

ÜBER DIE SCHUTZWIRKSAMKEIT SOCKELWALLBEHAFTETER DÜNNER WINDSCHUTZSTREIFEN: EXPERIMENT UND NUMERI- SCHE STUDIE

C. Frank & B. Ruck

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, D - 76128 Karlsruhe

Abstract

Der Einfluss von verschiedenen Parametern einer Windschutzstreifen-Doppelanordnung auf den Windschutz im Bereich zwischen den zwei Streifen wurde sowohl experimentell in einer Windkanalstudie als auch numerisch mit einem $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell untersucht. Bei den variierten Parametern handelt es sich um den Abstand der beiden Streifen, die Porosität der dünnen Bewuchsstreifen, den Böschungswinkel der Wälle und das Verhältnis von Bewuchshöhe zu Sockelwallhöhe. Die Schutzwirksamkeit der Windschutzanlagen wird mit Hilfe eines lokalen Schutzparameters bewertet, der die Veränderung der aerodynamischen Kraftwirkung beschreibt. Schutzvolumen geben als integrale Schutzfaktoren die Größe geschützter Bereiche wieder.

Einleitung

Windschutzstreifen dienen bereits seit Jahrhunderten dem Schutz landwirtschaftlich genutzter Flächen, in neuerer Zeit werden sie aber auch verstärkt angelegt, um Industrieflächen wie z. B. Deponien und Umschlagplätze von Schüttgütern oder auch Produktionsstätten, bei denen unter Umständen sogar schwermetallhaltige Schwebstoffe erzeugt werden, vor Windangriffen zu schützen. Während im agrarwirtschaftlichen Bereich Windschutz vor allem in Bodennähe angestrebt wird, interessiert bei stoffemittierenden Industrieflächen auch die Schutzwirkung der Streifen in größeren Höhen.

Als Windschutzanlagen kommen nicht nur einzelne linienförmige, ebenerdige (wallose) oder wallbehafte Gehölzschutzstreifen zum Einsatz, sondern oftmals werden ganze Industrieflächen von einer Anlage umgeben. Solche Windschutzanordnungen sind vor allem in dichtbesiedelten Gebieten anzutreffen. Industrieflächen werden windberuhigt, indem durch geeignete Windschutzanlagen dafür gesorgt wird, dass eine Reduktion konvektiver Strömungsgrößen im Schutzgebiet erzielt wird. Dadurch werden gleichzeitig angrenzende Siedlungen vor starken Immissionen geschützt.

Grundlegende Beziehungen zwischen den relevanten Einflussparametern einer Windschutzstreifen-Doppelanordnung (Porosität der dünnen Bewuchsstreifen ϕ , Böschungswinkel α , Verhältnis Bewuchshöhe zu Sockelwallhöhe H/h und Abstand a der begrenzenden Streifen) wurden sowohl durch physikalische Modellierung (siehe auch Frank und Ruck 2002, 2003a,b) als auch durch numerische Simulation erfasst. Die experimentellen Untersuchungen wurden in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal mittels eines 2D-LDA-Systems durchgeführt. Die numerischen Simulationen basieren auf einem $k-\varepsilon$ -Turbulenz-

modell (Programm-Paket FLOVENT der Firma Flomerics). Die parallele Anwendung dieser zwei unterschiedlichen Methoden erlaubt eine gegenseitige Validierung der erzielten Ergebnisse.

Physikalische Modellierung

Die experimentellen Untersuchungen wurden im Grenzschichtwindkanal des Laboratoriums für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe durchgeführt. Mit Hilfe von zu Beginn der Teststrecke angeordneten Wirbelgeneratoren und gleichmäßig über die gesamte Teststrecke verteilten Rauheitselementen wird eine neutral geschichtete atmosphärische Grenzschicht im Modellmaßstab 1:200 nachgebildet, die charakteristisch ist für vorstädtisches Terrain bzw. Waldgebiete. Die gemessenen horizontalen Geschwindigkeiten können mit dem Potenzgesetz $u(z)/u_{ref} = (z/z_{ref})^n$ und $n = 0.26$ sehr gut angenähert werden (Abb.1a). Die turbulente kinetische Energie je Masseneinheit $TKE = 0.75 \cdot (u'^2 + w'^2)$ nimmt allmählich mit der Höhe ab (Abb.1b).

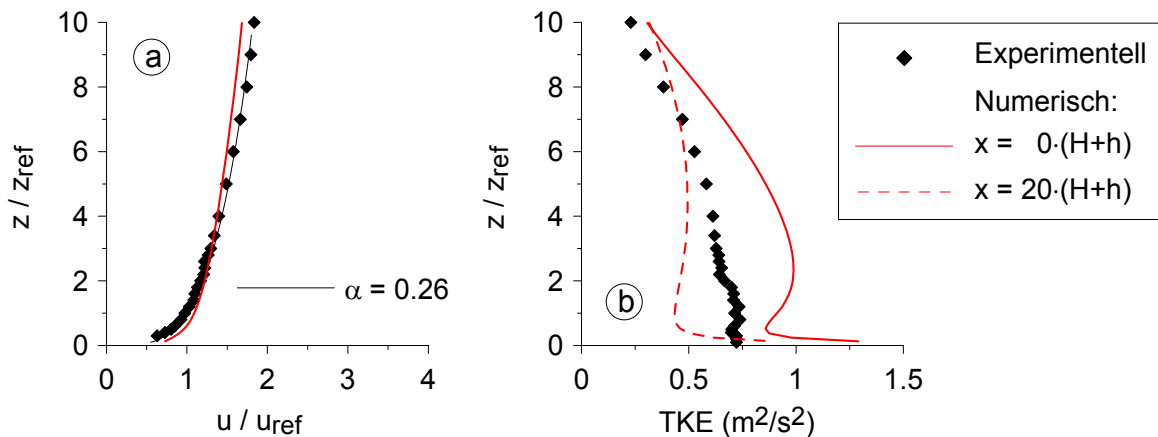
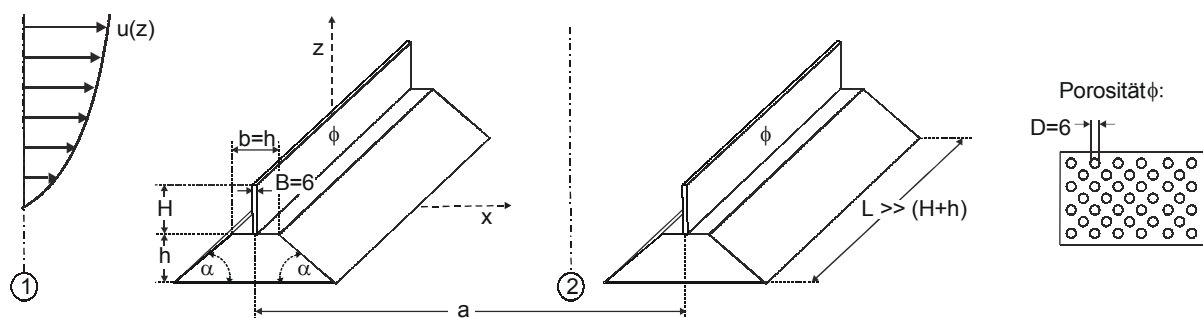


Abb.1: Experimentell und numerisch simulierte atmosphärische Grenzschicht: ($z_{ref} = 5\text{cm}, u_{ref} = 3.2\text{m/s}$)
 a) Mittlere horizontale Geschwindigkeit u/u_{ref} , b) Turbulente kinetische Energie TKE

Die Geschwindigkeitsmessungen wurden mit einem 2D-LDA-System durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen Argon-Ionen-Laser (4 Watt), der im Zweistrahlverfahren mit Vorwärtslichtstreuung arbeitet. 2 Doppel-Bragg-Zellen sorgen für die zur Erfassung der Rückströmgeschwindigkeiten notwendigen Frequenzverschiebungen. Das Streulicht wird mit Hilfe von Photomultipliern detektiert. Die Datenauswertung erfolgt mit 2 TSI Prozessoren, Modell IFA 550.



- 1: Position in der ungestörten Anströmung
- 2: Position im durch die Windschutzanlage beeinflussten Strömungsbereich

Abb. 2: Skizze der Windschutzstreifenmodelle und verwendete Nomenklatur

Die normal angeströmten, geradlinigen, langen (und damit in der Mittenebene zweidimensional umströmten), doppeltangeordneten Windschutzstreifenmodelle sind in Abb.2 skizziert. Die Porosität ϕ der dünnen Bewuchsstreifen wurde durch gleichmäßig verteilte Bohrungen realisiert und ist definiert als das Verhältnis von perforierter Fläche zur Gesamtfläche der Bewuchsstreifen.

Numerische Modellierung

Die Berechnungen wurden mit dem Programm-Paket FLOVENT V3.2 der Firma Flomerics durchgeführt. Das Programm ist speziell für numerische Berechnungen im Bereich Gebäude- und Umweltaerodynamik entwickelt worden. Die FLOVENT-Software beinhaltet ein statistisches Turbulenzmodell auf der Basis des k- ϵ -Modells.

Der „numerische“ Windkanal erstreckt sich in Hauptströmungsrichtung von $-4.86 \cdot (H+h) < x < 70.3 \cdot (H+h)$, in lateraler Richtung bis zu $9.4 \cdot (H+h)$ und in vertikaler Richtung bis $5.6 \cdot (H+h)$. Die Mitte des ersten, stromaufwärts angeordneten Windschutzstreifens liegt konstant bei $x = 0 \cdot (H+h)$.

Die Geländeoberfläche wird durch eine Wand modelliert, deren Rauheit in etwa der Höhe der Rauheitselemente im Windkanal unter dem zugrundegelegten numerischen Maßstab entspricht. Während die Seitenflächen in Hauptströmungsrichtung (X-Richtung) und in vertikaler Richtung (Z-Richtung) offen sind, wurde in lateraler Richtung (Y-Richtung) aufgrund der vorhandenen Zweidimensionalität der Untersuchung die Seitenflächen symmetrisch gewählt.

Die atmosphärische Anströmung zu Beginn des Rechenraumes wurde mit Hilfe von 20 gleichmäßig über die Höhe verteilten Fixed Flow Devices festgesetzt. Für jedes Fixed Flow Device wurden Werte für die mittlere horizontale Geschwindigkeit und die turbulente kinetische Energie festgelegt, deren vertikale Verteilung an der Stelle des stromaufwärts gelegenen Windschutzstreifens ($x = 0 \cdot (h+H)$) Abb.1 zu entnehmen sind. Während die horizontale Geschwindigkeit im bodennahen Bereich über die gesamte Länge des Rechenraumes annähernd konstant bleibt, nimmt die turbulente kinetische Energie stark ab (Abb.1b). Die TKE-Anfangswerte wurden deshalb auf das 1.5-fache der Windkanalwerte gesetzt, um im Schnitt einen vergleichbaren Mittelwert zu den Windkanaluntersuchungen zu erlangen. Die Werte für die vertikale Geschwindigkeit ($w = 0$ m/s), den Druck ($p = 0$ Pa) und die Dissipationsrate der Turbulenz ($TurbDiss = 0.21$ W/kg) wurden als über die Höhe unverändert angesetzt.

Im Bereich der Anströmung beträgt der Gitterabstand in Strömungsrichtung $\Delta x = 1$ m = $0.19 \cdot (h+H)$, ab dem ersten Windschutzstreifen $\Delta x = 2$ m = $0.38 \cdot (h+H)$. Über die Breite jedes Streifens wurden zusätzlich 10 gleichmäßig verteilte Gitter eingefügt. In vertikaler Richtung beläuft sich der Gitterabstand auf $\Delta y = 0.75$ m = $0.14 \cdot (h+H)$. Bis zur Höhe der Windschutzstreifen sind 15 zusätzliche Gitter mit nach oben zunehmendem Gitterabstand angeordnet. Die Unabhängigkeit der Ergebnisse vom gewählten Gitter wurde an einem um Faktor 2 verfeinerten Gitter getestet und es ergaben sich dabei nur sehr geringfügige Veränderungen.

Bestimmung der Druckverlustbeiwerte der Bewuchsstreifen

Die porösen Bewuchsstreifen wurden in den numerischen Untersuchungen vereinfacht als planare Widerstände modelliert. Der Windwiderstand eines porösen Hindernisses wird normalerweise durch den dimensionslosen Widerstandskoeffizienten k beschrieben:

$$k = (p_1 - p_2) / (0.5 \cdot \rho \cdot u_1^2) \quad (1)$$

wobei $p_1 - p_2$ der Druckverlust über das Hindernis (in einiger Entfernung, nicht unmittelbar beim Hindernis gemessen), ρ die Dichte und u_1 die Geschwindigkeit der Anströmung ist. k ist abhängig von der Porosität ϕ , der Form der Öffnungen und von der Reynoldszahl $Re_o = u_1 \cdot d_h / (\phi \cdot \nu)$, wobei d_h der hydraulische Durchmesser ist, welcher bei runden Öffnungen dem geometrischen Durchmesser entspricht, und ν die kinematische Viskosität. Nach FLOVENT - Schulungsmaterial wird zwischen 4 Regimen unterschieden: dem laminaren Regime $Re_o < 10$, 2 transitionalen Regimen $10 < Re_o < 25$ und $30 < Re_o < 10^4 \dots 10^5$ und dem voll turbulenten Regime $Re_o > 10^5$.

Um den Zusammenhang zwischen Druckverlust und Geschwindigkeit für die verwendeten Bewuchsstreifen zu ermitteln, wurde ein dreidimensionales Modell eines repräsentativen Streifenausschnittes in FLOVENT erstellt, welches eine laminare, reibungsfreie Anströmung über den gesamten Querschnitt des seitlich begrenzten Rechenraums blockiert. Da die horizontale Geschwindigkeit der simulierten atmosphärischen Anströmung logarithmisch mit der Höhe ansteigt, wurden jeweils drei unterschiedliche Geschwindigkeitswerte untersucht (Tab.1), welche charakteristisch für die Anströmung des unteren, mittleren und oberen Bereiches der Windschutzstreifen sind. Mit den ebenfalls in Tab.1 aufgelisteten Re_o -Zahlen trifft das oben erwähnte zweite transitionale Strömungsregime zu, in dem die k -Werte von der Geschwindigkeit abhängen und überschlägig abgeschätzt etwa die Hälfte der nach Gl.(1) berechneten k -Werte des vollturbulenten Bereiches betragen. Vereinfacht wurden letztendlich die in mittlerer Windschutzstreifenhöhe geltenden, in Tab.1 fettgedruckten k -Werte verwendet.

ϕ	u_1 [m/s]	Δp (Pa)	$Re_o = u_1 \cdot d_h / (\nu \phi)$	$k = \Delta p / (u_1^2 \rho)$
0.22	2	70.0	2964	14.71
	3	147.0	4447	13.73
	4	249.0	5929	13.08
0.52	2	9.1	1254	1.91
	3	18.7	1881	1.75
	4	29.3	2508	1.54

Tab. 1: Druckverlustbeiwerte k für poröse Bewuchsstreifen ($d_h = 0.006$ m, $\rho = 1.19$ kg/m³, $\nu = 1.84E-05$ Ns/m²).

Bewertung der Schutzwirksamkeit

Die Wirksamkeit der unterschiedlichen Windschutzstreifen-Doppelanordnungen wird in diesem Beitrag mit Hilfe des lokalen Schutzparameters S_u beschrieben

$$S_u(x,z) = 1 - \frac{u_2(x,z)^2}{u_1(z)^2}, \quad (2)$$

der die relative Änderung des zeitgemittelten, horizontalen Impulsstroms der geschützten (2) zur ungeschützten (1) Anströmung in einer Höhe z wiedergibt (Nomenklatur siehe Abb.2). Da die aerodynamische Kraftwirkung auf Körper proportional u^2 ist, erfasst der Schutzfaktor S_u auch deren relative Änderung quantitativ. Die Windturbulenz (Böigkeit) wird explizit nicht berücksichtigt. Ist $S_u > 0$, reduziert sich die Kraftwirkung; ist $S_u < 0$, verstärkt sie sich.

Für den Schutzparameter wurden Schutzvolumen V_{Su} berechnet. Unter einem Schutzvolumen V_{Su} versteht man eine Fläche, in der sich ein Mindestwert des Schutzparameters einstellt, multipliziert mit der Länge L eines Windschutzstreifens quer zur Anströmungsrichtung.

Vergleich numerischer Vorhersagen mit experimentellen Daten

Exemplarisch sind in Abb. 3 Isoplots des Schutzparameters S_u ($S_u = 0.25, 0.5$ und 0.75) aus experimentellen und numerischen Daten für undurchlässige Bewuchsstreifen ($\phi = 0\%$) dargestellt. In Bereichen mit $S_u = 0.25$ reduziert sich die Kraftwirkung um mindestens 25 % im Vergleich zur Kraftwirkung in der ungeschützten Anströmung (geringe Schutzwirkung). Stärker geschützte Bereiche sind natürlich kleiner.

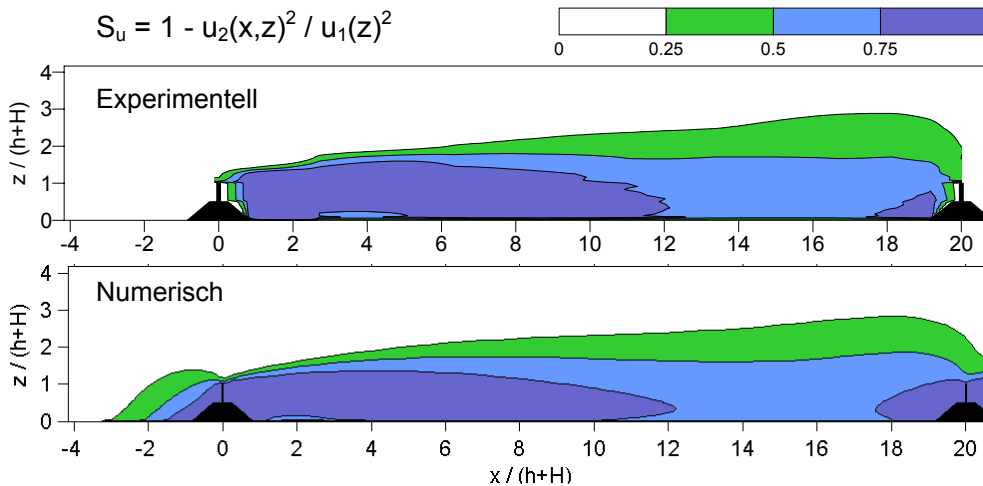


Abb. 3: Experimentell und numerisch ermittelte Isoplots des Schutzparameters S_u für doppelt angeordnete Windschutzstreifen ($\phi = 0\%$, $\alpha = 40^\circ$, $H/h = 1$, $a = 20 \cdot (H+h)$).

Einfluss des Abstands der beiden Windschutzstreifen auf den Windschutz

Sieben Abstände im Bereich von $5 \cdot (H+h)$ bis $25 \cdot (H+h)$ wurden für unterschiedlich poröse Bewuchsstreifen ($\phi = 0\%$, 22 % bzw. $k=13.7$ und 52 % bzw. $k = 1.8$) untersucht. In Abb.4 sind deren normierte Schutzvolumen $v'_{Su} = V_{Su} / ((H+h)^2 \cdot L)$ über den normierten Abstand $a' = a / (H+h)$ für drei unterschiedliche Schutzwirkungsgrade (niedrig: $S_u = 0.25$, mittel: $S_u = 0.5$, hoch: $S_u = 0.75$) aufgetragen. Sowohl die experimentellen als auch die numerischen Ergebnisse zeigen, dass der Abstand der beiden Windschutzstreifen einen signifikanten Einfluss auf die Größe der Schutzvolumen im Zwischenfeld der beiden Streifen ausübt. Die Größe der Schutzvolumen nimmt mit zunehmendem Abstand zu. Dies gilt, solange das Zwischenfeld über seine gesamte Länge geschützt ist. Wird der Abstand der beiden Streifen größer, bilden sich zwei separate Schutzvolumen aus: Ein großes im Lee des stromauf gelegenen Streifens und ein kleines im Luv des stromab angeordneten Streifens (siehe auch Abb.3, $S_u = 0.75$). Beide Schutzvolumen sind dann vergleichbar in Form und Größe mit denen luv- und leeseits eines strukturgleichen Einzelstreifens und verändern sich bei einer weiteren Abstandsvergrößerung nicht mehr.

Durch eine optimal gewählte Anordnung des zweiten Streifens stromab (d.h. durch Wahl eines optimalen Abstands) kann das windgeschützte Gebiet speziell für niedrige und mittlere Schutzwirkung im Vergleich zum Einzelstreifen merklich vergrößert werden. Der optimale Abstand einer Doppelanordnung hängt dabei von der Struktur, insbesondere der Porosität der Bewuchsstreifen, ab.

Einfluss der Porosität auf den Windschutz

Die Windkanaluntersuchungen zeigen, dass die Porosität der Bewuchsstreifen die Schutzwirksamkeit von doppelt angeordneten Windschutzstreifen ebenfalls stark beeinflusst (Abb.4). Die Größe der Schutzvolumen v'_{Su} nimmt mit zunehmender Porosität sowohl für hohe als auch für niedrige Schutzwirkung ab. Diese Tendenz gilt für alle untersuchten Ab-

stände. Der Einfluss der Porosität nimmt, solange das Zwischenfeld über seine gesamte Länge geschützt ist, mit zunehmendem Abstand zu. Die experimentellen Ergebnisse werden mit den numerischen Berechnungen nur tendenziell wiedergegeben, quantitativ gibt es zum Teil leider große Abweichungen.

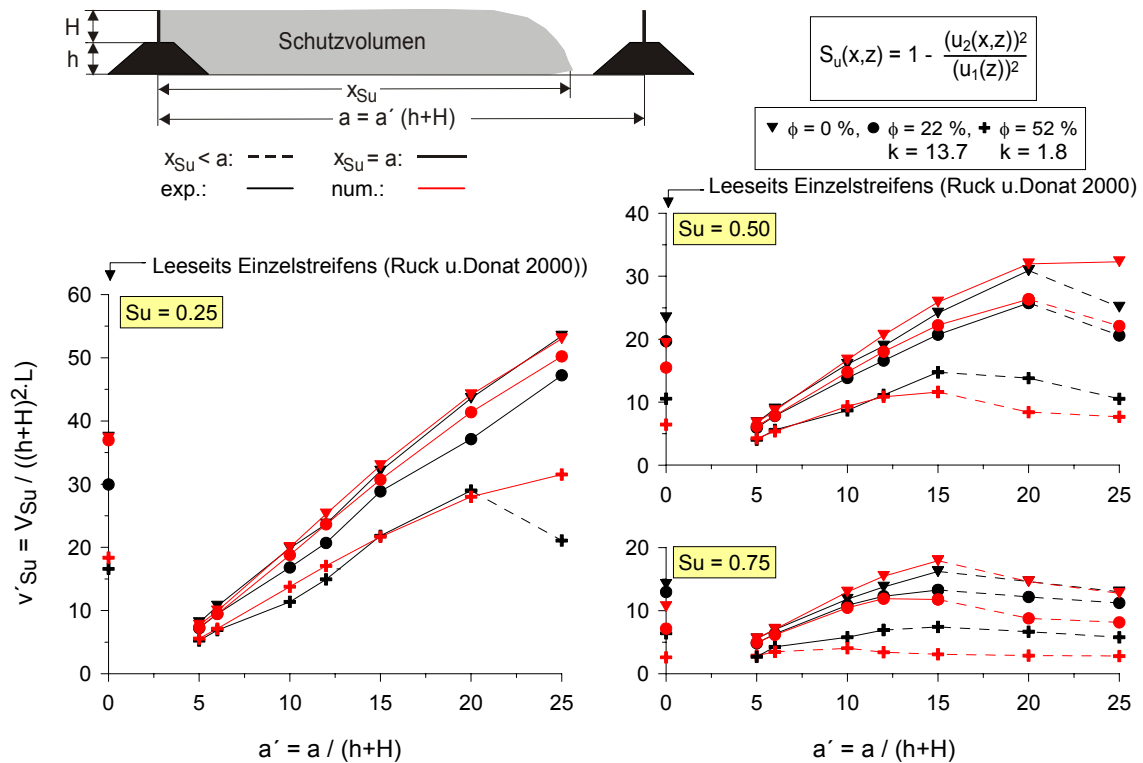


Abb. 4: Normierte Größe der Schutzvolumen $v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L)$ aus numerischer Berechnung und Experiment für unterschiedliche Porositäten ϕ bzw. k . ($\alpha = 40^\circ$, $H/h = 1$).

In Abb. 5 ist die prozentuale Abweichung der Schutzvolumengröße aus numerischer Berechnung und physikalischer Modellierung, bezogen auf die experimentellen Werte, für die unterschiedlich porösen Doppelanordnungen dargestellt. Während bei undurchlässigen Windschutzstreifen die Größe der Schutzvolumen in weiten Bereichen um weniger als $\pm 10\%$ abweicht, steigen die Diskrepanzen mit zunehmender Durchlässigkeit der Bewuchsstreifen kontinuierlich an. Die numerischen Berechnungen überschätzen die Größe der windberuhigten Bereiche für niedrige Schutzwirkung und unterschätzen sie für größere Abstände und hohe Schutzwirkung.

Der Übergang zwischen einem durchgängig geschützten und einem nur teilweise geschützten Zwischenfeld wird bei den undurchlässigen und dichten Windschutzstreifenanordnungen gut modelliert, während der Abstand bei mitteldichten Windschutzstreifen für hohe Schutzwirkung wiederum unterschätzt und für niedrige Schutzwirkung überschätzt wird.

Mögliche Ursachen für diese Abweichungen liegen zum einen wahrscheinlich in der vereinfachten Modellierung der Porosität. Eine experimentelle Überprüfung der numerisch bestimmten k -Werte wäre angebracht, um sicherzugehen, dass diese auch wirklich die Porositäten der Windkanalmodelle wiedergeben. Zum andern sind sicherlich auch die starke Abnahme der turbulenten kinetischen Energie TKE in Hauptströmungsrichtung wie auch die zu Beginn der Messstrecke zu hoch angesetzten TKE-Werte für die Abweichungen mitverantwortlich. Die Turbulenz der Anströmung beeinflusst die vertikale Ausbreitung der an der Spitze der Windschutzstreifen initiierten Vermischungsschicht und damit die Größe der geschützten Bereiche, siehe Judd 1996. Hohe Turbulenz führt demnach zu kürzeren Schutzvolumen und umgekehrt.

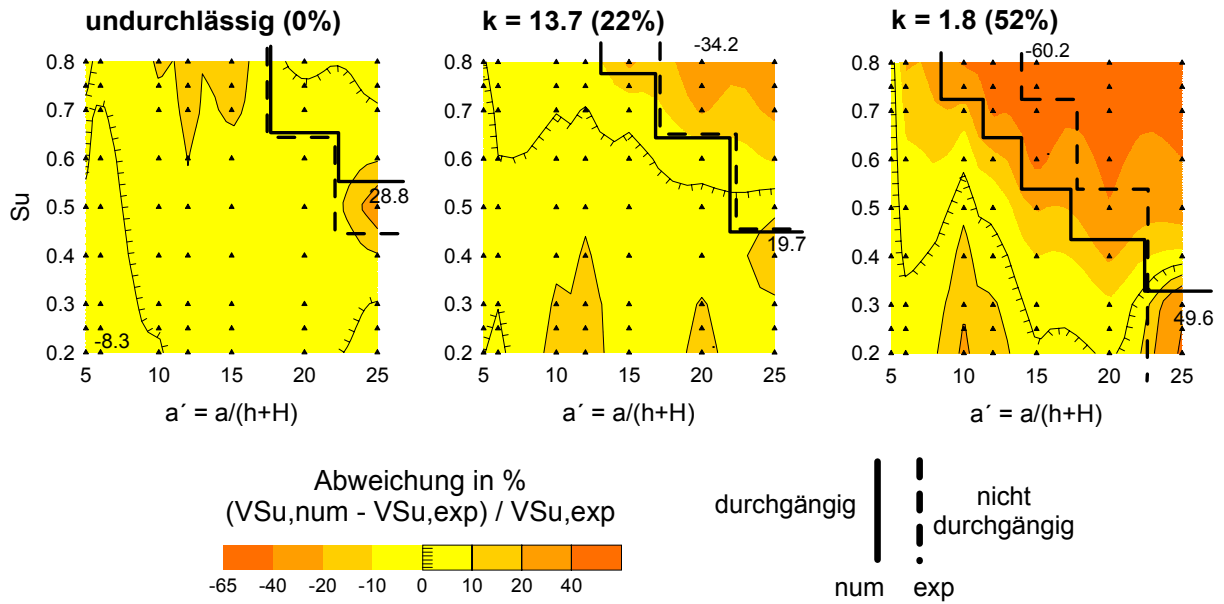


Abb. 5: Vergleich numerische Berechnung - Experiment: Prozentuale Abweichung der Schutzvolumengröße V_{Su} für unterschiedliche Porositäten ϕ bzw. k . ($\alpha = 40^\circ$, $H/h = 1$).

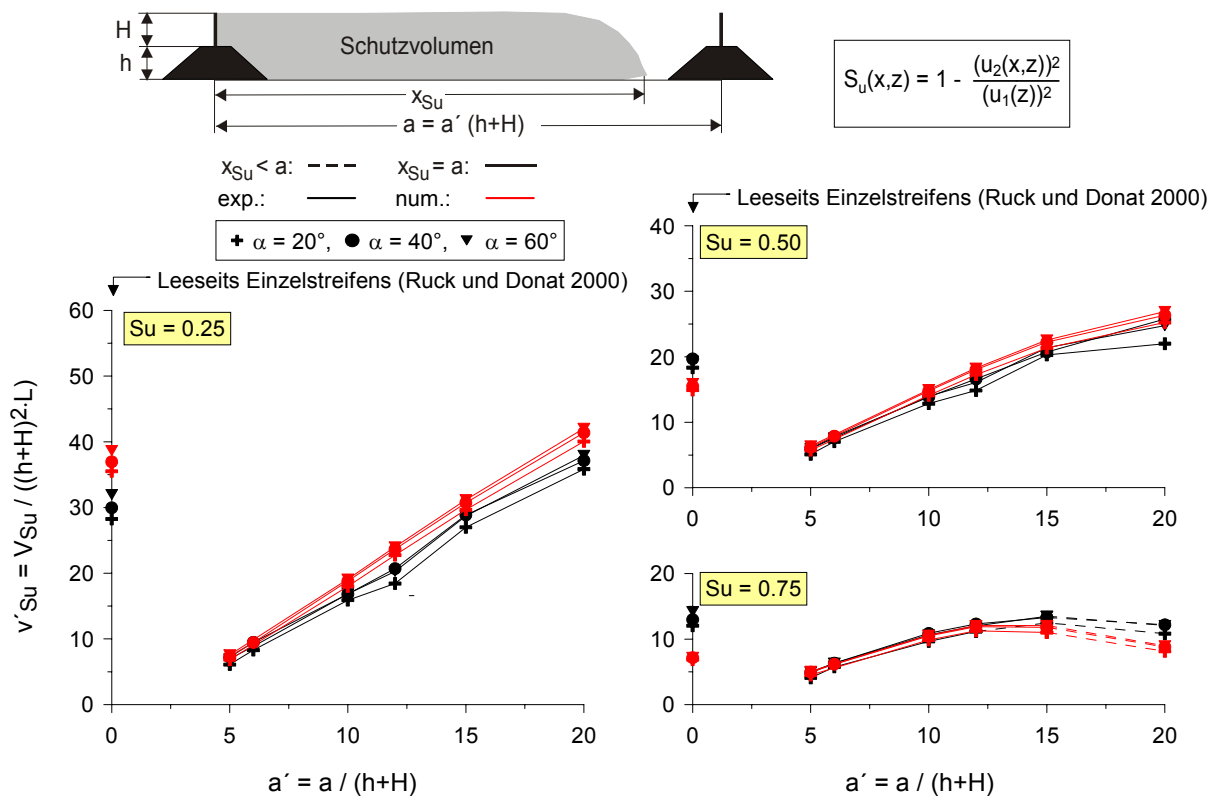


Abb. 6: Normierte Größe der Schutzvolumen $v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L)$ aus numerischer Berechnung und Experiment für unterschiedliche Wallwinkel α . ($\phi = 22\%$ bzw. $k = 13.7$, $H/h = 1$).

Einfluss des Wallwinkels auf den Windschutz

Schutzvolumen von Windschutzstreifen-Anordnungen mit unterschiedlichen Wallwinkeln $\alpha = 20^\circ$, 40° und 60° sind in Abb.6 in Abhängigkeit vom Abstand der beiden Streifen dargestellt. Abb.6 zeigt, dass der Wallwinkel nur einen geringen Einfluss auf die Schutzwirksamkeit von Windschutzstreifen ausübt. Der Vergleich numerischer und experimenteller Schutzvolumen weist, abgesehen von den zuvor beschriebenen Abweichungen zwischen experimentellen

und numerischen Ergebnissen bei porösen Windschutzstreifen (hier $\phi = 22\%$ bzw. $k = 13.7$), eine gute Übereinstimmung auf. Die Windkanalexperimente zeigen, dass sich Schutzvolumen zwischen Windschutzstreifen-Anordnungen mit Wallwinkel $\alpha = 40^\circ$ und $\alpha = 60^\circ$ sehr ähneln, ein eindeutiger Trend ist jedoch nicht erkennbar. Schutzvolumen zwischen Anordnungen mit flachem Winkel sind immer etwas kleiner. Die numerischen Berechnungen, welche frei von Messungs-Ungenauigkeiten sind, lassen erkennen, dass die Schutzvolumen-größe mit steigendem Wallwinkel leicht zunimmt.

Einfluss vom Verhältnis Bewuchshöhe zu Sockelwallhöhe auf den Windschutz

Die Auswirkungen von einem variierten Verhältnis Bewuchshöhe zu Sockelwallhöhe H/h auf die Größe der Schutzvolumen ist in Abb.7 in Abhängigkeit vom Streifenabstand aufgetragen. Sowohl die numerischen Vorhersagen als auch die Windkanalstudie zeigen, dass Schutzvolumen zwischen undurchlässigen Windschutzstreifen mit Wall ($H/h = 0.5, 1$ und 2) und ohne Wall sich ziemlich gleichen, Schutzvolumen zwischen Wällen ohne Bewuchsstreifen jedoch wesentlich kleiner sind. Die experimentellen Untersuchungen weisen wiederum, da die Abweichungen im Rahmen der erzielbaren Messgenauigkeit liegen, keinen generellen Trend für undurchlässige Windschutzstreifen mit und ohne Wall auf. Die Größe der numerischen Schutzvolumen streut etwas stärker als die der experimentellen. Sie nimmt generell mit steigendem H/h -Verhältnis zu und ist für Bewuchsstreifen ohne Wall am größten. Dies gilt auch für die Einzelstreifen. Somit kann numerisch nicht bestätigt werden, dass Einzelstreifen mit $H/h = 2$ die größten Schutzvolumen verursachen, siehe Ruck und Donat 2000, Ruck 2001.

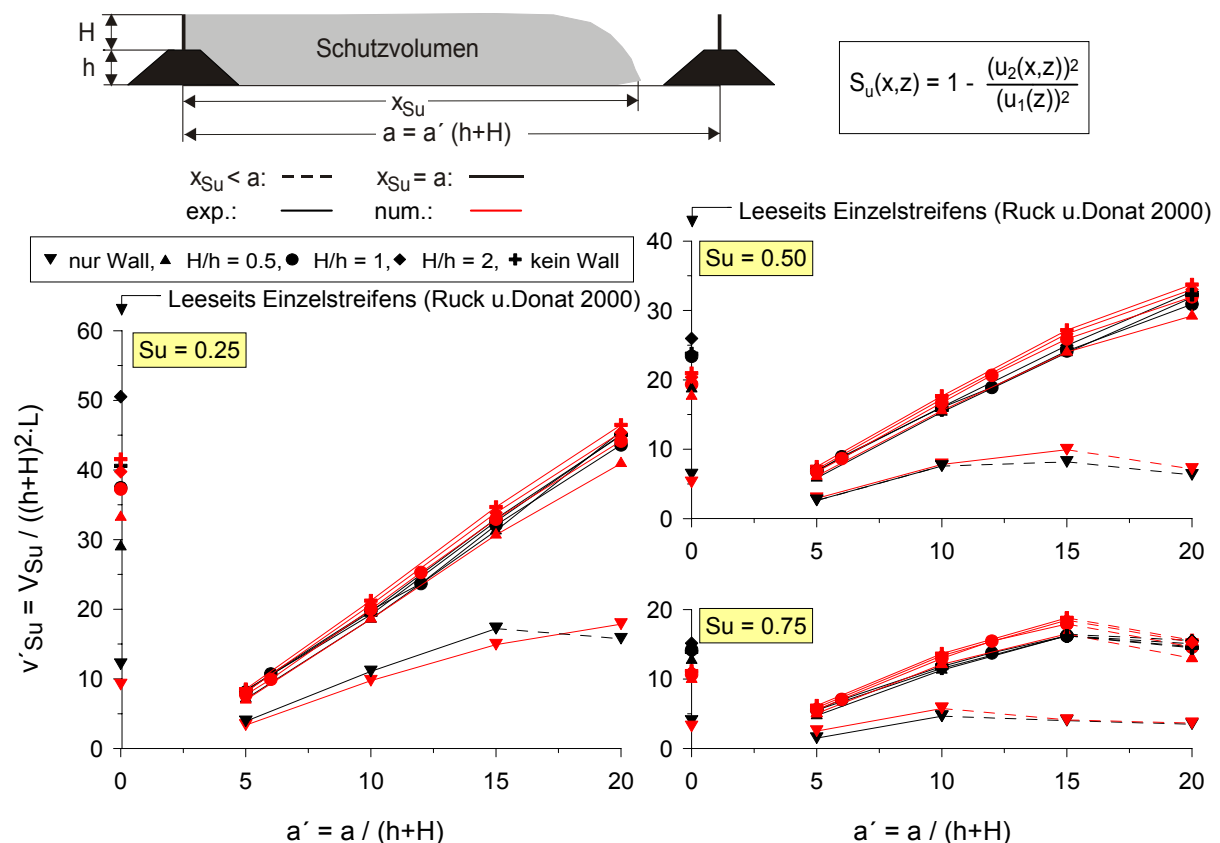


Abb. 7: Normierte Größe der Schutzvolumen $v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L)$ aus numerischer Berechnung und Experiment für unterschiedliche Höhenverhältnisse H/h ($\phi = 0\%$, $\alpha = 40^\circ$).

Zusammenfassung

Die in diesem Beitrag angestellten Vergleiche zeigen, dass durch numerische Simulationen mit FLOVENT V3.2 der Einfluss der vier experimentell untersuchten Parameter von doppelt-angeordneten Windschutzstreifen auf die Größe von Schutzvolumen tendenziell vorhergesagt werden kann. Quantitativ sind jedoch insbesondere für poröse Windschutzstreifen große Abweichungen festzustellen, die zum Teil sicherlich auf die gewählten Randbedingungen zurückzuführen sind. Der Einfluss von Wallwinkel und Verhältnis Bewuchshöhe zu Wallhöhe wird numerisch auch quantitativ gut wiedergegeben und kann die aus den Windkanaluntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse ergänzen.

Dankesworte

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) in Osnabrück für die gewährte Förderung eines Teils der Forschungsarbeiten im Rahmen des Projektes 18062 bedanken.

Literatur

- Frank, C., Ruck, B., 2002: "Strömungscharakteristika im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen", Proc. 10. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Universität Rostock, 10.-12. Sept. 2002, Paper 28
- Frank, C., Ruck, B., 2003a: "Influence of Belt Porosity on Wind Reduction Between Two Mound-Mounted Shelterbelts", Proc. of Physmod2003: International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena, Prato, Italy, 3.-5. Sept. 2003, pp. 70-77
- Frank, C., Ruck, B., 2003b: "Shelter Efficiency of Double-Arranged Windbreaks", Proc. of Int. Conf. "Wind Effects on Trees", Karlsruhe, 16.-18. Sept. 2003, pp. 65-72
- Judd, M.J., Raupach, M.R., Finnigan, J.J., 1996: „A Wind Tunnel Study of Turbulent Flow around Single and Multiple Windbreaks, Part 1: Velocity Fields“, Boundary-Layer Meteorology 80, 127-165
- Ruck, B., Donat, J., 2000: "Aerodynamisches Verhalten dünner Windschutzstreifen auf Wällen unterschiedlicher Geometrie - Experiment und numerische Studie", Proc. 8. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Universität München, Paper 42
- Ruck, B., 2001: "Efficiency of Shelterbelts on Mounds", Proc. des Workshops on 'Physical modeling of environmental flow and dispersion phenomena', University of Hamburg, September 2001