

(Aus dem Institut für Hopfenforschung und Brauerei, Žalec, Slowenien)

## **Schwellenorientiertes Entscheidungsschema für epidemiebezogene Bekämpfung der Hopfenperonospora (*Pseudoperonospora humuli* Miy. et Tak.)**

Von M. DOLINAR und M. ŽOLNIR

(Mit 2 Abbildungen)

### **Zusammenfassung**

Auf Grund umfangreicher Untersuchungen über den Einfluß biotischer und meteorologischer Faktoren auf die Infektion und die Krankheitsentwicklung des Falschen Hopfenmehltaus wurde ein Modell zur Befallsprognose für anfällige Sorten entwickelt. Das Befallsausmaß ist von der Regenbenetzungsdauer und von der Populationsdichte der Zoosporangien in der Luft abhängig. Aus diesem Modell wurde ein einfacheres, auf Schwellenwerten basierendes Bekämpfungsentscheidungsschema für weniger anfällige Sorten (Savinja Golding, Aurora) entwickelt. Dazu wurden Untersuchungen durchgeführt, um Schwellenwerte für die Zoosporangienzahl festzulegen.

Schlüsselworte: Hopfen, *Pseudoperonospora humuli*, Epidemiologie, Prognose, Bekämpfung.

### **Epidemic related decision model for control of downy mildew in hop (*Pseudoperonospora humuli* Miy. et Tak.), based on critical amount of spores**

#### **Summary**

The influence of biological and meteorological factors on the infection and on the development of downy mildew of hop was investigated. A forecasting model for sensitive varieties was developed. The infection level depends on the duration of leaf surface wetness as rainfall and airborne spore concentration. From this model a simplified model was developed for less sensitive varieties, based on the critical amount of spores.

Key-words: hop, *Pseudoperonospora humuli*, epidemiology, forecasting model, control.

### **1. Einleitung**

Die Bekämpfung des Falschen Hopfenmehltaus basierte in Slowenien bis vor einigen Jahren bei anfälligen Sorten auf der Kalendermethode, bei weniger anfälligen Sorten orientierte sie sich dagegen an den Entwicklungsstadien des

Hopfens. Bei dieser Verfahrensweise entstanden Probleme, da einerseits die Hopfenpreise einen möglichst niedrigen Betriebsmittelaufwand erforderten, andererseits aber die epidemiologische Dynamik des Schaderregers nicht zufriedenstellend prognostiziert werden konnte. Eine optimale Wirkung der Fungizidanwendung war deshalb nur zufällig erreichbar, andererseits waren wirtschaftliche und ökologische nicht vertretbare Applikationen nicht auszuschließen.

Die Forderung des integrierten Pflanzenschutzes, chemische Maßnahmen nur dann durchzuführen, wenn das aktuelle Befallsgeschehen das gebietet, setzt die Erarbeitung wissenschaftlich begründeter und auf meteorologischen und biotischen Parametern ausgerichteter Entscheidungshilfen voraus.

In der Literatur steht umfangreiches biotisches Datenmaterial über Falschen Hopfenmehltau zur Verfügung, welches für eine erfolgreiche Befallsprognose jedoch nicht ausreicht. Die Versuche wurden unter künstlichen Bedingungen durchgeführt, wodurch deren Anwendbarkeit unter Freilandbedingungen fragwürdig ist.

Besonders fragwürdig dabei sind ältere Daten, welche nur den Entwicklungszyklus bzw. einzelne biotische Parameter behandeln und für eine moderne quantitative Epidemiologie nicht ausreichend sind. Die Forschungen von ROYLE und THOMAS (1971, 1972), ROYLE (1973) und besonders von KREMHELLER (1979) haben viel zum Verständnis der quantitativen Epidemiologie des Falschen Hopfenmehltaus beigetragen. Die Modelle sind aber nur begrenzt in andere geographische Gebiete übertragbar. An der Epidemieentwicklung sind drei Komponenten beteiligt: Erreger — Wirt — Umwelt, welche in unterschiedlichen Gebieten auch verschieden sind.

Die modernen Befallsprognosen der Peronosporaarten sind auf dem asexuellen Lebenszyklus des Pilzes, dem Infektionsvorgang und dem simulierten Epidemieverlauf, denen statistische Analysen von Witterungsdaten zugrunde liegen, aufgebaut. Eine sichere Bewertung der Infektionswahrscheinlichkeit im Sinne einer Prognose erfordert die Untersuchung der Einflüsse der Benetzungsdauer und der Temperatur auf den Infektionsvorgang. In der älteren Literatur findet man nur Daten über den Einfluß der Temperatur auf die Keimung der Zoosporangien und eventuell auf die Enzystierung. Die Versuche wurden so durchgeführt, daß nur ein Parameter variiert wurde, der andere blieb jedoch konstant, was den Freilandbedingungen in keiner Weise entspricht. In optimalen Bedingungen keimen die Zoosporangien in einer Stunde.

Die Mindestbenetzungszeit für eine Infektion ist zwei Stunden. Zoosporangien brauchen noch eine bestimmte Zeit um zu enzystieren, bilden den Keimschlauch und treten in Beziehung mit dem Wirt, die mit der Ausbildung der Haustorien endet.

Die Zoosporangien von *Pseudoperonospora humuli* verbreiten den Erreger während der Vegetationsperiode. Zu den Faktoren, von denen die Fähigkeit zu einer epidemischen Entwicklung abhängt, gehört auch die Lebensdauer der Zoosporangien. Bei *Pseudoperonospora humuli* wurde die Lebensdauer der Zoosporangien mehrfach untersucht, meistens unter Laborbedingungen. ARENS (1929) stellte eine Lebensdauer von 29 Tagen fest.

KREMHELLER (1979) untersuchte die Lebensdauer der abgelösten Zoosporangien im Freiland und stellte eine Halbwertszeit von 1,5 Tagen fest. Die Keimfähigkeit im Labor und Freiland untersuchte KRAUS (1983) sehr genau. Die Lebensdauer der Zoosporangien nimmt viel schneller ab, als angenommen wurde.

Man könnte noch weitere, für die Charakterisierung des Entwicklungszyklus des Schaderregers wertvolle Feststellungen präsentieren, welche für die Prognose jedoch nur bedingt genutzt werden können.

## 2. Die wichtigsten Daten der Epidemiologie des Falschen Hopfenmehltaus in Slowenien

Um die Grundlagen für eine Peronosporaprognose in Slowenien zu erarbeiten, wurden die Untersuchungen über den Einfluß der Witterungsfaktoren auf die Entwicklung des Pilzes, unter Laborbedingungen aus der Sicht der Epidemiologie, ergänzt.

Tabelle 1

*Einfluß der Benetzungszeit und Temperatur auf den Befall*

Temperatur (° C)	Benetzungszeit in Stunden und Befallsstärke (P)						
	1	1,5	2	4	6	8	24
5	0	0	0	0	0	0	0,2
8	0	0	0	0,3	0,8	0,8	
11	0	0	0	0,2	2	2	
17—18	0	0	0,3	2	5	5	
21	0	0,1	0,8	5	5		
25	0	0,1	0,3	1	1		
29	0	0,1	0,1				
30	0	0	0	0	0	0	

P = Befallsstärke in %, nach TOWNSEND - HEUBERGER

Es wurde der Einfluß der Benetzungszeit und der Temperatur auf die Infektion untersucht. Bei optimaler Temperatur beträgt die Mindestbenetzungszeit für die Infektion zwei Stunden. Mit wachsender Benetzungszeit nimmt der Befall zu. Wenn die Benetzungszeit über acht Stunden dauert, ist keine weitere Zunahme des Befalls festzustellen. Falls die Blätter einen Tag lang naß waren, fand die Infektion noch bei 5 °C statt. Die Infektion findet noch bei 29 °C statt, doch der Befall ist schwach.

Es wurde die Lebensdauer der Zoosporangien im Labor und im Freiland untersucht. Mit zunehmendem Sättigungsdefizit nimmt die Lebensdauer ab. Bei 600 mb sterben die Zoosporangien ab. Die abgelösten Zoosporangien keimen im Freiland bei einer mittleren Tagestemperatur von 23 °C und einer mittleren relativen Luftfeuchte von 74 % nach 24 Stunden nur noch zu 15 %. Nach 48 Stunden keimen unter gleichen Bedingungen die Zoosporangien nicht mehr.

Um Beziehungen zwischen den Witterungsfaktoren, der Zoosporangiedichte und dem Befall quantitativ erfassen zu können, wurde mit der Topfpflanzmethode gearbeitet (ROYLE 1973). Mit dieser Methode kann die Infektionszeit genau festgestellt werden. Die Versuche wurden teilweise im Labor und am Feld durchgeführt. Die Topfpflanzen wurden für 48 Stunden in den Hopfengarten gestellt und dem natürlichen Inokulum ausgesetzt. Zur Inkubation kamen die Pflanzen ins Labor, und nach Ablauf der Inkubationszeit wurde die Befallsstärke ermittelt. Am Feld waren die Meßgeräte für Temperatur, relative Feuchte, Blattnässedauer, Regenmenge und die Burkard Sporenfalle aufgestellt.

Im Freiland wurde auch die Epidemieentwicklung auf Dolden verfolgt, wobei der Einfluß der Umwelt und des Erregers auf die Pflanzenteile zum Ausdruck kam. Mit multipler Korrelations- und Regressionsanalyse und anderen statistischen Methoden wurden quantitative Beziehungen zwischen biometeorologischen Parametern und dem Krankheitsbefall ermittelt. Um festzustellen, ob die statistisch ermittelten Zusammenhänge zufällig oder kausal sind, wurden die Untersuchungen in überprüfbareren Bedingungen in Klimakammern nachvollzogen.

Tabelle 2

Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) für die Beziehungen zwischen Befall und biometeorologischen Einflußgrößen

Einflußgrößen	Korrelationskoeffizient ( $r$ )		
	1975	1976	1977
Regenbenetzungsdauer	0,6385*	0,8409**	0,7200**
Summe der Temperaturäquivalente in der Regenbenetzungsperiode	0,7088**	0,8425**	0,7790**
Zoosporangiendichte	-0,0838	-0,3108	0,3335
Relative Feuchte $\geq 90$ %	0,3708*	0,6593*	0,3920*

\*  $P = 5$  %

\*\*  $P = 1$  %

Aus der Tabelle 2 ist eine enge Korrelation zwischen dem Befall und den Einflußgrößen, welche die Regenbenetzung ausdrücken, zu erkennen.

Die Temperatur hatte keinen signifikanten Einfluß auf die Befallsstärke. Dieses Ergebnis bedeutet aber keineswegs, daß der Pilz und somit die Infektion von der Temperatur unabhängig ist, sondern es sagt aus, daß in der Versuchszeit die Temperatur nicht so stark schwankte und eigentlich für die Entwicklung des Pilzes optimal war. Deswegen wurde die Temperatur im Modell nicht berücksichtigt. Nach ANALYTIS (1977) vorgeschlagenen Verfahren wurde die Temperatur in Form des Temperaturäquivalents in der Regenbenetzungsperiode ausgedrückt. Damit wurde das Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) verbessert und auch eine enge Korrelation mit der Befallsstärke festgestellt. Die negative Korrelation zwischen dem Zoosporangiengehalt der Luft und der Befallsstärke widerspricht den biologischen Erfahrungen. Dieses Ergebnis kann man mit dem, durch den Regen verursachten Auswaschen der Zoosporangien aus der Luft erklären. Im Labor wurde festgestellt, daß die Befallsstärke eine Funktion der Zoosporangienkonzentration ist.

Tabelle 3

Bestimmtheitsmaß und schrittweise aufgenommene Einflußgrößen

Einflußgrößen	Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ )		
	1975	1976	1977
Summe der Temperaturäquivalente in der Regenbenetzungsperiode	0,5024	0,709	0,772
Regenbenetzungsdauer	0,5474	0,804	0,787
Relative Feuchte $\geq 90$ %	0,5633	0,810	0,789
Zoosporangiendichte	0,566	0,810	0,792

Die Einflußgrößen und die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Summe der Temperaturäquivalente in der Regenbenetzungsperiode erklärt 50 bis 77 % der Variabilität der Befallsänderung zwischen zwei Erhebungsterminen. Der Einfluß der Temperatur in der Benetzungsperiode wurde in Form des Temperaturäquivalents in Beziehung gesetzt.

Um einen bestimmten Befall am Wirt zu erzielen, mußte ein bestimmtes Inokulum vorhanden sein. Diese Befallsenergie, welche noch gerade zur Infektion reichte, ist die numerische Infektionsschwelle. VAN DER PLANK (1963) hat den Begriff  $ED_{50}$  (effektive Dosis — Zoosporangienmenge, welche nötig ist, daß 50 % der Blätter befallen werden) eingeführt. Für die anfällige Sorte Atlas müssen in  $5 \mu\text{l}$  Inokulum 350 Zoosporen sein. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde für den

Infektionserfolg die untere Grenze der Zoosporangienmenge innerhalb von vier Tagen festgelegt. Für Atlas beträgt sie bis zu 15 Zoosporangien vor der Blüte und fünf während der Blüte und Doldenbildung. Sehr ähnliche Ergebnisse wurden bei der Auswertung der Freilandversuche erzielt.

Der Einfluß der Regenbenetzung auf den Befall ist hoch signifikant, wogegen eine Taubenbenetzung zu keiner oder nur zu einer sehr geringen Infektion führte. Diese Feststellung steht im Gegensatz zu anderen Peronosporaarten, wie zum Beispiel *Plasmopara viticola* und *Pseudoperonospora cubensis*, bei welchen das Ablösen der Zoosporangien von Sporangienträgern in den Morgenstunden (von 6 bis 8 Uhr) erfolgt.

Bei *Pseudoperonospora humuli* geschieht das jedoch zur Mittagszeit, bei niedriger relativer Feuchte. Somit sind größere Mengen der Zoosporangien erst dann verfügbar, wenn es keine Taubenbenetzung mehr gibt. Es könnte durchaus sein, daß zum Teil aus diesem Grund bei *Plasmopara viticola* und *Pseudoperonospora cubensis* die Infektionsrate in Slowenien höher liegt als bei der Hopfenperonospora (bei *Pseudoperonospora humuli* 0,26 und bei *Pseudoperonospora cubensis* 0,48).

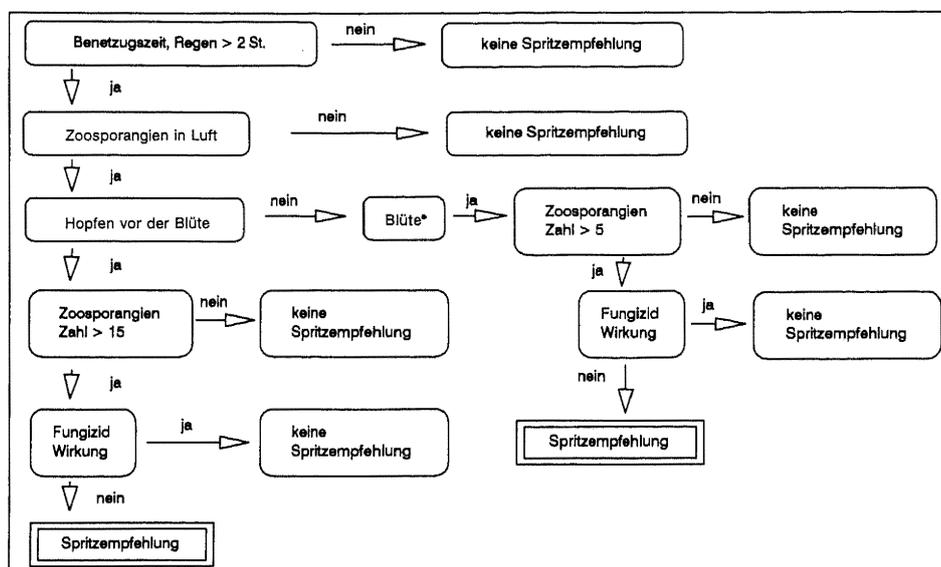


Abb. 1: Das Prognosemodell für gezielte Bekämpfung der Hopfenperonospora (*Pseudoperonospora humuli*) für anfällige Sorten

### 3. Schwellenorientiertes Bekämpfungsentscheidungsschema für weniger anfällige Sorten

Die anfälligen Sorten Blik und Atlas werden nur zu 5 % in den Hopfenanlagen von Slowenien angebaut. 90 % der Anbauflächen sind mit weniger anfälligen Sorten (Savinja Golding und Aurora) bepflanzt. Bei beiden Sorten richteten sich die Behandlungsmaßnahmen nach den Entwicklungsstadien des Hopfens. Die erste Behandlung erfolgte sofort nach dem Schneiden, die zweite nach dem Anleiten und die dritte nach der Entwicklung der Seitentriebe. Es wurde zweimal in die Blüte und einmal in die Dolden gespritzt.

Das Resistenzverhalten von Wirtsorten gegenüber verschiedenen Erregerkonzentrationen spielt bei der Prognose eine zentrale Rolle. Für den Infektionserfolg der weniger anfälligen Sorten wie Savinja Golding und Aurora ist eine höhere Zoosporangienmenge nötig. Deswegen wurden für diese Sorten auch höhere Schwellenwerte der Zoosporangien festgelegt.

Nach der Topfpflanzmethode wurden Savinja Golding, Aurora und Atlas dem Inokulum am Feld serienmäßig ausgesetzt. Für den Infektionserfolg bei Savinja Golding und Aurora müßte die Zoosporangienmenge vier- bis fünfmal höher sein als bei der Sorte Atlas, die gegen den Falschen Hopfenmehltau anfälliger ist. Um ein theoretisches Verhältnis der  $ED_{50}$  bei verschiedenen Sorten zu bekommen, wurden die Blätter mit verschiedener Zoosporangiendichte inokuliert (500, 5000, 50.000, 100.000 Zoosporangien pro ml).

Je fünf Blätter wurden mit zehn Tropfen des Inokulums befeuchtet, wobei jede Behandlung 50 Wiederholungen erfuhr. Nach der Inkubationsperiode wurde die Befallshäufigkeit bonitiert. Mit der Probitmethode wurde  $ED_{50}$  festgestellt.

Tabelle 4

*ED<sub>50</sub> bei verschiedenen Sorten*

Sorte	ED <sub>50</sub> Zoosporangienmenge in 5 µl Wasser
Gröne bell	9
Ahil	10
Atlas	14
Savinjski Golding	89
Aurora	81

$ED_{50}$  ist bei Savinja Golding und Aurora viel höher als bei anderen anfälligen Sorten.

Aufgrund der Ergebnisse wurde für einen Infektionserfolg die untere Grenze der Zoosporangiendichte innerhalb von vier Tagen festgelegt: 40 Zoosporangien vor der Blüte und 10 während der Blüte und Doldenbildung. Diese Werte wurden in den letzten zwei Jahren auf 60 und 20 erhöht. Der Sicherheitsfaktor ist hoch, da die Vitalität der Zoosporangien nicht berücksichtigt wurde.

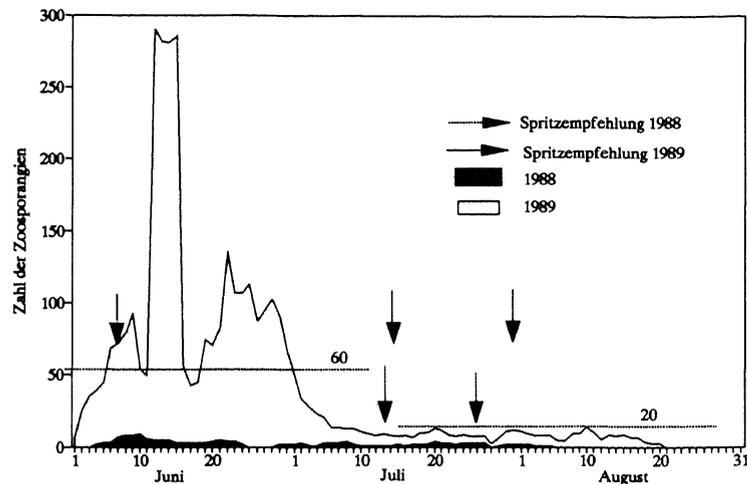
In Slowenien überwintert *Pseudoperonospora humuli* als Myzel im Rhizom. Im Frühjahr infiziert das Myzel die jungen Sprosse. An Peronospora erkrankte Triebe (Bubiköpfe) können bei der Sorte Savinja Golding zahlreich sein. Infizierte Triebe kommen auch bei anderen Sorten vor. Da Savinja Golding gegen Primärinfektion anfällig ist, werden alle Anlagen mit Fungiziden behandelt. Für Aurora werden die Spritzempfehlungen aufgrund der Bekämpfungsschwelle gegeben (wenn fünf von 100 Stöcken erkrankte Bodentriebe haben).

Hopfenanbauer, welche die Bekämpfungsmaßnahmen nach dieser Prognose durchführen wollen, müssen die Primärinfektion gut bekämpfen. Mit der Entfernung des Infektionsherdes nimmt die Zoosporangiendichte stark ab. Es ist wünschenswert, daß die Zoosporangiendichte im ganzen Hopfengebiet gleichmäßig ist.

Ohne Berücksichtigung der Zoosporangiendichte werden zwei Spritzungen während der Blüte empfohlen. Alle anderen Spritzempfehlungen im Mai, Juni und August sind auf Schwellenwerten begründet.

Seit sieben Jahren werden die Spritzungen nach der erwähnten Methode durchgeführt. Fünf Jahre wurden die Spritzungen im Mai und Juni unterlassen und im August nur ein Drittel der Anlagen gespritzt. Da die Witterungsbedin-

Abb. 2: Gezielte Spritzungen nach Schwellenwerten in den Jahren 1988—1989



ungen für die Entwicklung der Hopfenperonospora im Jahr 1989 besonders günstig waren, mußten wir in diesem Jahr, auch im Juni, für einen Teil des Hopfengebietes eine Spritzempfehlung erteilen.

Es wurden über 40 % der Spritzungen eingespart, wobei in allen betroffenen Jahren die Ernte gesund geblieben ist.

#### 4. Schlußfolgerungen

Es wurde der Einfluß der biotischen und meteorologischen Parameter auf die Infektion und Krankheitsentwicklung unter kontrollierten Bedingungen und in Hopfenbeständen untersucht und quantifiziert. Aufgrund der Ergebnisse wurde ein Modell zur Befallsprognose für anfällige Sorten entwickelt: Die Infektion erfolgt, wenn die Regenbenetzungszeit mindestens zwei Stunden beträgt und Zoosporangien vorhanden sind. Innerhalb von vier Tagen vor der Blüte sind die Schwellenwerte 15 Zoosporangien und in der Zeit zwischen Blüte und Doldenbildung fünf Zoosporangien. Spritzungen müssen während der Inkubationszeit durchgeführt werden.

Aufgrund der erwähnten Untersuchungen der Epidemiologie, den Erfahrungen und der zusätzlichen Untersuchungen ( $ED_{50}$  für verschiedene Sorten) wurde ein auf Schwellenwerten aufgebautes Bekämpfungsentscheidungsschema für weniger anfällige Sorten entwickelt. Die Schwellenwerte innerhalb von vier Tagen vor der Blüte sind 60 Zoosporangien und 20 im Zeitraum während der Blüte und der Doldenbildung. Der Sicherheitsfaktor ist hoch, da die Vitalität der Zoosporangien nicht berücksichtigt wurde. Nach dieser Methode werden über 40 % der Fungizidspritzungen eingespart.

Trotz der Einfachheit des Bekämpfungsentscheidungsschemas waren umfangreiche Untersuchungen zur Epidemiologie der *Pseudoperonospora humuli* nötig. Biotisches Datenmaterial aus der Literatur ist wertvoll, kann aber für moderne Prognosen nur bedingt genutzt werden. Die Prognosenmodelle sind auf andere Gebiete nur bedingt übertragbar.

#### Literatur

ANALYTIS, S., 1977: Über die Relation zwischen biologischer Entwicklung und der Temperatur bei phytopathologischen Pilzen. *Phytopath. Z.* 76, 64—67.

- ARENS, K., 1929: Untersuchungen über *Pseudoperonospora humuli* (Miy. et Tak.) den Erreger der neuen Hopfenkrankheit. *Phytopath. Z.* 1, 169—193.
- KRAUS, A., 1983: Biologische und epidemiologische Aspekte bei der Bekämpfung von *Pseudoperonospora humuli* (Miy. et Tak.) Wilson nach Prognose. Dissertation, Technische Universität München.
- KREMHELLER, H. Th., 1979: Untersuchungen zur Epidemiologie und Prognose des Falschen Mehltaus an Hopfen (*Pseudoperonospora humuli* Miy. et Tak.) Wilson. Dissertation Technische Universität München.
- ROYLE, D. J., 1973: Quantitative relationships between infection by the hop downy mildew pathogen, *Pseudoperonospora humuli*, and weather and inoculum factors. *Ann. appl. Biol.* 73, 19—30.
- ROYLE, D. J. and G. THOMAS, 1971: The influence of stomatal opening on the infection of hop leaves by *Pseudoperonospora humuli*. *Physiological Plant Pathology* 1, 329—343.
- ROYLE, D. J. and G. THOMAS, 1972: Factors affecting zoospore responses towards stomata in hop downy mildew (*Pseudoperonospora humuli*) including comparisons with grapevine downy mildew (*Plasmopara viticola*). *Physiological Plant Pathology* 3, 405—417.
- VAN DER PLANK, J. E., 1963: *Plant diseases: Epidemics and control*. New York, London: Academic Presse.

(Manuskript eingelangt am 22. Mai 1993, angenommen am 20. Dezember 1993)

Anschrift der Verfasser:

M. Sci. Marta DOLINAR und M. Sci. Milan ŽOLNIR, Institut für Hopfenforschung und Brauerei Žalec, Ul. Žalskega tabora 2, 63310 Žalec, Slowenien