktoriellen Schädigung durch andere Primärursachen. Keinesfalls zu unterschätzen ist aber die Relevanz von spezifischen, meist extremen Witterungsereignissen, wenn sie sekundär auf den bereits prädisponierten, geschwächten Waldbaum wirken. Kommen zusätzlich noch anthropogene, das Klima bzw. die Witterungsabläufe modifizierende Einflüsse hinzu, dann erscheint es voreilig, die Relevanz von Klima bzw. extremen Witterungsereignissen aus der Diskussion um synergistische Effekte bei den neuartigen Waldschäden auszuschließen.

### 2 Potentielle Witterungsstreßfaktoren

Analysiert man Witterungserscheinungen hinsichtlich ihrer Relevanz für neuartige Waldschäden, so bilden eindeutige fachliche Begriffsklärungen eine notwendige Voraussetzung. So versteht man unter einem Witterungsereignis einen meist mehrtägigen Wetterablauf mit überregional ähnlichen Wertebereichen der meteorologischen Parameter. Als extrem soll jenes Witterungsereignis eingestuft werden, für das unter Zugrundelegung von langjährigen Meßreihen nur eine geringe statistische Auftretenswahrscheinlichkeit (z. B. aktuelles Tagesminimum der Lufttemperatur kleiner als der um die zweifache Standardabweichung reduzierte, analoge langjährige Mittelwert) festgestellt werden kann. Mit „Frostchock“, dessen wirkungsbezogenes Ausmaß im Januar sicher eine andere Dimension als im April hat, bezeichnet man einen Lufttemperatursturz, der sich z. B. im Hochwinter dadurch auszeichnet, daß sich innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden die Lufttemperatur  $T_2$  um mindestens 15 K von  $T_1 > 0^\circ\text{C}$  auf  $T_2 < -3^\circ\text{C}$  verringert.

Alle waldschadensrelevanten Witterungsanalysen müssen den Bezug zum pflanzenphysiologischen Streßrisiko beinhalten, da sie sonst den Charakter einer reinen Klimatologie annehmen. Dabei kommt der Witterungsvorgeschichte eine große Bedeutung für die Interpretation des nachfolgenden Extremereignisses zu.

Ein beträchtliches Problem wirft in diesem Zusammenhang die bis jetzt noch unzureichend geklärte Frage nach zeitabhängigen, pflanzenphysiologischen Schwellenwerten und -funktionen für meteorologische Parameter, einzeln oder in Form von Komplexgrößen, auf.

In der Abbildung 1 sind zehn Witterungserscheinungen zusammengestellt, die einzeln oder kombiniert in irgendeiner Form zu pflanzenphysiologischer Belastung von Waldbäumen füh-

### Potentielle Witterungsstressfaktoren (PWF)

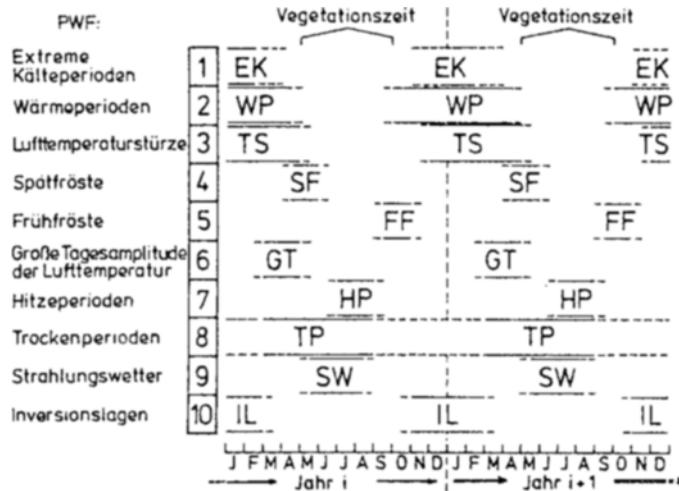


Abb. 1. Jahreszeitliches Auftreten von potentiellen Witterungsstressfaktoren

Fig. 1. Seasonal occurrence of potential meteorological stress factors

ren können und deshalb als „potentielle Witterungsstressfaktoren“ bezeichnet werden. Jedem Faktor sind dabei schwerpunktmäßig die Auftrittszeiträume mit dem größten Belastungsrisiko in tiefen und mittleren Lagen zugeordnet. Treten mehrere potentielle Witterungsstressfaktoren zeitgleich auf, dann steigt die Wahrscheinlichkeit der Gefährdung durch typische forstmeteorologische Schadensereignisse, wie z. B. bei der sommerlichen Dürre durch die Faktoren Hitzeperioden, Trockenperioden und Strahlungswetter.

Diese Arbeit beschäftigt sich näher mit den potentiellen Witterungsstressfaktoren 1 bis 6, an denen der Luftfrost wesentlich beteiligt ist. Dabei werden Daten der Lufttemperatur  $T_a$  aus längeren Zeiträumen verwendet, die an ausgewählten Klimahaupt- und Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes in Bayern (Tabelle 1) in 2 m Höhe über Grund gemessen wurden.

Tabelle 1. Kennzeichnung von Stationen des Deutschen Wetterdienstes (letzter Stand) mit Angabe des Untersuchungszeitraums

Table 1. Characteristics of stations of the German Weather Service (most recent situation) with information on period of investigation

Stationsname	geographische		Höhe über NN	Zeitraum	Forstlicher Wuchsbezirk
	Breite N	Länge E			
Würzburg	494618	095731	268 m	1. 7. 1950–1983	Südliche Fränkische Platte
Ebrach	495102	102929	360 m	1. 11. 1962–1983	Steigerwald
Fichtelberg	500016	115136	720 m	1. 11. 1946–1983	Fichtelgebirge
Pommelsbrunn	493025	113056	368 m	3. 3. 1949–1983	Nördliche Frankenalb
Weißenburg	490113	105742	422 m	12. 7. 1946–1986	Südliche Frankenalb
Höllenstein-Kraftwerk	490744	125158	403 m	1. 1. 1941–1983	Östlicher Vord. Bayer. Wald
Großer Falkenstein	490510	131654	1307 m	11. 7. 1946–1982	Innerer Bayer. Wald
Augsburg	482540	105547	461 m	1. 11. 1946–1983	Unteres Lechtal
München-Riem	480816	114239	527 m	1. 3. 1948–1983	Münchener Schotterebene
Garmisch-Partenkirchen	472902	110349	719 m	1. 12. 1941–1986	Mittlere Bayer. Kalkalpen
Reit im Winkel	474037	122857	695 m	1. 10. 1940–1983	Chiemgauer Alpen

### 3 Wintertypen von Lufttemperaturverläufen

Analysiert man für die Monate November bis April die langjährigen Verläufe von  $T_1$  im Hinblick auf ein potientiellies Streßrisiko für Waldbäume, so lassen sich bestimmte Wintertypen herausfiltern. Die Grundlage für deren schematische Typisierung in der Abbildung 2 bilden die Abweichungen des aktuellen täglichen Minimums von  $T_1$  vom entsprechenden langjährigen Mittelwert. Zusätzlich enthält die Abbildung 2 in qualitativer Weise den jahreszeitlichen Verlauf des angenommenen Temperaturschwellenwerts für eine mögliche pflanzenphysiologische Belastung. Insgesamt lassen sich dabei sechs Fälle unterscheiden:

#### Schematische Typisierung von Lufttemperaturverläufen im Zeitabschnitt NOVEMBER-APRIL

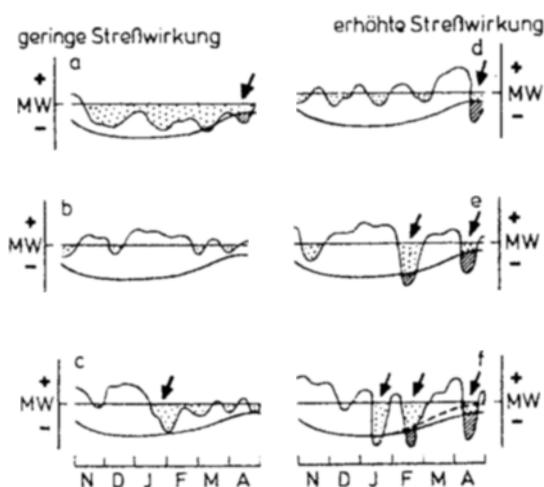


Abb. 2. Wintertypen von Lufttemperaturverläufen  
Fig. 2. Winter types of air temperature patterns

MW: langjähriger Mittelwert der Lufttemperaturminima  
+/- : schematische pos/neg Abweichungen vom MW  
- : Schwellenwert für pflanzenphysiologische Belastung

Im Fall a sind anhaltende Frostperioden ohne intermittierende Wärmeperioden dargestellt. Wegen der daraus resultierenden ausgeprägten Frostabhärtung dürften auch jeweils für die Jahreszeit zu tiefe tägliche  $T_1$ -Minima als relativ unbedenklich für die oberirdischen Organe von Waldbäumen angesehen werden (z. B. im Winter 1962/63). Der Fall b veranschaulicht anhaltend milde Witterung ohne ausgeprägte Frostperioden mit  $T_1$  unter  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ , wie etwa im Winter 1974/75. Trotz abgeschwächter Frostabhärtung der Pflanzenorgane sind keine frostbedingten Belastungen oder Schäden an den Waldbäumen zu erwarten. Im Fall c ist der allmähliche Übergang von milder Witterung zu hochwinterlichen Kälteperioden mit täglichen  $T_1$ -Minima bis  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  verdeutlicht. Dabei handelt es sich ebenfalls um eine relativ unbedenkliche Witterungsentwicklung für die oberirdischen Pflanzenorgane, da ausreichend Zeit für die Adaptation an den strengen Frost bestand.

Generell belastend hingegen sind nach längeren milden Witterungsabschnitten mit  $T_1$ -Werten über dem Gefrierpunkt abrupt einsetzende Frostperioden mit täglichen  $T_1$ -Minima, z. B. im angehenden Frühjahr unter  $-3\text{ }^\circ\text{C}$  (Fall d). Infolge von photo- und thermoperiodischen Einwirkungen auf die pflanzenphysiologische Aktivität ist die Frostenthärtung rasch fortgeschritten, was dann zu einer erhöhten Frostempfindlichkeit führt (z. B. Winter 1982/83). Ungünstig wirken sich bereits ab Januar (Fall e) abrupte Kaltlufteinbrüche nach Wärmeperioden mit

nächtlichen Minima von  $T_a$  unter  $-20\text{ °C}$  aus. Grundsätzlich muß angenommen werden (Fall f), daß die pflanzenphysiologische Belastungsschwelle um so eher durch tiefe Lufttemperaturen unterschritten wird, je häufiger ein Wechsel zwischen Wärme- und Kälteperioden pro Zeitabschnitt erfolgt. Dieser Effekt läßt sich als summarische Wirkung beschreiben.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Extreme Luftfröste im Winter

Einen wesentlichen, in seiner pflanzenphysiologischen Streßwirkung jedoch schwer einzustufenden Faktor stellen extreme  $T_a$ -Minima für unsere Waldbäume dar. Im Hochwinter sind zwar  $T_a$ -Minima zwischen  $-10\text{ °C}$  und  $-15\text{ °C}$  als durchaus normal zu bewerten, sinkt aber  $T_a$  unter  $-20\text{ °C}$  oder gar  $-25\text{ °C}$  ab, besteht bei mangelnder Abhärtung oder vorangegangener Teilenthärtung nach Wärmeperioden ein Schadensrisiko für die Nadel- und Knospenorgane (siehe Zusammenstellung bei EISENHUT 1987). Eine diesbezügliche retrospektive Analyse der  $T_a$ -Werte ergibt unter Zugrundelegung der Schwellenwerte

- tägliche Minima von  $T_a \leq -25,0\text{ °C}$  in den Monaten Dezember bis Februar (Tabelle 2),
- tägliche Minima von  $T_a \leq -20,0\text{ °C}$  in den Monaten Dezember bis Februar (Tabelle 3),
- tägliche Minima von  $T_a \leq -15,0\text{ °C}$  im Monat März (Tabelle 4)

*Tabelle 2. Extreme Luftfrostergebnisse an ausgewählten Stationen des Deutschen Wetterdienstes in Bayern ( $T_{a, \text{min}}$ : Tagesminimum der Lufttemperatur)*

*Table 2. Occurrence of extreme subfreezing air temperatures at selected stations of the German Weather Service in Bavaria ( $T_{a, \text{min}}$ : diurnal minimum of air temperature)*

Stationsname	$T_{a, \text{min}} \leq -25\text{ °C}$
Würzburg	---
Ebrach	---
Fichtelberg	9./10. 2. 1956
Pommelsbrunn	10. 2. 1956; 21. 12. 1969
Weißenburg	10. 2. 1956; 3. 12. 1973; 8./9. 1. 1985
Höllenstein-Kraftwerk	11. 1. 1941; 16. 1. 1941; 21./24. 1. 1942; 12. 2. 1942; 11. 1. 1943; 25. 1. 1947; 10./11. 2. 1956; 15. 1. 1960; 14./15. 1. 1963; 17./18. 1. 1963; 21. 1. 1963; 2./3. 2. 1963; 5. 2. 1963; 7. 2. 1963; 18. 1. 1964
Großer Falkenstein	1./2. 2. 1956; 9./10. 2. 1956
Augsburg	10. 2. 1956
München-Riem	2. 2. 1956; 10. 2. 1956; 18. 1. 1963
Garmisch-Partenkirchen	21./22. 1. 1942; 2. 2. 1956; 10./11. 2. 1956; 8. 1. 1985
Reit im Winkel	6./7. 1. 1947; 25./26. 1. 1947; 29./31. 1. 1947; 4. 2. 1949; 2. 2. 1956; 10./11. 2. 1956; 25. 12. 1962; 14. 1. 1963; 18. 1. 1963; 23. 1. 1963; 3. 12. 1973

folgende Ergebnisse: solch auffällige Frostereignisse konzentrieren sich in Bayern nach 1945 bis zum Winter 1969/70 im wesentlichen auf zwei Termine, nämlich auf den „Jahrhundert“-Februar 1956 und den extrem langen und kalten Winter 1962/63. So lagen am 10. Februar 1956 die  $T_a$ -Minima in Bayern teilweise um  $-30\text{ °C}$ , in Oberstdorf, Weiden und Höllenstein-Kraftwerk (Bayerischer Wald) sogar unter  $-32\text{ °C}$ . Infolge regionaler Einflußkomponenten gab es aber in Bayern auch Gebiete, in denen die extremen Frostereignisse weniger stark ausgeprägt waren. Hinsichtlich ihrer zeitlichen Folge deuten die Tabellen 2 und 3 für Bayern eine Häufung von extremen Luftfrostergebnissen von 1954 bis 1956 sowie in den 60er und 80er Jahren, allerdings wieder mit regionalen Differenzierungen, an. In den 70er Jahren hingegen wurden in Bayern nur wenige extreme Frostereignisse registriert. Extreme Luftfröste im März (Tabelle 4) traten in Bayern seit Mitte der 70er Jahre erst wieder Anfang März 1987 auf.

Tabelle 3. Anzahl von Tagen mit  $T_{a, \min} \leq -20,0 \text{ }^\circ\text{C}$  an ausgewählten Stationen des Deutschen Wetterdienstes, aufgeteilt in 3jährige Abschnitte

Table 3. Number of days with  $T_{a, \min} \leq -20,0 \text{ }^\circ\text{C}$  at selected stations of the German Weather Service, expressed in 3-year periods

Stationsname	1951	1954	1957	1960	3jährige Abschnitte			1972	1975	1978	1981
	1953	1956	1959	1962	1963	1966	1969	1974	1977	1980	1983
Würzburg	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Ebrach	0	0	0	0	8	4	6	2	1	3	2
Fichtelberg	0	4	0	1	0	1	0	0	0	1	0
Pommelsbrunn	0	4	0	1	1	9	5	2	0	1	1
Weißenburg	0	6	0	3	15	4	3	2	3	0	2
Höllenstein-Kraftwerk	0	12	0	15	35	5	8	1	2	4	4
Großer Falkenstein	0	13	0	3	5	2	3	0	0	2	0
Augsburg	0	5	0	0	6	0	0	0	0	0	2
München-Riem	0	11	1	5	12	0	1	2	1	0	0
Garmisch-Partenkirchen	0	10	0	3	5	3	3	1	0	1	2
Reit im Winkl	4	16	1	11	15	8	6	2	2	4	2

Tabelle 4. Anzahl von Tagen im Monat März mit  $T_{a, \min} \leq -15,0 \text{ }^\circ\text{C}$  an ausgewählten Stationen des Deutschen Wetterdienstes in Bayern, aufgeteilt in 3jährige Abschnitte

Table 4. Number of days in March with  $T_{a, \min} \leq -15,0 \text{ }^\circ\text{C}$  at selected stations of the German Weather Service in Bavaria, expressed in 3-year periods

Stationsname	1951	1954	1957	1960	3jährige Abschnitte			1972	1975	1978	1981
	1953	1956	1959	1962	1963	1966	1969	1974	1977	1980	1983
Würzburg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ebrach	0	0	0	0	5	0	3	0	0	0	0
Fichtelberg	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Pommelsbrunn	0	0	0	0	2	1	3	0	0	0	0
Weißenburg	0	1	1	0	4	0	2	0	0	0	0
Höllenstein-Kraftwerk	0	4	0	0	9	0	2	0	0	0	0
Großer Falkenstein	1	1	0	2	1	0	7	0	1	0	0
Augsburg	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0
München-Riem	0	0	0	0	4	0	3	0	0	0	0
Garmisch-Partenkirchen	0	0	0	0	1	1	7	2	0	0	0
Reit im Winkl	3	4	4	3	5	1	7	3	0	0	0

Aus solchen Extremereignissen kann aber nur für die oberirdischen Pflanzenorgane eine physiologische Belastung erwachsen, da  $T_1$ -Werte unter  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  aus energetischen Gründen (siehe u. a. LARCHER u. HÄCKEL 1985) nur bei geschlossener Schneedecke ab einigen cm Höhe erreicht werden. Der Wurzelhorizont ist dann vor Extremfrösten isoliert. Führen die mit einem extremen Kälteeinbruch verbundenen Schneefälle nur zu einer dünnen Schneedecke im Freiland, kann in geschlossenen Beständen infolge der Schneeeinterzeption bei anhaltendem Frost mit  $T_2$ -Werten unter  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  ein Ausfrieren der oberen Bodenhorizonte eintreten. Damit verbunden ist eine Gefährdung der unterirdischen Pflanzenteile, deren Frostresistenz im Winter bei Feinwurzeln nur bis  $-3 \text{ }^\circ\text{C}$  reicht und bei den Grobwurzeln zwischen  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  endet (LARCHER u. HÄCKEL 1985). Eine pflanzenphysiologische Beachtung gilt nach unserer Ansicht den südlich der Donau verbreitet aufgetretenen Extremfrösten vom 7. bis zum 10. 1. 1985 sowie am 13. 1. 1987 mit  $T_2$ -Werten unter  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ebenso stielte das extreme Luftfrostergebnis in der ersten Märzdekade 1987, das in Bayern mit Ausnahme von Unterfranken  $T_1$ -Werte unter  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$  bewirkte, ein potentielles Schadensrisiko für prädisponierte Nadelbäume dar.

## 4.2 Kälteeinbrüche und Kälterückfälle

Für die Fragestellung nach der pflanzenphysiologischen Streßwirkung von Kälteeinbrüchen und Kälterückfällen sind nur jene Witterungsereignisse relevant, die, ausgehend von  $T_j$ -Werten über  $0^\circ\text{C}$ , zu  $T_j$ -Werten unter  $-3^\circ\text{C}$  führen und abrupt, d. h. innerhalb eines Zeitraums von weniger als 24 Stunden, auftreten. Das herausragende Kälteeinbruchereignis in den letzten 30 Jahren war der Lufttemperatursturz am Jahreswechsel von 1978 zu 1979, der in Bayern Beträge bis zu  $-28\text{ K}$  annahm und  $T_a$ -Werte von bis zu  $-22^\circ\text{C}$  erreichte. Dieses Ereignis wurde von MAYER (1987) ausführlich beschrieben und spiegelt sich auch in der Tabelle 5 wider.

*Tabelle 5. Kälteeinbrüche und Kälterückfälle (am Tag i:  $T_{a,\max} \geq +5.0^\circ\text{C}$ ; am Tag i + 1:  $T_{a,\min} \leq -10.0^\circ\text{C}$  und  $T_{a,\max} \geq +5.0^\circ\text{C}$ ) an ausgewählten Stationen des Deutschen Wetterdienstes in Bayern*  
*Table 5. Cold snaps and cold relapses (on day i:  $T_{a,\max} \geq +5.0^\circ\text{C}$ ; on day i + 1:  $T_{a,\min} \leq -10.0^\circ\text{C}$  and  $T_{a,\max} \geq +5.0^\circ\text{C}$ ) at selected stations of the German Weather Service in Bavaria*

Stationsname	Termine
Würzburg	3./4. 3. 1955
Ebrach	4./5. 3. 1963; 11./12./13. 3. 1965
Fichtelberg	12./13. 3. 1965; 30./31. 12. 1978; 5./6. 1. 1982
Pommelsbrunn	11./12. 3. 1965
Weißenburg	4./5. 3. 1963; 11./12. 3. 1965; 31. 12. 1978/1. 1. 1979
Höllenstein-Kraftwerk	15./16. 3. 1947; 5./6. 3. 1969; 31. 12. 1978/1. 1. 1979
Großer Falkenstein	---
Augsburg	12./13. 3. 1965; 31. 12. 1978/1. 1. 1979
München-Riem	31. 12. 1978/1. 1. 1979
Garmisch-Partenkirchen	31. 12. 1978/1. 1. 1979; 18./19. 2. 1983; 24./25. 2. 1983; 20./21. 2. 1984
Reit im Winkl	9./10./11./12. 2. 1947; 27./28./29. 2./1. 3./2./3./4. 3. 1948; 16./17./18./19./20./21./22. 2. 1949; 16./17./18./19. 2. 1950; 23./24./25. 2. 1952; 8./9. 3. 1954; 15./16. 3. 1956; 3./4. 3. 1957; 24./25. 3. 1958; 7./8./9. 2. 1959; 4./5. 3. 1963; 11./12./13. 3. 1965; 15./16. 2. 1967; 31. 1./1. 2. 1968; 9./10. 3. 1970; 11./12. 2. 1971; 22./23./24. 2. 1975; 24./25. 2. 1983

Bei den hier ebenfalls zu erwähnenden Phänomenen Früh- und Spätfroste handelt es sich um Strahlungsfroste infolge von großer effektiver Ausstrahlung während wolkenloser Nächte. Den Spätfrostereignissen kommt dabei jedoch eine größere Bedeutung zu, da bei ihnen zahlreiche meteorologische und pflanzenphysiologische Aspekte auf ein höheres Streßrisiko für Waldbäume hinweisen (u. a. REHFUOSS u. BOSCH 1987). Die große Abhängigkeit von orographischen Einflüssen erschwert allerdings auf den Einzelstandort bezogene Aussagen über die räumliche Verbreitung und das Ausmaß von Spätfrostereignissen, wenn nur Daten von Stationen des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung stehen, die sich nur selten in Waldstandortsnähe befinden.

Die in der Tabelle 5 zusammengestellten Termine von extremen Kälteeinbrüchen und -rückfällen an ausgewählten Stationen des Deutschen Wetterdienstes in Bayern weisen darauf hin, daß im Untersuchungszeitraum seit Mitte der 60er Jahre keine solch extremen Spätfrostereignisse aufgetreten sind. Setzt man als unteren Schwellenwert für pflanzenphysiologisch relevanten Spätfrost ein Tagesminimum von  $T_j \leq -3^\circ\text{C}$ , d. h. einen höheren Wert als bei der Tabelle 5, an, dann zeigt sich anhand der Ergebnisse in Tabelle 6.

- Mit regional unterschiedlicher Ausprägung gab es in den Jahren 1951–1953, 1972–1974 und 1981–1983 mehr Spätfrostereignisse als in den übrigen 3jährigen Abschnitten.
- Auffällig sind die seit Mitte der 70er Jahre etwas häufigeren Spätfrostereignisse im April. Solch eine markante Witterungserscheinung war auch in der ersten Aprilhälfte 1986 zu beobachten.

Bei den Spätfrostereignissen könnten sich wärmebedingte Frostenthärtung und kurzfristig erforderliche Anpassung an für diese Jahreszeit zum Teil extreme Luftfrostwerte regional be-

Tabelle 6. Anzahl von Fällen im Monat März (in Klammern im Monat April) mit  $T_{a,max} \geq +10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  am Tag  $i$  sowie  $T_{a,min} \leq -3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $T_{a,max} \geq +10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  am Tag  $i + 1$  an ausgewählten Stationen des Deutschen Wetterdienstes in Bayern, aufgeteilt in 3-jährige Abschnitte

Table 6. Number of occurrences in March (in brackets in April) with  $T_{a,max} \geq +10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  on day  $i$  as well as  $T_{a,min} \leq -3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $T_{a,max} \geq +10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  on day  $i + 1$  at selected stations of the German Weather Service in Bavaria, expressed in 3-year periods

Stationsname	3-jährige Abschnitte											
	1951 1953	1954 1956	1957 1959	1960 1962	1963 1965	1966 1968	1969 1971	1972 1974	1975 1977	1978 1980	1981 1983	
Würzburg	3(0)	1(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	1(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	
Ebrach	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	1(1)	3(1)	1(1)	4(1)	2(3)	0(2)	1(1)	
Fichtelberg	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	
Pommelsbrunn	1(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(1)	1(0)	0(1)	5(1)	0(3)	0(1)	2(1)	
Weißenburg	6(1)	2(1)	1(1)	1(0)	0(0)	0(0)	0(1)	1(0)	1(2)	0(1)	1(1)	
Höllenstein-Kraftwerk	8(2)	6(0)	5(1)	2(1)	0(3)	0(2)	0(1)	5(1)	0(2)	2(1)	1(2)	
Großer Falkenstein	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	
Augsburg	2(1)	0(1)	0(0)	0(0)	0(0)	1(0)	1(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	
München-Riem	1(0)	0(0)	1(0)	1(0)	0(0)	0(0)	1(0)	3(0)	1(0)	0(1)	0(1)	
Garmisch-Partenkirchen	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	5(1)	7(0)	0(2)	1(0)	3(1)	
Reit im Winkl	9(4)	2(0)	6(0)	8(0)	6(2)	7(2)	3(0)	3(0)	5(0)	2(2)	6(1)	

lastend auf die Nadel- und Knospenorgane von Waldbäumen in tieferen Lagen ausgewirkt haben.

Exemplarische Auskunft über die langfristige Entwicklung von Spätfrostereignissen in Bayern gibt in der Abbildung 3 die Anzahl der Frosttage (Tagesminimum von  $T_a$  in 2 m Höhe über Grund unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) im April in München von 1781 bis 1987, dargestellt als übergreifende 10-jährige Mittelwerte. Dabei stellt sich ein periodischer Verlauf mit einer mittleren Schwingungsdauer von 23,5 Jahren heraus, die im Untersuchungszeitraum zwischen 16 und 29 Jahren streut. Auffallend in der Abbildung 3 sind das relativ niedrige Wellenniveau vor dem Jahr 1830, die näherungsweise Konstanz des Mittelwertes bis etwa 1945 und dann wieder eine Welle bis etwa 1970 mit deutlich reduziertem Maximum. Daran schließt sich eine Welle mit dem höchsten Maximum im Untersuchungszeitraum an. Da die Münchener Lufttemperaturreihe auf die Station München-Riem am östlichsten Stadtrand homogenisiert ist (BAUMGARTNER et al. 1972), dürfte sie frei von Stadtklimaeffekten sein.

Die Abbildung 3 sagt jedoch nichts über die Intensität der Frostereignisse aus und beinhaltet



Abb. 3. Anzahl der Frosttage im April in München im Zeitraum 1781-1987

Fig. 3. Number of frost days in April in Munich during the period 1781-1987

somit fast keine forstliche Relevanz. Deshalb sind ergänzend dazu in der Abbildung 4 die abgestuften Spätfrostintensitäten in München-Riem im April in der Zeit von 1948 bis 1987 zusammengestellt. Dabei bewirken nach LARCHER und HACKEL (1985) Spätfrostereignisse mit  $T_{\text{min}}$ -Minima erst unter  $-4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  eine Gefährdung von jungen Trieben. Schwere Spätfroste mit  $T_{\text{min}}$ -Minima unter  $-6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  traten nur an zwei Tagen im April 1952 sowie an je einem Tag im April 1956, 1975 und 1986 auf. Starke Spätfrost mit  $T_{\text{min}}$ -Minima zwischen  $-4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $-6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  gab es an drei Tagen im April 1976, an zwei Tagen im April 1958, 1969 und 1977 sowie an einem Tag im April 1955, 1956, 1970, 1972, 1973, 1979, 1981 und 1987.

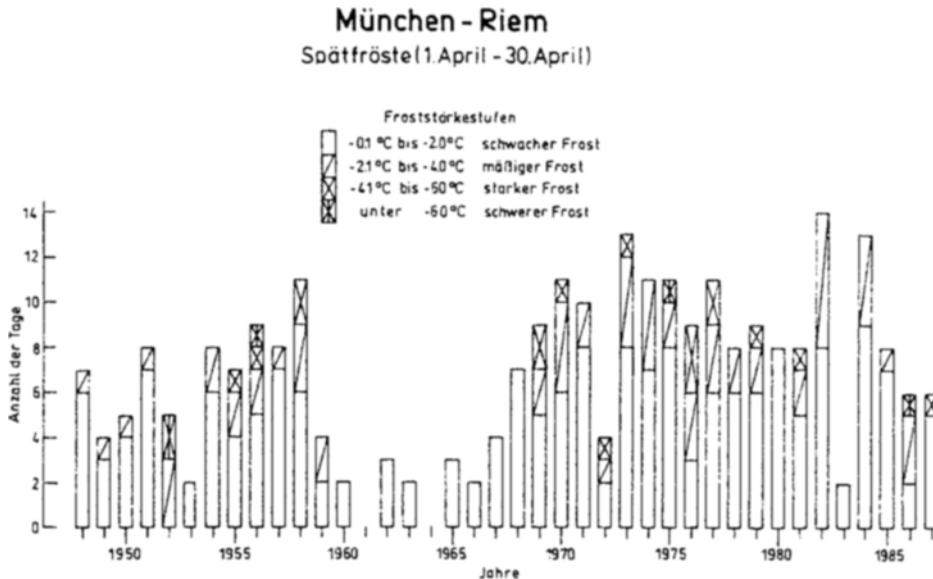


Abb. 4. Spätfrostintensitäten im April in München im Zeitraum 1948–1987

Fig. 4. Intensities of late frost in April in Munich during the period 1948–1987

- Analysiert man die Ergebnisse in der Abbildung 4 unter dem Aspekt „Streßbelastung von vorgeschädigten Waldbäumen“, so fällt für den Raum der Münchener Schotterebene auf, daß
- von 1960 bis 1968 nur schwacher Spätfrost im April auftrat, der für die Waldbäume bedeutungslos gewesen sein dürfte;
  - im Zeitabschnitt von 1969 bis 1981 nur die Aprilmonate 1971, 1974, 1978 und 1980 frei von Spätfrost mit  $T_{\text{min}}$  unter  $-4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  blieben;
  - in den 80er Jahren im April keine Häufung von Tagen mit schwerem oder starkem Frost festzustellen ist.

Allerdings muß hier auf die Resultate von MAYER (1987) verwiesen werden, der auch für die Spätfrostereignisse die Notwendigkeit einer regionalen Differenzierung in Bayern hervorgehoben hat.

#### 4.3 Frosttrocknisereignisse

Frosttrocknis tritt meist an der Waldgrenze und in Niederungen, vor allem an schneearmen, windexponierten und stark besonnten Standorten, auf. Die meteorologischen Voraussetzungen dafür liefern stabile winterliche Hochdruckwetterlagen, die durch eine kontinentale Kaltluftzufuhr mit zum Teil mäßigen Ostwinden sowie durch wolkenarmes und damit strahlungsintensives Wetter gekennzeichnet sind. Die Folge ist eine starke mittägliche Erwärmung von Blattorganen auf den sonnseitig exponierten Kronenpartien. Die dadurch erhöhte Transpiration der

Waldbäume kann bei verminderter bzw. unterbrochener Wasseraufnahme aus dem angefrorenen oder trockenen Wurzelboden zu Streß führen. Davon sind vor allem die flachwurzelnde Fichte und die Legföhre im subalpinen Bereich betroffen. Dabei können auch nach anhaltenden Frostperioden ohne Extremwerte Schäden auftreten (LARCHER u. HACKEL 1985).

KLEIN (1985) hat Frostrocknisschäden in Wäldern aufgrund der Witterung im Februar 1983 ausführlich beschrieben. Eine Analyse von langfristigen Daten von Stationen des Deutschen Wetterdienstes im Hinblick auf mögliche Frostrocknisschäden in Waldbeständen ist jedoch sehr problematisch, weil gerade hier exakte Daten von Waldstandorten benötigt werden, die aber über die meist waldfernen Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes kaum ermittelt werden können.

Auf der Basis von meteorologischen Daten der Stationen Hohenpeißenberg (977 m ü. NN) und Großer Falkenstein (1307 m ü. NN) bzw. ab November 1982 Großer Arber (1445 m ü. NN) wurde dennoch der Zeitraum Winter 1970/71 bis Winter 1986/87 auf Witterungsereignisse mit möglicher Frostrocknisgefahr für die Hochlagenwälder in Bayern hin untersucht. Solche Witterungsereignisse traten auf: 4./12. 2. 1975; 22. 2./3. 3. 1975; 18. 2./11. 3. 1976 (mit kleinen Unterbrechungen); 20./28. 2. 1980; 29. 1./3. 2. 1981; 13./15. 3. 1981; 24./28. 3. 1982; 16./25. 2. 1983 (mit kleinen Unterbrechungen); 17./21. 2. 1984; 14./24. 3. 1984; 11./13. 3. 1986; 1. 3. 1986; 16./20. 3. 1986 und 4./15. 3. 1987 (mit kleinen Unterbrechungen). Diese Termine deuten in den 80er Jahren ein gehäuftes Auftreten solcher Witterungsereignisse mit zumindest potentieller Frostrocknisgefährdung an.

## 5 Schlußbemerkungen

Die Analyse von Witterungserscheinungen in Bayern, an denen der Luftfrost wesentlich beteiligt ist, ergibt für die 80er Jahre folgende zusammengefaßten Ergebnisse: eine Häufung von extremen Luftfrösten im Zeitraum Dezember bis Februar sowie eine Häufung von Spätfrost und Witterungsereignissen mit Frostrocknisgefährdung der Waldbäume. Dabei treten deutliche regionale Differenzierungen auf. So gab es auf der Münchener Schotterebene im April ab den 80er Jahren keine Häufung von Tagen mit schwerem oder starkem Frost.

Die hier dargelegten Ausführungen zum Komplex „Frostereignisse und neuartige Waldschäden“ machen die darin enthaltene Problematik deutlich. So fehlen ausreichende pflanzenphysiologische Schwellenwerte bzw., bei der notwendigen Berücksichtigung der Witterungsvorgeschichte, die entsprechenden Schwellenfunktionen, über die langfristige Klimadaten in retrospektiver Art analysiert werden können.

Ferner ist es unzweckmäßig, daß dafür nur das Datenmaterial von Stationen des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung steht, die sich aufgrund ihrer primären anderen Zielsetzung in Bayern nicht auf Waldstandorten bzw. kaum in ihrer Nähe befinden. Da für den einzelnen Waldbestand die Wirkung des großräumigen Klimas bzw. von Witterungsereignissen durch zahlreiche mikroskalige Komponenten, wie z. B. das Relief oder die Exposition, modifiziert wird, erscheint eine spezielle bestandsbezogene Klima- bzw. Witterungsanalyse auf der Basis von solchen Klimadaten kaum möglich. Es lassen sich eigentlich nur potentielle Aussagen für größere Teilräume machen. Abhilfe würde hier die Einrichtung von forstlichen Klimastationen, d. h. von Klimastationen auf Waldstandorten, schaffen.

### Anmerkung

Für die Unterstützung der Arbeiten zur Problematik „Klima und neuartige Waldschäden“ wird dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, dem Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen sowie dem Zentralamt des Deutschen Wetterdienstes, Abt. Klima, gedankt.

### Zusammenfassung

Nach einer Zusammenstellung von potentiellen Witterungsstressfaktoren für Waldbäume werden Wintertypen von Lufttemperaturverläufen diskutiert, die für Waldbäume entweder unbedenklich oder belastend sind. Danach folgt eine Analyse von Witterungsereignissen in Bayern zum Komplex „Frostereignisse und neuartige Waldschäden“. Grundlage dafür bilden langfristige Lufttemperaturdaten von ausgewählten Stationen des Deutschen Wetterdienstes. Die Ergebnisse für die 80er Jahre, die durch eine bemerkenswerte regionale Differenzierung gekennzeichnet sind, lauten zusammengefaßt: Häufung von extremen Luftfrösten im Zeitraum Dezember bis Februar sowie Häufung von Spätfrost und Witterungsereignissen mit Frosttrocknisgefährdung.

### Summary

#### *Identification of meteorological events with plant-physiological stress effects on forest trees*

After a survey on potential meteorological stress factors for forest trees, winter types of air temperature patterns are discussed which seem to be either harmless or stressing for forest trees. Referring to the complex "frost events and novel forest damages", an analysis of meteorological events in Bavaria follows which is based on long-term air temperature data from selected stations of the German Weather Service. The results for the 1980's which are characterized by remarkable regional differences can be summarized as follows: an increase of extreme subfreezing air temperatures during the period December to February, as well as an increase of late frost, and meteorological events with winter desiccation risk.

### Literatur

- BAUMGARTNER, A.; PAESLER, M.; STRAUSS, R., 1972: Temperaturmessungen in München 1781–1968. Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München Nr. 23.
- EISENHUT, R., 1987: Mögliche forstliche Auswirkungen der Kälteperioden im Januar 1987 und Februar 1987. Dipl.-Arb. Forstw. Fak. Univ. München.
- KLEIN, E., 1985: Nadelstüben im Winter. AFZ 40, 288–290.
- LARCHER, W.; HACKEL, H., 1985: Handbuch der Pflanzenkrankheiten. Band 1, Teil 5 – Meteorologische Pflanzenpathologie. Berlin und Hamburg: Verlag Paul Parey.
- MAYER, H., 1987: Die Frostereignisse der letzten Jahre als mögliche Stressfaktoren. GSF-Bericht 10/87, 227–254.
- REHFUSS, K.-E.; BOSCH, C., 1987: Experimentelle Überprüfung der Auswirkungen eines Witterungsstresses in Expositionskammern. GSF-Bericht 10/87, 175–184.

*Anschrift der Verfasser:* PD Dr. Dr. habil. HELMUT MAYER, Dipl.-Forstw. CHRISTIAN KÖNIG, Dipl.-Met. ANNIE RALL, Lehrstuhl für Bioklimatologie und Angewandte Meteorologie der Universität München, Amalienstraße 52, D-8000 München 40