

**Berichte des Deutschen Wetterdienstes**

# 24

**Der Strömungsverlauf sowie die Erosionsvorgänge und  
Schneeablagerungen an künstlichen Windschirmen nach  
Untersuchungen im Windkanal**

Ein Beitrag zur Windschutzfrage

von  
Wilhelm Kreutz  
Wolfgang Walter

**Zitationsvorschlag:**

Kreutz, Wilhelm; Walter, Wolfgang: Der Strömungsverlauf sowie die Erosionsvorgänge und Schneeablagerungen an künstlichen Windschirmen nach Untersuchungen im Windkanal : ein Beitrag zur Windschutzfrage. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1956.  
(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 24)

ISSN der Onlineausgabe: 2194-5969

ISSN der Druckausgabe: 0072-4130

---

**Nutzungsbedingungen**

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz



Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden.

Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

---

Herausgeber und Verlag:

:

Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
D- 63067 Offenbach am Main

Internet: [www.dwd.de](http://www.dwd.de)

Mail: [bibliothek@dwd.de](mailto:bibliothek@dwd.de)

## Inhalt:

|                                                                                                                                                                     | Seite |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1. Vorwort .....                                                                                                                                                    | 3     |
| 2. Problemstellung .....                                                                                                                                            | 3     |
| 3. Messung des Stauprofiles an künstlichen<br>Windschirmen .....                                                                                                    | 4     |
| 3.1. Untersuchung des Einflusses der Ober-<br>flächenrauigkeit und der absoluten Grö-<br>ße der durchblasenen Öffnungen auf das<br>Stauprofil der Hindernisse ..... | 4     |
| 3.2. Strömungsbilder .....                                                                                                                                          | 9     |
| 4. Ablagerungsverhältnisse im Wirkungsbereich<br>künstlicher Windschirme .....                                                                                      | 11    |
| 4.1. Erosionsvorgänge .....                                                                                                                                         | 11    |
| 4.2. Schneeablagerungen .....                                                                                                                                       | 19    |
| 5. Isotachenverlauf an künstlichen Windschirmen .....                                                                                                               | 22    |
| 6. Zusammenfassung und Ausblick .....                                                                                                                               | 23    |
| 6.1. Wissenschaftliche Ergebnisse .....                                                                                                                             | 23    |
| 6.2. Praktische Folgerungen .....                                                                                                                                   | 24    |
| Literatur .....                                                                                                                                                     | 25    |

## Anschriften der Verfasser:

Dr. W. Kreutz, Gießen, Am Nahrungsberg 12

Dr. W. Walter, Offenbach/M., Ludwigstraße 23

## 1. Vorwort

Der Möglichkeit des Windschutzes wird in der Landwirtschaft, im Gartenbau und in der Verkehrswirtschaft immer mehr Beachtung geschenkt. Indem man die Strömungsverhältnisse des Windes durch natürliche und künstliche Schutzanlagen beeinflusst, wird versucht, den nachteiligen Wirkungen des Windes auf das Klima, den Boden und die Pflanze zu begegnen. Sobald man sich mit der Frage des quantitativen Einflusses der hierbei oft gleichzeitig zusammenwirkenden Faktoren befaßt, stellen sich bei den Untersuchungen im Freiland häufig Schwierigkeiten ein.

Um Aufgaben mit einer bestimmten Zielsetzung im Rahmen der Windklimauntersuchungen durchführen zu können, ist es deshalb notwendig, auf experimentellem Wege im Windkanal idealisierte Verhältnisse zu schaffen. Dabei lassen gerade die nur im Windkanal möglichen Versuchsbedingungen die Wirkung der einzelnen, in der Natur sich oft überlagerten und deshalb von nebensächlichen Einflüssen nur schwer trennbaren Faktoren klarer erkennen.

Mit Windkanalforschungen befaßt sich die Wissenschaft im In- und Ausland schon seit vielen Jahren. Die Arbeitstechnik sowie die Größe und Form der Kanäle sind für die jeweiligen Zwecke recht verschieden. Während früher aerodynamische Fragen in Verbindung mit der Flugzeugentwicklung studiert und mit der Weiterentwicklung des Flugwesens große Kanäle mit sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten gebaut wurden, geht man jetzt auch dazu über, kleinere Kanäle für meteorologische, bodenkundliche, pflanzenbauliche und biologische Forschungszwecke zu verwenden. In den letzten Jahren wurden in USA sogar große Windlaboratorien für Sturmuntersuchungen eingerichtet, an deren Ergebnissen vor allem taifun- und hurrikangefährdete Länder interessiert sind. Unter Verwendung von 1300-PS-Flugzeugmotoren, die mit Wasserstrahler gekoppelt sind, wird versucht, die gleichen Bedingungen, wie sie in einem Hurrikan vorherrschen, zu schaffen. Der Einfluß des künstlichen Hurrikans auf Versuchshäuser, Glas-, Baumaterialien, Automobile und andere Gegenstände wird eingehend untersucht, und Architekten, Ingenieure und Baufirmen richten sich nach den Sturmtests oder berücksichtigen die Prüfungsergebnisse bei ihren Planungsarbeiten.

Wie die Untersuchungsergebnisse und die neuerdings von deutschen Forschungsstätten erzielten Erkenntnisse in Windkanälen zeigen, sind schon recht beachtliche Beiträge zur Frage der Strömungstechnik an Modellen und insbesondere zum Thema Nachlauf- und Grenzschichtproblem geliefert worden. Im Falle des Windschutzes versuchte man, meistens Objekte der Natur in Modellform nachzubilden. Wir haben weder Baum- noch Strauchmodelle als Windschutzobjekte benutzt, sondern künstliche Windschirme verschiedener Art und Form zur Untersuchung herangezogen. Sie finden in der Praxis immer mehr Anwendung, sei es im Feldgemüsebau und beim Anbau von Sonderkulturen sowie als Erosions- oder Schneeschutz. Wir bauten verkleinerte Modelle zunächst von künstlichen Windschirmen, wie sie in der Praxis verwendet werden, und versuchten alsdann, durch Abänderungen und Ergänzungen, an ihnen den Strömungsverlauf derart abzuwandeln, daß die Schirme mehreren Zwecken dienen können.

Die Untersuchungen wurden durch eine Sachbeihilfe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn, gefördert, wofür an dieser Stelle

besonders gedankt sei. Durch eine Zuwendung von seiten der Industrie war es möglich, einen für solche Untersuchungen notwendigen Windkanal zu bauen.

## 2. Problemstellung

Die vorliegende Arbeit soll nicht allein die strömungstechnischen Eigenschaften verschiedener künstlicher Windschirme klären und zur Frage der praktischen Bedeutung für den Schutz des Bodens und der Pflanze gegen die schädlichen Wirkungen des Windes Stellung nehmen, sondern auch Probleme, die sich bei Windkanaluntersuchungen einstellen, anschnitten.

Die bei Strömungsmessungen im Freien stets auftretenden Schwankungen des Windes führen oftmals zu nur schwer nachprüfbar und unsystematischen Ergebnissen, die für exakte Vergleiche der charakteristischen Strömungseigenschaften von verschiedenen Hindernisformen ungeeignet sind. Wie eigene Versuche im Windkanal und im Freien bestätigten, ergaben schon geringe Richtungsänderungen des Windes ( $\geq 10^\circ$ ) eine Verschiebung des Staupunktes sowie der Ablösungsstellen und damit oft eine weitgehende Veränderung der Strömungsrichtung und -geschwindigkeit, was bei gleichbleibenden Strömungsverhältnissen im Windkanal nicht der Fall ist.

Für die Übertragung der Strömungsverhältnisse des Modellversuchs auf den Großversuch legte man bisher das Hauptaugenmerk auf das Ähnlichkeitsgesetz. Dieses Gesetz besagt, daß die Strömungsbilder zweier geometrisch ähnlicher Körper einander ähnlich sind, wenn für sie eine dimensionslose Zahl, die den Strömungszustand wiedergibt, gleich ist. Diese Zahl nennt man die Reynold'sche Zahl mit der Schreibweise:

$$Re = \frac{u \cdot h}{\nu} = \frac{\rho u h}{\mu} \quad [1]$$

( $u$  = Strömungsgeschwindigkeit im  $\infty$ ,  $h$  = Hauptabmessung bzw. charakteristische Länge des Hindernisses,  $\mu$  = Zähigkeit des strömenden Mediums,  $\frac{\mu}{\rho} = \nu$  kinematische Zähigkeit des strömenden Mediums)

Betrachtet man nun das Hindernis, in unserem Falle einen künstlichen Windschirm, nur als relativ scharfkantige Fläche, so wird als charakteristische Länge des Hindernisses seine Höhe  $h$  und die Strömungsgeschwindigkeit  $u$  in  $Re$  eingehen. Der Modellversuch wird demnach nur dann eine wirklichkeitsgetreue Nachbildung des Großversuchs gestatten, wenn das Produkt  $u \cdot h$  für beide Fälle den gleichen Betrag hat.

Bei undurchlässigen Modellen von gleicher Oberflächenrauigkeit hat man unter Beachtung des obigen Gesetzes die Freiheit, Modellgröße und Strömungsgeschwindigkeit zu verändern, wenn nur dafür gesorgt wird, daß  $Re$  konstant bleibt. Unter dieser Bedingung ändern sich dann die Trägheits- und Reibungskräfte im gleichen Verhältnis. Die geringfügigen Veränderungen der kinematischen Zähigkeit  $\nu$  durch Schwankungen der Lufttemperatur dürfen hierbei außer acht gelassen werden.

|    |       |       |      |        |               |
|----|-------|-------|------|--------|---------------|
| (t | 0     | 20    | 40   | C°)    |               |
| (ν | 0,133 | 0,149 | 0,17 | cm²/s) | für 760 mm Hg |

Nach bisherigen, von verschiedenen Autoren unter Beachtung des Modellgesetzes bei Versuchen im Windkanal durchgeführten Messungen des Geschwindigkeitsprofils lag die Reichweite der Schutzwirkung (80%)

der Windgeschwindigkeit ohne Hindernis) höher als in der freien Natur. Auf Grund eines Vergleiches der von Blenk (1) im Windkanal erhaltenen Versuchsergebnisse mit denen von Nägeli (2) und Nøkkentvæn (3) im Freien angestellten Messungen leitete man eine vorläufige Faustregel ab. Nach ihr sind, um eine Übertragung der Modellversuchsergebnisse auf die freie Natur zu ermöglichen, die im Windkanal erhaltenen Reichweiten der Schutzwirkung mit dem Faktor 0,5 zu multiplizieren.

Der Verlauf des Geschwindigkeitsprofils hinter einem Hindernis wird durch die Nachlauf- und Grenzschichtströmung entscheidend beeinflusst. Sie wiederum wird von mehreren Faktoren, wie z. B. der geometrischen Durchlässigkeit, der absoluten Größe der durchblasenen Öffnung und der Oberflächenrauigkeit bestimmt.

Ist die Re-Zahl im Modell- und Großversuch die gleiche, dann müßte bei einer Modellhöhe von 30 mm die Windgeschwindigkeit 40 m/sec sein, um übertragbare Verhältnisse zu erhalten. Die Durchführung solcher Messungen ist zwar im Prinzip möglich. Jedoch kann bei dieser verhältnismäßig kleinen Modellgröße schon der Meßkörper des Stauohres den Strömungsverlauf störend beeinflussen. Insbesondere werden die durch die Oberflächenrauigkeit und die absolute Größe der durchblasenen Öffnungen auftretenden spezifischen Strömungseigenschaften der verschiedenen Windschirme wegen der Modellgröße und der hohen Geschwindigkeit im Staupprofil nicht mehr zum Ausdruck kommen. Ferner ist zu bedenken, daß sich der Einfluß vorstehend angeführter Faktoren sowie die Übertragung der Modellversuchsergebnisse auf die Wirklichkeit nicht mehr mit dem Reynold'schen Modellgesetz erfassen lassen. Auch erscheint es nicht sinnvoll, den Strömungsverlauf in direkte Beziehungen zur geometrischen Durchlässigkeit (offene Fläche : Gesamtfläche) des Hindernisses zu bringen, wie dies vielfach in der Literatur geschieht. Zwei verschiedene Hindernisse können wohl die gleiche geometrische Durchlässigkeit haben, jedoch in ihrem Strömungsbild stark voneinander abweichen. Aber gerade die Art der Anordnung und die absolute Größe der durchblasenen Öffnungen des Hindernisses sowie die Oberflächenrauigkeit bewirken die Entstehung der Ablösung und Wirbelbildung aus der dem Hindernis und dem Boden anliegenden Grenzschichtströmung.

Diese durch die Reibung der Strömung an den Grenzflächen hervorgerufenen Turbulenzvorgänge können nicht mehr mit der in Gleichung [1] dargestellten Form des Re-Ähnlichkeitsgesetzes erfaßt werden. Wie Windkanalmessungen von Blenk (4) und Paeschke (5) im Freiland gezeigt haben, spielen hierbei die molekularen Reibungskräfte eine untergeordnete Rolle, d. h. der nur für die thermische Turbulenz gültige Koeffizient der inneren Reibung muß in diesem Falle durch den Austauschkoefizienten

$$A = A_0 \varrho u l \quad [2]$$

ersetzt werden.

Nach Gleichung [1] und [2] erhält man für Re:

$$Re = \frac{\varrho u \cdot h}{A_0 \varrho u \cdot l} = \frac{1}{A_0} \cdot \frac{h}{l}$$

A und  $A_0$  sind Funktionswerte der Bodenrauigkeit,  $\varrho$  bedeutet die Dichte und u die Geschwindigkeit des strömenden Mediums, l = Abstand der oberen Hinderniskante von der Grenzfläche.

Setzt man den Abstand l von der Grenzfläche gleich der charakteristischen Höhe h des Hindernisses, so erhält man für Re:

$$Re = \frac{1}{A_0} = \text{const.} \quad [3]$$

In der vorstehenden Darstellung ist die Re-Zahl unabhängig von der Windgeschwindigkeit sowie der Hindernishöhe. Sie ist nur noch eine Funktion des Austauschbeiwertes  $A_0$  bzw. der Bodenrauigkeit. Für die Übertragung der Strömungsverhältnisse vom Modell auf das Freiland besagt Gleichung [3], daß die Strömungsverhältnisse an Hindernissen im Modellversuch und im Freiland nur dann mechanisch ähnlich sind, wenn die Austauschbeiwerte  $A_0$  gleich groß sind.

Hiervon hängen auch die Strömungsform und das Geschwindigkeitsprofil im Leebereich des Hindernisses ab. Es wurde deshalb zunächst bewußt davon abgesehen, für die verschiedenen Modellarten die Reichweite ihrer Schutzwirkung im Windkanal zu bestimmen, bevor es noch nicht möglich ist, quantitative Aussagen über die Größe des Einflusses dieser vorstehend genannten Faktoren auf das Modellgesetz zu machen. Hierüber liegen bisher noch keine Messungen vor.

Unsere Untersuchungen beschäftigen sich daher besonders mit der Frage, welche Arten künstlicher Windschirme (Form und Material) durch die Veränderung des Windfeldes den für den jeweiligen Verwendungszweck günstigsten Effekt ergeben. Als Modellschirme wurden verschiedene Ausführungen aus Blechstreifen, Holzplatten, Draht- und Fasergewebe benutzt.

### 3. Messung des Stauprofiles an künstlichen Windschirmen

#### 3.1. Untersuchung des Einflusses der Oberflächenrauigkeit und der absoluten Größe der durchblasenen Öffnungen auf das Stauprofil der Hindernisse

Die Arbeiten wurden in einem im Turmaufbau unseres Dienstgebäudes auf der Liebigshöhe in Gießen untergebrachten Windkanal durchgeführt. Die Seitenwände des Turmaufbaues sind alle verglast, so daß gute Lichtverhältnisse für die Windkanaluntersuchungen bestehen. Für spezielle photographische Aufnahmen wurden Wände und Boden der Versuchsstrecke des Windkanales matt geschwärzt und mit einer Nitraphotolampe beleuchtet. Aus der Schnittzeichnung des Windkanales lassen sich die Maße und technischen Angaben entnehmen. Der Elektromotor treibt eine Luftschraube an, welche die Luft durch die trichterförmige Öffnung in den Strömungskanal ansaugt. Unmittelbar hinter dem Ansaugtrichter wird durch ein System von parallelen Düsen der Luftstrom gleichgerichtet. Die bei der Ablösung an den Kanten der Düsen noch auftretenden kleinsten turbulenten Verwirbelungen werden durch das hinter den Düsen angebrachte Sieb unterdrückt. Die Windgeschwindigkeit kann durch den Einbau von Sieben und Blenden von 1 m/sec bis 20 m/sec eingestellt werden. Um den Strömungsverlauf des Bodenwindes im Windkanal den Freilandbedingungen annähernd anpassen zu können, wurde auf die Kanalsohle eine Sandschicht von 0,7 mm Korndurchmesser aufgetragen. Durch die Sandrauigkeit des Kanalbodens entsteht die turbulente Grenzschichtströmung. Sie ermöglicht erst die im Modellmaßstab annähernde Angleichung der Strömung bzw. des Austauschbeiwertes im Windkanal an die Verhältnisse in der Natur.

Die Kanalwand liegt halbkreisförmig über dem Kanalboden, weil in diesem Falle die Strömungsverhältnisse am wenigsten gestört werden. Ist der Kanalquerschnitt dreieckig oder rechteckig, dann bilden sich nach Untersuchungen von J. Nikuradse in den Ecken verhältnismäßig sehr hohe Geschwindigkeiten aus. In allen Kanälen mit nicht kreisförmigem Querschnitt bilden sich Sekundärbewegungen derart aus, daß die Strömung längs der Winkelhalbierenden in die Ecken hinein- und zu beiden Seiten davon aus der Ecke herausführt. Durch die Sekundärströmung wird dauernd Im-

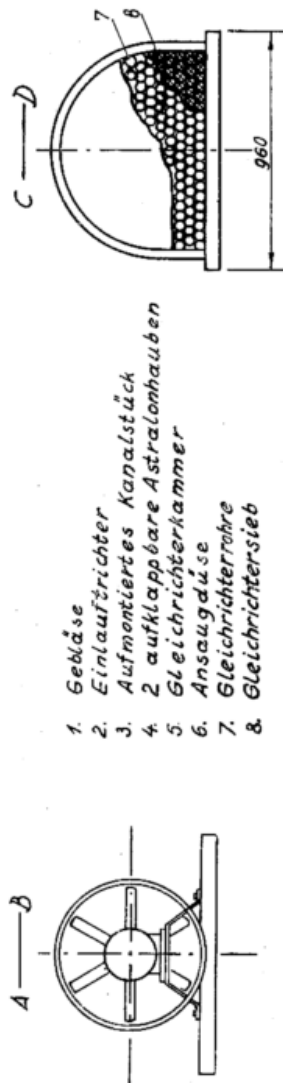
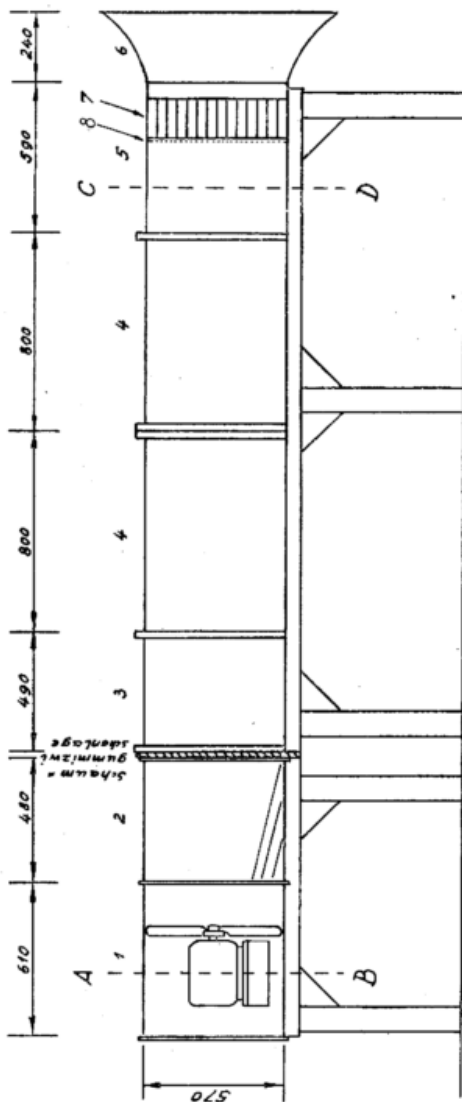


Abb. 1  
Skizze des Windkanals

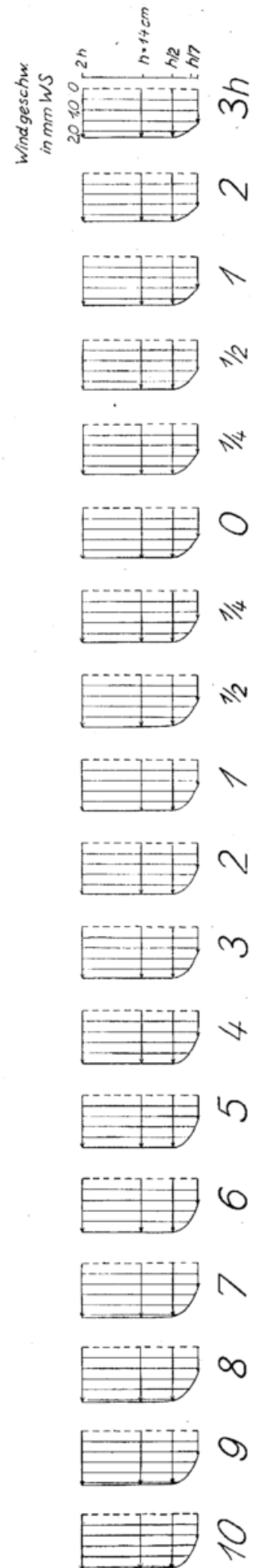


Abb. 2  
Geschwindigkeitsprofil ohne Hindernis

puls aus der Mitte in die Ecken hineingetragen, wodurch es dort zu großen Geschwindigkeiten kommt, H. Schlichting (6).

Die Modelle standen senkrecht zur Strömungsrichtung in der Mitte der Versuchsstrecke des Windkanals. Bei der Modellhöhe von 14 cm und der Breite von 22 cm betrug der seitliche Abstand zwischen Modell und Kanalwand 15 cm, so daß die Kanalwand das Umströmen des Hindernisses nicht beeinflussen konnte.

Die auf der Abszisse und Ordinate der folgenden Stauprofile angegebenen Werte bedeuten den jeweiligen Abstand der Meßstellen vom Hindernis und vom Boden, ausgedrückt in Einheiten der Hindernishöhe  $h$ . Die Geschwindigkeiten wurden mit einem Prandtl-Staurohr von 3 mm Durchmesser und einem Fuess-Mikromanometer gemessen. Die Meßwerte sind in dem Stauprofil in mm WS (Wassersäule) angegeben.

Bei der Eichung des Windkanals führte man verschiedene Profilmessungen durch. Die aufgezeigte Meßreihe veranschaulicht den Strömungsverlauf über hindernisfreiem Boden. Die Bodenoberfläche des Kanals bestand aus einer aufgeklebten Sandschicht. Die Meßpunkte dieses Profils beziehen sich bereits auf die Entfernungen der späteren Meßpunkte nach Aufstellung des Windschirms, d. h. also 0 = Standort des Hindernisses, links davon Lee- und rechts Luvseite (Abb. 2).

Durch den Einfluß der Bodenrauigkeit erfolgt mit wachsender Höhe der Grenzschicht eine allmähliche Abnahme des Bodenwindes in Strömungsrichtung. Die Windgeschwindigkeit geht am Boden von 1,6 auf 1,2 mm WS zurück. Die Grenzschicht der ungestörten Bodenströmung erreicht in Kanalmitte etwa 5 cm Höhe. Ab halber Hindernishöhe verändert sich das Geschwindigkeitsprofil nach oben praktisch nicht mehr.

Die in Abb. 3 dargestellten Stauprofile A—F zeigen nun den Einfluß der Oberflächenrauigkeit und Maschenweite an zwei verschiedenen Modellen künstlicher Windschirme. Die Windschirme waren um  $\frac{1}{2}$  ihrer Gesamthöhe vom Boden abgesetzt, d. h. der untere Hindernisrand stand 2 cm über dem Boden. Als Material wurde Draht und Baumwollfaser verwendet. Der Vergleich der Stauprofile zwischen Faser- und Drahtmodell lehrt, daß bei gleicher geometrischer Durchlässigkeit (gleiche Maschenweite und gleicher Durchmesser des Geflechtes) die Windgeschwindigkeit durch die Oberflächenrauigkeit stark herabgesetzt wird. Diese im Leebereich besonders ausgeprägt in Erscheinung tretenden spezifischen Strömungseigenschaften haben ihre Ursache in der für die Oberflächenbeschaffenheit des jeweiligen Hindernisses charakteristischen Grenzschichtströmung. Sie beeinflusst in ihrem weiteren Verlauf die Strömungsform und damit das Geschwindigkeitsprofil entscheidend. Im einzelnen ist aus der Darstellung zu ersehen, daß bei der Maschenweite 1,5 mm im Luv innerhalb des Staubereiches die Geschwindigkeit des Bodenwindes am Drahtschirm etwa um das Vierfache größer ist als am Faserschirm. Im Maschenbereich (0) wird durch Enge und Rauigkeit die Geschwindigkeit bis zur Hindernishöhe gesteigert. Beim Draht nimmt sie etwas weniger zu als bei der Faser. Wahrscheinlich war bei dieser Maschenweite die absolute Rauigkeit der Faser im Vergleich zur Größe der durchblasenen Öffnungen für die vorübergehende Geschwindigkeitssteigerung von Einfluß. In der Leezone hingegen macht sich sofort wieder die größere Zunahme der Geschwindigkeit hinter dem Drahtschirm gegenüber der Faser bemerkbar.

Die Maschenweite 2,5 mm zeigt im Luv gegenüber der Maschenweite 1,5 mm keine wesentliche Veränderung. Im Maschenbereich (0) gleichen sich die Kurven an. Leewärts ist wiederum die Geschwindigkeit bei

Draht größer als bei der Faser. Dieser Unterschied tritt im Gegensatz zum oberen Stauprofil in der weiteren Leezone jedoch deutlicher in Erscheinung.

Schließlich ergibt sich bei der Maschenweite 6 mm, daß im Luv und im Maschenbereich (0) die Verhältnisse etwa ähnlich sind wie vorher. Auch im Lee ist der Verlauf ungefähr derselbe wie bei der Maschenweite 2,5 mm, jedoch durch die im Vergleich zur absoluten Rauigkeit zunehmenden Maschenweite abgeschwächt.

Faßt man die Meßergebnisse im Leebereich der beiden Windschirme zusammen und stellt Vergleiche zwischen den verschiedenen Maschenweiten an, dann treten deutliche Unterschiede auf.

Tab. 1  
Schutzwirkung im Lee von Draht- und Faserschirmen

| Hindernisart  | Maschenweite<br>in mm | Summe des Staudruckes in mm WS<br>bis zum 10fachen leeseitigen Abstand<br>der Hindernishöhe $h$ in den<br>Bodenhöhen: |       |     |
|---------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----|
|               |                       | $h/7$                                                                                                                 | $h/2$ | $h$ |
| Draht         | 1,5                   | 138                                                                                                                   | 186   | 259 |
| Baumwollfaser | 2,5                   | 153                                                                                                                   | 59    | 108 |
| W in %        |                       | —                                                                                                                     | 68    | 59  |
| Draht         | 2,5                   | 150                                                                                                                   | 223   | 288 |
| Baumwollfaser | 6,0                   | 169                                                                                                                   | 185   | 243 |
| W in %        |                       | —                                                                                                                     | 17    | 15  |

In der Tabelle bedeutet W den für das jeweilige Vergleichspaar in Prozent angegebenen günstigeren Wirkungsgrad des Fasermodells gegenüber dem Drahtmodell. Wie insbesondere aus den beiden letzten Zeilen (2,5 und 6,0 mm) hervorgeht, ist selbst bei einer doppelt so großen Durchlässigkeit des Fasergewebes gegenüber dem Drahtgeflecht der Faserwindschirm in seiner Schutzwirkung dem Drahtgeflecht überlegen (um 17% bei  $h/2$  und 15% bei  $h$ ). Diese Strömungseigenschaften dürften in ihren quantitativen Ergebnissen als zuverlässig gelten und werden auch in der Natur ihre Gültigkeit behalten, da mit einer Vergrößerung der Hindernishöhe  $h$  bis zu einem gewissen Grade auch eine Vergrößerung der Reichweiten dieser Strömungseigenschaften verbunden ist.

Nach der Untersuchung des Einflusses der Maschenweite und Rauigkeit auf den Strömungsverlauf wurden im folgenden künstliche Schirme, wie sie in der Praxis Verwendung finden, herangezogen. Wir benutzten die schon mehrere Jahre bekannten Holzhürden und die in letzter Zeit im Handel erschienene Rico-Metallhürde der Firma Rieger & Co., München, und den Kokosfaserzaun der Firma Kayser, Hannover. Die Modelle der Ricohürde und der versetzten Holzhürde entsprachen im verkleinerten Maßstab 1:10 ihrer natürlichen Größe. Die absolute Größe der durchblasenen Öffnungen nimmt bei diesen Windschirmmodellen in natürlicher Größe noch um das Zehnfache zu. Material und Maschenweite des Kokosfasermodells entsprachen dem wirklichen Windschirm.

Der luvseitige Strömungsverlauf wird vor dem Hindernis zunächst nicht wesentlich beeinflusst. Am Hindernis nimmt der Bodenwind etwas zu und er behält diese Geschwindigkeit nach dem Verlassen des Hindernisses im Lee bis  $h/2$  bei. In Hindernishöhe geht aber die Geschwindigkeit stark zurück und in doppelter Hindernishöhe wird sie nicht mehr beeinflusst. Das Windminimum in Bodennähe wird im 3- bis 5fachen leeseitigen Abstand erreicht. Als dann wächst die Geschwindigkeit ganz langsam an.

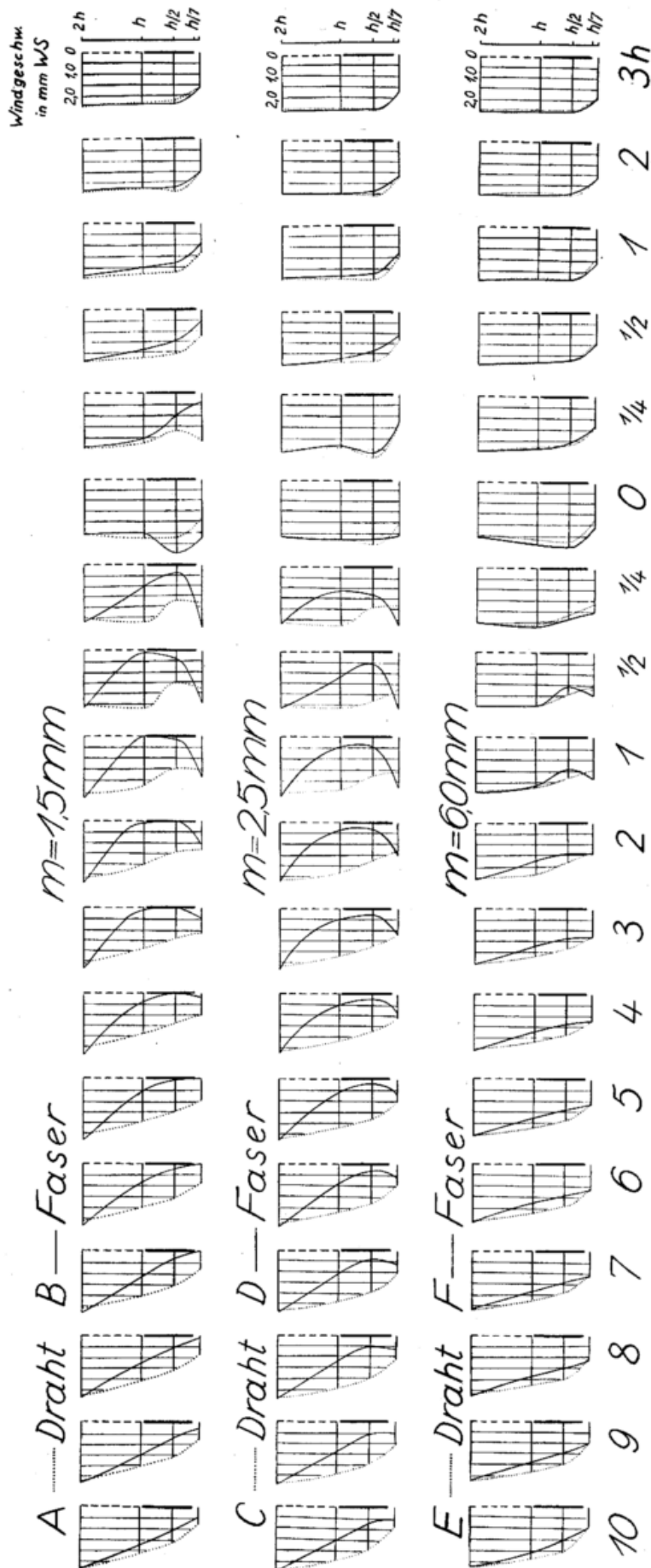


Abb. 3  
Strömungsverlauf am Draht- und Baumwollfaserwindschirm

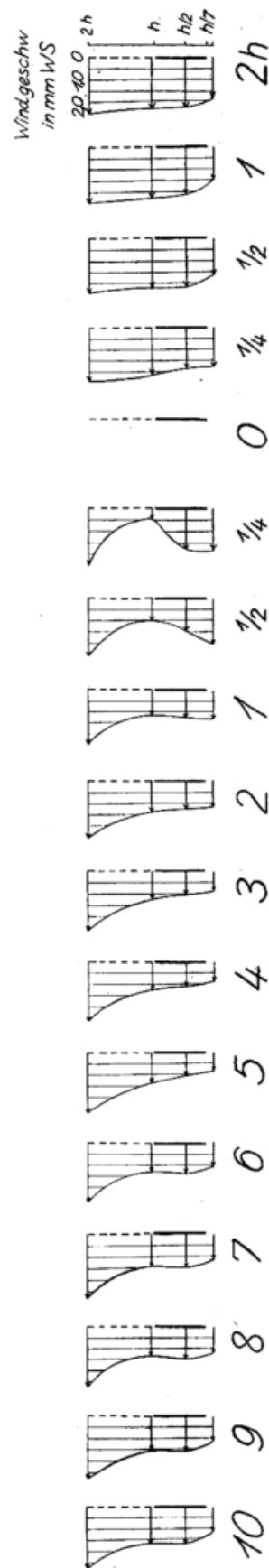
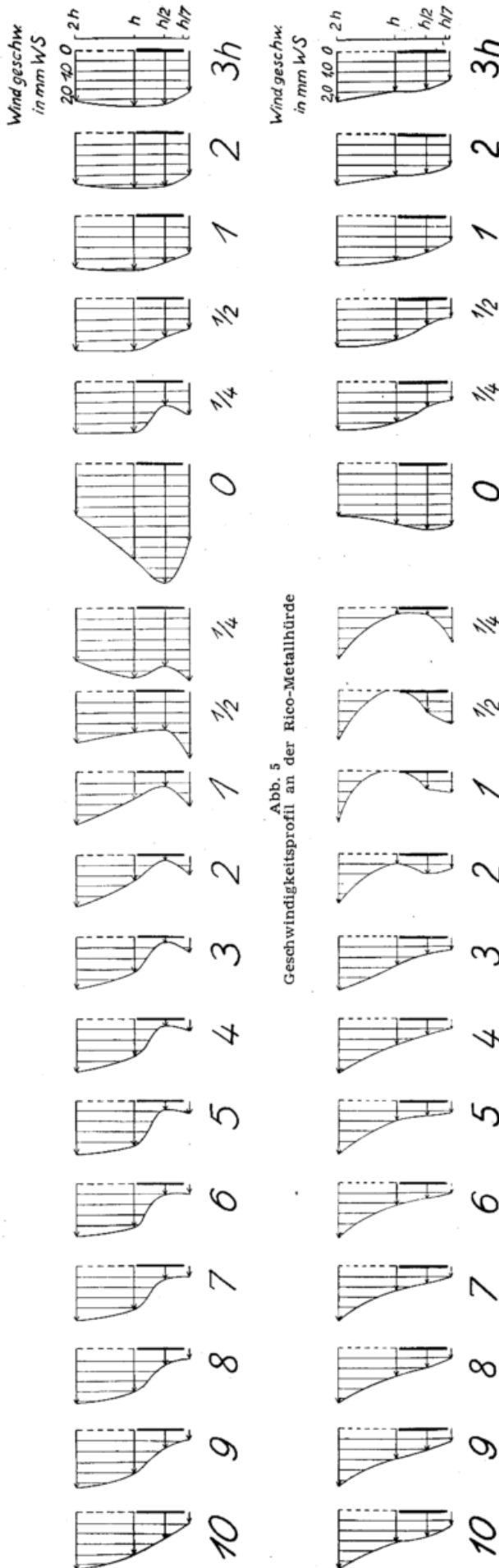


Abb. 4  
Geschwindigkeitsprofil an der versetzten Holzhürde



An der Luvseite der Metallhürde wird die Geschwindigkeit in Bodennähe schon früher verlangsamt, etwa bei  $h$ . Zwischen den Metallstreifen der Hürde (0) erreicht die Geschwindigkeit das Maximum des gesamten Meßbereiches, und zwar in  $h/2$  über dem Boden. Gegenüber der luvseitigen Ausgangsgeschwindigkeit von 6,3 m/sec steigt sie auf 9,7 m/sec an. Auf die mechanische Beanspruchung des Materials durch die Geschwindigkeitszunahme wird später noch eingegangen. Unmittelbar im Lee ( $h/4$ ) wird die Geschwindigkeit zwar geschwächt, aber sie ist immer noch höher als der Ausgangswert im Luv. Während vorher das Maximum der Windgeschwindigkeit bei  $1/2 h$  lag, tritt es jetzt im Bereich von  $1/7 h$  und  $h$  auf, als Folgeerscheinung turbulenter Vorgänge. Im weiteren Verlauf wird die Geschwindigkeit schwächer und sie erreicht ihr Minimum in  $1/2 h$  bei dem dreifachen Abstand der Hindernishöhe und in Bodennähe bei dem 7fachen Abstand. In doppelter Hindernishöhe ändert sich im gesamten Bereich die Geschwindigkeit kaum.

Die Ablösung der Strömung an den Kanten der Blechstreifen und Holzlatten erhöht im Leebereich die Strömungsgeschwindigkeit und Turbulenz. Bekanntlich können jedoch Messungen mit einem Prandtl-Staurohr in der turbulenten Vermischungszone einen Unterdruck bis 15 v. H. des Staudruckes ergeben, so daß die wahren Geschwindigkeiten im unmittelbaren Leebereich noch etwas höher sein dürften. Wie später gezeigt wird, haben die Turbulenzvorgänge an diesen Windschirmmodellen in ihrem Wirkungsbereich einen entscheidenden Einfluß auf die Erosion des Bodens und die Ablagerung des Schnees.

Vor dem Hindernis ist die Abnahme der Geschwindigkeit in Bodennähe größer als bei der Rico-Metallhürde. Das Hindernis (0) wird in der Vertikalen — im Gegensatz zu den beiden anderen Hürden — fast gleichmäßig durchblasen. Der Vergleich zeigt ferner, daß unmittelbar hinter dem Hindernis des Kokosfaserzaunes in beiden Richtungen eine starke und gleichmäßige Abnahme der Windgeschwindigkeit einsetzt, was bei den anderen nicht zu beobachten ist. Besonders auffallend ist aber die starke Windschwächung in Hindernishöhe. Hier haben wir praktisch Windstille. Das Windminimum in  $1/2 h$  und in Bodennähe liegt zwischen der 3- bis 4fachen Hindernishöhe. Die Messungen in doppelter Hindernishöhe zeigen keine Veränderung der Windgeschwindigkeit gegenüber der ungestörten Strömung.

Wie aus vorliegenden Vergleichsmessungen hervorgeht, werden die Strömungseigenschaften von dem Kokosfaserwindschirm mit der Maschenweite 25 mm am besten erfüllt. Der durch die Siebwirkung und Oberflächenrauigkeit des Fasergeflechtes auftretende Energieverlust verursacht im Leebereich eine Verbreiterung der Strömung und dadurch die Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit, die sich in ihrem weiteren Verlauf bis  $10 h$  nur ganz langsam und gleichmäßig wieder beschleunigt. Im Gegensatz zu den in der Praxis vielfach verwendeten Windschirmen aus Blechstreifen (Ricohürde) und Holzlatten (versetzte Holzhürde) treten an dem Kokosfaserhindernis keine Ablösungsvorgänge ein, die im Leebereich zu stärkerer Turbulenz führen können.

Die Meßergebnisse aus der Leezone der drei Hindernisarten sind in Tab. 2 zusammengefaßt. Sie wurden, ähnlich wie dies in Tab. 1 mit der Baumwollfaser geschah, diesmal mit der Kokosfaser verglichen. Tab. 2 unten schließt noch mit einer vergleichenden Betrachtung des Drahtschirmes, der in der ersten Meßreihe untersucht wurde. W gibt den günstigeren Wirkungsgrad des Kokosfaserschirmes in Prozent gegenüber den anderen Arten von Hindernissen an.

Tab. 2

**Schutzwirkung im Lee von Metall-, Kokosfaser- und Holzlattenschirmen**

| Hindernisart                      | Maschenweite | Summe des Staudruckes in mm WS bis zum 10fachen leeseitigen Abstand der Hindernishöhe h in den Bodenhöhen: |     |     |
|-----------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|
|                                   |              | h/7                                                                                                        | h/2 | h   |
| Metallstreifen                    |              | 142                                                                                                        | 111 | 244 |
| Kokosfaser                        | 25           | 99                                                                                                         | 104 | 97  |
| W in %                            |              | 30                                                                                                         | —   | 60  |
| Holzplatten (versetzte Holzhürde) |              | 147                                                                                                        | 164 | 149 |
| Kokosfaser                        | 25           | 99                                                                                                         | 104 | 97  |
| W in %                            |              | 33                                                                                                         | 36  | 35  |
| Draht                             | 2,5          | 147                                                                                                        | 222 | 285 |
| Kokosfaser                        | 25           | 99                                                                                                         | 104 | 97  |
| W in %                            |              | 32                                                                                                         | 53  | 66  |

Es zeigt sich ganz deutlich, daß das Kokosfasermmodell gegenüber den anderen Modellen aus Metall und Holz, trotz des zur natürlichen Größe kleineren Maßstabes der durchblasenen Öffnungen am günstigsten ist. Die Schutzwirkung ist gegenüber der Rico-Metallhürde um 60% und gegenüber der versetzten Holzhürde um 35% besser.

In Tab. 2 unten erkennt man, daß trotz der erheblich größeren Maschenweite des Fasermmodelles (Fasermmodell 25 mm, Drahtmodell 2,5 mm Maschenweite) die Strömungsgeschwindigkeit im Leebereich in den Bodenhöhen 1/7, 1/2 und h um 30—60% niedriger als bei dem dichtmaschigen Draht ist. Diese Geschwindigkeitsunterschiede im Leebereich haben ihre Ursache in der unmittelbar hinter den relativ engen Maschen des Drahtgitters entstehenden Düsenwirkung sowie in der Geschwindigkeitserhöhung durch die starke Umströmung des Drahthindernisses. Bei der größeren Maschenweite (25 mm) ist es möglich, durch Erhöhung der Oberflächenrauigkeit des Geflechtes die Geschwindigkeit der Grenzschichtströmung in den Zwischenräumen der einzelnen Maschen zu verzögern, so daß bei einer gewissen Durchlässigkeit eine maximale Windschwächung im Leebereich des Hindernisses erreicht wird.

### 3. 2. Strömungsbilder

Ein wertvolles Hilfsmittel zur Erforschung der strömungstechnischen Eigenschaften ist die experimentelle Sichtbarmachung des Strömungsverlaufes im Windkanal. Für diesen Zweck erwies sich Titan-tetrachlorid als bestes Mittel zur Rauchentwicklung, indem man die Oberfläche des Modells damit bestreicht. Die vorbeiströmende Luft reißt im Farbton intensiv weiß erscheinende Nebelstreifen ab, deren Bewegungen sich photographisch festhalten lassen. Im Folgenden werden die charakteristischen Strömungsmerkmale an verschiedenen künstlichen Windschirmen unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Beeinflussung der Strömung durch Abänderung der Modelle aufgezeigt.

Um zunächst eine Vorstellung von der Wirkung des dichten Windschirmes zu haben, wurde eine undurchlässige mit dem Boden abschließende Strohwand senkrecht im Windkanal angeblasen. Bereits vor dem Hindernis wird die Strömung vom Boden abgehoben und teilt sich in zwei Hälften. Diese Stromverzweigungslinie läuft auf den sogenannten Staupunkt hinaus. An dieser Stelle ist die Strömungsgeschwindigkeit gleich Null. Hierdurch entsteht zwischen der Stromverzweigungsstelle und dem Hindernis die bekannte luvseitige Schutzwirkung. Die nun durch Stauwirkung vor dem

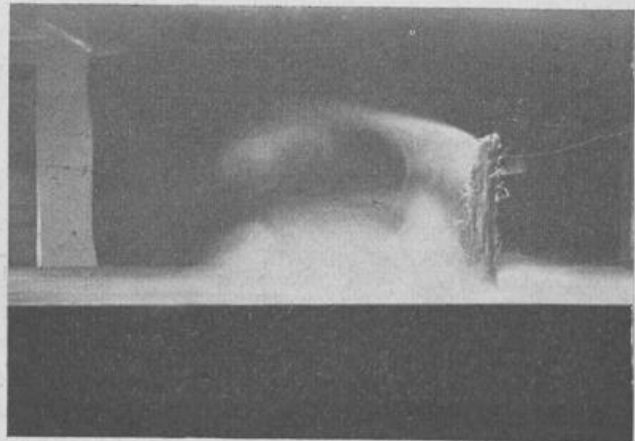


Abb. 7  
Wirbelbildung im Leebereich eines undurchlässigen Windschirmes

Hindernis zum Ansteigen gezwungene Strömung erfährt unmittelbar hinter der oberen Hinderniskante eine starke Verzögerung. Zunächst ist die Strömung wohl noch bestrebt, sich um die obere Kante zu bewegen. Jedoch kommt es durch die starke Verzögerung unmittelbar hinter dieser Kante zur Ablösung der Strömung und Bildung eines Wirbels. Im Leebereich des Hindernisses entsteht somit zwischen Strömung und ruhender Luft eine turbulente Vermischungszone, die der Bodenluft eine entgegengesetzte Sekundärbewegung vermittelt. Turbulente Vermischungszone und Rückströmung verursachen eine beträchtliche Verminderung der leeseitigen Schutzwirkung, weil der Wind schon kurz hinter dem Hindernis wieder zum Boden zurückgeführt wird, wie aus Abb. 7 zu ersehen ist. Auch die Seitenwirkung ist an einem dichten Hindernis bedeutend größer als an einem Windschirm, der vom Wind durchblasen werden kann oder sich vom Boden absetzt.

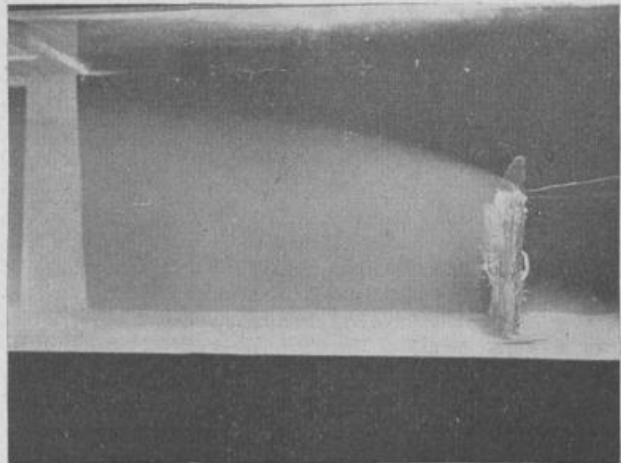


Abb. 8  
Verhinderung der Ablösung und Wirbelbildung durch einen Maschendrahtstreifen am oberen Rand des undurchlässigen Hindernisses

In Abb. 8 ist der Strömungsverlauf hinter dem gleichen Windschirm dargestellt, jedoch wurde zur Vermeidung der Ablösung an der oberen Hinderniskante ein 4 cm breiter Maschendrahtstreifen von 2,5 mm Maschenweite angebracht. Durch die Maschen des Drahtgitters wird jetzt die Strömung in relativ dünne Einzelstrahlen zerlegt. Man kann durch entsprechende Maschenweite für das jeweilige Hindernis einen stetigen Übergang in der Verzögerung der einzelnen Luftstrahlen von der scharfen Hinderniskante zur Außenluft erreichen, so daß die Gesamtströmung durch die turbu-

lente Vermischung mit der Außenluft nicht mehr gebremst wird. Durch die Beseitigung der Ablösung und Turbulenz wird in diesem Falle bei maximal möglicher Abschwächung der Windgeschwindigkeit gleichzeitig die leeseitige Schutzwirkung erhöht.

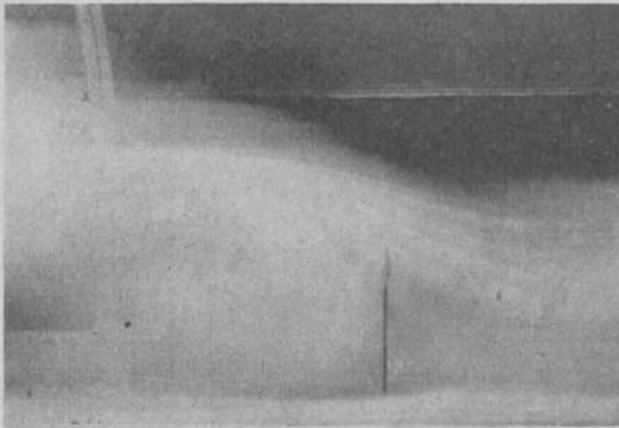


Abb. 9  
Strömungsverlauf am Windschirm aus Baumwollfasergeflecht mit der Maschenweite 2,5 mm

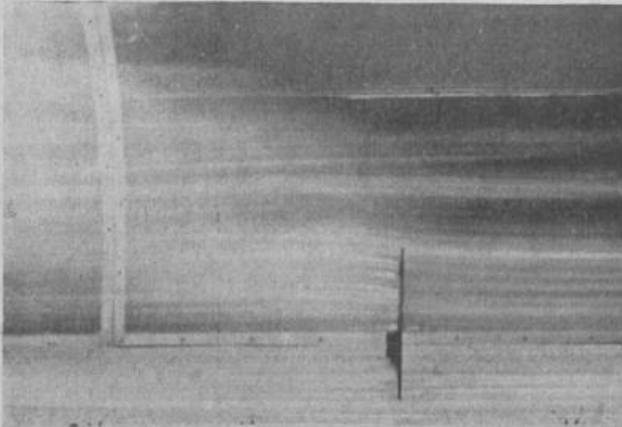


Abb. 10  
Strömungsverlauf am Windschirm aus Drahtgeflecht mit 2,5 mm Maschenweite

Die Abb. 9 und 10 zeigen den Strömungsverlauf zu den im vorhergehenden Abschnitt in Abb. 3, C und D, dargestellten Stauprofilen der Windschirmmodelle aus Draht- und Baumwollfasergeflecht. Die Strömungsgeschwindigkeit entspricht den in den jeweiligen Stauprofilen angegebenen Werten. Die beiden Strömungsbilder lassen bei gleicher Maschenweite ihres Geflechtes den Einfluß der unterschiedlichen Oberflächenrauigkeit auf den Strömungsverlauf deutlich erkennen. Die größere Oberflächenrauigkeit der Faser bremst und leitet an der Luvseite den Wind stärker auf. Im Leebereich wird bis zur zweifachen Entfernung der Modellhöhe  $h$  die Luftströmung durch zahlreiche kleine Wirbel stark geschwächt.

Im Vergleich zu Abb. 9 sieht man am Modell des Drahtgitters in Abb. 10 den ungestörten Strömungsverlauf. Durch die erhöhte Strömungsenergie der Einzelstrahlen des Drahtgitters bildet sich im Leebereich eine relativ stärkere laminare Strömung aus.

Charakteristisch für den Strömungsverlauf an der Rico-Metallhürde (Abb. 11) und der versetzten Holzhürde (Abb. 12) ist die stärkere Wirbelbildung und Beschleunigung der Strömung im Leebereich bis zum zweifachen Abstand der Hindernishöhe  $h$ . Durch die sehr rasche zeitlich und örtlich verschiedene Aufeinander-

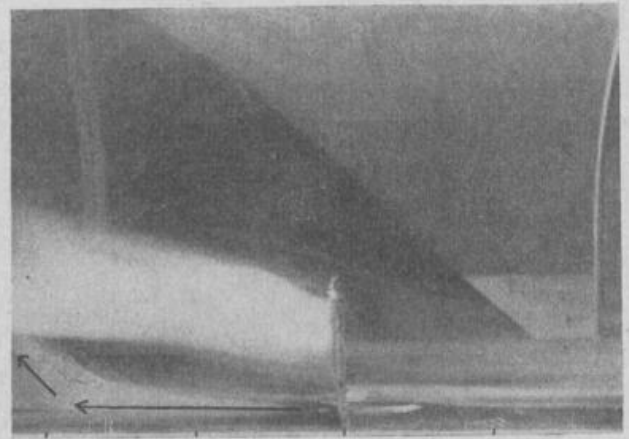


Abb. 11  
Strömungsverlauf am Windschirm der Rico-Metallhürde

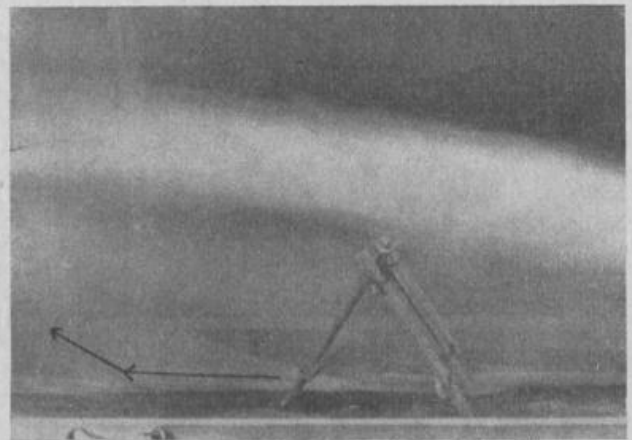


Abb. 12  
Strömungsverlauf am Modell der versetzten Holzhürde

derfolge der hinter den Ablösungsstellen an den Kanten der Blechstreifen und Holzlatten sich bildenden Wirbel kommen diese Vorgänge im einzelnen in der Photographie nicht mehr zum Ausdruck. Insbesondere treten bei der Ricohürde durch Rückwirkung dieser Strömungsvorgänge unterschiedlich starke Druckkräfte an den Blechstreifen auf, die bei höheren Windgeschwindigkeiten diese Windschirme verbiegen und umwerfen können (s. Abb. 14). Etwa im einfachen luvseitigen und zweifachen leeseitigen Abstand der Hindernishöhe  $h$  erfolgt bei beiden Hindernissen eine Ablösung der Strömung vom Boden. Der leeseitige Bodenwind zeigt unmittelbar hinter den Ablösungsstellen die sprunghafte Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit. Die Höhe der Grenzschichtströmung beträgt hinter beiden Modellen etwa  $1/6$  bis  $1/3$  ihrer Gesamthöhe und erreicht bis zur Ablösungsstelle bei der versetzten Holzhürde die doppelte Höhe gegenüber der Ricohürde. Im Gegensatz zur Ricohürde und versetzten Holzhürde treten am Modell des Kokosfaserschirms keine Ablösungsvorgänge und Rückströmungen durch Wirbelbildung auf. Vielmehr kommt es durch die Siebwirkung und Rauigkeit der Kokosfasermaschen zu Energieverlust, der im Lee durch die Verbreiterung des Strömungsquerschnittes die Geschwindigkeit schwächt.

Im Taunus wurden im Winter 1954/55 vergleichsweise Rico-Metallhürden und Kokosfaserschneezäune nebeneinander aufgestellt. In Abb. 14 ist die nach einem Sturm an beiden Windschirmen beobachtete Windwirkung der unterschiedlichen Strömungsverhältnisse zu sehen. Während die einzelnen Blechstreifen der Ricohürde verbogen und der Windschirm zum Teil umge-







tenen Ergebnisse mit entsprechenden Erosionsvorgängen in der Natur zu vergleichen, die Grundlagen und Beiträge für das Modellgesetz liefern.

Um quantitative Aussagen über die Wirkung des Windfeldes auf den angewehten und abgewehten Boden im Bereich von Windschirmen machen zu können, wurde an der Luvseite des Windschirmmodells bis zum 3-fachen und an der Leeseite bis zum 5fachen Abstand der Hindernishöhe  $h$  der Kanalboden in doppelter Breite der Hindernishöhe  $h$  mit einer 10 mm hohen Sandschicht (Korndurchmesser 0,7 mm) bedeckt. Als dann bedeckten wir eine Fläche von  $h \times 2h$  mit einer Sandschicht, deren Korndurchmesser 0,25 mm betrug. Begonnen wurde bei 3h im Luv in der Reihenfolge bis 5h im Lee. Als Vorversuch lief zuerst ein Meßgang ohne Hindernis, wobei aber die Einteilung Luv und Lee schon berücksichtigt wurde. Die Windgeschwindigkeit steigerte man solange, bis der Sand mit Korndurchmesser 0,25 mm pro Fläche maximal abgeweht wurde.

Tab. 3 enthält das Ergebnis der für die jeweils 8 Flächen im Luv- und Leebereich durchgeführten Erosionsmessungen. Die Dauer der Bewindung betrug für jeden Versuch 5 Minuten. Die Geschwindigkeit des Bodenwindes ist zur jeweiligen Fläche in der linken Spalte in mm WS angegeben. Die unterste Zahlenreihe gibt die Summe der in den einzelnen Quadranten von Luv bis Lee nach Aufhörung der Bewindung liegende Bodenmenge an. Auf der gesamten Versuchsfläche blieb in den einzelnen Ausgangsquadranten die erodierte Bodenmenge fast gleich (z. B. Luv 3h = 6,5 g, Lee 5h = 6,0 g). In den zwischen Luv und Lee befindlichen Quadranten liegt die abgelagerte Sandfracht unter 1 g. Die restlichen nicht erodierten Bodenmengen waren im Vergleich zum Ausgangsgewicht von 200 g auf allen Versuchsstrecken relativ klein. Selbst im größten Untersuchungsbereich von 3h Luv bis 5h Lee wurden auf der Gesamtstrecke nur 16,1 g festgehalten.

Tab. 4 und 5 bringen nun die Meßergebnisse vom Modell des Draht- und Faserwindschirmes mit gleicher Maschenweite 2,5 mm. Man wollte nicht nur die Materialunterschiede der Schirme und deren Einfluß auf Erosionsvorgänge untersuchen, sondern auch die Unterschiede kennenlernen, wenn an diesen Schirmen Veränderungen vorgenommen werden. Die Schirme waren normalerweise 2 cm vom Boden abgesetzt. Die Veränderung bestand darin, daß die freie Fläche zwischen Boden und unterem Hindernisrand mit einem undurchlässigen Gazestreifen bespannt wurde.

Die Meßwerte „mit Streifen“ in den Tab. beziehen sich also auf das jeweils gleiche Modell, an dem zur Aufleitung des Bodenwindes dieser undurchlässige, 2 cm breite (= 1/7 der Gesamthöhe des Hindernisses) mit dem Boden abschließende Streifen angebracht war.

Vergleicht man zunächst in Spalte 1 der Tab. 4 die Staudruckwerte, so fällt bei beiden Hindernissen auf, daß erst ab 2h im Luv am Hindernis mit Streifen der Staudruck abnimmt. Im Lee haben wir beim Drahtgeflecht bis zu 2 h Luftruhe und alsdann eine schwache Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit gegenüber dem Modell ohne Streifen. Am Fasergewebe macht sich im Lee bis 1h durch turbulente Rückströmung negativer Druck bemerkbar, und bis 3h reicht die Zone der Luftruhe. Daraufhin gewinnt der Bodenwind an Beschleunigung.

Diese Unterschiede in der Geschwindigkeit des Bodenwindes bestimmen auch entscheidend die Ablagerungsverhältnisse. So betragen z. B. die Unterschiede am Drahtgeflecht im unmittelbaren Luvbereich (1h) 7,6 g ohne Streifen gegenüber 167,0 g mit Streifen und im 5fachen leeseitigen Abstand noch 14,3 g gegenüber 115,4 g der nicht erodierten Bodenmenge. Am Fasermodell sind die Abweichungen am größten bei 1h im

Luv, 51,5 g gegenüber 171,0 g, im Lee bei 1h 65,5 g gegenüber 198,0 g.

In Verbindung mit dem Energieverlust durch die Rauigkeit des Faserwindschirmes kommt es auch im seitlichen Luv- und Leebereich zur verstärkten Ablagerung der Windfracht. Bei der ersten Meßreihe lagern im seitlichen Luv 21,0 g und im seitlichen Lee 61,7 g Sand ab (s. Tab. 5).

Im gleichen Bereich des Drahthindernisses, das im Gegensatz zur Faser stärker durchblasen wird, haben wir an der Leeseite nur eine relativ geringe Sandanwehung von 18,2 g (s. Tab. 4).

Betrachtet man zum Schluß die nicht erodierten Bodenmengen im jeweiligen Untersuchungsgebiet, die in den Restzahlen zusammengefaßt sind, so ergibt sich, daß im Bereich des Drahthindernisses (3h Luv, 5h Lee) wegen des stärkeren Bodenwindes um 30–40% mehr verfrachtet wurden als am Faserhindernis, und zwar bezogen auf den Schirm ohne Schutzstreifen. Mit Schutzstreifen wird unabhängig von der Hindernisart durch die Aufleitung des Bodenwindes die Erosion herabgesetzt und die Akkumulation erhöht.

Die Aufleitung des Bodenwindes durch den zusätzlich angebrachten undurchlässigen Streifen vermindert innerhalb des von der absoluten Höhe dieses Streifens abhängigen Bereiches und des durch die Oberflächenrauigkeit hervorgerufenen unterschiedlichen Erosionsgrades zwischen Faser- und Drahtgeflecht die Ablagerung recht beträchtlich. Analog der Beseitigung der Ablösung durch einen Drahtstreifen an der oberen Kante der undurchlässigen Strohwand, worüber im Abschnitt 3.2. berichtet und der Strömungsverlauf in Abb. 8 festgehalten wurde, verhindert in diesem Falle das über den undurchlässigen Streifen anschließende Maschengeflecht die Ablösung und Wirbelbildung des Bodenwindes im Leebereich des Windschirmes.

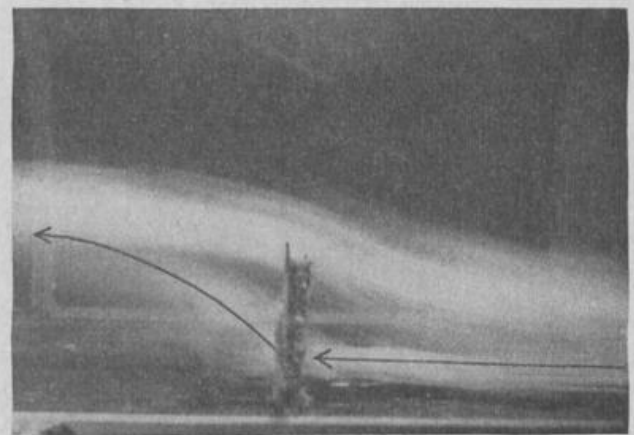


Abb. 15  
Aufleitung des Bodenwindes durch den undurchlässigen Streifen am Kokosfaserwindschirm

Im Strömungsbild (Abb. 15) kommt deutlich die Aufleitung des Bodenwindes durch den undurchlässigen Streifen am Modell des Kokosfaserwindschirmes zum Ausdruck, und in Abb. 16 wird dieser Vorgang auf den Erosionseinfluß veranschaulicht. Es kommt zu keiner Ablagerung.

In Abb. 17 ist ohne den unteren Schutzstreifen noch eine schwache Abwehung des Bodens vor dem Stauraum an der Luvseite des Hindernisses sowie im unmittelbaren Leebereich bis 1h zu erkennen.

Die in Tab. 6 zusammengefaßten Meßergebnisse geben in Ergänzung zu den vorstehenden Strömungs- und Erosionsbildern Aufschluß über die Wechselwirkung



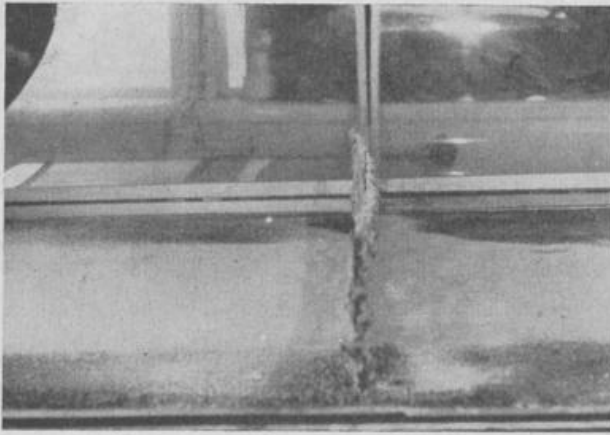


Abb. 16  
Verhinderung der Bodenerosion durch Aufleitung des Bodenwindes am Kokosfaserwindschirm

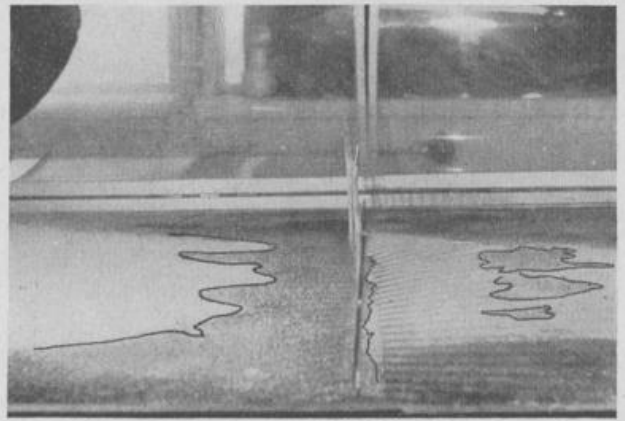


Abb. 18  
Erosionsbild an der Rico-Metallhürde, um  $1/7 h$  vom Boden abgesetzt

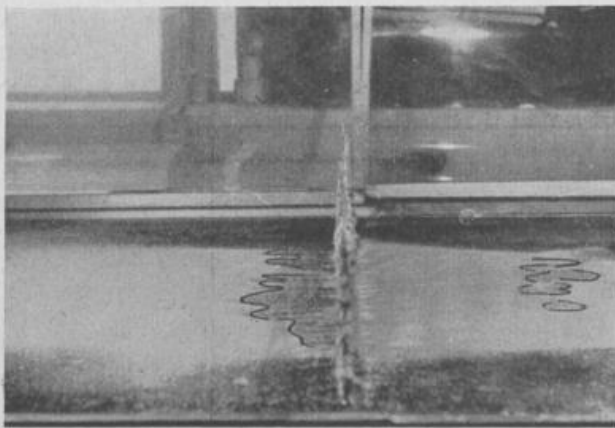


Abb. 17  
Bodenerosion am Kokosfaserwindschirm ohne Schutzstreifen, aber am Boden aufgesetzt

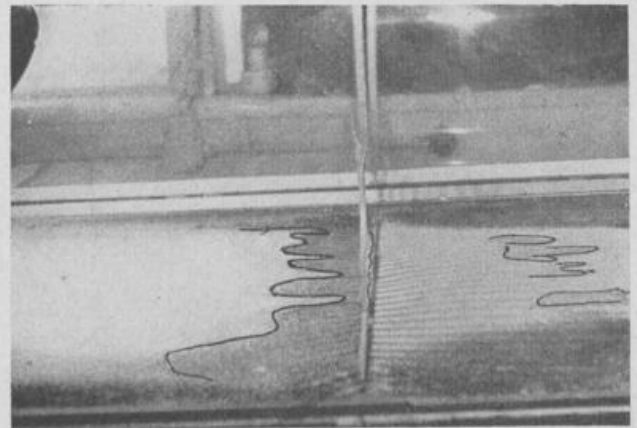


Abb. 19  
Erosionsbild an der Rico-Metallhürde, mit dem Boden abschließend

der durch die Veränderung des Windfeldes verursachten unterschiedlichen Erosionsvorgänge im Bereich des Kokosfaserwindschirmes. Charakteristisch für diesen Windschirm ist die relativ geringe Erosion trotz der um das 10fache größeren Maschenweite des Kokosfasergewebes gegenüber dem Baumwollgewebe mit nur 2,5 mm Maschenweite. Obwohl das Kokosfasergewebe eine größere Durchlässigkeit hat, haben wir im Lee bis 3h durch die Aufleitung des Bodenwindes keine Luftbewegung. Außer der Aufleitung und Schwächung des Bodenwindes im Leebereich, wird durch den unteren Schutzstreifen der luvseitige Stauraum erweitert, wodurch mehr Windfracht innerhalb und seitlich des Stauraumes angeweht wird. Im Leebereich des Kokosfaserschirmes beträgt bis zum 5fachen Abstand der Hindernishöhe  $h$  die erodierte Bodenmenge weniger als 5% gegenüber der erodierten Bodenmenge ohne Hindernis (Tab. 3). Diese Ergebnisse stehen in keinem Widerspruch zu der Transportkraft des Windes, wie sie sich aus dem jeweiligen Staudruck ergibt, bezogen auf den Korndurchmesser 0,25 mm und die Menge des erodierten Bodens.

Wie aus den folgenden Ausführungen zu ersehen ist, war die in der Praxis als Schneezaun verwendete Rico-Metallhürde und versetzte Holzhürde für den Erosionsschutz weniger geeignet.

Die Abb. 18—20 veranschaulichen die jeweiligen Erosionsvorgänge an diesen Modellen bei senkrecht zum Modell anstehendem Wind. Im Leebereich der Ricohürde und der versetzten Holzhürde ist bis zur Ablösungsstelle des mit gesteigerter Geschwindigkeit un-

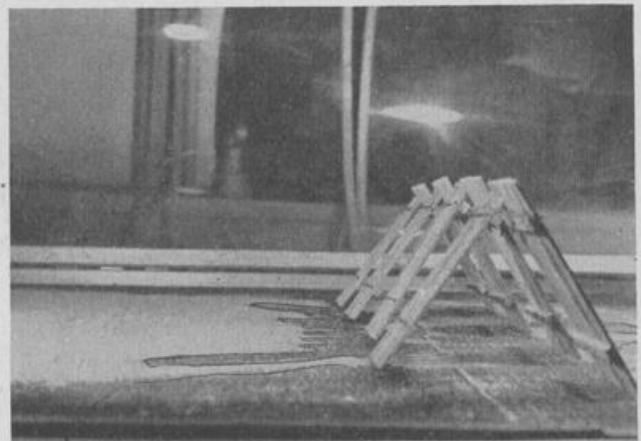


Abb. 20  
Erosionsbild an der versetzten Holzhürde

ter den Hindernissen durchblasenden Windes auch verstärkte Abwehung des Bodens verbunden. Etwas schwächer ist die Abwehung an der Ricohürde durch die Beschleunigung des Bodenwindes vor dem luvseitigen Stauraum. Wird die Ricohürde am Boden aufgesetzt, dann fällt die Unterströmung weg. Jedoch kann hierdurch die Ablösung der Strömung an den Kanten der Blechstreifen, die zur Wirbelbildung und verstärkten Erosion führt, nicht beseitigt werden (s. Abb. 19).

An der Holzhürde ist zwischen den versetzten Latten eine düsenartige Beschleunigung der Strömung

Tab. 7  
**Bodenerosion**  
**Rico-Hürde**  
a) geschlossen  
b) offen  
(aufgetragene Bodenmenge in g)

| h                             |  | Sandruck in mm WS |      |             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
|-------------------------------|--|-------------------|------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|
|                               |  | ohne Hindernis    |      | geschlossen |       | offen |       | a     |       | b     |       | a     |       | b     |       | a     |       | b     |       | a     |       | b     |  |  |  |
|                               |  |                   |      |             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
| 3                             |  | 5,4               | 4,8  | 5,1         | 200,0 | 200,0 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
| 2                             |  | 5,4               | 4,1  | 4,1         | 5     | 4,1   | 200,0 | 200,0 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
| 1                             |  | 4,9               | 1,6  | 2,0         | 13    | 10,7  | 48,6  | 20,7  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
|                               |  |                   |      |             | 15,1  | 3,5   | 34,4  | 21,5  | 200,0 | 200,0 | 185,6 | 172   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
| 1                             |  | 4,2               | 3,2  | 4,0         | 1,8   | 0,2   | 0,7   | 1,0   | 0,2   | 0,6   | 200,0 | 200,0 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
| 2                             |  | 3,9               | 0,2  | 1,4         | 2,5   | 0,4   | 1,2   | 1,2   | 0,4   | 0,6   | 21,4  | 0     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
| 3                             |  | 3,6               | 0,4  | 0,6         | 2,2   | 1,2   | 1,1   | 1,3   | 0,2   | 0,6   | 61,9  | 20,5  | 200,0 | 200,0 |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
| 4                             |  | 3,2               | 0,7  | 0,8         | 1,0   | 1,8   | 0,9   | 2,5   | 0     | 0,4   | 10,4  | 5,0   | 182,4 | 27,5  | 200,0 | 200,0 |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
| 5                             |  | 2,5               | 0,7  | 0,7         | 0,5   | 2,3   | 0,5   | 1,1   | 0     | 0     | 3,0   | 5,5   | 5,3   | 24,1  | 153,5 | 160   | 200,0 | 200,0 | 158   | 187   |       |       |  |  |  |
|                               |  |                   |      |             |       |       |       |       |       |       | 0,6   | 8,8   | 0,6   | 8,8   | 11,5  | 12,1  | 200,0 | 200,0 | 15,3  | 8,0   | 200,0 | 200,0 |  |  |  |
|                               |  |                   |      |             |       |       |       |       |       |       | 0     | 4,6   | 0     | 5,4   | 0,6   | 1,6   | 15,3  | 8,0   | 181,5 | 187,5 |       |       |  |  |  |
| seitl. Luv                    |  |                   |      |             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
| seitl. Lee                    |  |                   |      |             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
|                               |  | 39,0              |      | 8,7         |       | 2,4   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 56,3  |       |       |  |  |  |
| Rest (nicht erodierte Mengen) |  | 80,1              | 24,2 | 96,4        | 51,7  | 186,4 | 174,2 | 193,9 | 35,6  | 188,3 | 65,8  | 165,6 | 173,7 | 173,3 | 195   | 181,5 | 187,5 |       |       |       |       |       |  |  |  |

**Tab. 8**  
**Bodenerosion**  
**Versetzte Hürde**  
(aufgetragene Bodenmenge in g)

[illegible]

festzustellen, die im Lee des Hindernisses den Boden rinnenartig auskolkelt (s. Abb. 20). Die durch das Hindernis mitgerissene, sowie im Leebereich erodierte Windfracht wird teilweise zu beiden Seiten und am unteren Ende der Kolke abgelagert. Durch diesen Vorgang kommt es hinter dem Hindernis zur Bildung von walfischrückenartigen Ablagerungen der Windfracht und zur düsenartigen Verstärkung der Bodenströmung zwischen denselben, welche die Kolke leewärts stetig erweitert. Wird dieses Hindernis vom Wind schräg angeblasen, so verstärkt sich mit zunehmender Winddurchlässigkeit zwischen den durchblasenen Lücken die Erosionswirkung. Ferner wird der Leeschutzbereich durch die Verbreiterung der Kolke noch erheblich verkleinert.

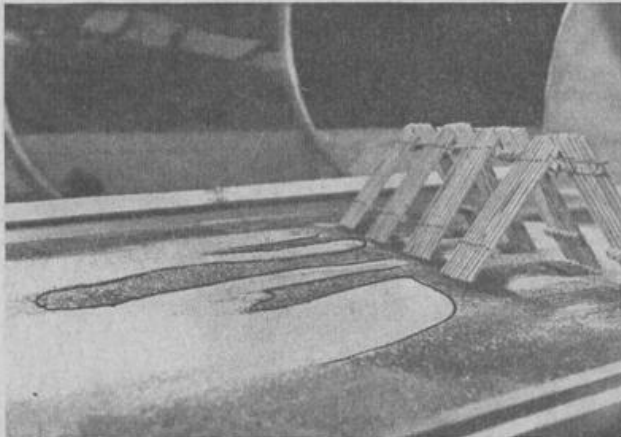


Abb. 21

Erosionsbild an der versetzten Holzhürde bei schräg zum Hindernis anstehendem Wind

Wie aus den in den Tab. 7 und 8 für die Rico-Metallhürde und versetzte Holzhürde angegebenen Gewichten der erodierten Bodenmengen hervorgeht, liegen diese im Durchschnitt bedeutend höher als bei den Kokosfaserwindschirmen. An der vom Boden abgesetzten Rico-Metallhürde vermindert die sprunghafte Abnahme des Staudruckes auf 0,6 mm WS hinter der leeseitigen Ablösungsstelle des Bodenwindes auch die Erosion und steigert die Akkumulation der Windfracht.

Tab. 9

**Erodierte Bodenmengen in Gewichtsprozenten**

| Hindernisart               | Luv 3h | Lee 5h |
|----------------------------|--------|--------|
| Kokosfaserschirm           | 12     | 3      |
| Rico-Metallhürde           | 38     | 14     |
| Holzhürde $\perp$          | 69     | 8      |
| Holzhürde $\star 30^\circ$ | 81     | 66     |

In Tab. 9 sind schließlich die in Gewichtsprozenten angegebenen verfrachteten Bodenmengen im Bereich der drei Hindernisarten zusammengefaßt, und zwar bezogen bis auf 3h im Luv und 5h im Lee. Ganz eindeutig ist zu ersehen, daß der Kokosfaserschirm, verglichen mit den beiden anderen Schirmen, mithin den besten Erosionsschutz bietet. Von Bedeutung ist außerdem, daß bei einer Änderung des Anblaswinkels um  $30^\circ$  im Luvbereich der versetzten Holzhürde die Bodenerosion um den 1,2fachen und im Lee um den 8,3fachen Betrag zunimmt.

#### 4. 2. Schneeablagerungen

Die örtliche Verteilung des vom Winde getragenen Schnees wird im Wirkungsbereich eines Windschirmes besonders stark beeinflusst. Es ist oftmals nicht einfach,

während des Schneetreibens die Wirkung der einzelnen Faktoren zur Zeit des Schneefalles und bei der Verwehung des bereits abgelagerten Schnees durch Messungen zu bestimmen. Mit eingehenden Untersuchungen über die Bildung von Schneewehen hinter verschiedenen Schneegattern haben sich bisher Nägeli (7) und Nøkkentved (8) befaßt. Im Gegensatz zu den Beobachtungen von Nøkkentved, der im Felde nur unbedeutende Luvwehen festgestellt hat, ergaben die Untersuchungen von Nägeli, daß die Schneeablagerungen vor einer dichten Wand wesentlich größer waren als vor einer lockeren. Umgekehrt war die leeseitige Schneeanhäufung hinter der lockeren Wand stärker ausgebildet als hinter der dichten. Diese von Nägeli beobachteten Ablagerungsverhältnisse haben ihre Ursache in den im ersten Abschnitt dieses Berichtes beschriebenen unterschiedlichen Strömungsverhältnissen, wie sie im Windkanalversuch an der undurchlässigen Strohwand und dem durchlässigen Geflecht festgestellt werden konnten (vgl. Abb. 7 und 8). Nach Nøkkentved haben Windgeschwindigkeiten bis zu 10–12 m/sec keinen wesentlichen Einfluß auf die Form der Schneewehen, während höhere Windgeschwindigkeiten den Schnee an der Leeseite näher an der Wand des Hindernisses ablagn. Wie aber beispielsweise am Modell der versetzten Holzhürde gezeigt wurde, können größere Richtungsschwankungen des Windes erhebliche Veränderungen in der Erosionswirkung und Akkumulationsform im Leebereich des Hindernisses verursachen.

Es würde über den Rahmen dieses Berichtes hinausgehen, auf die zahlreichen, zum Teil voneinander abweichenden, von mehreren Autoren bisher durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse der Schneeablagerungen im Bereich von Windschutzstreifen näher einzugehen. Im wesentlichen ergab sich bei allen Beobachtungen die eindeutige Abhängigkeit der Schnee-Verteilung von den durch die Form und Material bedingten spezifischen Strömungseigenschaften. Es erschien daher von besonderem Interesse, im Experiment den Einfluß dieser bisher festgestellten unterschiedlichen Strömungsvorgänge auf den Transport und die Flugbahn des Schnees sichtbar zu machen und auf diesem Wege das als Schneezäun wirksamste Hindernis zu ermitteln. Zu diesem Zweck war es notwendig, den Verlauf der Teilchenbahnen künstlichen Schnees im Strömungsbereich des Modells durch photographische Aufnahmen festzuhalten und eine Vorrichtung zu entwickeln, die im Untersuchungsfeld gleichmäßigen Schneefall ermöglicht. Als künstlicher Schnee wurde ein fertiges Fabrikat\*) benutzt, das gewichtsmäßig und in seinen strukturellen Eigenschaften dem natürlichen Schnee am nächsten kam. Der künstliche Schnee wurde aus einem geschlitzten Rohr, das über dem Hindernis angebracht war, und das durch eine besondere Vorrichtung außerhalb des Kanals gedreht werden konnte, gleichmäßig über der Untersuchungsfläche abgegeben. Um die Teilchenbahnen photographieren zu können, mußten dieselben, ähnlich der Dunkelfeldbeleuchtung, senkrecht zur Strömungsrichtung und Objektvachse des Photoapparates stark beleuchtet werden. Die Flugbahnen der einzelnen Teilchen erscheinen dann auf der Photographie hell auf dunklem Grund.

In Abb. 22 ist zunächst ohne Hindernis der geradlinige, ungestörte Verlauf der Flugbahnen zu ersehen. Die Strömungsrichtung verläuft hier sowie in den folgenden Aufnahmen von rechts nach links.

Mit Ausnahme der versetzten Holzhürde waren sämtliche Hindernisse um  $\frac{1}{2}$  ihrer Gesamthöhe h vom Boden abgesetzt. Der zwischen Hindernis und Boden frei bleibende Raum verhindert, daß sich die Schnee-

\*) Dekorationsschnee der Firma Interessengemeinschaft Sprühtechnik — Rheinfelden/Baden.

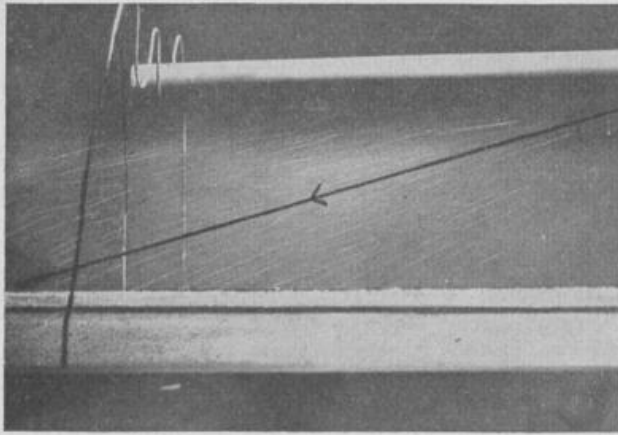


Abb. 22  
Flugbahnen künstlichen Schnees ohne Hindernis

massen nicht zu dicht an den Zaun im Lee ablagern können und damit einen unerwünschten Schneedruck auf das Hindernis ausüben.

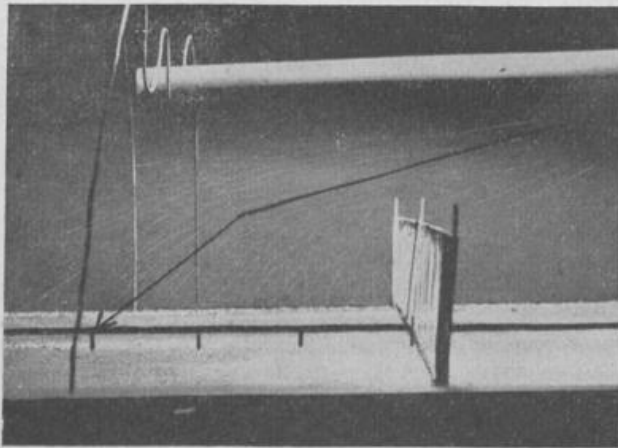


Abb. 23  
Flugbahnen künstlichen Schnees am Modell der Rico-Metallhürde

Die Abb. 23 und 24 bringen den Verlauf der Flugbahnen an den Modellen der Rico-Metallhürde und versetzten Holzhürde. Im Leebereich der Rico-Metallhürde erfahren die Teilchen etwa in Hindernishöhe eine schwache bodenwärts gerichtete Ablenkung von ihrem ungestörten Verlauf. Auf ihrer weiteren Flugbahn geraten sie in die turbulente Strömung und la-

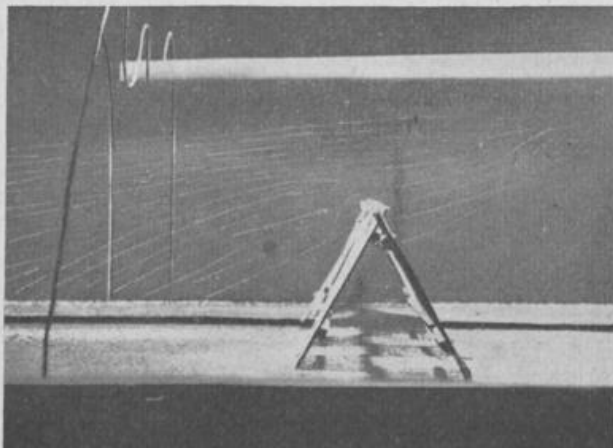


Abb. 24  
Flugbahnen künstlichen Schnees am Modell der versetzten Holzhürde

gern sich etwa im 3—4fachen leeseitigen Abstand der Hindernishöhe  $h$  auf dem Boden ab.

Im Leebereich der versetzten Holzhürde ist nur eine schwache Ablenkung des Verlaufes der Flugbahnen von der Hauptströmungsrichtung zu erkennen.

Die obigen Beobachtungen stimmen mit denen in der Natur überein. Im Vogelsberg wurden im Winter 1954/55 im Lee der versetzten Holzhürde, Rico-Metallhürde und des Kokosfaserzaunes die Schneehöhen gemessen. Nach Abb. 25 liegt das Maximum der Schnee-



Abb. 25  
Lage des Maximums der Schneehöhe im Lee der versetzten Holzhürde

höhe mit 50—60 cm ungefähr im 3—4fachen Abstand der Hindernishöhe  $h$ . Nach den Staudruckbeobachtungen am Modell befindet sich das Minimum des Staudruckes (= Zone der stärkeren Ablagerung) bei 3—5 $h$ .

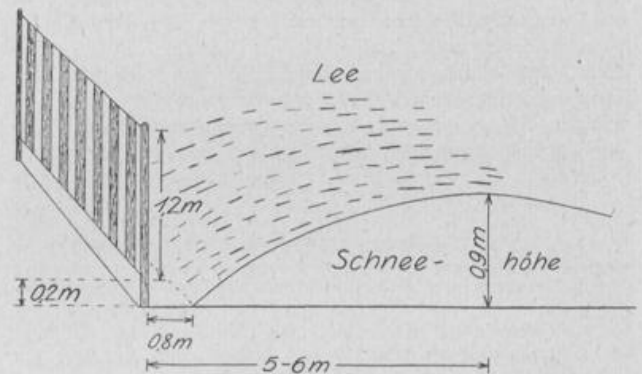


Abb. 26  
Lage des Maximums der Schneehöhe im Lee der Rico-Metallhürde

Analog den Ergebnissen der Windkanaluntersuchungen ergibt sich das gleiche Bild für die Rico-Metallhürde. Die Kulminationsstelle der Schneeablagerung mit 90 cm liegt nach dem Bild in der Natur etwa 5—6 m vom Hindernis entfernt, das entspricht der 4fachen Hindernishöhe. Auch die schneefreie Zone am Hindernis infolge Durchblasung ist deutlich sichtbar.

Wird die versetzte Holzhürde schräg vom Wind angeblasen, dann wird der Schutzbereich durch Verbreiterung der Kolke verkleinert. Es bilden sich wegen der stärkeren Durchblasung zwischen den versetzten Latentafeln lange, in Windrichtung gestreckte, schneefreie Gassen. Als Beispiel hierfür wird ein Bild an der Straße Bad Schwalbach—Hausen/Taunus angeführt (Abb. 27).



Abb. 27  
Schneeablagerung bei schräg zur versetzten Holzhürde anstehendem Wind

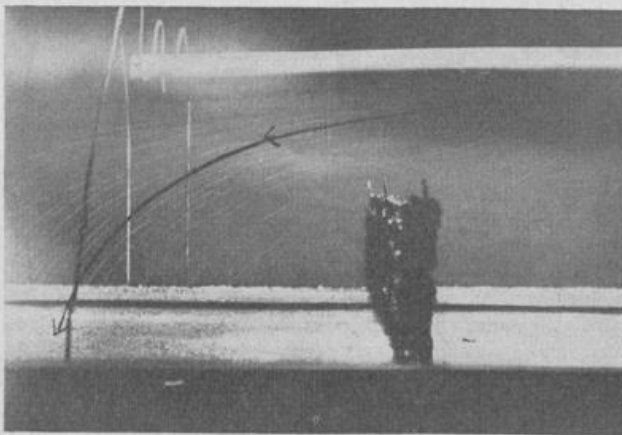


Abb. 28  
Flugbahnen künstlichen Schnees am Modell des Kokosfaser-  
geflechtes

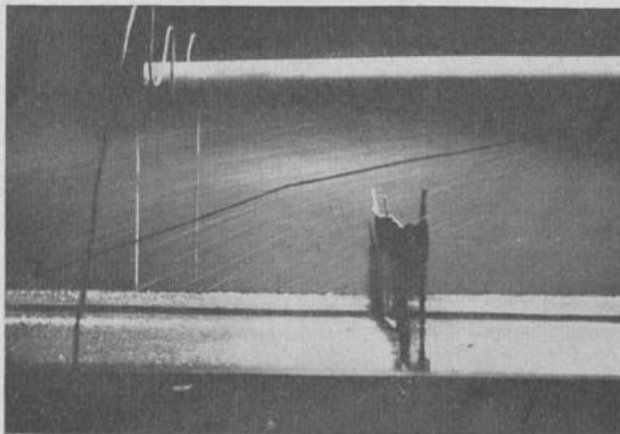


Abb. 29  
Flugbahnen künstlichen Schnees am Modell des Drahtgeflechtes

In den Abb. 28 und 29 sind die Flugbahnen an den Modellen des Kokosfaser- (25 mm Maschenweite) und des Drahtgeflechtes (2,5 mm Maschenweite) ersichtlich. Der Einfluß der jeweiligen Oberflächenrauigkeit ändert die Strömung, was sich im Verlauf der Flugbahnen im Leebereich widerspiegelt. Im Vergleich zum Drahtgeflecht sind die Flugbahnen im Lee des Kokosfasergeflechtes stärker gekrümmt.

Wiederum sind die Beobachtungen im Windkanal denen im Freiland ähnlich. Nach Abb. 30 liegt das Maximum der Schneehöhe im unmittelbaren Leebereich. Als Ursache ist die windschwache Zone, wie sie

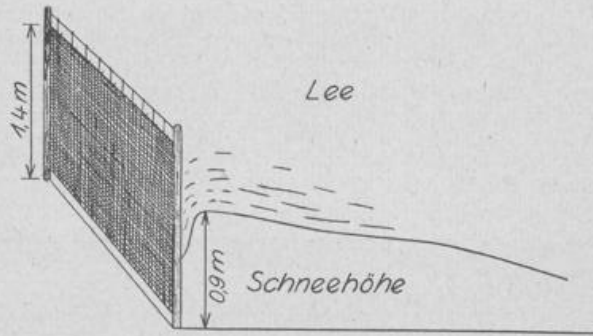


Abb. 30  
Lage der maximalen Schneeablagerung im Lee des Kokos-  
faserschirmes nach Beobachtungen im Vogelsberg

im Staupprofil und vor allem im Isotachenverlauf in Abb. 37 sehr deutlich zum Ausdruck kommt, anzusehen.

Es wurde nun noch der Versuch gemacht, durch einfache, in der Praxis leicht durchführbare Abänderungen des Windschirmes die gleichmäßige Ausfällung des Schnees im Leebereich zu verstärken. Dieser Effekt ließ sich durch Veränderung des Windfeldes im Leebereich des Schirmes erreichen, indem man an seiner oberen Kante einen 2 cm breiten undurchlässigen Streifen aus dichter Drahtgaze anbrachte. Die folgenden Abbildungen 31 und 32 bringen zunächst den Strömungsverlauf an den Modellen des Draht- und Kokosfasergeflechtes. Durch den undurchlässigen Streifen löst sich jetzt die Strömung an der oberen Kante ab

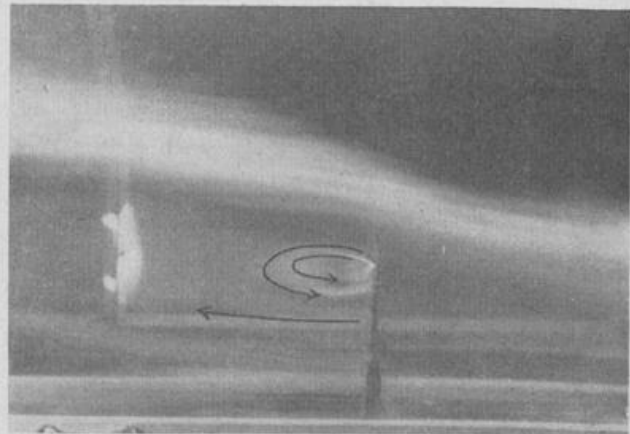


Abb. 31  
Strömungsbild am Modell des Drahtgeflechtes mit undurch-  
lässigem Streifen

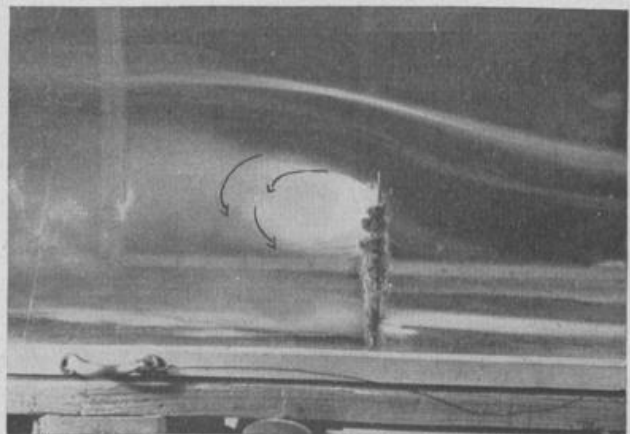


Abb. 32  
Strömungsbild am Modell der Kokosfaser mit undurch-  
lässigem Streifen

und unmittelbar dahinter bildet sich ein Wirbel. Am Drahtgeflecht ist er länger gestreckt als an der Kokosfaser. Unterhalb des Wirbels am Drahtgeflecht kann man beobachten, daß durch die Einzelstrahlen die Strömung stärker beschleunigt wird.

Die Strömungsbilder sind den Flugbahnen des Schnees ähnlich, wie in den Abb. 33 und 34 deutlich zu

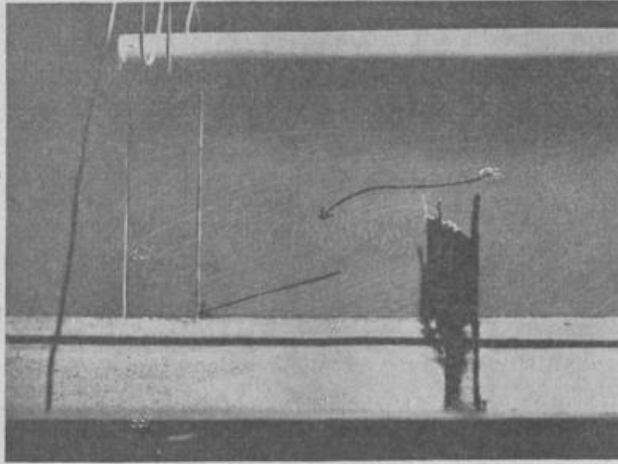


Abb. 33  
Flugbahnen künstlichen Schnees am Drahtgeflecht mit undurchlässigem Streifen

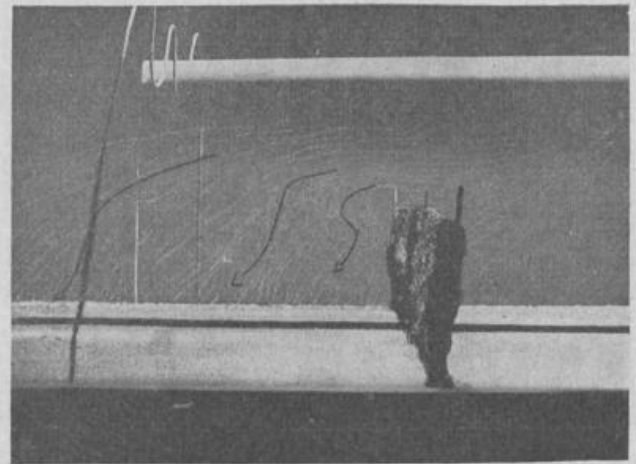


Abb. 34  
Flugbahnen künstlichen Schnees an der Kokosfaser mit undurchlässigem Streifen

Im Leebereich der Kokosfaser hingegen paßt sich der Verlauf der Flugbahnen stark an die durch den lee-seitigen Wirbel zum Boden gerichtete Rückströmung an. Durch die ungestörte Ausfällung des Schnees wird er ziemlich gleichmäßig im Lee abgelagert.

#### 5. Isotachenverlauf an künstlichen Windschirmen

Zur Darstellung des quantitativen Geschwindigkeitsverlaufes wurden noch Zustandsbilder angefertigt. Man verglich die künstlichen Windschirme Draht, Baumwollfaser, Rico-Metallhürde und Kokosfasergewebe miteinander. Aus den Stauprofilen wurde für jede Meßstelle die Höhe des jeweiligen Isotachenwertes bestimmt. Die Isotachen haben in allen Abbildungen die gleichen Stufen von 6,2—4,0 m/sec. Ihre Unterteilung ließ sich schlecht in gleichbleibende Geschwindigkeits-

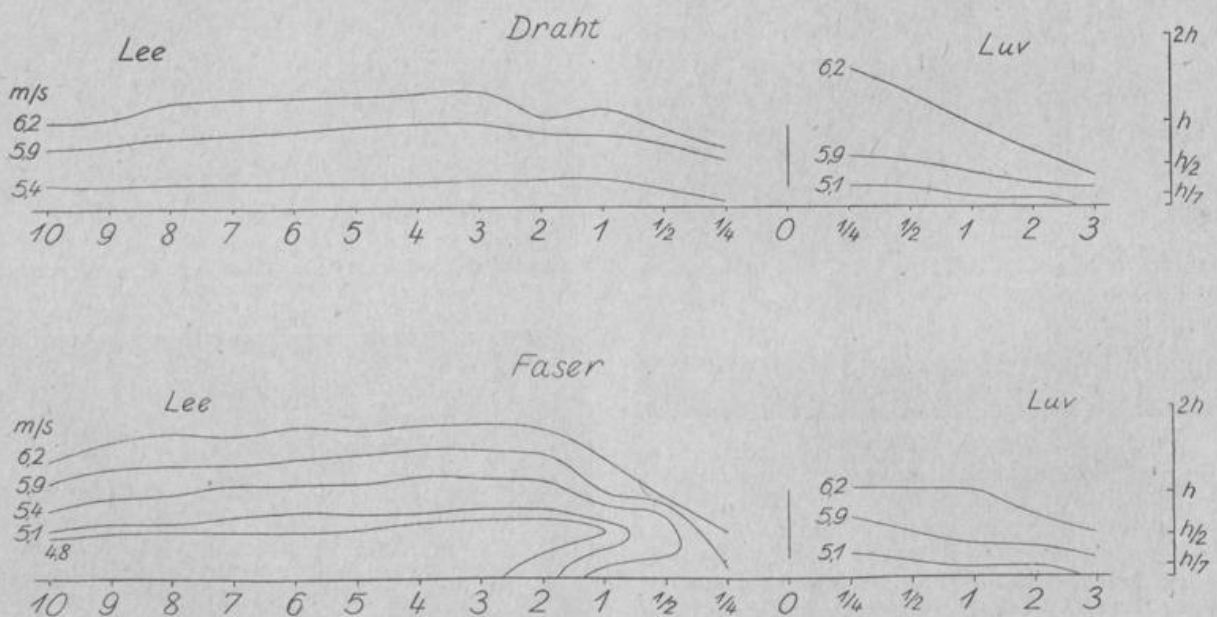


Abb. 35  
Isotachenverlauf im Bereich des Draht- und Baumwollfaserschirmes  
Abstand der Meßstellen in Einheiten der Hindernishöhe h

differenzen vornehmen, weil sonst die charakteristischen Merkmale in der Zeichnung nicht so deutlich zum Ausdruck gekommen wären.

Ohne Hindernis und bei gleichbleibender Bodenrauigkeit verlaufen die Isotachen in der Regel parallel und in gleichem Abstand, abgesehen von der ge-

ringen Verformung in Bodennähe infolge zunehmender Dicke der Grenzschicht. Durch das Hindernis kommt es zu ganz spezifischen Abwandlungen des Isotachenverlaufes. Vergleicht man die Luvseite des Draht- und Baumwollfaserschirmes miteinander, so ist am Faserschirm zu beobachten, daß die 6,2 Isotache durch die allgemein stärkere Aufleitung niedriger liegt als am Drahthindernis. Während bei der Faser der Staupunkteffekt durch Knickbildung hervortritt und sich vom Boden nach oben von 2h nach etwa 1h verlagert, verlaufen die Isotachen beim Draht durch die stärkere Durchblasung annähernd geradlinig.

In der Leezone ist zunächst an beiden Schirmen ein Abfallen der Isotachen festzustellen. Beispielsweise erreicht die 5,9 Isotache am Draht nur die halbe Höhe der Faser. Nach dem Boden zu ( $h/7$ ) ist die Abnahme der Geschwindigkeit verglichen mit Draht bei der Faser erheblich größer. In  $h/2$  beläuft sich die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Draht und Faser auf 1 m/sec. Dieser Unterschied ist an beiden Hindernissen zwischen 1 und 10h festzustellen.

Während die 6,2 Isotache bei der Faser von 2h im Lee etwa in doppelter Hindernishöhe verläuft, liegt sie beim Draht von 1h ab in Hindernishöhe.

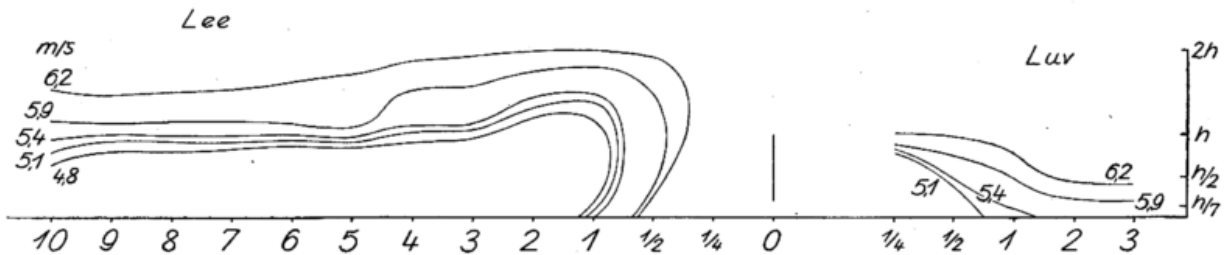


Abb. 36  
Isotachenverlauf im Bereich der Rico-Metallhürde  
Abstand der Meßstellen in Einheiten der Hindernishöhe h

Im Gegensatz zum Draht- und Baumwollfaserschirm werden an der Rico-Metallhürde die Isotachen mit luvseitiger Annäherung zusammengedrängt, und zwar zwischen  $1/2$  und  $1/4$ h. Im Staubereich zwischen 2 und 1h werden die Isotachen 5,9 und 6,2 nach oben abgelenkt.

Im Lee führen die düsenartige Durchblasung zwischen den Blechstreifen und die Wirbelbildung schon auf kurzem Abstand zwischen  $1/2$  und 1h zur Ge-

schwindigkeitssteigerung von 4,8 auf 6,2 m/sec. Bis zum Hindernis steigert sich nach den Staudruckmessungen die Geschwindigkeit z. B. bei  $1/2$ h noch um das 3fache. Außerdem erfolgt nach etwa 1h in Strömungsrichtung rascher Geschwindigkeitsanstieg in vertikaler Richtung. Die 6,2 Isotache verläuft zwischen 1h und 4h zunächst in doppelter Hindernishöhe und nimmt leewärts bis 10h etwa auf 1,5 Hindernishöhe ab.

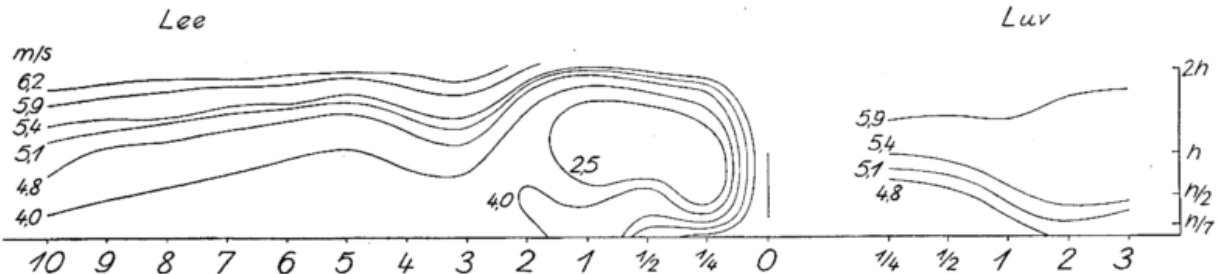


Abb. 37  
Isotachenverlauf im Bereich des Kokosfaserschirmes  
Abstand der Meßstellen in Einheiten der Hindernishöhe h

Eine Sonderstellung nehmen die Isotachen des Kokosfaserwindeschirmes ein. Schon im Luv ist die Geschwindigkeit kleiner als an den anderen Modellen. Ferner ändert sich die Richtung der Isotachen. Die Ursache dieses Verlaufes hängt mit dem Anheben der Strömung in der Stauzone zusammen, wodurch die Isotachen innerhalb der Hindernishöhe nach oben abgelenkt werden. Gleichzeitig wird hierdurch die über dem Hindernis liegende Isotache 5,9 schwach nach unten abgelenkt.

Im Leebereich nimmt, im Gegensatz zur Rico-Metallhürde, die Geschwindigkeit horizontal und vertikal gleichmäßig und allmählich zu. Die 5,4 Isotache dehnt sich bis 2h aus und reicht bis 2h im Lee. Im Gegensatz zu den anderen Hindernissen liegen darunter in konzentrischer Anordnung die relativ geringen Windgeschwindigkeiten bis 2,5 m/sec. Hierdurch hat der gesamte Leebereich bis 10h schwächeren Wind als alle anderen Hindernisse. Dieses Ergebnis bringt nochmals deutlich zum Ausdruck, daß der Kokosfaserschirm somit die beste Schutzwirkung hat.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1. Wissenschaftliche Ergebnisse

Wie bereits schon einleitend in der Problemstellung darauf hingewiesen wurde, können die im Windkanal erhaltenen Ergebnisse nicht ohne weiteres auf das Freiland übertragen werden. Insbesondere ließen die Modellversuchsergebnisse erkennen, daß der Einfluß der verschiedenen Faktoren (z. B. Oberflächenrauigkeit, Form und Durchlässigkeit des Hindernisses, Turbulenzvorgänge des Bodenwindes) auf die charakteristischen Strömungsverhältnisse des Nachlaufes sich nicht streng gesetzmäßig durch ein physikalisches Modellgesetz erfassen läßt, daß aber die unter idealisierten Versuchsbedingungen gewonnenen grundsätzlichen Erkenntnisse die Grundlage bilden und Richtlinien geben für weitere Versuche im Freiland.

Aus den Windkanaluntersuchungen konnte eine Reihe grundsätzlicher Erkenntnisse abgeleitet werden. Die bei den Modellversuchen gefundene Übereinstimmung der Strömungsverhältnisse mit denen des Frei-

landes ließ auf Grund des Vergleiches mit den Strömungs- und Erosionsbildern darauf schließen, daß sich im Windkanal, trotz geringer Strömungsgeschwindigkeit, die im Maßstabverhältnis zum Freiland wahren Turbulenzvorgänge einstellen. Die spezifischen Strömungsvorgänge der Grenzschicht können bei der dem Re-Ähnlichkeitsgesetz notwendigen hohen Windgeschwindigkeit im Modellversuch nicht mehr zum Ausdruck kommen, zumal bei Annäherung an die Schallgeschwindigkeit noch der Einfluß der Kompressibilität der Luft zu berücksichtigen ist.

Beachtet man nur die molekulare Zähigkeit, so ist bei dem Modellmaßstab 1:10 und bei gleicher Windgeschwindigkeit die Re-Zahl im Windkanal etwa 10mal kleiner als im Freiland. Um im Modellversuch die wahren Strömungsverhältnisse des Freilandes annähernd richtig darzustellen, müßte nach dem Re-Ähnlichkeitsgesetz die Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal noch um das 10fache erhöht werden. Vergleicht man jedoch die sich aus dem Austauschbeiwert für Rübenland ( $A_0 = 0,034$ ) und dem aufgerauhten Kanalboden ( $A_0 = 0,02$ ) ergebenden Re-Zahlen, so ergibt sich für den Windschirm im Freiland eine Re-Zahl von  $Re = 29,4$  und für den Modellwindschirm die Re-Zahl  $Re = 50$ . Dieses nur unter Berücksichtigung der turbulenten Reibung erhaltene Verhältnis der Re-Zahlen ist nur 1,7mal so groß. Es läßt darauf schließen, daß unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und der Größe des Modellschirmes durch eine dem Maßstabverhältnis entsprechende Erhöhung der Turbulenz die Angleichung der Strömungsverhältnisse im Windkanal an das Freiland möglich ist.

Die Versuche haben ergeben, daß die Form der Geschwindigkeitsverteilung im leeseitigen Abstand weitgehend unabhängig von der Größe des Körpers und der Strömungsgeschwindigkeit ist. Jedoch zeigte sich, daß die Geschwindigkeitsverteilung in der unmittelbaren Leewirbelzone stark durch die Grenzschicht des Körpers und die Ablösung der Strömung bestimmt wird. Insbesondere erwies sich der Einfluß des Durchlässigkeitsgrades bzw. der absoluten Größe der durchblasenen Öffnung und die Oberflächenrauigkeit des Hindernisses für die Ausbildung der Leewirbelzone von besonderer Bedeutung. So stellte sich heraus, daß bei einer um das 10fache größeren Durchlässigkeit des Kokosfaserwindschirmes mit 25 mm Maschenweite gegenüber dem Drahtgeflecht mit nur 2,5 mm Maschenweite der Wirkungsgrad des leeseitigen Schutzeffektes von  $h/7$  bis  $h$  um 32–66% besser war. Bei den in der Praxis üblichen Schutzzäunen (Holzhürde, Rico-Metallhürde und Kokosfaserzaun) fand man, daß der Wirkungsgrad im Lee bei der Kokosfaser um 30% besser war als an den beiden anderen Hindernissen.

Wird die Holzhürde versetzt aufgestellt, und der Wind steht im Winkel von  $30^\circ$  an, dann wird im unmittelbaren Leebereich die Windgeschwindigkeit erheblich gesteigert, weil sich die durchblasene Fläche zwischen den versetzten Latten vergrößert. Beträgt der Anblaswinkel  $30^\circ$ , dann kann im Durchschnitt, bezogen bis auf den 5fachen leeseitigen Abstand der Hindernishöhe  $h$ , die Geschwindigkeit um etwa 50% gegenüber der senkrechten Anblasung gesteigert werden.

Ein gutes Hilfsmittel, um die Strömung durch Rauch sichtbar zu machen, ist Titantrichlorid. An Hand des Bildes war es möglich, vergleichende Beobachtungen der Turbulenzvorgänge an den verschiedenen Hindernissen anzustellen. Es konnten hierdurch Rückschlüsse auf die Ursachen der Geschwindigkeitsverteilung gezogen werden.

Die mechanische Windwirkung im Strömungsbereich der verschiedenen Hindernisarten auf die Erosion konnte im Windkanal quantitativ untersucht werden.

Das sich hierbei gezeigte Erosionsbild stimmte in jedem Falle mit dem Strömungsbild überein. An der Holz-, Metall- und Kokosfaserhürde sind sehr beträchtliche Unterschiede in der Abtragung des Bodens und in der Ablagerung der Windfracht eingetreten. Auf Grund der günstigen Strömungsbedingungen an dem Kokosfaserschirm wurden hier auch die kleinsten Bodenmengen verfrachtet. Sie betrugen im Luv 12% und im Lee nur 3%, während im gleichen Bereich die Mengen bei der Metallhürde 38 und 14% und bei der versetzten Holzhürde 69 und 8% ergaben. Bei schräger Anblasung ( $30^\circ$ ) werden an der versetzten Holzhürde im Luv 81 und im Lee 66% des Bodens weggeweht.

Eine analoge Übereinstimmung zeigte sich bei der Schneeablagerung und vor allem bei den Flugbahnen der Schneeteilchen, die photographisch festgehalten wurden. Ähnlich der Dunkelfeldbeleuchtung arbeitete man eine Methode aus, die es ermöglicht, die Flugbahnen für die photographische Aufnahme sichtbar zu machen.

Auch hier war eine weitere Übereinstimmung mit den obigen Ergebnissen zu beobachten. Im Lee des Kokosfaserzaunes waren die Flugbahnen im Bereich der windschwachen Zone bodenwärts gerichtet. Die Akkumulation der Windfracht erfolgte ziemlich gleichmäßig im gesamten Leeschutz bis 5h. Die Flugbahnen der Schneeteilchen im Lee der Metallhürde waren wegen der stärkeren Durchblasung des Hindernisses auch weniger gekrümmt. Durch diesen Vorgang kam nicht nur weniger Schnee zur Ablagerung, sondern auch der Kulminationspunkt wurde etwa nach der 4fachen Hindernishöhe verlagert. Die versetzte Holzhürde wurde am stärksten durchblasen. Nach dem photographischen Bild verlaufen die Flugbahnen fast geradlinig, und der Schnee lagert sich durch die Düsenwirkung zu beiden Seiten der, hinter den durchblasenen Öffnungen entstandenen Windgassen ab.

Durch experimentelle Veränderungen am Windschirm konnten auch der Strömungsverlauf und der Wirkungseffekt verändert werden.

Die Untersuchungen lehren, daß die Arbeiten im Windkanal nicht nur wissenschaftliche Erkenntnisse liefern, sondern auch von praktischer Bedeutung sind. Wie unsere weiteren Arbeiten schon gezeigt haben, kann man im Windkanal auch den Strömungsverlauf in Abhängigkeit von der Geländeausformung am Modell erforschen. Es lassen sich vor allem quantitative Aussagen über den Verlauf des Bodenwindes und des bodennahen Windes, der Windablenkung und über die Lage der bei turbulenten Überfallwinden auftretenden Rückströmung machen. Ferner kann man schon auf Grund dieser am Relief möglichen Beobachtungen Schlüsse auf Windbruchschäden, Erosionsvorgänge und Lagerschäden ziehen. Der Windkanal ist somit auch ein wichtiges Werkzeug für die geländeklimatologischen Untersuchungen. Manches Ergebnis, das im Freiland erst nach längerer Zeit gefunden werden kann, läßt sich im Windkanal schon in kurzer Zeit und unter einfacheren Arbeitsbedingungen sowie geringerem Kostenaufwand festlegen.

## 6.2. Praktische Folgerungen

Der künstliche Windschirm wird in der Praxis schon vielseitig verwendet, und zwar als Wind-, Erosions- und Schneeschutz. In jedem Falle hängt die Wirkung von dem Verlauf der Strömung ab, die ihrerseits durch die Gestalt und Beschaffenheit des Hindernisses beeinflusst wird. Vor allem ist darauf zu achten, daß in der Leezone zur Turbulenz führende Vorgänge vermieden werden. In den meisten Fällen ist als Ursache die Ablösung der Strömung an scharfen oder glatten Kanten anzusehen. Insbesondere sind es die Ränder

der durchblasenen Öffnungen des Hindernisses sowie dessen äußere Begrenzung, welche die Grenzschichtströmung und somit den Nachlauf im unmittelbaren Leebereich beeinflussen.

Entscheidend ist nicht allein die geometrische Durchlässigkeit, sondern die absolute Größe und die Anordnung der durchblasenen Öffnungen am Hindernis. Obwohl Metallhürde und Kokosfaser annähernd die gleiche geometrische Durchlässigkeit von etwa 45–50% haben, so zeigen sie doch in ihrem Turbulenzgrad und Strömungsverlauf wesentliche Unterschiede. Bei siebartiger Anordnung der durchblasenen Öffnungen wird der Energieverlust auf der Gesamtfläche gleichmäßig verteilt, während an Blechstreifen und Holzplatten durch die Ablösung der Strömung an den Kanten Wirbelbildungen und damit stark unterschiedliche Druckverluste am Hindernis auftreten. Außer der starken Verwirbelung der Strömung und Erhöhung der Geschwindigkeit im Leebereich kann hierbei durch die mechanische Beanspruchung als Folge der unterschiedlichen Druckkräfte das Hindernis umgeworfen und die Blechstreifen in sich verbogen werden.

Durch entsprechende Abänderung des Hindernisses war es möglich, für den jeweiligen Verwendungszweck die bestmögliche Wirkung zu erreichen. Sollen künstliche Hindernisse als Windschutz dienen, dann müssen sie in jedem Falle mit der Bodenoberfläche abschließen. Insbesondere war es am Kokosfaserschirm möglich, die an sich schon im Vergleich zu den anderen Hindernissen bessere Schutzwirkung noch zu steigern. Durch die Anbringung eines mit dem Boden abschließenden windundurchlässigen Gazestreifens von etwa  $1/7$  der Hindernishöhe wird der Bodenwind noch stärker aufgeleitet und dadurch die Schutzwirkung erhöht.

Diese für den Windschutz gefundenen Untersuchungsergebnisse haben auch Gültigkeit für die Bekämpfung der Bodenerosion.

Dienen die Hindernisse dem Zweck der Schneeablagerung, dann erwies sich als vorteilhaft, das Hindernis nicht nur  $1/7$  seiner Gesamthöhe vom Boden abzusetzen, sondern auch am oberen Hindernisrand einen

windundurchlässigen Streifen von  $1/7$  der Hindernishöhe zusätzlich anzubringen. Dadurch wird die Schneeablagerung im Lee infolge der bodenwärts gerichteten Rückströmung (Wirbel hinter der oberen Hinderniskante) noch gesteigert, und die Windfracht kann gleichmäßiger akkumulieren. Im Vergleich zur Metallhürde und versetzten Holzhürde ist am Kokosfaserschirm die Ablagerung gleichmäßiger und in der Regel auch höher. Die versetzte Holzhürde ist für diesen Zweck am ungünstigsten, weil bei jeder Richtungsänderung des Windes durch die hiermit zunehmend stärkere Durchblasung zwischen den versetzten Lattenhürden das im Lee abgelagerte Schneegut zum Teil wieder verfrachtet werden kann und nochmals verweht wird.

#### Literatur

- (1) Blenk, H.: Strömungstechnische Beiträge zum Windschutzproblem. Landtechn. Forsch. H. 3 (1953)
- (2) Nägeli, W.: Weitere Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich der Windschutzstreifen. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Versuchswesen 24, H. 2 (1946).
- (3) Flensburg, C. E., u. Nøkkentved, Chr.: Fortsatte Laevirkningsundersøgelser. Hedeselskabets Tidkrift Nr. 13 (1940)
- (4) Blenk, H.: Aerodynamische Untersuchungen zum Windschutzproblem. Umschaudienst „Landschaftspflege und Landschaftsgestaltung“ H. 5/6 (1952)
- (5) Paeschke, W.: Experimentelle Untersuchungen zum Rauigkeits- und Stabilitätsproblem. Beitr. Phys. fr. Atm. 19, 188 (1932)
- (6) Schlichting, H.: Grenzschichttheorie, Stuttgart 1951, 376–378.
- (7) Nägeli, W.: Untersuchungen über die Windverhältnisse i. Bereich v. Schilfrohrwänden. Mitt. Schweiz. Anst. forstl. Versuchswesen 29, H. 2 (1953).
- (8) Nøkkentved, Chr.: Drivedannelse ved Sneskaerme. Stads- og Havneingeniøren 1940, 85–92.





