

matologen und Bodenkundler, Wasserbauingenieur und Landschaftspfleger suchen Beiträge zum Verständnis der Hecken zu liefern und ihren Nutzen aufzuzeigen. Von breiten Kreisen der Wissenschaft und von Laien werden sie als eine Rettung gegen Landschaftsschäden großen Ausmaßes, gegen Austrocknung, Grundwasserabsenkung, Versteppung, Bodenerosion und Bodenverwehung propagiert. Vom Staate werden bereits beträchtliche Mittel für die Erforschung des Windschutzes und der Bodenabspülung und für die Abwendung solcher Gefahren durch „Windschutzhecken“ gegeben.

Es kann aber kein Zweifel bestehen, daß es sich bei der Heckenlandschaft um einen sehr verwickelten Fragenkomplex handelt, der in den letzten Jahren durch Einseitigkeit der Betrachtung, durch unzulässige räumliche Verallgemeinerungen und durch propagandistische Übertreibungen eher getrübt als geklärt wurde und für viele Menschen, vor allem auch aus den verantwortlichen Behörden recht undurchsichtig geworden ist. Heckenlandschaften sind keineswegs nur ein technisches Mittel der Landeskultur, etwa zur Minderung der Windwirkung, sondern ein Kulturlandschaftstyp, zu dessen Verständnis die Gesamtheit der natürlichen, landschaftsökologischen, agrargeographischen, betriebswirtschaftlichen und kulturgeschichtlichen Zusammenhänge gesehen werden muß.

Die „Erdkunde“ hat daher die folgende Aufsatzreihe angeregt, die einen annähernd geschlossenen Überblick über den Stand der Heckenfrage vermitteln soll. Im ersten Beitrag berichtet der Begründer der Mikroklimatologie über unsere Kenntnisse der mikroklimatischen Wirkungen der Hecken. Im zweiten stellt ein Fachmann der Agrarwissenschaft die mehr oder weniger exakten

Feldversuche über den Einfluß der Hecken auf den landwirtschaftlichen Ertrag in verschiedenen Klimaten und für verschiedene Kulturen zusammen. Es war ein Glück, daß ein Tierökologe, der das biocönologische Zusammenspiel von Pflanze und Tier verfolgt, am Beispiel der Wallhecken Schleswig-Holsteins bereits eingehende Untersuchungen angestellt hatte, um einen Beitrag speziell auch zur Frage der landwirtschaftlichen Schädlinge und der Hecken zu liefern. In der umfassendsten Arbeit sucht *W. Hartke* die Heckenlandschaft in der ganzen Breite und Verflochtenheit der kulturgeographischen Zusammenhänge darzustellen und kann sich dabei großer eigener Erfahrungen in West- und Mitteleuropa und einer Reihe neuester geographischer Bearbeitungen über Schleswig-Holstein, Mecklenburg und das Eupener Land bedienen. Die Ergebnisse seiner vielseitigen Überschau sollten den verantwortlichen Stellen doch sehr zu denken geben, bei der Verwendung beträchtlicher öffentlicher Mittel nicht einer einseitig verzerrenden Propaganda, sondern den Ergebnissen von Wissenschaften zu folgen, die wohl noch um die letzte Klarheit der Erkenntnis ringen, aber doch den Blick auf die Fülle der Aspekte richten. Den Schluß bildet eine landschaftsökologische Gegenüberstellung der beiden Grundtypen der mitteleuropäischen Heckenlandschaften, um daran nochmals die Notwendigkeit einer differenzierten geographischen Beurteilung zu unterstreichen.

Mögen die Aufsätze dahin wirken, daß das „Heckenproblem“ auch von den Behörden der Land- und Forstwirtschaft, von der Landeskultur und Landesplanung nicht mehr so einseitig technisch wie in den letzten Jahren, sondern als geographisch-ökologisch-wirtschaftlicher Kulturlandschaftskomplex gesehen und für die praktischen Aufgaben beurteilt wird!

DER KUNSTLICHE WINDSCHUTZ ALS METEOROLOGISCHES PROBLEM

R. Geiger

Mit 8 Abbildungen

Je mehr die baum- und buschreiche Naturlandschaft in die einförmige Kulturlandschaft übergeht, desto bedeutungsvoller wird das Problem des künstlichen Windschutzes. Schier unübersehbar ist heute die Literatur, die aus allen Ländern der Erde hierüber vorliegt. Der Landwirt, der Forstmann, der Meteorologe, der Volkswirtschaftler, der Bodenkundler und andere nahmen von ihrem Standpunkt aus Stellung und teilten

ihre Beobachtungen, öfters auch zahlenmäßige Untersuchungsergebnisse, mit.

Trotzdem findet der Praktiker im Studium dieser reichen Literatur nicht den sicheren Boden, auf dem er handfeste Wirtschaftsmaßnahmen mit der erforderlichen Erfolgsaussicht begründen könnte. Das liegt daran, daß es sich in der überwiegenden Zahl der Fälle um mehr oder minder zufällige Einzelerfahrungen handelt, die in den

verschiedensten Großklimagebieten gewonnen wurden, daß aber kaum noch systematische Untersuchungen mit klarer Zielsetzung und folgerichtiger Durchführung zustande gekommen sind. (Von wenigen Ausnahmen wird später die Rede sein.) Gelegenheitsbeobachtungen und Stichprobenmessungen reichen aber heute nicht mehr aus.

Ein wissenschaftlicher und für Nutzanwendung fruchtbarer Fortschritt wird erst dann erzielt werden, wenn das Problem des künstlichen Windschutzes mit einer besseren inneren Ordnung behandelt wird als bisher und wenn an einer geeigneten Stelle größere Versuche einige Jahre hindurch laufen. Einer solchen inneren Ordnung ist es wohl dienlich, wenn man einmal die meteorologische Seite des Problems aus dem gesamten Zusammenhang herauslöst und für sich betrachtet. Das mag zunächst als ein gewaltsames und nur theoretisches Verfahren erscheinen. Denn in der Praxis geht es nie um die meteorologischen Probleme allein. Es müssen immer auch die Fragen beantwortet werden, mit welchen Holzarten und nach welchem Verfahren Windschutzstreifen begründet und lebendig-wirksam erhalten werden können, welche guten und schädlichen Nebenwirkungen der Windschutz mit sich bringt und unter welchen Voraussetzungen sich der Arbeit- und Geldaufwand lohnt. Aber es soll im folgenden gezeigt werden, daß es trotzdem möglich, ja sogar sehr zweckmäßig ist, in der vorge-schlagenen Weise zu verfahren.

Meteorologisch gesehen, zerfällt das Windschutzproblem bereits in zwei Teilprobleme.

Da geht es zunächst um die Beeinflussung des Windfeldes der bodennahen Atmosphäre durch künstliche Maßnahmen. Dieses strömungstechnische Problem ist in seinen theoretischen Grundlagen durch die hochentwickelte Strömungslehre längst klargelegt. Die Aufgabe liegt nur in der Anwendung auf die vielgestaltigen Windhinder-nisse der lebenden Natur. Die Mehrzahl der bisher veröffentlichten Arbeiten behandelt dieses Teilproblem. Der folgende 1. Abschnitt ist ihm gewidmet.

Aber diese Beeinflussung des Windfeldes ist im Rahmen künstlicher Windschutzmaßnahmen nur Mittel zum Zweck. Der erreichte Windschutz soll das Mikroklima, welches das Standortklima der zu schützenden Kulturen darstellt, verbessern, so daß der Ertrag steigt. Während nun aber die Beeinflussung des Windfeldes — ähnlich wie ein Problem im physikalischen Laboratorium — un-abhängig von Zeit und Ort studiert werden kann, ist die Wirkung des Windfeldes auf das Mikro-klima in hohem Maße zeitlich von der Witte-rungsgestaltung, örtlich vom Großklima abhän-

gig. Daraus folgt sofort, daß dieselbe Herabset-zung der Windgeschwindigkeit sehr verschiedene Auswirkungen haben kann. Um nur ein Beispiel zu nennen: die Minderung der Verdunstung durch die Windruhe bessert in Trockengebieten das Mikro-klima, kann es aber in einer bodenfeuchten Marschlandschaft verschlechtern. „Gut“ und „schlecht“ ist hierbei im Blick auf die Ertrags-Steigerung zu verstehen. Es folgt weiter daraus, daß den Windmessungen an Schutzstreifen eine gewisse Allgemeinbedeutung zukommt, während etwa Ertragsmessungen in und außerhalb des ge-schützten Geländes stets ortsklima- und jahr-ganggebunden sind.

Für das Verständnis der meteorologischen Seite des Windschutzproblems ist schon viel gewon-nen, wenn man diese doppelte Fragestellung er-kennt und bei späteren Untersuchungen berück-sichtigt. Zur Erleichterung künftiger systema-tischer Messungen ist im 2. Abschnitt vorliegender Arbeit ein Überblick über das gegeben, was man heute schon über die Rückwirkung der Windfeld-änderung auf das Mikroklima sagen kann.

1. Änderung des Windfelds

a) Die Rauigkeitshöhe

Für das Verständnis des atmosphärischen Windfelds sind zwei Größen bedeutsam: der Wind und der Austausch.

Der Wind in der hohen Atmosphäre entsteht aus den großräumigen Luftdruckgegensätzen. Dieser „Gradientwind“ erleidet in der flachen, meist nur 1 bis 2 km hohen „Grundschicht“ der Troposphäre (*Schneider-Carius*) eine Ablenkung und Schwächung durch den Bodeneinfluß (Rei-bung). In der Abb. 1 ist links oben die normale Änderung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe über dem Boden dargestellt. In der boden-nächsten Schicht ist die Windzunahme sehr groß und nimmt dann rasch ab. Man kann den Zu-stand auch zeitlich wie in der Abb. 1 rechts dar-stellen, indem die Bereiche gleicher Windgeschwin-digkeitsstufen abwechselnd schwarz und weiß ge-tönt werden.

Das gezeigte Windprofil ist aber nur das Rechenergebnis über einen längeren Zeitraum. Zu dieser mittleren Vorwärtsbewegung der Luft tritt eine nach Richtung und Größe unregelmäßige Zusatzkomponente der Luftbewegung. Sie be-wirkt die „Turbulenz“ der Luft und die Böigkeit des Windes (Richtungs- und Geschwindigkeits-böigkeit). Die Böigkeit ist nahezu ausnahmslos, also auch bei ganz schwachem Wind, vorhanden, wird allerdings erst bei Sturm sinnfällig. Verfolgt man an empfindlichen Windmessern mittels eines rasch laufenden Films die momentane Wind-

änderung mit der Höhe, so ergibt sich nicht ein Bild wie Abb. 1 rechts oben, sondern wie Abb. 1 unten. Der Ausschnitt aus Messungen von *Wilb. Schmidt* in einer 1 m hohen Luftschicht über dem Boden umfaßt nur 4 Sekunden. Die Turbulenz ist sehr groß. Bisweilen weht der Wind, was in der Abb. durch senkrechte Schraffur gekennzeichnet ist, auch aus der entgegengesetzten Richtung.

Die Zusatzkomponente ist ohne Belang, soweit sie parallel zum Boden verläuft, dagegen von höchster Bedeutung, soweit sie einen Auf- und Abtransport von Luftteilen bewirkt. Ohne diesen würden die Eigenschaften der Luft am Boden (Wärme, Wasserdampfgehalt, Staub, Kohlensäure usw.) nicht in die Atmosphäre hinaufgeschafft und deren Eigenschaften nicht abwärts

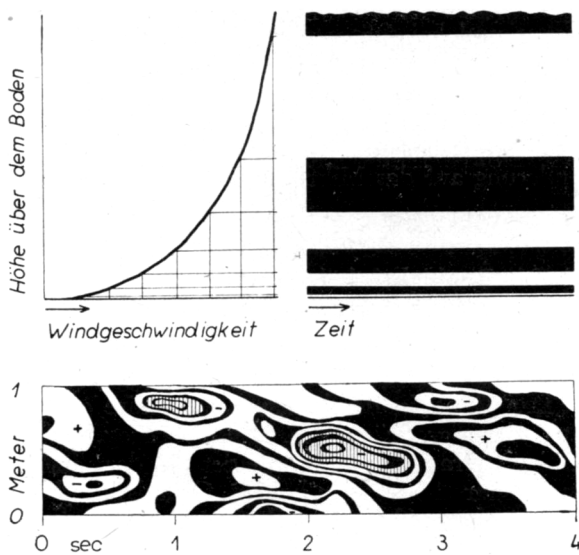


Abb. 1. Windbewegung in Bodennähe

geschafft. Der Vorgang trägt die Bezeichnung Massenaustausch oder kurz *Austausch*. Ohne ihn wäre der Wärme- und Wasserhaushalt der Bodenoberfläche völlig anders. Ohne ihn gäbe es keine ausreichende Samen- und Pollenverbreitung.

Das in der Abb. 1 links oben gezeigte mittlere Windprofil setzt völlig ebene Oberflächen voraus, wie sie in der Natur etwa in einer Neuschneedecke oder in einem glatten Seespiegel annähernd verwirklicht sind. Bei einer rauhen und vor allem bei einer bewachsenen Bodenoberfläche muß man nach der Höhe eine Zweiteilung vornehmen. Bis zu einer Höhe z_0 , welche die „Rauhigkeitshöhe“ genannt wird, herrscht lebhafter Massenaustausch, aber sehr geringe Windgeschwindigkeit. Erst von z_0 ab ist das Normalprofil der Abb. 1 anzusetzen. z_0 fällt nicht mit der Pflanzenoberfläche zusammen, die ja bei

lebender Vegetation auch gar nicht als einheitliche Größe meßbar ist, sondern wird aus dem Windprofil experimentell bestimmt. Nach *W. Paeschke* (19) ist bei einem Getreidefeld z_0 etwa 1,3 m, bei einem Rübenacker 0,5, bei einer Wiese 0,2, bei einem Flugplatz 0,1 m. Erst oberhalb dieser Höhe setzt die normale Zunahme des Windes mit der Höhe ein. Für das Holsteinische Wiesen- und Knickgelände bei Quickborn errechnete *E. Frankenberger* (6), daß der Wind im Mittel bis zu 0,7 m Bodenabstand heruntergreift.

b) Windschutz als Aufrauung des Landes

Die erste Forderung für Schaffung eines künstlichen Windschutzes ist somit die Erhöhung der Rauigkeit zum Abheben der freien atmosphärischen Windströmung von dem zu schützenden Boden. Die wellige Anordnung der Ackerflächen oder das Dulden von Unkraut auf den Feldern nach der Ernte sind in windgefährdeten Gegenden bekannte Maßnahmen hierfür. Auch das Ackern mit dem „Unterschnieder“, der die Lockerung und Durchlüftung des Bodens unter Erhaltung der Oberfläche des Stoppelackers erlaubt und nach *A. Olbrich* (18) in USA Verwendung findet, gehört hierher. Bisweilen dient der Zwischenbau hoher Früchte (Sonnenblumen, Topinambur) dem gleichen Zweck. Schon jeder einzelne Strauch oder Baum erhöht die Rauigkeit seiner Umgebung. Die Häufigkeit stürmischer Winde ist daher auch auf die reibungsarmen Ebenen beschränkt: die See, die ebenen Schneelandschaften (Buran, Purga) und die vegetationslose Wüste (Chamsin, Harmattan).

Wo der Windschutz künstlich geschaffen wird, kann die Aufrauung des Landes durch verteilte Bepflanzung erfolgen, indem man alle Straßenränder und Flußufer, Böschungen und Dämme, um jedes Gehöft und an allen nicht anders genutzten Flächen Alleien, Gehölze und Buschwerke schafft. Dieses naturgemäße Verfahren ist ungefähr das Gegenteil von dem, was heutzutage durch die Flurbereinigung erreicht wird.

Im allgemeinen zwingt aber die Rücksicht auf den Landbau dazu, durch Windschutzstreifen, die meist geradlinig und senkrecht zur vorherrschenden Windrichtung angeordnet werden, das Gelände „aufzurauhen“. Die Streifen können als Waldstreifen oder als Hecken, Wallhecken, Knicks oder Kampenwälle angelegt werden oder auch als Zäune, Lattengestelle (wie die bekannten Schneegatter) oder gar als Mauern in Erscheinung treten. Die Erfahrungen über deren Wirkung stammen vorwiegend aus drei Gebieten der Erde. Im nordwestlichen und westlichen Europa entstanden Heckenlandschaften, über deren Ausdehnung und Entwicklung wir *O. Jessen* (11) genaue

Unterlagen verdanken. Hier hat die dänische Heidegesellschaft schon frühzeitig Messungen ausgeführt, worüber *C. E. Flensburg* (5) berichtet. Eine ausgezeichnete Zusammenfassung unter Berücksichtigung aller wesentlichen Gesichtspunkte verdanken wir *P. Ehrenberg* (4). 1949 veröffentlichte *A. Olbrich* (18) eine lesenswerte Schrift. Die jetzt besten meteorologischen Untersuchungen wurden während und nach dem Kriege in der Schweiz von *W. Nägeli* (15—17) durchgeführt. Als zweiter Erfahrungsraum ist die südrussische Steppe zu nennen. Neuerdings hat *E. Gagarin* (7) einen zusammenfassenden Bericht über die russischen Arbeiten und Erfahrungen veröffentlicht. Dazu tritt das Präriegebiet der Vereinigten Staaten mit dem großen „Shelterbelt“-Unternehmen (26); systematische Messungen aus dem dortigen Raum sind mir aus neuer Zeit nicht bekannt.

c) Die Wirkung eines einzelnen Windschutzstreifens

Zunächst bleibe Gestalt und Material des Schutzstreifens außer acht. Wird ein einzelner Schutzstreifen senkrecht vom Winde angeblasen, so wird bereits vor dem Hindernis (Luvseite) die Strömung vom Boden abgehoben, wodurch eine luvseitige Schutzwirkung in Bodennähe entsteht. Die zum Ansteigen gezwungene Strömung behält diese Aufwärtsbewegung jenseits des Hindernisses (also auf der Leeseite) noch für kurze Zeit bei und kehrt dann allmählich zur normalen Lage zurück. Das Absinken erfolgt viel langsamer als das Anheben. Daher ist die Windschutzwirkung in Lee viel weitreichender als in Luv. Erfolgt die Anblasung des Schutzstreifens nicht senkrecht, so verringert sich die beiderseitige Schutzwirkung; der Wind streicht zum Teil dem Hindernis entlang.

Im allgemeinen wird ein hoher Schutzstreifen auf größere Entfernungen hin wirksam sein als ein niedriger. Man pflegt daher die Schutzwirkung nicht im Längenmaß anzugeben, sondern nimmt die Schutzstreifenhöhe h als Einheit. Die darin ausgesprochene Vermutung, daß die Schutzwirkung proportional der Höhe h ist, trifft aber nicht streng, sondern nur für mäßige Höhen angenähert zu. Mit wachsendem h wird der Proportionalitätsfaktor sicher kleiner, aber in welchem Ausmaße, ist noch unbekannt.

In der Literatur findet man für die Schutzwirkung vor dem Schutzstreifen Zahlen zwischen 2 h und 10 h , für die Wirkung hinter dem Schutzstreifen Angaben zwischen 8 h und 60 h . Diese unerhörte Streubreite ist keineswegs nur durch tatsächliche Unterschiede bewirkt, sondern geht

darauf zurück, daß fast jeder Autor unter der „Schutzwirkung“ etwas anderes versteht. Allgemein üblich ist es, den Wind in der ungestörten Umgebung als Norm zu setzen (= 100) und entweder die Schwächung des Windes in Prozent oder die Windgeschwindigkeit in Prozent des Freilandwinds anzugeben (letzteres Verfahren wird im folgenden benutzt). Dabei wird die Frage, wann noch von einem Schutz gesprochen werden kann und soll, von jedem Praktiker anders beantwortet. Der Übergang vom Schutzbereich zum ungestörten Windfeld erfolgt so allmählich, daß der gewählte Grenzwert das Ergebnis stärkstens beeinflusst. Auch ist die Aufstellhöhe der Windmesser, auf deren Registrierung das Ergebnis beruht, von Bedeutung; diese wird aber in vielen Veröffentlichungen überhaupt nicht angegeben! Die Streubreite der Zahlenangaben ist daher nicht verwunderlich. Im wirklichen Sachverhalt unterscheiden sich die verschiedenen Beobachtungsergebnisse nur unwesentlich.

W. Nägeli (17) wählte bei seinen sorgfältigen und umfangreichen Messungen für die Anemometer 1,4 m Aufstellhöhe. In einer besonderen Untersuchung verteilte er Instrumente zwischen 0,2 und 5,0 m Höhe und zeigte, daß die Schutzwirkung in vertikaler Richtung nur ganz allmählich mit der Höhe abnimmt und auf der Leeseite erheblich über die Schutzstreifenhöhe hinausreicht. Die Höhe von 1,4 m erwies sich hierbei als sehr zweckmäßig. Sie ist nämlich oberflächennah genug, um die erreichte Schutzwirkung zu erfassen, aber auch gerade hoch genug, um die Reibungsunterschiede auszugleichen, die bei Messungen im freien Gelände durch die wechselnde Bodendecke verursacht sind. Um die Vergleichbarkeit mit den Versuchsreihen *W. Nägelis* sicherzustellen, empfiehlt es sich bei künftigen Untersuchungen, 1,4 m als Aufstellhöhe zu benutzen.

Um zunächst eine richtige Vorstellung von der Größenordnung der Schutzwirkung zu erhalten, sei vorausgeschickt: In 1,4 m über dem Boden kann bei Wind senkrecht zum Schutzstreifenverlauf eine mindestens 10%ige Windschwächung auf eine Entfernung hin erreicht werden, die vor dem Hindernis etwa das 5fache, hinter dem Hindernis etwa das 25fache der Schutzstreifenhöhe h beträgt. Eine 2%ige Schwächung erstreckt sich etwa von 10 h bis 50 h .

Daraus ergibt sich sofort eine wichtige Folgerung. Selbst hohe Wälder erstrecken ihre Schutzwirkung nur auf einen schmalen Bereich. Ein 20 m hoher Bestand übt beispielsweise nur auf einen halben Kilometer Entfernung in der hier-

für günstigsten Richtung einen nennenswerten Schutz aus. „Wir dürfen nicht wähen“, sagt *W. Leimbach* (14), „daß Waldstreifen Bodenwinde abfangen, wie etwa ein Deich das Meer abdämmt.“ Weil die später noch zu erörternde Mindestbreite der Windschutzstreifen nur gering ist, folgt daraus, daß vom Standpunkt des Windschutzes aus die Gehölze im Lande möglichst zu verteilen sind. Das ist aber nichts anderes als die schon oben erhobene Forderung nach einer „Aufrauhung“ der Landschaft.

Hinsichtlich der Abhängigkeit der Schutzwirkung von der Windgeschwindigkeit ließen Messungen von *D. Denny* (3) eine relative Abnahme der Schutzwirkung bei Winden über 10 m/sec erkennen. *W. Nägeli* (17) fand eine solche bei Windgeschwindigkeiten unter 2 m/sec; zwischen 2 und 7 m/sec war die prozentuale Windschwächung vom absoluten Betrag des Freilandwindes praktisch unabhängig.

Alle Erfahrungen zeigen übereinstimmend, daß ein durchlässiger Schutzstreifen eine bessere Wirkung erzielt als ein für den Wind undurchdringlicher. Eine Hecke ist besser als eine Mauer. Hinter dem festen Hindernis bildet sich nämlich ein Leewirbel, der den starken Wind oberhalb des Hindernisses rascher zum Boden zurückführt, als wenn Luft durch das Hindernis hindurchtreten und die Wirbelbildung verhindern oder mindestens stark abschwächen kann. Vergleichende Messungen von *W. Nägeli* (17) an 12 verschiedenartigen Windschutzstreifen in der Schweiz zeigen das in der Abb. 2 zusammengefaßte Ergebnis. Sehr dichte Streifen (z. B. alte Fichten mit dichtem Bestandmantel) bewirken wohl unmittelbar hinter dem Hindernis beinahe Luftruhe, aber dafür auch einen sehr raschen Wiederanstieg der Windgeschwindigkeit. Lückige oder aus locker stehenden Stämmen auf-

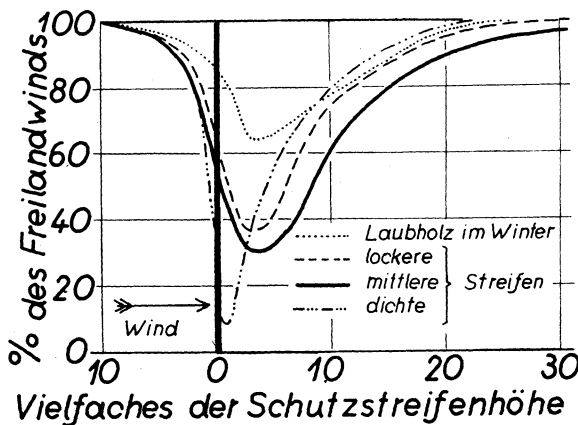


Abb. 2. Ergebnis der Versuche von *W. Nägeli* über die Schutzwirkung einzelner Windschutzstreifen

gebaute Streifen bieten, im ganzen betrachtet, dem Wind zu wenig Widerstand. Am besten wirken die mäßig dichten, vom Wind noch schwach zu durchreichenden Schutzstreifen.

Beim Eintritt des Windes in den einzelnen Windschutzstreifen wird zunächst der Strömungsquerschnitt verringert. Das bedeutet eine Steigerung der Windgeschwindigkeit. Sie ist durch *M. Woelfle* (22) unmittelbar an einem dichten Fichtenbestandmantel sogar gemessen worden. Im allgemeinen aber wird sie mehr als ausgeglichen durch den Einfluß der an Ästen, Nadeln und Blättern einsetzenden Reibung und durch das Ausweichen der Luft nach oben. Die Abb. 3 zeigt einen von *W. Nägeli* (16) in der Rhoneebene gemessenen Fall, bei dem das Windprofil im luvseitigen Teil des Windschutzstreifens (20 m hoch aus Fichten, Eschen, Eichen, Buchen, Ahorn, Weymouthskiefern, Tannen und Pappeln, 75 m breit) im Widerstreit beider Einflüsse anfangs eine geringfügige Bremswirkung zeigt; diese kommt erst im rückwärtigen Teil zur vollen Auswirkung. Selbstverständlich ist dieser

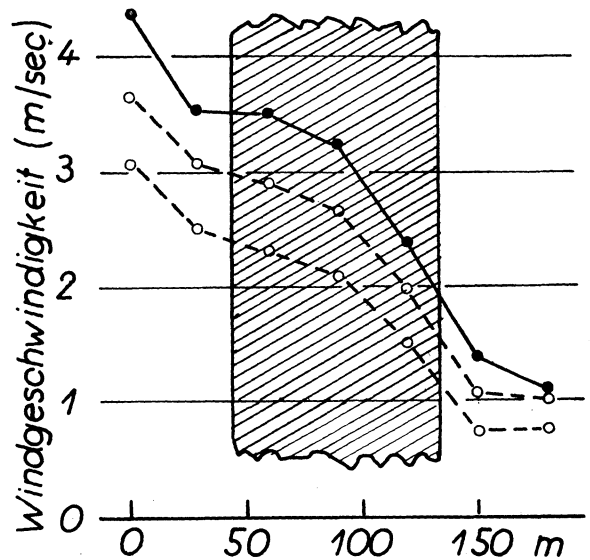


Abb. 3. Messungen innerhalb eines Windschutzstreifens (geordnet nach 3 Windgeschwindigkeitsgruppen) Nach *W. Nägeli*

Vorgang durch Dichte und Art des Schutzstreifens in hohem Maße bestimmt, also keineswegs überall so, wie ihn die Abb. 3 zeigt. In jedem Fall bestimmt sich aber dadurch die Mindestbreite der Schutzstreifen. Sie muß so groß sein, daß keine eigentliche Durchblasung des Streifens möglich ist, sondern die Bremswirkung voll erreicht wird. (Diejenigen Forderungen für die Mindestbreite werden hier nicht be-

sprochen, die sich forstlich-botanisch aus der Notwendigkeit ergeben, die Schutzstreifen trotz Windschadens überhaupt hochzubringen, zu erhalten und ohne Verlust der Schutzwirkung zu verjüngen.)

Wo diese Mindestbreite nicht erreicht wird, besteht die Gefahr erhöhter Windwirkung. Schon ein einzelner Baum zeigt auf kleinstem Raume eine lokale Geschwindigkeitserhöhung des Windfelds, weil das Hindernis umströmt werden muß, also eine Drängung der Stromlinien an den Baumflanken entsteht, und weil die Bremsung des stets lebhafteren Höhenwinds an der Krone diesen teilweise nach unten ausweichen läßt. Die Abb. 4 zeigt nach Messungen von M. Woelfle (22, 23) das Windfeld in 50 cm über der Bodenfläche rings um eine einzelstehende, 24 m hohe Alteiche bei München. Die 24 Meßpunkte sind in der Abb. 4 markiert.

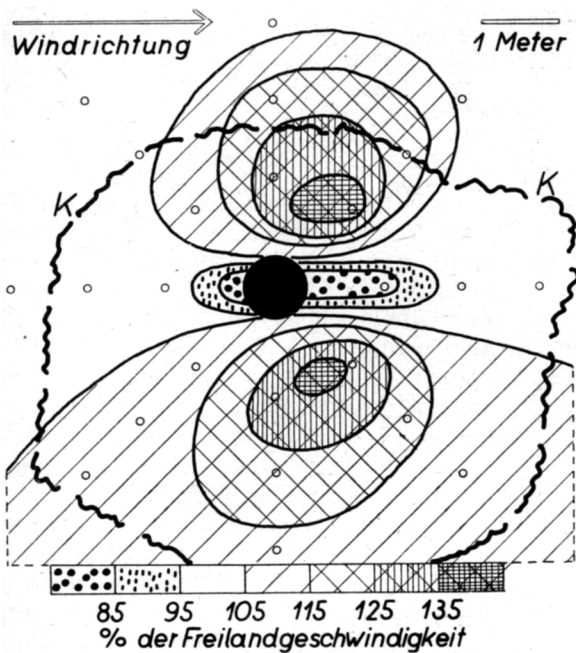


Abb. 4. Lokales Windfeld um eine einzelne Eiche (nach M. Woelfle)

Die Kronendraufsicht ist durch die Linie K umrissen. Lage und Ausdehnung der windschwachen und windstarken Räume ist ohne weiteres verständlich.

Bei Alleen steigert sich dieser Effekt durch die benachbarten Einzelstämme und führt zu den Aushagerungserscheinungen, die man auf den Äckern neben Straßenalleen beobachten kann. Sie sind um so stärker, je astfreier das untere Stammstück und je unterholzfrier die Allee ist.

Ein schönes Beispiel bietet die Abb. 5 nach Messungen von W. Nägeli (16) an einer Pappelallee in Wallis. Man kann erkennen, daß hier die Geschwindigkeitssteigerung zwischen den Alleebäumen bei 20 % liegt, wenn der Wind senkrecht anweht. Aber dies ist eine ganz lokale Erscheinung; denn die eigentliche Windschutzwirkung dieser nur doppelten Baumreihen ist bis über

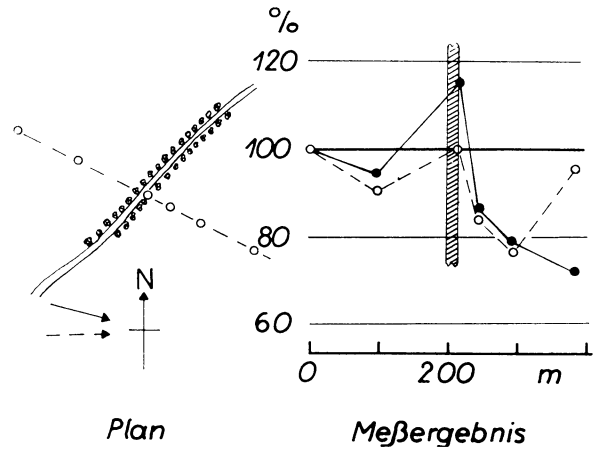


Abb. 5. Der Durchblaseeffekt bei einer Pappelallee Nach W. Nägeli

100 m vor und viele hundert Meter hinter dem Hindernis feststellbar. Der Durchblasevorgang ist also bei Anlage der Schutzstreifen wohl zu beachten (Unterholz!), kann und darf aber nie ein Hindernis sein, den Windschutz zu schaffen (vgl. auch Abb. 8).

d. Der Schutz einer größeren Landfläche

Der Windschutz eines größeren Gebietes wird durch hintereinander gestaffelte Schutzstreifen erreicht. Die Abb. 6 zeigt nach W. Nägeli (16) die Windverteilung zweier senkrecht angeblasener Schutzstreifen. Der Streifen links von 44—75 m Breite bestand aus dichtem Laub- und Nadelholz von 20—26 m Höhe, der Streifen rechts von 40 bis 60 m Breite aus Fichten von 23 m Höhe, in deren Lücken später Laubholz eingepflanzt war. Das Ergebnis jedes einzelnen Windmessers ist hier eingetragen, um einerseits die örtliche Streuung, aber auch die Zuverlässigkeit des Gesamtergebnisses zu zeigen. Luv- und Leewirkung addieren sich. Denn wo in 18facher Entfernung der Höhe des vorderen Schutzstreifens die Windgeschwindigkeit erst 80 % des Freilandwertes überschreitet, setzt bereits die Luvwirkung des zweiten Streifens ein. W. Nägeli hat solche Staffelwirkungen, die stark mit Höhe und Beschaffenheit des Schutzstreifens wechseln, noch an mehreren anderen Objekten untersucht.

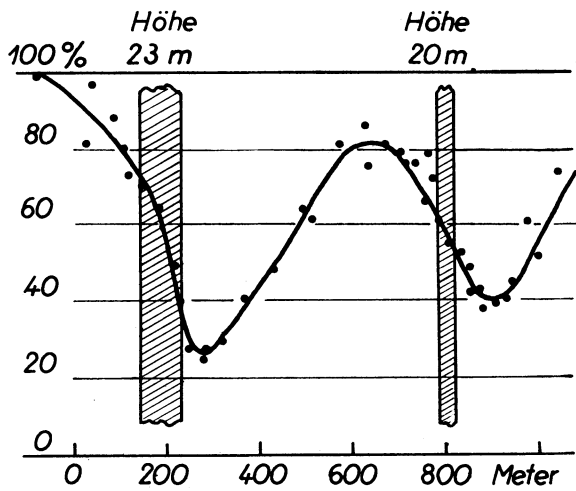


Abb. 6. Wirkung gestaffelter Windschutzstreifen
(nach W. Nägeli)

Die Abb. läßt zugleich erkennen, daß die Herabsetzung der Windgeschwindigkeit keine gleichmäßige Verteilung aufweist, sondern je nach dem Abstand von den nächsten Schutzstreifen und je nach der Windrichtung sehr unterschiedlich ist. Das darf nie vergessen werden.

Wo eine bestimmte Windrichtung stark vorherrscht, ist durch die Staffeln der Streifen der Windschutz leicht zu erreichen. In der Mehrzahl der Fälle, wie auch bei uns in Deutschland, ist aber mit Winden aus mehreren Richtungen zu rechnen. Man muß dann zu einem Netzwerk von Windschutzstreifen übergehen, das man am besten aus mehreren Systemen verschieden hoher Schutzstreifen aufbaut. Für die Hauptstreifen wählt man eine Richtung senkrecht zur gefährlichsten oder häufigsten Windrichtung. Dabei muß die Steuerung des Windes durch das Gelände gut berücksichtigt werden. Die richtige Planung eines Windschutznetzes setzt also immer die Vertrautheit mit der orographischen Mikroklimatologie voraus. Die Hauptstreifen, die bei hinreichender Höhe sogar als „Windleitlinien“ (*M. Rohwedder*) dienen können, verbindet man durch Querstreifen, wobei im Netzwerk überall Lücken zu lassen sind, weil sonst durch den Windschutz ein „Luftsumpf“ entsteht (Frostgefahr!). Für den großen Schutzwaldplan der Sowjetunion 1949—1965 in der südosteuropäischen Steppe zeigt beispielsweise *J. Blüthgen* (1) eine Karte. Sie läßt das weitmaschige Gitternetz der Waldstreifen im Raume zwischen dem Unterlauf des Dnjestr und dem Ural gut erkennen. Zwischen die hohen Hauptstreifen kommt ein System von Hecken, das erst den eigentlichen Windschutz schafft. *M. Woelfle* (25) hat einmal

für die Besiedelung der Hohen Rhön einen ins einzelne gehenden Vorschlag vorgelegt. So wird aus dem offenen Land (open field, champagne) das eingefriedigte Land (fencing country, pays d'enclos), wie das *O. Jessen* (11) für Europa schilderte.

2. Rückwirkung des Windfelds auf das Mikroklima

Ein Mikroklima ist individuell um so ausgeprägter, je größer die Luftruhe ist. Aus- und Einstrahlung wirkt sich je nach Bodenart, Bodenoberflächenbeschaffenheit und Pflanzendecke verschieden aus. Auch der aus der hohen Atmosphäre fallende Niederschlag wird im Wasserhaushalt verschieden verwertet, während Tau, Reif, Rauhreif, Rauhrost und Glatteis von vornherein eine vom Mikroklima abhängige Spende liefern. Die Verdunstungsgröße ist stets lokal bestimmt. All diese Besonderheiten kommen nur im „selbständigen“ Mikroklima zur Auswirkung, das nicht von Fremdeinflüssen gesteuert wird (vgl. 8). Je geringer der alle Unterschiede nivellierende Wind ist, desto selbständiger ist das Mikroklima. Im Sturm verwischen alle spezifischen Klimaeigenschaften.

Allgemein wirkt also die künstliche Windschwächung dahin, daß die ortsgebundenen Klimakennzeichen verstärkt werden. Es hängt ganz vom Einzelfall ab, was praktisch daraus folgt. Man kann aber immerhin auf einige Tatsachen hinweisen, die zu einer richtigen Beurteilung der Verhältnisse dienen können.

Eine mittelbare Wirkung des künstlichen Windschutzes ist zunächst die *Seitenwirkung*, die jedes Hindernis hervorruft. Denn der Wind überströmt nicht bloß das Hindernis, sondern er umströmt es auch. Was die Abb. 4 im Kleinen zeigte, gilt auch für das Ganze einer Windschutzanlage. An der Abb. 7 kann man diese Seitenwirkung in ihrem Ausmaße gut abschätzen. Es handelt sich wiederum um Messungen von *W. Nägeli* (16) an dem Schutzstreifen, der in der Abb. 6 links schon in seiner Wirkung gezeigt, und dessen Größe und Art dort schon beschrieben wurde.

Der obere Teil der Abb. 7 zeigt das nordöstliche Schutzstreifenende und die Aufstellung der Windmesser hinter dem Streifen. Der untere Teil gibt die Meßergebnisse wieder. Unmittelbar hinter dem Streifen ist noch eine merkliche Schutzwirkung vorhanden. Aber von 20 m Seitenabstand an wird der Normalwert des Windes überschritten. Mit fast 130 % wird der Höchstwert in etwa 100 m Abstand erreicht und nimmt von da an nur allmählich ab. Der Schutz hinter dem Hin-

dernis wird also, wenn es seitenfrei steht, teilweise durch erhöhten Wind in der nächsten Nachbarschaft erkauft. In windausgesetzten Gemüsegärten, die an irgendeiner Stelle etwa eine Thujahhecke angepflanzt haben, kann man die Schä-

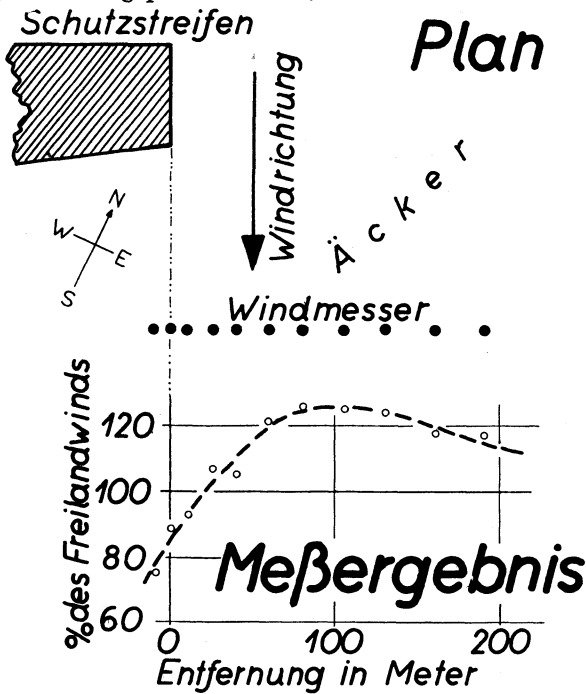


Abb. 7. Die Seitenwirkung eines Schutzstreifens (nach W. Nägeli)

den solcher Seitenwirkung oft gut am Ertrag erkennen. Die Schaffung des künstlichen Windschutzes ist daher stets eine Gemeinschaftsaufgabe.

Unvermeidbar ist die Schattenwirkung jedes Schutzstreifens. Man kann diese berechnen. Für den Schattenwurf an einem Bestandsrand hat R. Geiger (9) graphische Tafeln in Abhängigkeit von Exposition, Bestandshöhe und Tageszeit wenigstens für die Zeiten der Sonnenwenden und der Äquinoktien veröffentlicht. Auch Veröffentlichungen von W. Kaempfert (12) kann man mit Vorteil dazu benutzen.

Die stärkste Mikroklimawirkung übt der Windschutz durch die Herabsetzung der Verdunstung aus. Nach A. Wagner (21) ist (in vereinfachter Form) die Verdunstung V (in g je qcm und Stunde) gleich

$$V = 10^{-2} (E' - e) \sqrt{v + 0,3}$$

worin E' den Dampfdruck (in mm Hg = Torr) der verdunstenden Oberfläche, e den in der Luft gemessenen Dampfdruck und v die Windgeschwindigkeit (in m/sec) bedeutet. Danach hängt die Verdunstung vorwiegend von zwei Faktoren ab: vom Wind v und der Temperatur der ver-

dunstenden Oberfläche, welche E bestimmt. W. Nägeli hat neben den Windmessungen jeweils auch Messungen der Verdunstungsgröße vorgenommen. Das Ergebnis zeigt eine vollkommene Parallelität mit dem Verlauf der Windgeschwindigkeit. Der Schutz vor zu großer Wasserabgabe ist meist der vorteilhafteste Faktor im Windschutz. Dieser Verdunstungsschutz ist, worauf E. Gagarin (7) mit Recht hinweist, keineswegs auf heiße und trockene Zeiten beschränkt, sondern hilft auch an kühlen und feuchten Tagen zur Erhaltung des Wasservorrats im Boden.

Auch über den Niederschlag wird der Wasserhaushalt verbessert. Denn der örtliche Windschutz hält den Niederschlag am Orte fest, d. h. er kommt in der Windruhe zum Ausfallen. In der Ukraine wird beispielsweise die Steigerung des Ernteertrages in erster Linie auf diese Wirkung des Windschutzes zurückgeführt. Nach E. Danilow (2) sind auf dem Versuchsgut „Kamennaja Stepj“ im Durchschnitt der Jahre 1918 bis 1924 unter dem Schutz der Waldstreifen jährlich 440 mm Niederschlag gefallen, in der offenen Steppe dagegen nur 384 mm. Die Niederschlagsmehrung um 15 % muß keine echte Erhöhung der atmosphärischen Wasserspende sein (im Sinne der „Wohlfahrtswirkung“ des Waldes), sondern stellt wahrscheinlich nur das örtliche Festhalten des sonst vorübergepeitschten Regens dar. Für den mikroklimatischen Wasserhaushalt wirkt es sich aber wie eine echte Niederschlags-erhöhung aus.

Der vom Wind leicht getragene Schnee wird noch stärker als der Regen von den Windschutzmaßnahmen beeinflusst. Die Abb. 8 zeigt die gleichzeitigen Messungen der Windgeschwindigkeit und der Schneedeckenhöhe beiderseits eines Schneegatters („Schneehags“), wie sie zum Straßenschutz verwendet werden, durch W. Nägeli (17) an der Straße Yverdon-Moudon in der Schweiz. Das Gatter war 1,0 m hoch und war aus

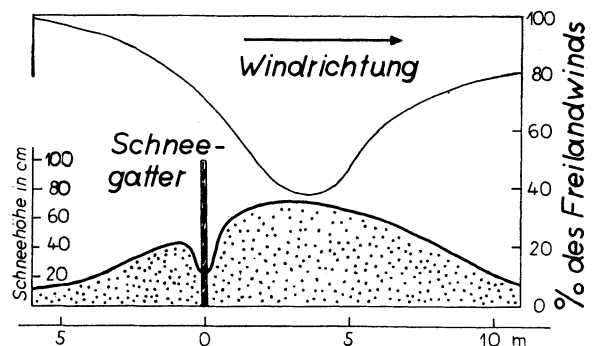


Abb. 8. Mittleres Windfeld und Schneedeckenhöhe an einem Windschutzgitter an der Straße (nach W. Nägeli)

5 cm breiten senkrechten Latten mit 5 cm Zwischenraum hergestellt. Die Windmesser standen 50 cm über dem Boden. Das Ergebnis stellt das Mittel aus mehreren hundert Einzelmessungen im März 1944 dar. Die Schutzwirkung erstreckt sich auf etwa 6 h in Luv und etwa 25 h in Lee. Diese starke Wirkung wird erzielt, obgleich das Hindernis zu 50 % durchblasen wird. Am Gatter selbst erniedrigt der Durchblaseeffekt (s. oben) die Schneehöhe auf nur 22 cm.

Die Temperaturwirkung der Windschutzstreifen ist für das Mikroklima ähnlich der Wirkung, die der Wald auf das Großklima eines Landes ausübt. Tagsüber wird die Temperatur erhöht, was zugleich die verdunstungshemmende Wirkung des Windes verringert, bei nassem Boden also unter Umständen willkommen ist. Nachts bieten die Windschutzstreifen zwar einen Ausstrahlungsschutz, der nach R. Geiger (10) unmittelbar am Streifen 50 %, aber schon in der Entfernung gleich der Höhe h nur noch 10 % der Freilandausstrahlung beträgt. Mikroklimatisch wirksamer ist aber die Stagnation der Luft bei ruhiger Wetterlage und damit das örtliche Wirksamwerden der Ausstrahlung. Der künstliche Windschutz bringt also stets eine Erhöhung der Frostgefahr. Man kann diese Gefahr herabsetzen durch Öffnungen in den Windschutzstreifen. Besonders im Hügel- und Berggelände wird man damit Erfolg haben, wo die nächtliche Kaltluft abfließen kann. Die Öffnungen wird man an solche Stellen legen, wo ein Durchblasen bei starkem Wind möglichst verhindert, ein Abströmen der Kaltluft bei Windruhe möglichst gefördert wird.

All diese Rückwirkungen des erzielten Windschutzes müssen vor größeren Planungen wohl überdacht werden. Man muß hierfür sowohl die Großklimalage des zu schützenden Gebietes als auch die ortsgebundenen Mikroklimata berücksichtigen. Das hieraus sich ergebende Urteil über die meteorologischen und klimatischen Auswirkungen kann dann ein brauchbarer Beitrag werden für die Beurteilung des vielgestaltigen Windschutzproblems in seiner Gesamtheit für eine gegebene Landschaft.

Literatur

- (1) *Blüthgen, J.*, Das südruss. Schutzpflanzenvorhaben in landw. u. geograph. Betrachtung. + *Urania*. 12. 1949. 209—220, 255—266.
- (2) *Danilow, E.*, Waldschutzstreifen. + Landw. Staatsverl. Moskau-Leningrad. 1931.
- (3) *Dennyl, D.*, The zone of effective windbreak influence. + *Journ. of Forestry*. 1936. 689—695.
- (4) *Ehrenberg, P.*, Landwirtsch. beachtliche Windwirkungen u. Windschutz in d. Landw. + Kulturtechniker. 46. 1943. 19—41.
- (5) *Flensburg, C. E.*, Die dänische Heidegesellschaft. + Viborg. 1939.
- (6) *Frankenberger, E.*, Über d. Austauschmechanismus der Bodenschicht u. die Abhäng. d. vertik. Massenaustauschs von Temp. gefälle nach Unters. an d. 70 m hohen Funkmasten in Quickborn/Holstein. + *Ann. d. Met.* 1. 1948. Beiheft 3—23.
- (7) *Gagarin, E.*, Holzanbau zum Schutz der Felder in Rußland. + *Forstwiss. Centralbl.* 68. 1949. 571—602.
- (8) *Geiger, R.*, Über selbständige u. unselbst. Mikroklimata. + *Met. Z.* 46. 1929. 539—544.
- (9) —, Die Beschattung am Bestandsrand. + *Forstwiss. Centralbl.* 57. 1935. 789—794.
- (10) —, Weitere Bem. zum Klima am Bestandsrand. + *Ebenda* 58. 1936. 262—266.
- (11) *Jessen, O.*, Heckenlandschaften im nordwestl. Europa. + *Mitt. Geogr. Ges. Hamburg*. 45. 1937. 7—58.
- (12) *Kaempfert, W.*, Ein Phasendiagramm der Besonnung. + *Wetter u. Klima*, im Druck.
- (13) *Kreutz, W.*, Das Windschutzproblem. + *Bioklimat. Beibl.* 5. 1938. 10—16.
- (14) *Leimbach, W.*, Die neuen Schutzwaldstreifen in der Sowjetunion. + *Erdk. Unterr.* 1. 1949. 145—146.
- (15) *Nägeli, W.*, Über die Bedeutung v. Windschutzstreifen z. Schutze landw. Kulturen. + *Schweiz. Z. f. Forstwesen*. 11. 1941. 265—280.
- (16) —, Untersuchungen über d. Windverh. im Bereich v. Windschutzstreifen. + *Mitt. d. Schweiz. Anst. f. d. forstl. Versuchswesen*. 23. 1943. 223—276.
- (17) —, Weitere Untersuchungen usw. + *Ebenda* 24. 1946. 659—737.
- (18) *Olbrich, A.*, Windschutzpflanzungen. + M. u. H. Schaper. Hannover. 1949.
- (19) *Paeschke, W.*, Experim. Unters. zum Rauhgigkeits- u. Stabilitätsproblem in d. bodennahen Luftschicht. + *Beitr. z. Phys. d. freien Atmosph.* 24. 1937. 163—189.
- (20) *Schoenichen, W.*, Lebende Windschutzanlagen. + *Pet. Geogr. Mitt.* 90. 1944. 273—278.
- (21) *Wagner, A.*, Zur Frage der Verdunstung. + *Gerl. Beitr. z. Geophys.* 34. 1931. 85—101.
- (22) *Wöelfle, M.*, Wald und Windschutz. + *Forstwiss. Centralbl.* 57. 1935. 349—362 und 58. 1936. 325—338, 429—448.
- (23) —, Verhagerungserscheinungen. + *Ebenda*. 59. 1937. 757—769.
- (24) —, Hecken als Windschutzanlagen. + *Ebenda*. 60. 1938. 15—28.
- (25) —, Windschutzanlagen. + *Ebenda*. 60. 1938. 52 bis 63, 73—86.
- (26) Possibilities of shelterbelt planting in the plains region. + Washington. 1935. (US govern. print. off.)