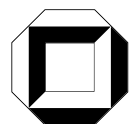


Dissertationsreihe am Institut für Hydromechanik
der Universität Karlsruhe (TH)
Heft 2005/1

Wirksamkeit von dünnen
Windschutzstreifen auf Sockelwällen
in luv- und leeseitiger Anordnung

Cornelia Frank



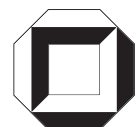
Cornelia Frank

**Wirksamkeit von dünnen Windschutzstreifen
auf Sockelwällen in luv- und leeseitiger Anordnung**

Dissertationsreihe am Institut für Hydromechanik
der Universität Karlsruhe (TH)
Heft 2005/1

Wirksamkeit von dünnen Windschutzstreifen auf Sockelwällen in luv- und leeseitiger Anordnung

von
Cornelia Frank



universitätsverlag karlsruhe

Dissertation, genehmigt von der
Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 2005
Referenten: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.h.c. Bodo Ruck, Prof. Dr.-Ing. habil. Alfred Leder

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

www.uvka.de

© Universitätsverlag Karlsruhe 2005
Print on Demand

ISSN 1439-4111
ISBN 3-937300-55-4

Wirksamkeit von dünnen Windschutzstreifen auf Sockelwällen in luv- und leeseitiger Anordnung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Cornelia Frank

aus Schwäbisch Hall

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Februar 2005

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.h.c. Bodo Ruck

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Alfred Leder

Karlsruhe 2005

Kurzfassung

Windschutzstreifen werden seit langem angelegt, um insbesondere landwirtschaftlich genutzte Flächen vor Windangriffen zu schützen. Aufgrund eines steigenden Umweltbewusstseins und infolge von erhöhten Anforderungen im Emissionsschutz gewinnen Windschutzanlagen heutzutage vor allem an der städtisch-industriellen Schnittstelle zunehmend an Bedeutung.

Als Windschutzanlagen kommen dabei oftmals einzelne linienförmige, ebenerdige (wallose) oder wallbehaftete Gehölzstreifen zum Einsatz, deren Wirksamkeit als hinreichend erforscht angesehen werden kann. Darüber hinaus werden jedoch immer häufiger ganze Industrieflächen von einer Windschutzanlage umgeben. Dies geschieht bevorzugt z. B. bei Deponien und Umschlagplätzen von Schüttgütern oder bei Produktionsstätten, bei denen unter Umständen sogar schwermetallhaltige Schwebstoffe erzeugt werden. Derartige Windschutzanlagen sind vor allem in dichtbesiedelten Gebieten anzutreffen. Industrieflächen werden windberuhigt, indem durch geeignete Windschutzanlagen eine Reduktion konvektiver Strömungsgrößen im Schutzgebiet erzielt wird. Dadurch werden gleichzeitig angrenzende Siedlungsgebiete vor starken Immissionen geschützt.

Im Gegensatz zu einzelnen linienförmigen Windschutzstreifen war der Wissensstand über die Strömungszustände bei einer Doppelanordnung, d.h. bei Anordnung je eines Streifens luv- und leeseits einer windzuberuhigenden Fläche, zu Beginn dieser Studie sehr lückenhaft. Durch systematische Windkanaluntersuchungen sollten daher grundlegende Beziehungen zwischen den relevanten Einflussparametern einer Windschutzanlage (Porosität der Bewuchsstreifen, Böschungswinkel, Verhältnis Bewuchshöhe zu Sockelwallhöhe und Abstand der begrenzenden Streifen) und deren Schutzwirksamkeit erfasst werden. Zu Validierungszwecken wurden auch numerische Berechnungen mit einem k - ϵ Turbulenzmodell durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Abstand der beiden Windschutzstreifen und die Porosität der Bewuchsstreifen einen großen Einfluss auf die Windschutzwirkung der Anlage ausüben, während der Einfluss der Sockelwallgeometrie gering ist. Ein variiertes Verhältnis von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe wirkt sich bei undurchlässigen Windschutzstreifen konstanter Gesamthöhe ebenfalls nur wenig aus. Die Schutzwirkung eines Walls ohne Bewuchs ist jedoch deutlich schlechter. Bei mitteldichten Bewuchsstreifen bewirkt ein variiertes Höhenverhältnis vor allem im nahen Lee der Streifen starke Veränderungen. Mit den abgeleiteten Schutzvolumen, welche die Größe geschützter Bereiche abhängig von der Art und vom Grad der Schutzwirkung beschreiben, wird dem planenden Ingenieur eine Bemessungsgrundlage für solch doppelt angeordnete Windschutzanlagen geliefert.

Abstract

Shelterbelts and windbreaks are used since a long period of time to protect man and his environment against wind attacks, to improve the microclimate, to prevent and control wind erosion and also to reduce dispersion. Due to a rising environmental awareness and augmented requirements in emission control, windbreaks play an important role, particularly in the urban and industrial domain.

In order to protect areas against wind attacks, not only single lines of windbreaks are erected at the windward side, but also windbreak systems surrounding whole areas or industrial sites. Thus, in many cases the area between can be conceived of as being protected by a windward and a leeward windbreak (double-arrangement). Since the horizontal extent of the wind shelter efficiency is usually assumed to be proportional to windbreak height, shelterbelts are often mounted on thrown-up earth walls (mounds) in order to obtain an increased shelter.

Preferentially, double-arranged windbreaks are erected e.g. around dumpsites, transshipment areas or industrial sites where bulk material is likely to be dispersed by the atmospheric flow. Thus, the wind activity over industrial sites can be calmed-down by an adequate windbreak arrangement yielding a maximum reduction of advective flow quantities in the protected zone between. An optimised layout of the wind shelter efficiency of such double-arranged windbreak systems allows an efficient reduction of immissions in adjacent densely populated areas.

The fluid mechanical principle of single line shelterbelts without mound is well understood. The knowledge about the wind shelter efficiency of mound-mounted shelterbelts is limited to single line windbreaks. There is a lack of knowledge regarding double-arranged systems. A systematic wind tunnel study and numerical calculations with a $k-\varepsilon$ -model were carried out in order to understand better the aerodynamic behaviour of double-arranged mound-mounted shelterbelts. Fundamental findings and relations between relevant windbreak structural parameters are given in order to define optimum shelter efficiency for the field between the windbreaks. These parameters are the distance between the windbreaks, the shelterbelt porosity, the angle of mound and the ratio of shelterbelt-height to mound-height.

The results show, that the distance between the windbreaks and the shelterbelt porosity affect strongly the shelter efficiency of windbreak systems, whereas the influence of the angle of mound is small. A variation of the ratio of shelterbelt-height to mound-height has little effect on the efficiency of impermeable shelterbelts (with and without mound). However, mounds without shelterbelts are less effective. For medium-dense shelterbelts, a varied height-ratio causes strong changes in the near lee of the windbreaks.

Dank

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik am Institut für Hydromechanik an der Universität Karlsruhe.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. B. Ruck für die stete wissenschaftliche und fachkundige Betreuung und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Prof. A. Leder danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Bei all meinen Kollegen möchte ich mich insbesondere für die freundliche und angenehme Atmosphäre bedanken. Es hat viel Spaß gemacht, mit Euch zusammen zu arbeiten. Harald und Armin danke ich besonders für die hilfreiche Unterstützung bei den Windkanaluntersuchungen, der Hilfe bei Computerproblemen und den vielen Gesprächen bei einer gemeinsamen Tasse Kaffee. Boris gebührt großen Dank für seine unentbehrliche Hilfe bei Problemen mit dem Lasersystem. Ikhwan, Patrick und Wilken danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit und für wertvolle Anregungen.

Danken möchte ich auch meinem Freund Martin für das Korrekturlesen des Manuskriptes und für die Geduld und die moralische Unterstützung vor allem während der Schlussphase der Arbeit.

Diese Untersuchung wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Optimierte Windberuhigung über stoffemittierenden Industrieflächen“, Az 18062, von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) in Osnabrück finanziell gefördert.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand des Wissens	3
2.1 Aerodynamik eines Windschutzstreifens.....	3
2.2 Ebenerdiger Einzelstreifen	5
2.2.1 Externe Struktur.....	5
2.2.2 Interne Struktur.....	6
2.2.3 Eigenschaften der Anströmung	8
2.2.4 Rauigkeit des Untergrundes	9
2.3 Ebenerdige Mehrfachanordnungen.....	9
2.4 Sockelwallbehäftete Einzelstreifen.....	11
3. Windkanalmodellierung	13
3.1 Beschreibung der atmosphärischen Grenzschicht.....	13
3.2 Modellgesetze	14
3.3 Atmosphärischer Grenzschichtwindkanal	16
3.4 Windschutzstreifenmodelle	18
3.5 Messtechnik	19
3.5.1 Prinzip der LDA	19
3.5.2 Verwendetes LDA-System	22
3.5.3 Durchführung der Messungen	22
3.6 Simulierte atmosphärische Grenzschicht.....	23
3.7 Systematik der Untersuchung	30
4. Numerische Modellierung	31
4.1 Mathematisches Modell	31
4.2 Angenommene Randbedingungen	35
4.3 Druckverlustkoeffizient k_r	36
5. Beurteilung der Wirksamkeit von Windschutzstreifen	39
5.1 Überblick: Beurteilungen in der Literatur.....	39
5.2 Angewandte Beurteilungsgrößen	41
5.3 Umrechnungen der verwendeten Schutzparameter.....	43
6. Einfluss des Windschutzstreifenabstandes	45
6.1 Reduktion der aerodynamischen Kraftwirkung.....	45
6.1.1 Ergebnisse Windkanal.....	45
6.1.2 Ergebnisse Numerik	48
6.2 Fußgängerwindkomfort	48
6.3 Veränderung des turbulenten vertikalen Impulsaustausches.....	49

6.4	Rezirkulationsgebiete	51
6.4.1	Ergebnisse Windkanal	51
6.4.2	Ergebnisse Numerik	52
6.5	Relative turbulente kinetische Energie	52
6.5.1	Ergebnisse Windkanal	52
6.5.2	Ergebnisse Numerik	53
6.6	Vergleich mit Literaturdaten	54
7.	Einfluss der Porosität der Bewuchsstreifen	57
7.1	Reduktion der aerodynamischen Kraftwirkung	57
7.1.1	Ergebnisse Windkanal	57
7.1.2	Ergebnisse Numerik	60
7.1.3	Vergleich mit Literaturdaten	62
7.2	Fußgängerwindkomfort	64
7.2.1	Ergebnisse Windkanal	64
7.2.2	Vergleich mit Literaturdaten	65
7.3	Veränderung des turbulenten vertikalen Impulsaustausches	66
7.3.1	Ergebnisse Windkanal	66
7.3.2	Vergleich mit Literaturdaten	67
7.4	Rezirkulationsgebiete	68
7.4.1	Ergebnisse Windkanal	68
7.4.2	Ergebnisse Numerik	69
7.4.3	Vergleich mit Literaturdaten	70
7.5	Relative kinetische Energie	70
7.5.1	Ergebnisse Windkanal	70
7.5.2	Ergebnisse Numerik	72
7.6	Diskussion	73
8.	Einfluss des Böschungswinkels	75
8.1	Reduktion der aerodynamischen Kraftwirkung	75
8.1.1	Ergebnisse Windkanal	75
8.1.2	Ergebnisse Numerik	77
8.2	Fußgängerwindkomfort	77
8.3	Veränderung des turbulenten vertikalen Impulsaustausches	78
8.4	Rezirkulationsgebiete	79
8.4.1	Ergebnisse Windkanal	79
8.4.2	Ergebnisse Numerik	81
8.5	Relative turbulente kinetische Energie	82
8.6	Diskussion	83
9.	Einfluss des Verhältnisses von Bewuchs- zu Wallhöhe	85
9.1	Reduktion der aerodynamischen Kraftwirkung	85
9.1.1	Ergebnisse Windkanal	85

Inhaltsverzeichnis	III
9.1.2 Ergebnisse Numerik	88
9.2 Fußgängerwindkomfort	89
9.3 Veränderung des turbulenten vertikalen Impulsaustausches	90
9.4 Rezirkulationsgebiete	92
9.4.1 Ergebnisse Windkanal	92
9.4.2 Ergebnisse Numerik	94
9.5 Relative turbulente kinetische Energie	95
9.5.1 Ergebnisse Windkanal	95
9.5.2 Ergebnisse Numerik	95
9.6 Diskussion	97
10. Formeln und Beispiele für Praxisanwendungen	99
10.1 Formeln zur Berechnung von Schutzvolumen V_{Su}	99
10.2 Anwendungsbeispiele	100
11. Zusammenfassung	103
Literaturverzeichnis	107
Anlagen	
Einfluss der Porosität des Bewuchsstreifens auf den Windschutz	
Stromlinien	113
Isolinien des Windschutzparameters S_u	120
Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel}	127
Isolinien des Komfortparameters f	134
Isolinien des Windschutzparameters $S_{u'w'}$	141
Einfluss des Sockelwallwinkels auf den Windschutz	
Stromlinien	148
Isolinien des Windschutzparameters S_u	156
Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel}	164
Isolinien des Komfortparameters f	172
Isolinien des Windschutzparameters $S_{u'w'}$	180
Einfluss des Verhältnisses Bewuchs- zu Wallhöhe auf den Windschutz	
Stromlinien	188
Isolinien des Windschutzparameters S_u	194
Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel}	200
Isolinien des Komfortparameters f	206
Isolinien des Windschutzparameters $S_{u'w'}$	212
Größe der Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit des Schutzparameters S_u für verschiedene Abstände zwischen den Windschutzstreifen	
	218

Abbildungsverzeichnis

Kapitel 2:

Abb. 2.1 Skizze des zweidimensionalen Strömungsfelds um einen langen, senkrecht angeströmten, porösen Windschutzstreifen (nach JUDD et al. 1996).

Kapitel 3:

Abb. 3.1 Vertikaler Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht (nach ETLING 2002)

Abb. 3.2 Teststrecke des atmosphärischen Grenzschicht - Windkanals

- a) Skizze Seitenansicht
- b) Skizze Blick gegen Strömungsrichtung
- c) Skizze Draufsicht mit LDA - System
- d) Photo

Abb. 3.3 Skizze der Windschutzstreifenmodelle und verwendete Nomenklatur

Abb. 3.4 Skizze zur Erläuterung eines LDA-Meßverfahrens (nach RUCK 1990)

Abb. 3.5 Skizze zum Interferenzstreifenmodell (nach RUCK 1990)

Abb. 3.6 Positionen der vertikalen Messprofile in Abhängigkeit vom Abstand a' .

Abb. 3.7 Simulierte atmosphärische Grenzschicht:
Zeitgemittelte horizontale Geschwindigkeit $u(z)$ ($z_{ref} = 0.05$ m, $u_{ref} = 3.2$ m/s)
a) Potenzansatz b) Logarithmischer Ansatz

Abb. 3.8 Simulierte atmosphärische Grenzschicht:
a) Bezogene Reynoldsschubspannung $u'w' / u_*^2$
b) Turbulenzintensität in Hauptströmungsrichtung $T_u(z)$
c) Turbulenzintensität in vertikaler Richtung $T_w(z)$

Abb. 3.9 Simulierte atmosphärische Grenzschicht: Integrales Längenmaß L_{ux}

Abb. 3.10 Simulierte atmosphärische Grenzschicht: Normierte Spektraldichteverteilung $S_{uu}(f)$

Kapitel 4:

Abb. 4.1 Vergleich der experimentell und numerisch simulierten atmosphärischen Grenzschichten:
a) Mittlere horizontale Geschwindigkeit u/u_{ref} , b) Turbulente kinetische Energie TKE
($z_{ref} = 5$ cm, $u_{ref} = 3.2$ m/s).

Abb. 4.2 Bestimmung der Druckverlustbeiwerte k_r : Aufbau des numerischen Windkanals und Geometrie der repräsentativen Bewuchsstreifenausschnitte.

Kapitel 5:

Abb. 5.1 Bezeichnungen zur Schutzbewertung
1 = Position in ungestörter Anströmung
2 = Position im durch die Windschutzanlage beeinflussten Strömungsbereich

Kapitel 6:

Abb. 6.1 Isolinien des Schutzparameters S_u und zugehörige Schutzvolumen $v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L)$ für verschiedene Windschutzstreifenabstände a und für den Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000, RUCK 2001).

$H/h = 1$, $\phi = 52$ %, $\alpha = 40^\circ$.

Abb. 6.2 Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Schutzparameter S_u für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen $a' = a / (h+H)$ und leeseits von Einzelstreifen für die Porositäten $\phi = 0$ % und $\phi = 52$ % bzw. $k_r = 1.8$. Links: Physikalische Modellierung; Rechts: Numerische Vorhersage.

$H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$.

Abb. 6.3 Isolinien des Komfortparameters f für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen a .
 $H/h = 1$, $\phi = 52$ %, $\alpha = 40^\circ$.

- Abb. 6.4 Schutzvolumen v'_f in Abhängigkeit vom Komfortparameter f für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen $a' = a / (h+H)$ und leeseits von Einzelstreifen für die Porositäten $\phi = 0\%$ und $\phi = 52\%$.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 6.5 Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w}$ für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen und für den Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000).
 $H/h = 1, \phi = 52\%, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 6.6 Isolinien der Korrelationen $u'w'_2$ für eine Doppelanordnung mit $a = 20 \cdot (H+h)$ und für den Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000).
 $H/h = 1, \phi = 52\%, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 6.7 Stromlinien $\psi \leq 0$ für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen a .
 $H/h = 1, \phi = 12\%, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 6.8 Numerisch ermittelte Rezirkulationsgebiete für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen a .
 $H/h = 1, k_r = 43.9, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 6.9 Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen a .
 $H/h = 1, \phi = 52\%, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 6.10 Numerisch ermittelte Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen a .
 $H/h = 1, k_r = 1.8, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 6.11 Relative Windgeschwindigkeit u_2/u_1 im Zwischenfeld zweier ebenerdiger Windschutzstreifen mit verschiedenen Abständen a und im Luv strukturgleicher Einzelstreifen für die Porositäten $\phi = 0\%$ und $\phi = 65\%$ (nach BLENK und TRIENES 1956).
- Abb. 6.12 Relative Windgeschwindigkeit u_2/u_1 im Zwischenfeld zweier sockelwallbehäfteter Windschutzstreifen mit verschiedenen Abständen a und im Luv strukturgleicher Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000) für die Porositäten $\phi = 0\%$ und $\phi = 52\%$ in Wallhöhe ($z = h$).
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.

Kapitel 7:

- Abb. 7.1 Isolinien des Schutzparameters S_u und zugehörige Schutzvolumen $v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L)$ für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ, a = 15 \cdot (h+H)$.
- Abb. 7.2 Schutzvolumen $v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L)$ in Abhängigkeit vom Schutzparameter S_u für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen für drei unterschiedliche Windschutzstreifenabstände $a' = a / (h+H)$.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 7.3 Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 7.4 Vergleich numerische Berechnung - Experiment: Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für unterschiedliche Porositäten ϕ bzw. k_r .
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 7.5 Vergleich numerische Berechnung - Experiment: Prozentuale Abweichung der Schutzvolumengröße v'_{Su} für unterschiedliche Porositäten ϕ bzw. k_r .
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 7.6 Isolinien des Komfortparameters f für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ, a = 12 \cdot (h+H)$.
- Abb. 7.7 Schutzvolumen v'_f in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 7.8 Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w}$ für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ, a = 15 \cdot (h+H)$.

- Abb. 7.9 Schutzvolumen $v'_{Su'w}$ in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 7.10 Stromlinien $\psi \leq 0$ für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ, a = 10 \cdot (h+H)$.
- Abb. 7.11 Rezirkulationsvolumen und Wiederanlegelängen in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 7.12 Numerisch ermittelte Wiederanlegelängen in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Porositäten k_r der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.
- Abb. 7.13 Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen. Die gestrichelten Linien stellen die relative kinetische Gesamtenergie $GKE = 1$ dar. Für Bereiche unterhalb dieser Linien gilt $GKE < 1$, für Bereiche oberhalb gilt $GKE > 1$.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ, a = 15 \cdot (H+h)$.
- Abb. 7.14 Numerisch ermittelte Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Porositäten k_r der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ, a = 15 \cdot (H+h)$.

Kapitel 8:

- Abb. 8.1 Isolinien des Schutzparameters S_u und zugehörige Schutzvolumen $v'_{Su} = V_{Su}/((h+H)^2 \cdot L)$ für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22\%, a = 15 \cdot (h+H)$.
- Abb. 8.2 Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22\%$ bzw. $k_r = 13.7$.
- Abb. 8.3 Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit von der Porosität ϕ (dem Druckverlustkoeffizienten k_r) der Bewuchsstreifen für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, a = 10 \cdot (h+H)$.
- Abb. 8.4 Isolinien des Schutzparameters f für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22\%, a = 15 \cdot (h+H)$.
- Abb. 8.5 Schutzvolumen v'_f in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22\%$.
- Abb. 8.6 Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w}$ für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22\%, a = 20 \cdot (h+H)$.
- Abb. 8.7 Schutzvolumen $v'_{Su'w}$ in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22\%$.
- Abb. 8.8 Rezirkulationsvolumen und Wiederanlegelängen in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22\%$.
- Abb. 8.9 Stromlinien $\psi \leq 0$ für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22\%, a = 10 \cdot (H+h)$.
- Abb. 8.10 Numerisch ermittelte Rezirkulationsgebiete für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, k_r = 13.7, a = 10 \cdot (H+h)$.
- Abb. 8.11 Numerisch ermittelte Wiederanlegelängen für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, k_r = 13.7$.
- Abb. 8.12 Experimentell und numerisch ermittelte Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22\%$ bzw. $k_r = 13.7, a = 15 \cdot (h+H)$.

Kapitel 9:

- Abb. 9.1 Isolinien des Schutzparameters S_u für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (h+H)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $\phi = 52\%$.
- Abb. 9.2 Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhen H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $\phi = 52\%$).
- Abb. 9.3 Unterschiede der Schutzvolumengröße $v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L)$ in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a und dem Schutzparameter S_u .
 $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$.
- Abb. 9.4 Vergleich numerische Berechnung – Experiment: Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $\phi = 52\%$ bzw. $k_r = 1.8$).
- Abb. 9.5 Isolinien des Komfortparameters f für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (h+H)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $\phi = 52\%$.
- Abb. 9.6 Schutzvolumen v'_f in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $\phi = 52\%$).
- Abb. 9.7 Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w}$ für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (h+H)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $\phi = 52\%$.
- Abb. 9.8 Schutzvolumen $v'_{Su'w}$ in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $\phi = 52\%$).
- Abb. 9.9 Stromlinien $\psi \leq 0$ für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (H+h)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $\phi = 52\%$.
- Abb. 9.10 Rezirkulationsvolumen und Wiederanlegelängen in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $\phi = 52\%$).
- Abb. 9.11 Numerisch ermittelte Wiederanlegelängen in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $k_r = 1.8$).
- Abb. 9.12 Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (H+h)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $\phi = 52\%$.
- Abb. 9.13 Numerisch ermittelte Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (H+h)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $k_r = 1.8$.

Kapitel 10:

- Abb. 10.1 Übereinstimmung der empirischen Formel mit gemessenen Werten für verschiedene Schutzparameter S_u .
- Abb. 10.2 Berechnungsbeispiel 1: Schutzvolumen V_{Su} bei variiertem Gesamthöhe des Windschutzstreifens.

Tabellenverzeichnis

Kapitel 3:

- Tab. 3.1 Eigenschaften des LDA-Systems
- Tab. 3.2 Simulierte atmosphärische Grenzschicht: Vergleich der Einzelstreifenuntersuchung [RUCK und DONAT 2000] mit dieser Studie.
- Tab. 3.3 Variierte Einflussparameter
- Tab. 3.4 Unveränderte Einflussparameter

Kapitel 4:

- Tab. 4.1 Empirische Konstanten der k - ϵ -Modellgleichungen
- Tab. 4.2 Druckverlustbeiwerte k_r für dünne, poröse Bewuchsstreifen.
($d_h = 0.006$ m, $\rho = 1.19$ kg/m³, $\nu = 1.84E-05$ Ns/m²).

Kapitel 5:

- Tab. 5.1 Böenfaktoren g aus verschiedenen Komfortkriterien [nach KOSS 2003, CATALDO und DURANONA 2003]
- Tab. 5.2 Umrechnungstabelle:
Schutzparameter S_u - Relative Veränderung und Reduktion der mittleren Geschwindigkeit.
- Tab. 5.3 Umrechnungstabelle:
Komfortparameter f - Relative Veränderung und Reduktion der Böenwindgeschwindigkeit.

Kapitel 7:

- Tab. 7.1 Abhängigkeit der maximalen Ausdehnung der Windreduktion u_2 / u_1 von der Porosität. Die Werte geben die Entfernung (unabhängig von der Höhe) in Vielfachen der Windschutzstreifenhöhe an, bei der die reduzierte Geschwindigkeit im Lee von Einzelstreifen bzw. im Zwischenfeld von Doppelanordnungen wieder 50 % (70%) der Anströmgeschwindigkeit erreicht.
- Tab. 7.2 Numerisch bestimmte maximale Rückströmgeschwindigkeiten für verschiedene Porositäten der Bewuchsstreifen.
 $\alpha = 40^\circ$, $H/h = 1$.

Kapitel 9:

- Tab. 9.1 Numerisch bestimmte maximale Rückströmgeschwindigkeiten und deren Lage für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (H+h)$, $\phi = 0$ % und $k_r = 1.8$.
- Tab. 9.2 Einfluss des H/h -Verhältnisses auf die Gesamtporosität bei mitteldichten Bewuchsstreifen.

Symbolverzeichnis

a	Abstand der Windschutzstreifen
a'	$= a / (h+H)$ = normierter Abstand der Windschutzstreifen
A	Fläche
b	Breite der Sockelwallkrone
B	Breite des Windschutzstreifens
c	Lichtgeschwindigkeit
C_μ, C_1, C_2, C_3	empirische Konstanten
d	Verdrängungsdicke
d_p	geschützte Distanz im Lee eines Windschutzstreifens
D	Durchmesser der Bohrungen
f	Windschutzparameter nach Gandemer
f	Frequenz
f'	von einem bewegten Teilchen wahrgenommene Lichtfrequenz
f_B	Brennweite
f_D	von einem Detektor wahrgenommene Lichtfrequenz
f_n	normierte Frequenz
f_0	Laserlichtfrequenz
g	Erdbeschleunigung
g	Böenfaktor
GKE	gesamte kinetische Energie
h	Sockelwallhöhe
h_r	Höhe der Rauigkeitselemente
H	Bewuchsstreifenhöhe
\vec{I}	Richtung der Laserstrahlausbreitung
\vec{I}_D	Detektionsrichtung
k	turbulente kinetische Energie
k	Korrekturfaktor
k_r	Druckverlustkoeffizient
L	Länge des Windschutzstreifens
L_c	charakteristische Länge
L_{ux}	integrales Längenmaß
MKE	mittlere kinetische Energie
n	Anzahl der Interferenzstreifen
p	zeitgemittelter Druck
p_{comf}	Komfortgrenzwert der Auftretenswahrscheinlichkeit
p^T	Auftretenswahrscheinlichkeit im Referenzzeitraum T
$P(t)$	Druck
Re	Reynoldszahl
Re_R	Rauhigkeits – Reynoldszahl
$R_{ii}(t)$	zeitliche Autokorrelationsfunktion
S_u	Schutzparameter (mittlere horizontale Geschwindigkeit)

$S_{ii}(f)$	zeitliches, eindimensionales Energiedichtespektrum
$S_{u'w'}$	Schutzparameter (vertikaler turbulenter Impulsfluss)
t	Zeit
T	Referenzzeitraum
T_u	Turbulenzintensität in Hauptströmungsrichtung
T_w	Turbulenzintensität in vertikaler Richtung
TKE	turbulente kinetische Energie
\bar{u}	Teilchengeschwindigkeitsvektor
u	zeitgemittelte Geschwindigkeitskomponente in Hauptströmungsrichtung (x- Richtung)
$u'(t)$	turbulenter Schwankungsanteil der Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung
u_c	charakteristische Geschwindigkeit
u_g	Böenwindgeschwindigkeit
u_{lim}	Grenzgeschwindigkeit
u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit
$u'w'$	Korrelationen der Geschwindigkeitsschwankungen (zeitgemittelt)
$U(t)$	Momentangeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung
v'	$= V / ((h+H)^2 \cdot L) =$ normiertes Schutzvolumen
V	Schutzvolumen
w	zeitgemittelte Geschwindigkeitskomponente in vertikaler Richtung (z-Richtung)
$w'(t)$	turbulenter Schwankungsanteil der Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung
$W(t)$	Momentangeschwindigkeit in vertikaler Richtung
x, y, z	kartesische Raumkoordinaten
y	Wandabstand
z_0	Rauhigkeitshöhe

Griechische Symbole

α	Profilexponent im Potenzgesetz
α	Böschungswinkel
β	zweiter Böschungswinkel
δ	Grenzschichtdicke
δ_{ij}	Kronecker Delta
Δf	Doppler-Signalfrequenz
Δf_E	Braggzellen-Differenzfrequenz
Δx	Interferenzstreifenabstand
ε	Dissipation
ϕ	Porosität des Bewuchsstreifens
φ	Halbwinkel der sich kreuzenden Laserstrahlen
κ	von Karmänsche Konstante

λ	Wellenlänge
μ	dynamische Viskosität
μ_T	Wirbelviskosität
ν	kinematische Viskosität
ρ	Dichte
$\sigma(u)$	Standardabweichung der mittleren Geschwindigkeit
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	empirische Konstanten
τ	Zeitversatz
τ_0	Wandschubspannung
ψ	Winkel zwischen dem Teilchengeschwindigkeitsvektor und der Winkelhalbierenden der beiden Laserstrahlrichtungen.

Indices

max	Maximum
min	Minimum
M	Modellwerte
N	Naturwerte
ref	Referenzgröße
rel	relative, auf ungestörte Anströmung bezogene Größe
1	ungestörte Anströmung
2	gestörte Anströmung
'	normierter Wert

1. Einleitung

Stürme und Orkane sind in unseren Breitengraden die Naturkatastrophen, welche die meisten volkswirtschaftlichen Schäden verursachen. Aufgrund der Erwärmungstendenz der Atmosphäre ist in Zukunft mit einem verstärkten Auftreten dieser Extremwinde zu rechnen. Ein beträchtliches Schadensrisiko stellen bei diesen Prognosen offen gelagerte oder deponierte Stoffe dar, die durch starke Winde verweht d.h. ferntransportiert werden können. Typische Beispiele für stoffemittierende Industrieflächen sind Deponien oder Umschlagplätze von Schüttgütern, wie Erze, Kohle, Salze, Filterstäube, Fasermaterialien, Baustoffe usw., aber auch Produktionsstätten wie Hüttenwerke und Zementfabriken, deren Betrieb mit der Erzeugung von z.T. schwermetallhaltigen Schwebstäuben einhergeht. Derartige Anlagen führen nicht selten zu erhöhten Immissionen in angrenzenden Wohngebieten.

Um eine Schädigung von Menschen, Sachwerten und Umwelt durch die Verwehung dieser Stoffe zu verhindern, müssen zukünftig verstärkt natürliche Windschutzstreifen angelegt werden. Diese setzen die Windaktivität über industriellen Betätigungsflächen herab und verhindern so die Verwehung. Für die effiziente Auslegung von Windschutzstreifen ist ein umfassendes Grundlagenwissen über die aerodynamische Wechselwirkung zwischen Windschutzstreifen und atmosphärischer Anströmung notwendig. Trotz zahlreicher Untersuchungen im Freiland und im Modell ist ein volles Verständnis der Aerodynamik von Windschutzanlagen noch immer nicht vorhanden. Während das strömungsmechanische Prinzip von linienförmigen Einzelstreifen als hinreichend untersucht betrachtet werden kann, ist das Wissen über doppeltangeordnete Windschutzstreifen noch sehr lückenhaft bzw. existiert überhaupt nicht für poröse Windschutzstreifen (z.B. Gehölzschutzstreifen), die, wie heute häufig zu sehen, auf Erdwälle gepflanzt werden.

Im Rahmen einer detaillierten Windkanalstudie wurde deshalb das Grundlagenwissen zur strömungsmechanischen Bemessung von natürlichen, dünnen Windschutzstreifen auf Erdwällen erarbeitet, die eine industrielle Betätigungsfläche entweder zweiseitig eingrenzen (luv- und leeseitige Anordnung, senkrecht zur Hauptwindrichtung) bzw. ganz umgeben. Die Effektivität des Windschutzes im Zwischenfeld der Windschutzstreifen wurde durch systematische Variation verschiedener Einflussparameter erfasst. Bei diesen Einflussparametern handelt es sich um den Abstand der beiden Streifen zueinander, die Bewuchsstreifenporosität, den Böschungswinkel und das Verhältnis von Bewuchshöhe zu Sockelwallhöhe. Durch die systematische Vermessung der Strömungsfelder mit Hilfe eines zweidimensionalen Laser-Doppler-Anemometrie-Systems konnten mittlere Windgeschwindigkeiten sowie Turbulenz- und Austauschgrößen erfasst werden. Die Bewertung der Wirksamkeit von Windschutzanlagen erfolgte anhand unterschiedlich definierter Schutzparameter, welche u.a. die Änderung des horizontalen Impulsflusses bzw. der aerodynamischen Kraft-

wirkung auf in der Strömung befindliche, umströmte Körper oder die Änderung des vertikalen Impulsaustausches beschreiben. Darüber hinaus wurden Schutzvolumen bestimmt, mit Hilfe derer die Größe windgeschützter Bereiche zwischen den Windschutzstreifen in Abhängigkeit der Streifeneigenschaften berechnet werden kann.

Die experimentellen Untersuchungen im atmosphärischen Grenzschichtwindkanal wurden zusätzlich durch numerische Strömungsberechnungen mit einem k - ϵ -Turbulenzmodell abgesichert bzw. ergänzt.

Eine Zusammenfassung neuerer Literatur zum Thema Windschutzstreifen wird zunächst in Kap.2 gegeben. In Kap.3 folgt eine kurze allgemeine Beschreibung der natürlichen atmosphärischen Grenzschicht sowie der Modellgesetze, die bei dieser Windkanaluntersuchung eingehalten werden müssen, um die Übertragbarkeit der Modellergebnisse auf die Natur zu gewährleisten. Außerdem werden die experimentellen Einrichtungen und Methoden beschrieben, die Eigenschaften der simulierten Grenzschicht dargestellt und ein Überblick über das Versuchsprogramm gegeben. In Kap.4 wird auf die Grundlagen des angewandten numerischen Modells und auf die gewählten Randbedingungen eingegangen. Kap.5 befasst sich mit der Beurteilung der Wirksamkeit einer Windschutzanlage. Die Ergebnisse der einzelnen Parametervariationen werden dann in Kap.6 bis Kap.9 dargestellt, soweit möglich mit Literaturangaben verglichen und diskutiert. Die Anwendbarkeit der Ergebnisse in der Praxis wird in Kap.10 anhand von zwei Beispielen gezeigt. Kap.11 schließt mit einer Zusammenstellung der wesentlichen Ergebnisse diese Arbeit ab.

2. Stand des Wissens

Bereits seit Jahrhunderten werden Gehölzschutzstreifen bevorzugt in windreichen Gebieten angelegt, um Flächen vor Windangriffen zu schützen. Nach MÜLLER (1989) wurde z.B. im norddeutschen Raum bereits seit dem 16. / 17. Jahrhundert die Eignung von Wallhecken zum Schutz vor Bodenerosion erkannt und in der Praxis angewandt. Im 20. Jahrhundert wurden zahlreiche Untersuchungen sowohl im Freiland als auch im Modell durchgeführt. Bei den frühen Arbeiten handelt es sich vorwiegend um Studien aus dem forst- und agrarwissenschaftlichen Bereich, in neuerer Zeit kommen Untersuchungen auch vermehrt aus dem landschafts- und städteplanerischen Sektor.

Die Suche nach der optimalen Windschutzanordnung wird durch wechselnde Rahmenbedingungen erschwert. Trotz zahlreicher Untersuchungen auf dem Gebiet des Windschutzes ist ein volles Verständnis der Aerodynamik von Windschutzanlagen immer noch nicht vorhanden; dies gilt insbesondere für auf Wällen angeordnete Bewuchsstreifen. Zusammenfassungen über die vielfältigen Arbeiten im Bereich des Windschutzes wurden u.a. von VAN EIMERN et al 1964, HEISLER und DEWALLE 1988, McNaughton 1988 und Cleugh 1998 verfasst.

2.1 Aerodynamik eines Windschutzstreifens

Bei Windschutzstreifen handelt es sich oftmals entweder um geradlinige Baum- und Strauchreihen oder aber um künstliche Hindernisse wie Zäune. Sie stellen für die Anströmung poröse Hindernisse dar. Ein Teil der Anströmung durchdringt den Windschutzstreifen mit verminderter Geschwindigkeit, ein Teil wird nach oben abgedrängt und überströmt ihn mit erhöhter Geschwindigkeit. Die Luftströmung wird im bodennahen Bereich abgebremst und der Streifen bietet dadurch bis zu einer gewissen luv- und leeseitigen Distanz Schutz. Ein Windschutzstreifen übt eine Widerstandskraft auf das Windfeld aus, was zu einem Impulsverlust in der inkompressiblen Luftströmung führt [RAINE und STEVENSON 1977]. Die Art und Weise, in der ein Windschutzstreifen die Windgeschwindigkeit und die turbulente Strömung verändert, bestimmt seine Schutzwirksamkeit [WANG und TAKLE 1997].

Zu Beginn werden in diesem Kapitel die grundlegenden Strömungsmuster um einen Windschutzstreifen und die daraus resultierenden unterschiedlichen Luftströmungsregionen beschrieben. Sechs strömungsmechanisch unterschiedliche Regionen einschließlich vertikaler Profile der mittleren Geschwindigkeiten um einen porösen Einzelstreifen (zweidimensionaler Fall: Anströmung wirkt senkrecht auf einen langen, einheitlichen Windschutzstreifen) sind in Abb.2.1 nach JUDD et al. 1996 dargestellt. Ähnliche Beschreibungen von aerodynamisch verschiedenen Strömungsregionen

sind beispielsweise in PLATE 1971, RAINE und STEVENSON 1977 und CLEUGH 1998 zu finden.

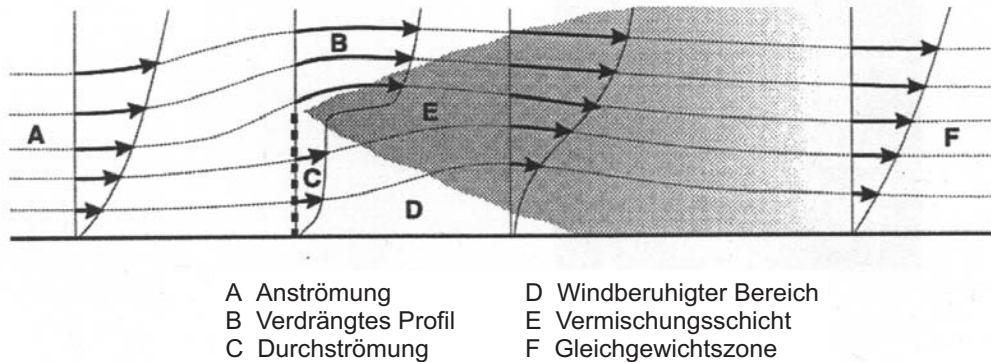


Abb. 2.1 Skizze des zweidimensionalen Strömungsfelds um einen langen, senkrecht angeströmten, porösen Windschutzstreifen (nach JUDD et al. 1996)

Die Anströmung (A in Abb.2.1) wird bestimmt durch die atmosphärische Stabilität und die Oberflächenrauigkeit des Geländes. Ab einer luvseitigen Entfernung zum Windschutzstreifen von ungefähr 5facher Streifenhöhe ($x = -5H$) verlangsamt sich die Luftströmung in Bodennähe ($z < H$, mit $H =$ Höhe des Windschutzstreifens) und divergiert. Ein Teil der Luft strömt durch den porösen Streifen und bildet die Region der Durchströmung („bleed flow“, C in Abb.2.1). Die Geschwindigkeit in diesem Bereich ist aufgrund des Widerstands, der vom Streifen auf die Strömung ausgeübt wird, verringert. Der andere Teil der Luft strömt über den Windschutzstreifen (B in Abb.2.1). Die Durchlässigkeit der Streifen bestimmt dabei das Verhältnis von durch- zu überströmender Luft. Aus Kontinuitätsgründen muss die Konvergenz oberhalb des Streifens durch eine Zunahme der Windgeschwindigkeit ausgeglichen werden. Die Kombination aus reduzierter Geschwindigkeit hinter dem Windschutzstreifen und erhöhter Geschwindigkeit oberhalb führt zu einem charakteristischen Knick im Windprofil (Abb.2.1).

Ein windberuhigter Bereich (D in Abb.2.1) bildet sich im Lee des Streifens aus. Er besitzt eine annähernd dreieckige Form, deren Grenzen durch den Streifen selbst, den Boden und einer stromabwärts schräg nach unten verlaufenden Linie, die von der Oberkante des Streifens ausgeht und zwischen $x = 3H$ und $x = 7H$ auf den Grund auftrifft, bestimmt werden. Die minimale Geschwindigkeit u_{\min} tritt in dieser beruhigten Zone auf. Die Turbulenz in diesem Bereich wird hauptsächlich von der Durchströmung des Windschutzstreifens beeinflusst und hängt folglich von der gesamten Streifen-Morphologie ab, wie z.B. von der vertikalen Struktur und der Bewuchsdichte. Die Abmessungen und Turbulenzeigenschaften der beruhigten Zone werden jedoch bis zu einem gewissen Grad auch durch die Eigenschaften der Anströmung beeinflusst. Die turbulenten Wirbel in der Durchströmungszone und im beruhigten Bereich sind

normalerweise kleiner und weniger energiereich als die in der ungestörten Anströmung oder in der leeseitigen Vermischungszone.

Oberhalb und stromab der beruhigten Zone bildet sich eine turbulente Luftschicht aus: die Vermischungsschicht (E in Abb.2.1). Diese geht letztendlich ($x \gg 10$) in eine Gleichgewichtszone (F in Abb.2.1) über, in welcher sich das ungestörte Windprofil der Anströmung wieder einstellt. Die Vermischungsschicht entsteht an der Oberkante des Windschutzstreifens, wo das Geschwindigkeitsprofil stark verzerrt ist, und breitet sich stromab in vertikaler Richtung allmählich aus. Die Vermischungsschicht, welche oftmals auch als Nachlaufzone bezeichnet wird, trifft bei ca. $x = 5H$ auf den Boden auf.

Es sei an dieser Stelle noch darauf hingewiesen, dass die bisher angegebenen Werte Näherungswerte sind. Die Abmessungen und Positionen der Bereiche werden mehr oder weniger stark durch die Form und Struktur der Windschutzstreifen wie auch durch andere Rahmenbedingungen beeinflusst und können somit natürlich von den angegebenen Werten abweichen.

2.2 Ebenerdiger Einzelstreifen

Das Windfeld hinter geradlinigen, walllosen Einzelstreifen, welche auf ebenem Gelände stehen, wird mehr oder weniger stark beeinflusst durch folgende Faktoren:

- Die externe Struktur: Abmessungen (Höhe, Breite und Länge) und Form des Streifens (insbesondere bei breiten Streifen, Kantenausbildung).
- Die interne Struktur (Porosität des Streifens, Porositätsverteilung, Größe und Form der Öffnungen)
- Die Eigenschaften der Anströmung (Windgeschwindigkeit, Anströmrichtung, Schichtungszustand der Atmosphäre, Verhältnis Grenzschichtdicke zu Hindernisdicke)
- Die Rauigkeit des Untergrundes (sowohl im Luv als auch im Lee).

Eine umfassende und detaillierte Literaturzusammenfassung über den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf den Windschutz wurde von HEISLER und DEWALLE 1988 zusammengestellt. Im folgenden werden daher vorwiegend neuere Untersuchungen aufgeführt.

2.2.1 Externe Struktur

Windschutzstreifen beeinflussen die Strömung bis zu einer gewissen luv- und leeseitigen Entfernung. Die Länge dieser Strecken wird üblicherweise proportional zur Streifenhöhe angenommen [HEISLER und DEWALLE 1988].

Der Einfluss der Streifenlänge (quer zur Anströmung) wurde von GANDEMER 1981 im Windkanal untersucht. Die Größe geschützter Flächen (in der Höhe $z = 0.3H$) nimmt erwartungsgemäß mit der Streifenlänge zu. Eine seitliche Umströmung führt zu einer annähernd halbelliptischen Form der geschützten Flächen. Studien über diverse Kantenausbildungen wurden ebenfalls von GANDEMER 1979, 1981 durchgeführt.

LIEFF 1993 führte Modellversuche an dreidimensionalen, in Hauptströmungsrichtung porösen Streifen durch. Er beobachtete keine prinzipiellen Veränderungen der Strömungsfelder bei einer Breitenvariation (in Strömungsrichtung) von $0.125H$ bis $1H$. Eine zusätzliche Vertikalporosität bewirkt eine Verschiebung der Ablösegebiete nach stromab.

Unterschiedliche Breiten eines Streifens (in Strömungsrichtung) wurden von WANG et al. 2001 numerisch untersucht: $0.1H < B < 10H$. Die Position des Geschwindigkeitsminimums verschiebt sich demnach mit zunehmender Breite zum Streifen hin und kann bei sehr breiten Streifen in größeren Höhen sogar innerhalb des Windschutzstreifens auftreten. Die Größe der Windreduktion und die Länge des geschützten Bereichs verändern sich dabei nur leicht.

WANG und TAKLE 1997b, WANG et al. 2001 untersuchten numerisch auch den Einfluss der äußeren Form eines Windschutzstreifens auf dessen Schutzwirkung. Es wurden nur geringe Unterschiede in der leeseitigen Windreduktion bei sieben sehr unterschiedlichen Formen festgestellt und der Einfluss auf die Länge des geschützten Bereichs ist demnach sogar vernachlässigbar.

2.2.2 Interne Struktur

Mit abnehmender Durchlässigkeit eines Windschutzstreifens verringert sich der Anteil der Strömung, welcher den Streifen durchdringt, und die Widerstandskraft nimmt zu. Die Anströmung wird dabei in zunehmendem Maße nach oben abgelenkt [RAINE und STEVENSON 1977]. Unterhalb einer bestimmten Durchlässigkeit, d.h. bei dichten bis undurchlässigen Streifen, bildet sich eine Region mit abgelöster Strömung im Lee des Streifens aus [PERERA 1981, WANG und TAKLE 1995, FANG 1997, RUCK und LIEFF 1997]. Je dichter der Streifen ist, umso ausgeprägter zeigt sich auch der Wirbel in der Ablösezone und umso steiler verläuft die Trennstromlinie bei Annäherung an den Wiederanlegepunkt [RAINE und STEVENSON 1977].

NORD 1991 führte Feldmessungen mit Gill-Anemometern an natürlichen Windschutzstreifen unterschiedlicher Porosität und zu verschiedenen Jahreszeiten durch. Insbesondere der Vergleich von Sommer- und Wintermessungen zeigt, dass im Sommer im Lee der dichten Windschutzstreifen höhere Windreduktionen beobachtet werden als im Winter, wenn dieselben Streifen im unbelaubten Zustand eine höhere Porosität besitzen. Eine Beurteilung des Porositätseinflusses durch einen Vergleich

der Messungen an unterschiedlichen Hecken wird, wie bei Naturuntersuchungen allgemein üblich, erschwert durch gleichzeitig wechselnde Rahmenbedingungen (Breite, Höhe, vertikaler Aufbau der Streifen usw...).

Numerische Untersuchungen über den Einfluss der Porosität auf das Windfeld wurden von WANG und TAKLE 1995 durchgeführt. Ihre Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten von BRADLEY und MULHEARN 1983 und von FINNIGAN und BRADLEY 1983 für Streifen mit $k_r = 2.0$. (Diese experimentellen Ergebnisse wurden übrigens auch von WILSON 1985 zur Validierung seiner numerischen Modellierung herangezogen, wobei die Übereinstimmung nicht so gut war. Mögliche Ursachen wurden in WILSON und MOONEY 1997 und TAKLE und WANG 1997 diskutiert). Den Berechnungen von WANG und TAKLE 1995 zufolge nimmt die Geschwindigkeitsreduktion mit abnehmender Porosität zu, was durch eine Vielzahl von Untersuchungen bestätigt wird (siehe HEISLER und DEWALLE 1988), gleichzeitig verringert sich jedoch die luvseitig geschützte Distanz stark. Letzteres wurde auch früher z.B. in den sehr häufig zitierten Naturuntersuchungen von NÄGELI 1945 festgestellt, wird jedoch insbesondere durch neuere Untersuchungen (z.B. RAINE und STEVENSON 1977, LIEFF 1993, WILSON 1995) zum Teil widerlegt, worauf in Kap.7.1 noch näher eingegangen wird.

BOLDES et al. 2001 führten in der Natur Messungen im nahen Lee ($x \leq 3H$) von ein- und zweireihigen krautartigen Schutzstreifen durch, welche in einem Weizenfeld standen. Sie beschreiben neben den Veränderungen der mittleren Geschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten auch die Verteilung von Schräge und Kurtosis. In BOLDES et al. 2002 werden die Ergebnisse der natürlichen Schutzstreifen mit Messungen hinter zwei hölzernen Lattenzäunen (beide $\phi = 50\%$, unterschiedliche vertikale Verteilung) verglichen. Des Weiteren wird der Einfluss auf den Weizenkornenertrag und den Ernteindex (definiert als das Verhältnis von Korngewicht zum Gesamtgewicht der Pflanze) beschrieben.

Die Auswirkungen von porösen Zäunen auf die Erosion kleiner Sandpartikel von einer dreieckförmigen prismatischen Sandhalde wurde von LEE et al. 2002 durch Visualisierungsaufnahmen veranschaulicht. Die abnehmende Schutzwirkung der Zäune mit zunehmender Porosität zeigt sich in einer Abnahme der Schwellengeschwindigkeit (die Windgeschwindigkeit, bei der eine Partikeldrift einsetzt).

PARK und LEE 2003 befassten sich in einer experimentellen Studie mit dem Einfluss von unterschiedlich porösen Zäunen auf die Druckverteilung entlang des Bodens und über ein stromab liegendes zweidimensionales dreieckförmiges Kohlenhaldemodell. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die Porosität der Zäune den Druckverlauf zwischen Zaun und Halde stark und stromab der Halde leicht beeinflusst. Ein zusätzlich im Lee der Halde angeordneter zweiter Zaun (sozusagen eine Doppelanordnung) verändert nur minimal den Druckverlauf stromauf bis zur Halde. Eine Naturuntersuchung zum

Druckverlauf am Boden um einen langen, porösen Zaun wurde von WILSON 1997 durchgeführt.

Natürlich übt nicht nur die Höhe der eigentlichen Porosität einen Einfluss auf den Windschutz aus, sondern auch die Größe und Form der Öffnungen sowie deren Verteilung über den Windschutzstreifen.

Dieser Aspekt wird u.a. von GANDEMER 1981 behandelt. Er beobachtete bei Windschutzstreifen, deren Porosität mit der Höhe abnimmt, in der Höhe $z = 0.3H$ eine Abnahme der Größe stark geschützter Flächen und eine Zunahme der Größe schwach geschützter Flächen, verglichen mit einem einheitlichen Streifen derselben Gesamtporosität. Bei Streifen mit nach oben zunehmender Porosität verhält sich die Größe der windberuhigten Flächen entsprechend umgekehrt. Maßgebend für den Komfort im nahen Lee ist seiner Studie nach somit die Durchlässigkeit im unteren Abschnitt des Windschutzstreifens.

WILSON 1987 untersuchte sowohl experimentell als auch numerisch 50 % poröse Streifen mit unterschiedlicher Porositätsverteilung (gleichmäßig sowie zu- und abnehmender vertikaler Gradient): Die Porositätsverteilung beeinflusst vor allem den Windschutz im nahen Lee des Streifens im bodennahen Bereich, wo bei unten dichteren Streifen eine Verstärkung der Windreduktion um 10 % - 15 %, verglichen mit dem einheitlichen Streifen, beobachtet wurde. Dies geht jedoch ebenfalls mit einer leichten Verringerung der Windreduktion weiter stromab einher. Insgesamt ist der Einfluss seiner Meinung nach eher gering.

Eine Schwierigkeit bei breiten natürlichen Windschutzstreifen liegt immer auch in der Beschreibung ihrer dreidimensionalen aerodynamischen Struktur. Um die räumliche Struktur eines zweireihigen grünen Eschen-Windschutzstreifens genauer zu erfassen, führten ZHOU et al. 2002 Messungen in der Natur durch. Sie stellten mathematische Gleichungen zur Berechnung der vegetativen Oberflächendichte SAD (definiert als vegetative Oberfläche pro Canopy - Volumeneinheit) und der kubischen Dichte CD (definiert als vegetatives Volumen pro Canopy - Volumeneinheit) für die vier unterschiedlichen Baumbestandteile Stamm, Äste, Blätter und Samen auf. Diese Gleichungen können u.a. dazu benutzt werden, um die Struktur solcher Eschen-Windschutzstreifen numerisch naturgetreuer zu modellieren.

2.2.3 Eigenschaften der Anströmung

NORD 1991 fand bei ihrer Feldstudie an natürlichen Bewuchsstreifen heraus, dass eine Zunahme der Anströmgeschwindigkeit zu einer Erhöhung der relativen Windgeschwindigkeit führt, d.h. zu einer Abnahme der Schutzeffizienz. Schräge Anströmung verringert nicht nur die Schutzwirkung, sondern bewirkt auch eine Veränderung der Windrichtung im Lee der Bewuchsstreifen.

FANG 1997 untersuchte den Einfluss des Verhältnisses von Grenzschichthöhe zur Höhe eines 30 % porösen Zauns, δ/H , mit Hilfe einer Large-Eddy Simulation und stellte fest, dass eine Veränderung dieses Parameters so gut wie keine Auswirkung auf die Wiederanlegelänge hat, die Geschwindigkeit oberhalb des Zauns jedoch mit zunehmendem δ/H -Verhältnis ansteigt.

Die numerische Modellierung von WANG et al. 2001 zeigt eine Abnahme der Länge des geschützten Bereiches mit zunehmender Schräge der Anströmung über die gesamte Höhe eines mitteldichten Windschutzstreifens, wobei der Einfluss der Windrichtung mit Annäherung an den Boden zunimmt.

Eine verringerte Schutzwirkung bei schräger Anströmung wird auch von WILSON 2004a im Luv eines künstlichen Zaunes beobachtet. Eine Abnahme der Effektivität seines Zaunes wurde auch bei stabiler und instabiler Schichtung (im Vergleich zur neutralen Schichtung) beobachtet, zumindest solange die Anströmung annähernd senkrecht ($\pm 30^\circ$) auf den Zaun erfolgt. Um RANS Windmodelle zu evaluieren, wurde der Einfluss von schräger Anströmung und von Schichtungszuständen auch numerisch untersucht [WILSON 2004b]. Die Ergebnisse seiner Felduntersuchung werden dabei für die Reduktion der mittleren Windgeschwindigkeit tendenziell bestätigt, weichen aber von den numerischen Ergebnissen insbesondere für schräge Anströmung sowie für Windgrößen höherer Ordnung stark ab.

2.2.4 Rauigkeit des Untergrundes

ARGENT 1992 beschäftigte sich mit der Frage, inwiefern ein im Lee eines Zauns angeordneter Pflanzenbestand die Schutzwirksamkeit des Zauns verändert. Er folgerte aus seiner Untersuchung, dass der Bestand keinen gravierenden Einfluss ausübt, wenn die Rauigkeit im Luv des Zauns vergleichbar mit der Rauigkeit des Pflanzenbestands ist. Ist die Rauigkeit des Pflanzenbestands jedoch wesentlich größer als die der luvseitigen Fläche, sollte der Bestand bei der Bestimmung der Schutzwirkung mitberücksichtigt werden.

Die Oberflächenrauigkeit im Luv eines Streifens beeinflusst die Turbulenz der Anströmung, die wiederum das vertikale Ausbreitungsverhalten der Vermischungsschicht mitbestimmt und somit auch die Länge der geschützten Bereiche im Lee. Erhöhte Turbulenz der Anströmung führt zu einer Verkürzung der geschützten Bereiche [JUDD 1996, CLEUGH 1998].

2.3 Ebenerdige Mehrfachanordnungen

Trotz der praktischen Bedeutung von Mehrfachanordnungen sind Untersuchungen über mehrere parallel verlaufende Reihen von Windschutzstreifen eher selten. Die Ergebnisse aus Einzelstreifen - Untersuchungen sind jedoch nicht ohne Weiteres auf Mehrfachanordnungen übertragbar.

Bei Mehrfachanordnungen (mehrere parallel verlaufende Streifen in bestimmten Abstand) sind neben den Einflussparametern der Einzelstreifen zusätzlich folgende Faktoren zu beachten:

- Der Abstand der Streifen
- Die Anzahl der Streifen.

Die Auswirkungen des Abstands zwischen mehreren, langen, parallel verlaufenden Windschutzstreifen auf die Rauigkeitshöhe z_0 wurden von IQBAL und KHATRY 1976 im Windkanal untersucht. Das Verhältnis $z_0 / H = 0.4$ ist in einer natürlich entwickelten Grenzschicht maximal bei kleinen Abständen ($a = 1H$ bis $a = 3H$) und sinkt dann allmählich auf $z_0 / H \approx 0.15$ bei dem größten untersuchten Abstand $a = 20H$ ab.

PAPESCH 1992 führte Windkanaltests durch, um den optimalen Abstand und die optimale Porosität von Mehrfachanordnungen zur Verringerung von Windschäden in Kiwiplantagen zu bestimmen. Er untersuchte 5 Abstände ($a = 2H$ bis $a = 10H$) bei 4 unterschiedlichen Porositäten ($\phi = 0\%$ bis $\phi = 60\%$). Die Anzahl der Streifen variierte und betrug maximal 20. Leider wurden nur bodennahe Werte und keine Konturplots angegeben.

MCANENEY und JUDD 1990 haben in einer Feldstudie mittleren Wind und Turbulenz innerhalb und über 15 parallel verlaufenden Windschutzstreifen gemessen und hoben die Schwierigkeit hervor, mit einer Mehrfachanordnung gleichzeitig die mittleren Windgeschwindigkeiten und die Turbulenz zu reduzieren.

JUDD et al. 1996 untersuchten mehrfachangeordnete mitteldichte Zäune, welche in einem Pflanzenbestand angeordnet sind. Sie folgerten aus ihrer Windkanalstudie, dass stromauf gelegene Streifen in einer Mehrfachanordnung wie eine zusätzliche Rauigkeit wirken, die sowohl zu einer Gesamtabnahme der Windgeschwindigkeit als auch zu einem Anstieg der Umgebungsturbulenz führt. Die Folge dieser erhöhten Turbulenz ist, dass sich die Wirksamkeit eines einzelnen Streifens innerhalb einer Mehrfachanordnung verringert, verglichen zu der Schutzwirkung eines gleichartigen Einzelstreifens.

Die Strömung einer Mehrfachanordnung wurde auch von PATTON et al. 1998 mit Hilfe einer Large-Eddy Simulation modelliert. Die Ergebnisse wurden mit den experimentellen Daten von JUDD et al. 1996 validiert: Die mittleren Windgeschwindigkeiten zeigen eine gute Übereinstimmung, wohingegen die Varianzen und die Reynoldschubspannungen insbesondere ab $x = 5H$ stärker abweichen.

WILSON und YEE 2003 untersuchten mit Hilfe der Daten von MCANENEY und JUDD 1990 die Eignung von verschiedenen RANS - Wind Modellen für die Strömungsmodellierung von Mehrfachanordnungen. Im Gegensatz zu Simulationen von Einzelstreifen sind die Vorhersagen aller verwendeten Turbulenz-Schließungsansätze im Fall einer Mehrfachanordnung nicht sehr exakt, sogar im Hinblick auf die mittlere Strömung. Sie folgerten daraus, dass die gegenwärtigen RANS Wind Modelle in

stark gestörten mikrometeorologischen Strömungen noch nicht als alleinstehende Alternative zu Messungen verwendet werden sollten.

Doppeltangeordnete Windschutzstreifen stellen sozusagen einen Spezialfall der Mehrfachanordnungen dar. Untersuchungen über die Auswirkungen eines zweiten Streifens auf den Windschutz im Zwischenfeld sind eher selten. BLENK und TRIENES 1965 führten Windkanaluntersuchungen mit einem Prandtl-Rohr durch. Sie nahmen Geschwindigkeitsverteilungen in zwei verschiedenen Höhen $z = H/2$ und $z = H/6$ zwischen porösen und undurchlässigen Streifen auf. Ihre Ergebnisse werden in Kap.6 zum Vergleich herangezogen.

GANDEMER 1979, 1981 befasste sich u.a. auch mit doppelt angeordneten Windschutzstreifen. Er führte ausschließlich Messungen in einer horizontalen Ebene (in einer Höhe $z = 0.3H$) durch und bewertet sie mit dem von ihm eingeführten Komfortparameter, siehe Gl.(5.4). Seine Ergebnisse veranschaulichen sehr schön den Einfluss der seitlichen Umströmung. Während die geschützten horizontalen Flächen im Lee eines Einzelstreifens eine eher halbelliptische Form besitzen, kann bei optimierter Anordnung eines zweiten, parallel verlaufenden Streifens eine zumindest annähernd rechteckförmige Fläche windberuhigt werden.

HOLMES 2001 führte eine Studie über Windlasten, die auf zwei undurchlässige parallele Wände wirken, durch. Die auf die luvseitig angeordnete Wand einwirkenden Windlasten (Netto-Druckkoeffizienten $c_{p,net}$) steigen bei Abständen $a \leq ca. 5H$ leicht an. Die Windlasten auf den zweiten (geschützten) Streifen sind bis $a = 20H$ im Vergleich zum Einzelstreifen reduziert und bei $a = 2H$ minimal.

2.4 Sockelwallbehäftete Einzelstreifen

Bei Windschutzstreifen, welche auf Wällen angeordnet sind, kommen noch folgende Einflussparameter zusätzlich zu den bereits in Kap.2.2 und Kap.2.3 genannten hinzu:

- Eigenschaften des Walls (Böschungswinkel, Höhe, Kronenbreite, Rauigkeit der Walloberfläche)
- Anordnung des Bewuchsstreifens (Abstand von der vorderen Kante).

BLENK und TRIENES 1956 untersuchten u.a. die Anordnung „durchlässige Hecke auf trapezförmigem Wall“ ($\phi = 0.48$, $\alpha = 63.4^\circ$, $H/h = 4$) und verglichen deren Schutzwirkung (u_1/u_2) mit der Schutzwirkung von „Nur Wall“ der Höhe h und „Nur Hecke“ der Höhe H . Sie zeigten, dass sich die Bremswirkung von der Anordnung „Hecke auf Wall“ näherungsweise aus der Summe der Bremswirkungen von „Nur Wall“ und „Nur Hecke“ ergibt.

Der Einfluss von Sockelwällen auf die Schutzwirksamkeit einzelner linienförmiger Windschutzstreifen wurde erstmals systematisch in einer umfangreichen Windkanal-

studie von RUCK und DONAT untersucht (RUCK und DONAT 2000, 2000b, RUCK 2001). Grundlegende Zusammenhänge wurden hergeleitet, die den Einfluss von unterschiedlichen geometrischen Parametern (Porosität und deren Feinheit, Wallwinkel sowie das Verhältnis von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe) auf den Windschutz überstromab liegenden Flächen wiedergeben. Mit Hilfe von Schutzvolumen wurde die Größe geschützter Bereiche quantifiziert, die einen bestimmten Mindestwert an Schutzwirkung aufweisen. Die damit geschaffene umfangreiche Datenbasis bietet gute Vergleichsmöglichkeiten mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, zumal die Rahmenbedingungen annähernd übereinstimmen (siehe auch Gegenüberstellung der Grenzschiefeigenschaften in Kap.3.6). Die Ergebnisse der Einzelstreifenuntersuchung werden soweit möglich an den entsprechenden Stellen in Kap.6 bis Kap.9 mit den Ergebnissen dieser Studie (Doppelanordnungen) verglichen.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass sich das Wissen über sockelwallbehäftete Windschutzanlagen auf Einzelstreifen beschränkt. Die Wirkung von Doppelanordnungen auf Wällen wurde bisher nicht untersucht.

3. Windkanalmodellierung

Probleme und offene Fragestellungen in der Gebäude- und Umweltaerodynamik werden häufig mit Hilfe physikalischer Modellierungen in einem Windkanal untersucht. Hierzu werden geometrisch ähnliche Modelle realer Objekte in eine den natürlichen Verhältnissen nachgebildete Strömung eingebaut und vermessen. Windkanaluntersuchungen haben gegenüber Naturmessungen den Vorteil, dass die Rahmenbedingungen kontrollierbar sind und beibehalten werden können, was die Untersuchung verschiedener Varianten ermöglicht. Damit die Ergebnisse der physikalischen Modellierungen auf die Natur übertragbar sind, müssen unterschiedliche Modellgesetze eingehalten werden. Nach einer kurzen Beschreibung des Aufbaus der atmosphärischen Grenzschicht wird daher auf diese Modellgesetze näher eingegangen. Daran anschließend werden die experimentellen Einrichtungen und Methoden vorgestellt und die Eigenschaften der im Windkanal simulierten atmosphärischen Grenzschicht dargestellt. Eine Zusammenstellung der durchgeführten Versuche schließt dieses Kapitel ab.

3.1 Beschreibung der atmosphärischen Grenzschicht

Der untere Teil der Atmosphäre, in welchem die Dynamik der Luftschichten durch die Wechselwirkung mit dem Boden beeinflusst ist, wird als atmosphärische Grenzschicht bezeichnet. Die atmosphärische Grenzschicht ist gekennzeichnet durch ein Ansteigen der Windgeschwindigkeit vom Wert Null in Bodennähe bis zum Wert des geostrophischen Windes, der in Höhe der Grenzschichtdicke δ erreicht wird. Die Grenzschichtdicke ist abhängig vom thermischen Schichtungszustand und von der Rauigkeit der Erdoberfläche. Bei neutraler Schichtung beträgt die Dicke der Grenzschicht δ ungefähr 1000 m. Die Wechselwirkung mit dem Boden bewirkt einen schnellen Austausch von Energie, Masse und Impuls, insbesondere durch turbulente Transportvorgänge, sowohl von der Oberfläche in die Atmosphäre als auch umgekehrt.

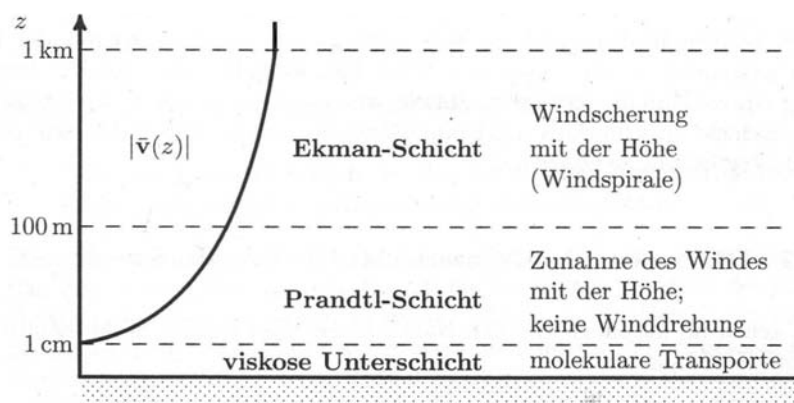


Abb. 3.1 Vertikaler Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht (nach ETLING 2002)

Die atmosphärische Grenzschicht untergliedert sich in die Ekman-Schicht, die Prandtl-Schicht und die laminare (viskose) Unterschicht (Abb.3.1)

Die viskose Unterschicht ist nur wenige Millimeter stark und turbulenzfrei, d.h. molekulare Vorgänge sind in ihr für den Transport von Wärme, Feuchte und Impuls verantwortlich. Bei den meisten Betrachtungen der atmosphärischen Grenzschicht kann diese Schicht außer acht gelassen werden.

Die Prandtl-Schicht erstreckt sich bis in eine Höhe von ungefähr 50 - 100 m. Die Luftschichten-Dynamik ist durch die Reibung bestimmt, während der Einfluss von Druck- und Coriolis-Kräften vernachlässigbar ist. Die Windgeschwindigkeit steigt innerhalb der Prandtl-Schicht auf etwa 70 % bis 80 % des geostrophischen Windes an, wohingegen die turbulenten Flüsse annähernd höhenkonstant sind. Letzteres ist auch aus der englischen Bezeichnung „constant flux layer“ ableitbar. Die Bodenbeschaffenheit ist ein wesentlicher Einflussparameter. Ob die Oberfläche als glatt oder rau zu betrachten ist, hängt vom Verhältnis der Höhe der Rauigkeitselemente zur Dicke der laminaren Unterschicht ab. Bei einer glatten Oberfläche sind die Rauigkeitselemente so klein, dass sie innerhalb der laminaren Unterschicht liegen, während bei rauen Oberflächen die Rauigkeitselemente so groß sind, dass sie aus der laminaren Unterschicht herausragen und eine Erhöhung des Widerstands bewirken. Die turbulente Grenzschicht geht in diesem Fall bis zu den Rauigkeitselementen. Das Kriterium für das Strömungsverhalten ist die Rauigkeits - Reynoldszahl Re_R , siehe Gl.3.1.

In der Ekman-Schicht dreht sich der Wind von der Richtung des Bodenwindes in die Richtung des geostrophischen Windes, welcher in der freien Atmosphäre vorherrscht. Auf diese Eigenschaft lässt sich auch die gebräuchliche Bezeichnung „Spiralschicht“ zurückführen. Auf der Nordhalbkugel dreht der Wind dabei immer nach rechts und auf der Südhalbkugel immer nach links, betragsmäßig nimmt er jedoch in größeren Höhen nur wenig zu. Die turbulenten Flüsse nehmen mit der Höhe ab und verschwinden an der Obergrenze der Ekman-Schicht völlig, d.h. in der freien Atmosphäre herrscht eine annähernd gleichmäßige, laminarartige Luftströmung vor.

Für die Umströmung von Windschutzstreifen sind vorrangig die Eigenschaften der Prandtl-Schicht von Bedeutung. Diese werden in Kap.3.6 näher beschrieben und mit den Eigenschaften der im Windkanal simulierten atmosphärischen Grenzschicht verglichen.

3.2 Modellgesetze

Die Windtechnologische Gesellschaft (WTG) veröffentlichte 1994 das Merkblatt „Über Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik“, welches auch in Plate 1995 als Windkanalrichtlinie enthalten ist und das einer Standardisierung von Windkanalversuchen dient. Für denselben Zweck stellte der Normenausschuss der Kommission Reinhaltung der Luft die VDI-Richtlinie 3783, Blatt 12 (2000) zusammen.

Damit die Übertragbarkeit von Modellergebnissen auf die Natur gewährleistet ist, müssen bei Untersuchungen von Strömungsvorgängen um Gebäude-, Hindernis- oder Landschaftsstrukturen einerseits naturähnliche Windverhältnisse simuliert werden, andererseits muss die Umströmung von Modellstrukturen ähnlich der Umströmung in der Natur sein.

Im weiteren Verlauf kennzeichnen die Indices M Modellwerte und N Naturwerte.

Ähnlichkeiten der Anströmung:

Um zu gewährleisten, dass die Strömung im Windkanal eine vollturbulente Prandtl-Schicht nachbildet, muss nach der Windkanalrichtlinie 1994 für die Rauigkeits-Reynoldszahl, die ein Kriterium für raues bzw. glattes Strömungsverhalten ist, gelten:

$$Re_R = u_* \cdot z_0 / \nu > 5 \quad (3.1)$$

mit ν = kinematische Viskosität
 u_* = Schubspannungsgeschwindigkeit
 z_0 = Rauigkeitshöhe

Des Weiteren müssen die mittleren Windprofile im Modell und in Natur ähnlich sein. Bei Verwendung des Potenzansatzes zur Beschreibung des Windprofils bedeutet dies, dass der Profilexponent α im Modell gleich dem in der Natur sein muss

$$\alpha_M = \alpha_N \quad (3.2)$$

und bei Verwendung des logarithmischen Wandgesetzes sind die Rauigkeitshöhen z_0 gemäß dem Modellmaßstab nachzubilden

$$z_{0,M} / z_{0,N} = \text{Modellmaßstab} \quad (3.3)$$

Darüber hinaus wird gefordert, dass die Profile der Turbulenzintensitäten $T_{U,i} = \sigma_i / u$ im Windkanal ähnlich denen in der Natur sind

$$T_{U,i,M} = T_{U,i,N} \quad (3.4)$$

Um die räumliche Verteilung der Turbulenz naturähnlich zu modellieren, muss der Verlauf des integralen Längenmaßes L_{ux} im Windkanal maßstäblich zum Verlauf in der Natur sein

$$(L_{ux} / L_c)_M = (L_{ux} / L_c)_N \quad (3.5)$$

mit L_c = charakteristische Länge

Und schließlich wird gefordert, dass die normierte Verteilung der turbulenten Schwankungen über der Frequenz im Modell und in der Natur übereinstimmen soll. Das heißt, dass die Abbildungen der normierten Spektraldichtefunktionen $f \cdot S_{uu}(f) / \sigma_u^2$ über der normierten Frequenz $f_n = f \cdot L_{ux} / u$ annähernd kongruente Bilder ergeben müssen.

$$(f \cdot S_{uu}(f) / \sigma_u^2)_M = (f \cdot S_{uu}(f) / \sigma_u^2)_N \quad (3.6)$$

Ähnlichkeit der Hindernisumströmung

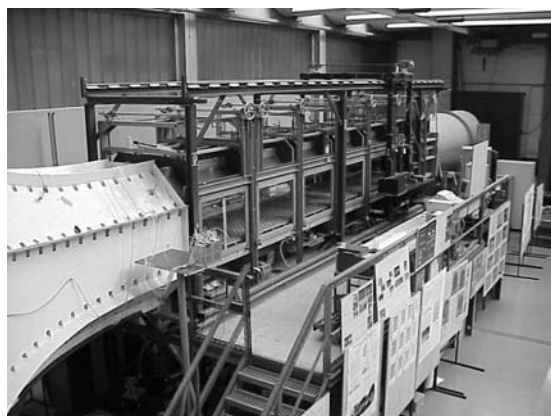
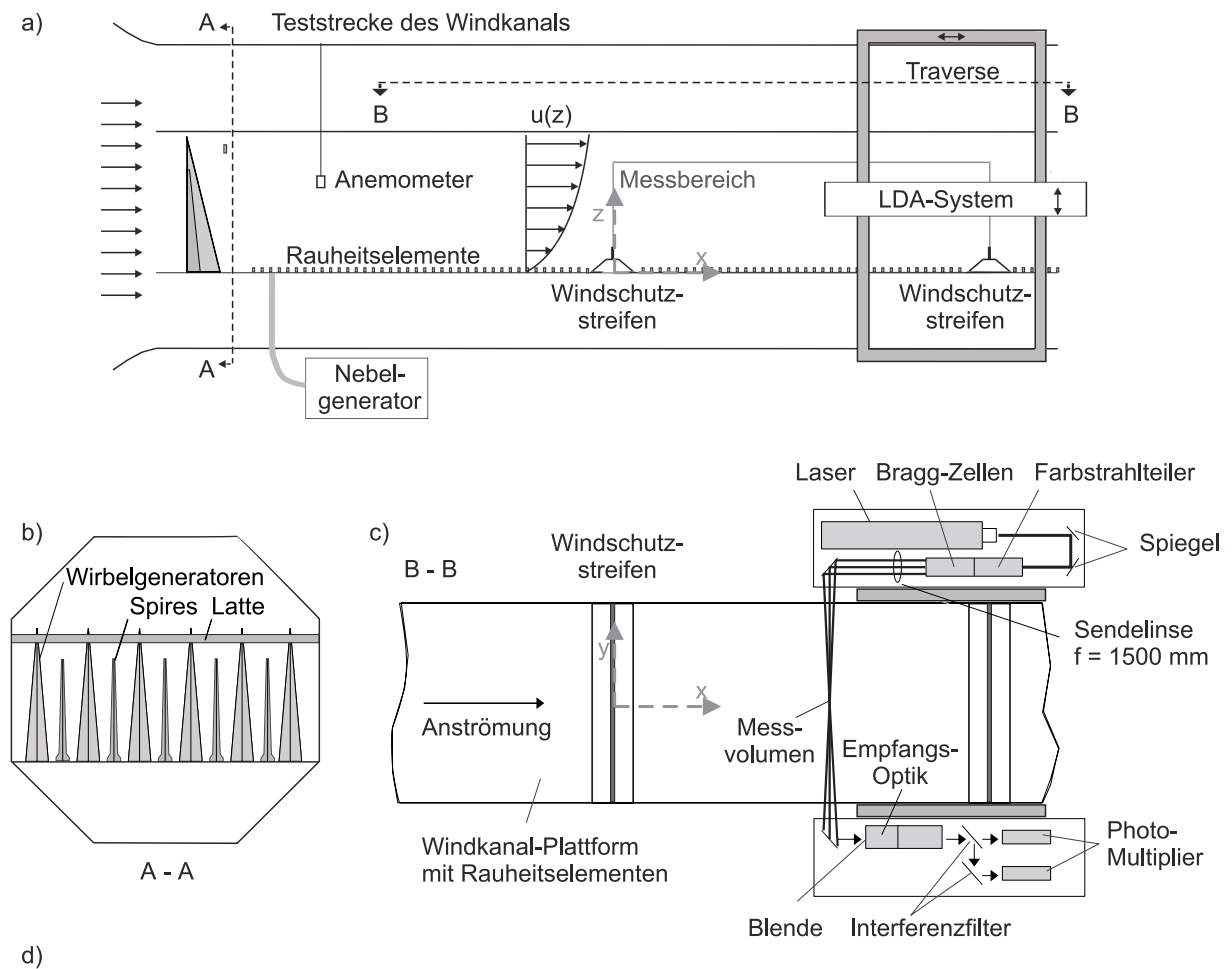
Streng genommen ist die Einhaltung der vollständigen Reynoldszahl-Ähnlichkeit notwendig, damit eine naturähnliche Umströmung von Modellstrukturen sichergestellt ist. Dies ist bei unverändertem Strömungsmedium und den üblichen Modellmaßstäben von 1:100 bis 1:500 nicht realisierbar, da hierfür Modellgeschwindigkeiten notwendig sind, die das 100- bis 500-fache der Naturgeschwindigkeit betragen. Bei scharfkantigen Hindernissen ist jedoch die Lage von Strömungsablösungen durch die Kanten festgelegt, und die Umströmung kann als voll turbulent und Reynoldszahl-invariant betrachtet werden, wenn gilt

$$Re_M = (u_c \cdot L_c / \nu)_M > 10000 \quad (3.7)$$

3.3 Atmosphärischer Grenzschichtwindkanal

Die experimentellen Untersuchungen wurden im geschlossenen, 29 m langen Grenzschichtwindkanal des Laboratoriums für Gebäude- und Umweltaerodynamik am Institut für Hydromechanik / Universität Karlsruhe durchgeführt. Die Teststrecke (Abb.3.2) besitzt eine Länge von 8 m und einen oktogonalen Querschnitt mit einer Breite von 1.5 m.

Durch den Einbau von strömungsprofilformenden Strukturen lässt sich eine naturähnliche atmosphärische Grenzschicht im Windkanal entsprechend des gewählten Modellmaßstabes simulieren. Wirbelgeneratoren („Spires“) formen in Abhängigkeit ihrer geometrischen Ausbildung das Geschwindigkeits- und Turbulenzprofil zu Beginn der Anlaufstrecke vor. Die Bodenrauigkeit, welche hier mit auf dem Windkanalboden systematisch angeordneten Modellsteinen verwirklicht wurde, erzeugt ein ähnliches Profil der Turbulenzintensitäten. Die Teststrecke unterteilt sich daher in eine Anlaufstrecke mit einer Länge von 4 m, über die sich die Grenzschicht entwickelt, und die eigentliche Messstrecke, in welcher die modellierte Grenzschicht einen Gleichgewichtszustand erreicht. Die Charakteristika der simulierten atmosphärischen Grenzschicht sind in Kap.3.6 beschrieben. Die Grenzschicht erstreckt sich am Ende der Anlaufstrecke über eine Höhe von rund 55 cm.



Kenndaten:
 Gesamtlänge: 29m
 Teststrecke: 8 m x 1.5 m x 1.5 m (oktagonal)
 Leistung: 90 kW
 Max. Geschwindigkeit: 45 m/s

Abb. 3.2 Teststrecke des atmosphärischen Grenzschicht - Windkanals
 a) Skizze Seitenansicht
 b) Skizze Blick gegen Strömungsrichtung
 c) Skizze Draufsicht mit LDA - System
 d) Photo

Die Geschwindigkeit im Windkanal wurde mit Hilfe eines Anemometers (Abb.3.2) überprüft und beträgt für alle Untersuchungen gleichbleibend 5.55 m/s in einer Höhe von $z = 40$ cm.

Der Ursprung des verwendeten kartesischen x, z - Koordinatensystems liegt auf der Windkanalbodenplatte in der Mitte des ersten, stromaufwärts gelegenen Windschutzstreifens mit der x -Achse in horizontaler Hauptströmungsrichtung und mit der z -Achse in nach oben ausgerichteter, vertikaler Richtung (Abb.3.2 und Abb.3.3).

3.4 Windschutzstreifenmodelle

Die Modelle der Windschutzstreifen sind in Abb.3.3 skizziert. Die Wälle sind aus Holz gefertigt, die porösen dünnen Bewuchsstreifen bestehen aus perforierten Plexiglas-Platten. Die Gesamthöhe der Modelle $H+h$ beträgt 12 cm.

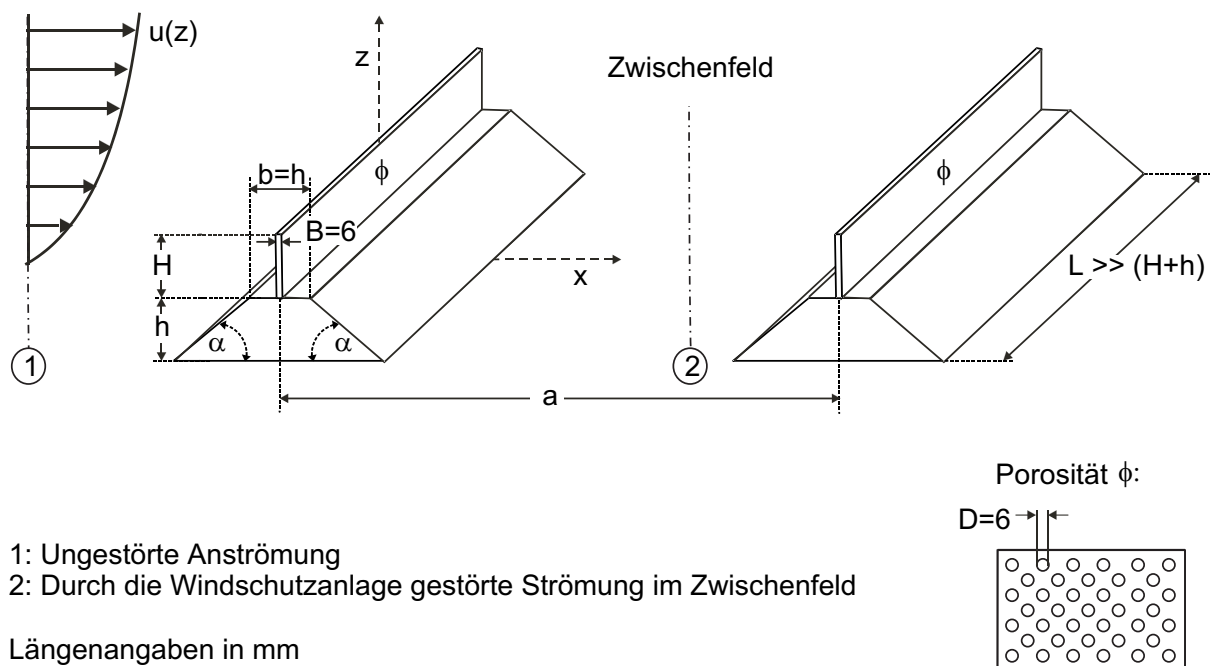


Abb. 3.3 Skizze der Windschutzstreifenmodelle und verwendete Nomenklatur.

Für dünne, künstliche Barrieren ($H > B$), wie sie bei diesen Untersuchungen verwendet wurden, kann die Porosität ϕ gleich der optischen Porosität angenommen werden, die sich aus der optisch projizierten Windschutzstreifenfläche ergibt. Die Porosität wurde durch gleichmäßig verteilte Bohrungen realisiert und ist definiert als das Verhältnis von perforierter Fläche zur Gesamfläche der Bewuchsstreifen. Die Feinheit der Löcher ist durch das Verhältnis vom Lochdurchmesser D zur Dicke der Bewuchsstreifen B definiert: $D / B = 1$.

Die Windschutzstreifenmodelle erstreckten sich über die gesamte Breite der Messstrecke, womit gewährleistet wurde, dass die untersuchte Mittellinien-Strömung (in der xz -Ebene, Abb.3.2) als zweidimensional zu betrachten ist. Die Länge der Modellstreifen L (senkrecht zur Strömungsrichtung) betrug die 12.5fache Windschutzstreifenhöhe. Die Anströmung erfolgte rechtwinklig zu den Windschutzstreifen.

Der Bereich zwischen den beiden Windschutzstreifen wird im folgenden als Zwischenfeld bezeichnet.

3.5 Messtechnik

Die Geschwindigkeitsmessungen zur Erfassung des Strömungsfeldes wurden mit Hilfe eines Laser - Doppler - Anemometrie - System (LDA - System) durchgeführt. LDA - Systeme gehören mittlerweile zu den Standardmessverfahren in der experimentellen Strömungsmechanik. Sie ermöglichen berührungslose Messungen, womit die ablaufenden Strömungsvorgänge nicht durch Sondeneinbauten gestört werden, sowie Messungen mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung. Ein weiterer Vorteil liegt in der Kalibrierungsfreiheit dieser Messsysteme. Auf das Grundprinzip eines LDA wird im Folgenden kurz eingegangen; ausführliche Beschreibungen der Funktionsweise von LDA - Systemen und deren instrumentelle Realisierung sind u.a. in Durst et al 1976 und Ruck 1987, 1990 zu finden.

3.5.1 Prinzip der LDA

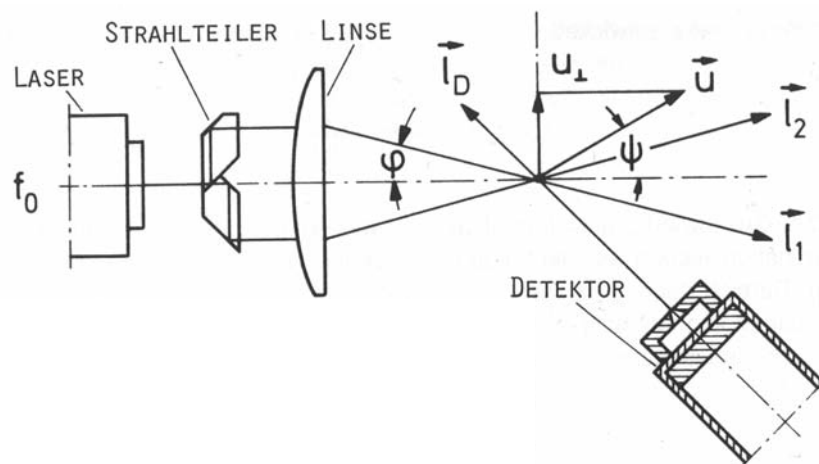


Abb. 3.4 Skizze zur Erläuterung eines LDA - Messverfahrens (nach RUCK 1990)

LDA - Systeme setzen sich im Allgemeinen aus einer Laserlichtquelle, einer Sende- und einer Empfangsoptik zusammen, siehe Abb.3.4. Das Grundprinzip der Laser - Doppler - Anemometrie basiert auf der Gegebenheit, dass kohärente Lichtwellen beim Auftreffen auf sich bewegende Teilchen gestreut werden und eine Doppler-Frequenzverschiebung aufweisen, in der Information über die Geschwindigkeit enthalten ist.

Die Geschwindigkeit der Strömung wird indirekt erfasst, indem die Geschwindigkeit sehr kleiner, in der Strömung mittransportierter Teilchen gemessen wird. Diese müssen Luftströmungen normalerweise zugegeben werden und sollten der Strömung möglichst schlupffrei und ohne Eigendynamik folgen.

Die Frequenzverschiebung f' einer monochromatischen Lichtquelle, die durch die Streuung an einem bewegten Teilchen verursacht wird, errechnet sich zu

$$f' = f_0 \cdot \left(1 - \frac{\vec{u} \vec{l}}{c}\right) \quad (3.8)$$

mit $f_0 =$ Laserlichtfrequenz
 $\vec{u} =$ Teilchengeschwindigkeitsvektor
 $\vec{l} =$ Richtungsvektor des beleuchtenden Laserstrahls
 $c =$ Lichtgeschwindigkeit.

Ein Detektor empfängt das vom bewegten Teilchen emittierte Licht mit einer Frequenz f_D

$$f_D = \frac{f'}{\left(1 - \frac{\vec{u} \vec{l}_D}{c}\right)} \approx f_0 \cdot \left(1 - \frac{\vec{u} \vec{l}}{c} + \frac{\vec{u} \vec{l}_D}{c}\right) \quad (3.9)$$

mit $\vec{l}_D =$ Detektionsrichtungsvektor.

Die Detektionsfrequenz f_D liegt im Bereich der eigentlichen Lichtfrequenz (im Bereich von $10^{14} - 10^{15}$ Hz) und kann dadurch nicht diskret aufgelöst werden. In der LDA wird der Laserlichtstrahl deshalb durch eine geeignete Strahlteilungsoptik in zwei Teilstrahlen aufgeteilt. Durch Passieren einer Konvexlinse überlagern sich die Partialstrahlen im Brennpunkt der Linse, dem sogenannten Messvolumen. Ein Streuteilchen erkennt dann zwei Lichtwellen mit den Frequenzen f'_1 und f'_2 , entsprechend Gl.3.8 (Die Skalarprodukte sind aufgrund der unterschiedlichen Richtungsvektoren l_1 und l_2 nie gleich). Der Detektor registriert die Überlagerung zweier dopplerverschobenen Lichtwellen mit den Frequenzen f_{D1} und f_{D2} entsprechend Gl.3.9. Nach der skalaren Wellentheorie entsteht bei der Überlagerung zweier unterschiedlicher Lichtwellen eine hochfrequente Signalwelle, welche von einer niederfrequenten Schwebung moduliert wird. Der Detektor registriert somit die Schwebungsfrequenz Δf

$$\Delta f = f_{D1} - f_{D2} \approx f_0 \cdot \left(\frac{\vec{u} \vec{l}_2 - \vec{u} \vec{l}_1}{c}\right) \quad (3.10)$$

Diese Frequenz liegt in einem gut aufzulösenden Frequenzbereich und ist unabhängig von der Detektionsrichtung.

Gl.3.10 kann nach Auflösung der Skalarprodukte, mit $f_0 / c = 1 / \lambda$ und nach trigonometrischer Umformung auch folgendermaßen geschrieben werden

$$\Delta f = |\vec{u}| \sin \psi \frac{2 \sin \varphi}{\lambda} \quad (3.11)$$

mit $\psi =$ Winkel zwischen dem Teilchengeschwindigkeitsvektor \vec{u} und der Winkelhalbierenden der beiden Laserstrahlrichtungen.

$\varphi =$ Halbwinkel der sich kreuzenden Laserstrahlen

$\lambda =$ Lichtwellenlänge

Es wird demnach die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Winkelhalbierenden der beiden Laserstrahlrichtungen detektiert.

Als vereinfachtes Beschreibungsmodell findet im messtechnischen Bereich oft das Interferenzstreifenmodell Anwendung. Am Überlagerungsort zweier kohärenter monochromatischer Lichtwellen bilden sich Interferenzstreifen (Hell-Dunkel-Abschnitte) aus, siehe Abb.3.5. Passiert ein mit der Strömung sich mitbewegendes Teilchen das Messvolumen, streut es diese Hell-Dunkel-Abschnitte, deren Abstand Δx abhängig vom Überlagerungswinkel φ und der Lichtwellenlänge λ ist. Ein Detektor erkennt diese Streuung mit einer Frequenz Δf

$$\Delta f = \frac{u_{\perp}}{\Delta x} = u_{\perp} \frac{2 \sin \varphi}{\lambda} \quad (3.12)$$

mit $u_{\perp} =$ Geschwindigkeitskomponente des Teilchens senkrecht zum Interferenzstreifenmuster

Die Geschwindigkeitskomponente ist demnach linear abhängig von der Doppler-Frequenz und ergibt sich aus der Multiplikation der detektierten Schwebungsfrequenz Δf mit dem Interferenzstreifenabstand Δx .

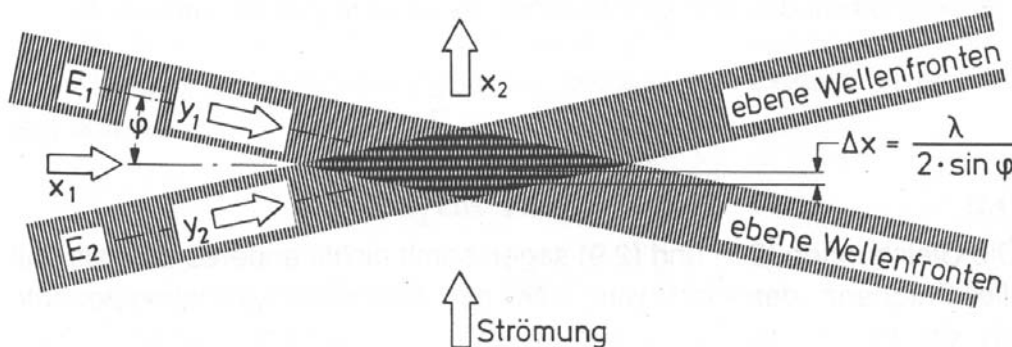


Abb. 3.5 Skizze zum Interferenzstreifenmodell (nach RUCK 1990)

3.5.2 Verwendetes LDA-System

Das verwendete zweidimensionale LDA - System ist in Abb.3.2 skizziert; die Eigenschaften des Systems sind Tab.3.1 zu entnehmen. Als Laserlichtquelle kam ein Argon - Ionen - Laser mit einer Leistung von 4 Watt zum Einsatz. Bei der verwendeten LDA - Anordnung handelte es sich um ein Zweistrahlverfahren. Die Laserstrahlleistung beider Komponenten wird dabei durch Strahlteiler jeweils im Verhältnis 50:50 aufgeteilt; die Laserstrahlen, welche in ihrem Kreuzungspunkt das Messvolumen bilden, besitzen somit in einer Richtung gleiche Lichtleistung. Zwei Doppel - Braggzellen sorgten für die zur eindeutigen Bestimmung der Strömungsrichtungen notwendigen Frequenzverschiebungen Δf_E der Laserstrahlen. Das Streulicht wurde mit Hilfe von Photomultipliern detektiert, welche der Sendeseite gegenüber angeordnet waren (Vorwärtslichtstreuung), so dass überwiegend in Richtung der Laserstrahlausbreitung streuendes Licht aufgenommen wurde. Die Datenauswertung erfolgte mit Hilfe von 2 TSI Signalprozessoren, Modell IFA 550. Die Streuteilchen wurden mit einem Nebelgenerator und dem Nebelfluid 1,2-Propandiol (Teilchendurchmesser 1-2 μm) künstlich generiert.

	u-Komponente	v-Komponente
Wellenlänge λ	514 nm (grün)	488 nm (blau)
Frequenzverschiebung Δf_E	0.6 MHz	0.55 MHz
Brennweite f_B	1500 mm	1500 mm
Halbwinkel der kreuzenden Strahlen φ	0.955°	0.955°
Interferenzstreifenabstand Δx	14.64 μm	15.42 μm
Anzahl Interferenzstreifen n	51	52

Tab. 3.1 Eigenschaften des LDA-Systems

3.5.3 Durchführung der Messungen

Das LDA - System wurde manuell auf die gewünschte Position in horizontaler Richtung verschoben und dann mit Hilfe einer Traversensteuerung in vertikaler Richtung automatisch verfahren. Die elektrischen Signale wurden bandpassgefiltert im Bereich von 300 kHz bis 1 MHz. An jedem Messpunkt wurden 11260 Datenpunkte mit einer Frequenz von 250 Hz im Coincidence Mode aufgenommen. Eine Punktmessung dauerte somit ca. 45 s.

Die Strömungsfelder wurden im Bereich zwischen den zwei Windschutzstreifen ($0 \leq x \leq a$) in einer Höhe von $z = 0.08 \cdot (h+H)$ bis $z = 4.16 \cdot (h+H)$ vermessen. Abhängig vom Abstand der beiden Streifen wurden zwischen 5 und 13 vertikale Profile aufgenommen, deren Positionen in Hauptströmungsrichtung in Abb.3.6 zusammengestellt sind. Jedes vertikale Profil zwischen den zwei Windschutzstreifen bestand aus 24 Messpunkten und die beiden Profile über den Streifen (erstes und letztes Profil, $1.04 \cdot (h+H) \leq z \leq 4.16 \cdot (h+H)$) aus jeweils 16 Messpunkten. Die Messstellen lagen in

Die vertikale Verteilung der zeitgemittelten, horizontalen Geschwindigkeit in der Untersuchungsstrecke lässt sich theoretisch mit dem Potenzgesetz

$$u(z) / u_{\text{ref}} = (z / z_{\text{ref}})^{\alpha} \quad (3.13)$$

- mit u_{ref} = Referenzgeschwindigkeit in einer Referenzhöhe z_{ref}
 = 3.2 m/s in $z_{\text{ref}} = 0.05$ m (als z_{ref} wird häufig eine Höhe in der Natur von 10 m gewählt).
 α = Profilexponent, abhängig von der Rauigkeit
 (≈ 0.1 über glatter Wasserfläche, ≈ 0.4 über Stadtgebiet)

oder alternativ mit dem logarithmischen Wandgesetz beschreiben

$$u(z) = (u_* / \kappa) \cdot \ln((z-d) / z_0) \quad (3.14)$$

- mit u_* = Schubspannungsgeschwindigkeit
 κ = von Karmànsche Konstante = 0.4
 z_0 = Rauigkeitshöhe (ein Maß für die Oberflächenrauigkeit)
 d = Nullpunktverschiebung des Geschwindigkeitsprofils (entspricht dem Abstand von der Erdoberfläche, in welchem die Windgeschwindigkeit den Wert Null annimmt).

Die gemessenen horizontalen Geschwindigkeiten können im vorliegenden Fall mit Hilfe des Potenzgesetzes und einem Profilexponenten $\alpha = 0.26$ sehr gut angenähert werden (Abb.3.7a). Dieser Profilexponent ist typisch für Grenzschichten über vorstädtischem Terrain bzw. Waldgebieten, siehe COUNIHAN (1975), PLATE (1995). Aus dem logarithmischen Ansatz (Abb.3.7b) bestimmt sich die Rauigkeitshöhe z_0 im Modell zu 1.55 mm; Das entspricht bei einem Modellmaßstab 1:200 in der Natur $z_0 = 0.31$ m. Nach EUROCODE 1:ENV 1991-2-4 ist dieser Wert charakteristisch für Vorstädte und Industrieflächen. Für die Nullpunktverschiebung wird $d = 0$ angenommen. Die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* ergibt sich zu 0.367 m/s und $\tau_0 = u_*^2 \cdot \rho = 0.165$ N/m².

Das logarithmische Wandgesetz gilt lediglich in der Prandtl-Schicht, wo $z^* = u_* \cdot z / \nu$ im Bereich zwischen 60 - 250 (untere Begrenzung) und 5000 - 10000 (obere Begrenzung) liegt, siehe ROTTA 1972. z^* dieser Messungen liegt zwischen 280 ($z = 1$ cm) und 14100 ($z = 50$ cm). In einer Höhe $z = 30$ cm ($z/z_{\text{ref}} = 6$) beträgt $z^* = 8500$. Diese Höhe kann somit annähernd als obere Begrenzung der Prandtl-Schicht angesehen werden.

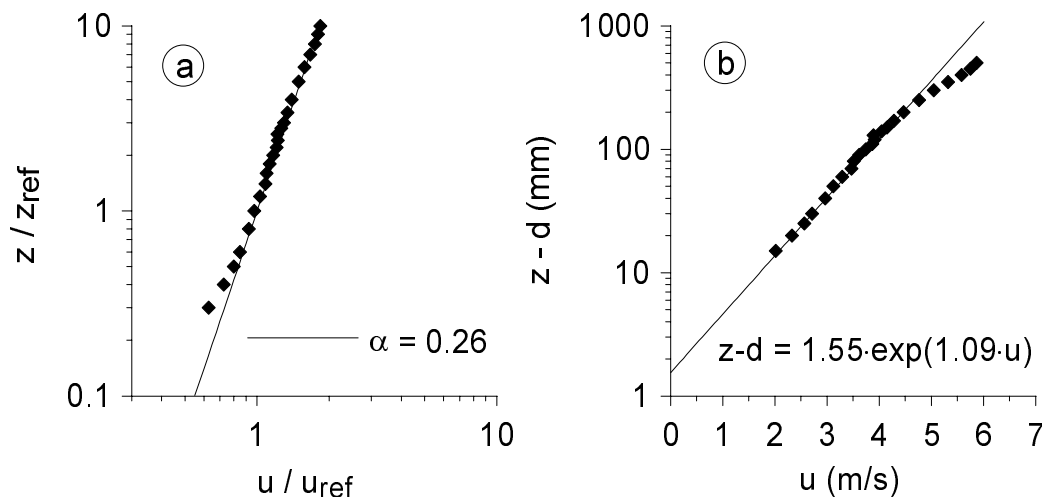


Abb. 3.7 Simulierte atmosphärische Grenzschicht:
Zeitgemittelte horizontale Geschwindigkeit $u(z)$ ($z_{\text{ref}} = 0.05$ m, $u_{\text{ref}} = 3.2$ m/s)
a) Potenzansatz b) Logarithmischer Ansatz

Die Korrelationen der Geschwindigkeitsschwankungen $u'w'$ (Abb.3.8a) weisen im unteren Bereich der Grenzschicht einen annähernd konstanten Verlauf auf. Dies ist typisch für die Prandtl-Schicht, in der die Flüsse über die Höhe um weniger als 10 % ihrer Größe abweichen und in der $u_*^2 = -u'w'$ gilt, siehe STULL 1988.

Die in Abb.3.8a dargestellte theoretische Kurve ergibt sich alternativ aus der von PLATE 1995 angegebenen Funktion des Schubspannungsverlaufs über die Höhe für eine geschätzte Grenzschichtdicke $\delta = 350$ m in der Natur:

$$\tau(z) = -\tau_0 \cdot (1 - (z/\delta))^{2\alpha+1} \quad (3.15)$$

Die Profile der Turbulenzintensitäten in Hauptströmungsrichtung T_u (Abb.3.8b)

$$T_u = \sqrt{u'^2} / u \quad (3.16)$$

und in vertikaler Richtung T_w (Abb.3.8c)

$$T_w = \sqrt{w'^2} / u \quad (3.17)$$

sind über die Höhe dargestellt. In Bodennähe ($z/z_{\text{ref}} = 0.3$) beträgt $T_u = 0.43$ und $T_w = 0.19$; beide Größen nehmen allmählich mit zunehmender Höhe ab und stimmen hinreichend gut mit den theoretischen Verläufen nach PLATE 1995 überein:

$$T_u(z) = 1 / \ln((z-d) / z_0) \quad (3.18)$$

$$T_w(z) = 0.5 / \ln((z-d) / z_0) \quad (3.19)$$

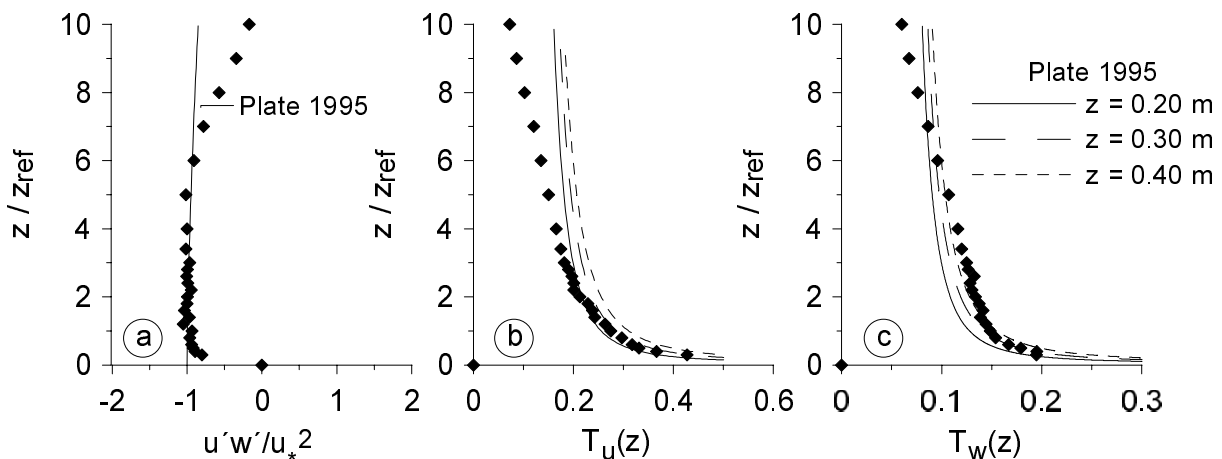


Abb. 3.8 Simulierte atmosphärische Grenzschicht:
 a) Bezogene Reynoldsschubspannung $u'w' / u_*^2$
 b) Turbulenzintensität in Hauptströmungsrichtung $T_u(z)$
 c) Turbulenzintensität in vertikaler Richtung $T_w(z)$

Das integrale Längenmaß L_{ux} beschreibt die Größe der einheitlich bewegten Masse und gibt somit die mittlere Turbulenzballengröße an. Es ist allgemein abhängig sowohl vom Geländetyp als auch von der Höhe über Grund und wird aus der Längskorrelation der Hauptströmungs-Komponente (Kreuzkorrelation in variablen Abständen) berechnet. Legt man die Taylor-Hypothese der „eingefrorenen Turbulenz“ zugrunde, so kann diese Kreuzkorrelation durch eine Autokorrelation des registrierten Geschwindigkeitssignals $R_{uu}(\tau)$ in guter Näherung erhalten werden

$$R_{uu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u'(t) u'(t + \tau) dt \quad (3.20)$$

mit $\tau =$ Zeitversatz

Die Taylor-Hypothese ist anwendbar für $T_u(z) < 0.5$, siehe STULL 1988. Integriert man die Korrelationsfunktion und schiebt den Flächeninhalt unter der Kurve zu einem Rechteck zusammen, so entspricht der Abszissenwert dieses Rechtecks dem integralen Längenmaß oder Zeitmaß, je nach Auftragung bzw. Umrechnung:

$$L_{ux} = u \cdot \int_0^{\infty} R_{uu}(\tau) d\tau / \int_0^{\infty} R_{uu}(0) d\tau = u \cdot \int_0^{\infty} R_{uu}(\tau) d\tau / \sigma_u^2 \quad (3.21)$$

mit $\sigma_u =$ Standardabweichung der horizontalen Geschwindigkeit

Die in der Literatur gemachten Angaben über das integrale Längenmaß in der natürlichen atmosphärischen Grenzschicht schwanken stark und erschweren den Vergleich mit Naturdaten. Der EUROCODE gibt folgenden Zusammenhang vor:

$$\begin{aligned}
 L_{ux}(z) &= 300 \cdot (z / 300)^\varepsilon && \text{für } z_{\min} \leq z \leq 300 \text{ m} \\
 L_{ux}(z) &= 300 \cdot (z_{\min} / 300)^\varepsilon && \text{für } z \leq z_{\min} \\
 L_{ux}(z) &= 300 \text{ m} && \text{für } z > 300 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

mit $(L_{ux}, z \text{ in m})$

$\varepsilon = 0.37$ für Vorstädte, Industriegebiete und Wälder.

In der Windkanalrichtlinie 1995 sind für den Geländetyp „Waldgebiete / Vorstadt“ folgende Richtwerte angegeben:

$$L_{ux}(d_o+10\text{m}) = 65 - 85 \text{ m}$$

$$L_{ux}(d_o+30\text{m}) = 130 - 260 \text{ m}$$

mit $d_o = \text{Versatzhöhe}$

Im vorliegenden Fall zeigt der Vergleich der vertikalen Verteilung des integralen Längenmaßes mit der des Eurocodes (Abb.3.9), dass die Werte in der simulierten Windkanalgrenzschicht im unteren Bereich hinreichend (mit einer Tendenz zu kleineren Werten) übereinstimmen, während sie im oberen Bereich abweichen. Letzteres ist zu erwarten, da der Einfluss der Decke des Windkanals eine weitere Zunahme des integralen Längenmaßes wie in der natürlichen, nach oben offenen Atmosphäre verhindert.

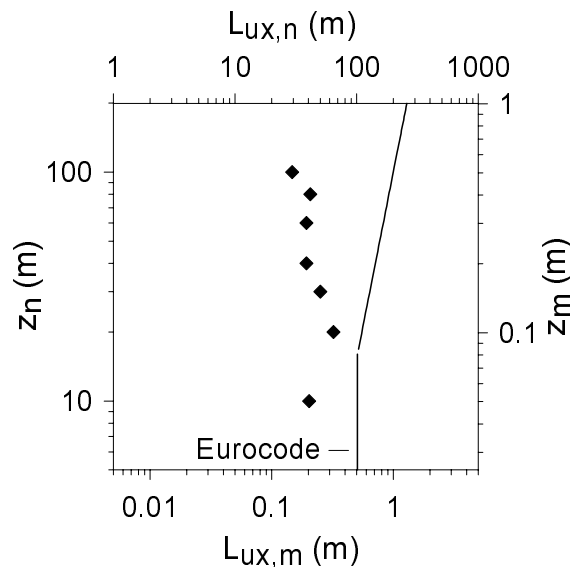


Abb. 3.9 Simulierte atmosphärische Grenzschicht: Integrales Längenmaß L_{ux}

In Abb.3.10 sind Spektraldichtefunktionen (Fourier-Transformierte der Autokorrelationsfunktion) der modellierten Anströmung im Windkanal in zwei verschiedenen Höhen z ($z = 50 \text{ mm}$ und $z = 200 \text{ mm}$) dargestellt. Diese sind das Ergebnis der Spektralanalyse von Geschwindigkeitszeitreihen in Hauptströmungsrichtung (x -Richtung). Ein häufig verwendeter Ansatz zur Beschreibung der Spektraldichtefunktionen in der

atmosphärischen Grenzschicht ist das von Kármán -Spektrum, welches sich wie folgt darstellen lässt

$$f \cdot S_u(z, f) / \sigma_u^2 = 4 \cdot f_n / [1 + 70.8 \cdot f_n^2]^{5/6} \quad (3.23)$$

wobei zur Bildung der dimensionslosen Frequenz f_n das integrale Längenmaß L_{ux} verwendet wurde

$$f_n = f \cdot L_{ux} / u \quad (3.24)$$

Ein Vergleich der dimensionslosen Spektren in der Windkanalgrenzschicht mit denen der natürlichen Grenzschicht (von Kármán - Spektrum) zeigt, dass die ermittelten Spektraldichtefunktionen hinsichtlich Lage und Höhe des Maximums sehr gut übereinstimmen. Ein Abklingverhalten proportional zu $f^{-2/3}$ im höherfrequenten Bereich wird bei den Spektren ebenfalls gut wiedergegeben. In Folge der endlichen Frequenzauflösung einer jeden Messeinrichtung und teilweise auch wegen des Verlustes von hohen Frequenzen durch die Maßstabsverkleinerung übersteigen die im Windkanal gemessenen Spektren im hohen Frequenzbereich die theoretischen Werte.

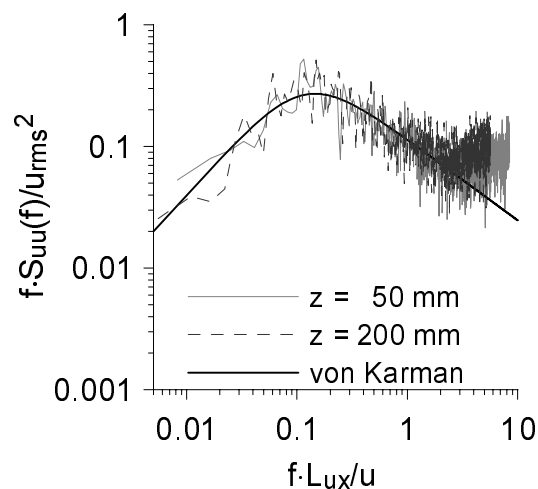


Abb. 3.10 Simulierte atmosphärische Grenzschicht: Normierte Spektraldichteverteilung $S_{uu}(f)$

Mit den zuvor in diesem Kapitel abgeleiteten Werten für die Schubspannungsgeschwindigkeit u^* und für die Rauigkeitshöhe z_0 ergibt sich die Rauigkeits-Reynoldszahl zu

$$Re_R = u^* \cdot z_0 / \nu = 0.367 \text{ m/s} \cdot 0.00155 \text{ m} / 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \approx 38,$$

womit die Forderung nach Gl. 3.1, $Re_R > 5$, erfüllt ist.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Modellgesetze (Gl.3.1 – Gl.3.6) zumindest annähernd eingehalten werden und dass somit die Windkanalgrenzschicht bei einem zugrundegelegten Maßstab von $M = 1/200$ eine natürliche atmosphärische Grenzschicht über rauem Gelände näherungsweise nachbildet. Es treten zwar Abweichungen in der Turbulenzstruktur auf; diese sollten aufgrund der vorherrschenden Effekte der Hindernisumströmung jedoch nur von sekundärer Bedeutung sein.

Ähnlichkeit der Hindernisumströmung

Die Modell - Reynoldszahl, ermittelt aus der Gesamthöhe der Windschutzstreifen, $H+h$, und aus der in einer Höhe $z = H+h$ vorherrschenden mittleren Geschwindigkeit u_1 beträgt

$$Re_M = 3.9 \text{ m/s} \cdot 0.12 \text{ m} / 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \approx 31\,000.$$

Somit ist auch die Forderung von Gl.3.7, $Re_M > 10000$, erfüllt und eine naturähnliche Hindernisumströmung gewährleistet.

Einige Parameter der ungestörten atmosphärischen Grenzschicht, die in diesem Kapitel hergeleitet wurden, sind in Tab.3.2 abschließend noch einmal zusammengestellt. Zusätzlich werden die entsprechenden Größen der Einzelstreifenuntersuchung [RUCK und DONAT 2000] aufgeführt. Der Profilexponent α , die Rauigkeitshöhe z_0 sowie die Schubspannungsgeschwindigkeit u^* sind bei der Einzelstreifenuntersuchung etwas kleiner als bei dieser Untersuchung, was auf einen weniger rauen Untergrund hindeutet.

Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Untersuchungen liegt in der leicht abweichenden Kanalgeschwindigkeit ($u_{A_{nem}}$ bzw. u_1), was aufgrund der vollturbulenten Umströmung der Hindernisse jedoch keine Abweichungen bei den Ergebnissen verursachen sollte.

	Einzelstreifen [RUCK u.DONAT 2000]	Doppelanordnung Diese Studie
Profilexponent α	0.22	0.26
Rauigkeitshöhe z_0	Modell	1.55 mm
	Natur	0.31 m
Schubspannungsges. u^*	0.29 m/s	0.367 m/s
u_1 ($z = 0.05\text{m}$)	3.0 m/s	3.2 m/s
$u_{A_{nem}}$	5.0 m/s	5.55 m/s

Tab. 3.2 Simulierte atmosphärische Grenzschicht: Vergleich der Einzelstreifenuntersuchung [RUCK und DONAT 2000] mit dieser Studie.

3.7 Systematik der Untersuchung

Ziel dieser Arbeit ist die Erforschung grundlegender Zusammenhänge zwischen Formparametern der Windschutzstreifen-Doppelanordnung und deren aerodynamischen Wirksamkeit hinsichtlich eines optimalen Windschutzes. Bei den untersuchten Einflussparametern handelt es sich um die Porosität der Bewuchsstreifen ϕ , den Streifenabstand a (nachfolgend in der normierten Form $a' = a / (h+H)$ dargestellt), dem Verhältnis der Bewuchshöhe zur Sockelwallhöhe H / h und dem Sockelwallwinkel α .

Die Einflussparameter wurden bei den Untersuchungen gemäß Tab.3.3 variiert. Dabei hatten die Streifen einer Doppelanordnung immer die gleiche Struktur; Kombinationen unterschiedlicher Streifenstrukturen wurden nicht untersucht.

Porosität der Bewuchsstreifen ϕ	0 %, 12 %, 22 %, 35 %, 52 %
Streifenabstand $a' = a / (h+H)$	5, 6, 10, 12, 15, 20, 25
Verhältnis Bewuchs- zu Wallhöhe H / h	0 (nur Wall), 0.5, 1, 2, ∞ (ohne Wall)
Sockelwallwinkel α	20°, 40°, 60°

Tab. 3.3 Variierte Einflussparameter

Die übrigen Parameter, von welchen das Geschwindigkeitsfeld zwischen zwei Windschutzstreifen abhängt und welche sich aus dimensionsanalytischen Betrachtungen ergeben, wurden in allen Experimenten konstant gehalten, siehe Tab.3.4.

Rauhigkeitshöhe	$z_0 / (H+h) = 0.013$
Grenzschicht - Reynoldszahl	$Re = u_{ref} \cdot h / \nu = 12587$ ($u_{ref} = 3.2 \text{ m/s}$ in $z_{ref} = 0.05 \text{ m}$)
Zweiter Böschungswinkel	$\beta = \alpha$
Verhältnis Kronenbreite zu Sockelwallhöhe	$b / h = 1$
Position des Bewuchsstreifens auf Wall	Mittig
Feinheit der Porosität	$D / B = 1$

Tab. 3.4 Unveränderte Einflussparameter

4. Numerische Modellierung

Die numerischen Berechnungen wurden mit dem Programm-Paket FLOVENT Version 3.2 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 Basis des k - ε -Modells.

4.1 Mathematisches Modell

In diesem Kapitel werden die mathematischen Grundlagen von FLOVENT, welche für die hier durchgeführten numerischen Berechnungen relevant sind, kurz beschrieben, siehe FLOMERICS 2000, LAUNDER und SPALDING 1973. Eine allgemeine Beschreibung numerischer Berechnungsverfahren ist z.B. in RODI 1982, FERZIGER und PERIĆ 1999 zu finden.

Bewegungsgleichungen:

Grundlage der bei FLOVENT verwendeten Techniken sind die Bewegungsgleichungen. Es werden die Erhaltungsgleichungen von Masse, Impuls und Energie angewandt, deren Herleitung in zahlreichen Lehrbüchern zu finden ist (z.B. SCHLICHTING 1965, STULL 1988).

Für die hier betrachteten Strömungsvorgänge in einer neutral geschichteten atmosphärischen Grenzschicht wurden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Strömung ist stationär ($\partial/\partial t = 0$).
- Strömung ist inkompressibel ($\rho = \text{konst.}$).
- Thermische Vorgänge sind vernachlässigbar.
- Coriolis-Kräfte sind vernachlässigbar.
- Strömung verhält sich wie ein Newtonsches Fluid.

Die Erhaltungsgleichungen lassen sich dann unter Verwendung der Einsteinschen Summenkonvention wie folgt darstellen:

Kontinuitätsgleichung (Massenerhalt)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1)$$

Navier-Stokes-Gleichungen (Impulserhalt)

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\delta_{i3} \rho g - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \quad (4.2)$$

Bei dem Programm FLOVENT handelt es sich um ein Finite-Volumen-Verfahren. Der Rechenraum wird dabei in viele aneinandergrenzende, rechteckige Teilvolumen zerlegt, und in jedem Teilvolumen werden die partiellen Differentialgleichungen in algebraischer Form angegeben. Diese algebraischen Gleichungen werden dann iterativ gelöst. Die Iterationen werden abgebrochen, sobald die Lösung konvergiert, d.h. sobald der Fehler im System einen festgelegten, akzeptablen Grenzwert unterschreitet.

Turbulenz-Viskositäts-Modell:

Um turbulente Strömungen exakt zu modellieren, müssen die zeitlichen Terme der Erhaltungsgleichungen einen Zeitschritt dt haben, der selbst turbulente Schwankungen der kleinsten Zeitskalen erfasst. Das gleiche gilt für die physikalischen Abmessungen der Kontrollvolumenzellen dx_i . Sie müssen so klein sein wie das Kolmogorov-Längenmaß, das mit einem Anstieg der Re-Zahl nicht-linear abnimmt. Exakte Modellierungen sind aufgrund des hohen Rechenaufwands somit in den meisten Fällen nicht möglich.

Um diese Einschränkungen zu umgehen, werden die Variablen in einen Mittelwert und einen Schwankungswert zerlegt, die in die „augenblicklichen“ Impulsgleichungen eingesetzt werden. Durch anschließende Mittelung der Bewegungsgleichungen ergeben sich die Reynoldsschen Gleichungen

$$\rho U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\delta_{i3} \rho g - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} u'_j u'_i \quad (4.3)$$

Durch die zeitliche Mittelung der Impulsgleichungen werden die Reynoldsschen Schubspannungen eingeführt (letzter Term auf der rechten Seite von Gl.4.3). In einer turbulenten Grenzschicht setzt sich demnach die Schubspannung aus einem turbulenten und einem viskosen Anteil zusammen. Außer in Bereichen in unmittelbarer Wandnähe übersteigt der turbulente Anteil den viskosen Anteil um ein Vielfaches. Es ergibt sich ein nicht geschlossener Gleichungssatz, und ein Turbulenz-Schließungsansatz ist zur Modellierung erforderlich.

Als Turbulenz-Viskositäts-Modell wurde ein „revised k-ε-Modell“ gewählt. Die turbulente Viskosität in den einzelnen Strömungsgitterzellen, die nicht in unmittelbarer Umgebung zu festen Oberflächen liegen, wird dabei in Abhängigkeit von zwei Feldvariablen berechnet: Der kinetischen Energie der Turbulenz k und der Dissipationsrate ε . Diese beiden Variablen werden durch Lösung zweier zusätzlicher Differential-

gleichungen bestimmt. In unmittelbarer Nähe zu festen Oberflächen variiert der Wert für die turbulente Viskosität entsprechend dem logarithmischen Wandgesetz.

Zur Berechnung der Reynoldsspannungen wird das Prinzip der Wirbelviskosität angewandt, wonach analog zu laminaren Strömungen auch bei turbulenten Strömungen die Spannungen proportional zu den Deformationsgeschwindigkeiten angenommen werden:

$$-\rho u'_j u'_i = \mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4.4)$$

mit $\mu_T =$ Wirbelviskosität
 $\delta_{ij} =$ Kronecker-Delta

Der letzte Term ist notwendig, damit die Summe über die drei Normalspannungen ($i = j$) $2k$ ergibt. Die Wirbelviskositäts-Annahme setzt eine isotrope Turbulenz voraus (Wirbelviskosität in allen Richtungen gleich). Dies kann allerdings bei extremen Stromlinienkrümmungen, Wirbeln, adversen Druckgradienten und Auftrieb nicht zutreffen.

Aus dimensionsanalytischen Überlegungen ergibt sich für die von der Turbulenzstruktur abhängige Wirbelviskosität μ_T folgende Beziehung

$$\mu_T = C_\mu \cdot \rho \cdot k^2 / \varepsilon \quad (4.5)$$

mit $C_\mu =$ empirische Konstante, siehe Tab. 4.1.

Die turbulente kinetische Energie k und die Dissipation ε können stark über das gesamte Strömungsfeld variieren und werden an einer Stelle durch Vorgänge an anderen Stellen beeinflusst. Darum werden differentielle Transportgleichungen für k und ε verwendet, um die Wirbelviskosität für jede einzelne Zelle vorherzusagen. Diese Transportgleichungen lauten bei auftriebsfreien Strömungen

$$\frac{\partial \rho u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \rho u_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.7)$$

mit $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_1, C_2$ und $C_3 =$ empirische Konstanten, siehe Tab.4.1

und gelten sowohl in laminaren als auch in turbulenten Strömungsregimen.

C_μ	C_1	C_2	C_3	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.0	1.217

Tab. 4.1 Empirische Konstanten der k-ε-Modellgleichungen

Wandgleichungen:

Eine Rauigkeits-Reynoldszahl Re_R wird aus der festgelegten Höhe der Rauigkeitselemente h_r bestimmt:

$$Re_R = \frac{h_r \cdot u_* \cdot \rho}{\mu} \quad (4.8)$$

Bei rauen Wänden ($Re_R > 3.3$) wird aus der berechneten Geschwindigkeit u im Mittelpunkt p einer Gitterzelle, die den Abstand y von der Wandoberfläche besitzt, die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* folgendermaßen abgeleitet

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{0.435} \cdot \ln\left(\frac{29.7 \cdot y}{h_r}\right) \quad (4.9)$$

Für $Re_R < 3.3$ wird u_* aus den Beziehungen, welche für die glatte Wand gelten, berechnet:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{0.435} \cdot \ln(9 \cdot y^+) \quad \text{für } y^+ > 11.5 \text{ (turbulent)} \quad (4.10)$$

$$\frac{u}{u_*} = y^+ \quad \text{für } y^+ \leq 11.5 \text{ (laminar)} \quad (4.11)$$

$$\text{mit } y^+ = \frac{y \cdot u_* \cdot \rho}{\mu}$$

Die Berechnung für raue Wände führt, verglichen mit der Berechnung der glatten Wände, zu einer erhöhten Reibung. Für turbulente Bedingungen wird eine iterative Lösung angewandt.

Die Wandschubspannung τ_0 ergibt sich letztendlich zu

$$\tau_0 = u_*^2 \cdot \rho, \quad (4.12)$$

und ihr Wert wird als eine Impulssenke in der wandnahen Zelle gesetzt.

4.2 Angenommene Randbedingungen

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

Die Geländeoberfläche wurde durch eine Wand modelliert, deren Rauigkeit in etwa der Höhe der Rauigkeitselemente im Windkanal entsprechend dem zugrundegelegten numerischen Maßstab entsprach. Die Begrenzungsflächen des Rechenraums wurden in Hauptströmungsrichtung (X-Richtung) und in vertikaler Richtung (Z-Richtung) nach oben hin offen gewählt, d.h. freie Begrenzungen mit konstantem Druck, durch welche Luft strömen kann. In lateraler Richtung (Y-Richtung) wurden aufgrund der zweidimensionalen Problematik symmetrische Begrenzungsflächen gesetzt, d.h. reibungsfreie, undurchlässige Oberflächen.

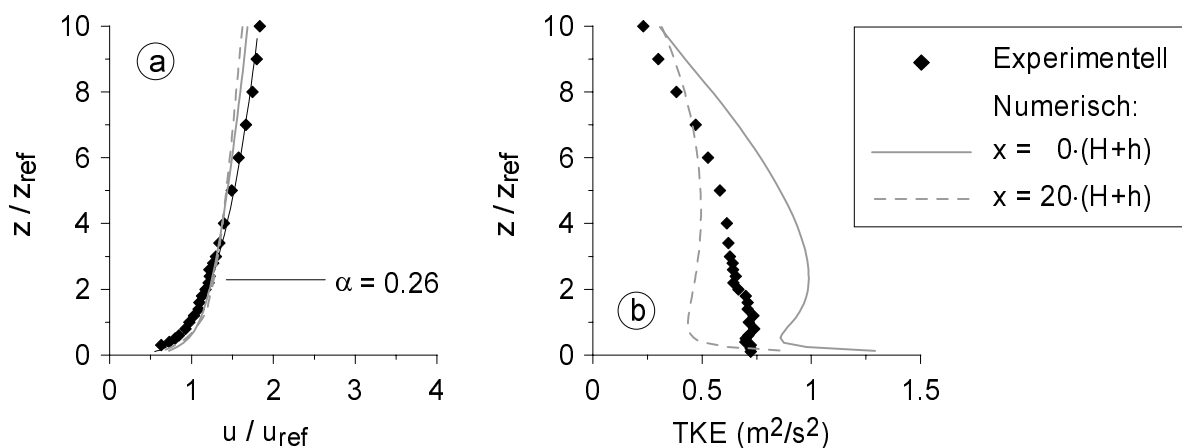


Abb. 4.1 Vergleich der experimentell und numerisch simulierten atmosphärischen Grenzschichten: a) Mittlere horizontale Geschwindigkeit u/u_{ref} , b) Turbulente kinetische Energie TKE ($z_{ref} = 5 \text{ cm}$, $u_{ref} = 3.2 \text{ m/s}$).

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 Verteilungen an der Stelle des stromauf gelegenen Windschutzstreifens ($x = 0 \cdot (h+H)$) Abb.4.1 zu entnehmen sind. Während die horizontale Anströmungsgeschwindigkeit im bodennahen Bereich über die gesamte Länge des Rechenraumes annähernd konstant bleibt (Abb.4.1a), nimmt die turbulente kinetische Energie stark ab (Abb.4.1b). 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 ($w = 0 \text{ m/s}$), den Druck ($p = 0 \text{ Pa}$) und die Dissipations-

rate der Turbulenz (TurbDiss = 0.21 W/kg) wurden als über die Höhe unverändert angesetzt.

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

4.3 Druckverlustkoeffizient k_r

Die porösen Bewuchsstreifen wurden in den numerischen Untersuchungen vereinfacht als planare Widerstände modelliert. Der Windwiderstand eines dünnen, porösen Hindernisses wird normalerweise durch den dimensionslosen Widerstandskoeffizienten k_r beschrieben [HOERNER 1965, IDELCHIK 1986]

$$k_r = (p_1 - p_2) / (0.5 \cdot \rho \cdot u_1^2), \quad (4.13)$$

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_r ist abhängig von der Porosität ϕ , von 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 $Re_o < 10$, zwei 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 (Abb.4.2), 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.4.2), welche charakteristisch für die Anströmung des unteren, mittleren und oberen Bereiches der Windschutzstreifen sind. Mit den ebenfalls in Tab.4.2 aufgelisteten Re_o -Zahlen trifft das oben erwähnte zweite transitionale Strömungsregime zu, in dem die k_r -Werte von der Geschwindigkeit abhängen und überschlägig abgeschätzt etwa die Hälfte der nach Gl.(4.13) berechneten k_r -Werte des vollturbulenten Bereiches betragen. Vereinfacht

wurden letztendlich die in mittlerer Windschutzstreifenhöhe geltenden, in Tab.4.2 fettgedruckten k_r -Werte verwendet.

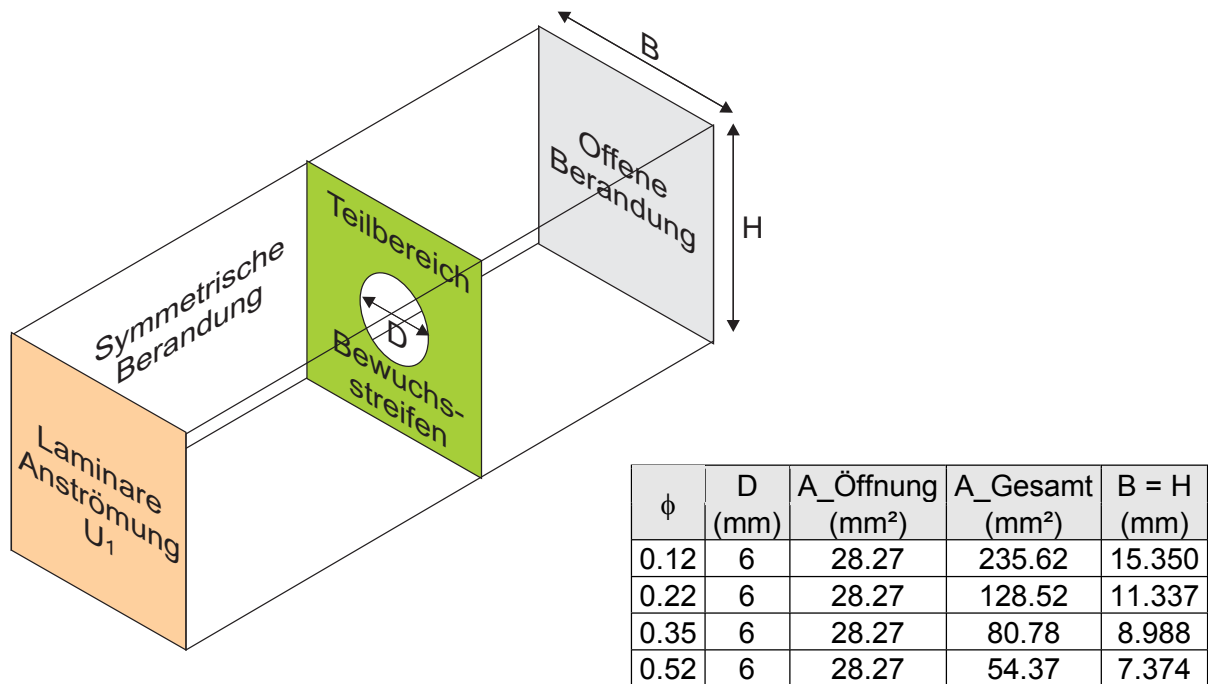


Abb. 4.2 Bestimmung der Druckverlustbeiwerte k_r : Aufbau des numerischen Windkanals und Geometrie der repräsentativen Bewuchsstreifenausschnitte.

ϕ	u_1 [m/s]	Δp (Pa)	$Re_0 = u_1 d_h / (\nu \phi)$	$k_r = \Delta p / (u_1^2 \rho)$
0.12	2	221.0	5435	46.4
	3	470.0	8152	43.9
	4	810.0	10870	42.5
0.22	2	70.0	2964	14.7
	3	147.0	4447	13.7
	4	249.0	5929	13.1
0.35	2	26.3	1863	5.5
	3	52.5	2795	4.9
	4	81.5	3727	4.3
0.52	2	9.1	1254	1.9
	3	18.7	1881	1.8
	4	29.3	2508	1.5

Tab. 4.2 Druckverlustbeiwerte k_r für dünne, poröse Bewuchsstreifen. ($d_h = 0.006$ m, $\rho = 1.19$ kg/m³, $\nu = 1.84E-05$ Ns/m²)

5. Beurteilung der Wirksamkeit von Windschutzstreifen

5.1 Überblick: Beurteilungen in der Literatur

Es gibt viele Möglichkeiten, Windschutz zu quantifizieren. Der Ausdruck „wirksamer Schutz“ beinhaltet u.a. sowohl die maximal erreichbare Reduktion der Windgeschwindigkeit, als auch die Ausdehnung der Fläche, über welcher diese Reduktion auftritt. Die zweifellos am häufigsten verwendeten Bewertungsgrößen des Windschutzes sind:

u_2 / u_1 Das Verhältnis zwischen der Windgeschwindigkeit in der durch den Windschutzstreifen beeinflussten Strömung u_2 zur Windgeschwindigkeit in der ungestörten Anströmung u_1 . Alternativ wird oftmals auch die Reduktion der Windgeschwindigkeit $1 - u_2 / u_1$ angegeben. Die Windgeschwindigkeiten werden häufig auf Referenzwerte in gleicher Höhe z bezogen, teilweise jedoch auch auf einen Referenzwert in der Höhe H (Oberkante Windschutzstreifen)

u_{\min} Die minimale Geschwindigkeit im Lee des Streifens.

x_{\min} Die Entfernung von u_{\min} vom Streifen.

d_p Die Distanz, über welche $u_2 / u_1 < c$ gilt. c stellt dabei einen variablen Faktor dar, der häufig zwischen 0.7 und 0.8 liegt.

Diese Definitionen berücksichtigen jedoch keine Änderungen der Turbulenz. Zur Charakterisierung der Turbulenz sind in der Literatur oftmals Angaben zu folgenden Größen angegeben: Standardabweichungen der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten, Werte der turbulenten kinetischen Energie und Spektren der Geschwindigkeitsschwankungen in Hauptströmungsrichtung.

Die Wirksamkeit von Windschutzanlagen kann auch mit den Ansätzen des Windkomforts bewertet werden. Ziel dieser Bewertung ist, ein akzeptables Windklima im Hinblick auf den vom Menschen empfundenen Komfort zu garantieren, d.h. beispielsweise ein bestimmtes Maß an Lebensqualität in Wohnbereichen oder die wirtschaftliche Nutzbarkeit von Innenstädten oder Siedlungszentren zu gewährleisten. Ein Vergleich der gängigen Windkomfortkriterien wurde von KOSS 2003 durchgeführt. Eine umfangreiche Literaturübersicht, die mit praktischen Beispielen ergänzt ist, wurde von BLOCKEN und CARMELIET 2004 verfasst.

Ansätze zur Windkomfortbewertung setzen sich im Allgemeinen aus zwei Bedingungen zusammen:

- Grenzwerte der lokalen bodennahen Windgeschwindigkeit für verschiedene Personenaktivitäten bzw. für diverse Außenbereiche

$$u_g = u + g \cdot \sigma \leq u_{lim} \quad (5.1)$$

mit u_g = Böenwindgeschwindigkeit
 u_{lim} = Grenzgeschwindigkeit
 g = Böenfaktor

und

- entsprechende Auftretenswahrscheinlichkeiten, d.h. tolerierbare Häufigkeiten dieser Geschwindigkeitsgrenzwerte in einer bestimmten Zeitspanne.

$$p^T (u_g \geq u_{lim}) \leq p_{comf} \quad (5.2)$$

mit p^T = Auftretenswahrscheinlichkeit im Referenzzeitraum T.
 p_{comf} = Komfortgrenzwert der Auftretenswahrscheinlichkeit für bestimmte Personenaktivitäten bzw. für bestimmte Außenbereiche.

Für eine bestimmte Personenaktivität bzw. einen bestimmten Außenbereich wird der Windkomfort demnach als akzeptabel betrachtet, wenn die zugehörige Grenzgeschwindigkeit u_{lim} mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als p_{comf} im Referenzzeitraum T auftritt. Komfortbedingungen werden somit im Allgemeinen nicht dauernd gewährleistet, sondern es werden für einen gewissen Zeitanteil unkomfortable und auch gefährliche Bedingungen akzeptiert.

Hauptunterschied in den angewandten Bewertungsansätzen ist die Anzahl der definierten Aktivitäten bzw. Außenbereichen und die dazugehörigen Geschwindigkeitsgrenzwerte.

Werte für den Böenfaktor g aus verschiedenen Komfortkriterien sind in Tab.5.1 zusammengestellt.

Davenport	0 *
Gandemer	1
Isyumov and Davenport	1.5
Lawson and Penwarden	2.68
Hunt, Poulton and Mumford	3
Melbourne	3.5

* empfiehlt jedoch die Berücksichtigung der Turbulenz

Tab. 5.1 Böenfaktoren g aus verschiedenen Komfortkriterien [nach KOSS 2003, CATALDO und DURANONA 2003]

Prinzipiell gibt es demnach zwei Arten von Kriterien: Die einen basieren auf dem stündlichen Mittelwert der Windgeschwindigkeit ($g = 0$), die anderen berücksichtigen die lokale Turbulenz ($g \neq 0$). Der physikalisch sinnvollere Ansatz berücksichtigt sicherlich die Turbulenz. Die Anwendung unterschiedlicher, auf der Böenwindgeschwindigkeit basierender Komfortkriterien führt jedoch zu teils erheblichen Unterschieden in den Ergebnissen von Komfortstudien. Diese werden von KOSS 2003 auf die diversen eingeführten Vereinfachungen zurückgeführt. Eine Standardisierung von Komfortuntersuchungen wird angestrebt, steht momentan jedoch noch aus.

5.2 Angewandte Beurteilungsgrößen

Durch die Analyse der Strömungsfelder, welche für verschiedene Windschutzstreifenkonfigurationen in den Bereichen zwischen den beiden Schutzstreifen vermessen wurden, ist es möglich, den einzelnen Anordnungen Schutzparameter zuzuweisen. Diese beschreiben die Wirksamkeit der unterschiedlichen Windschutz-Doppelanordnungen unter Berücksichtigung verschiedener Geschwindigkeits- und Turbulenzgrößen.

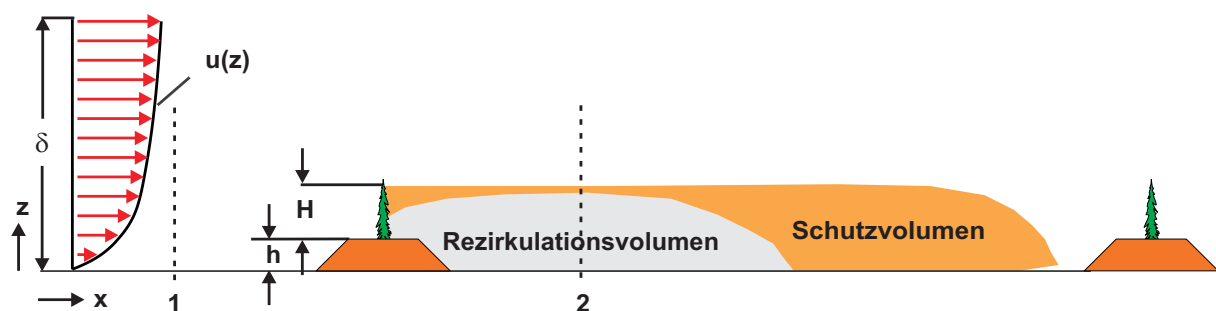


Abb. 5.1 Bezeichnungen zur Schutzbewertung
 1 = Position in ungestörter Anströmung
 2 = Position im durch die Windschutzanlage beeinflussten Strömungsbereich

Zur Beurteilung der Effizienz der Windschutzanordnungen wurden folgende lokale Parameter bestimmt:

Schutzparameter S_u

$$S_u(x, z) = 1 - \frac{u_2(x, z)^2}{u_1(z)^2} \quad (5.3)$$

gibt die relative Änderung des zeitgemittelten, horizontalen Impulsstroms der geschützten (Pos.2 in Abb.5.1) zur ungeschützten (Pos.1 in Abb.5.1) Anströmung in einer Höhe z wieder. Da die aerodynamische Kraftwirkung auf Körper

proportional zu 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.

Windschutzparameter nach Gandemer

$$f(x,z) = \frac{u_1(z) + \sigma(u_1(z))}{|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z))} \quad (5.4)$$

wurde von GANDEMER (1981) als Komfortparameter eingeführt. Er ist ein „subjektiver“ Parameter, welcher aus statistischen Überlegungen abgeleitet wurde und welcher auch die turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen berücksichtigt. Der Mittelwert u_i und die Standardabweichung $\sigma(u_i)$ der horizontalen Geschwindigkeit an einem bestimmten Ort werden addiert und die Werte der ungestörten Anströmung ($i = 1$, Pos.1 in Abb.5.1) zu denen der gestörten ($i = 2$, Pos.2 in Abb.5.1) Strömung ins Verhältnis gesetzt.

Wirkt sich der Windschutz an einem Ort strömungsberuhigend aus, gilt $f > 1$, verschlechtert er hingegen die Bedingungen, gilt $0 < f < 1$.

Schutzparameter $S_{u'w'}$

Weil die mittlere horizontale Geschwindigkeit der Anströmung mit der Höhe zunimmt (Kap.3.6), ist die (zeitgemittelte) Turbulenzgröße $u'w'_1$, welche die Intensität des turbulenten vertikalen Austausches (den turbulenten vertikalen Impulsfluss) der Anströmung beschreibt, per Konvention negativ [STULL 1988, GARRATT 1994]. Das bedeutet, dass turbulente Wirbel Impuls abwärts transportieren. Der Schutzparameter $S_{u'w'}$

$$S_{u'w'}(x,z) = 1 - \frac{u'w'_2(x,z)}{u'w'_1(z)} \quad (5.5)$$

setzt die zeitgemittelten, vertikalen turbulenten Impulsflüsse bzw. die Schubspannungen der gestörten (Pos.2 in Abb.5.1) und der ungestörten (Pos.1 in Abb.5.1) Strömung in Beziehung und eignet sich somit zur Beurteilung der Wirksamkeit einer Windschutzanlage hinsichtlich des Stoffaustausches in vertikaler Richtung.

Die möglichen Werte dieses Parameters lassen sich wie folgt interpretieren:

$0 < S_{u'w'} < 2$: Verringerung des Impulsaustausches.

$S_{u'w'} < 0$: Verstärker, zum Boden gerichteter Impulsaustausch.

$S_{u'w'} > 2$: Verstärker, nach oben gerichteter Impulsaustausch.

Für diese einzelnen Schutzparameter wurden des Weiteren entsprechende Schutzvolumen berechnet. Unter einem Schutzvolumen (skizziert in Abb.5.1) versteht man eine Fläche, in der ein Mindestwert des entsprechenden Schutzparameters erreicht wird, multipliziert mit der Länge L eines Windschutzstreifens (rechtwinklig zur Anströmrichtung).

Da der Schutzfaktor S_u die Windböigkeit nicht explizit berücksichtigt, jedoch die Abnahme der mittleren Geschwindigkeit im windgeschützten Gebiet üblicherweise mit einer Zunahme der turbulenten kinetischen Energie TKE einhergeht, wurde auch deren relative Größe TKE_{rel} bestimmt. Dabei wird die lokale TKE im Zwischenfeld (Pos.2 in Abb.5.1) mit der TKE der ungestörten Anströmung (Pos.1 in Abb.5.1) in gleicher Höhe z normiert:

$$TKE_{rel}(x,z) = TKE_2(x,z) / TKE_1(z) \quad (5.6)$$

$$\text{mit } TKE(x,z) = 0.75 \cdot (u'(x,z)^2 + w'(x,z)^2). \quad (5.7)$$

Bis zu einer bestimmten Durchlässigkeit eines Windschutzstreifens tritt eine Strömungsablösung ein, d.h. im Lee eines Streifens bildet sich eine rotierende Luftmasse aus. Solch ein Bereich wird als Rezirkulationsgebiet bezeichnet und kann durch Stromlinienberechnungen ermittelt werden. Für die Trennstromlinie, welche das Rezirkulationsgebiet von der Umströmung abgrenzt, gilt

$$\psi = \int u(z) dz / \psi_{ref} = 0. \quad (5.8)$$

Der windgeschützte Bereich ist meistens wesentlich ausgedehnter als das möglicherweise auftretende Rezirkulationsgebiet (skizziert in Abb.5.1). Letzteres ist daher nur bedingt zum Beschreiben der Schutzwirkung geeignet.

5.3 Umrechnungen der verwendeten Schutzparameter

Durch eine einfache Umformung von Gl.5.3 und von Gl.5.4 kann die relative Veränderung und die Reduktion der mittleren Geschwindigkeit bzw. der Böenwindgeschwindigkeit, bezogen auf die jeweiligen Geschwindigkeiten in der ungestörten Anströmung, berechnet werden. Die entsprechenden Umformungen dieser Gleichungen sind in Tab.5.2 für den Schutzparameter S_u und in Tab.5.3 für den Komfortparameter f zusammengestellt. Zusätzlich sind die umgerechneten Größen der bei der Ergebnisdarstellung in Kap.6 bis Kap.9 verwendeten Parameterwerte angegeben.

Parameter S_u	$S_u = 1 - u_2^2 / u_1^2$	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.75	0.80
Relative Windgeschwindigkeit	$ u_2 /u_1 = (1-S_u)^{1/2}$	0.89	0.87	0.84	0.77	0.71	0.63	0.55	0.50	0.45
Geschwindigkeitsreduktion	$1- u_2 /u_1 = 1-(1-S_u)^{1/2}$	0.11	0.13	0.16	0.23	0.29	0.37	0.45	0.50	0.55

Tab. 5.2 Umrechnungstabelle:
Schutzparameter S_u - Relative Veränderung und Reduktion der mittleren Geschwindigkeit

Komfortparameter f [GANDEMER 1981]	$f = (u_1 + \sigma(u_1)) / (u_2 + \sigma(u_2))$	1.25	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00
Relative Böenwindgeschwindigkeit	$1/f = (u_2 + \sigma(u_2)) / (u_1 + \sigma(u_1))$	0.80	0.67	0.50	0.33	0.25	0.20
Reduktion der Böenwindgeschwindigkeit	$1-1/f = 1 - (u_2 + \sigma(u_2)) / (u_1 + \sigma(u_1))$	0.20	0.33	0.50	0.67	0.75	0.80

Tab. 5.3 Umrechnungstabelle:
Komfortparameter f - Relative Veränderung und Reduktion der Böenwindgeschwindigkeit

6. Einfluss des Windschutzstreifenabstandes

6.1 Reduktion der aerodynamischen Kraftwirkung

6.1.1 Ergebnisse Windkanal

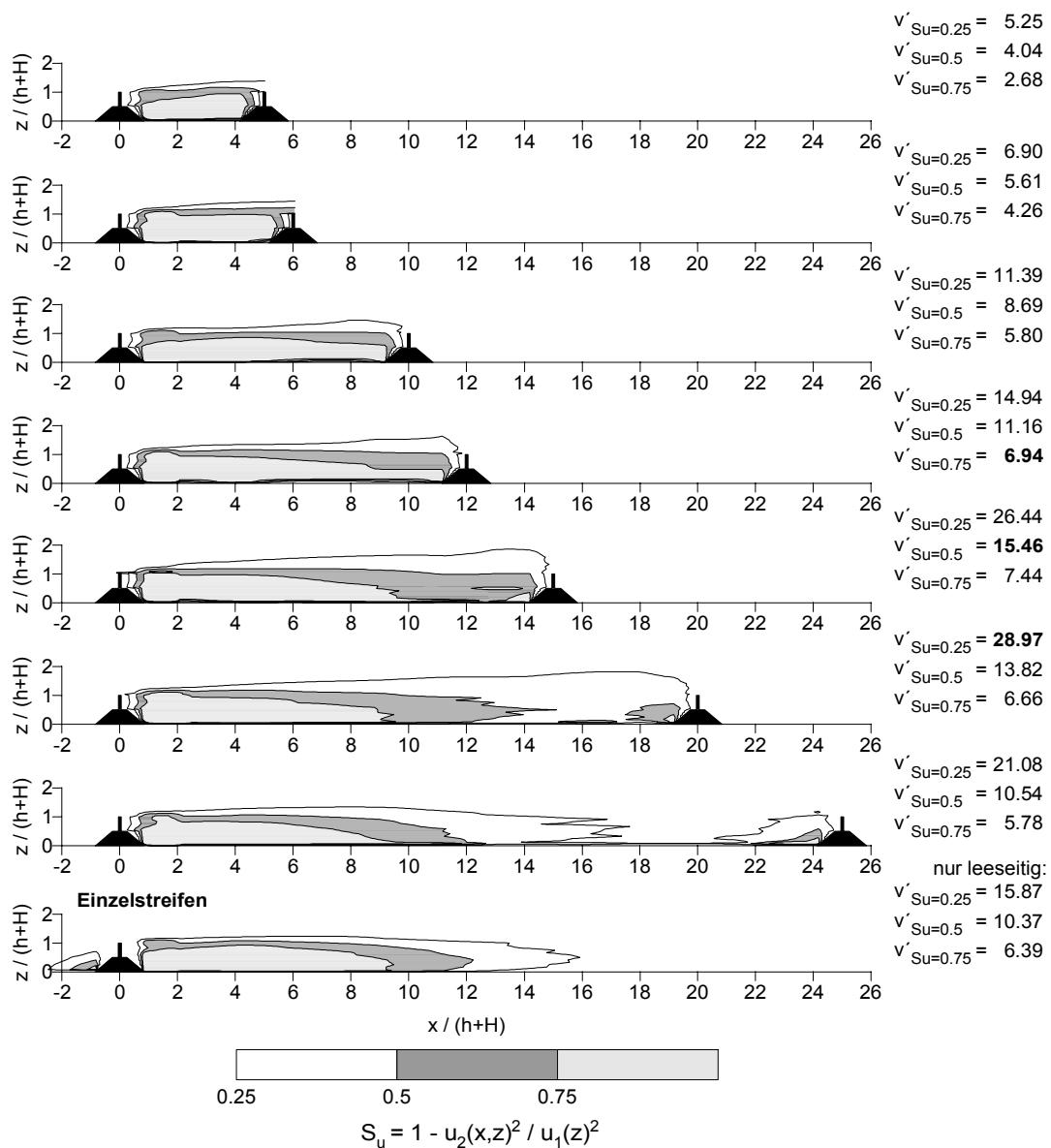


Abb. 6.1 Isolinien des Schutzparameters S_u und zugehörige Schutzvolumen $v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L)$ für verschiedene Windschutzstreifenabstände a und für den Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000, RUCK 2001).
 $H/h = 1$, $\phi = 52\%$, $\alpha = 40^\circ$.

Der Einfluss des Streifenabstandes auf den Windschutz wird exemplarisch an Windschutzstreifen der Porosität $\phi = 52\%$ gezeigt. In Abb.6.1 sind Schutzvolumen V_{Su} für verschiedene Abstände dargestellt. Zuerst sind zum Vergleich Schutzvolumen eines Einzelstreifens nach RUCK und DONAT 2000, RUCK 2001 angegeben.

Das Schutzvolumen $V_{S_u=0.25}$, d.h. der Bereich, in dem sich die aerodynamische Kraftwirkung auf vorhandene Körper um mindestens 25 % zur Kraftwirkung in der ungeschützten Anströmung reduziert, steigt bei den untersuchten Abständen bis zu $a = 20 \cdot (h+H)$ kontinuierlich an. Das Zwischenfeld ist bis zu diesem Abstand über seine gesamte Länge und mindestens über die Gesamthöhe der Windschutzstreifen geschützt. Im Vergleich zum Einzelstreifen kann der Bereich mit $S_u = 0.25$ durch die Anordnung eines zweiten Walls merklich vergrößert werden (bei $a = 20 \cdot (H+h)$ auf das 1.83-fache). Bei $a = 25 \cdot (h+H)$ ist das Zwischenfeld nicht länger durchgehend geschützt, sondern es bilden sich zwei Schutzvolumen aus: Ein Großes im Lee des ersten Windschutzstreifens und ein Kleines im Luv des Zweiten.

Die Doppelanordnung mit einem Abstand von $12 \cdot (H+h)$ ist hinsichtlich der Größe des Schutzvolumens dem Einzelstreifen am ähnlichsten; die Ausbildung des Volumens ist bei dem beidseitig von Wällen eingegrenzten Bereich jedoch gleichmäßiger als leeseits des Einzelstreifens.

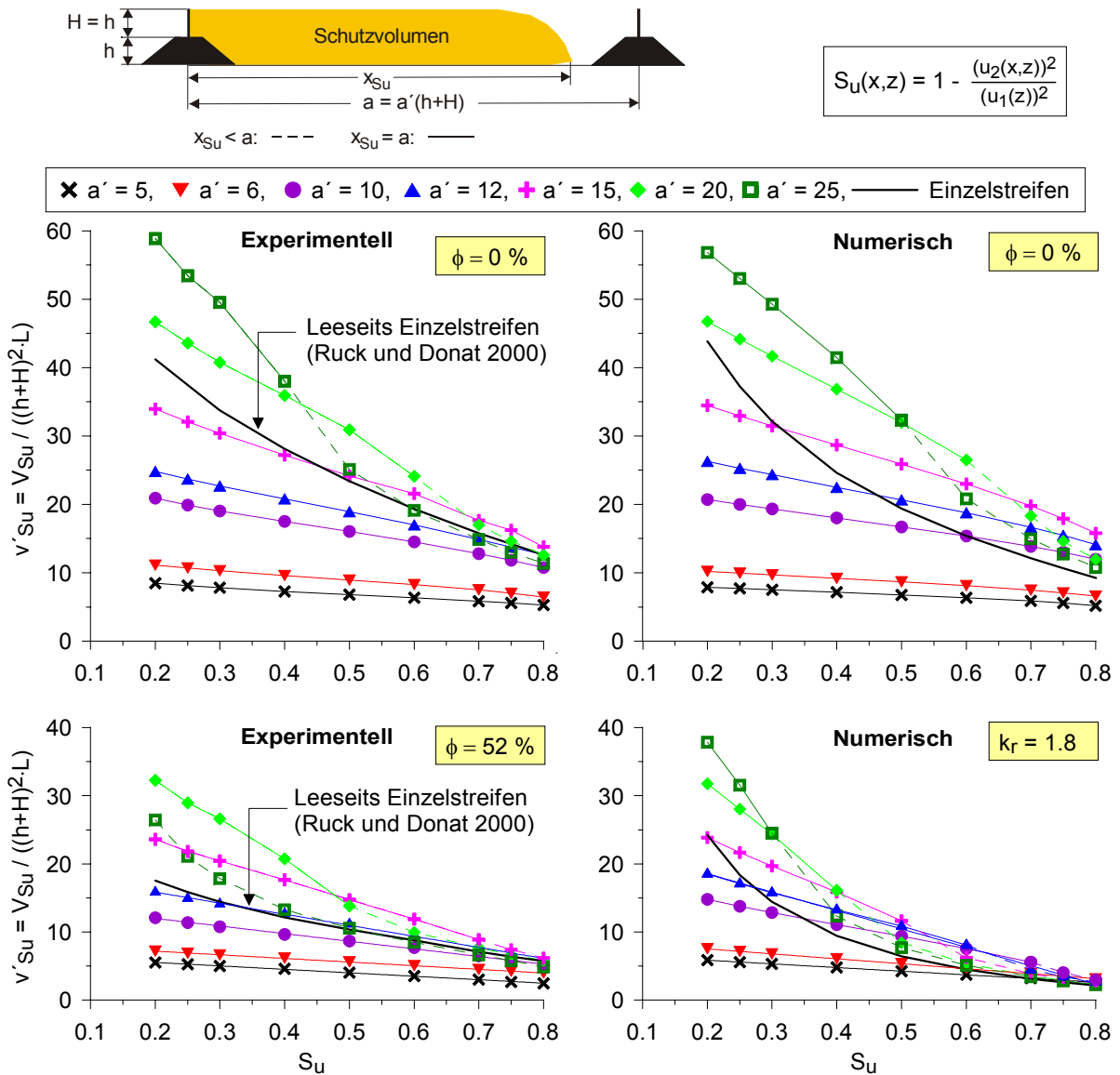
Für größere Reduktionen der aerodynamischen Kraftwirkungen - d. h. für höhere Schutzparameter S_u - stellt sich das maximale Volumen bei kleineren Abständen der Doppelstreifen ein.

Das Gesamtvolumen mit $S_u = 0.75$ vergrößert sich bis zu einem Abstand von $a = 15 \cdot (h+H)$, jedoch ist lediglich bis $a = 12 \cdot (h+H)$ ein über das gesamte Zwischenfeld zusammenhängendes Gebiet geschützt. Die Mindesthöhe des kompakten Schutzvolumens ist bis zu dieser Streifenentfernung ungefähr gleich der Sockelwallhöhe. Bei $a = 15 \cdot (h+H)$ überlagern sich die leeseitige Schutzwirkung des ersten Streifens und die luvseitige Schutzwirkung des zweiten Streifens für $S_u = 0.75$ nicht mehr, sondern sind von Gestalt und Größe den entsprechenden Schutzvolumen des Einzelstreifens vergleichbar.

In Abb.6.2 sind auf der linken Seite die experimentell ermittelten dimensionslosen Schutzvolumen $v'_{S_u} = V_{S_u} / (h+H)^2 \cdot L$ über die Reduktion der aerodynamischen Kraftwirkung S_u sowohl für undurchlässige als auch für mitteldichte Bewuchsstreifen dargestellt. S_u ist dabei der Mindestwert der Kraftminderung; Bereiche größerer Schutzwirkung sind darin enthalten.

Abb.6.2 (linke Seite) zeigt, dass bei kleinen Abständen stark geschützte Bereiche nur wenig kleiner sind als schwach geschützte; mit zunehmendem Streifenabstand nimmt diese Diskrepanz zu. Dies gilt, solange das Zwischenfeld über die gesamte Länge geschützt ist ($x_{S_u} \cong a$).

Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Einfluss des im Luv angeordneten zweiten Streifens mit geforderter, steigender aerodynamischer Kraftminderung S_u nachlässt. D.h. Bereiche mit geringer Schutzwirkung (kleinen S_u -Werten) lassen sich im Vergleich zum Einzelstreifen durch eine Doppelanordnung mit geeignetem Abstand sehr viel stärker vergrößern als Bereiche mit hoher Schutzwirkung (hohen S_u -Werten).



Berechnung der exp. Schutzvolumengröße:

Undurchlässige Streifen ($\phi = 0\%$):

- $a' = 5: v'_{Su} = -5.13 \cdot S_u + 9.39$
- $a' = 6: v'_{Su} = -7.46 \cdot S_u + 12.61$
- $a' = 10: v'_{Su} = -16.28 \cdot S_u + 24.06$
- $a' = 12: v'_{Su} = -19.94 \cdot S_u + 28.77$
- $a' = 15: v'_{Su} = -32.41 \cdot S_u + 40.31$
- $a' = 20: v'_{Su} = -54.63 \cdot S_u + 57.48$ für $S_u \leq 0.6$
- $a' = 25: v'_{Su} = -103.15 \cdot S_u + 79.61$ für $S_u \leq 0.4$

Mitteldichte Streifen ($\phi = 52\%$):

- $a' = 5: v'_{Su} = -5.08 \cdot S_u + 6.55$
- $a' = 6: v'_{Su} = -5.33 \cdot S_u + 8.26$
- $a' = 10: v'_{Su} = -11.18 \cdot S_u + 14.23$
- $a' = 12: v'_{Su} = -16.23 \cdot S_u + 19.10$
- $a' = 15: v'_{Su} = -28.94 \cdot S_u + 29.21$
- $a' = 20: v'_{Su} = -60.46 \cdot S_u + 44.43$ für $S_u \leq 0.5$
- $a' = 25: v'_{Su} = 40.51 - 89.00 \cdot S_u + 56.84 \cdot S_u^2$

Abb. 6.2 Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Schutzparameter S_u für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen $a' = a / (h+H)$ und leeseits von Einzelstreifen für die Porositäten $\phi = 0\%$ und $\phi = 52\%$ bzw. $k_r = 1.8$. Links: Physikalische Modellierung; Rechts: Numerische Vorhersage.
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.

6.1.2 Ergebnisse Numerik

Die numerischen Ergebnisse (Abb.6.2 rechte Seite) bestätigen, dass der Abstand der beiden Windschutzstreifen einen signifikanten Einfluss auf die Größe der Schutzvolumen im Zwischenfeld der beiden Streifen ausübt. Die Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen werden qualitativ sehr gut bestätigt. Quantitativ stimmt die Größe der Schutzvolumen bei undurchlässigen Streifen sehr gut überein, bei mitteldichten Streifen treten jedoch größere Abweichungen auf, worauf in Kap.7.1.2 näher eingegangen wird.

6.2 Fußgängerwindkomfort

Wird die Windberuhigung unter Beachtung der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen mit dem bereits in Kap.5 beschriebenen Schutzparameter f bewertet, ergeben sich ähnliche grundlegende Tendenzen wie beim Schutzparameter S_u . Exemplarisch wird in Abb.6.3 für $f = 1.5$ der Übergang vom noch durchgehend geschützten Bereich zu zwei sich nicht mehr berührenden Bereichen bei größerem Abstand dargestellt. Das luvseitige Schutzvolumen des zweiten Streifens bildet sich nur für kleine Komfortparameter aus (hier $f = 1.5$).

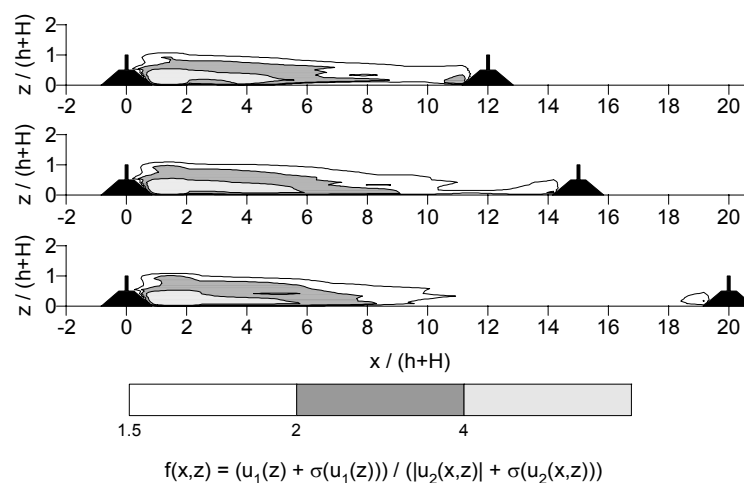


Abb. 6.3 Isolines des Komfortparameters f für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen a. $H/h = 1$, $\phi = 52\%$, $\alpha = 40^\circ$.

Der größte Einfluss des Windschutzstreifenabstandes auf die Größe der Schutzvolumen v'_f wird für niedrige Komfortparameter f (geringer Komfort) beobachtet (Abb. 6.4). Der Einfluss des Abstandes nimmt mit zunehmendem Komfortparameter ab, da die am stärksten geschützten Bereiche sich unmittelbar hinter dem in Anströmrichtung ersten Windschutzstreifen ausbilden (Abb.6.3, $f = 4$) und vom zweiten Windschutzstreifen nur bei kleinen Abständen beeinflusst werden. Das bedeutet somit, dass vor allem schwach geschützte Bereiche durch einen optimal angeordneten zweiten Streifen merklich vergrößert werden können. Der optimale Abstand ist bei

Beurteilung der Schutzwirksamkeit mit dem Komfortparameter f jedoch kleiner als bei dem Schutzparameter S_U .

Die nicht mehr durchgängig geschützten Bereiche im Zwischenfeld doppelt angeordneter Windschutzstreifen stimmen gut mit den Schutzvolumen im Luv und Lee eines strukturgleichen Einzelstreifens [RUCK und DONAT 2000] überein.

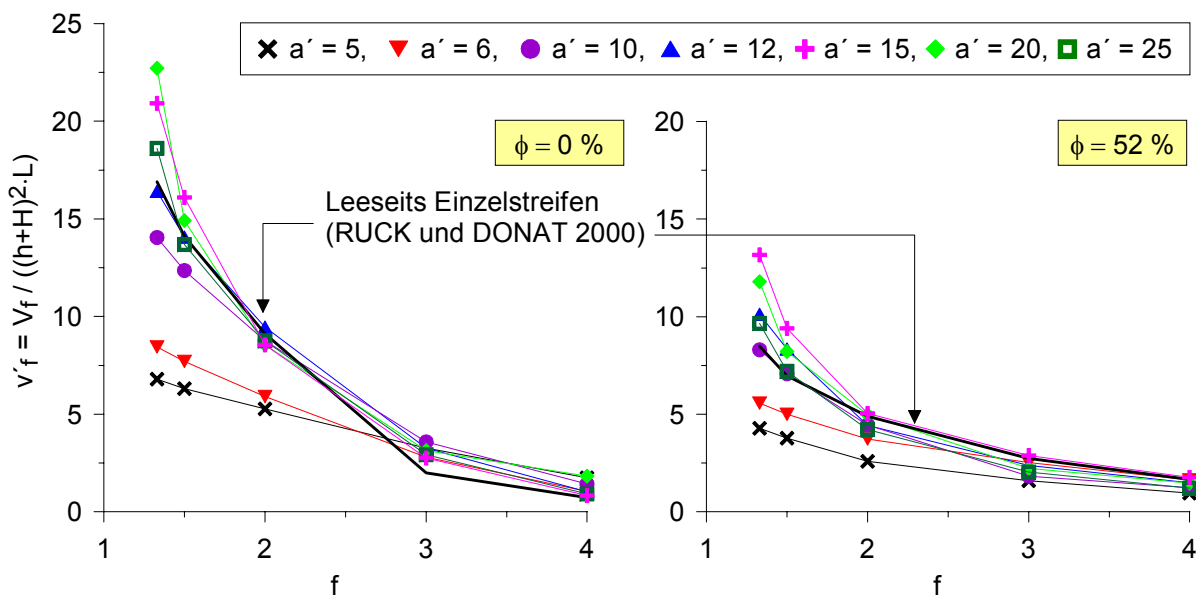


Abb. 6.4 Schutzvolumen v'_f in Abhängigkeit vom Komfortparameter f für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen $a' = a / (h+H)$ und leeseits von Einzelstreifen für die Porositäten $\phi = 0\%$ und $\phi = 52\%$.
 $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$.

6.3 Veränderung des turbulenten vertikalen Impulsaustausches

In Abb.6.5 sind exemplarisch für vier verschiedene Abstände $a' = 5, 10, 15$ und 20 Isolinien des Schutzparameters $S_{U'w}$ für mitteldichte Windschutzstreifen ($\phi = 52\%$) dargestellt. Zusätzlich ist noch die Darstellung des entsprechenden Einzelstreifens aus der Untersuchung von RUCK und DONAT 2000 aufgeführt. Während bei dem kleinsten untersuchten Windschutzstreifenabstand ($a' = 5$) der turbulente Impulsfluss über die gesamte Länge des Zwischenfeldes noch über mindestens Sockelwallhöhe reduziert ist, weisen die geschützten Bereiche bei größeren Abständen ab ca. $x' = x / (h+H) = 4 - 5$ eine geringere Höhe auf. Bereiche mit erhöhtem turbulentem Impuls-transport entwickeln sich an der Oberkante der stromauf gelegenen Bewuchsstreifen und breiten sich stromabwärts in vertikaler Richtung aus. Bereiche, in denen sich der zum Boden gerichtete turbulente vertikale Impulsfluss gegenüber dem der ungestörten Anströmung verdoppelt, stellen sich erst ab $x' = 4$ ein und erstrecken sich bei 15fachem Abstand noch bis zum zweiten stromab gelegenen Streifen. Bei größeren Abständen ($a' = 20$ und 25) nimmt die Länge dieser Bereiche nicht mehr zu (bis $x' = 14$ bzw. $x' = 15$).

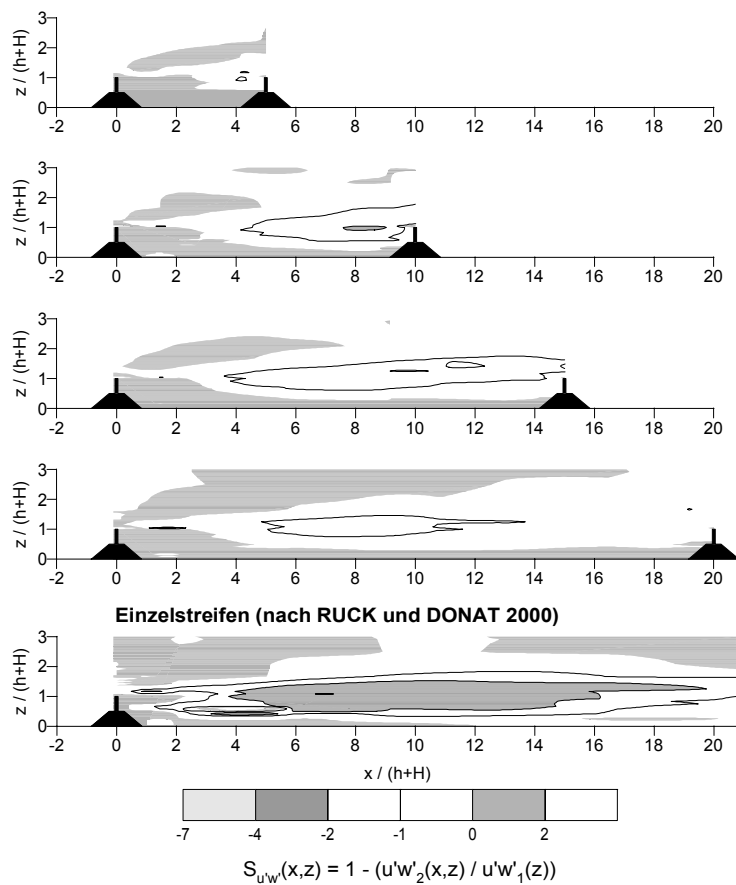


Abb. 6.5 Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w}$ für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen und für den Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000).
 $H/h = 1$, $\phi = 52\%$, $\alpha = 40^\circ$.

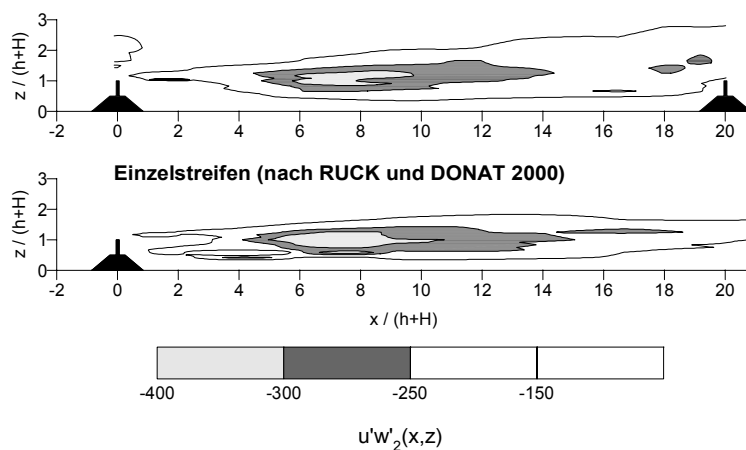


Abb. 6.6 Isolinien der Korrelationen $u'w'_2$ für eine Doppelanordnung mit $a = 20 \cdot (H+h)$ und für den Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000).
 $H/h = 1$, $\phi = 52\%$, $\alpha = 40^\circ$.

Der Vergleich mit den Ergebnissen der Einzelstreifenuntersuchung von RUCK und DONAT 2000 ist auf den ersten Blick nicht sonderlich gut (Abb.6.5): Der turbulente Impulsfluss erhöht sich hinter einem einzelnen Streifen wesentlich stärker als im Zwi-

schenfeld der Doppelanordnungen und Bereiche mit gleicher Zunahme weisen eine wesentlich größere horizontale Ausdehnung im Luv der Einzelstreifen auf. Dass die Ursache hierfür in den unterschiedlichen Grenzschichteigenschaften und nicht in einem abweichenden aerodynamischen Verhalten der Windschutzanordnungen liegt, zeigt Abb.6.6. Dort sind die unnormierten Korrelationswerte $u'w'_2$ dargestellt, welche eine recht gute Übereinstimmung aufweisen.

6.4 Rezirkulationsgebiete

6.4.1 Ergebnisse Windkanal

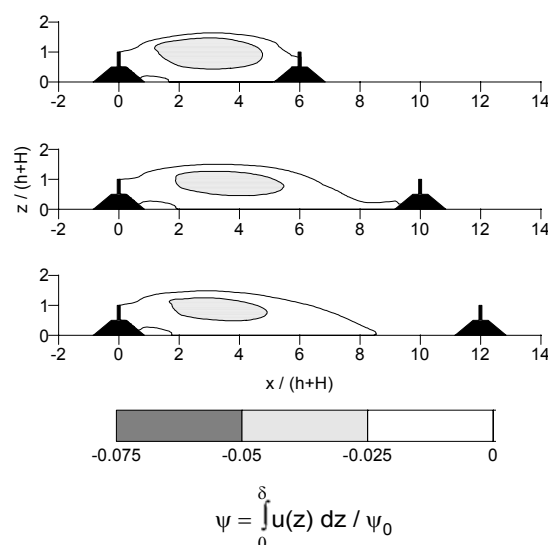


Abb. 6.7 Stromlinien $\psi \leq 0$ für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen a. $H/h = 1$, $\phi = 12\%$, $\alpha = 40^\circ$.

Exemplarisch sind in Abb.6.7 Stromlinien $\psi \leq 0$ für Doppelanordnungen mit 12 % porösen Bewuchsstreifen für drei Streifenabstände ($a' = 6, 10$ und 12) dargestellt. Solange der Abstand der beiden Windschutzstreifen kleiner oder gleich der Wiederanlegelänge x_{Rez} ist (x_{Rez} ist die Entfernung zum ersten Streifen, bei der die Trennstromlinie auf den Boden trifft), rotiert die abgelöste Luftmasse über das gesamte Zwischenfeld. Der zweite Windschutzstreifen beeinflusst dann die Größe des Rezirkulationsgebietes. Ist der Abstand der Streifen nur wenig größer als die Wiederanlegelänge x_{Rez} , kann eine leichte Vergrößerung der Wiederanlegelänge eintreten (beobachtet bei $a = 10 \cdot (h+H)$ für die Porositäten $\phi = 0\%$ und 12%), welche bei größeren Streifenabständen wieder verschwindet. Die „Verlängerungen“ weisen jedoch nur eine sehr geringe Höhe auf und tragen somit unwesentlich zu einer Vergrößerung der Rezirkulationsvolumen bei.

Bei großen Streifenabständen bleiben die Wiederanlegelängen und die Rezirkulationsvolumen annähernd konstant und stimmen gut mit denen der sockelwallbehafteten Einzelstreifen aus der Untersuchung von RUCK und DONAT 2000 überein.

6.4.2 Ergebnisse Numerik

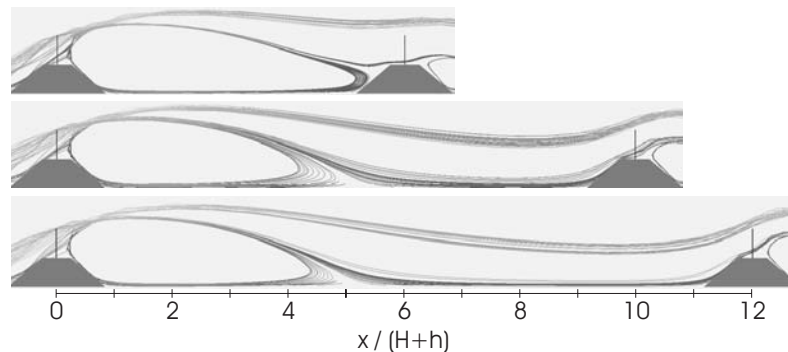


Abb. 6.8 Numerisch ermittelte Rezirkulationsgebiete für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen a .
 $H/h = 1$, $k_r = 43.9$, $\alpha = 40^\circ$.

Rezirkulationsgebiete aus numerischen Berechnungen, welche mit Hilfe einer linienförmigen Partikelquelle visualisiert wurden, sind in Abb.6.8 für poröse Windschutzstreifen mit $k_r = 43.9$ für drei verschiedenen Abstände $a' = 6, 10, 12$ dargestellt. Der Druckverlustkoeffizient entspricht in etwa einer Porosität $\phi = 12\%$. Ein Vergleich von Abb.6.8 mit Abb.6.7 zeigt, dass sich die Rezirkulationsgebiete prinzipiell ähneln, die numerisch ermittelten Wiederanlegelängen jedoch um einiges kleiner sind als die aus den Windkanaluntersuchungen. Ein leicht „verlängertes“ Rezirkulationsgebiet ist bei den numerischen Darstellungen daher schon bei 6fachem Streifenabstand zu erkennen. Bei größeren Abständen verändern sich die Rezirkulationsgebiete kaum. Für $a \geq 10 \cdot (H+h)$ tritt eine leichte Abnahme der Wiederanlegelängen mit zunehmendem Abstand auf, was in den folgenden Kapiteln noch deutlicher gezeigt wird. Die Wiederanlegelängen der Doppelanordnungen nähern sich somit erst allmählich denen der Einzelstreifen an (siehe z.B. Abb.7.12).

Die numerischen Modellierungen zeigen außerdem, dass weder die Größe noch die Stelle der maximalen Rückströmgeschwindigkeit durch eine Variation des Abstands der beiden Windschutzstreifen (zumindest für $5 < a' < 25$) beeinflusst wird.

6.5 Relative turbulente kinetische Energie

6.5.1 Ergebnisse Windkanal

In Abb.6.9 sind Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} exemplarisch für vier verschiedene Abstände $a' = 5, 10, 15$ und 20 für mitteldichte Windschutzstreifen ($\phi = 52\%$) dargestellt.

Bereiche mit erhöhter relativer turbulenter kinetischer Energie ähneln erwartungsgemäß sehr den Bereichen mit erhöhtem turbulentem vertikalem Impulstransport (Abb. 6.5).

Bei mitteldichten Streifen erhöht sich die relative turbulente kinetische Energie in einem kleinen Bereich unmittelbar im Lee des ersten stromauf gelegenen Windschutz-

streifens in Höhe von dessen Oberkante auf das 1.75fache. Größere Bereiche bilden sich, unabhängig vom Streifenabstand, bei $x' \approx 4$ aus. Diese erstrecken sich für Abstände $a' \leq 15$ bis zum zweiten Windschutzstreifen, für größere Abständen jedoch nur noch bis $x' \approx 12$. Die vertikale Ausdehnung ist bei $a' = 10$ insbesondere für Bereiche mit $\text{TKE}_{\text{rel}} = 2$ größer als bei höheren Abständen.

RUCK und DONAT 2000 beobachteten im Lee strukturgleicher Einzelstreifen einen wesentlich ausgedehnteren Bereich mit $\text{TKE}_{\text{rel}} = 2$ (von $x' \approx 0.5$ bis ca. $x' = 20$) und Erhöhungen von TKE bis auf das 4fache der ungestörten Anströmung. Diese Abweichungen sind großteils wiederum auf die unterschiedlichen Grenzschichtcharakteristiken zurückzuführen: TKE_1 (der ungestörten Anströmung) ist bei der Einzelstreifenuntersuchung wesentlich geringer als bei dieser Untersuchung, wodurch ein Anstieg der TKE_{rel} allein durch die Normierung erklärt werden kann.

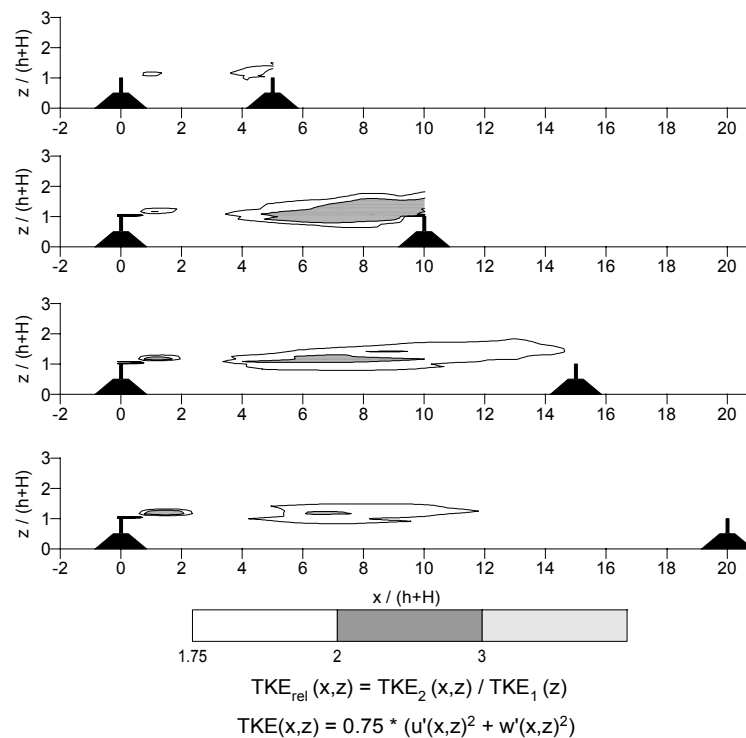


Abb. 6.9 Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen a .
 $H/h = 1$, $\phi = 52\%$, $\alpha = 40^\circ$.

6.5.2 Ergebnisse Numerik

In Abb.6.10 sind numerisch ermittelte Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie für einen variierten Windschutzstreifenabstand dargestellt. Die numerischen Berechnungen zeigen einen ähnlichen Anstieg von TKE_{rel} wie die physikalischen Modellierungen, jedoch treten die Bereiche erhöhter TKE näher beim luvseitigen Streifen auf (bereits bei $x' = 2$ im Gegensatz zu $x' = 4$ bei den Windkanaluntersuchungen) und erstrecken sich weiter zum Boden hin. Auch bei den numerischen Be-

rechnungen verlängern sich die Bereiche mit erhöhter TKE bis zu einem bestimmten Abstand. Ihre horizontale Ausdehnung nimmt bei einer weiteren Abstandsvergrößerung wiederum ab und bleibt daraufhin konstant. Ein leichter Anstieg der vertikalen Ausdehnung des Bereiches mit $TKE_{rel} = 1.75$ ist für $a' = 10$ unmittelbar stromauf des zweiten Streifens ebenfalls erkennbar. Bereiche mit erhöhter Energie im nahen Lee der ersten Streifen sind bei den numerischen Berechnungen zwar nicht zu beobachten, im wesentlichen werden die experimentellen Ergebnisse durch die numerischen Berechnungen jedoch qualitativ gut bestätigt.

Die numerischen Ergebnisse bestätigen des Weiteren, dass Bereiche mit erhöhter TKE bei großen Abständen dieselbe Größe und Form besitzen wie leeseits eines strukturgleichen Einzelstreifens.

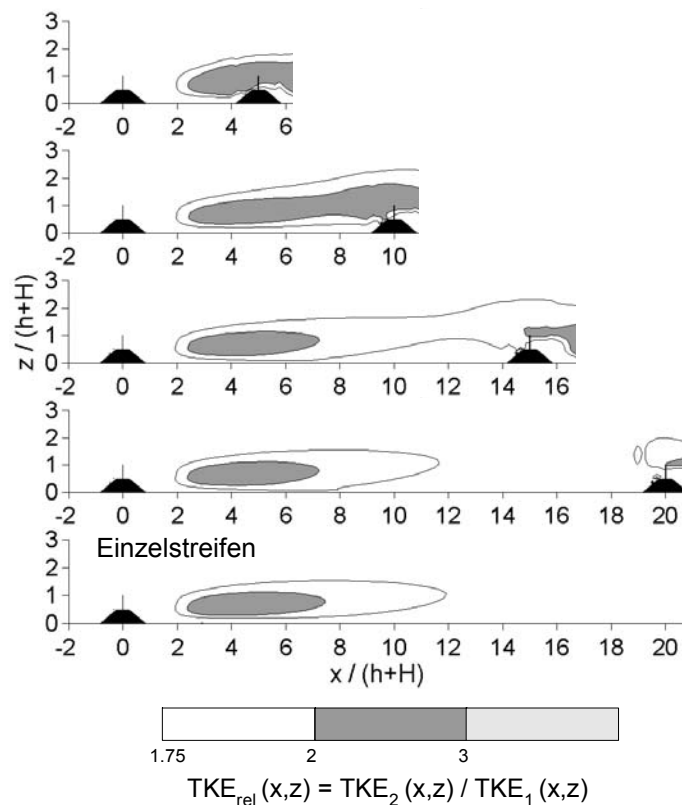


Abb. 6.10 Numerisch ermittelte Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Abstände zweier Windschutzstreifen a .
 $H/h = 1$, $k_r = 1.8$, $\alpha = 40^\circ$.

6.6 Vergleich mit Literaturdaten

BLINK und TRIENES 1956 führten Modellversuche im Windkanal durch und bestimmten mit einem Prandtl-Rohr die Geschwindigkeitsverteilung zwischen Doppelanordnungen mit verschiedenen Abständen. Leider wurde, wie zu dieser Zeit üblich, keine natürliche Grenzschicht simuliert. Ihr Vergleich mit Freilandversuchen zeigte, dass die leeseitige Geschwindigkeitsverteilung bei den Windkanaluntersuchungen um etwa Faktor 2 gestreckt war, was auf den vergleichsweise viel zu glatten Windka-

nalboden zurückgeführt wurde. Ihre Untersuchungen doppelt angeordneter undurchlässiger Windschutzstreifen zeigen (Abb.6.11 links), dass die Geschwindigkeitskurve u_2/u_1 (in der Graphik als v/v_0 bezeichnet) im Vergleich zur Kurve hinter einer Einzelanordnung gebogen verläuft. Der Wert des Maximums steigt mit zunehmendem Abstand an. Poröse Hecken ohne Wall ($\phi = 0.65$, Abb.6.11 rechts) weisen eine sehr geringe luvseitige Wirkung auf, wodurch der Geschwindigkeitsverlauf im Zwischenfeld weniger stark von dem im Lee eines Einzelstreifens abweicht.

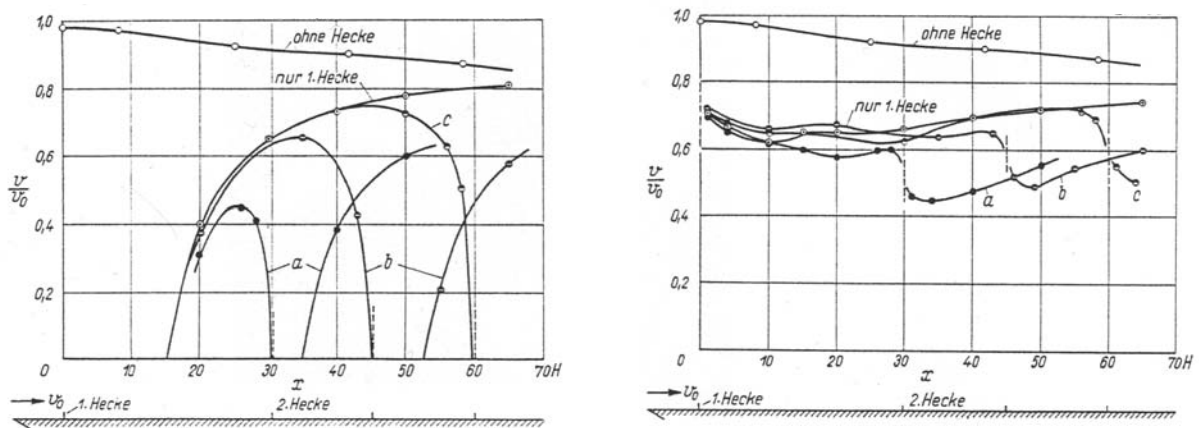


Abb. 6.11 Relative Windgeschwindigkeit u_2/u_1 im Zwischenfeld zweier ebenerdiger Windschutzstreifen mit verschiedenen Abständen a und im Luv strukturgleicher Einzelstreifen für die Porositäten $\phi = 0\%$ und $\phi = 65\%$ (nach BLENK und TRIENES 1956).

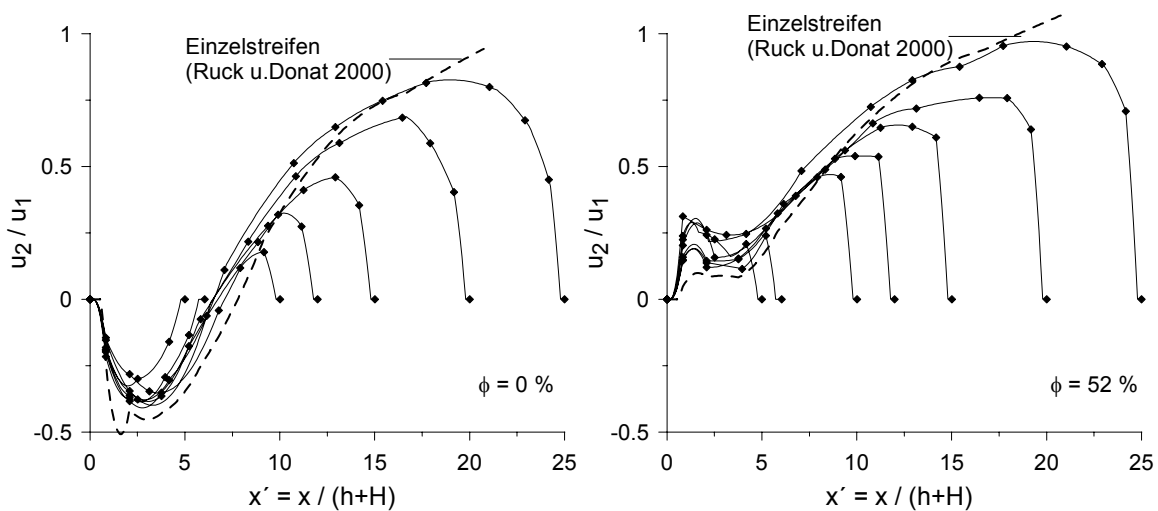


Abb. 6.12 Relative Windgeschwindigkeit u_2/u_1 im Zwischenfeld zweier sockelwallbehaffeter Windschutzstreifen mit verschiedenen Abständen a und im Luv strukturgleicher Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000) für die Porositäten $\phi = 0\%$ und $\phi = 52\%$ in Wallhöhe ($z = h$). $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$.

Vergleichbare Auftragungen für sockelwallbehäftete Windschutzstreifen sind in Abb.6.12 (links: undurchlässige Bewuchsstreifen, rechts: mitteldichte Bewuchsstreifen) dargestellt. Für undurchlässige Doppelanordnungen werden die Ergebnisse von BLENK und TRIENES 1956 prinzipiell bestätigt. Infolge der vorhandenen Wälle zeigt sich jedoch auch bei mitteldichten Bewuchsstreifen ein Rückgang auf $u_2/u_1 = 0$ in Wallhöhe. Übereinstimmend mit ebenerdigen Windschutzstreifen verringert sich auch hier die luvseitige Wirkung mit zunehmender Porosität, was in einem steileren Abfall der relativen Windgeschwindigkeitskurven im Luv der zweiten Streifen zum Ausdruck kommt.

7. Einfluss der Porosität der Bewuchsstreifen

7.1 Reduktion der aerodynamischen Kraftwirkung

7.1.1 Ergebnisse Windkanal

Isolinien des Schutzparameters S_u ($S_u = 0.25, 0.5$ und 0.75) sind in Abb.7.1 für fünf unterschiedlich poröse Windschutzstreifenanordnungen exemplarisch für einen Streifenabstand $a = 15 \cdot (h+H)$ dargestellt. Die Größen der geschützten Bereiche sind ebenfalls angegeben. Die Abbildung zeigt, dass die Porosität die Schutzwirkung der Windschutzstreifen stark beeinflusst. Die Größe der Schutzvolumen nimmt mit zunehmender Porosität ab. Dies gilt sowohl für hohe als auch für niedrige Schutzwirkung. Das Schutzvolumen zwischen undurchlässigen Windschutzstreifen ist bei diesem Abstand und bei niedriger Schutzwirkung ($S_u = 0.25$) um 47 % größer als das zwischen mitteldichten Windschutzanordnungen ($\phi = 52$ %). Für mittlere und hohe Schutzwirkung beträgt die entsprechende Zunahme der Schutzvolumengröße 64 % beziehungsweise 118 %.

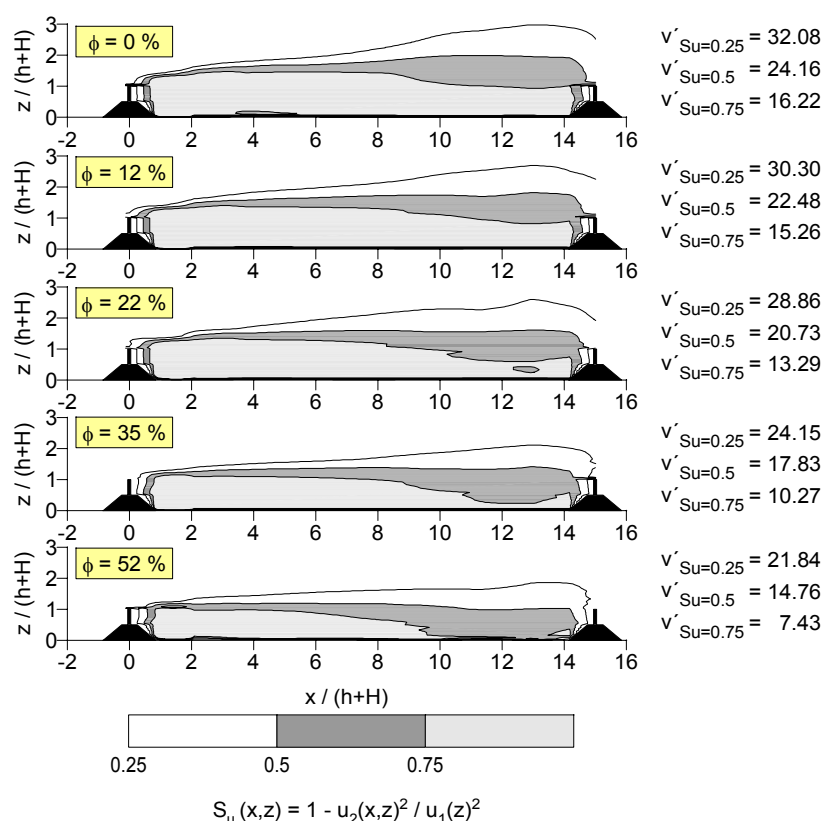


Abb. 7.1 Isolinien des Schutzparameters S_u und zugehörige Schutzvolumen $v'_{S_u} = V_{S_u} / ((h+H)^2 \cdot L)$ für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (h+H)$.

Die geometrische Form der Schutzvolumen (Abb.7.1) zeigt, dass offensichtlich vor allem der Bereich im Luv des zweiten Windschutzstreifens von der Porosität beein-

flusst wird. In der stromabwärts gelegenen Hälfte des Zwischenfeldes nimmt mit zunehmender Porosität die Höhe des geschützten Bereiches merklich ab, wohingegen die Höhenänderung in der stromaufwärts gelegenen Hälfte des Zwischenfeldes nicht besonders gravierend ausfällt.

Für niedrige und mittlere Schutzwirkungen ($S_u = 0.25$ und 0.5) erstreckt sich die geschützte Fläche über das gesamte Zwischenfeld und mindestens über die Höhe der Windschutzstreifen. Hoher Schutz ($S_u = 0.75$) kann in diesem Bereich nur mit zwei undurchlässigen Windschutzstreifen erreicht werden. Mitteldichte Windschutzstreifen ($\phi = 52\%$) bieten hohen Schutz lediglich im leeseitigen Bereich des ersten Streifens bis zu einer Entfernung von ungefähr $x = 9.5 \cdot (h+H)$.

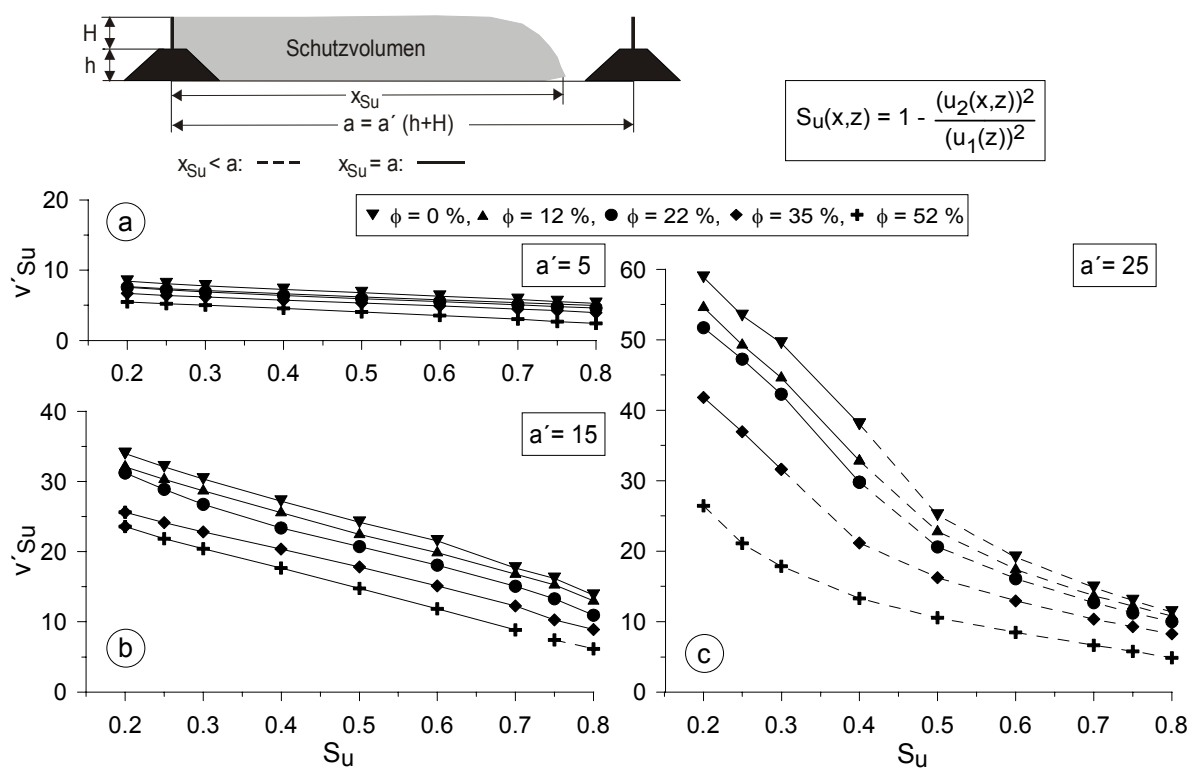


Abb. 7.2 Schutzvolumen $v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L)$ in Abhängigkeit vom Schutzparameter S_u für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen für drei unterschiedliche Windschutzstreifenabstände $a' = a / (h+H)$.
 $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$.

In Abb.7.2 ist die dimensionslose Größe der Schutzvolumen $v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L)$ über den Schutzparameter S_u für doppeltangeordnete Windschutzstreifen mit variiertem Abstand a' dargestellt. Solange der Abstand kleiner ist als die Länge des maximal geschützten Bereiches existiert ein linearer Zusammenhang zwischen der Größe der Schutzvolumen v'_{Su} und dem Schutzparameter S_u . Die Kurven der unterschiedlich porösen Windschutzanordnungen verlaufen dabei annähernd parallel.

Die Tendenz, dass dichte Windschutzstreifen größere Schutzvolumen verursachen als Porösere zeigt sich für jeden Grad an Schutzwirkung (für jeden S_u -Wert) bei allen

untersuchten Streifenabständen (Abb.7.2 und Abb.7.3); jedoch nimmt der Einfluss der Porosität für kleinere Abstände ab und für größere zu (Abb.7.3). Mit anderen Worten: Schutzvolumen zwischen undurchlässigen Streifen sind bei kleinen Abständen nur wenig größer als Schutzvolumen zwischen mitteldichten Streifen. Der Größenunterschied nimmt jedoch mit dem Abstand zu. Letzteres gilt nur, solange sich der geschützte Bereich über das gesamte Zwischenfeld erstreckt. Ansonsten bilden sich, wie bereits in Kap.6.1 beschrieben, zwei Schutzvolumen aus: ein großes im Lee des stromaufwärts gelegenen Windschutzstreifens und ein kleines im Luv des stromabwärts gelegenen Streifens. In diesem Fall sind die beiden Schutzvolumen in Form und Größe wiederum den luv- und leeseitigen Schutzvolumen eines strukturgleichen Einzelstreifens ähnlich. Das Eintreten dieses Phänomens ist abhängig von der Schutzwirkung und dem Streifenabstand: Je dichter die Windschutzstreifen sind und je geringer die Schutzwirkung ist, um so größer ist der Streifenabstand, bei welchem sich erstmals zwei Schutzvolumen ausbilden.

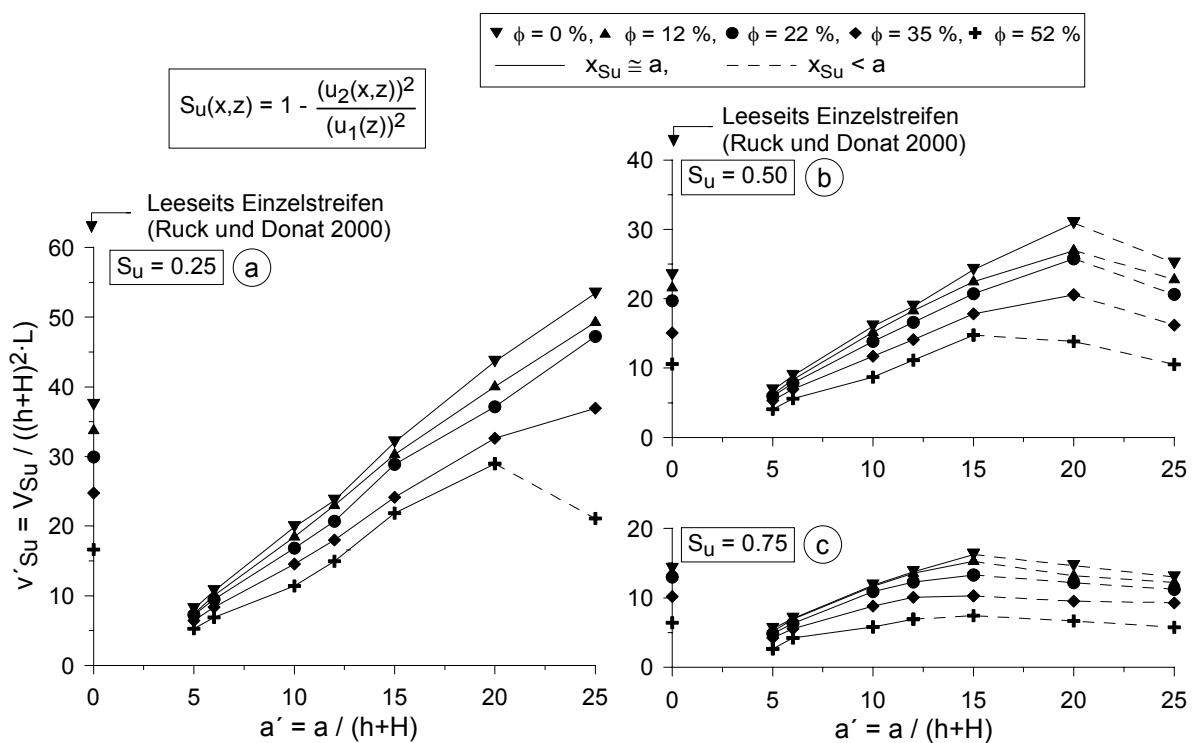


Abb. 7.3 Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$.

Abb.7.3 zeigt weiterhin, dass mit abnehmender Porosität ein größerer Abstand zwischen den beiden Streifen nötig ist, um die Größe der Schutzvolumen vergleichbarer Einzelstreifen zu erreichen. Dies ist naheliegend, da sich die Länge des geschützten Bereichs im Lee eines einzelnen Streifens mit abnehmender Porosität vergrößert, siehe RUCK und DONAT 2000.

Wie bereits in Kap.6 gezeigt, kann durch die Anordnung eines zweiten Windschutzstreifens stromab einer Fläche der geschützte Bereich merklich vergrößert werden. Die maximale Zunahme $\Delta V_{S_u=0.25} = V_{S_u=0.25}(\text{Doppelanordnung}) / V_{S_u=0.25}$ (im Lee des Einzelstreifens) beträgt 1.83, beobachtet bei der Anordnung $a' = 20$ und $\phi = 52\%$. Bei dichteren Windschutzstreifen stellen sich die maximalen Volumen bei größeren Abständen ein ($\Delta V = 1.43$ (0 %) \div 1.58 (22 %) bei $a' = 25$). Es wird erwartet, dass bei einer weiteren Vergrößerung des Abstandes die Größe der Schutzvolumen für diese Windschutzstreifen noch zunimmt. Die Länge des Windkanals beschränkte jedoch bei dem verwendeten Modellmaßstab den realisierbaren Abstand auf das 25fache der Windschutzstreifenhöhe.

Die beobachtete maximale Zunahme der Schutzvolumengröße einer optimalen Doppelanordnung, verglichen mit dem entsprechenden Einzelstreifen, nimmt mit zunehmendem Schutzparameter S_u ab:

$$\begin{aligned} \text{Max } \Delta V_{S_u=0.25} &= 1.83 \text{ (52 \% , } a' = 20) \\ \text{Max } \Delta V_{S_u=0.50} &= 1.25 \text{ (12 \% , } a' = 20) \div 1.42 \text{ (52 \% , } a' = 15) \\ \text{Max } \Delta V_{S_u=0.75} &= 1.01 \text{ (35 \% , } a' = 15) \div 1.14 \text{ (0 \% , } a' = 15) \end{aligned}$$

Da nicht jeder Windschutzstreifenabstand untersucht wurde, können die maximalen Volumenzunahmen die oben angegebenen Werte natürlich übersteigen. Es wird jedoch erwartet, dass sich der grundlegende Trend nicht ändert.

Letztendlich kann zusammengefasst werden, dass Doppelanordnungen mit undurchlässigen Bewuchsstreifen im Hinblick auf die Reduktion der aerodynamischen Windkraft am wirksamsten sind. Sie verursachen die größten Schutzvolumen. Dabei nimmt im Vergleich zu Anordnungen mit porösen Bewuchsstreifen nicht nur die Länge der geschützten Bereiche - vorausgesetzt dass der Abstand der Windschutzstreifen groß genug ist - sondern auch deren Höhe zu. Jedoch sollte an dieser Stelle auch angemerkt werden, dass die turbulente kinetische Energie gleichzeitig ansteigt (siehe Kap.7.5), was der mittleren Windreduktion zu einem gewissen Grade entgegenwirkt.

7.1.2 Ergebnisse Numerik

In Abb.7.4 sind numerisch berechnete und experimentell ermittelte Schutzvolumen $v'_{S_u} = V_{S_u} / ((H+h)^2 \cdot L)$ zwischen undurchlässigen und porösen Bewuchsstreifen ($\phi = 22\%$ ($k_r = 13.7$) und $\phi = 52\%$ ($k_r = 1.8$)) 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. Es ist zu erkennen, dass die experimentellen Ergebnisse mit den numerischen Berechnungen tendenziell übereinstimmen; quantitativ gibt es zum Teil jedoch große Abweichungen.

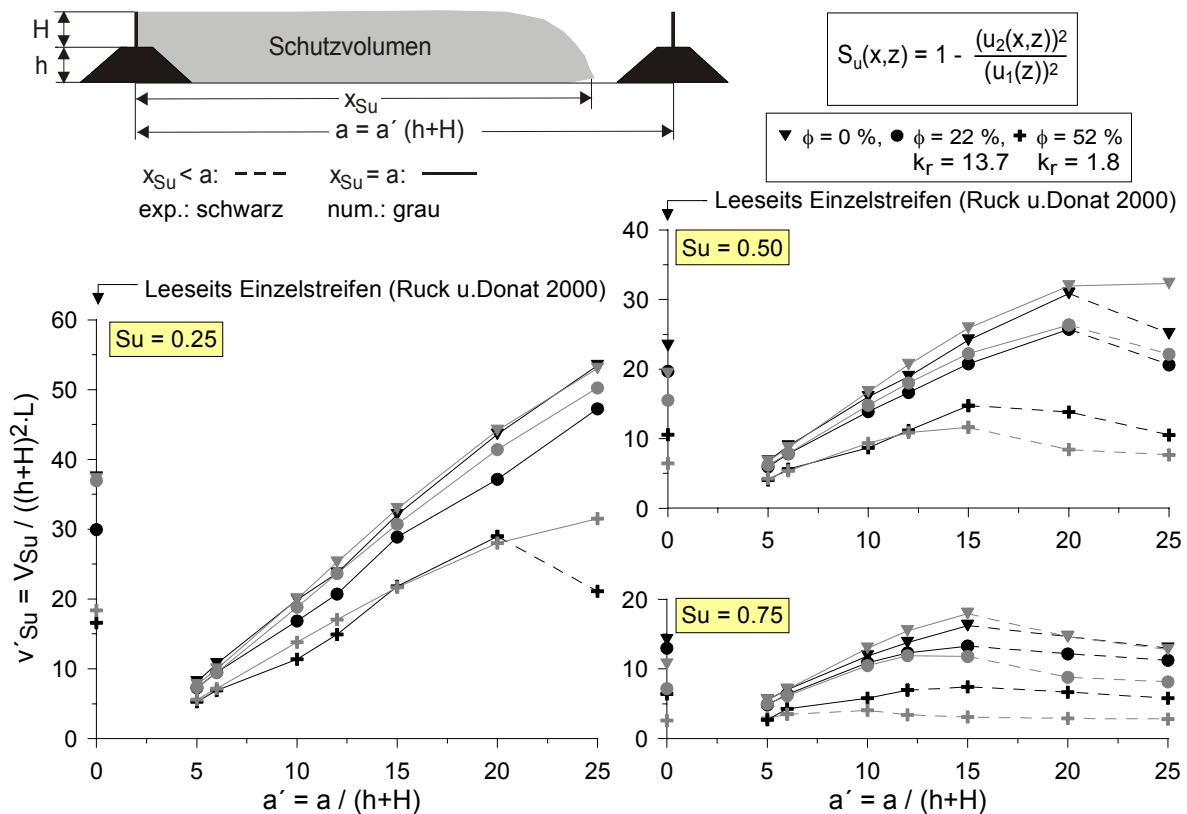


Abb. 7.4 Vergleich numerische Berechnung - Experiment: Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für unterschiedliche Porositäten ϕ bzw. k_r . $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.

In Abb.7.5 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 die Abweichungen zwischen den experimentellen Ergebnissen und den numerischen Vorhersagen liegen zum einen wahrscheinlich in der vereinfachten Modellierung der Porosität, siehe Kap.4.3. Eine experimentelle Überprüfung der numerisch bestimmten k_r -Werte wäre angebracht, um sicherzugehen, dass

diese auch wirklich die Porositäten der Windkanalmodelle wiedergeben. Diese Überprüfung wurde jedoch nicht durchgeführt. Zum andern sind sicherlich auch die starke Abnahme der turbulenten kinetischen Energie TKE in Hauptströmungsrichtung sowie die zu Beginn der Messstrecke zu hoch angesetzten TKE-Werte für die Abweichungen mitverantwortlich (siehe Kap.4.2). Eine Erhöhung der Turbulenz in der Anströmung führt zu einer Verkürzung der Schutzvolumen, siehe auch JUDD 1996.

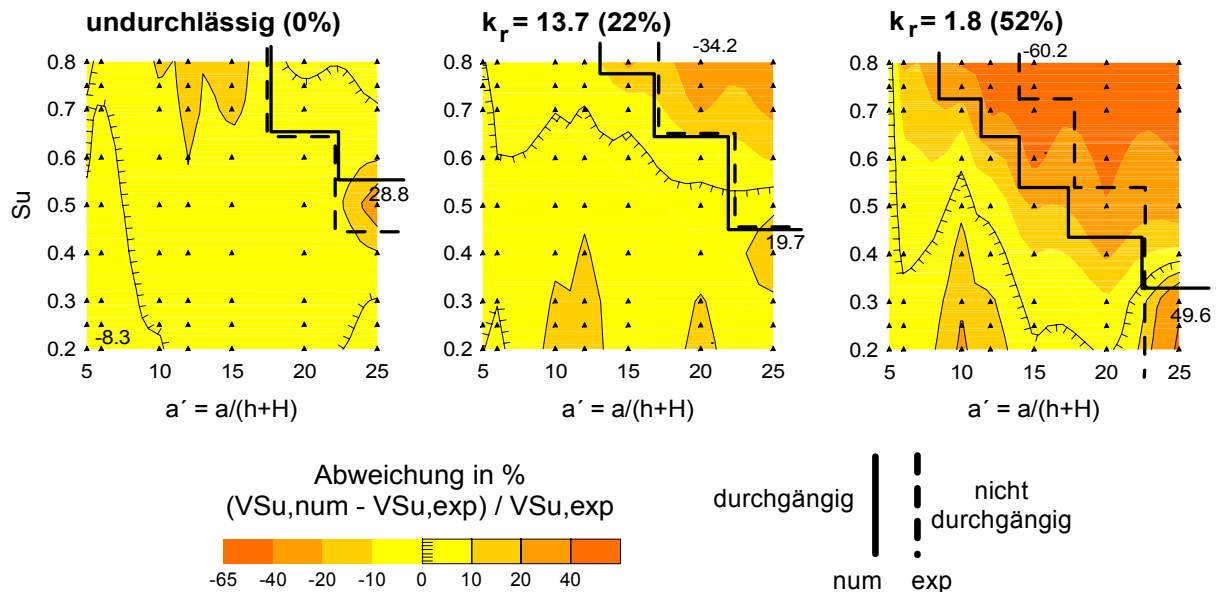


Abb. 7.5 Vergleich numerische Berechnung - Experiment: Prozentuale Abweichung der Schutzvolumengröße v'_{Su} für unterschiedliche Porositäten ϕ bzw. k_r .
 $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$.

7.1.3 Vergleich mit Literaturdaten

In der Literatur wird die Schutzwirkung von Windschutzstreifen oftmals durch die Ausdehnung der windberuhigten Bereiche in Hauptströmungsrichtung bewertet. Die geschützte Strecke d_p ist dabei die Länge des geschützten Bereichs im Lee der Streifen, über welche die mittlere Geschwindigkeit u_2 um mindestens einen bestimmten Prozentsatz reduziert ist, wie z.B. $u_2 / u_1 \leq 0.7$, wobei u_1 die ungestörte Anströmgeschwindigkeit ist. Die Abhängigkeit der maximalen Ausdehnung der Windreduktion u_2 / u_1 von der Porosität ist in Tab.7.1 für ausgewählte Einzelstreifen mit und ohne Wall zusammengefasst. Die Werte geben die Entfernung in Vielfachen der Windschutzstreifenhöhe an, bei der die Windgeschwindigkeit wieder 50 % (in Klammern 70 %) der Anströmgeschwindigkeit erreicht.

Durch eine einfache Umformung von Gl.5.3 ergibt sich die Windreduktion $|u_2| / u_1 = (1 - S_u)^{1/2}$ für die entsprechenden Isolinien des Schutzparameters S_u , siehe auch Tab.5.2. $S_u = 0.5$ (0.75) entspricht z.B. $|u_2| / u_1 \approx 0.7$ (0.5). Das bedeutet, dass die

Hälfte der Geschwindigkeit ein Viertel der aerodynamischen Windkraft verursacht und somit eine Windkraftreduktion von 75 % bewirkt. Um einen Vergleich mit den Literaturwerten zu ermöglichen, sind die Längen der geschützten Bereiche im Lee des stromaufwärts gelegenen Windschutzstreifens einer Doppelanordnung mit Abstand $a = 25 \cdot (h+H)$ ebenfalls in Tab.7.1 aufgeführt.

Die Daten aus den Untersuchungen von Windschutzstreifen ohne Wall zeigen eine große Streuung und keinen einheitlichen Trend. Die klassische Darstellung des Porositätseinflusses auf den Windschutz ist die von NAEGELI 1945, welche zeigt, dass mitteldichte Streifen am wirkungsvollsten hinsichtlich der Länge d_p sind. Unglücklicherweise entstammen die Datensätze verschiedenen Feldstudien, wodurch keine einheitlichen Anströmbedingungen und Windschutzanordnungen gewährleistet werden. Andere Messungen zeigen mit abnehmender Porosität eine Zunahme der geschützten Strecke für sehr lockere bis dichte Streifen und, wenn überhaupt, nur eine leichte Abnahme für sehr dichte bis undurchlässige Streifen, siehe HEISLER und DEWALLE 1988, WILSON 1985 und Tab.7.1. Im Gegensatz zu neueren Untersuchungen zeigen die numerischen Simulationen von WANG und TAKLE 1995, dass mit abnehmender Porosität die geschützte Strecke signifikant in Bodennähe und leicht in größeren Höhen abnimmt. Die geschützten Längen von doppeltangeordneten Windschutzstreifen stimmen vernünftig mit denen von RAINE und STEVENSON 1977, LIEFF 1993 und RUCK und DONAT 2000 überein, jedoch wird ein detaillierter Vergleich durch die unterschiedlichen Anströmbedingungen und Bodenrauigkeiten erschwert.

d_p	Einzelstreifen			Doppelanordnung	
	Ohne Wall		Mit Wall ($H/h = 1, \alpha = 40^\circ$)		
Porosität	RAINE und STEVENSON 1977	WANG und TAKLE 1995	LIEFF 1993	RUCK und DONAT 2000	Diese Studie ($a' = 25$)
0%	11.8 (16)		13.5	12.1 (15.8)	11.1 (16.0)
8%		6.5 (8.7)			
12%			14.6	12.1 (15.6)	10.6 (15.0)
20% / 22%	12 (16.2)		14.2	11.7 (14.9)	10.6 (14.8)
30%			13		
34% / 35%	9.8 (14)			11.0 (13.8)	10.3 (13.6)
40%		11.7 (15.5)			
50% / 52%	7.8 (11.9)		12.5	9.4 (12.1)	9.6 (12.0)
H/z_0	100	200	470	133	77.4

Tab. 7.1 Abhängigkeit der maximalen Ausdehnung der Windreduktion u_2 / u_1 von der Porosität. Die Werte geben die Entfernung (unabhängig von der Höhe) in Vielfachen der Windschutzstreifenhöhe an, bei der die reduzierte Geschwindigkeit im Lee von Einzelstreifen bzw. im Zwischenfeld von Doppelanordnungen wieder 50 % (70%) der Anströmgeschwindigkeit erreicht.

Die Oberflächenrauigkeit legt die Turbulenz der Anströmung und somit die Eigenschaften der Vermischungsschicht fest, die sich an der Spitze des Windschutzstreifens ausbildet. Die Vermischungsschicht breitet sich vertikal aus, während sie sich stromab bewegt. Die Rate des vertikalen Wachstums wird bestimmt durch die Turbulenz der Anströmung und beeinflusst neben der Porosität der Bewuchsstreifen die Abmessungen der geschützten Bereiche, siehe CLEUGH 1998. Die Jensen-Zahl H/z_0 beschreibt das Verhältnis von Windschutzstreifenhöhe H zu Rauigkeitshöhe z_0 . Eine Abnahme der Jensen-Zahl bedeutet eine Zunahme an Turbulenz in der Anströmung und führt im allgemeinen zu einer Abnahme der geschützten Strecke, siehe Daten von RAINE und STEVENSON 1977, LIEFF 1993, RUCK und DONAT 2000 und dieser Untersuchung in Tab.7.1.

7.2 Fußgängerwindkomfort

7.2.1 Ergebnisse Windkanal

In Abb.7.6 sind Isoplots von 3 verschiedenen Komfortparametern f für unterschiedliche Porositäten ϕ dargestellt. In Abb.7.7 sind Schutzvolumen $v'_f = V_f / ((h+H)^2 \cdot L)$ über den Windschutzstreifenabstand $a' = a / (h+H)$ für verschiedene Porositäten ϕ aufgetragen.

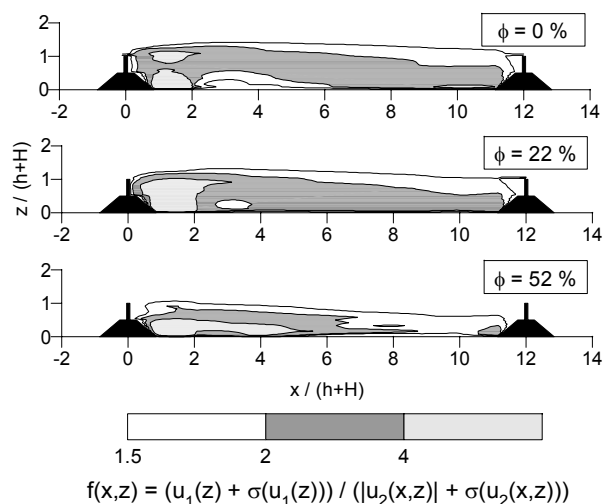


Abb. 7.6 Isolinien des Komfortparameters f für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen. $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$, $a = 12 \cdot (h+H)$.

Bereiche mit niedrigem Komfort erreichen für alle untersuchten Porositäten ihre maximalen Volumen bei einem Abstand $a = 15 \cdot (H+h)$, wobei die Größe dieses Volumens mit abnehmender Porosität zunimmt. Der Unterschied zwischen undurchlässigen und 12 % porösen Windschutzstreifen ist allerdings sehr klein.

Für höhere Komfortparameter ($f = 2$) ist der Maximalwert nicht mehr eindeutig erkennbar. Das Zwischenfeld ist über seine gesamte Länge bis zu einem Abstand von

ungefähr $a = 12 \cdot (H+h)$ für dichte und undurchlässige Streifen und bis etwa $a = 10 \cdot (H+h)$ für mitteldichte Streifen geschützt. Die Größe der sehr stark geschützten Bereiche ($f = 4$, Abb.7.6) nimmt nicht länger mit abnehmender Porosität zu.

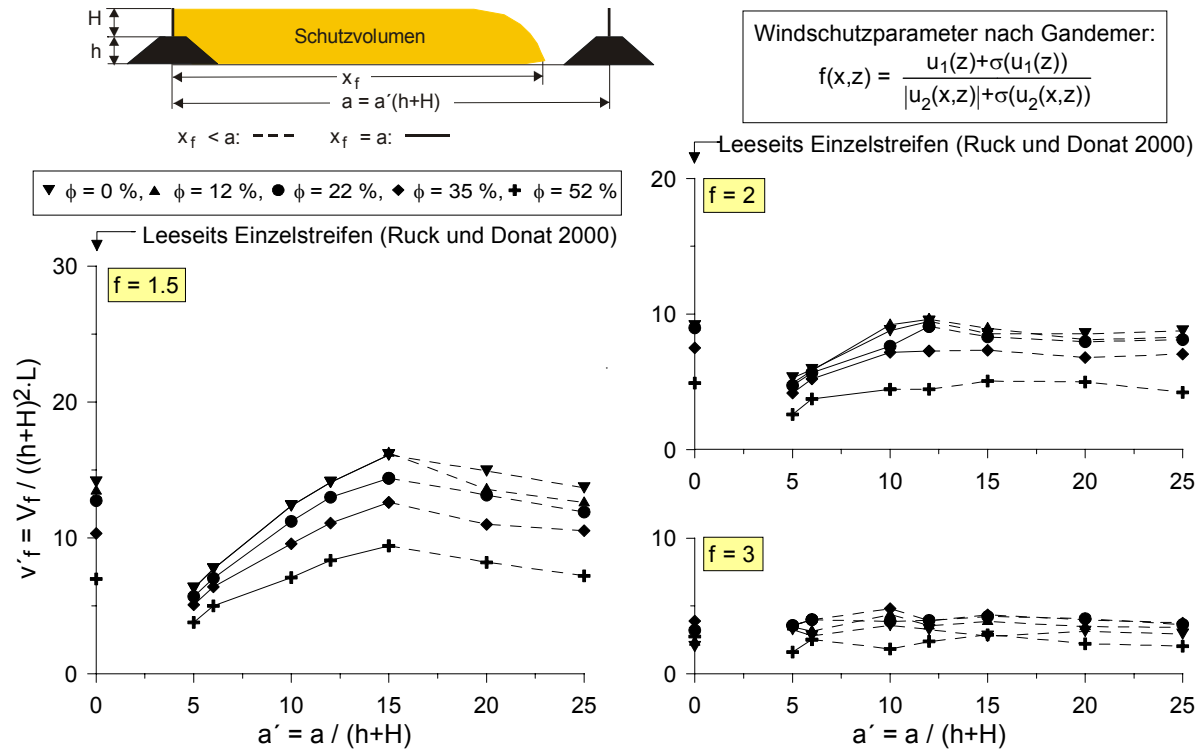


Abb. 7.7 Schutzwolumen v_f in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen. $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$.

7.2.2 Vergleich mit Literaturdaten

PERERA 1981 untersuchte undurchlässige bis mitteldichte Zäune ohne Wall ($0\% < \phi < 50\%$) in einem Windkanal und bewertete ihre Wirksamkeit mit dem Kehrwert des in Gl.5.4 angegebenen Komfortparameters von GANDEMER. Seine Untersuchungen zeigen, dass 10%-poröse Zäune den besten Gesamtschutz liefern, undurchlässige Zäune jedoch den höchsten Schutz in unmittelbarer Umgebung des Hindernisses bieten. Seine Isoplots zeigen gleichzeitig auch, dass der Größenunterschied von schwach geschützten Flächen klein ist bei Zäunen mit Porositäten zwischen 0% und 20%.

Die Größe stark geschützter Bereiche nimmt bei dieser Untersuchung nicht mit abnehmender Porosität zu. Dies stimmt mit den Ergebnissen von RUCK und LIEFF 1997 überein, welche die Ablösung von Regionen mit $f = 3$ im nahen Lee von dünnen, künstlichen Windschutzstreifen ohne Wall mit steigender Porosität veranschaulichen.

7.3 Veränderung des turbulenten vertikalen Impulsaustausches

7.3.1 Ergebnisse Windkanal

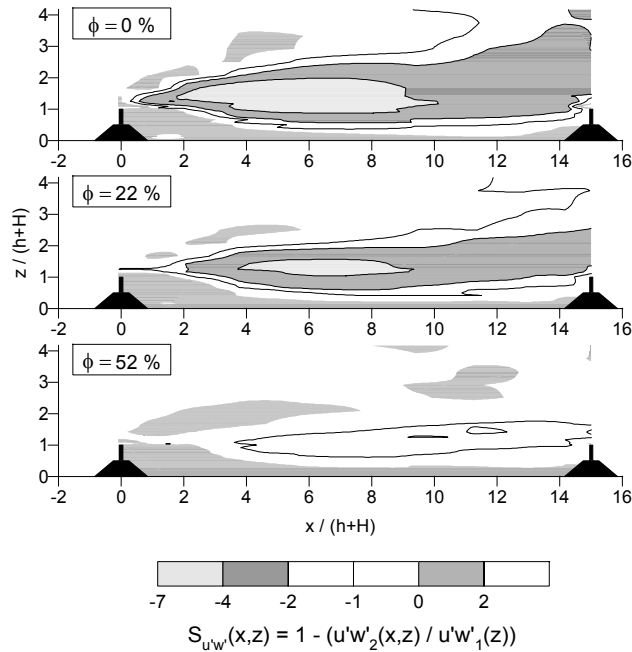


Abb. 7.8 Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen. $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (h+H)$.

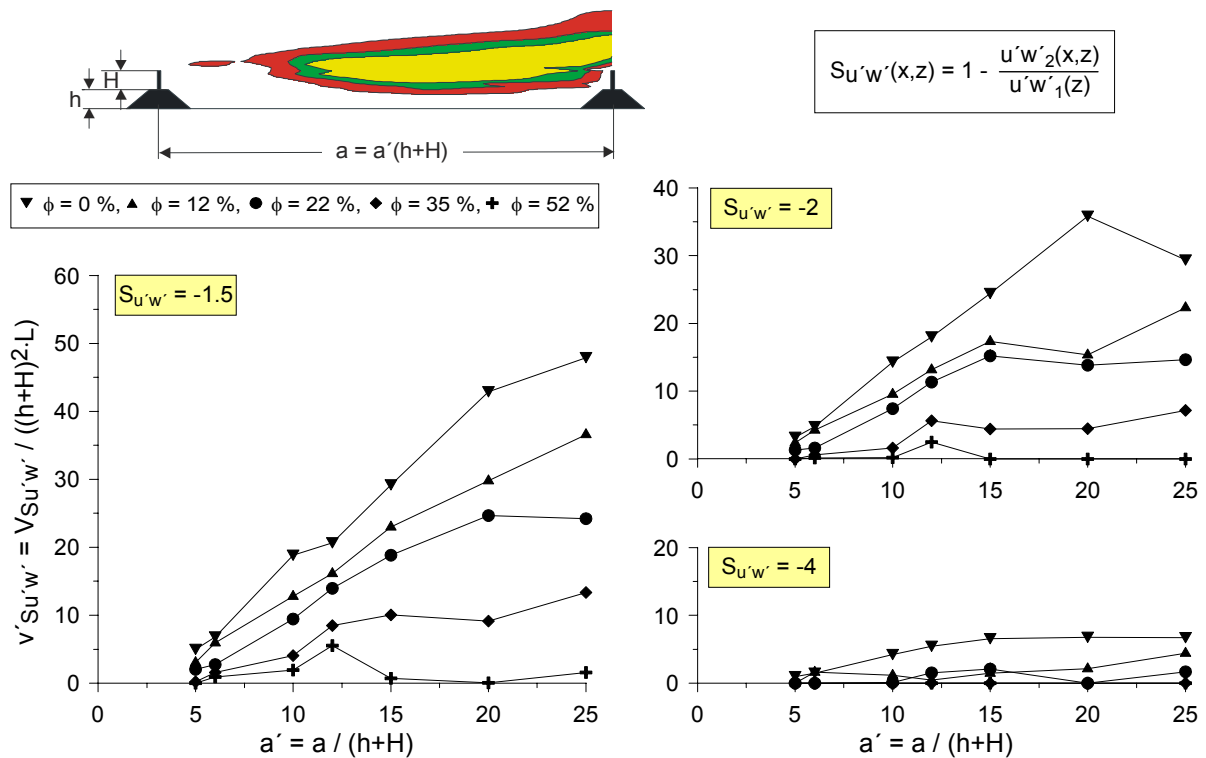


Abb. 7.9 Schutzvolumen $V'_{Su'w'}$ in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen. $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$.

Abb.7.8 zeigt Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ für verschieden poröse Bewuchsstreifen. Schutzvolumen mit einem reduzierten turbulenten Impulsaustausch in vertikaler Richtung ($0 < S_{u'w'} < 2$) werden als konturlose graue Flächen dargestellt. Diese verlaufen bodennah und erstrecken sich im nahen Lee des ersten Windschutzstreifens bis zur Höhe des Streifens. Weiter stromab sind die vertikalen Ausdehnungen eher gering.

Über diesen „wirklichen“ Schutzvolumen bilden sich Nachlaufgebiete aus, die durch einen erhöhten turbulenten, zum Boden gerichteten Impulsaustausch ($S_{u'w'} < 0$) gekennzeichnet sind, d.h. deren Kovarianzen $u'w'$ die der Anströmung übersteigen.

In Abb.7.9 sind Schutzvolumen $V_{S_{u'w'}}$ über den Abstand $a' = a / (h+H)$ für unterschiedliche Porositäten ϕ für die Parameter $S_{u'w'} = -1.5, -2$ und -4 aufgetragen. Der Parameterwert $S_{u'w'} = -1.5$ besagt, dass der Impulsaustausch mindestens 2.5 mal so groß ist wie in der ungestörten Anströmung. Aus Abb.7.8 und 7.9 ist ersichtlich, dass die Größe der „Schutzvolumen“ mit $S_{u'w'} = -1.5$ mit abnehmender Porosität zunimmt; Gleichzeitig nimmt auch die Stärke des Impulsaustausches zu. Die Extremwerte dieses Schutzparameters betragen (gemittelt über die untersuchten Abstände) für mitteldichte Windschutzstreifen ($\phi = 52\%$) $S_{u'w'} = -1.94$ und für undurchlässige Windschutzstreifen $S_{u'w'} = -5.64$.

7.3.2 Vergleich mit Literaturdaten

Die Zunahme des turbulenten Impulsflusses in der Vermischungsschicht bei abnehmender Porosität kann durch einen Anstieg des Geschwindigkeitsgradienten der gestörten Windprofile erklärt werden.

Die Untersuchungen von Einzelstreifen mit Wall zeigen dieselben Tendenzen, siehe RUCK und DONAT 2000. Der Faktor, um welchen die Stärke des Impulsaustausches ansteigt, weicht jedoch von dem in dieser Untersuchung beobachteten Faktor ab, worauf bereits in Kap.6.3. eingegangen wurde.

Für Einzelstreifen ohne Wall stellten WANG und TAKLE 1996 fest, dass der turbulente Impulsfluss $u'w'_2$, normiert mit dem ungestörten turbulenten Impulsfluss der Anströmung in Höhe der Streifenoberkante $u'w'_{1H}$, bei $z = H/2$ im nahen Lee reduziert und im mittleren Lee erhöht ist, wohingegen bei $z = 2H$ durchweg eine Erhöhung eintritt. Dabei nimmt die Stärke der erhöhten Nachlaufturbulenz wie auch in dieser Untersuchung mit abnehmender Porosität zu, und das Maximum bewegt sich zum Windschutzstreifen hin.

7.4 Rezirkulationsgebiete

7.4.1 Ergebnisse Windkanal

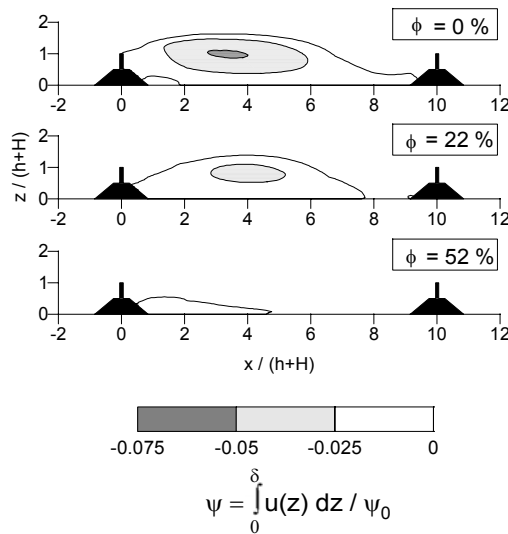


Abb. 7.10 Stromlinien $\psi \leq 0$ für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen. $H/h = 1, \alpha = 40^\circ, a = 10 (h+H)$.

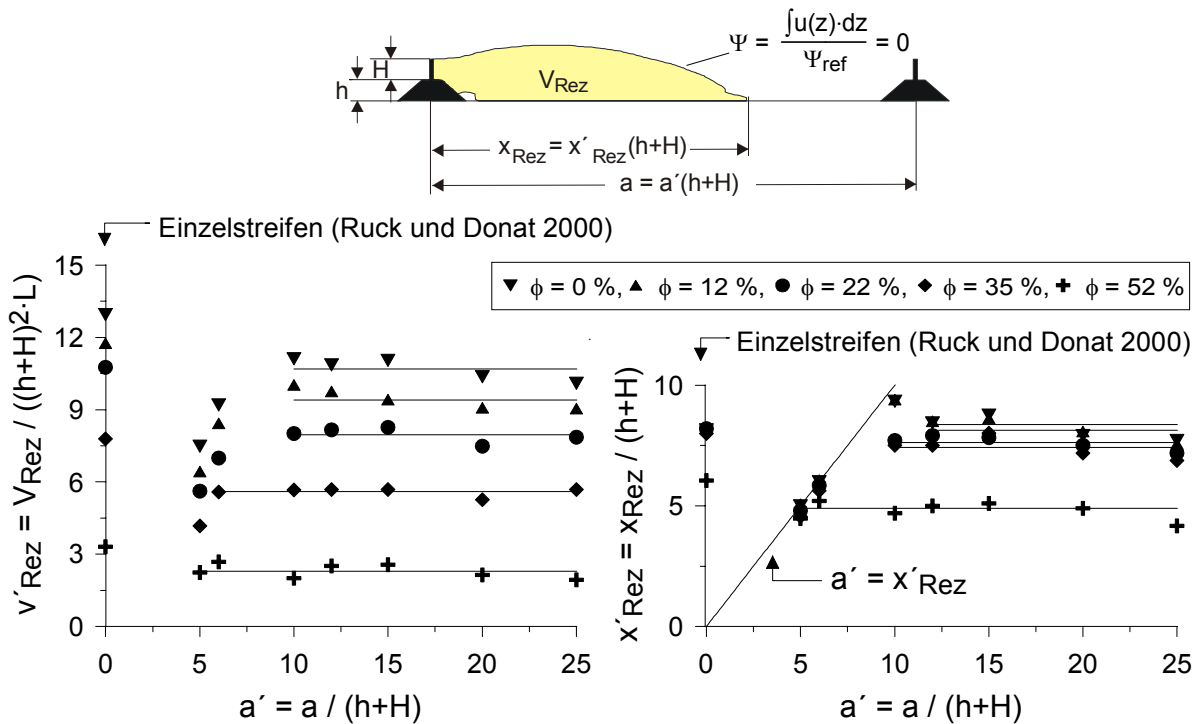


Abb. 7.11 Rezirkulationsvolumen und Wiederanlegelängen in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen. $H/h = 1, \alpha = 40^\circ$.

Abb.7.10 zeigt Stromlinien $\psi \leq 0$ zwischen Windschutzanlagen unterschiedlicher Porosität. In Abb.7.11 sind Rezirkulationsvolumen und Wiederanlegelängen in dimensionsloser Form über den Abstand der beiden Streifen für unterschiedliche Porositäten

dargestellt. Abb.7.10 und Abb.7.11 links zeigen, dass die Größe des Rezirkulationsgebietes mit abnehmender Porosität zunimmt. Dieser Trend konnte bei allen untersuchten Abständen beobachtet werden. Die Ausdehnung der Rezirkulationsgebiete in Hauptströmungsrichtung nimmt - sobald der Streifenabstand dies zulässt – ebenfalls mit abnehmender Porosität zu (Abb.7.11, rechts). Dabei ist der Unterschied in der Wiederanlegelänge zwischen den Porositäten $\phi = 52\%$ und $\phi = 35\%$ sehr viel größer als zwischen den Porositäten $\phi = 35\%$ und $\phi = 0\%$.

Bei undurchlässigen Bewuchsstreifen löst die Strömung an deren Oberkante ab, wohingegen der Ablösepunkt bei porösen Bewuchsstreifen als Folge von deren Durchströmung im Bereich des Walles liegt.

7.4.2 Ergebnisse Numerik

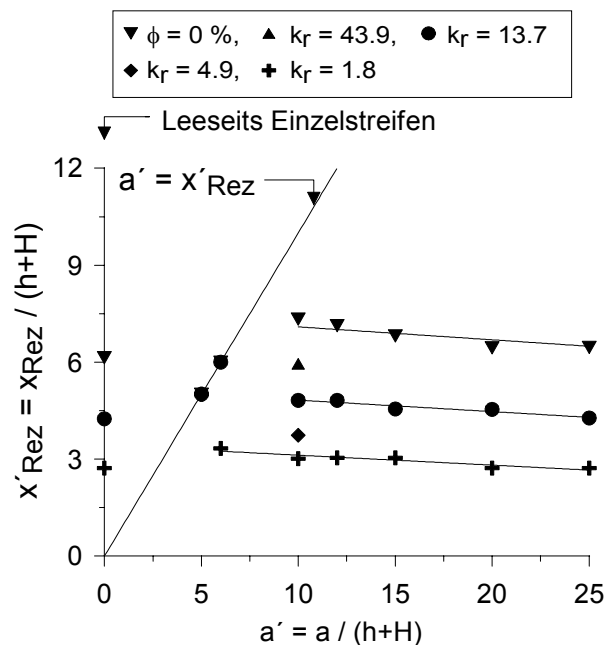


Abb. 7.12 Numerisch ermittelte Wiederanlegelängen in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Porositäten k_r der Bewuchsstreifen. $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$.

Die Wiederanlegelängen aus den numerischen Simulationen sind in Abb.7.12 über den Abstand für unterschiedlich poröse Bewuchsstreifen dargestellt. Sie sind tendenziell kleiner als die experimentellen Werte (Abb.7.11 rechts), bestätigen jedoch die bei den Windkanaluntersuchungen beobachtete Zunahme der Wiederanlegelängen mit abnehmender Porosität.

Für $a \geq 10 \cdot (H+h)$ ist, wie bereits in Kap.6.4 beschrieben, eine leichte Abnahme der Wiederanlegelänge mit zunehmendem Abstand und damit eine Annäherung an die Wiederanlegelängen von strukturgleichen Einzelstreifen zu erkennen. Der Grad der Abnahme ist dabei unabhängig von der Durchlässigkeit der Bewuchsstreifen (Abb. 7.12).

Die maximale Rückströmgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Porosität ab, siehe Tab.7.2. Ihre Lage verschiebt sich dabei um lediglich eine Gitterzelle stromauf und eine Gitterzelle nach unten (bei undurchlässigen Bewuchsstreifen $x'_{\min} = 1.75$, $z'_{\min} = 0.1$, bei mitteldichten Bewuchsstreifen $x'_{\min} = 1.39$, $z'_{\min} = 0.05$).

Porosität	u_2 (m/s)
$\phi = 0 \%$	- 1.45
$k_r = 43.9 / \phi = 12 \%$	- 1.06
$k_r = 13.7 / \phi = 22 \%$	- 0.82
$k_r = 4.9 / \phi = 35 \%$	- 0.57
$k_r = 1.8 / \phi = 52 \%$	- 0.48

Tab. 7.2 Numerisch bestimmte maximale Rückströmgeschwindigkeiten für verschiedene Porositäten der Bewuchsstreifen.
 $\alpha = 40^\circ$, $H/h = 1$.

7.4.3 Vergleich mit Literaturdaten

PERERA 1981 beobachtete im Lee von porösen Zäunen, dass Rezirkulationsgebiete mit zunehmender Porosität in der Größe abnehmen und sich stromab verlagern. Des Weiteren treten Rezirkulationsgebiete nur bei Porositäten kleiner als 30 % auf. RUCK und LIEFF 1997 beobachteten solche Gebiete auch noch hinter 30 % porösen Windschutzstreifen ohne Wall, aber nicht mehr hinter 50 % porösen Streifen. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen von WANG und TAKLE 1995. Beide fanden heraus, dass, sobald die Porosität zunimmt, sich der Ablösepunkt weiter stromab verschiebt und das Rezirkulationsgebiet an Höhe verliert. Der Wiederanlegepunkt bewegt sich nach RUCK und LIEFF 1997 leicht stromauf (was auch in dieser Untersuchung beobachtet wurde), nach WANG und TAKLE 1995 leicht stromab.

Das tendenzielle Verhalten der Rezirkulationsvolumen und der Wiederanlegelängen bei Doppelanordnungen mit Wall wird sowohl durch die Untersuchungen von sockelwallbehafteten Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000, Abb.7.11) als auch durch die numerische Simulation (Abb.7.12) bestätigt.

Die Anordnung von Wällen bewirkt letztendlich, dass sich auch hinter mitteldichten Bewuchsstreifen noch Rezirkulationsgebiete ausbilden.

7.5 Relative kinetische Energie

7.5.1 Ergebnisse Windkanal

Wie bereits erwähnt, berücksichtigt der Schutzparameter S_u nicht explizit die Bögigkeit des Windes. Da eine Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeit in den windberuhigten Bereichen normalerweise mit einer Zunahme an turbulenter kinetischer Energie TKE verbunden ist, interessiert auch die Veränderung dieser Strömungsgröße.

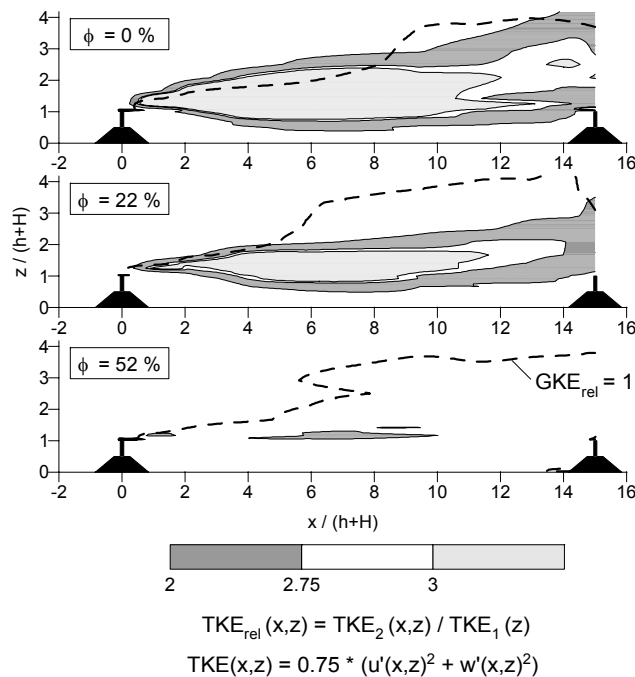


Abb. 7.13 Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Porositäten ϕ der Bewuchsstreifen. Die gestrichelten Linien stellen die relative kinetische Gesamtenergie $GKE = 1$ dar. Für Bereiche unterhalb dieser Linien gilt $GKE < 1$, für Bereiche oberhalb gilt $GKE > 1$.
 $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (H+h)$.

In Abb.7.13 sind Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Porositäten dargestellt.

Die Form der Bereiche mit erhöhter TKE_{rel} ähnelt stark an die mit erhöhtem vertikalen turbulenten Impulsaustausch (Abb.7.8). TKE_{rel} nimmt mit zunehmender Porosität ab. Für undurchlässige Windschutzstreifen beträgt der über alle Abstände gemittelte Wert von $TKE_{rel} = 4.84$, der Maximalwert beläuft sich auf 5.53 bei einem Abstand von $a' = 20 \cdot (H+h)$. Für mitteldichte Windschutzstreifen ($\phi = 52\%$) beträgt der über die Abstände gemittelte Wert 2.25 und der Maximalwert 2.68, gemessen bei einem Abstand von $a' = 12 \cdot (H+h)$.

Betrachtet man die Anordnung mit der maximalen Zunahme an turbulenter kinetischer Energie, ist TKE_{max} immer noch klein im Vergleich zur gesamten kinetischen Energie der ungestörten Anströmung GKE_1 ($TKE_{max} / GKE_1 = 0.37$). Dabei ist die gesamte kinetische Energie die Summe aus mittlerer kinetischer Energie MKE und turbulenter kinetischer Energie TKE

$$GKE = MKE + TKE \quad (7.1)$$

$$\text{mit } MKE(x,z) = 0.5 \cdot (u(x,z)^2 + w(x,z)^2) \quad (7.2)$$

TKE wie in Gl.5.7 definiert.

Die relative gesamte kinetische Energie GKE_{rel} (das Verhältnis der gesamten kinetischen Energie im Zwischenfeld bezogen auf die gesamte kinetische Energie der ungeschützten Anströmung) nimmt unterhalb der gestrichelten Linien in Abb.7.13 ab, also in einem Bereich vom Boden bis zur Höhe der Windschutzstreifen in der ersten Hälfte des Zwischenfelds bzw. bis mindestens zur 3fachen Höhe der Windschutzstreifen in der zweiten Hälfte des Zwischenfelds.

Die Beobachtung, dass TKE_{rel} mit zunehmender Porosität abnimmt, stimmt mit den Ergebnissen von WANG und TAKLE 1995 und RUCK und DONAT 2000 überein. Diese Abnahme kann wiederum auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass die Intensität der Scherschichten (die Verzerrung der Geschwindigkeitsprofile) mit zunehmender Porosität abnimmt.

7.5.2 Ergebnisse Numerik

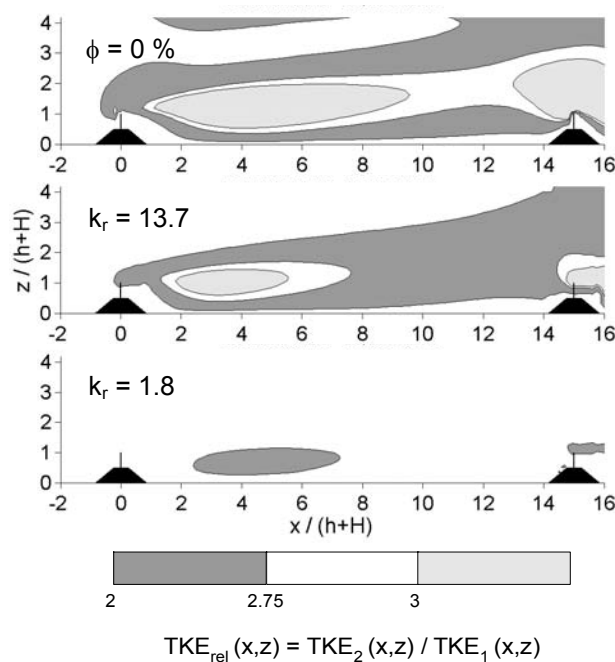


Abb. 7.14 Numerisch ermittelte Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Porositäten k_r der Bewuchsstreifen.
 $H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (H+h)$.

In Abb.7.14 ist die numerisch ermittelte relative turbulente kinetische Energie für unterschiedlich poröse Windschutzstreifen mit einem Abstand $a = 15 \cdot (H+h)$ dargestellt. Die experimentellen Ergebnisse (Abb.7.13) können tendenziell bestätigt werden. Der Faktor, um den sich die turbulente kinetische Energie im Zwischenfeld maximal erhöht, ist von der gleichen Größenordnung wie bei den physikalischen Experimenten. Der beruhigte Bereich im nahen Lee des ersten Streifens wird numerisch jedoch we-

sentlich kleiner vorhergesagt und oberhalb des ersten Streifens steigt TKE_{rel} - insbesondere bei undurchlässigen Bewuchsstreifen - stärker an.

7.6 Diskussion

Der Einfluss der Porosität auf die Reduktion der aerodynamischen Windkraft und der Windgeschwindigkeit in den geschützten Bereichen kann physikalisch folgendermaßen erklärt werden: Mit zunehmender Porosität wird die kinetische Energie der Anströmung in vertikaler Richtung vor dem Windschutzstreifen geschwächt. Folglich verkleinert sich das Rezirkulationsgebiet in der Höhe und der Länge. Gleichzeitig nimmt die Menge an kinetischer Energie, die den porösen Streifen in horizontaler Richtung durchdringt, zu, was der Rotation der rezirkulierenden Masse entgegenwirkt und zu einem früheren Wiederanlegen der Strömung führt. Diese Erkenntnisse sind ähnlich Ergebnissen aus der Gebäudeaerodynamik, wo bekannt ist, dass die Verformung des Geschwindigkeitsprofils bei einer dünnen undurchlässigen Platte maximal ist und wo dann auch ein Maximum an rezirkulierender Masse (übereinstimmend mit den Ergebnissen aus Kap.7.4) und an Rückströmgeschwindigkeit hinter der Platte auftritt.

Ein Anstieg der TKE_{rel} sowie eine Zunahme des vertikalen Impulsflusses mit abnehmender Porosität kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass die Intensität der Scherschichten (die Verzerrung der Geschwindigkeitsprofile) mit abnehmender Porosität ansteigt.

8. Einfluss des Böschungswinkels

8.1 Reduktion der aerodynamischen Kraftwirkung

8.1.1 Ergebnisse Windkanal

Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen mit unterschiedlichen Böschungswinkeln α werden in Abb.8.1 exemplarisch für einen Streifenabstand von $a = 15 \cdot (h+H)$ dargestellt. In Abb.8.2 sind die Größen der Schutzvolumen in Abhängigkeit vom Streifenabstand für verschiedene Sockelwallwinkel für niedrige, mittlere und hohe Schutzwirkung ($S_u = 0.25, 0.5$ bzw. 0.75) aufgetragen. Diese Abbildungen zeigen, dass der Sockelwallwinkel die Schutzwirkung von doppelt angeordneten Windschutzstreifen nur leicht beeinflusst. Die Schutzvolumen von Windschutzstreifenanordnungen mit Böschungswinkeln $\alpha = 40^\circ$ und $\alpha = 60^\circ$ sind sich sehr ähnlich. Windschutzstreifen mit flachen Wällen ($\alpha = 20^\circ$) bewirken immer etwas kleinere Schutzvolumen. Deren Größe ist im Schnitt um 9.8 % kleiner als die von Anordnungen mit $\alpha = 40^\circ$. Schutzvolumen im Lee entsprechender Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000, RUCK 2001) zeigen ein ähnliches Verhalten.

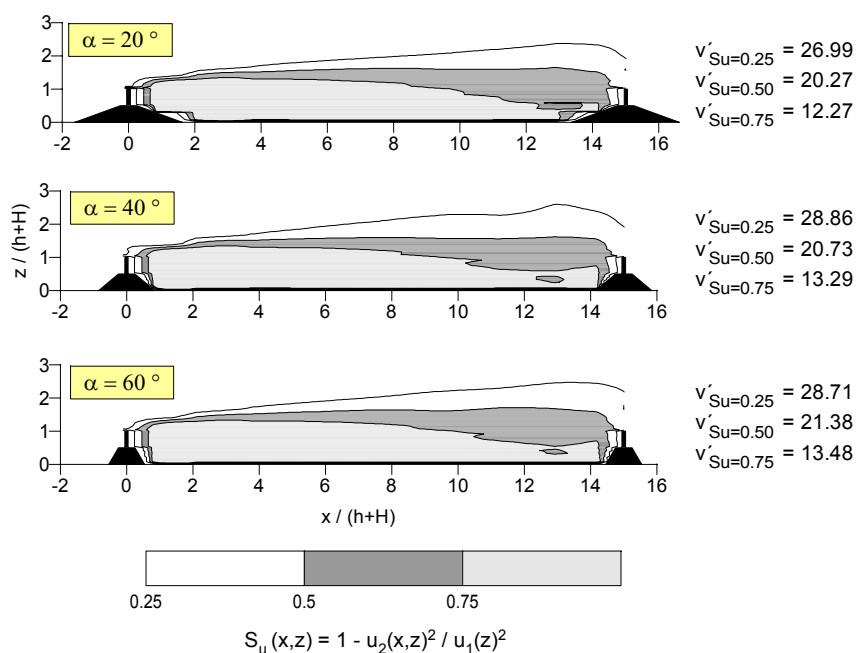


Abb. 8.1 Isolinien des Schutzparameters S_u und zugehörige Schutzvolumen $v'_{S_u} = V_{S_u} / ((h+H)^2 \cdot L)$ für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1$, $\phi = 22\%$, $a = 15 \cdot (h+H)$.

Abb.8.3 zeigt, dass der Einfluss des Sockelwallwinkels auf die Größe der Schutzvolumen für verschieden poröse Windschutzstreifen stagniert (der Unterschied zwischen den Kurven ist annähernd konstant gering). Jedoch kann die zuvor erwähnte Tendenz, dass Windschutzanordnungen mit $\alpha = 20^\circ$ etwas kleinere Schutzvolumen

bewirken als solche mit steileren Wällen ($\alpha = 40^\circ$ und 60°) bei mitteldichten Windschutzstreifen nicht beobachtet werden. In diesem Fall ist der geschützte Bereich für Anordnungen mit $\alpha = 40^\circ$ am kleinsten. Der Größenunterschied ist jedoch sehr klein und liegt damit im Bereich der Messgenauigkeit.

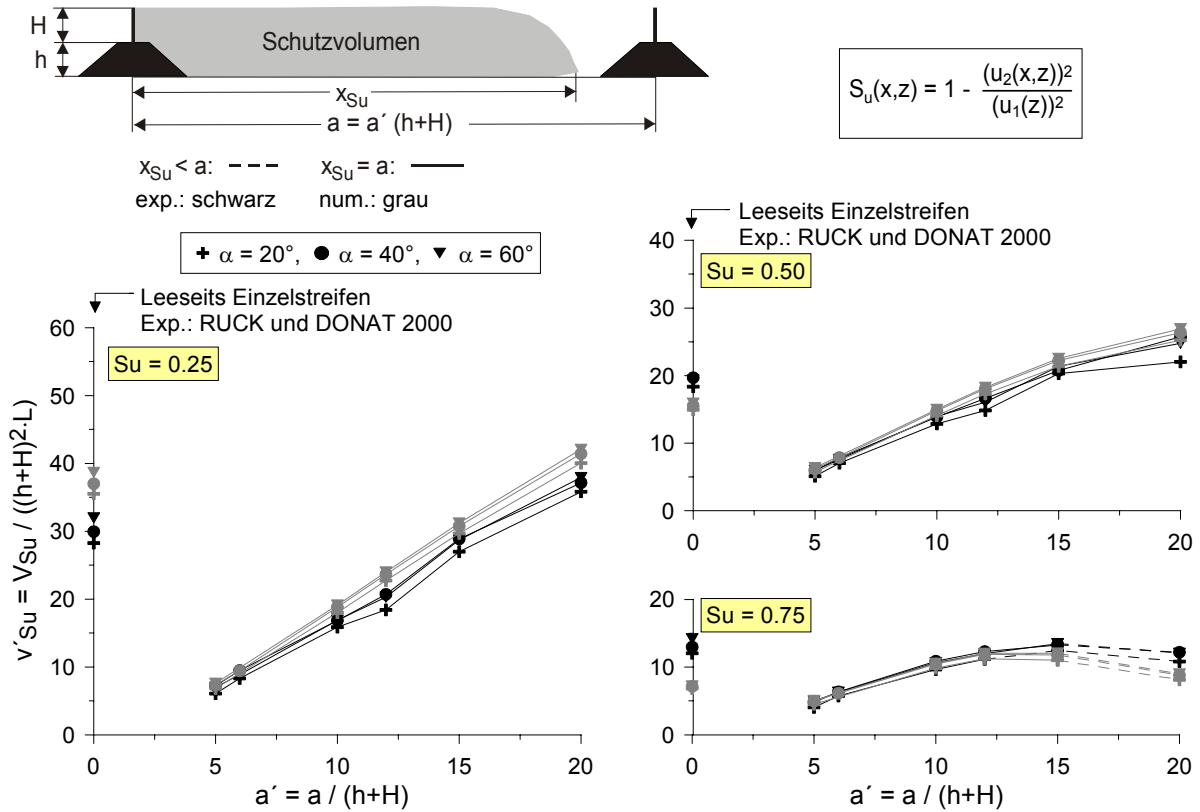


Abb. 8.2 Schutzwolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22\%$ bzw. $k_r = 13.7$.

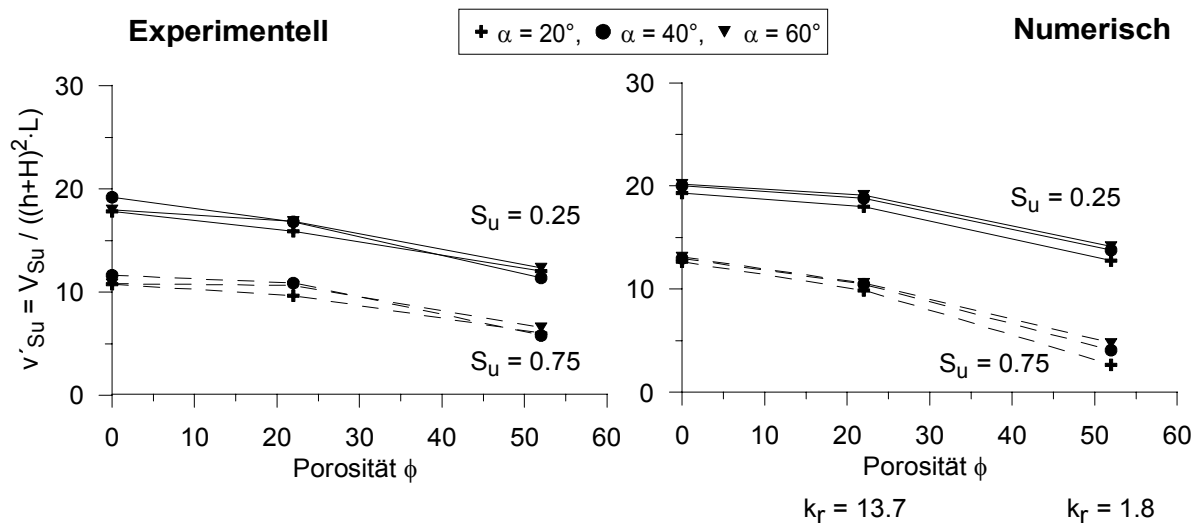


Abb. 8.3 Schutzwolumen v'_{Su} in Abhängigkeit von der Porosität ϕ (dem Druckverlustkoeffizienten k_r) der Bewuchsstreifen für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, a = 10 \cdot (h+H)$.

8.1.2 Ergebnisse Numerik

Numerisch und experimentell ermittelte Schutzvolumen zwischen Windschutzstreifen-Anordnungen mit unterschiedlichen Böschungswinkeln α sind in Abb.8.2 in Abhängigkeit vom Abstand der beiden Streifen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass, abgesehen von den bereits in Kap.7 beschriebenen Abweichungen infolge unzureichender Modellierung der Porosität (hier $\phi = 22\%$ bzw. $k_r = 13.7$), die numerisch vorhergesagten Schutzvolumen gut mit denen der Windkanaluntersuchungen übereinstimmen. Die numerischen Berechnungen zeigen klar, dass die Schutzvolumen-größe mit steigendem Wallwinkel leicht zunimmt. Dies wurde im Gegensatz zu den Windkanaluntersuchungen auch bei den Porositäten $\phi = 0\%$ und $k_r = 1.8$ ($\phi = 52\%$) beobachtet (Abb. 8.3).

Bei Windschutzstreifen mit $k_r = 1.8$ und $\alpha = 60^\circ$ ist für hohe Schutzwirkung ($S_u = 0.75$) das Zwischenfeld bei 10fachem Streifenabstand noch durchgehend geschützt, bei den flacheren Wällen jedoch nur noch teilweise. Dies belegt, dass der Abstand, bei welchem der Übergang von durchgängig zu nicht mehr durchgängig geschütztem Zwischenfeld eintritt, mit zunehmendem Böschungswinkel leicht ansteigt.

8.2 Fußgängerwindkomfort

Isolinien des Komfortparameters f für Windschutzstreifenkonfigurationen mit unterschiedlichen Wallwinkeln α sind in Abb.8.4 exemplarisch für den Abstand $a = 15 \cdot (H+h)$ dargestellt. Die Größe der Schutzvolumen v'_f ist in Abb.8.5 über den Abstand für unterschiedliche Komfortparameter f aufgetragen. Aus diesen Abbildungen wird der geringe Einfluss der Wallform auf die geschützten Flächen des Windkomforts deutlich. Bei flachen Wällen ($\alpha = 20^\circ$) tritt der am stärksten geschützte Bereich nicht mehr in unmittelbarer Bodennähe auf, sondern über dem luvseitigen Teilstück des ersten Walls.

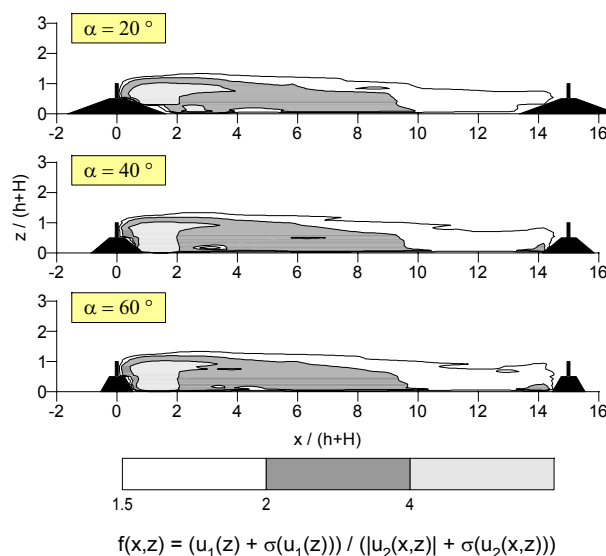


Abb. 8.4 Isolinien des Schutzparameters f für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1$, $\phi = 22\%$, $a = 15 \cdot (h+H)$.

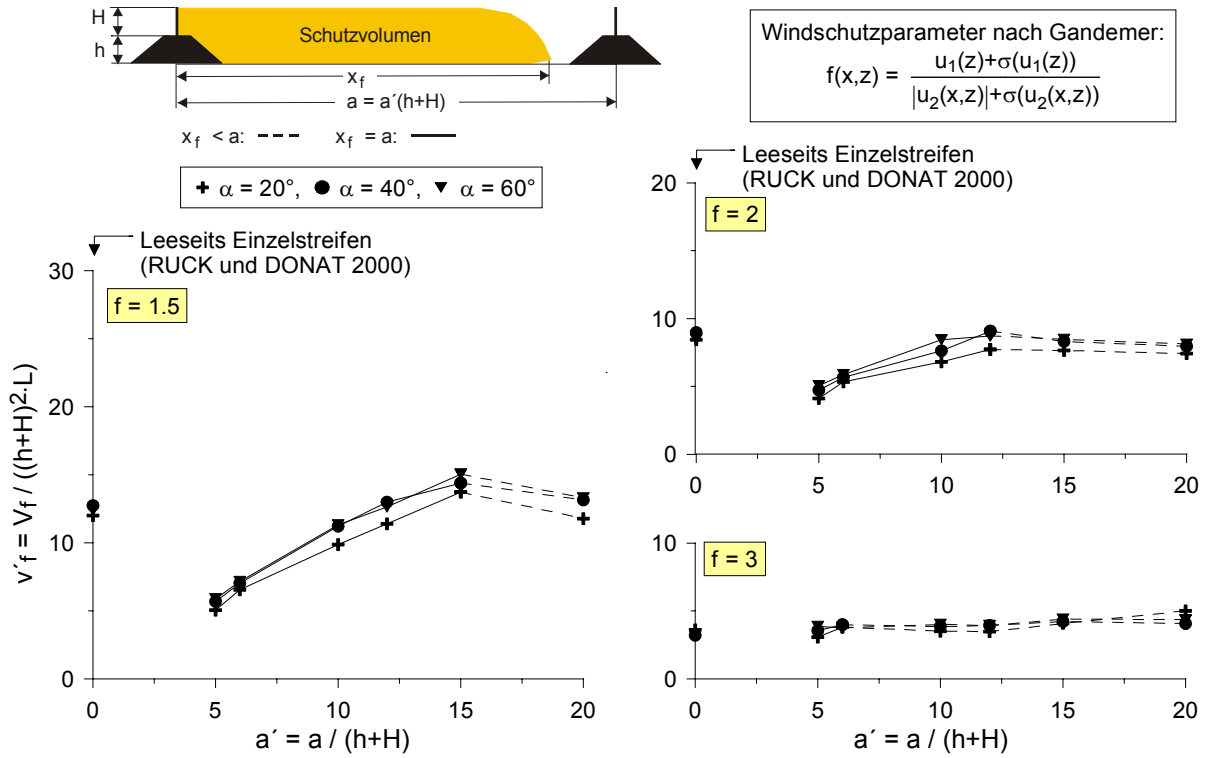


Abb. 8.5 Schutzvolumen v'_f in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22 \%$.

Die Ergebnisse der Doppelanordnungen stimmen auch hier gut mit denen der Einzelanordnungen überein.

8.3 Veränderung des turbulenten vertikalen Impulsaustausches

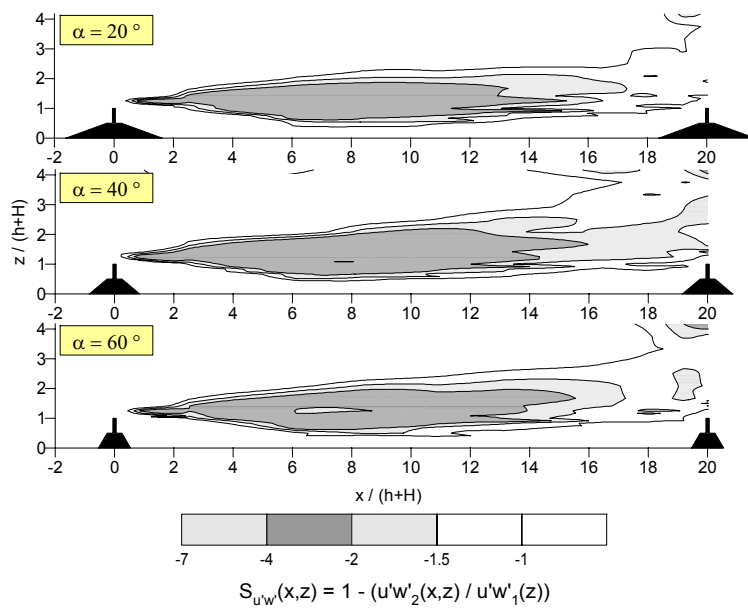


Abb. 8.6 Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w}$ für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22 \%, a = 20 \cdot (h+H)$.

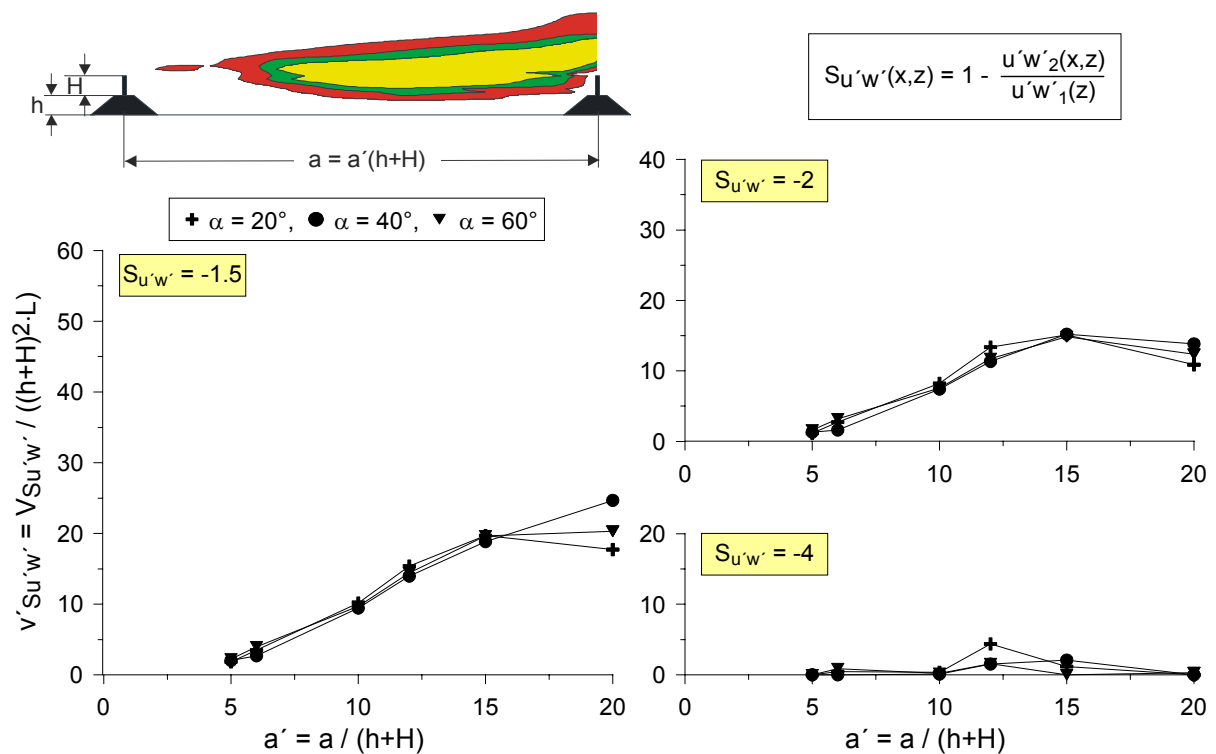


Abb. 8.7 Schutzvolumen $v'_{Su'w'}$ in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1$, $\phi = 22\%$.

Die Größe der Schutzvolumen $v'_{Su'w'}$ ist ebenfalls relativ unbeeinflusst von den untersuchten Wallwinkeln. Die Schutzvolumen mit $S_{u'w'} = -1.5$ zeigen zwar bei 20fachem Streifenabstand gewisse Differenzen, die - wie in Abb. 8.6 zu erkennen ist - durch Abweichungen des Isolinenverlaufs im nahen Luv des zweiten Streifens herühren, doch wird dies auf Messungenauigkeit bzw. auf eine geringe Abweichung der Windgeschwindigkeit im Windkanal zurückgeführt.

8.4 Rezirkulationsgebiete

8.4.1 Ergebnisse Windkanal

In Abb.8.8 sind Rezirkulationsvolumen und Wiederanlegelängen für unterschiedliche Wallwinkel α über den Abstand der beiden Windschutzstreifen aufgetragen. Bei Doppelanordnungen mit Wallwinkeln $\alpha = 40^\circ$ und $\alpha = 60^\circ$ ist die Größe der Rezirkulationsgebiete für alle untersuchten Abstände annähernd gleich. Bei Anordnungen mit $\alpha = 20^\circ$ weicht diese jedoch insbesondere für $a' = 10$ und $a' = 20$ stärker und für $a' = 12$ leicht ab. Da bei diesen drei hintereinander durchgeführten Messungen die Position des ersten (luvseitigen) Windschutzstreifens nicht verändert wurde, ist dies höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass der stromauf angeordnete Bewuchsstreifen nicht ganz plan auf dem Wall auflag (in Folge der in diesem Sommer vorherrschenden hohen Temperaturen hatte sich der Wall leicht verformt, was jedoch

zu spät erkannt wurde). Die dadurch möglicherweise verursachte zusätzliche Durchströmung verdrängte, wie in Abb.8.9 für $a = 10 \cdot (H+h)$ zu erkennen ist, den Ablösepunkt von der windabgewandten oberen Böschungskante stromabwärts.

Die Wiederanlegelängen zeigen einen sehr einheitlichen Verlauf. Lediglich bei $a' = 10$ sind größere Abweichungen zu beobachten: Während für $\alpha = 20^\circ$ und $\alpha = 60^\circ$ sich das Rezirkulationsgebiet über das gesamte Zwischenfeld erstreckt, liegt für $\alpha = 40^\circ$ die Wiederanlegelänge bereits im Zwischenfeld (Abb.8.9). Diese Beobachtung erscheint ziemlich unwahrscheinlich, wurde jedoch nicht erneut überprüft.

Die Untersuchung der Einzelstreifenanordnung von RUCK und DONAT 2000 zeigt sowohl für die Größe der Rezirkulationsgebiete als auch für die Wiederanlegelängen ähnliche Werte wie bei dieser Untersuchung.

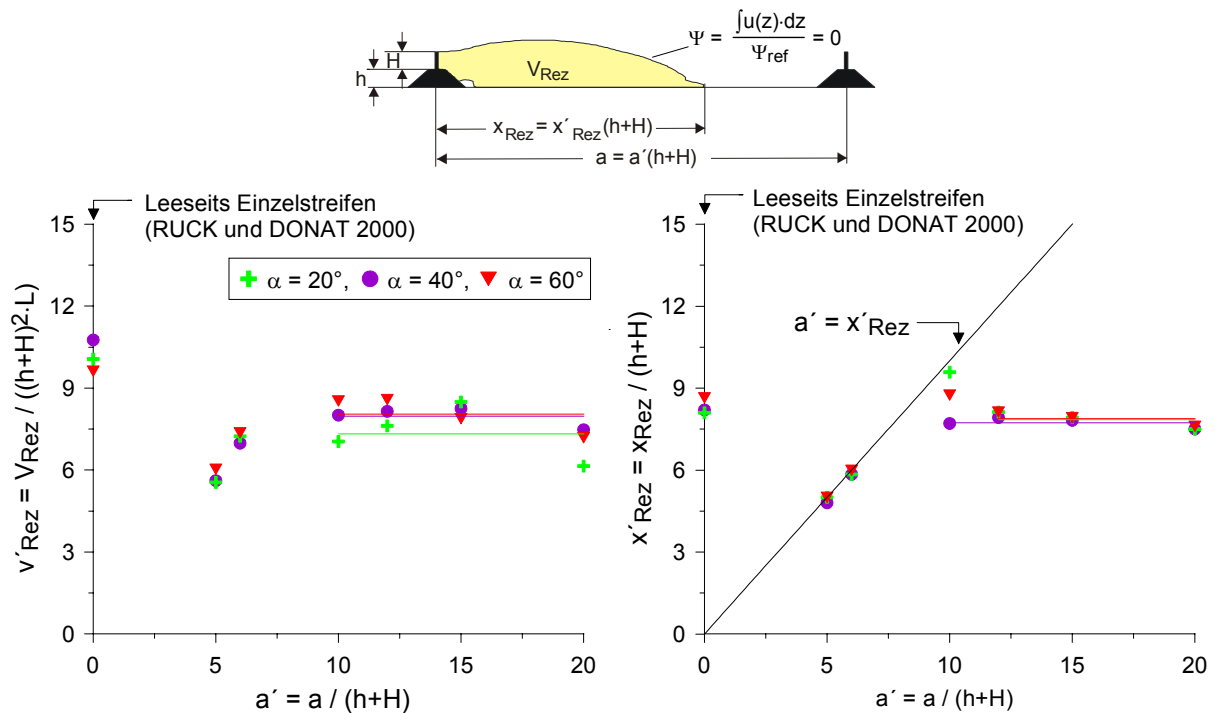


Abb. 8.8 Rezirkulationsvolumen und Wiederanlegelängen in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1, \phi = 22 \%$.

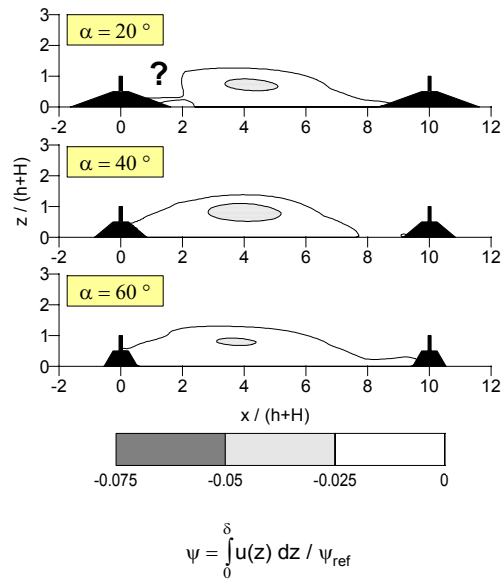


Abb. 8.9 Stromlinien $\psi \leq 0$ für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1$, $\phi = 22\%$, $a = 10 \cdot (H+h)$.

8.4.2 Ergebnisse Numerik

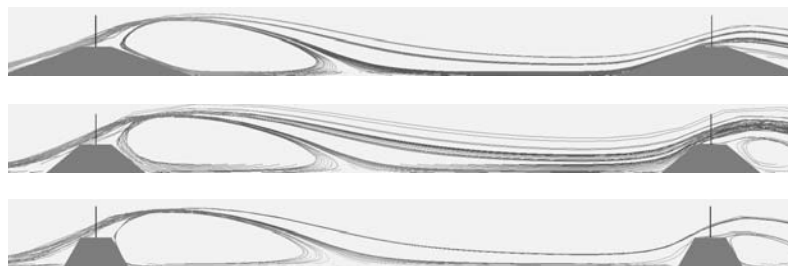


Abb. 8.10 Numerisch ermittelte Rezirkulationsgebiete für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1$, $k_r = 13.7$, $a = 10 \cdot (H+h)$.

Die in Abb.8.10 mit Hilfe einer linienförmigen Partikelquelle veranschaulichten Rezirkulationsgebiete aus den numerischen Berechnungen zeigen deutlich, dass - wie bereits zuvor vermutet - auch die Rezirkulationsgebiete hinter 20° Wällen an der leeseitigen Böschungsoberkante des ersten Walls ablösen und sich nicht, wie teilweise in den experimentellen Untersuchungen beobachtet, nach stromab verschieben (Abb.8.9). Dies bestätigt, dass die Größe der Rezirkulationsgebiete aus Kap.8.4.1 für 10, 12 und 20 fachen Streifenabstand sicherlich etwas zu klein angegeben sind.

Die Wiederanlegelängen aus den numerischen Berechnungen sind Abb.8.11 zu entnehmen und zeigen, wie schon die experimentellen Werte, auch nur sehr geringe Abweichungen für die unterschiedlichen Böschungswinkel.

Die maximale Rückströmgeschwindigkeit ist vom Böschungswinkel unbeeinflusst und beträgt $u_2 = -0.8$ m/s. Die Stelle, an welcher sie zu beobachten ist, verlagert sich jedoch bei steiler werdendem Wallwinkel zum Streifen hin (von $x'_{\min} = 2.5$ nach $x'_{\min} = 0.8$). Bei Wällen mit $\alpha = 20^\circ$ stellt sich die maximale Rückströmgeschwindigkeit leicht oberhalb der Böschung ein, ansonsten über dem freien Zwischenfeld.

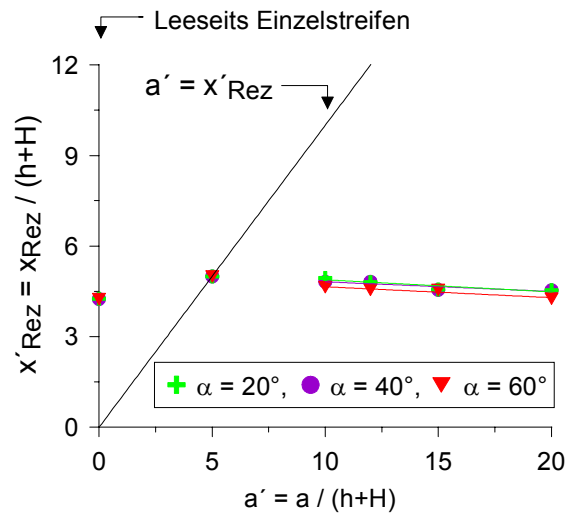


Abb. 8.11 Numerisch ermittelte Wiederanlegelängen für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1$, $k_r = 13.7$.

8.5 Relative turbulente kinetische Energie

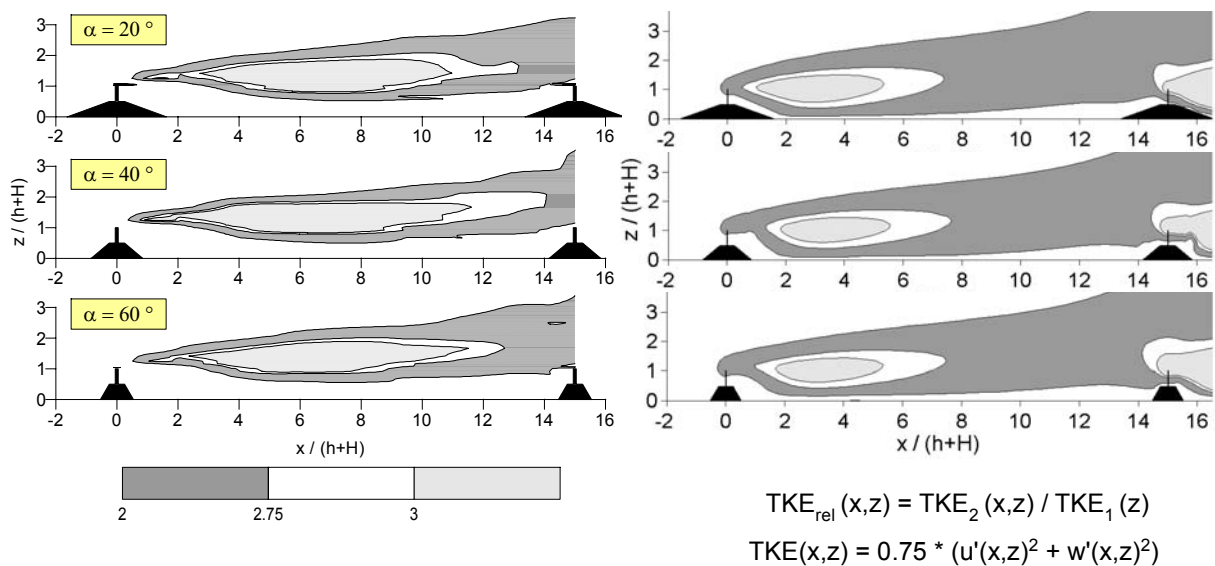


Abb. 8.12 Experimentell und numerisch ermittelte Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Sockelwallwinkel α .
 $H/h = 1$, $\phi = 22\%$ bzw. $k_r = 13.7$, $a = 15 \cdot (h+H)$.

Der Sockelwallwinkel hat praktisch keinen Einfluss auf den Verlauf der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} , was anhand der Isoplots in Abb.8.12 (links experimentell, rechts numerisch) exemplarisch für $a = 15 \cdot (h+H)$ gezeigt wird. Die numerischen Simulationen bestätigen die experimentellen Beobachtungen wiederum tendenziell.

8.6 Diskussion

Für die Praxis bedeutet dies zusammenfassend, dass der geometrischen Ausbildung des Walls viel weniger Bedeutung zukommt, als dies oftmals vermutet wurde. Steilere Wälle sind unter praktischen Gesichtspunkten sicherlich flacheren Wällen vorzuziehen, da der erforderliche Materialbedarf und somit die (Material-)Kosten für die Errichtung der Wälle geringer sind und vor allem der Flächenbedarf der Windschutzanlage kleiner ist.

In unmittelbarer bodennaher Umgebung der Wälle auftretende Abweichungen im Strömungsverhalten, welche aus einer Variation des Wallwinkels resultieren, werden durch die Bewuchsstreifen kompensiert. Bei unveränderter Porosität der Bewuchsstreifen bleibt das Verhältnis von Überströmung zu Durchströmung annähernd konstant. Die Umlenkung der Strömungsenergie durch den senkrechten Bewuchsstreifen in die Vertikale ist ebenfalls relativ unbeeinflusst vom Wallwinkel. Somit verändert sich der charakteristische Knick im Geschwindigkeitsprofil nicht, was die unveränderte Verteilung der relativen turbulenten kinetischen Energie und des vertikalen Impulsflusses erklärt.

Der geringe Einfluss der Wallgeometrie wird auch verständlich, wenn der Ablösewinkel als physikalische Ursache betrachtet wird. Dieser bleibt bei den untersuchten Anordnungen weitgehend konstant, siehe auch LEDER 1992.

Die Größe der Schutzvolumen nimmt leicht mit steigendem Wallwinkel zu. Hierfür gibt es zwei mögliche Erklärungen. Zum einen nimmt die Größe des Zwischenfelds bedingt durch die kleineren Volumen der Wälle leicht zu. Zum anderen bewirken flache Wälle wohl einen langsameren Anstieg der Stromlinien und eine geringere Turbulenz im Luv der Windschutzstreifen als steile Wälle. Die Strömung ist durch die Gegenwart der Windschutzstreifen etwas weniger stark gestört, was wiederum die kleineren Schutzvolumen erklärt. Gleichzeitig wäre dann jedoch auch eine geringere Turbulenzzunahme im Zwischenfeld zu erwarten, die weder experimentell noch numerisch beobachtet wurde. Diese Veränderungen sind bei einer Variation des Wallwinkels daher sicherlich von untergeordneter Bedeutung, werden hier jedoch der Vollständigkeit halber erwähnt. In Kap.9 wird nämlich gezeigt werden, dass diese Erklärung bei einer Variation des Verhältnisses von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe durchaus seine Berechtigung hat.

9. Einfluss des Verhältnisses von Bewuchs- zu Wallhöhe

9.1 Reduktion der aerodynamischen Kraftwirkung

9.1.1 Ergebnisse Windkanal

Der Einfluss des Verhältnisses von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h auf den Windschutz wird in Abb.9.1 exemplarisch für einen Streifenabstand $a = 15 \cdot (h+H)$ anhand der Isolinien dreier verschiedener Schutzparameter S_u ($S_u = 0.25, 0.5$ und 0.75) gezeigt. Anordnungen mit undurchlässigen Bewuchsstreifen sind dabei auf der linken Seite und Anordnungen mit mitteldichten Bewuchsstreifen auf der rechten Seite dargestellt. In Abb.9.2 ist die Größe der Schutzvolumen über den Windschutzstreifenabstand für niedrigen, mittleren und hohen Schutz aufgetragen.

Es zeigt sich, dass die Schutzvolumen zwischen undurchlässigen sockelwallbehafteten Windschutzstreifen und zwischen undurchlässigen Windschutzstreifen ohne Sockelwall in Form (Abb.9.1) und Größe (Abb.9.2) sehr ähnlich sind. Der Größenunterschied $\Delta v'$ schwankt lediglich zwischen 0.24 und 2.51 (Abb.9.3a) und beträgt im absoluten Mittel 1.21. Dies entspricht einer Größenabnahme (Abb.9.3b) zwischen 1.4 % und 16 % (im Mittel 7.9 %) bezogen auf das jeweils maximale Schutzvolumen.

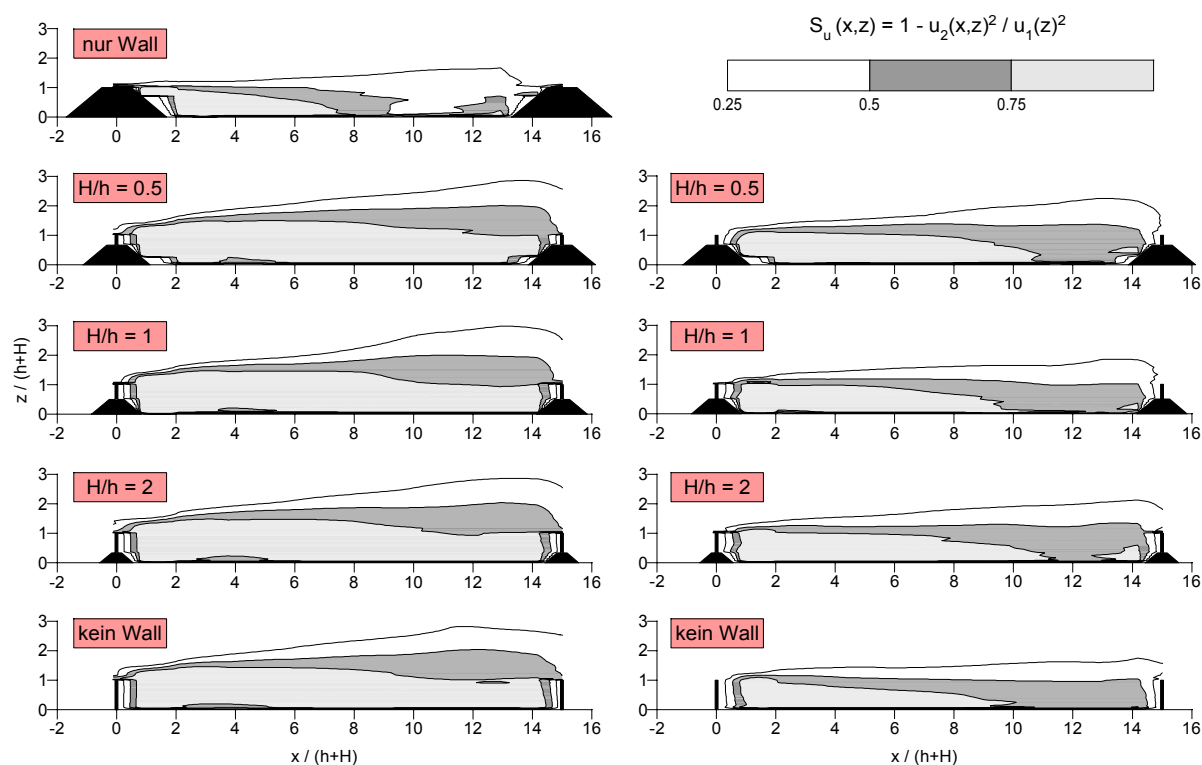


Abb. 9.1 Isolinien des Schutzparameters S_u für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (h+H)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $\phi = 52\%$.

Schutzvolumen zwischen Wällen ohne Bewuchsstreifen weichen jedoch beträchtlich von den Schutzvolumen zwischen den anderen Anordnungen (Bewuchsstreifen mit und ohne Wall) ab. Der Unterschied der Schutzvolumengröße (Abb.9.3c) steigt mit zunehmendem Streifenabstand und mit abnehmender Schutzwirkung an. Die mittlere Abweichung beträgt -12.39 (= -63.2 %). Dabei sind die Schutzvolumen im Zwischenfeld von zwei Wällen um 42.9 % bis zu 81.5 % kleiner als die zwischen der effektivsten Anordnung, wiederum bezogen auf das jeweils maximale Schutzvolumen (Abb.9.3d).

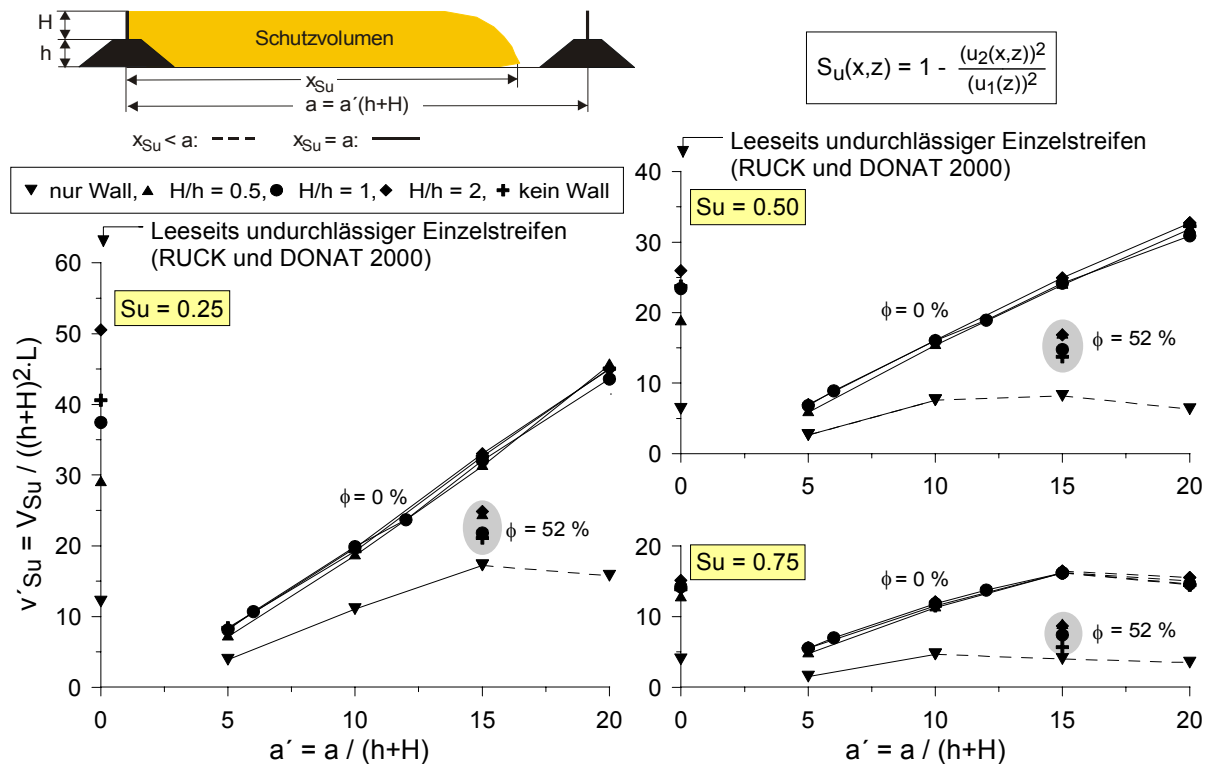
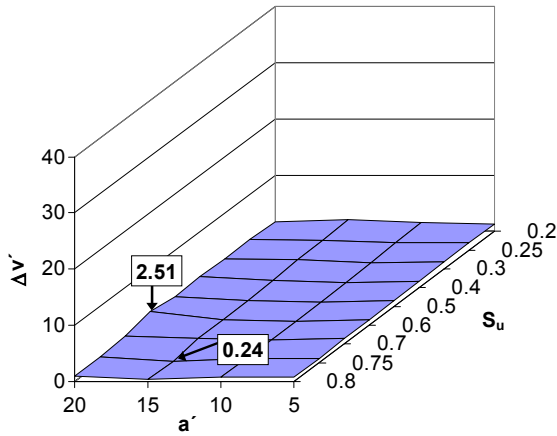
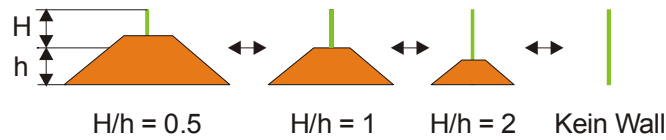
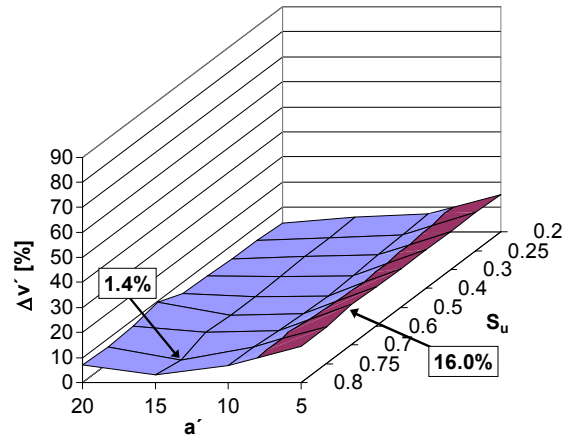


Abb. 9.2 Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h . $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $\phi = 52\%$).

Ein Vergleich der Schutzwirkung im Zwischenfeld von doppelt angeordneten Windschutzstreifen mit der Schutzwirkung im Lee strukturgleicher Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000) zeigt vor allem für niedrige Schutzwirkung ein abweichendes Verhalten (Abb.9.2, $S_u = 0.25$). Abgesehen vom Fall „Wall ohne Bewuchsstreifen“ kann der bei den Einzelstreifen beobachtete große Einfluss des Verhältnisses von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe auf die Größe der Schutzvolumen bei den doppelt angeordneten Windschutzstreifen nicht beobachtet werden. Des Weiteren kann auch nicht für jede untersuchte Doppelanordnung bestätigt werden, dass Windschutzstreifen mit $H/h = 2$ die größten Schutzvolumen verursachen.



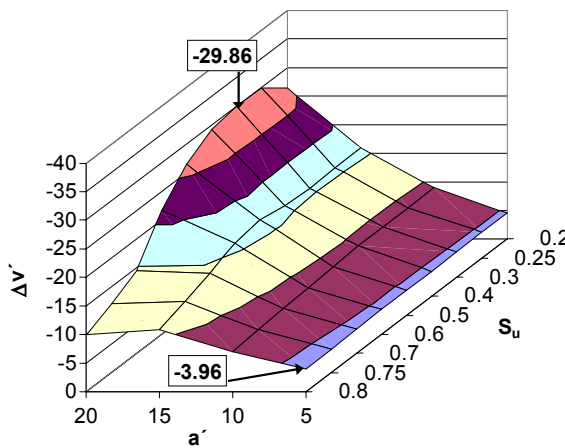
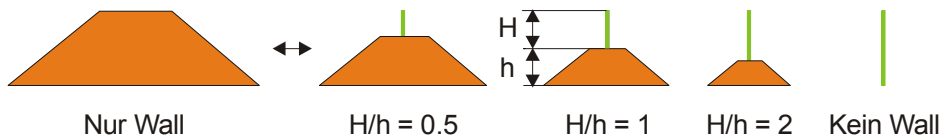
$\Delta v' = v'_{Max} - v'_{Min}$			
	$\Delta v'$	v'_{Max}	v'_{Min}
Max	2.51	H/h=2	H/h=1
Min	0.24	H/h=2	Kein Wall



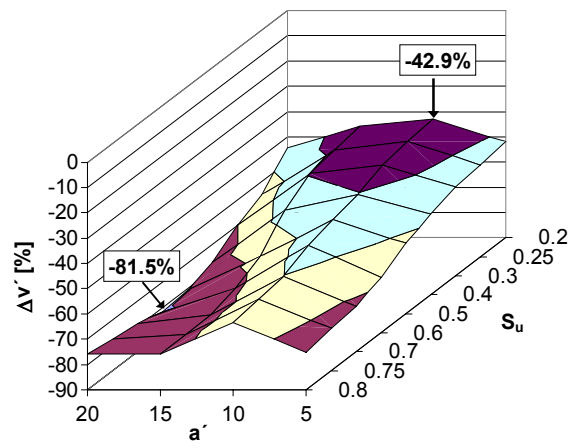
$\Delta v' = (v'_{Max} - v'_{Min}) / v'_{Max}$			
	$\Delta v' [\%]$	v'_{Max}	v'_{Min}
Max	16.0	H/h=2	H/h=0.5
Min	1.4	H/h=2	Kein Wall

a) absolute Größenunterschiede

b) Größenunterschiede in Prozent



$\Delta v' = v'_{Wall} - v'_{Max}$		
	$\Delta v'$	v'_{Max}
Max	-29.86	H/h=0.5
Min	-3.96	H/h=1



$\Delta v' = (v'_{Wall} - v'_{Max}) / v'_{Max}$		
	$\Delta v' [\%]$	v'_{Max}
Max	-81.9	H/h=2
Min	-42.9	H/h=1

c) absolute Größenunterschiede

d) Größenunterschiede in Prozent

Abb. 9.3 Unterschiede der Schutzvolumengröße $v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L)$ in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a und dem Schutzparameter S_u . $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$.

Für mitteldichte Bewuchsstreifen ($\phi = 52\%$) mit und ohne Sockelwall nimmt der Einfluss des Höhenverhältnisses H/h auf den Windschutz zu. Wie in Abb.9.2 (grau hinterlegte Datenpunkte) zu sehen ist, variiert die Schutzvolumengröße zwischen den mitteldichten Anordnungen stärker als zwischen den undurchlässigen Windschutzstreifen. Es zeigt sich jedoch kein klarer Trend: Die größten Schutzvolumen wurden zwischen Anordnungen mit $H/h = 0.5$ und $H/h = 2$ beobachtet (diese sind annähernd gleich groß), während Anordnungen mit $H/h = 1$ und ohne Wall etwas kleinere Schutzvolumen ausbilden.

Da durchlässigere Windschutzstreifen kleinere Schutzvolumen verursachen, was in Kap.7 gezeigt wurde, weichen folglich die Schutzvolumen zwischen Wällen ohne Bewuchsstreifen weniger stark von den mitteldichten als von den undurchlässigen Windschutzanordnungen (sockelwallbehaftet und ohne Wall) ab.

9.1.2 Ergebnisse Numerik

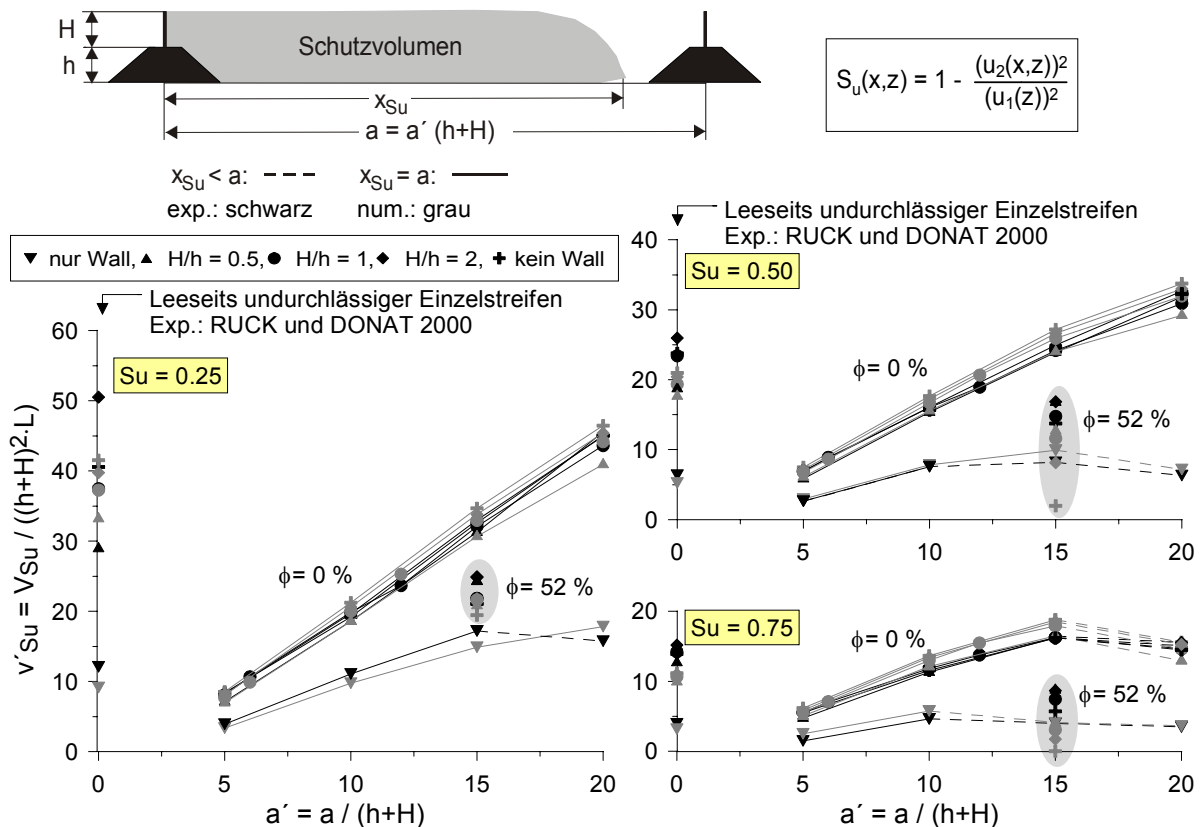


Abb. 9.4 Vergleich numerische Berechnung – Experiment: Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h . $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $\phi = 52\%$ bzw. $k_r = 1.8$).

Für undurchlässige Windschutzstreifen sind numerisch und experimentell ermittelte Schutzvolumen in Abb.9.4 für unterschiedliche Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe über den Streifenabstand dargestellt. Abb.9.4 bestätigt die im Vergleich zu den Anordnungen Bewuchsstreifen mit und ohne Wall wesentlich kleineren Schutzvolumen bei Nur-Wall-Anordnungen. Die Größe der numerisch ermittelten Schutzvolumen streut für Bewuchsstreifen mit und ohne Wall 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.

Der Einfluss des H/h-Verhältnisses auf die Schutzvolumen zwischen mitteldichten Windschutzstreifen ($k_r = 1.8$) ist ebenfalls in Abb.9.4 dargestellt, die Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen ist ziemlich schlecht. Die Größe schwach geschützter Bereiche ist für Bewuchsstreifen mit und ohne Wall relativ konstant. Für mittlere und hohe Schutzwirkung ist eine Abnahme der Schutzvolumengröße mit steigendem H/h-Verhältnis zu beobachten; Bewuchsstreifen ohne Wall bieten demnach den geringsten Schutz. Nur-Wall-Anordnungen verursachen im Vergleich zu den mitteldichten Bewuchsstreifen-Konfigurationen für $S_u = 0.25$ die kleinsten Schutzvolumen und für $S_u = 0.75$ die größten.

9.2 Fußgängerwindkomfort

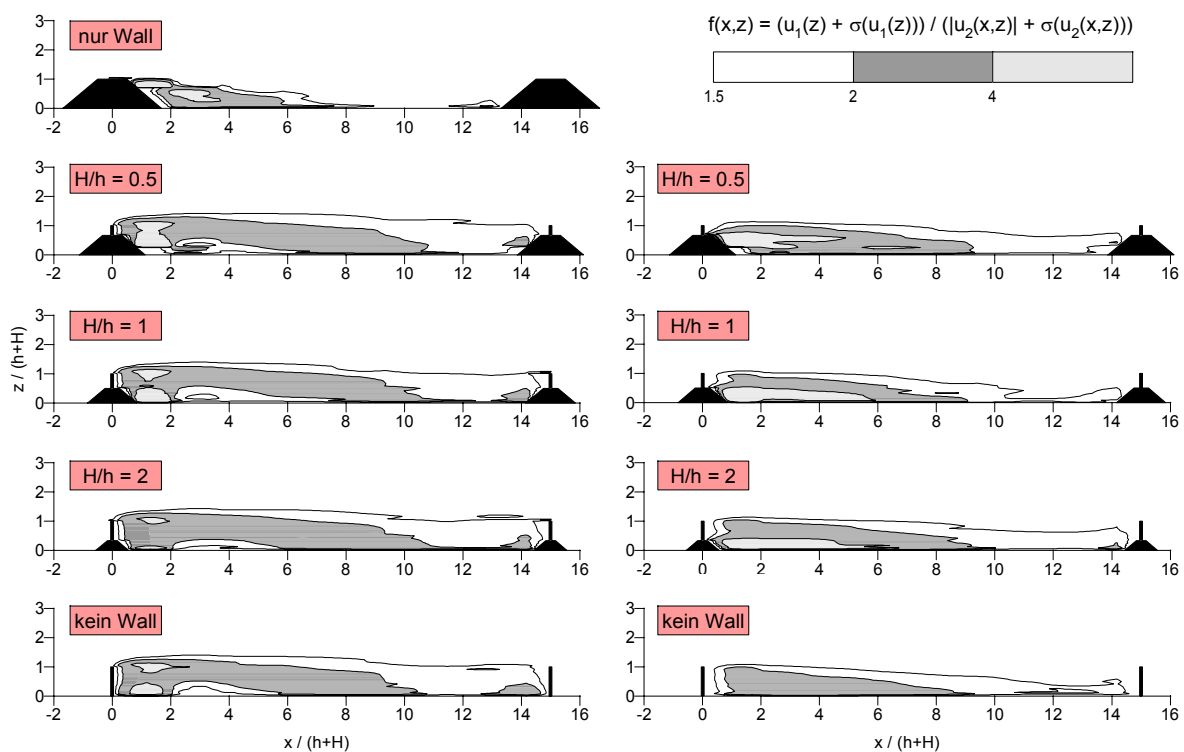


Abb. 9.5 Isolinien des Komfortparameters f für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (h+H)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $\phi = 52\%$.

Der Einfluss einer Variation des Verhältnisses von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h auf den Fußgängerkomfort wird in Abb.9.5 anhand von Isolinien des Komfortparameters f für undurchlässige und mitteldichte Bewuchsstreifen gezeigt. In Abb.9.6 sind entsprechende Schutzvolumen v'_f über den Streifenabstand a' aufgetragen. Die Komfortvolumen zeigen ein ähnliches Verhalten wie die Schutzvolumen v'_{su} (Abb.9.4): Der Kurvenverlauf für undurchlässige Bewuchsstreifen ist sehr einheitlich und Wälle ohne Bewuchsstreifen bieten auch hier wesentlich geringeren Schutz. Die Werte der undurchlässigen Einzelstreifen von RUCK und DONAT 2000 sind ergänzend aufgeführt und bestätigen die Werte der Doppelanordnungen. Komfortbereiche mit $f = 1.5$ und $f = 2$ sind zwischen mitteldichten Bewuchsstreifen kleiner als zwischen undurchlässigen Bewuchsstreifen, jedoch größer als bei Nur-Wall-Anordnungen. Dieses Verhalten kann bei $f = 3$ jedoch nicht mehr beobachtet werden. Die Größe der Komfortvolumen schwankt bei mitteldichten Bewuchsstreifen stärker als bei undurchlässigen.

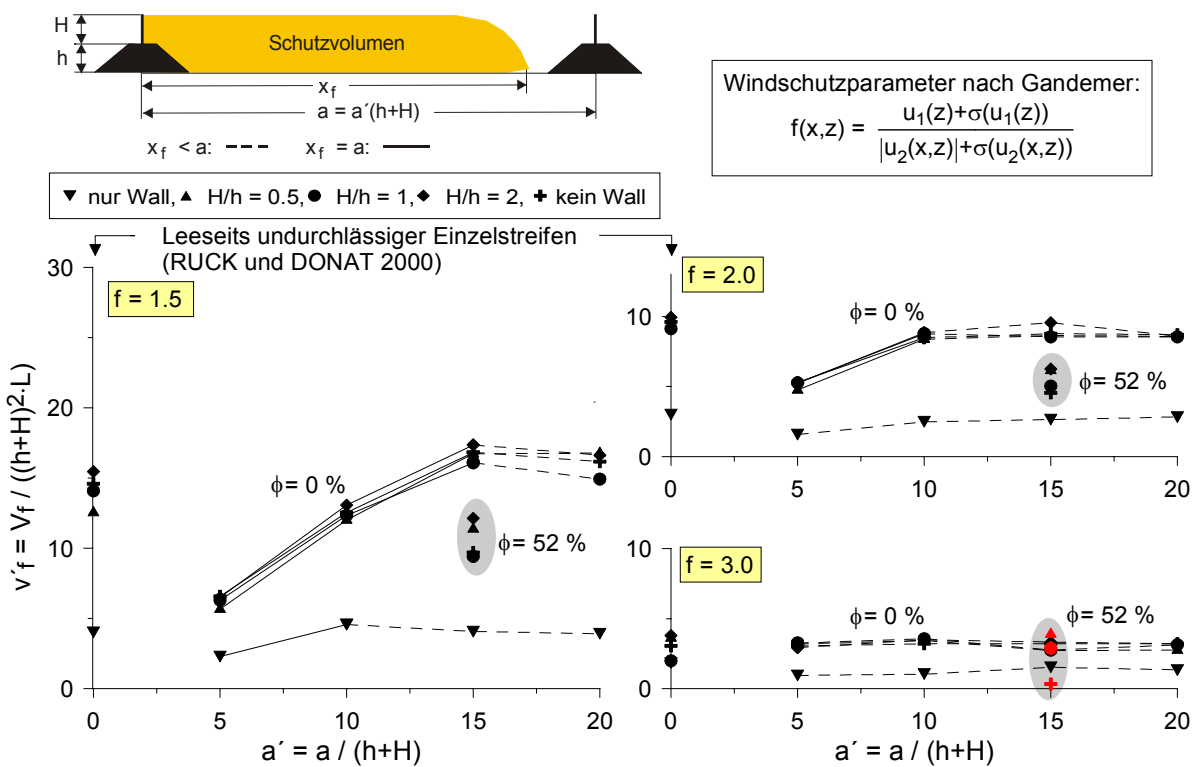


Abb. 9.6 Schutzvolumen v'_f in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h . $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $\phi = 52\%$).

9.3 Veränderung des turbulenten vertikalen Impulsaustausches

Die Isolinien des turbulenten Impulsaustausches in Abb.9.7 zeigen, dass das H/h -Verhältnis bei undurchlässigen Bewuchsstreifen kaum Einfluss auf die Ausbildung der Schutzvolumen $v'_{su'w}$ ausübt. Die Anordnung „Wall ohne Bewuchsstreifen“

weicht jedoch deutlich ab: Die Erhöhung des Impulsaustausches ist kleiner als bei undurchlässigen Bewuchsstreifen mit und ohne Wall und der bodennahe geschützte Bereich weist vor allem unmittelbar hinter dem ersten Wall eine geringere vertikale Ausdehnung auf.

In Abb.9.8 sind Schutzvolumen $v'_{Su'w}$ für ein variiertes H/h -Verhältnis über den Abstand dargestellt. Diese Abbildung zeigt, dass oben Gesagtes prinzipiell auch für die anderen untersuchten Abstände gilt, wobei jedoch die Anordnung $H/h = 1$ vor allem bei 20fachem Streifenabstand sowie bei einer starken Erhöhung des Impulstransports ($S_{u'w} = -4$) auch bei den Abständen $a' = 12$ und $a' = 15$ verstärkt abweicht. Dies ist überraschend und nicht unbedingt erklärbar.

Bei mitteldichten Bewuchsstreifen nimmt der turbulente Impulsfluss weniger stark zu als bei undurchlässigen Bewuchsstreifen (siehe auch Kap.7.3), er erhöht sich jedoch mit abnehmendem H/h -Verhältnis. Gleichzeitig vergrößern sich die Bereiche mit verstärktem Impulsaustausch und die geschützten Bereiche in Bodennähe wie auch oberhalb der Vermischungsschicht werden kleiner. Die Anordnung „Nur Wall“ setzt diesen Trend fort.

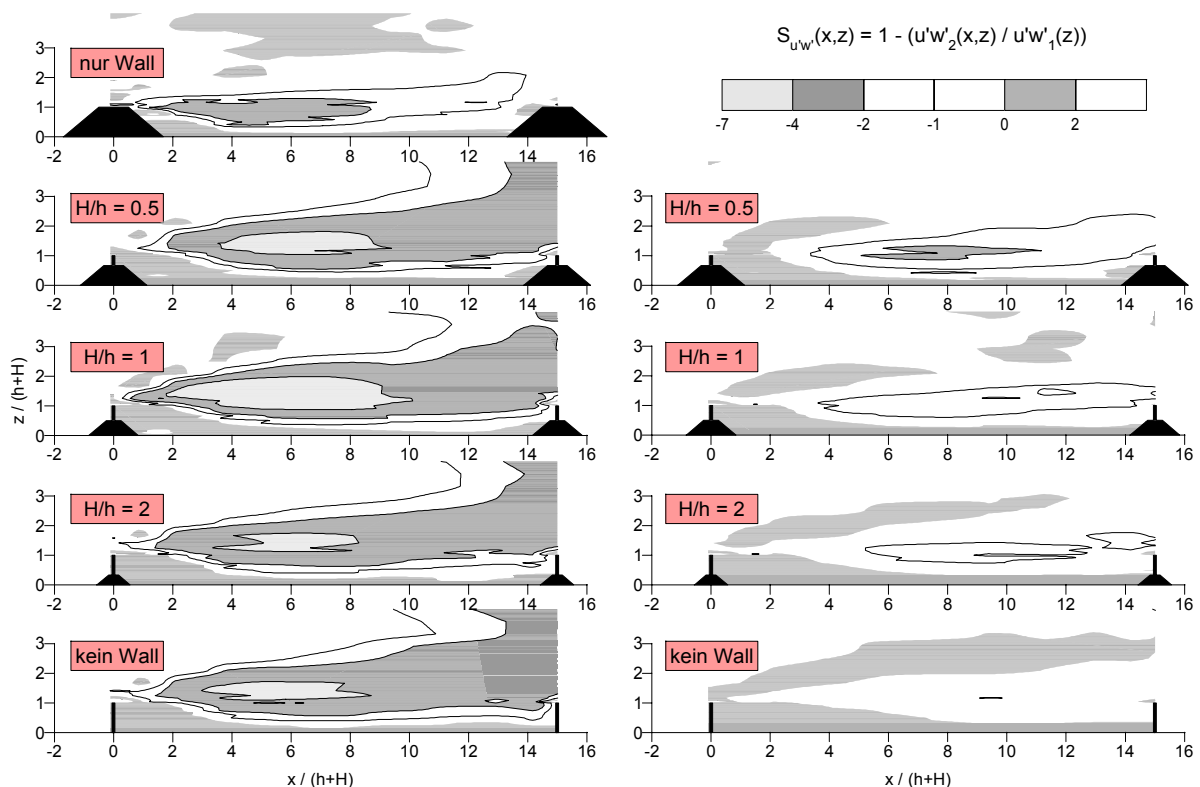


Abb. 9.7 Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w}$ für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

$\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (h+H)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $\phi = 52\%$.

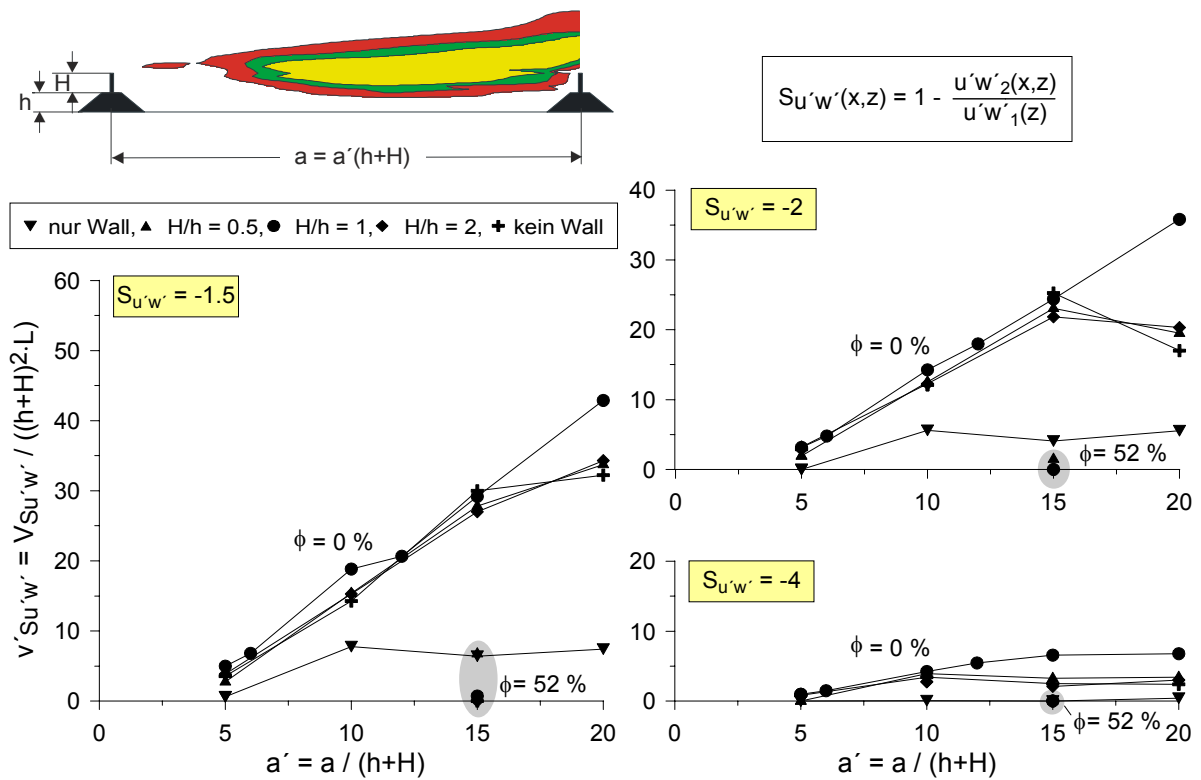


Abb. 9.8 Schutzvolumen $v'_{Su'w'}$ in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h . $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $\phi = 52\%$).

9.4 Rezirkulationsgebiete

9.4.1 Ergebnisse Windkanal

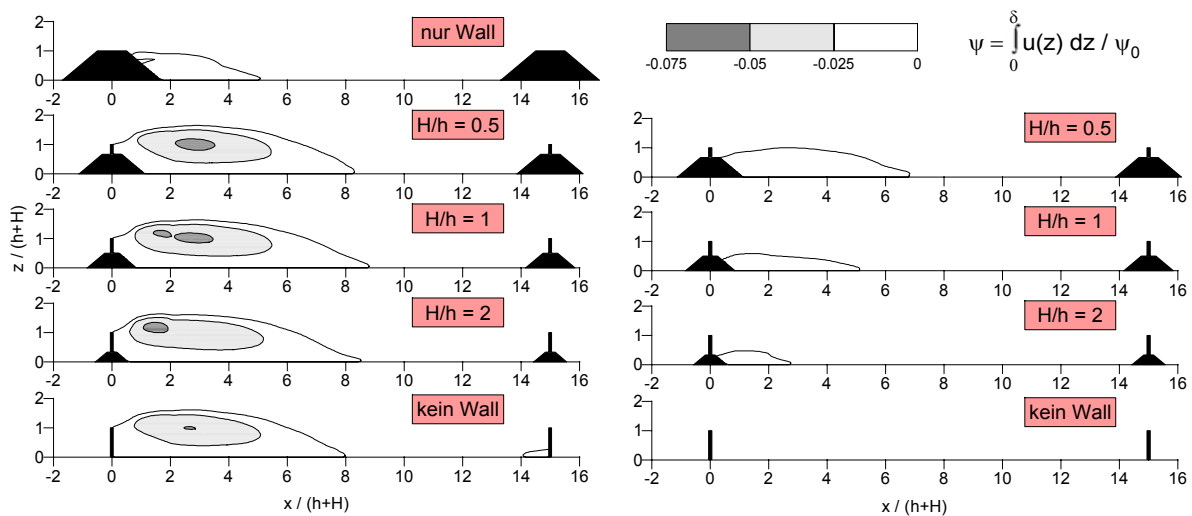


Abb. 9.9 Stromlinien $\psi \leq 0$ für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h . $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (H+h)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $\phi = 52\%$.

In Abb.9.9 sind exemplarisch für $a = 15 \cdot (H+h)$ Stromlinien $\psi \leq 0$ in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h dargestellt. In Abb.9.10 sind die Größe der Rezirkulationsgebiete V'_{Rez} sowie die Wiederanlegelänge x'_{Rez} über den Abstand a' aufgetragen. Aus beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass Rezirkulationsvolumen und Wiederanlegelängen zwischen undurchlässigen Bewuchsstreifen mit und ohne Wall nur leicht vom H/h -Verhältnis beeinflusst werden. Die über den Abstand gemittelten Werte zeigen eine leichte Abnahme von V'_{Rez} mit steigenden H/h -Werten. Die Konfiguration Wall ohne Bewuchsstreifen verursacht wesentlich weniger ausgeprägte Rezirkulationsgebiete. Bei mitteldichten Bewuchsstreifen mit und ohne Wall ist hingegen eine starke Abhängigkeit von den Höhenverhältnissen zu beobachten. Mit steigenden H/h -Werten nimmt sowohl die Größe des Rezirkulationsgebiets als auch die Wiederanlegelänge ab; bei Anordnungen ohne Wall existiert kein Rezirkulationsgebiet mehr. Bemerkenswert ist, dass mitteldichte Streifen auf Wällen mit $H/h = 0.5$ größere Rezirkulationsvolumen verursachen als Wälle ohne Bewuchsstreifen. Die Streuung der Werte undurchlässiger Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000) ist ähnlich der von entsprechenden Doppelanordnungen.

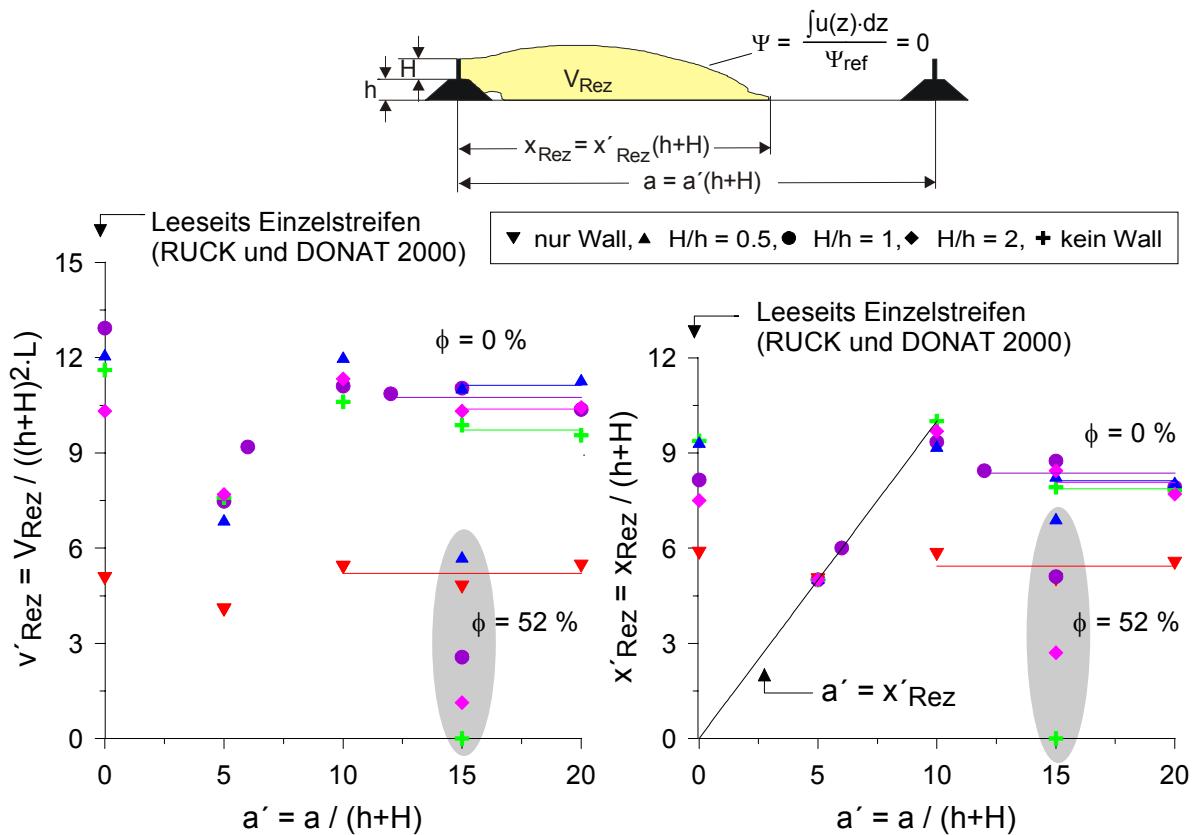


Abb. 9.10 Rezirkulationsvolumen und Wiederanlegelängen in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h . $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $\phi = 52\%$).

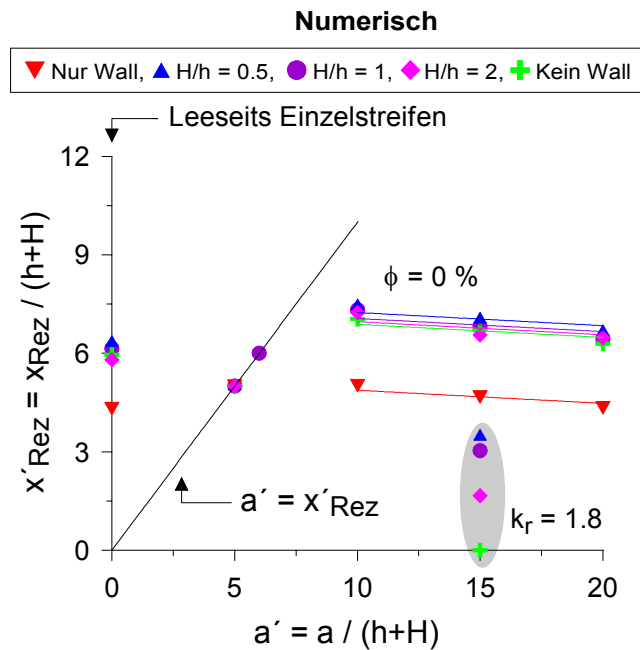


Abb. 9.11 Numerisch ermittelte Wiederanlegelängen in Abhängigkeit vom Windschutzstreifenabstand a für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$ (grau hinterlegt: $k_r = 1.8$).

9.4.2 Ergebnisse Numerik

Die numerischen Berechnungen zeigen bei Bewuchsstreifen mit $\phi = 0\%$ eine leichte, bei Bewuchsstreifen mit $\phi = 52\%$ eine starke Abnahme der Wiederanlegelänge mit steigenden H/h -Verhältnissen (Abb.9.11). Dies bestätigt tendenziell die experimentellen Ergebnisse, auch wenn die Werte generell insbesondere für $k_r = 1.8$ zu klein sind. Darüber hinaus ist auch hier wieder bei allen Konfigurationen eine Abnahme der Wiederanlegelänge mit steigendem Abstand und somit eine allmähliche Annäherung an die Wiederanlegelänge der jeweiligen Einzelstreifen zu erkennen. Die experimentellen Ergebnisse schwanken zu stark, als dass dies ersichtlich wäre (Abb. 9.10).

H/h	$\phi = 0\%$	$k_r = 1.8$	$\phi = 0\%$	$k_r = 1.8$	$\phi = 0\%$	$k_r = 1.8$
	u_2 (m/s)		x'_{\min}		z'_{\min}	
Nur Wall	-0.89		3.55		0.10	
0.5	-1.36	-0.6	2.11	1.75	0.10	0.05
1	-1.44	-0.49	1.75	1.39	0.10	0.05
2	-1.47	-0.35	1.03	0.47	0.10	0.05
Kein Wall	-1.44	Keine Rückströmung	0.06	-	0.16	-

Tab. 9.1 Numerisch bestimmte maximale Rückströmgeschwindigkeiten und deren Lage für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (H+h)$, $\phi = 0\%$ und $k_r = 1.8$.

Die maximalen Rückströmgeschwindigkeiten aus den numerischen Berechnungen sind in Tab.9.1 zusammengestellt. Die Werte sind aufgrund der quantitativen Abweichungen zwischen Experiment und numerischer Studie mit gewisser Vorsicht zu betrachten, werden hier jedoch dargestellt, um die Tendenzen zu veranschaulichen und insbesondere um auch einen Größenvergleich mit den anderen Einflussparametern zu ermöglichen. Während die Größe der Rückströmgeschwindigkeiten bei undurchlässigen Bewuchsstreifen bei einer Variation des Höhenverhältnisses nur minimal schwankt, nimmt sie bei mitteldichten Bewuchsstreifen mit der Wallhöhe ab. Mit kleiner werdenden Wallhöhe verschiebt sich der Ort, an dem die minimale Geschwindigkeit auftritt, zum luvseitigen Streifen hin.

9.5 Relative turbulente kinetische Energie

9.5.1 Ergebnisse Windkanal

Die Isolinien in Abb.9.12 zeigen den Einfluss eines variierten Höhenverhältnisses H/h für undurchlässige und mitteldichte Bewuchsstreifen auf die relative turbulente kinetische Energie TKE_{rel} . Die Darstellungen veranschaulichen für TKE_{rel} dieselben Tendenzen wie in Kap.9.3 für den Schutzparameter $S_{u,w}$ aufgezeigt wurden: Bei undurchlässigen Bewuchsstreifen übt das H/h -Verhältnis kaum einen Einfluss auf die Verteilung von TKE_{rel} aus, während bei mitteldichten Bewuchsstreifen sowohl der Betrag von TKE_{rel} wie auch die Ausdehnung der Bereiche erhöhter TKE_{rel} mit abnehmendem H/h -Verhältnis ansteigt. Nur-Wall-Anordnungen setzen den Trend der mitteldichten Streifen fort und weichen stark von den undurchlässigen ab.

9.5.2 Ergebnisse Numerik

In Abb.9.13 ist die Zunahme der turbulenten kinetischen Energie aus den numerischen Berechnungen dargestellt. Prinzipiell werden die experimentellen Ergebnisse bekräftigt. Die numerischen Ergebnisse zeigen zusätzlich, dass bei den undurchlässigen Bewuchsstreifen die Größe der Bereiche erhöhter TKE_{rel} mit dem H/h -Verhältnis leicht abnimmt, was bei den zu stark schwankenden Werten der Windkanaluntersuchung nicht erkennbar ist. Die numerisch ermittelten Bereiche erhöhter TKE_{rel} zwischen Nur-Wall-Anordnungen sind zwar etwas kleiner als zwischen mitteldichten Bewuchsstreifen mit $H/h = 0.5$; dies sollte jedoch aufgrund der in Kap.7 bereits beschriebenen Unsicherheiten bei porösen Streifen nicht überbewertet werden.

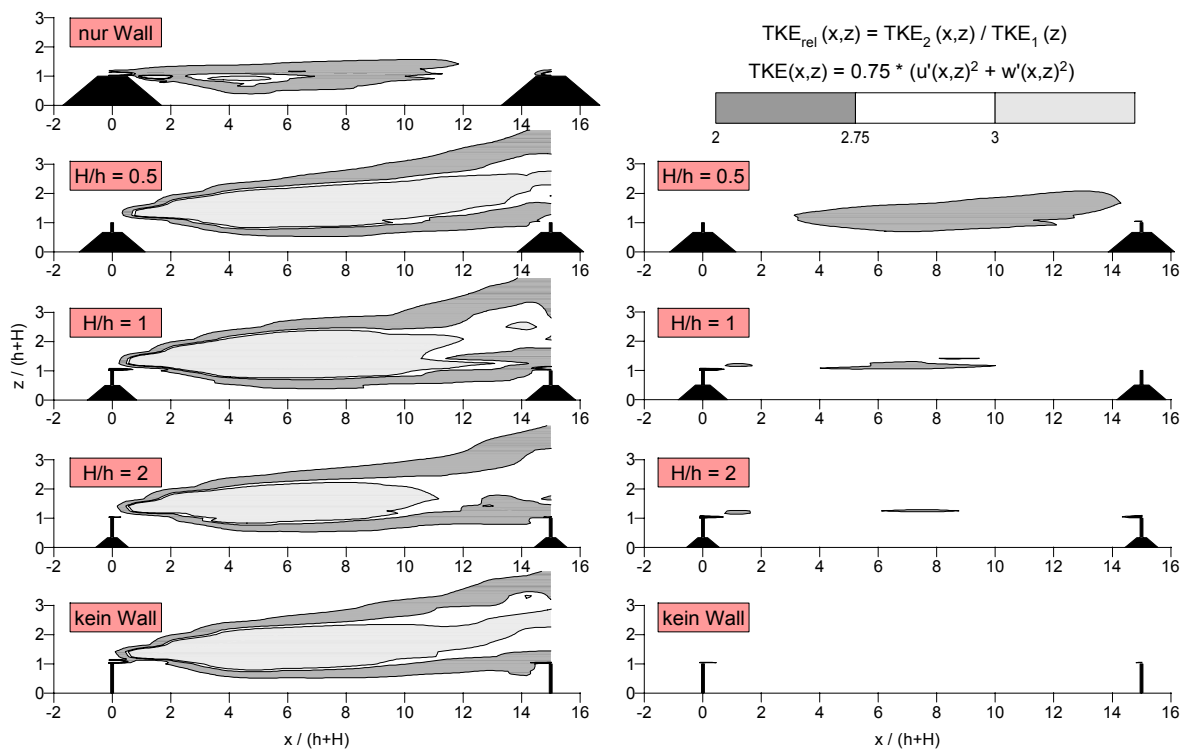


Abb. 9.12 Isolinen der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (H+h)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $\phi = 52\%$.

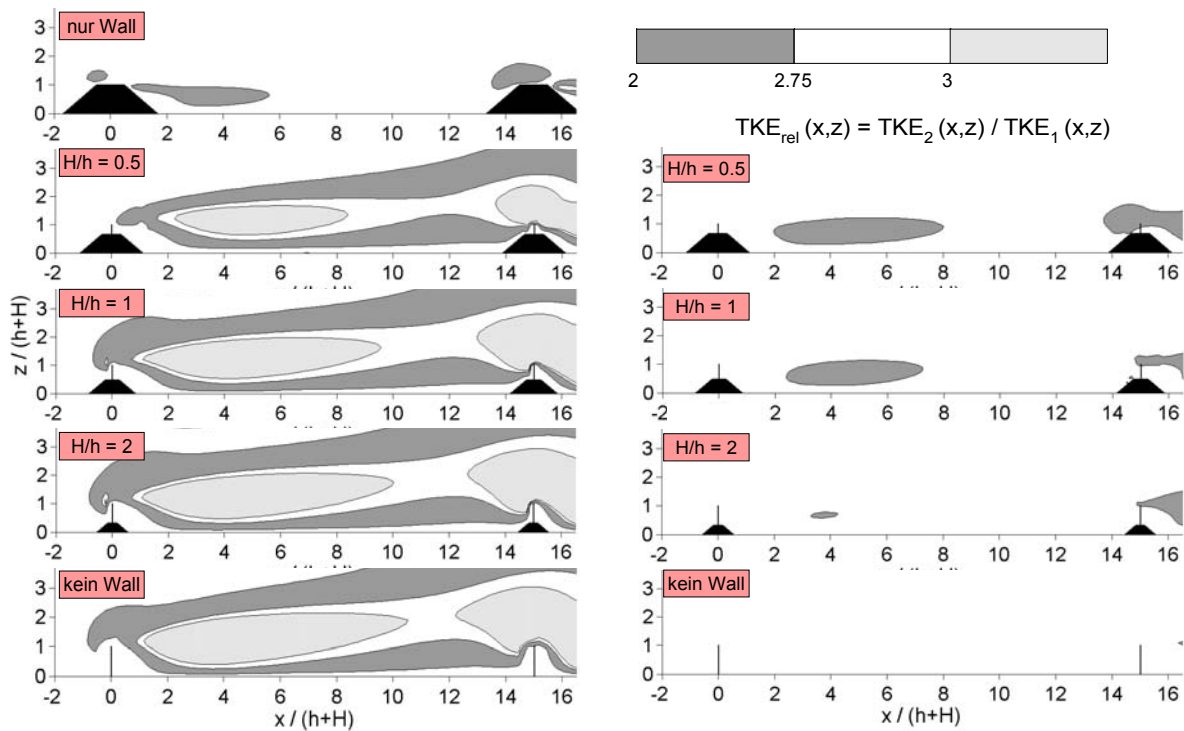


Abb. 9.13 Numerisch ermittelte Isolinen der relativen turbulenten kinetischen Energie TKE_{rel} für verschiedene Verhältnisse von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .
 $\alpha = 40^\circ$, $a = 15 \cdot (H+h)$, links: $\phi = 0\%$, rechts: $k_r = 1.8$.

9.6 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss des Höhenverhältnisses stark von der Porosität der Bewuchsstreifen abhängt. Während bei undurchlässigen Bewuchsstreifen die Wirksamkeit nur leicht beeinflusst wird, sind bei mitteldichten Bewuchsstreifen insbesondere im nahen Lee des ersten Windschutzstreifens gravierende Veränderungen in den Strömungsgrößen zu beobachten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass eine Variation des H/h-Verhältnisses bei Anordnungen mit undurchlässigen Bewuchsstreifen die Porosität des gesamten Windschutzstreifens nicht verändert, eine zunehmende Wallhöhe bei Anordnungen konstanter Höhe mit mitteldichten Bewuchsstreifen jedoch zu einer Abnahme der Gesamtporosität führt (Tab.9.2).

H/h	Porosität Bewuchsstreifen	Porosität Windschutzstreifen
Nur Wall	52 %	0 %
0.5	52 %	17 %
1	52 %	26 %
2	52 %	35 %
Kein Wall	52 %	52 %

Tab. 9.2 Einfluss des H/h-Verhältnisses auf die Gesamtporosität bei mitteldichten Bewuchsstreifen.

Die experimentellen Ergebnisse weisen keinen generellen Trend für undurchlässige Bewuchsstreifen mit und ohne Wall auf, da die Abweichungen im Rahmen der erzielbaren Messgenauigkeit liegen. Ein leichter Anstieg der Schutzvolumengröße V_{Su} und eine gleichzeitige Vergrößerung der Bereiche erhöhter TKE_{rel} mit steigendem H/h-Verhältnis, wie numerisch vorhergesagt, erscheint realistisch. Eine physikalische Erklärung hierfür ist, dass mit zunehmender Wallhöhe die Umlenkung der Strömung bei den Hindernissen verstärkt durch die Wallböschung bestimmt wird. Dies führt zu einem allmählicheren Anstieg der Stromlinien und zu geringerer Turbulenz. Der Extremfall stellt die Nur-Wall-Anordnung dar, die trotz gleicher Höhe und Porosität wesentlich weniger effizient ist. Die Strömungsumlenkung erfolgt in diesem Fall über eine relativ ausgedehnte horizontale Strecke. Die Strömung im Luv des Walls ist vermutlich wesentlich weniger turbulent. Durch das Fehlen des Bewuchsstreifens verschiebt sich der Ablösepunkt zur leeseitigen Böschung hin. Die Strömung ist insgesamt weniger stark gestört als bei Anordnungen mit Bewuchsstreifen.

Dass die Werte der Schutzvolumen V_{Su} und V_f bei Anordnungen mit mitteldichten Bewuchsstreifen keinen klaren Trend bei den experimentellen Untersuchungen erkennen lassen, liegt hauptsächlich an den Messergebnissen in der zweiten Hälfte des Zwischenfeldes. Dort sind die Unterschiede der relativen Windgeschwindigkeit u_2/u_1 ziemlich klein und weisen kein eindeutiges Verhalten auf. Es wird vermutet, dass dies auf geringe Schwankungen der Anströmgeschwindigkeit zurückzuführen ist. Solche Schwankungen wirken sich kaum auf die Strömungseigenschaften im na-

hen Lee der Streifen aus, welche überwiegend von der Windschutzstreifen-Struktur abhängen, sondern beeinflussen eher die Strömung weiter stromab.

Im Gegensatz zu den experimentellen Ergebnissen zeigen die numerischen Berechnungen bei der Schutzvolumengröße V_{Su} starke Veränderungen. Es wird an dieser Stelle nochmals daran erinnert, dass - wie in Kap.7.1 gezeigt wurde - bei der Modellierung von porösen Bewuchsstreifen größere quantitative Diskrepanzen beobachtet wurden. Bei mitteldichten Streifen wurde vor allem die Länge nicht mehr durchgängig geschützter Bereiche unterschätzt. Da eine Veränderung des H/h -Verhältnisses vor allem die Strömungseigenschaften im nahen Lee der Streifen beeinflusst, ist bei kürzeren Schutzvolumen somit natürlich auch mit größeren Abweichungen zu rechnen.

10. Formeln und Beispiele für Praxisanwendungen

10.1 Formeln zur Berechnung von Schutzvolumen V_{Su}

Für die untersuchten doppelt angeordneten Windschutzstreifen-Konfigurationen sind in den Anlagen 106 bis 116 die Größe der Schutzvolumen v'_{Su} in Abhängigkeit vom Schutzparameter S_u dargestellt. Zusätzlich sind Gleichungen der Trendlinien aufgeführt, mit denen eine Berechnung der Schutzvolumengröße für einen geforderten Schutzwirkungsgrad ermöglicht wird.

Für Streifenabstände $a' \leq 15$ können Schutzvolumen V_{Su} zwischen Windschutzstreifen mit und ohne Sockelwall näherungsweise auch mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$V_{Su} = v' \cdot (h+H)^2 \cdot L \quad (10.1)$$

mit

$$v'(S_u, \phi, a') = k \cdot ((-0.2026 \cdot a'^2 + 1.5652 \cdot a' - 7.9114) \cdot S_u + (0.0007 \cdot a'^2 - 0.0283 \cdot a' + 0.0746) \cdot \phi + 0.0781 \cdot a'^2 + 1.4273 \cdot a' + 0.5418)$$

Gültigkeitsbereich

S_u	= Schutzparameter	$0.2 < S_u < 0.8$
ϕ	= Porosität der Bewuchsstreifen	$0 \% < \phi < 52 \%$
a'	= normierter Abstand = $a / (H+h)$	$5 < a' < 15$
α	= Sockelwallwinkel	$\alpha = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ (nur $\phi = 22\%$)
k	= Korrekturfaktor	$k = 0.9$ für $\alpha = 20^\circ$ ansonsten $k = 1.0$
H	= Bewuchshöhe	
h	= Sockelwallhöhe	$H/h = 0.5, 1, 2$, kein Wall ($\phi = 0 \%$)
L	= Länge der Windschutzstreifen	

Dieser Berechnungsansatz wurde aus den experimentellen Untersuchungen abgeleitet. Die Übereinstimmung gemessener und berechneter Werte ist in Abb.10.1 dargestellt. Die maximale Abweichung zwischen experimentellen und empirischen Werten beträgt, bezogen auf den experimentellen Wert, 17 % für $S_u = 0.25$, 20 % für $S_u = 0.5$ und 22 % für $S_u = 0.75$.

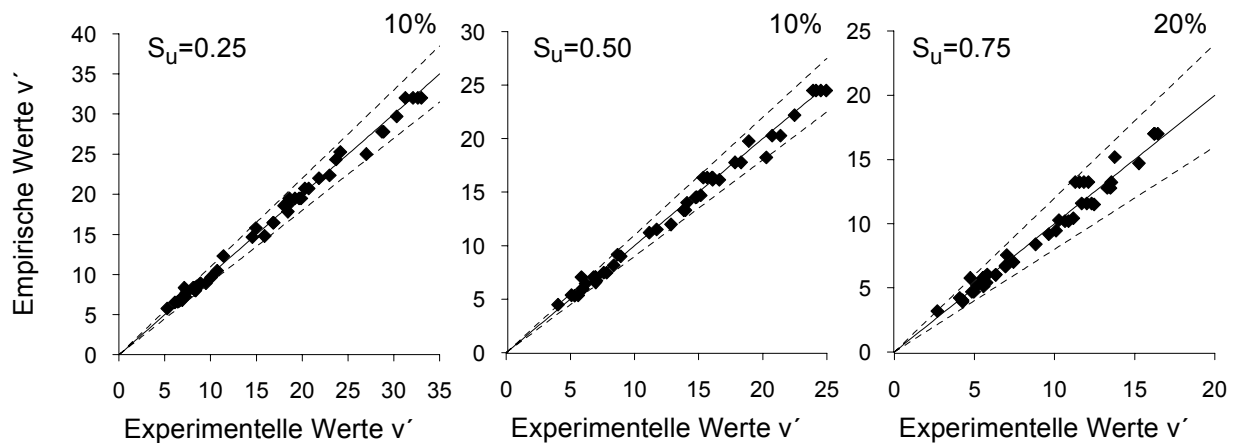


Abb.10.1 Übereinstimmung der empirischen Formel mit gemessenen Werten für verschiedene Schutzparameter S_u .

10.2 Anwendungsbeispiele

Fall 1:

Eine industriell genutzte Fläche (Länge in Hauptwindrichtung $a = 200$ m, Breite $L = 300$ m) soll mit Hilfe zweier Windschutzstreifen über eine Höhe von 10 m windberuhigt werden, und zwar dergestalt, dass sich die aerodynamischen Kräfte im Schutzvolumen um mindestens 75 % gegenüber den Kräften im freien Feld reduzieren ($S_u = 0.75$). Der schmale Bewuchsstreifen wird aufgrund der gewählten Pflanzen und deren Anordnung sehr dicht ausfallen (annähernd undurchlässig: $\phi = 0$ %) und das natürliche Wachstum der Pflanzen ist bis zum Zeitpunkt der vorgesehenen Inbetriebnahme auf $H = 10$ m begrenzt. Einflüsse einer seitlichen Umströmung der Windschutzstreifen seien vernachlässigbar.

Frage: Ist dies möglich mit Windschutzstreifen ohne Wall?

Lösung: Normierter Abstand der Streifen:

$$a' = a / (h+H) = 200 \text{ m} / 10 \text{ m} = 20.$$

Abb.9.2 und Anlagen 85 und 109 zeigen sogleich, dass Windschutzstreifen ohne Wall für $S_u = 0.75$ keinen durchgehenden Schutz bieten. Abb.9.2 und Anlage 85 zeigen weiterhin, dass auch mit sockelwallbehafteten Windschutzstreifen gleicher Höhe die Fläche nicht in der gewünschten Form geschützt werden kann.

Alternative: Um eine größere Höhe der Windschutzstreifen im vorgegebenen Zeitraum zu erhalten, wird vorgeschlagen, die Bewuchsstreifen auf einen Wall mit 10 m Höhe zu pflanzen ($H / h = 1$). Bieten diese den nötigen Schutz?

Lösung: Normierter Abstand der Streifen:

$$a' = a / (h+H) = 200\text{m} / (10 \text{ m} + 10 \text{ m}) = 10$$

Erforderliches Schutzvolumen:

$$V_{Su} = a \cdot L \cdot H = 200 \text{ m} \cdot 300 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} = 600\,000 \text{ m}^3$$

Normiertes erforderliches Schutzvolumen:

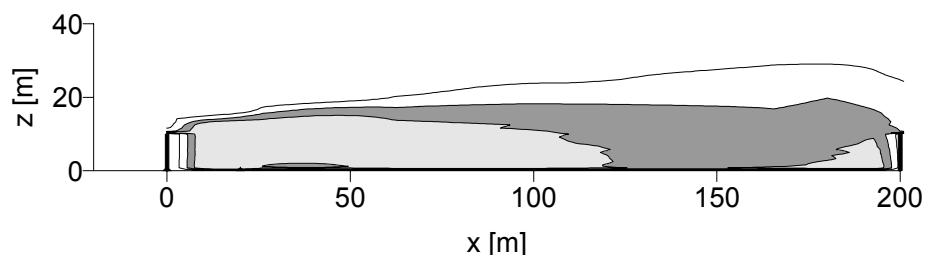
$$v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L) = 600\,000 \text{ m}^3 / ((20 \text{ m})^2 \cdot 300 \text{ m}) = 5$$

Abb.9.2 und Anlage 83 (Anordnung $H/h = 1$) zeigen, dass mit dieser Anordnung der nötige Schutz erreicht wird.

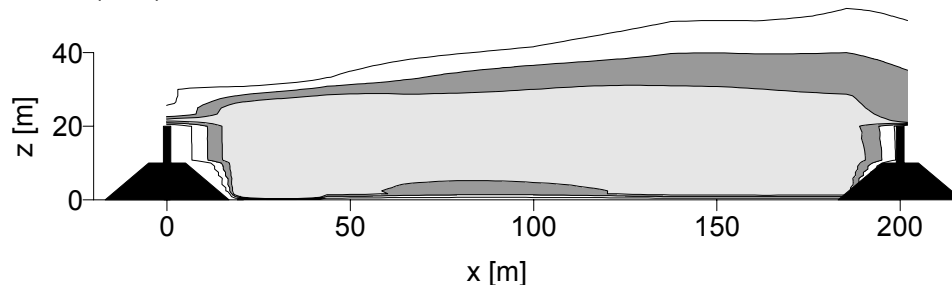
Die Schutzvolumen V_{Su} dieser beiden unterschiedlich hohen Anordnungen sind in Abb.10.2 in absoluten Längeneinheiten dargestellt.

Es wird bei diesem Fallbeispiel übrigens angenommen, dass sich die Schutzwirksamkeit nicht mit der Windschutzstreifenhöhe verändert. Dies gilt strenggenommen nur, wenn die Jensen-Zahl H/z_0 konstant bleibt, siehe RAINE und STEVENSON 1977. Bei zweifacher Windschutzstreifenhöhe verdoppelt sich die Jensen-Zahl. Die Anströmung ist folglich weniger turbulent, wodurch mit einer Verlängerung des geschützten Bereichs zu rechnen ist, siehe Kap.7.1.3.

Undurchlässige Bewuchsstreifen der Höhe $H = 10 \text{ m}$ ohne Wall,
 $a = 20 (H+h)$:



Undurchlässige Bewuchsstreifen der Höhe $H = 10 \text{ m}$ mit Wall gleicher Höhe h ,
 $a = 10 (H+h)$:



Größe der Schutzvolumen V_{Su} pro Breitereinheit der Fläche L [m^3/m]:

	Höhe	$S_u = 0.25$	$S_u = 0.50$	$S_u = 0.75$
Ohne Wall	$H + h = 10 \text{ m}$	4505	3229	1450
Mit Wall	$H + h = 20 \text{ m}$	7948	6412	4728

Abb. 10.2 Berechnungsbeispiel 1: Schutzvolumen V_{Su} bei variierter Gesamthöhe des Windschutzstreifens.

Fall 2:

Eine industriell genutzte Fläche (Länge in Hauptwindrichtung $a = 100$ m, Breite $L = 200$ m) soll mit Hilfe zweier sockelwallbehäfteter Windschutzstreifen ($H/h = 1$, $\alpha = 40^\circ$) über eine Höhe von 10 m windberuhigt werden. Dabei soll die Reduktion der aerodynamischen Kräfte im Schutzvolumen mindestens 50 % gegenüber den Kräften im freien Feld betragen ($S_u = 0.5$). Die Gesamthöhe eines jeden Windschutzstreifens ist aus landschaftsplanerischen Aspekten auf $h+H = 10$ m begrenzt.

Frage: Wie groß darf die Porosität ϕ der Windschutzstreifen höchstens sein?

Lösung: Normierter Abstand der Streifen:

$$a' = a / (h+H) = 100 \text{ m} / 10 \text{ m} = 10.$$

Erforderliches Schutzvolumen:

$$V_{Su} = a \cdot L \cdot H = 100 \text{ m} \cdot 200 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} = 200\,000 \text{ m}^3$$

Normiertes erforderliches Schutzvolumen:

$$v'_{Su} = V_{Su} / ((h+H)^2 \cdot L) = 200\,000 \text{ m}^3 / ((10 \text{ m})^2 \cdot 200 \text{ m}) = 10$$

Berechnung der Schutzvolumen nach Gl. 10.1:

$$\begin{aligned} v'(0.5, \phi, 10) &= 1 \cdot ((-0.2026 \cdot 10^2 + 1.5652 \cdot 10 - 7.9114) \cdot 0.5 + (0.0007 \cdot 10^2 - \\ &\quad 0.0283 \cdot 10 + 0.0746) \cdot \phi + 0.0781 \cdot 10^2 + 1.4273 \cdot 10 + 0.5418) \\ &= 16.3651 - 0.1384 \cdot \phi \end{aligned}$$

Wahl $\phi = 52$ %: $v' = 9.16 < 10$ Streifen zu durchlässig

Wahl $\phi = 35$ %: $v' = 11.52 > 10$ Streifen sind dicht genug.

Anhand von Anlage 10 muss noch überprüft werden, ob die Höhe des Schutzvolumens im gesamten Bereich ausreichend ist.

11. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Windschutzwirksamkeit von doppeltangeordneten dünnen Windschutzstreifen, welche auf Erdwällen errichtet sind. Die Effektivität des Windschutzes im Zwischenfeld der Windschutzstreifen wurde in Abhängigkeit vom Abstand der beiden Windschutzstreifen und von unterschiedlichen Strukturparametern erfasst. Hierzu wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal durchgeführt. Mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie konnten mittlere Windgeschwindigkeiten sowie Turbulenz- und Austauschgrößen gemessen werden. Die Bewertung der Wirksamkeit von Windschutzanlagen erfolgte anhand unterschiedlich definierter Schutzparameter, welche die Änderung des horizontalen Impulsflusses bzw. der aerodynamischen Kraftwirkung, die Änderung des Fußgängerkomforts und des vertikalen Impulsaustausches beschreiben. Des Weiteren wurden die Größen und Längen von Rezirkulationsgebieten sowie die Zunahme der turbulenten kinetischen Energie bestimmt. Für die definierten Schutzparameter wurden zugehörige Schutzvolumen ermittelt.

Darüber hinaus wurden, begleitend zu den Windkanaluntersuchungen, numerische Berechnungen mit einem k - ε -Turbulenzmodell durchgeführt, was eine gegenseitige Validierung der Ergebnisse ermöglichte.

Ergebnisse aus Vorversuchen dokumentieren die Anströmbedingungen in der Windkanalgrenzschicht. Der Vergleich mit den Bedingungen in einer natürlichen, atmosphärischen Grenzschicht zeigt eine gute Übereinstimmung des mittleren Windprofils, der Turbulenzintensitäten und der spektralen Verteilung der Turbulenz. Die Eigenschaften der Anströmung sind charakteristisch für eine Grenzschicht über vorstädtischem Terrain bzw. über Waldgebieten.

Der Einfluss des Abstandes zwischen zwei Windschutzstreifen auf den Windschutz wurde an verschiedenen Konfigurationen untersucht. Die Ergebnisse zeigen generell:

- Der Abstand zweier parallel angeordneter Windschutzstreifen ist ein wichtiger Einflussparameter im Hinblick auf eine optimierte Windberuhigung im Zwischenfeld.
- Die Größe der geschützten Bereiche nimmt erwartungsgemäß mit steigendem Abstand zu. Dies gilt, solange sich die Schutzvolumen im Lee des ersten Streifens und im Luv des zweiten Streifens überlagern bzw. diese aneinandergrenzen. Bei größeren Abständen wirken die beiden Windschutzstreifen wie strukturgleiche Einzelstreifen. Der stromab angeordnete Windschutzstreifen beeinflusst dann nicht mehr das Schutzgebiet des vorangegangenen, luvseitigen Streifens.

- Werden die Randbedingungen und der Abstand optimal gewählt, so kann das Windschutzgebiet zwischen zwei aerodynamisch kommunizierenden Streifen im Vergleich zum Schutzgebiet des Einzelstreifens merklich vergrößert werden. Dies gilt insbesondere für die Fälle, bei denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf Körper im Vergleich zur Kraftwirkung in der ungeschützten Strömung schwach bis mittelmäßig stark reduziert. Demgegenüber lassen sich Gebiete mit hohem Windschutz, die sich meist direkt hinter einem Streifen befinden, kaum durch die Anordnung eines zweiten Streifens stromab vergrößern.
- Mit zunehmendem Abstand vergrößern sich gleichzeitig auch die Bereiche mit erhöhtem turbulenten Impulsfluss in vertikaler Richtung bzw. die Bereiche mit erhöhter relativer turbulenter kinetischer Energie.
- Bei kleinen Abständen bilden sich über das gesamte Zwischenfeld Rückströmgebiete aus.
- Der optimale Abstand zwischen zwei Windschutzstreifen ist abhängig von der Struktur der Windschutzstreifen und vom Grad der geforderten Schutzwirkung. Er nimmt mit abnehmender Schutzwirkung und kleiner werdender Porosität zu.

Die Struktur der sockelwallbehafteten Windschutzstreifen wurde variiert, indem die Porosität der Bewuchsstreifen, der Wallwinkel und das Verhältnis von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe modifiziert wurden. Die Untersuchungen zeigen:

- Die Porosität der Bewuchsstreifen übt einen signifikanten Einfluss auf die Größe des windgeschützten Gebietes aus. Windschutzstreifen geringer Porosität verursachen wesentlich größere Schutzvolumen als Anordnungen mit hoher Porosität.
- Der Einfluss des Böschungswinkels auf die Größe der geschützten Gebiete ist ziemlich gering. Die numerischen Ergebnisse zeigen einen leichten Anstieg der Schutzvolumengröße mit steigendem Wallwinkel, die experimentellen Ergebnisse zeigen keinen klaren Trend, da die Unterschiede im Bereich der Messgenauigkeit liegen.
- Undurchlässige, sockelwallbehaftete Windschutzstreifen und gleich hohe Windschutzstreifen ohne Wall besitzen eine ähnliche Schutzwirkung. Bei den experimentellen Ergebnissen liegen die Größenunterschiede der Schutzvolumen wiederum im Bereich der Messgenauigkeit. Die numerischen Berechnungen zeigen einen Anstieg der Schutzvolumengröße mit steigendem Verhältnis von Bewuchs- zu Sockelwallhöhe. Zwischen ebenerdigen, undurchlässigen Bewuchsstreifen bilden sich demnach die größten Schutzvolumen aus. Wälle ohne Bewuchsstreifen bieten indes wesentlich geringeren Schutz.

- Der Einfluss vom Verhältnis der Bewuchshöhe zur Sockelwallhöhe bei Anordnungen mit mitteldichten Bewuchsstreifen ist größer als bei Anordnungen mit undurchlässigen Bewuchsstreifen. Dies gilt insbesondere für den Bereich im nahen Lee des ersten Windschutzstreifens. Mit zunehmender Bewuchshöhe steigt die Gesamtporosität der Windschutzstreifen an, was sich insbesondere in einer Verkleinerung der Rezirkulationsvolumen, der Bereiche mit erhöhter TKE_{rel} sowie der Bereiche mit erhöhtem turbulenten Impulsaustausch äußert.
- Eine größere Reduktion der Geschwindigkeit geht normalerweise mit einem höheren Anstieg der turbulenten kinetischen Energie bzw. des turbulenten Impulsaustausches einher und umgekehrt.
- Im Lee aller untersuchten sockelwallbehäfteten Windschutzstreifen bilden sich Rezirkulationsvolumen aus. Deren Größe wird wesentlich beeinflusst durch die Porosität. Im Lee undurchlässiger Windschutzstreifen ist eine stark ausgeprägte Rückströmung in Bodennähe zu erkennen, die sich mit zunehmender Porosität abschwächt. Bei mitteldichten sockelwallbehäfteten Windschutzstreifen gleicher Gesamthöhe nimmt die Größe der Rezirkulationsvolumen und die Wiederanlegelänge mit der Höhe des Sockelwalls stark, bei undurchlässigen Windschutzstreifen nur leicht ab.

Die numerischen Berechnungen stimmen qualitativ gut mit den experimentellen Ergebnissen überein, quantitativ sind jedoch vor allem bei porösen Bewuchsstreifen größere Abweichungen festzustellen.

Der Vergleich mit Untersuchungen sockelwallbehäfteter Einzelstreifen (RUCK und DONAT 2000) zeigt, abgesehen vom Einfluss des Verhältnisses von Bewuchs- zur Sockelwallhöhe bei niedriger Schutzwirkung, eine gute Übereinstimmung. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden zusätzlich einige numerische Berechnungen sockelwallbehäfteter Einzelstreifen durchgeführt, um Vergleichsdaten mit exakt gleicher Anströmung zu erhalten und um Abweichungen, bedingt durch die unterschiedlichen Grenzschichteigenschaften, auszuschließen.

Weitere Vergleiche mit Literaturdaten ebenerdiger Windschutzstreifen wurden, soweit möglich, durchgeführt und liefern ebenfalls eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

Mit den abgeleiteten Schutzvolumen, welche die Größe von geschützten Bereichen abhängig von der Art und vom Grad der Schutzwirkung beschreiben, wird dem planenden Ingenieur eine Bemessungsgrundlage und Entscheidungshilfe für doppeltangeordnete Windschutzanlagen geliefert.

Literaturverzeichnis

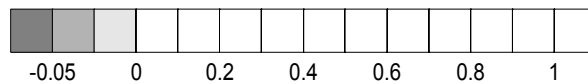
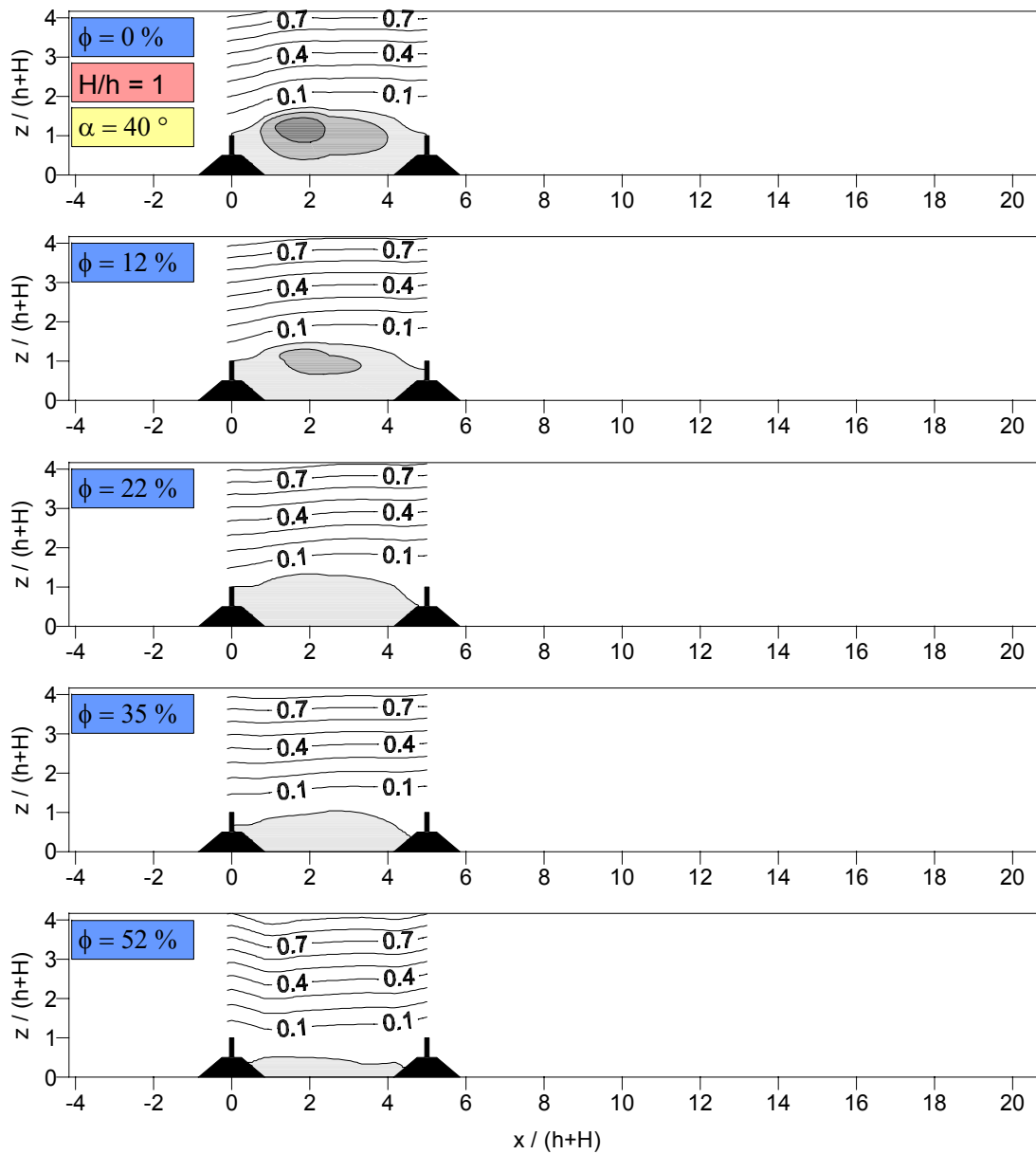
- Alefeld, G.:** 1982: *Höhere Mathematik für Bau- und Vermessungsingenieure Teil 1*, Vorlesungsskript, Universität Karlsruhe.
- Argent, R.M.:** 1992, The Influence of a Plant Canopy on Shelter Effect, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 41-44, 2643-2653
- Blenk, H., Trienes, H.:** 1956, Strömungstechnische Beiträge zum Windschutz - Strömungsuntersuchungen an Windhindernissen am Modell und in der freien Natur“, *Grundlagen der Landtechnik* 8, 1.Teil, VDI-Verlag, Düsseldorf
- Blenk, H., Trienes, H.:** 1956, Strömungstechnische Beiträge zum Windschutz - Strömungsuntersuchungen an Windhindernissen am Modell und in der freien Natur“, *Grundlagen der Landtechnik* 8, 2.Teil, VDI-Verlag, Düsseldorf
- Blocken, B., Carmeliet, J.:** 2004, Pedestrian Wind Environment around Buildings: Literature Review and Practical Examples, *J. of Thermal Env. & Bldg. Sci.* 28, 107-160.
- Boldes, U., Colman, J., Maranon Di Leo, J.:** 2001, Field Study of the Flow behind Single and Double Row Herbaceous Windbreaks, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 89, 665-687.
- Boldes, U., Golberg, A., Maranon Di Leo, J., Colman, J., Scarabino, A.:** 2002, Canopy Flow and Aspects of the Response of Plants Protected by Herbaceous Shelterbelts and Wood Fences, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 90, 1253-1270
- Bradley, E.F., Mulhearn, P.J.:** 1983, Development of Velocity and Shear Stress Distributions in the Wake of a Porous Shelter Fence, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 15, 145-156.
- Cataldo, J. Duranona, V.:** 2003, Wind Comfort Technique Study, *Proc. of PHYSMOD2003: Int. Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena*, Prato, Italy, 3. - 5. Sept. 2003, 120-125.
- Cleugh, H.A.:** 1998, Effects of Windbreaks on Airflow, Microclimates and Crop Yields, *Agroforestry Systems* 41, 55-84.
- Counihan, J.:** 1975, Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data from the Period 1880-1972, *Atmos. Environ.* 9, 871-905, Pergamon Press.
- Durst, F., Melling, A., Whitelaw, J.H.:** 1976, *Principles and Practice of the Laser-Doppler-Anemometry*, Academic Press, London
- Etling, D.:** 2002, *Theoretische Meteorologie: Eine Einführung*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 354 pp.
- Eurocode 1:** Basis of Design and Actions on Structures, Part 2.4: Wind Actions, ENV 1991-2-4. In Niemann, H.-J. (ed.), 1994, *Windlastnormen nach 1992*, WTG-Berichte Nr. 2, 165-286, Windtechnologische Gesellschaft, Aachen.
- Fang, F.-M., Wang, D.Y.:** 1997, On the Flow around a Vertical Porous Fence, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 67/68, 415-424
- Ferziger, J.H., Perić, M.:** 1999, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 2nd Edition, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 389 pp.
- Finnigan, J.J., Bradley, E.F.:** 1983, The Turbulent Kinetic Energy Budget Behind a Porous Barrier: an Analysis in Streamline Coordinates, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 15, 157-168.

- Flomerics Ltd:** 2000, *Guide to Defining the Mathematical Model*, Document Nr. FLOVENT/MM/1000/1/0.
- Frank, C., Ruck, B.:** 2002, Strömungscharakteristika im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen, *Proc. der 10. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik"*, Univ. 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: Int. Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena*, Prato, Italy, 3. - 5. Sept. 2003, 70-77.
- Frank, C., Ruck, B.:** 2003b, Shelter Efficiency of Double-Arranged Windbreaks, *Proc. of the int. Conf. "Wind Effects on Trees"*, Karlsruhe, 16. - 18. Sept. 2003, 65-72.
- Frank, C., Ruck, B.:** 2003c, *Optimierte Windberuhigung über stoffemittierenden Industrieflächen*, Abschlussbericht DBU-Forschungsprojekt Az.: 18062, IfH, Univ. Karlsruhe.
- Frank, C., Ruck, B.,** 2004a: Über die Schutzwirksamkeit sockelwallbehäfteter dünner Windschutzstreifen: Experiment und numerische Studie, *Proc. der 12. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik"*, Karlsruhe, 7.-9. Sept. 2004, Paper 52.
- Frank, C., Ruck, B.:** 2004b, Double-Arranged Mound-Mounted Shelterbelts: Influence of Porosity on Wind Reduction between the Shelters, *Environ. Fluid Mech.* (in press).
- Gandemer, J.:** 1979, Wind Shelters, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 4, 371-389.
- Gandemer, J.:** 1981, The Aerodynamic Characteristics of Windbreaks, Resulting in Empirical Design Rules, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 7, 15-36.
- Garratt, J.R.:** 1994, *The Atmospheric Boundary Layer*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Heisler, G.M., DeWalle, D.R.:** 1988, Effects of Windbreak Structure on Wind Flow, *Agric. Ecosystems Environ.* 22/23, 41-69.
- Hoerner, S.F.:** 1965, *Fluid-Dynamic Drag*, Hoerner Fluid Dynamics, Bricktown, New Jersey.
- Holmes, J.D.:** 2001, Wind Loading of Parallel Free-Standing Walls on Bridges, Cliffs, Embankments and Ridges, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 89, 1397-1407.
- Idelchik, I.E.:** 1986: *Handbook of Hydraulic Resistance*, Springer Verlag, Berlin.
- Iqbal, M., Khatry, A.K.:** 1976, A Study of the Roughness Effects of Multiple Windbreaks, *Boundary Layer Met.* 11, 187-203.
- 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 Met.* 80, 127-165.
- Klingbeil, K., Benndorf, D., Grunert, F.:** 1982, Aerodynamische Grundlagen für Windschutzpflanzungen - Der Einfluß der geometrischen Struktur von Gehölzschutzstreifen auf ihre Schutzwirkung, Teil II, *Z. Meteor.* 32, 3, 165-175.
- Koss, H.:** 2003, Windkomfortkriterien im Vergleich. In: Graubner (Hrsg.) *Windwirkungen auf Bauwerke und deren Umgebung*, WtG-Berichte Nr. 8, 143-160, Windtechnologische Gesellschaft, Aachen.
- Lauder, B.E., Spalding, D.B.:** 1974, The Numerical Computation of Turbulent Flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3, 269-289.
- Leder, A.:** 1992, *Abgelöste Strömungen – Physikalische Grundlagen*, Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden.

- Lee, S.-J., Park, K.-C., Park, Ch.-W.:** 2002, Wind Tunnel Observations about the Shelter Effect of Porous Fences on the Sand Particle Movements, *Atmos. Environ.* 36, 1453-1463.
- Lieff, W.:** 1993, *Vergleich der Umströmung von Bäumen in Natur und Modell*, Diplomarbeit, IfH, Univ. Karlsruhe.
- McAneney, K.J., Judd, M.J.:** 1990, Multiple Windbreaks: An Aeolean Ensemble, *Boundary Layer Met.* 54, 129-146.
- McNaughton, K.G.:** 1988, Effects of Windbreaks on Turbulent Transport and Microclimate, *Agric. Ecosystems Environ.* 22/23, 17-39.
- Müller, G.:** 1989, *Wallhecken: Entstehung - Pflege - Neuanlage am Beispiel der Gemeinde Ganderkesee*, BSH Verlag, Wardenburg.
- Nägeli, W.:** 1945, Weitere Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Windschutzstreifen, *Mitteil. Schweizer. Anstalt für das forstl. Versuchswesen* 24, 2, 659-737.
- Nord, M.:** 1991, Shelter Effects of Vegetation Belts - Results of Field Measurements, *Boundary Layer Met.* 54, 363-385.
- Papesch, A.J.G.:** 1992, Wind Tunnel Tests to Optimize Barrier Spacing and Porosity to Reduce Wind Damage in Horticultural Shelter Systems, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 41-44, 2631-2642
- Park, C.-W., Lee, S.-J.:** 2003, Experimental Study on Surface Pressure and Flow Structure around a Triangular Prism Located behind a Porous Fence, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 91, 165-184
- Patton E.G., Shaw, R.H., Judd, M.J., Raupach, M.R.:** 1998, Large-Eddy Simulation of Windbreak Flow, *Boundary Layer Met.* 87, 275-306.
- Perera, M.D.A.E.S.:** 1981, Shelter behind Two-Dimensional Solid and Porous Fences, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 8, 93-104.
- Plate, E. J.:** 1971, The Aerodynamics of Shelter Belts, *Agr. Meteorol.* 8, 203-222.
- Plate, E.J.:** 1995, Windprofile in der Gebäudeaerodynamik. In: Plate, E.J. (ed.) *Windprobleme in dichtbesiedelten Gebieten*, WTG-Berichte Nr. 3, 7-26, Windtechnologische Gesellschaft, Aachen.
- Raine, J.K., Stevenson, D.C.:** 1977, Wind Protection by Model Fences in a Simulated Atmospheric Boundary Layer, *J. Ind. Aerodyn.* 2, 159-180.
- Rodi, W.:** ca. 1982, *Turbulenzmodelle und ihre Anwendung mit Hilfe von Differenzenverfahren*, Vorlesungsskript, Universität Karlsruhe.
- Rotta, J.C.:** 1972, *Turbulente Strömungen*, B.G.Teubner, Stuttgart.
- Ruck, B.:** 1987, *Laser-Doppler-Anemometrie*, AT-Fachverlag, Stuttgart.
- Ruck, B. (Hrsg.):** 1990, *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, AT-Fachverlag, Stuttgart.
- Ruck, B.:** 2001, Efficiency of Shelterbelts on Mounds, *Proc. of PHYSMOD2001*, Univ. Hamburg.
- Ruck, B., Donat, J.:** 2000, *Einfluss der Geometrie von Sockelwällen auf die Wirksamkeit von Windschutzpflanzungen*, Abschlussbericht DBU-Forschungsprojekt Az.: 12071, Univ. Karlsruhe.
- Ruck, B., Donat, J.:** 2000b, Aerodynamisches Verhalten dünner Windschutzstreifen auf Wällen unterschiedlicher Geometrie - Experiment und numerische Studie, *Proc.*

- der 8. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, Univ. München, Paper 42.
- Ruck, B., Lieff, W.:** 1997, Wind Tunnel Simulation of Shelter Belt Performance. In: Ruck, B., Leder, A., Dopheide, D. (eds.), *Laser Anemometry - Advances and Applications*, 577-586, Univ. Karlsruhe.
- Schlichting, H.:** 1965, *Grenzschicht-Theorie*, Verlag G. Braun, Karlsruhe.
- Stull, R.B.:** 1988, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Sturrock, J.W.:** 1969, Aerodynamic Studies of Shelterbelts in New Zealand - 1, Low to Medium Height Shelterbelts in Mid-Canterbury, *New Zealand Journal of Science* 12, 754-776.
- Sturrock, J.W.:** 1972, Aerodynamic Studies of Shelterbelts in New Zealand - 2, Medium-Height to Tall Shelterbelts in Mid-Canterbury, *New Zealand Journal of Science* 15, 113-140.
- Take, E.S., Wang H.:** 1997, Reply to Comments by J.D. Wilson and C.J. Mooney on „A Numerical Simulation of Boundary-Layer Flows near Shelterbelts“, *Boundary Layer Met.* 85, 151-159.
- Van Eimern, J., Karschon, R., Razumova, L.A., Robertson, G.W.:** 1964, *Windbreaks and Shelterbelts*, Technical Note No. 59, World Meteorological Organization, 188 pp.
- VDI-Richtlinie 3783**, Blatt 12, 2000: *Umweltmeteorologie. Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht. Windkanalanwendungen*. Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN-Normenausschuss.
- Wang, H., Take, E.S.:** 1995, A Numerical Simulation of Boundary-Layer Flows near Shelterbelts, *Boundary Layer Met.* 75, 141-173.
- Wang, H., Take, E.S.:** 1997, Momentum Budget and Shelter Mechanism of Boundary-Layer Flow near a Shelterbelt, *Boundary Layer Met.* 82, 417-435.
- Wang, H., Take, E.S.:** 1997b, Model-Simulated Influences of Shelterbelt Shape on Wind-Sheltering Efficiency, *J. Applied Meteorol.* Vol. 36, 695-704.
- Wang, H., Take, E.S., Shen, J.:** 2001, Shelterbelts and Windbreaks: Mathematical Modeling and Computer Simulations of Turbulent Flows, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 33, 549-586.
- Wilson, J.D.:** 1985, Numerical Studies of Flow through a Windbreak, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 21, 119-154.
- Wilson, J.D.:** 1987, On the Choice of a Windbreak Porosity Profile, *Boundary Layer Met.* 38, 37-49.
- Wilson, J.D.:** 1997, A Field Study of the Mean Pressure about a Windbreak, *Boundary Layer Met.* 85, 327-358
- Wilson, J.D.:** 2004a, Oblique, Stratified Winds about a Shelter Fence, I: Measurements, *J. Applied Meteorol.* Vol. 43, No. 8, 1149-1167
- Wilson, J.D.:** 2004b, Oblique, Stratified Winds about a Shelter Fence, II: Comparison of Measurements with Numerical Models, *J. Applied Meteorol.* (im Druck).
- Wilson, J.D., Mooney, C.J.:** 1997, Comments on „A Numerical Simulation of Boundary-Layer Flows near Shelterbelts“ by H. Wang and E. Take, *Boundary Layer Met.* 85, 137-149.

- Wilson, J.D., Yee, E.:** 2003, Calculation of Winds Disturbed by an Array of Fences, *Agric. Forest Met.* 115, 31-50.
- WTG-Merkblatt,** Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik: 1995 In: Plate, E.J. (ed.) *Windprobleme in dichtbesiedelten Gebieten*, WTG-Berichte Nr. 3, 241-284, Windtechnologische Gesellschaft, Aachen.
- Zhou, X.H., Brandle, J.R., Takle, E.S., Mize, C.W.:** 2002, Estimation of the Three-Dimensional Aerodynamic Structure of a Green Ash Shelterbelt“, *Agric. Forest Met.* 111, 93-108.

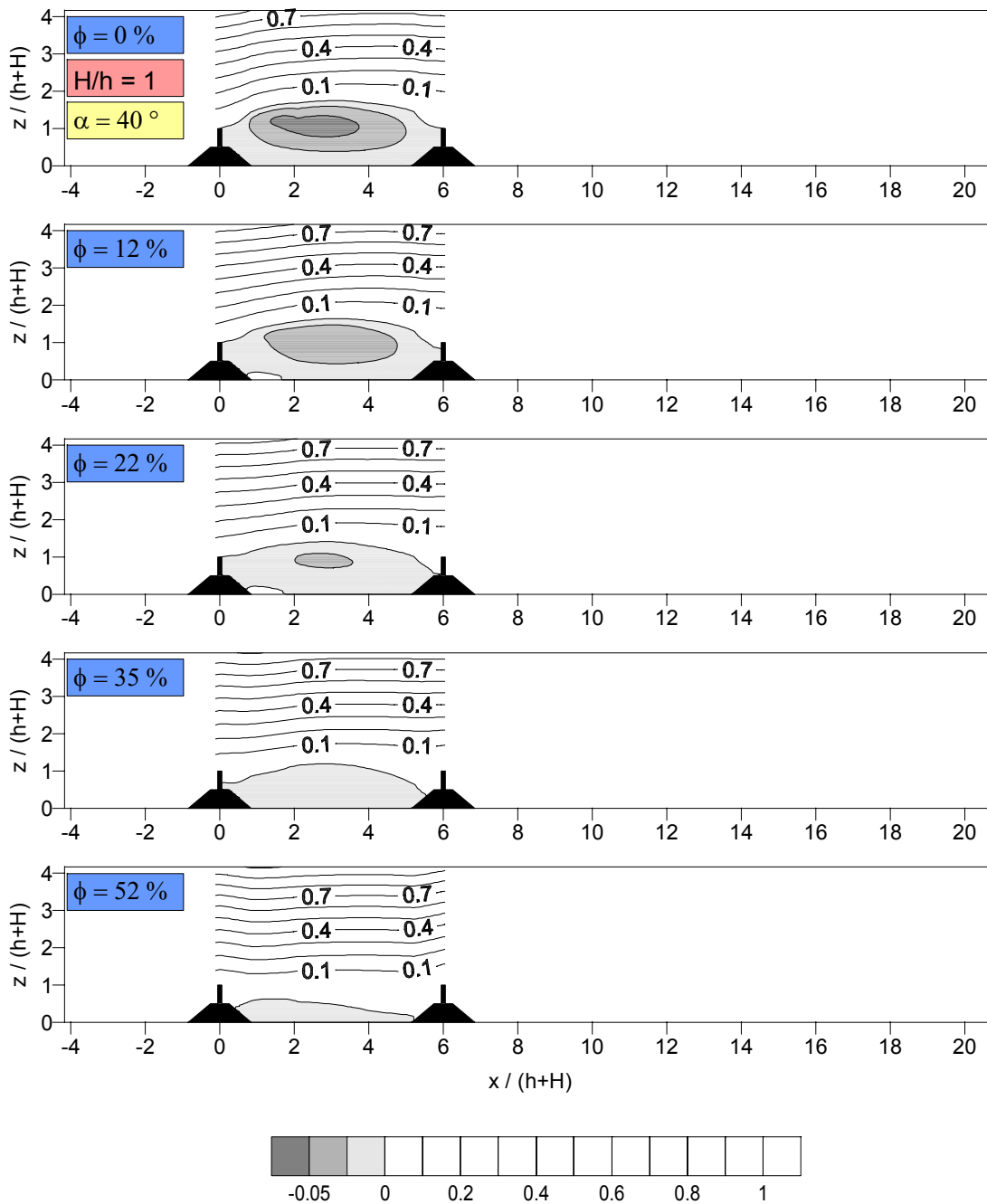


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 1:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ . (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)

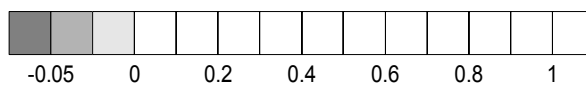
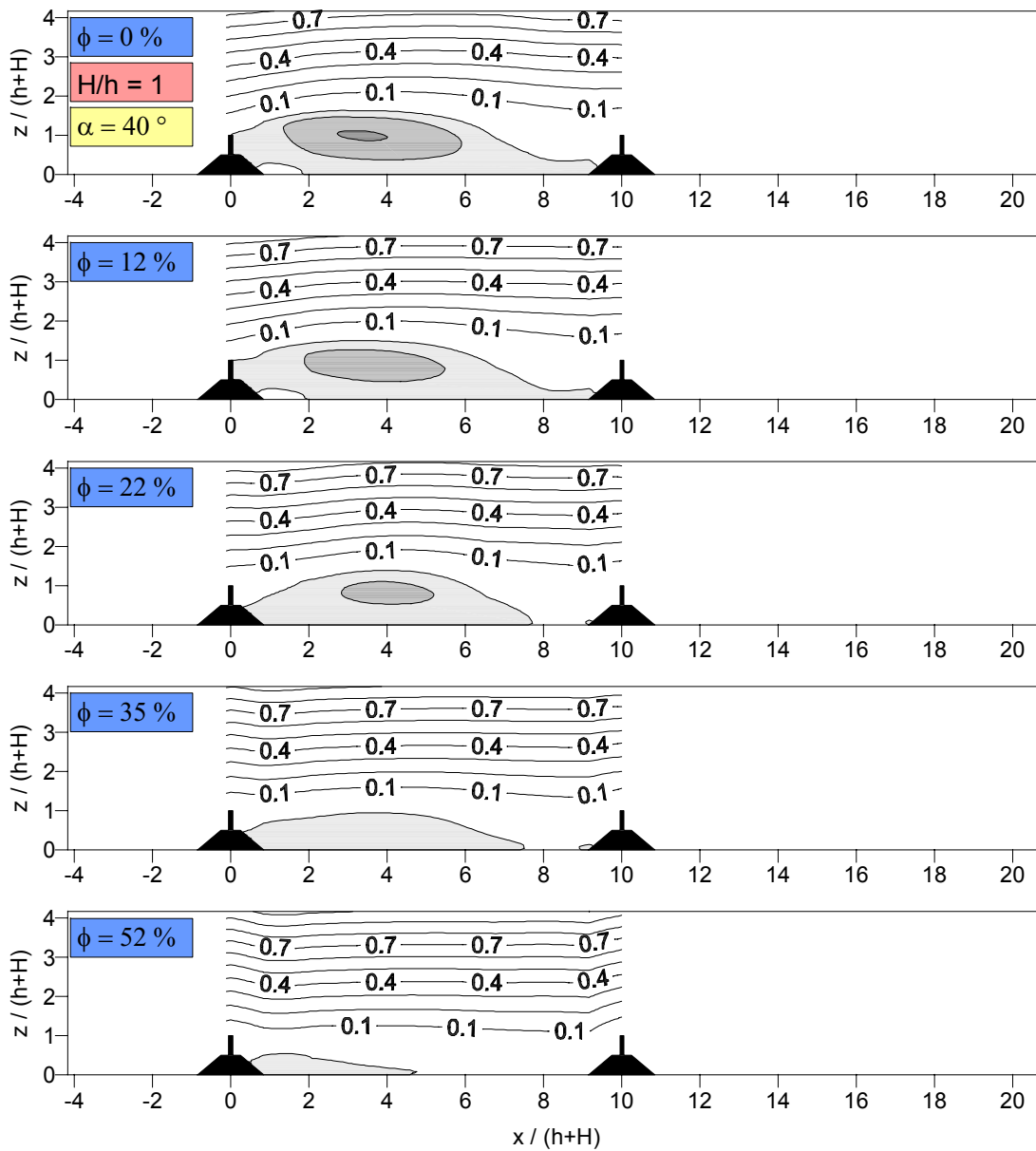


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 2:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .
 (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 6 \cdot (h+H)$)

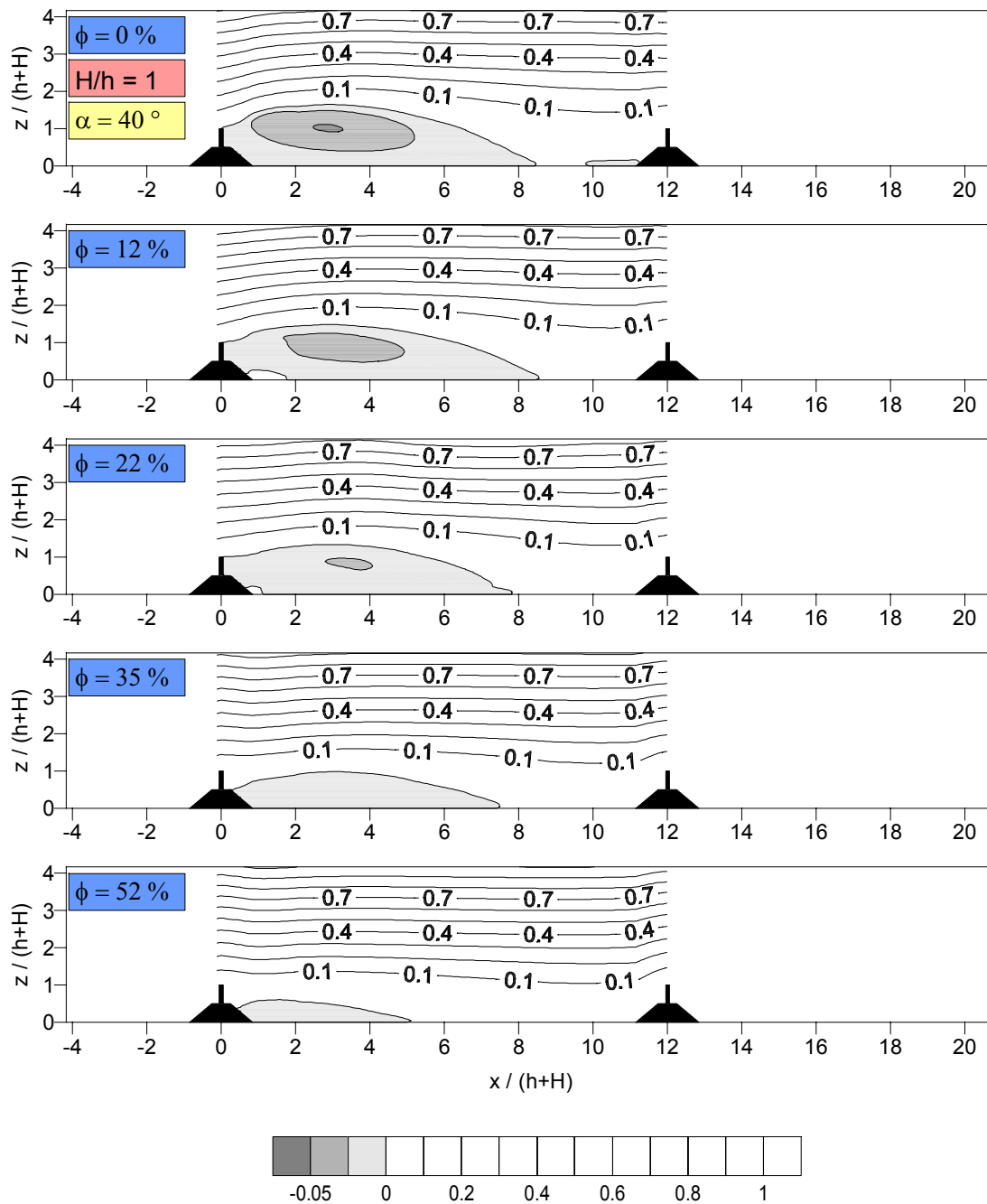


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 3:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .
 (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

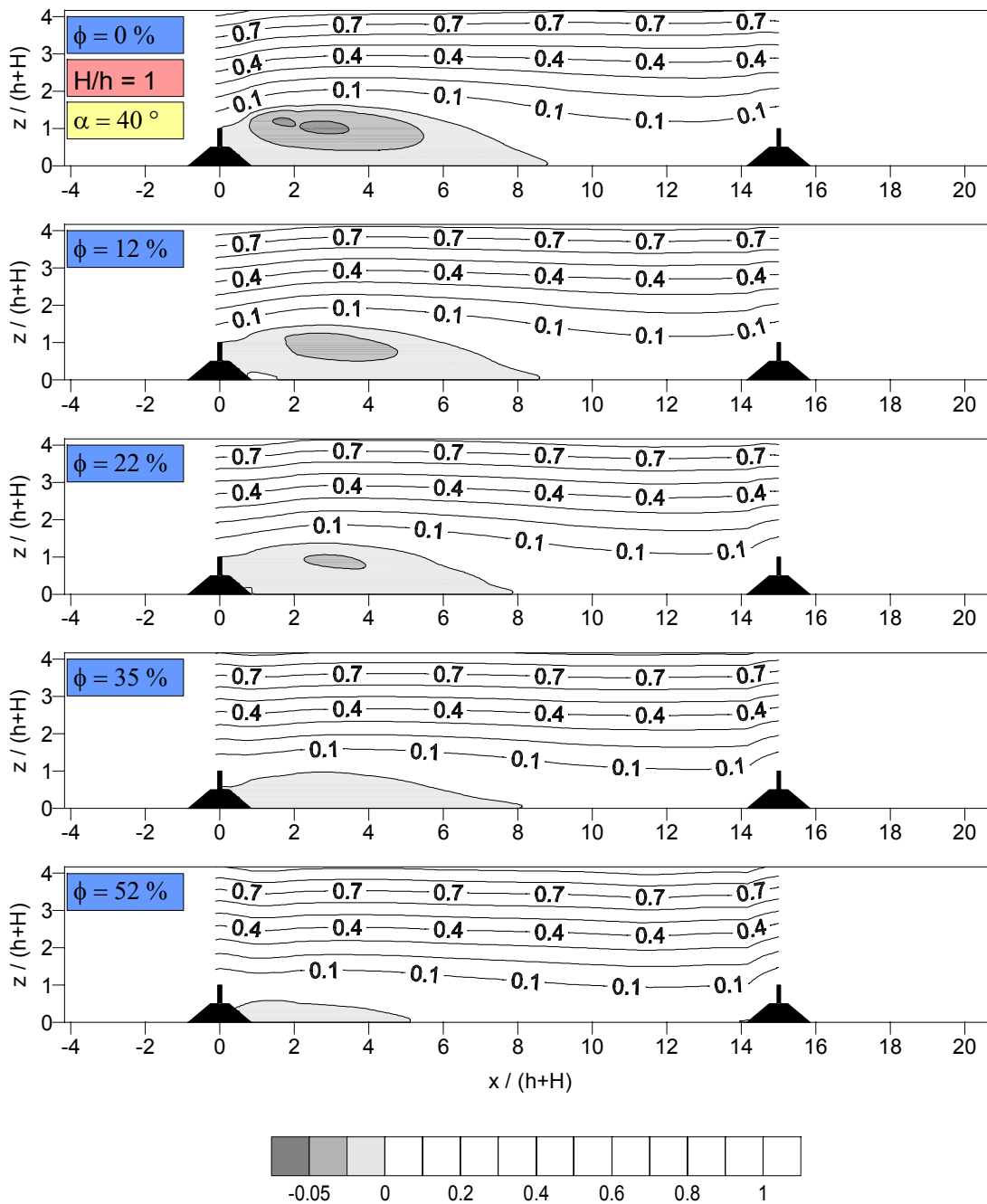


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 4:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .
 (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 12 \cdot (h+H)$)

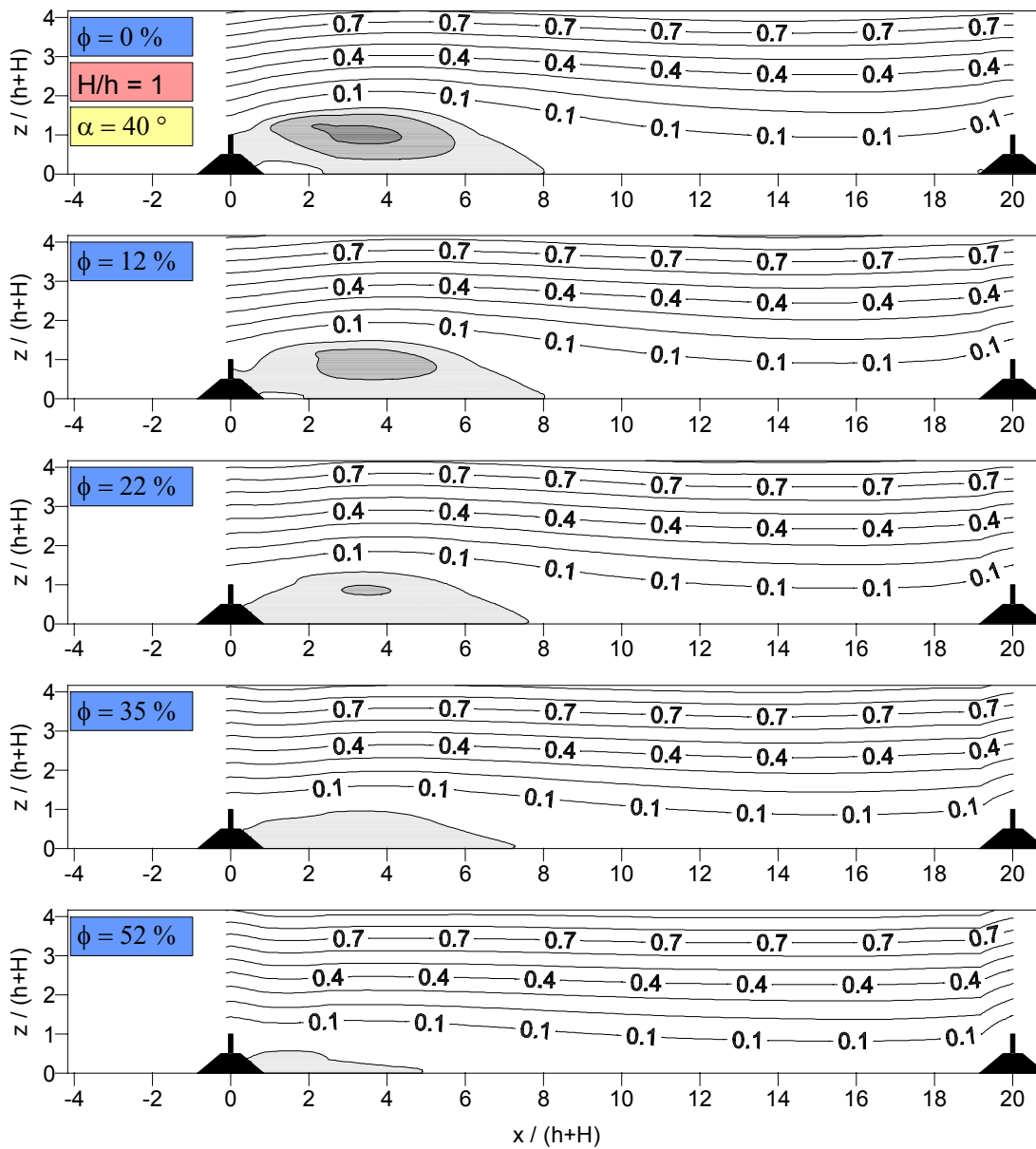


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 5:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .
 (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

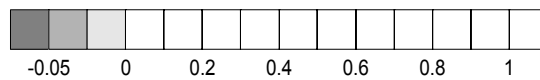
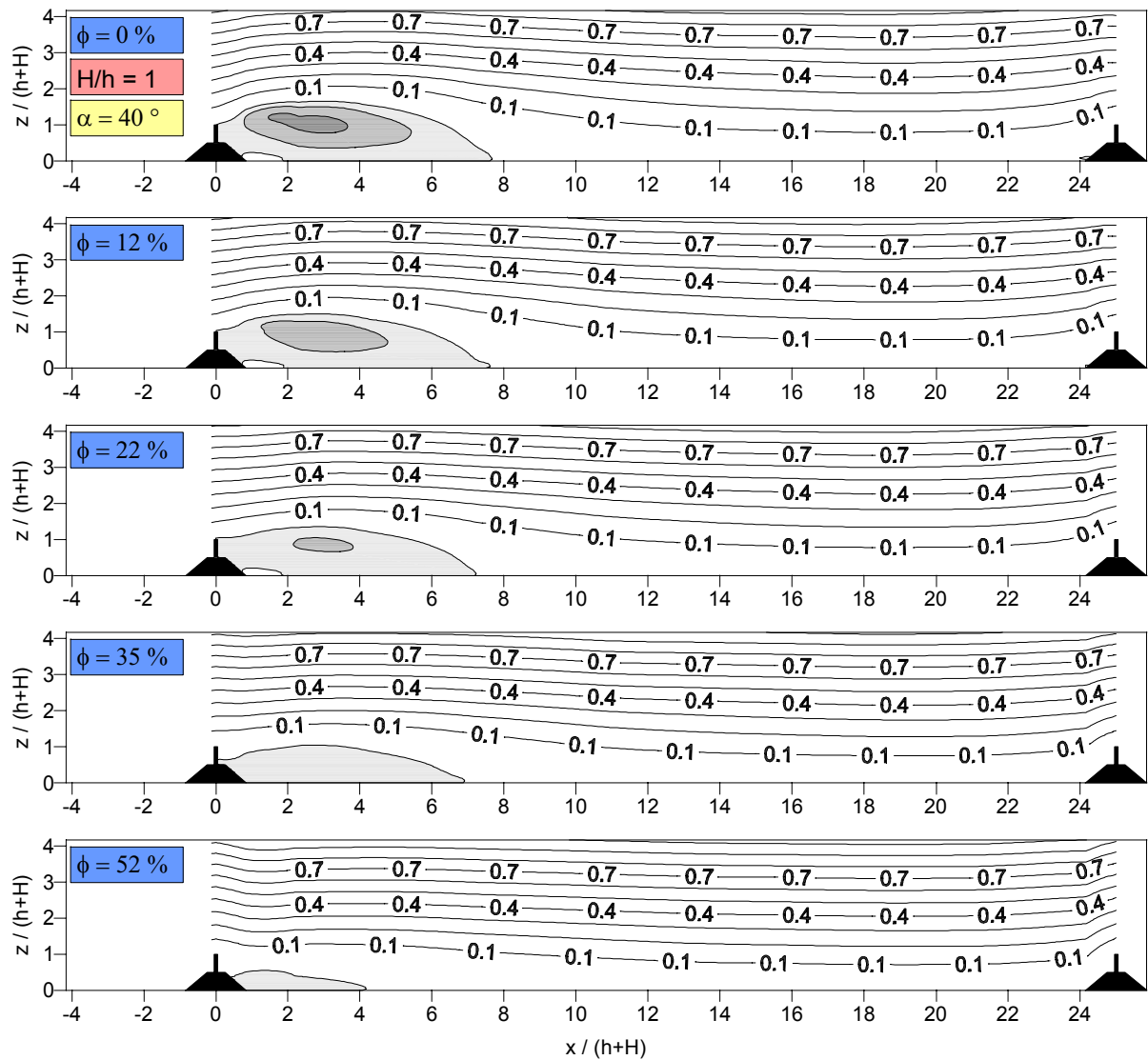


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 6:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .
(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)

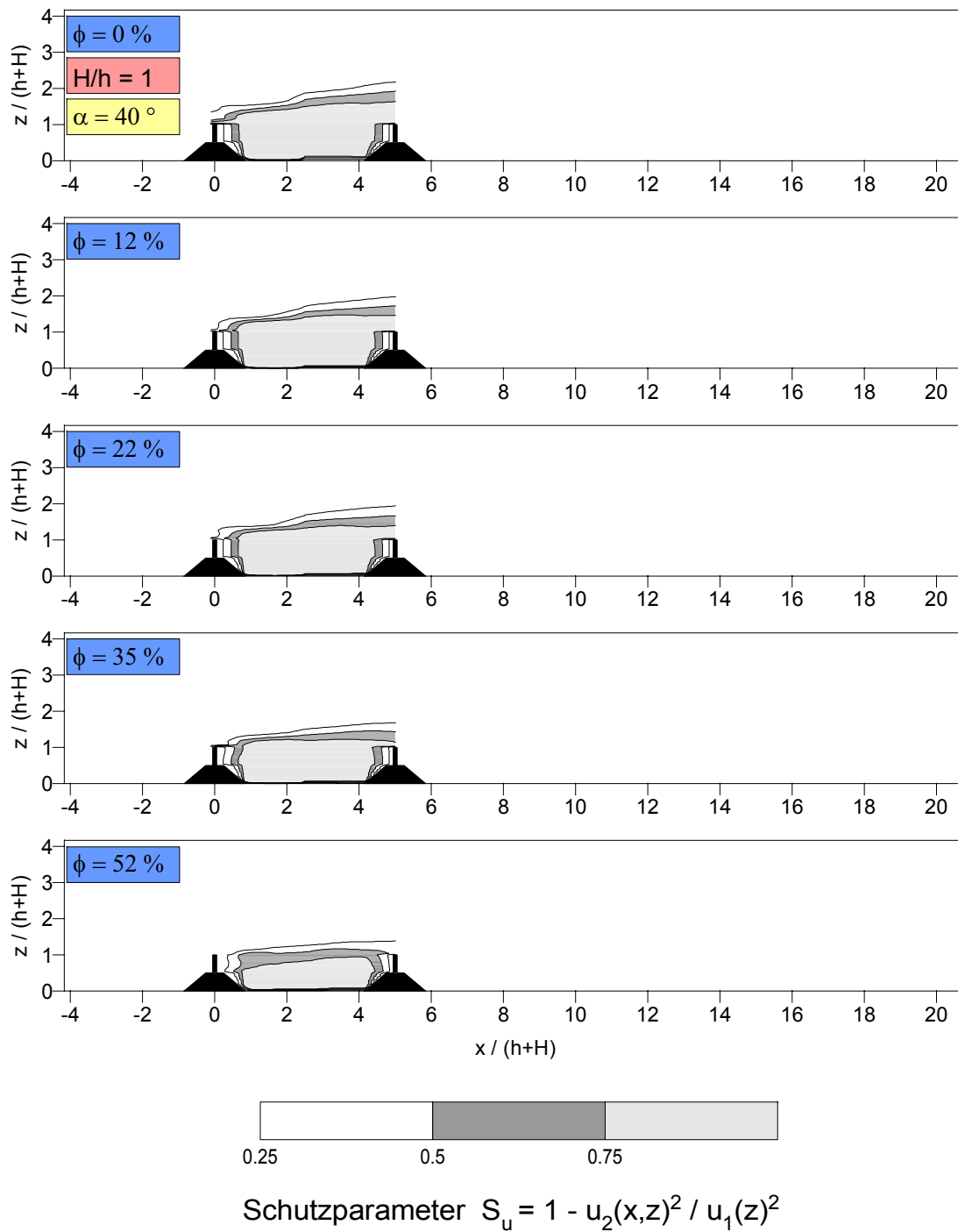


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

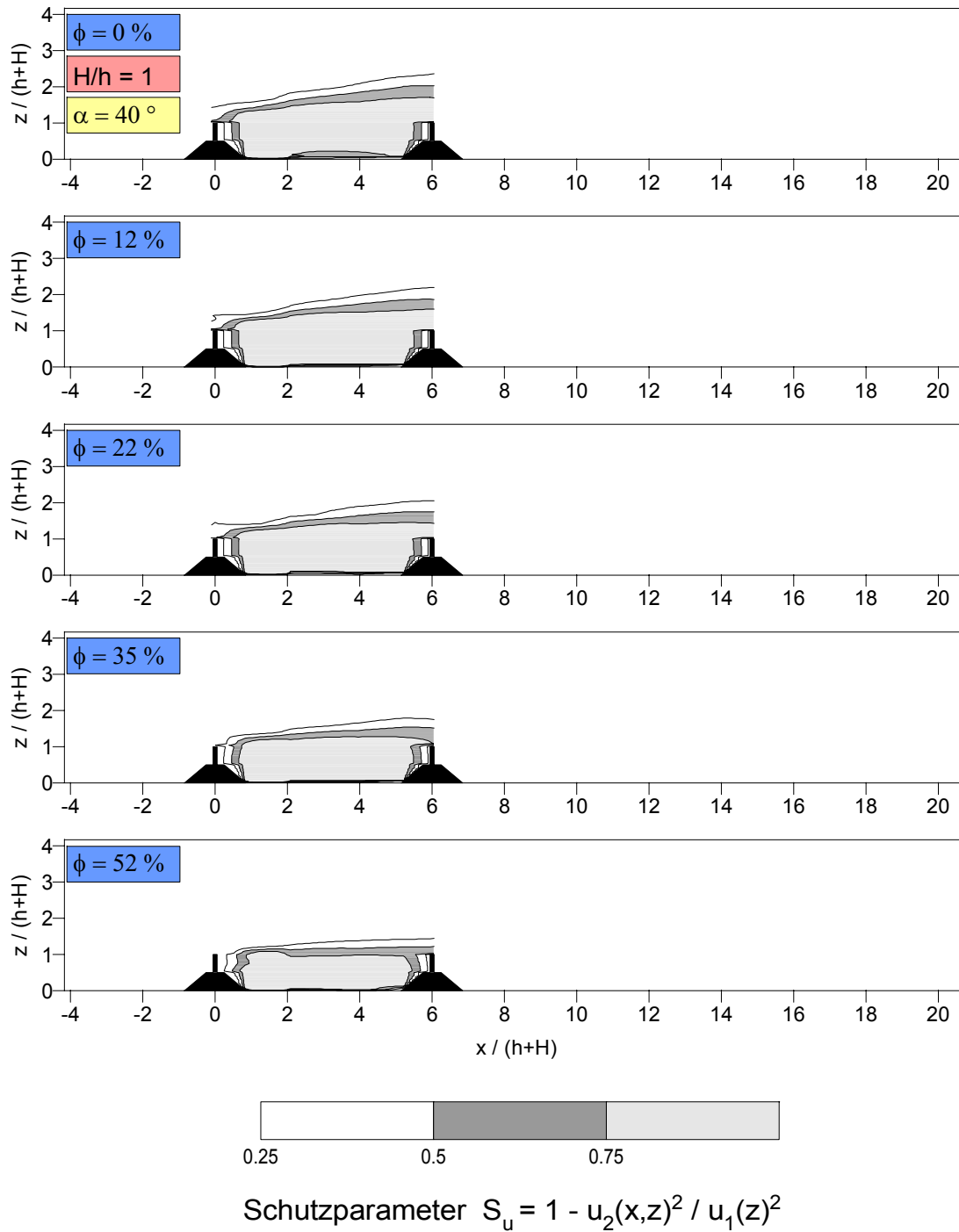
Anlage 7:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .
 (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 25 \cdot (h+H)$)

**Anlage 8:**

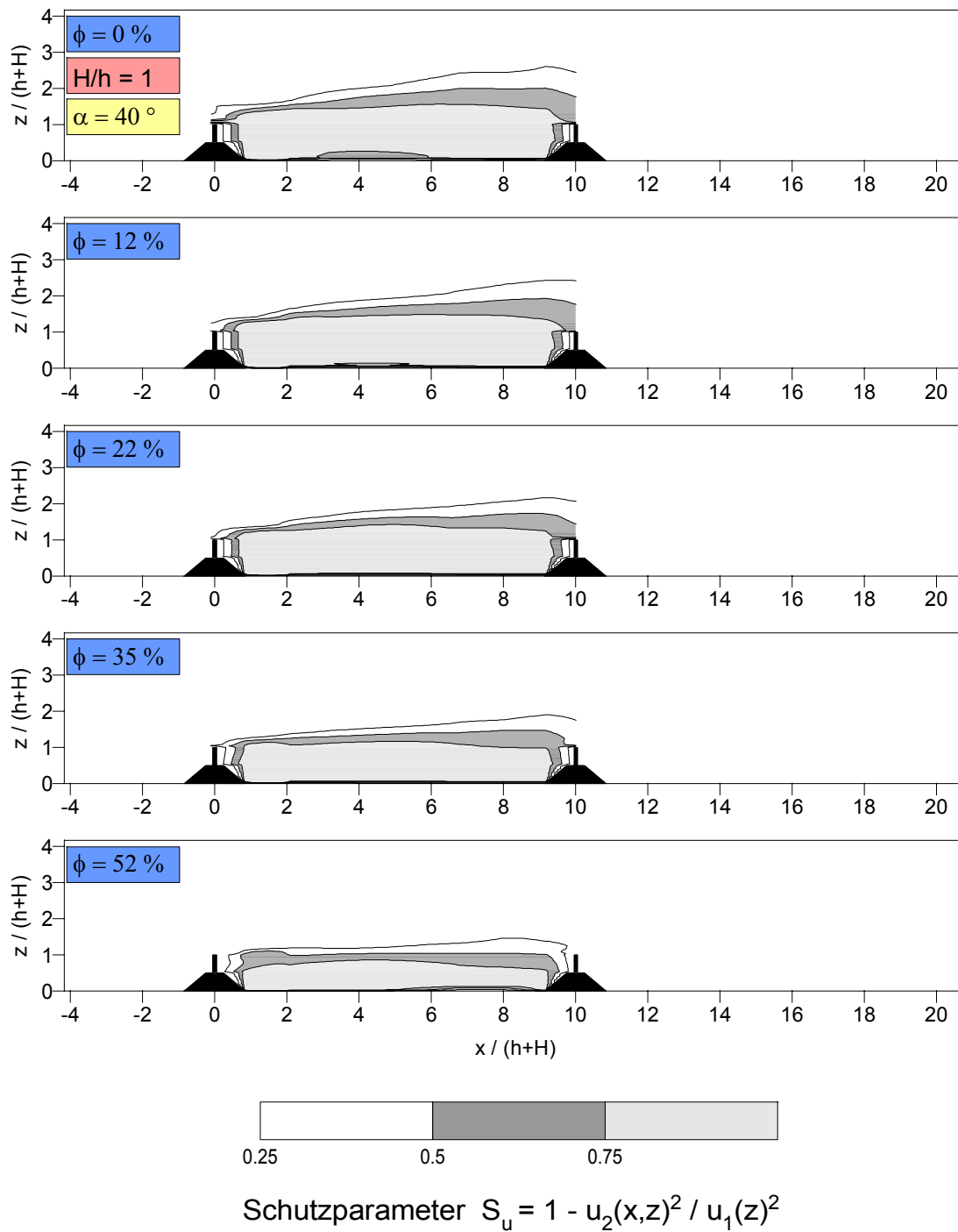
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)

**Anlage 9:**

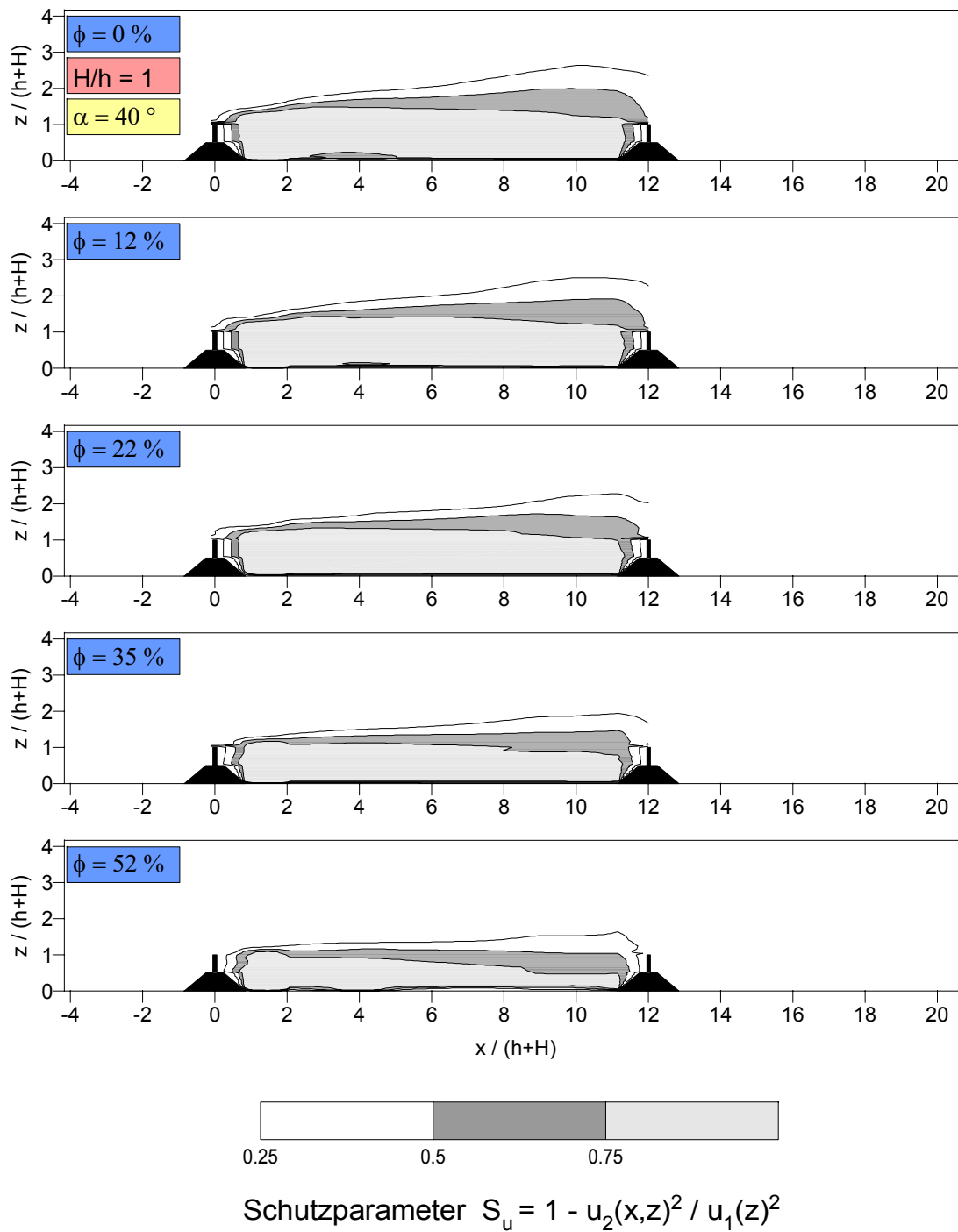
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 6 \cdot (h+H)$)

**Anlage 10:**

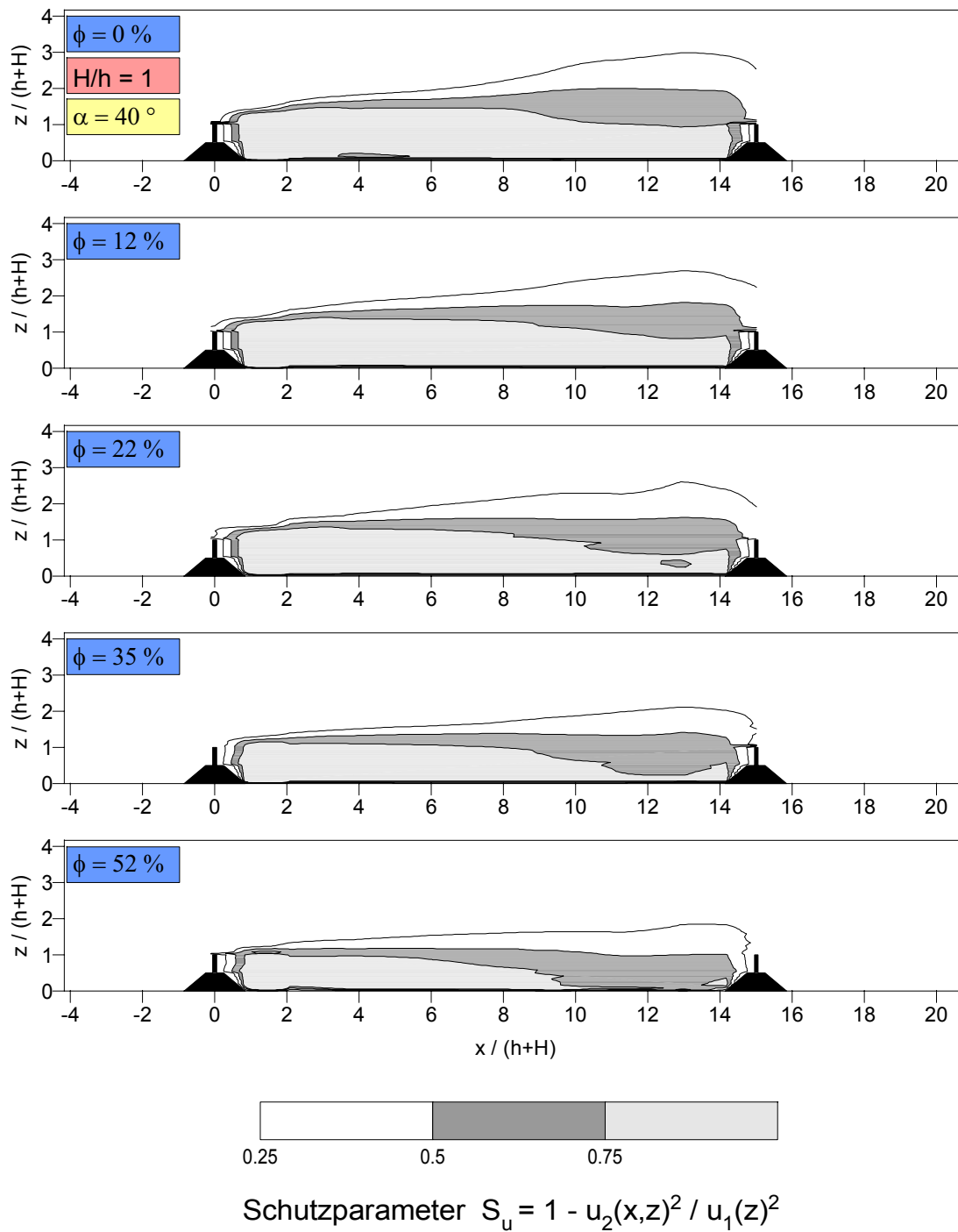
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

**Anlage 11:**

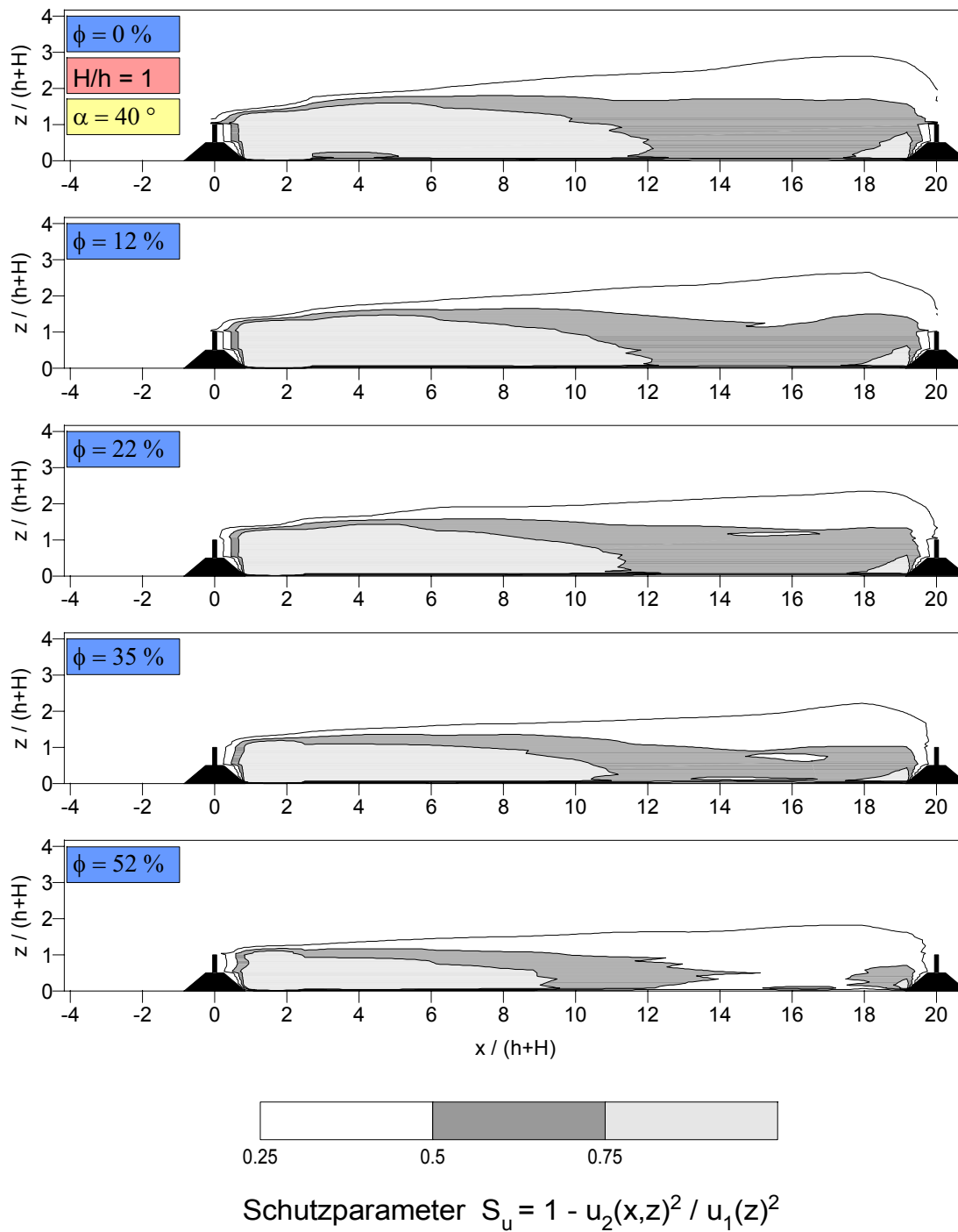
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 12 \cdot (h+H)$)

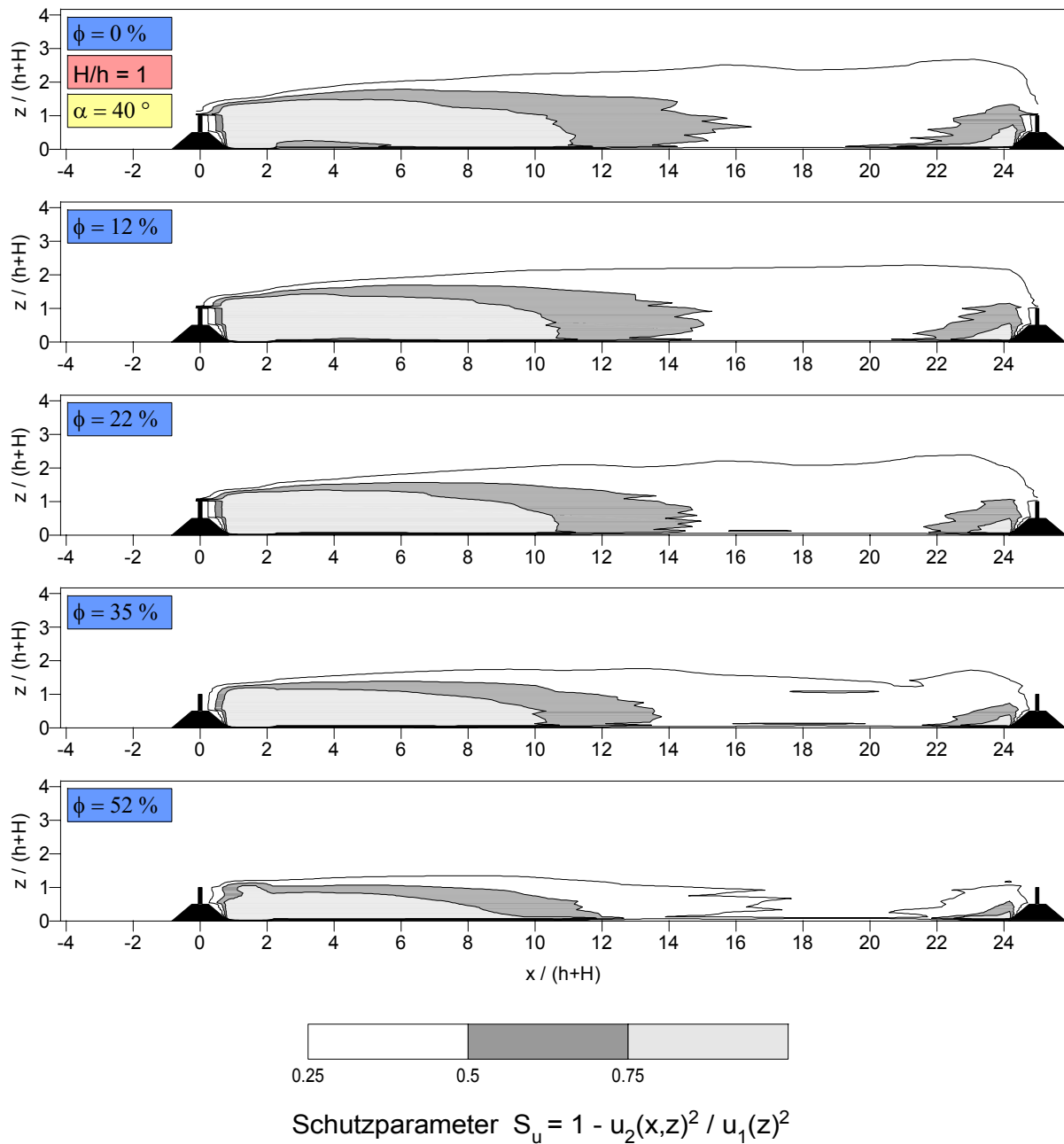
**Anlage 12:**

Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

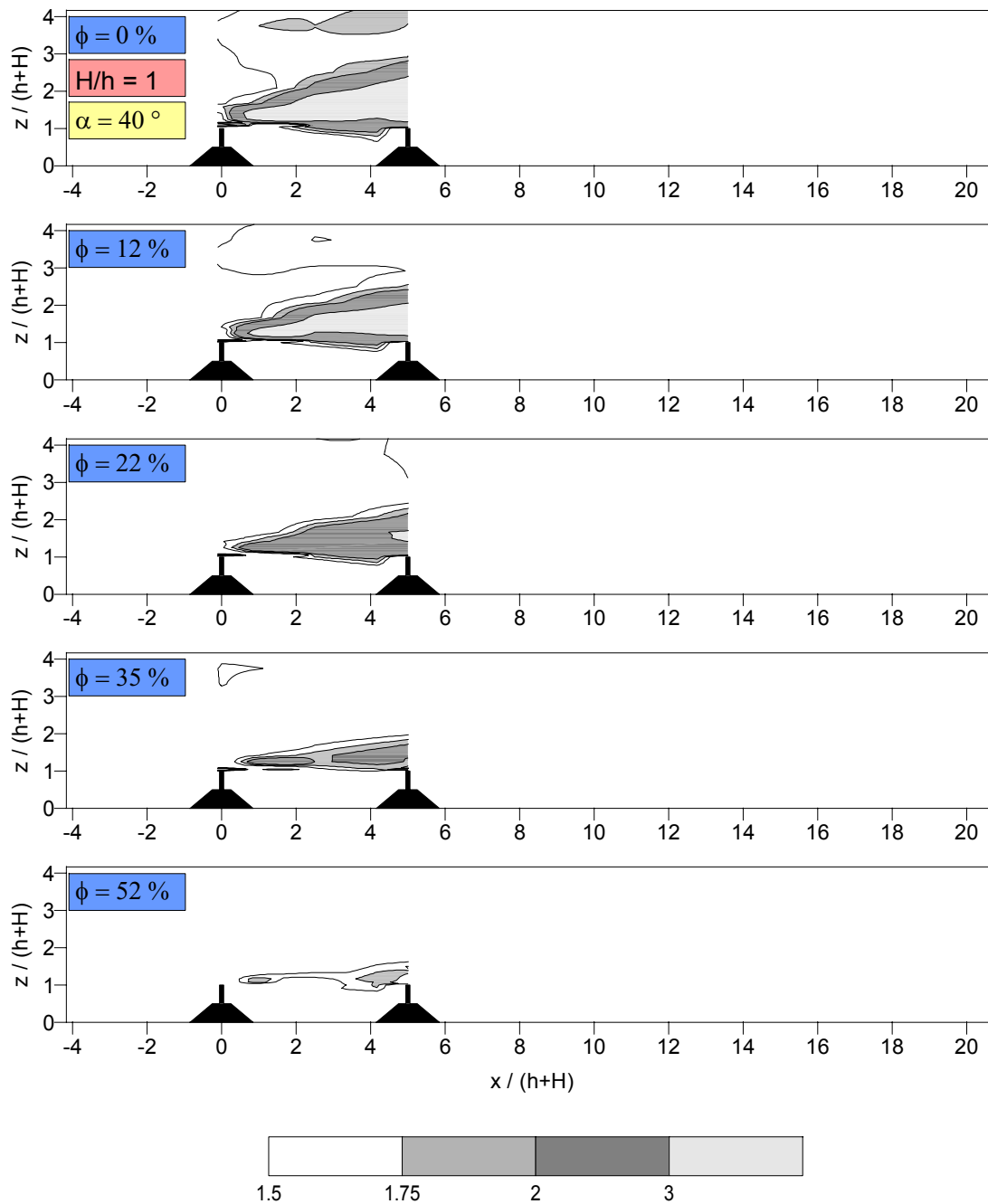
**Anlage 13:**

Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .
 (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)

**Anlage 14:**

Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 25 \cdot (h+H)$)



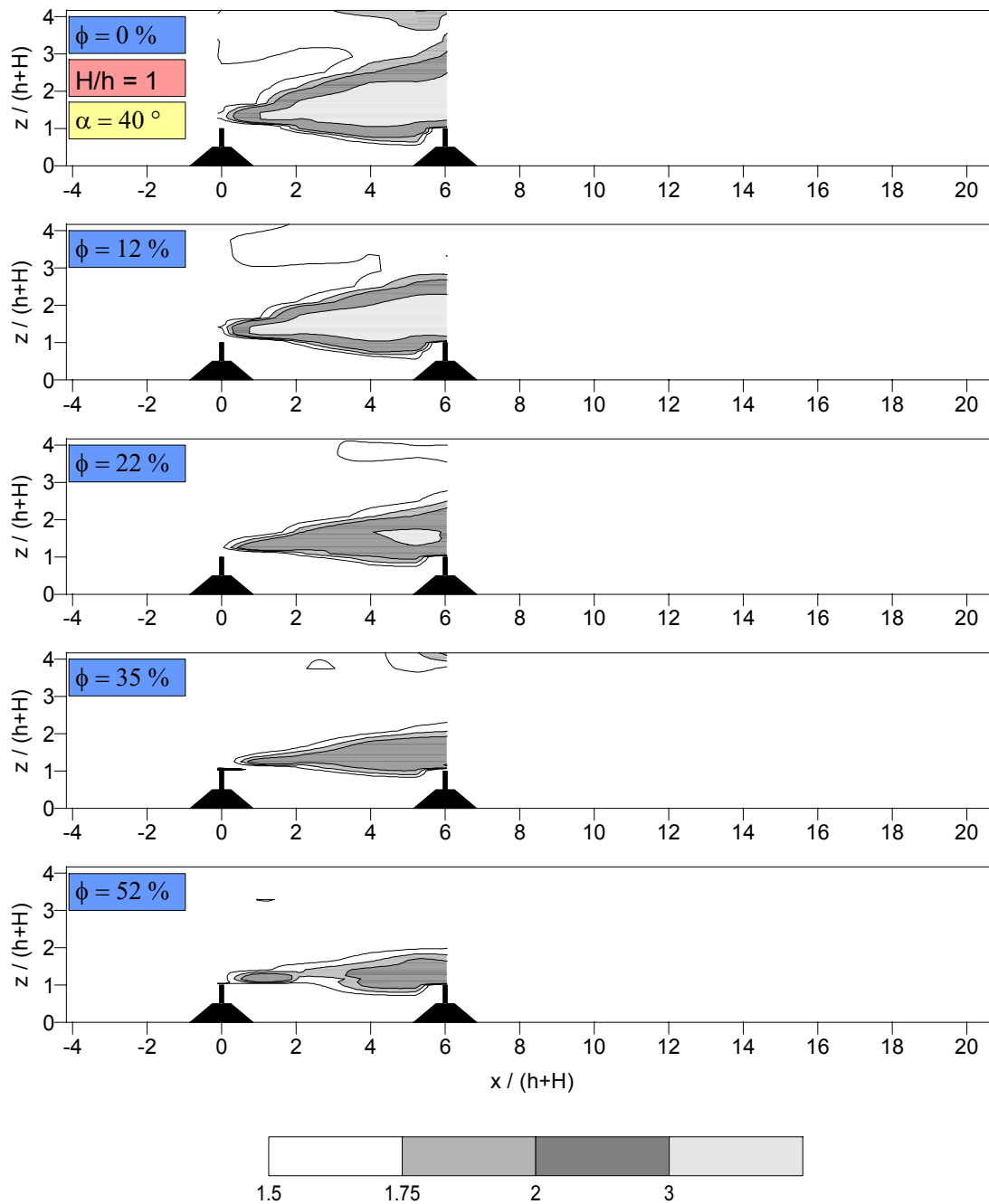
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 15:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)



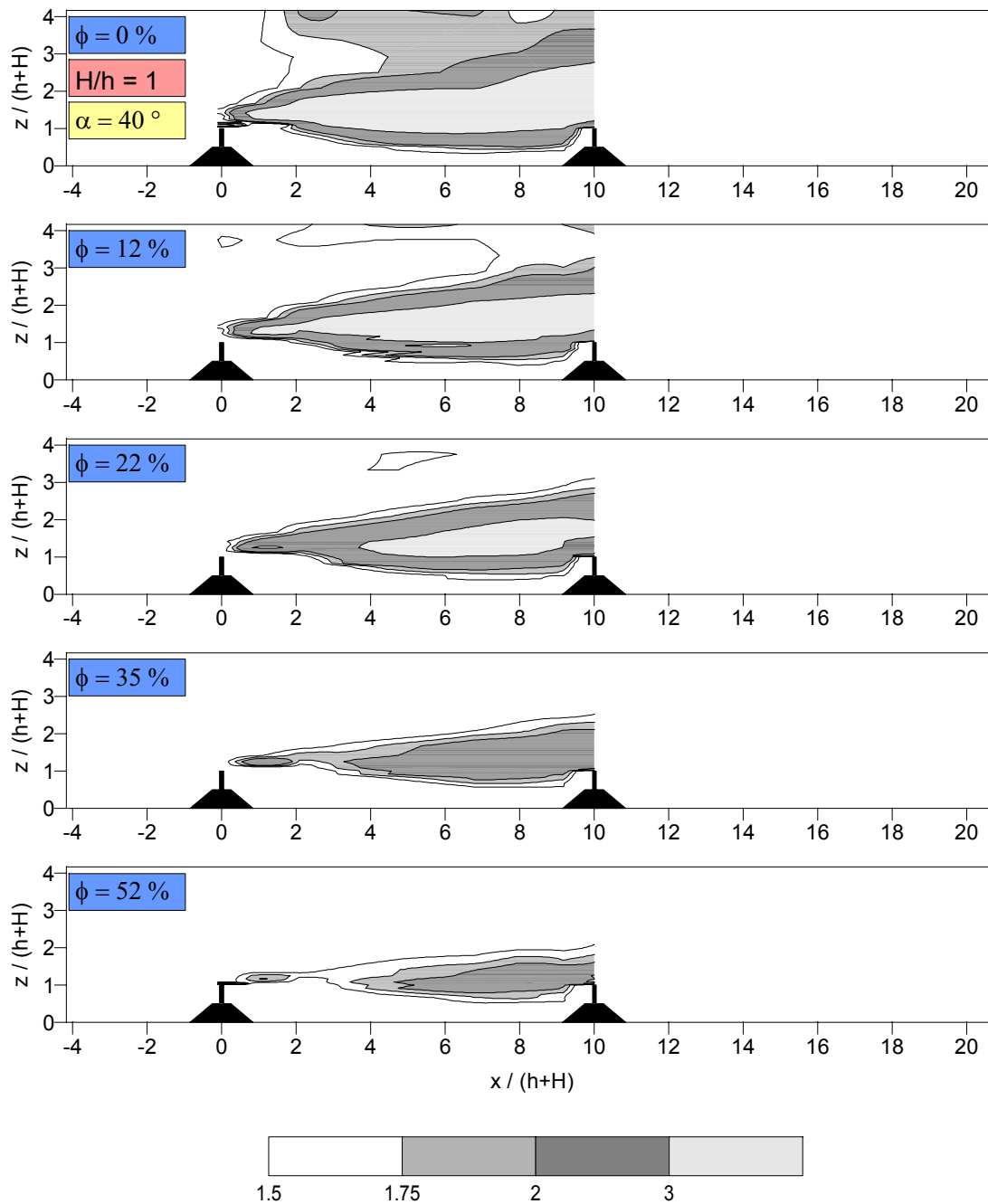
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 16:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 6 \cdot (h+H)$)



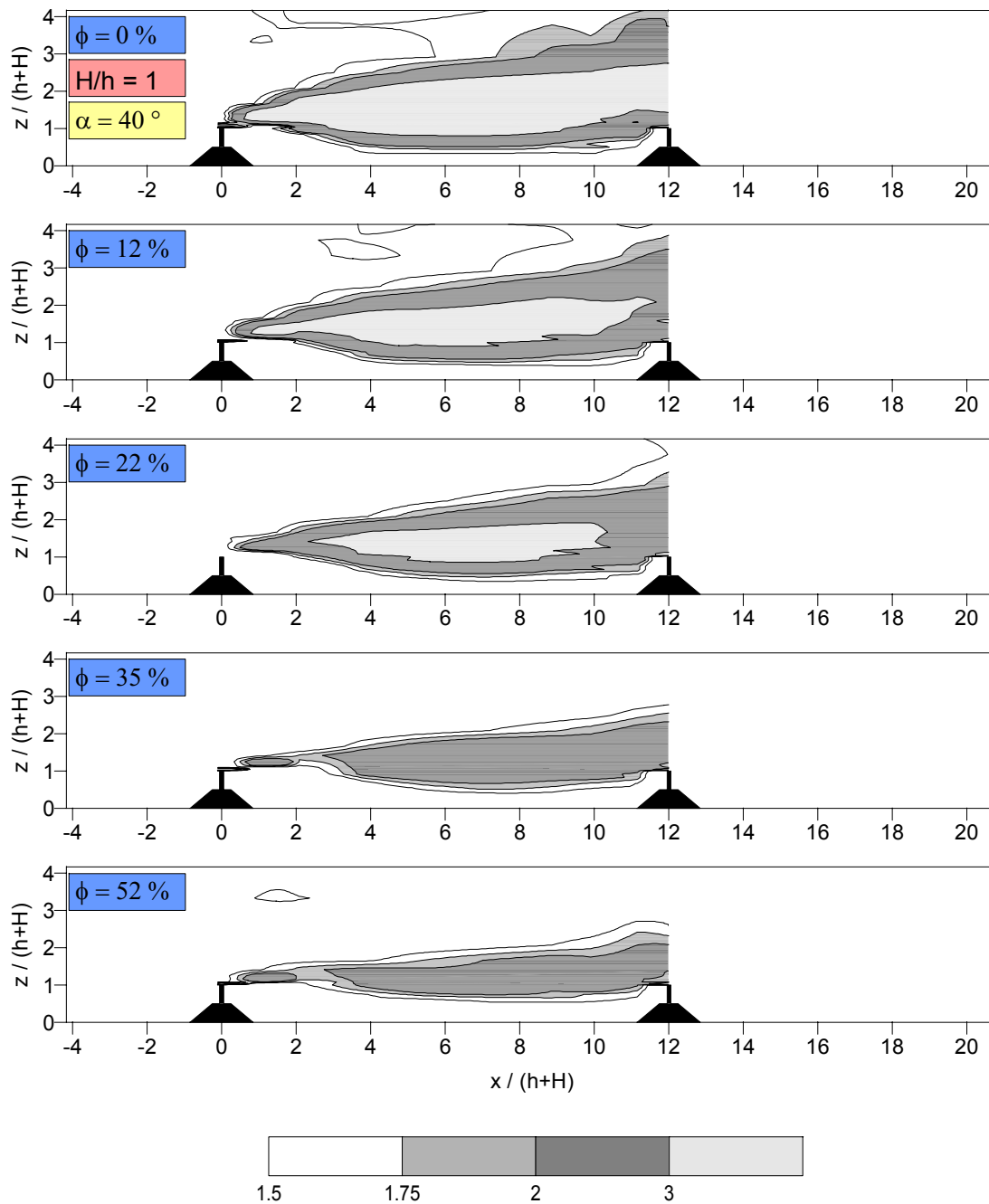
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 17:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)



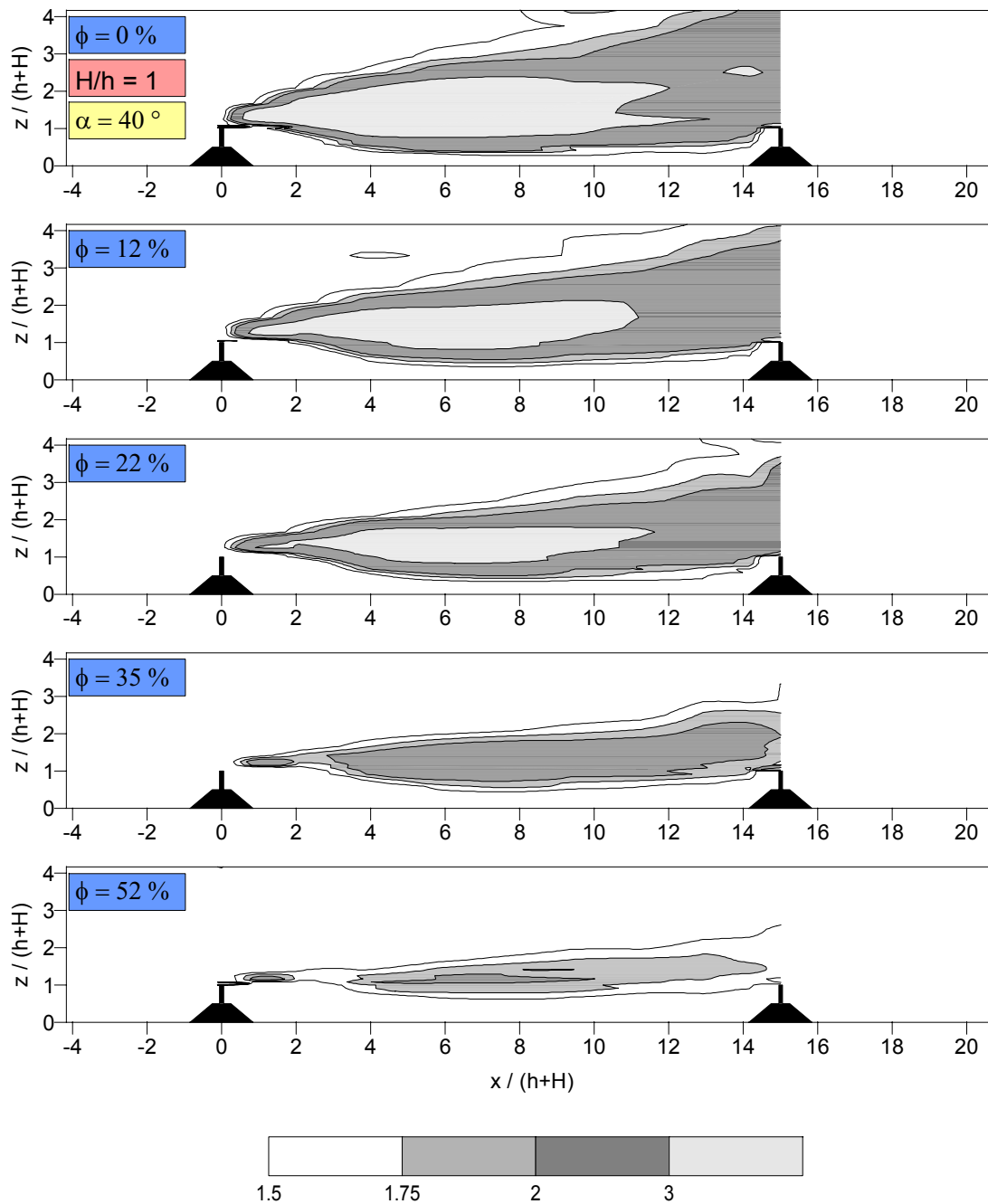
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 18:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 12 \cdot (h+H)$)



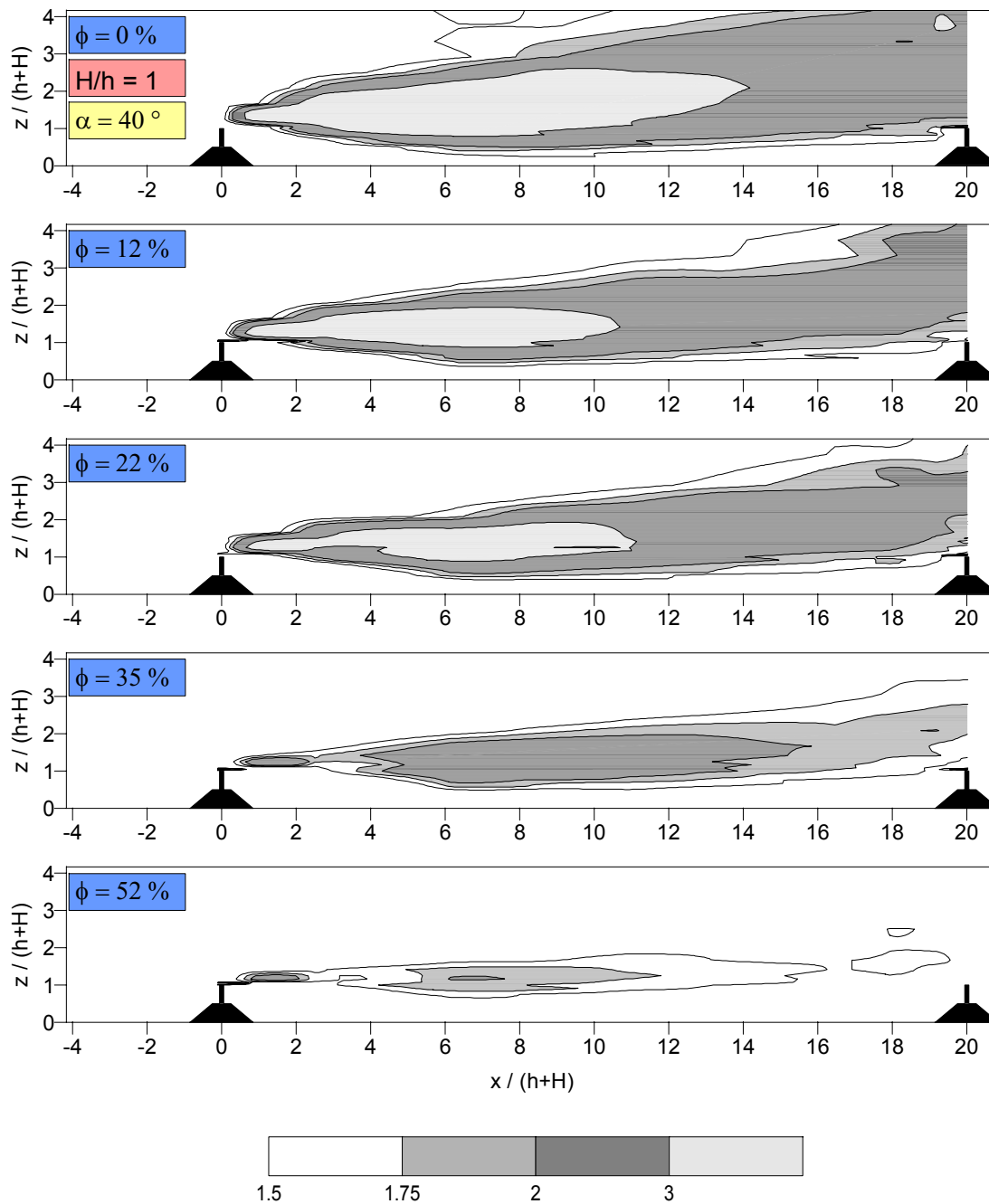
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 19:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)



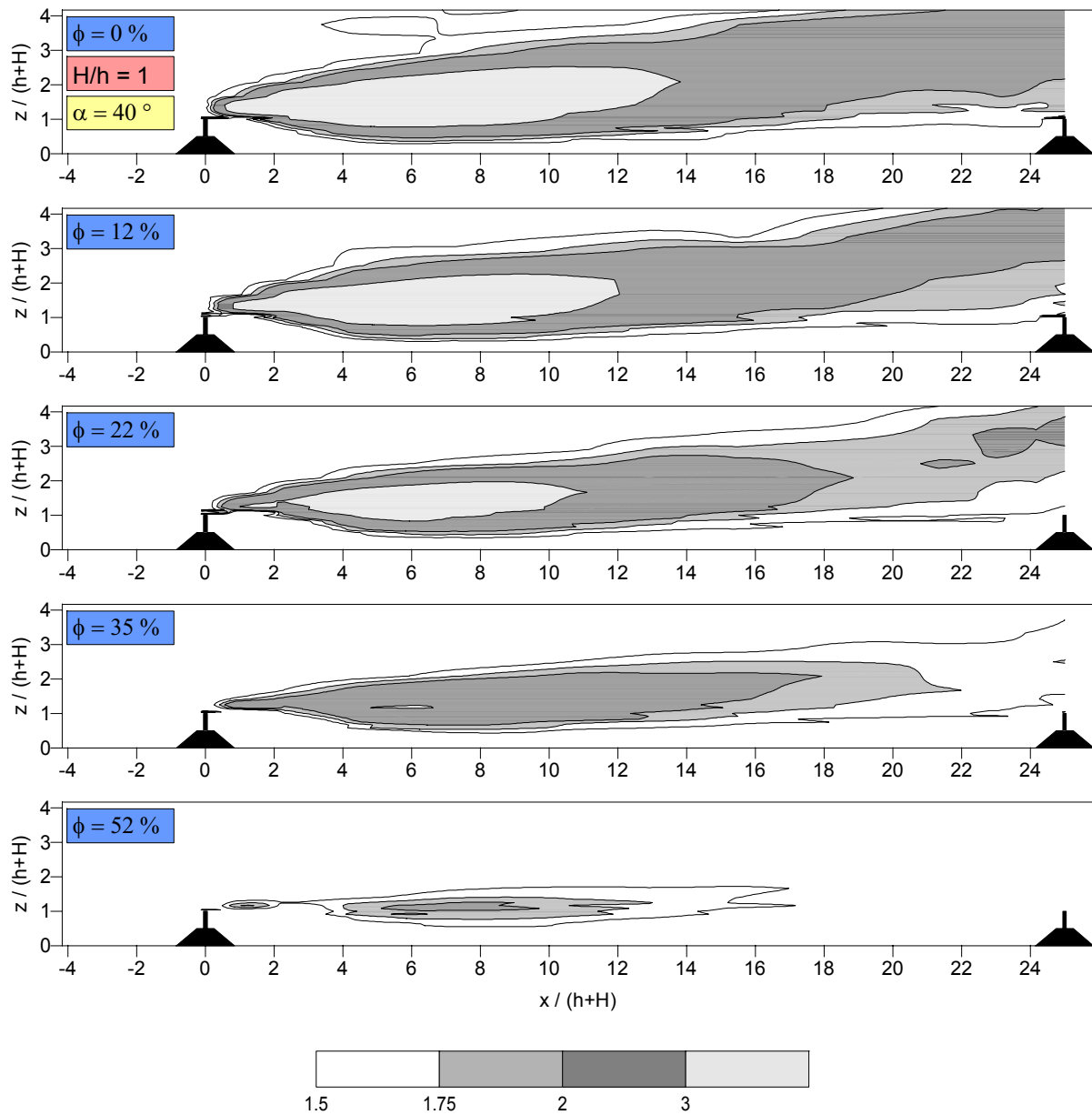
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 20:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)



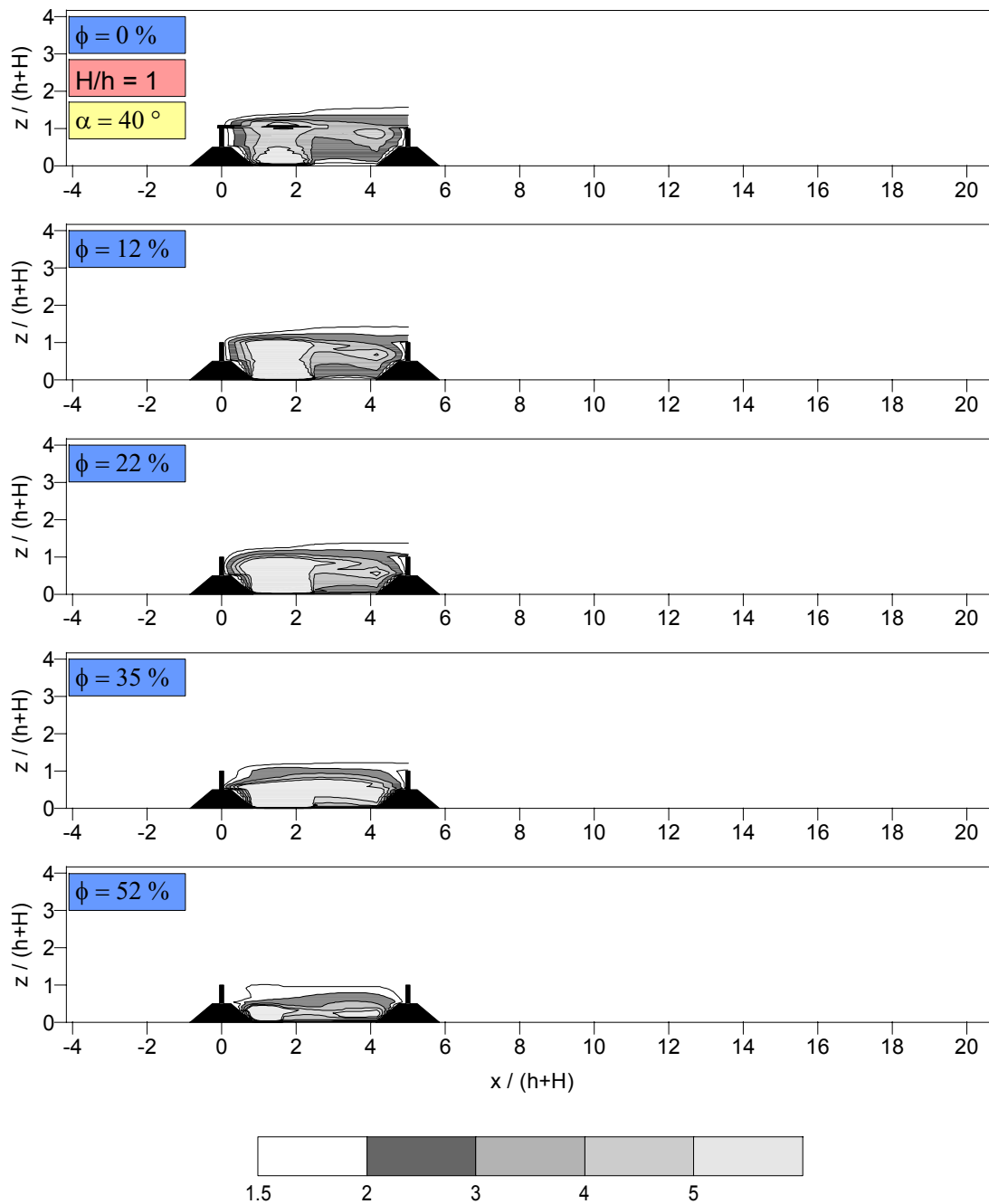
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 21:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 25 \cdot (h+H)$)

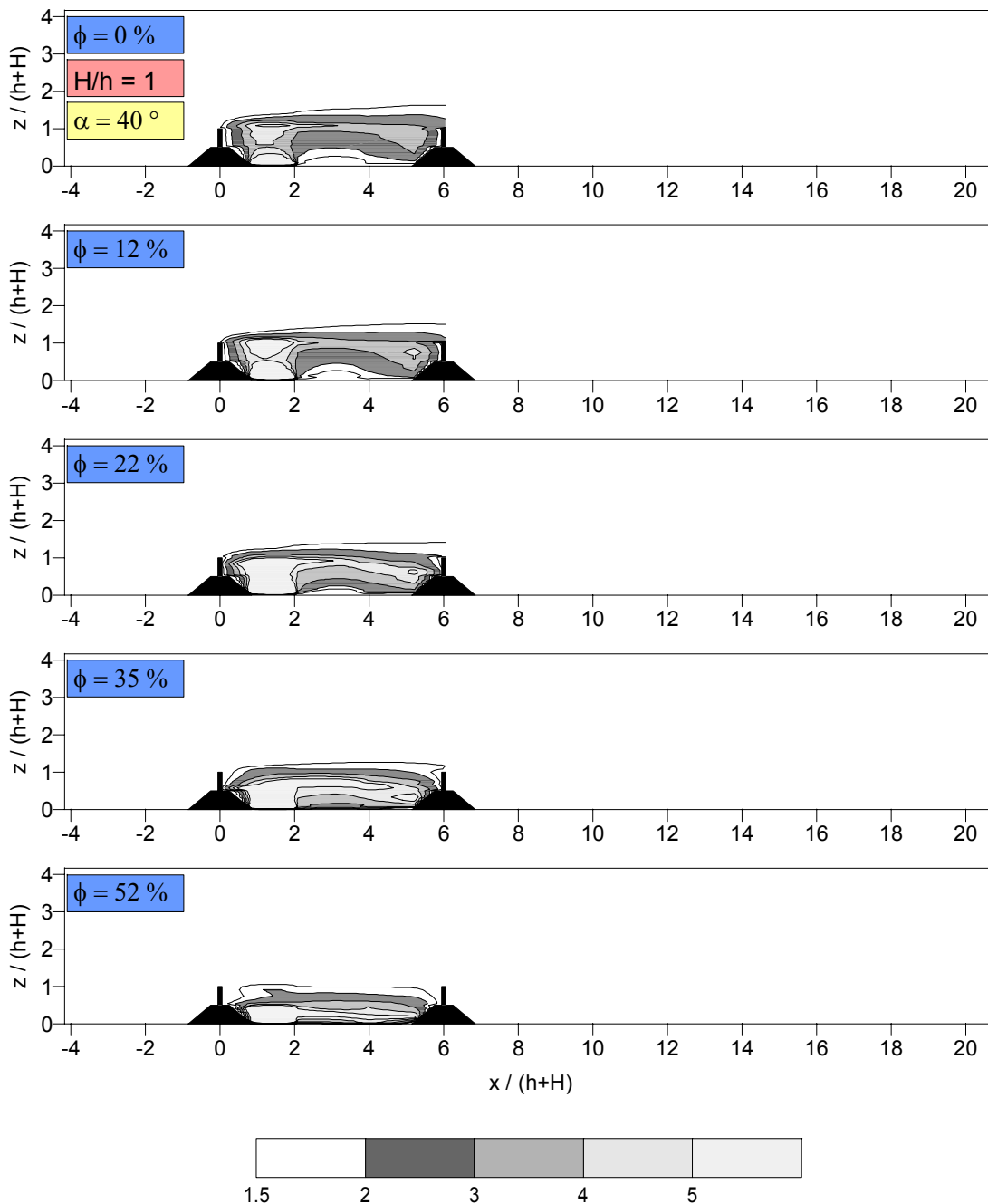


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 22:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)

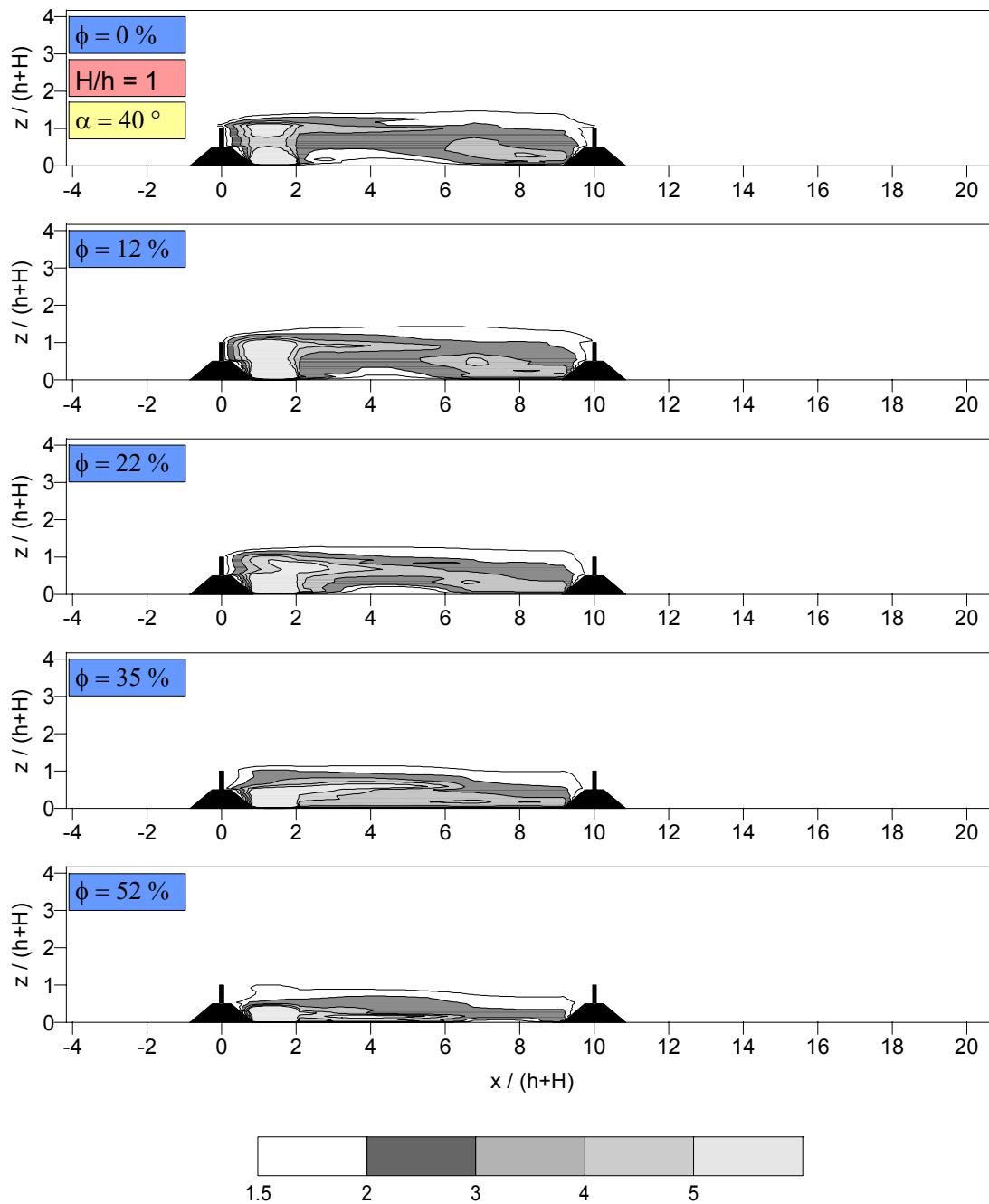


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 23:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 6 \cdot (h+H)$)

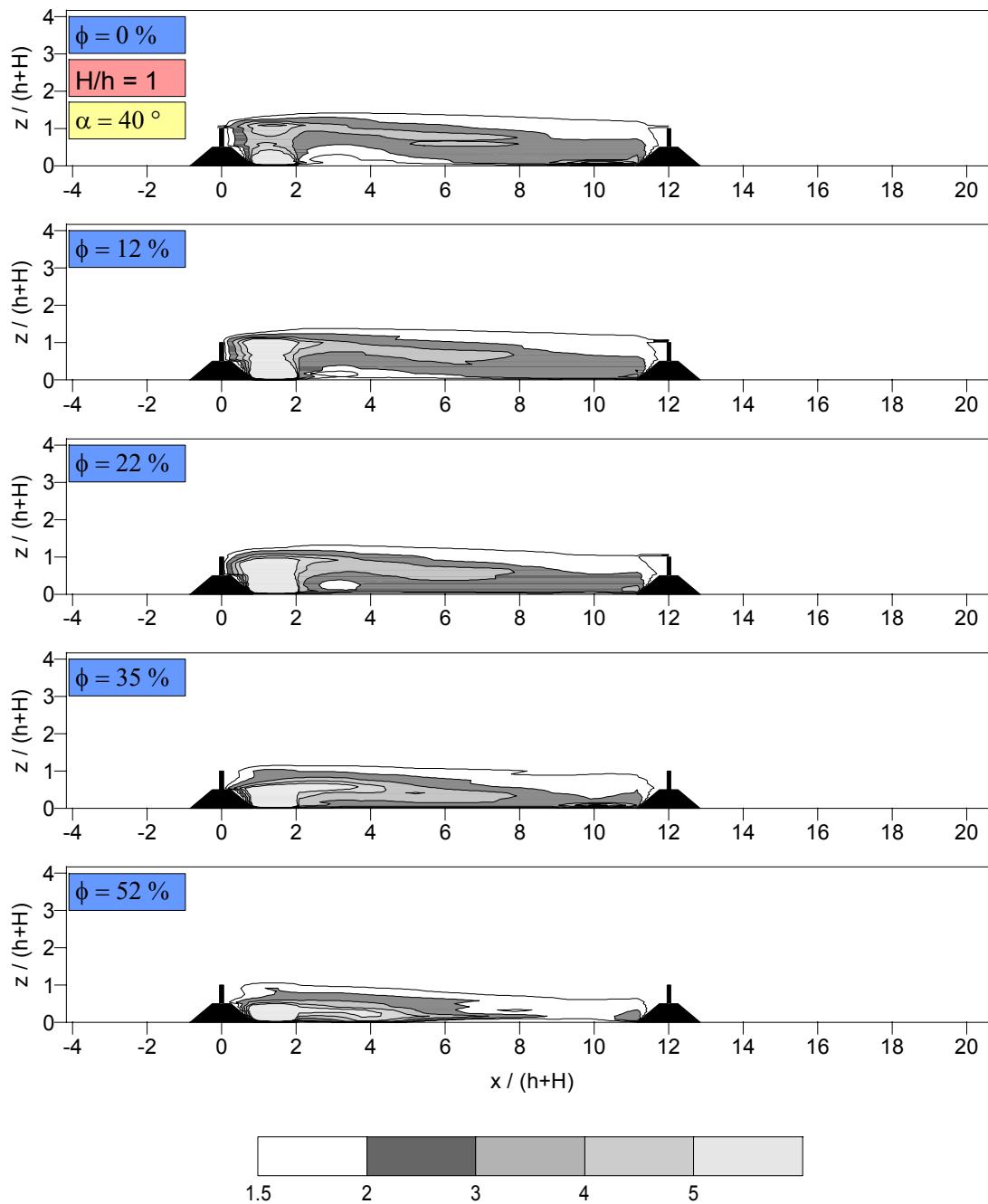


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 24:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

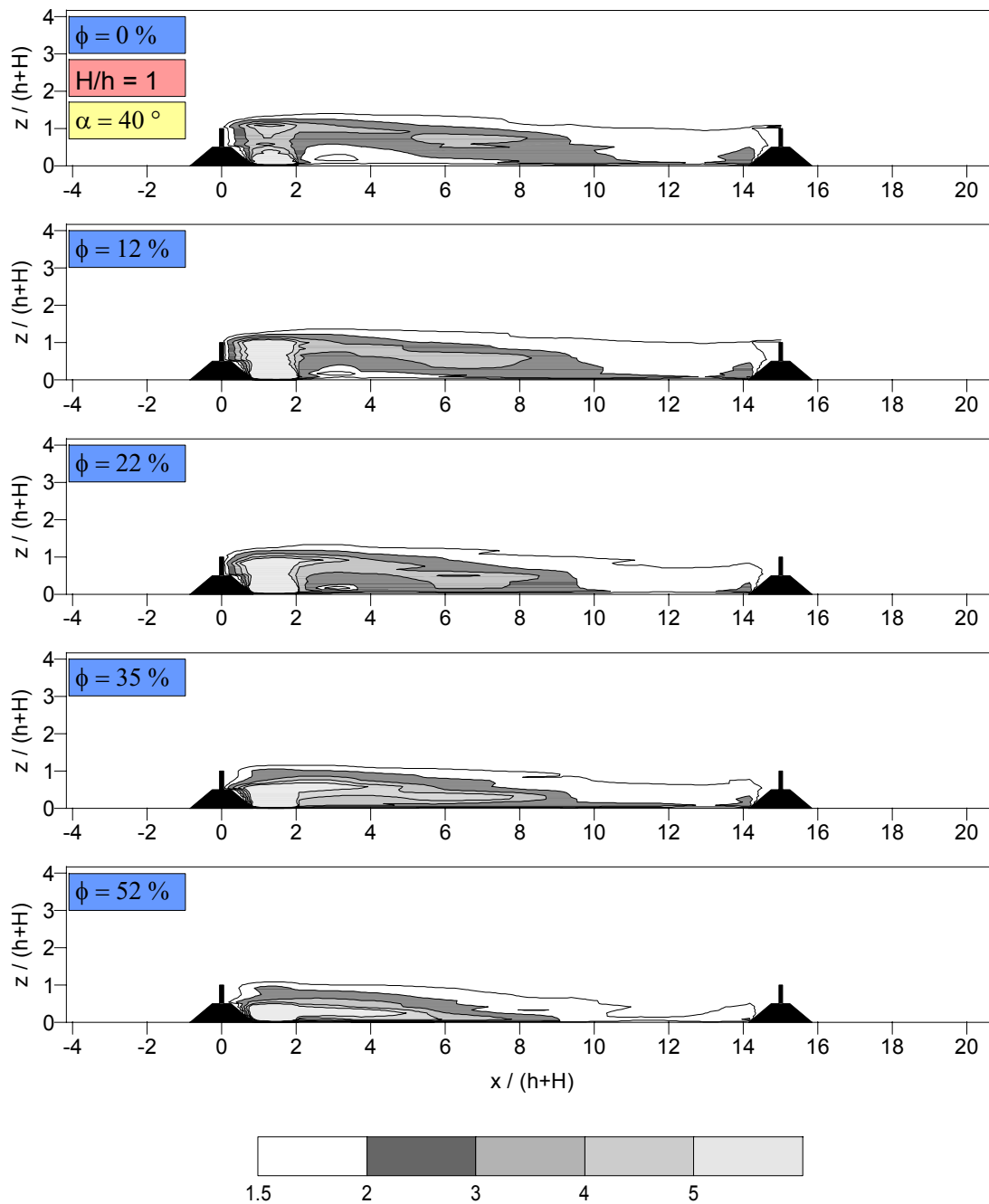


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 25:

Isolinen des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 12 \cdot (h+H)$)

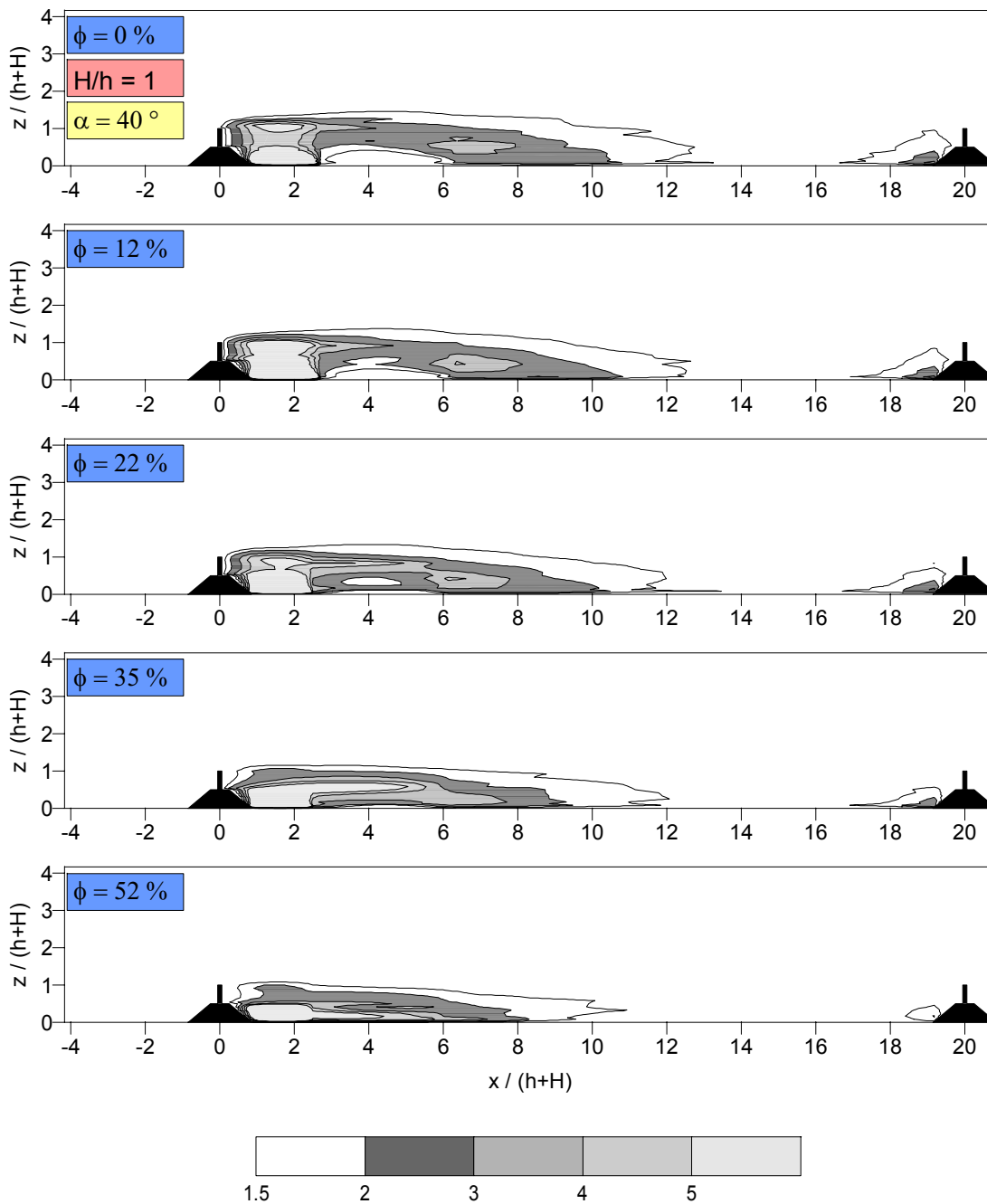


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 26:

Isolinen des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

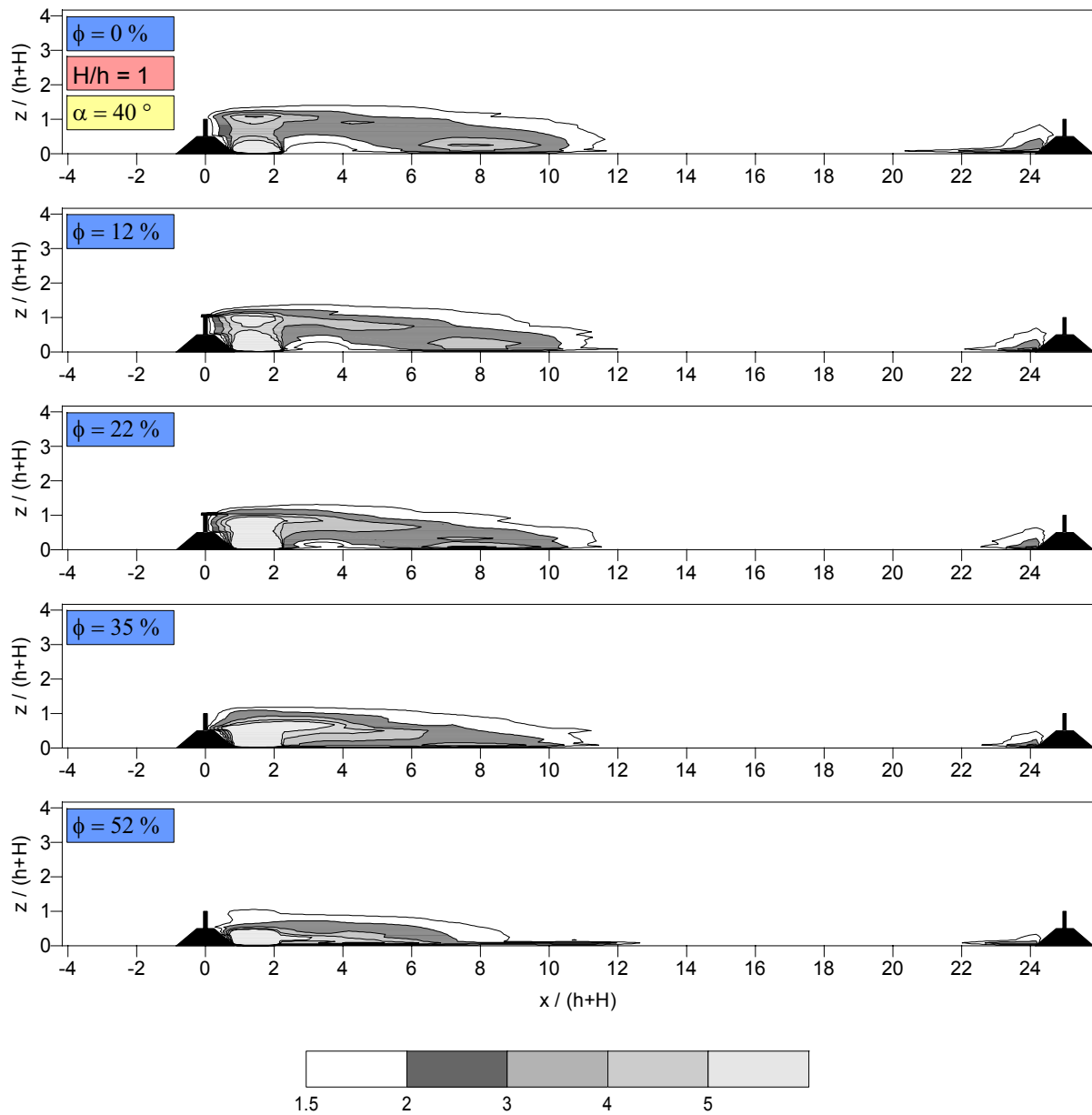


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 27:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)



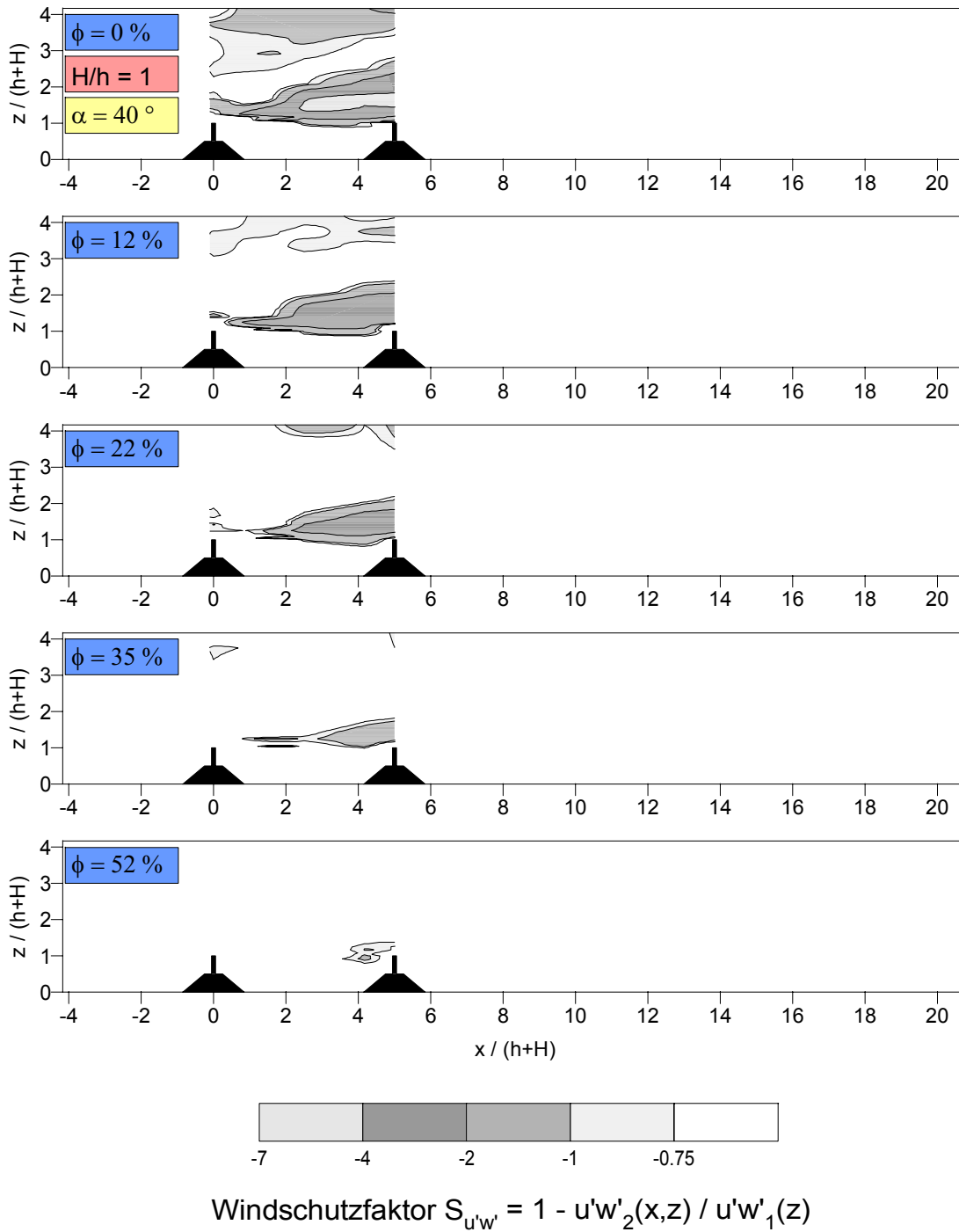
Windschutzparameter nach Gandemer

$$f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$$

Anlage 28:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

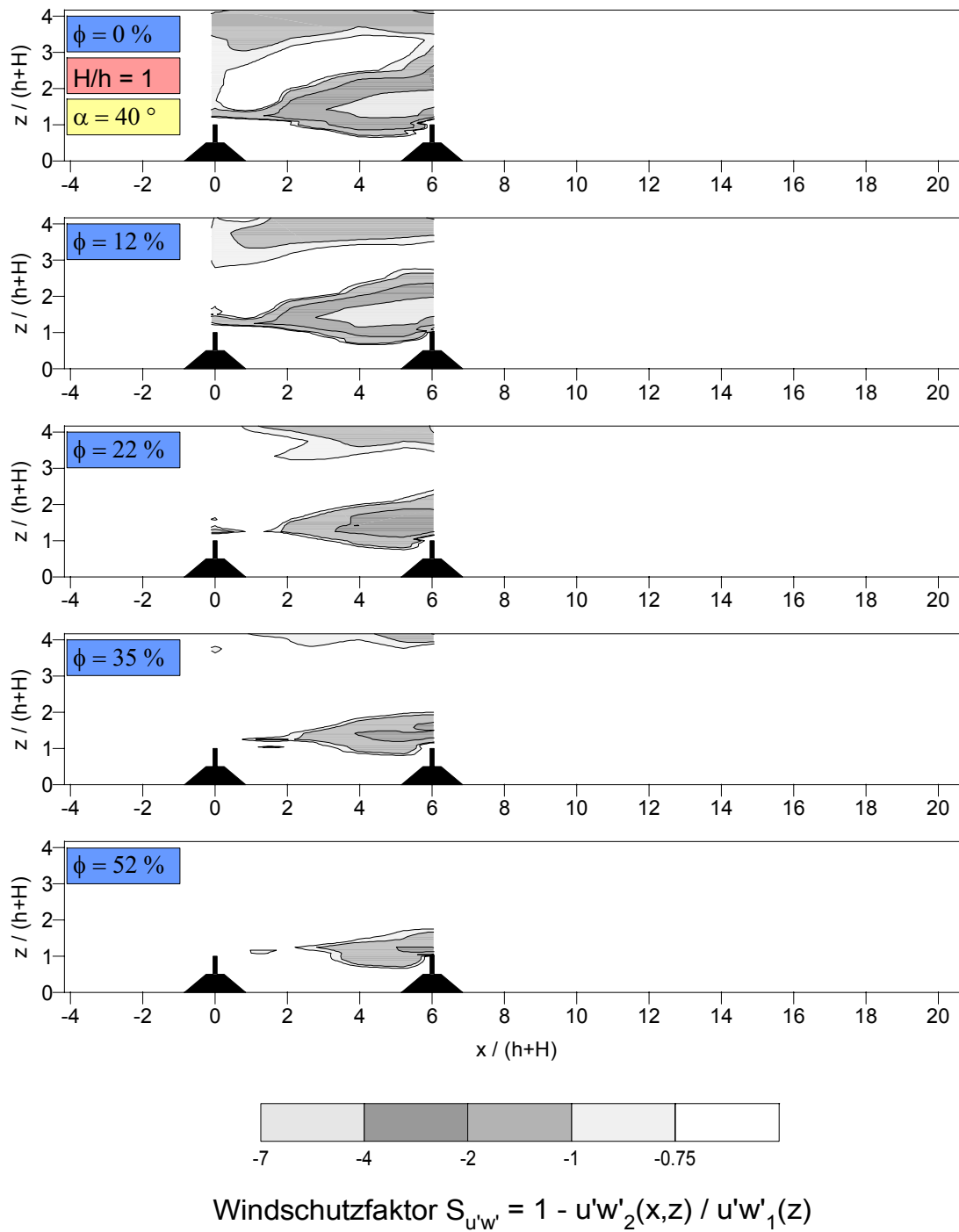
(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 25 \cdot (h+H)$)



Anlage 29:

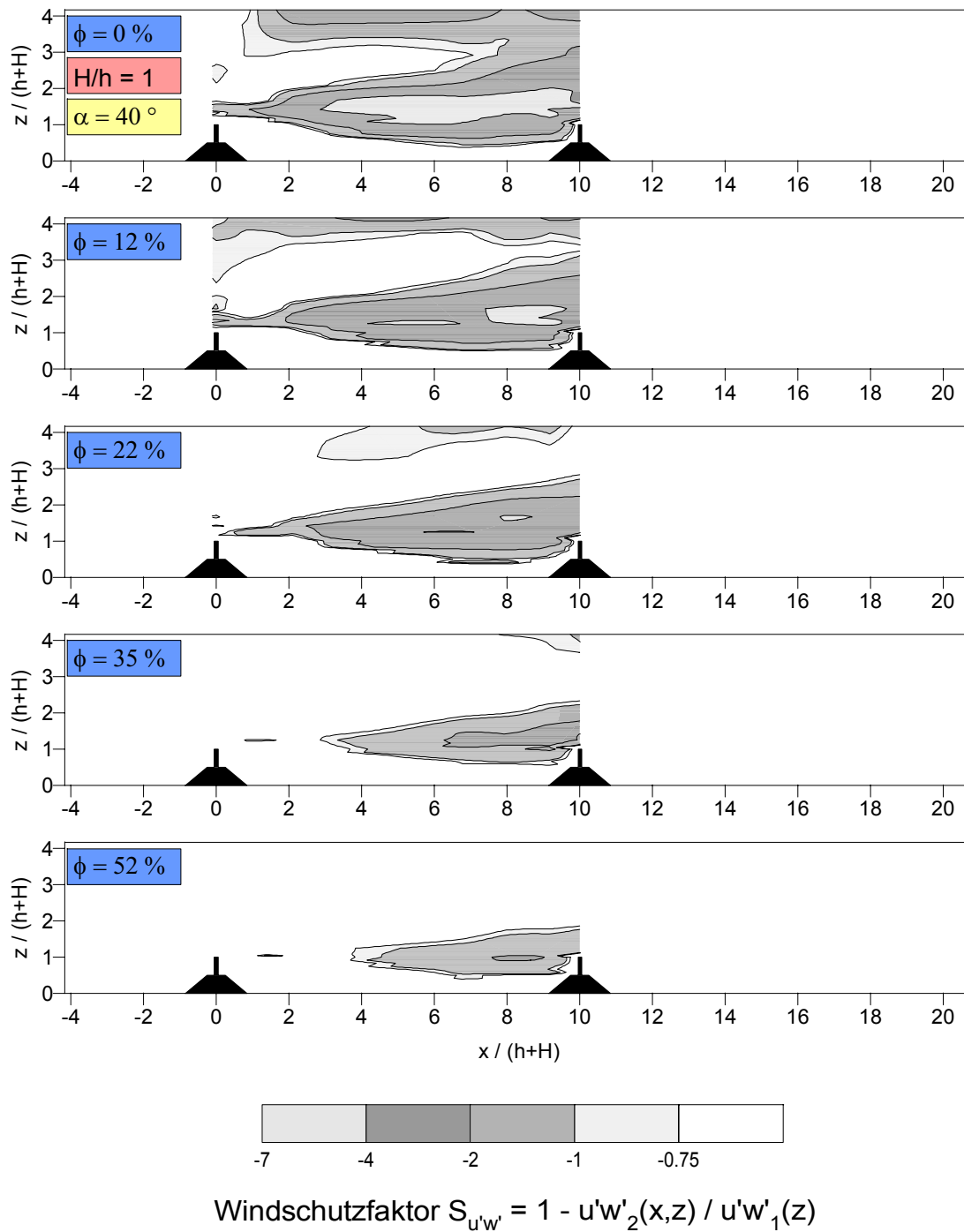
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)

**Anlage 30:**

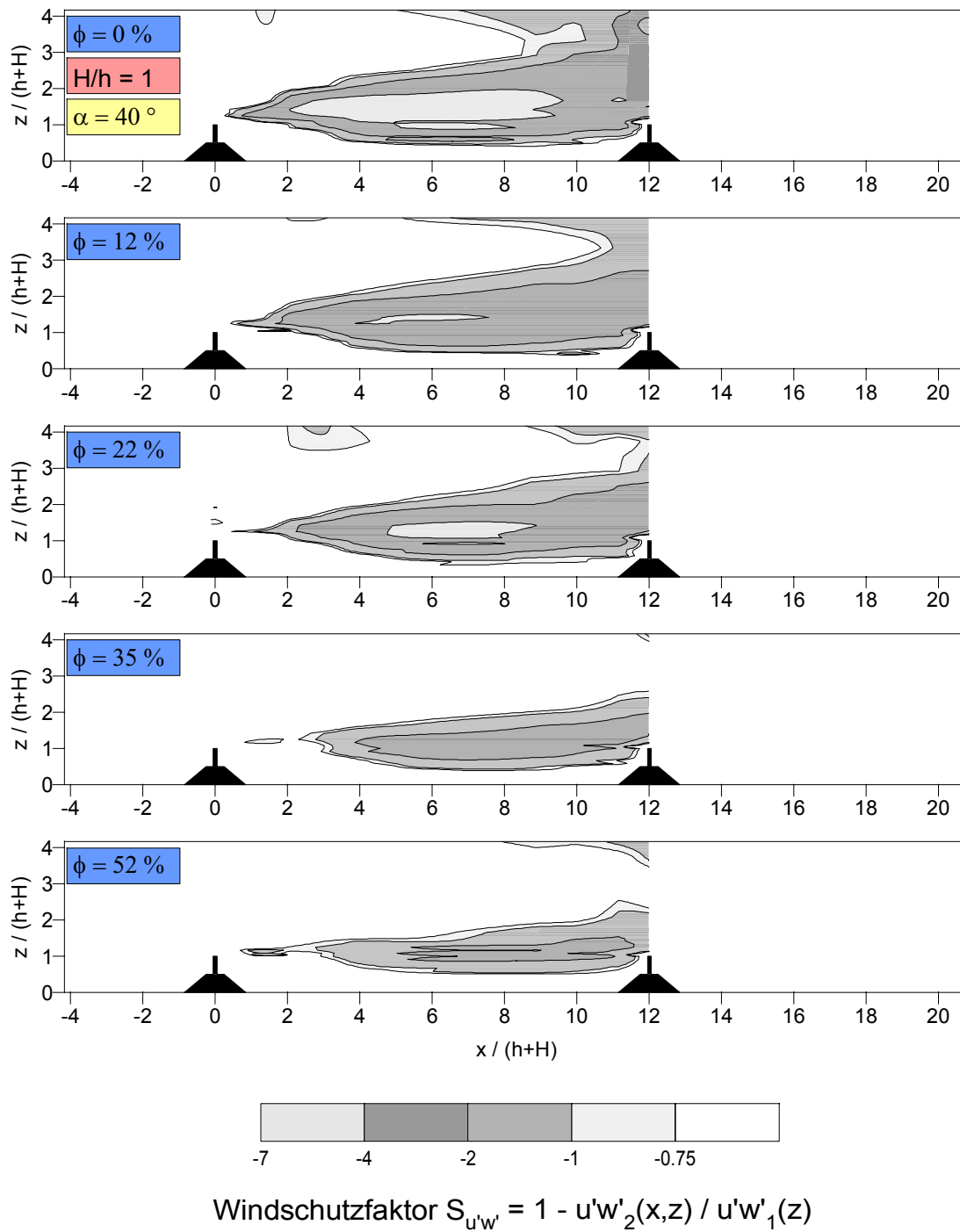
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 6 \cdot (h+H)$)

**Anlage 31:**

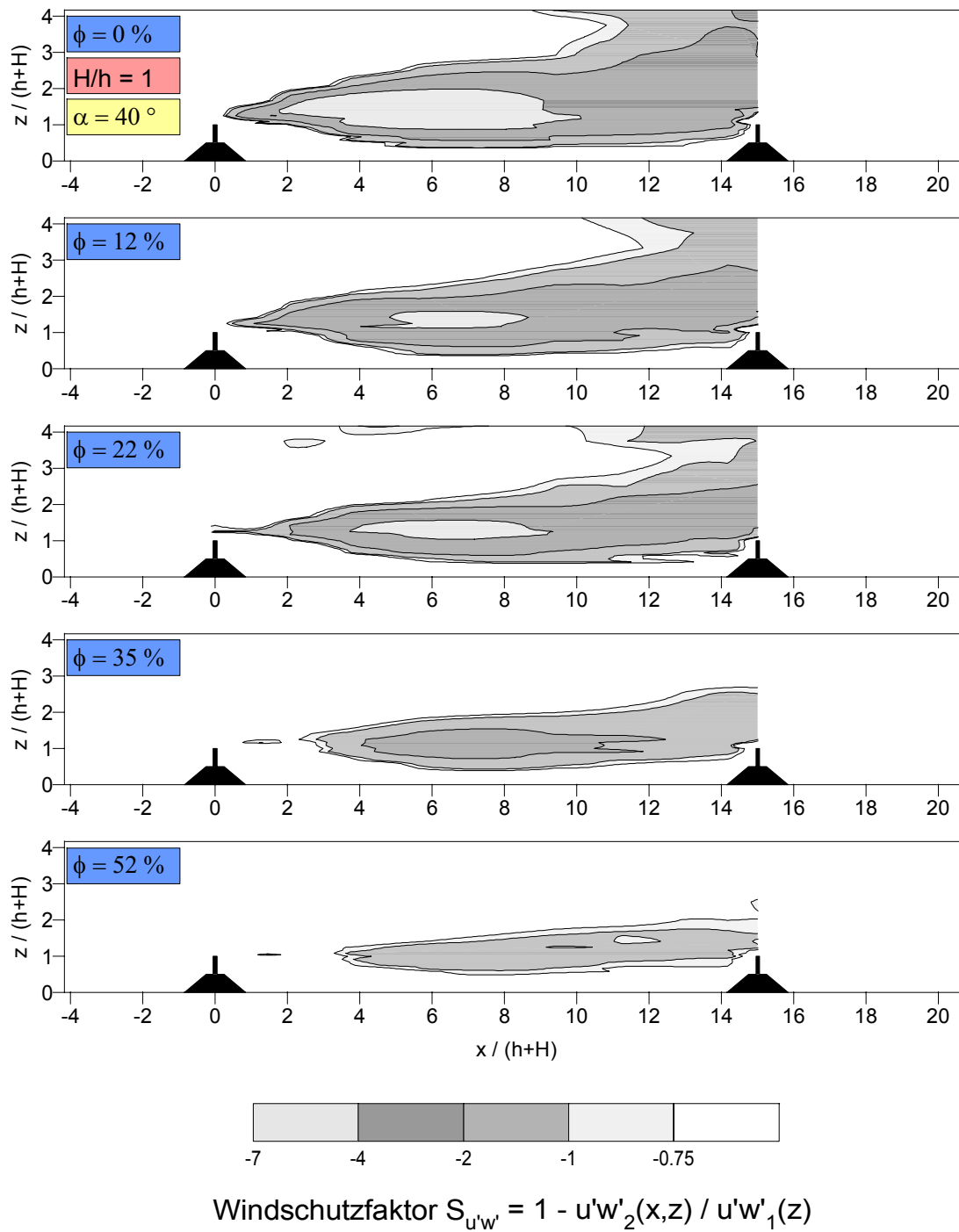
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

**Anlage 32:**

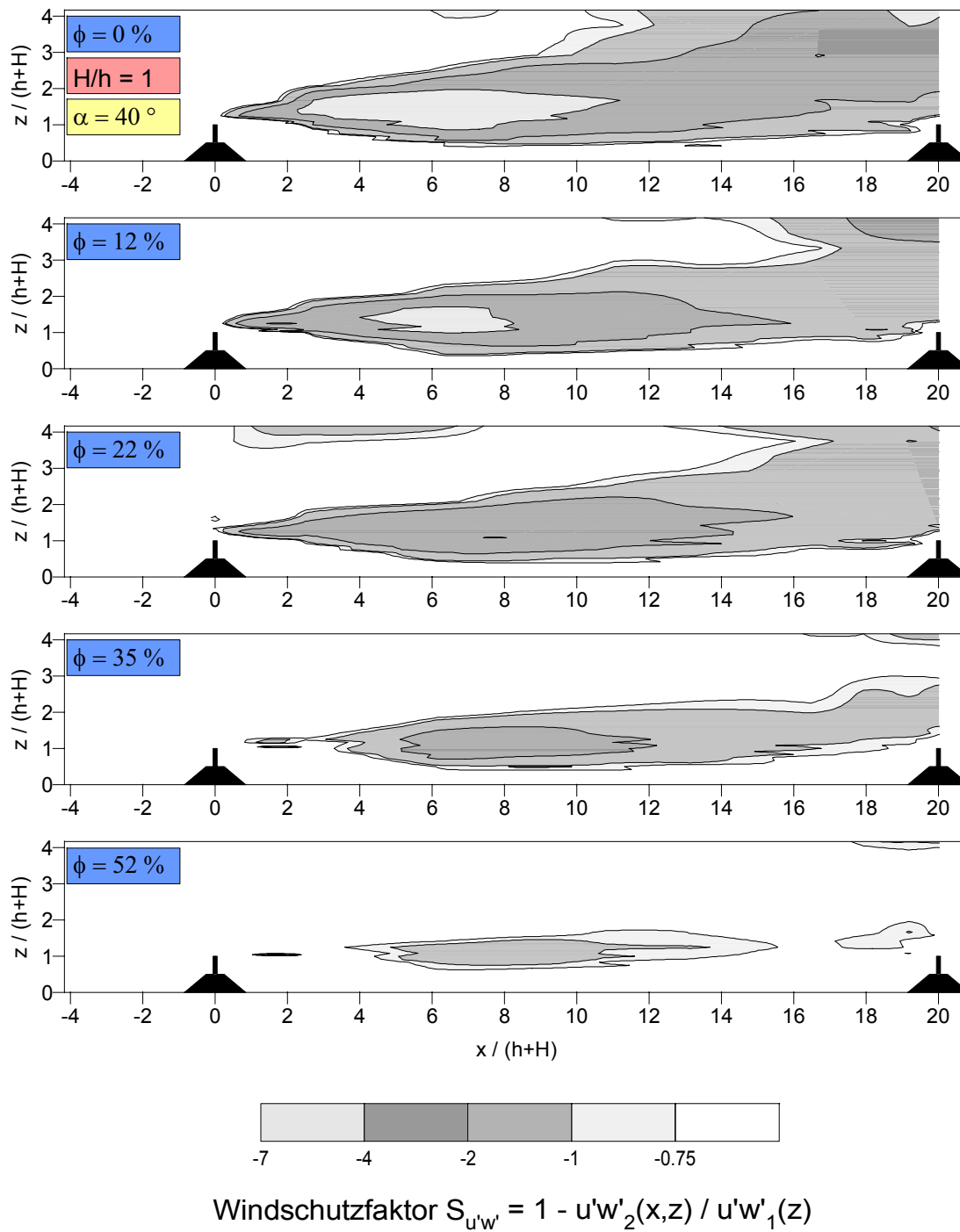
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 12 \cdot (h+H)$)

**Anlage 33:**

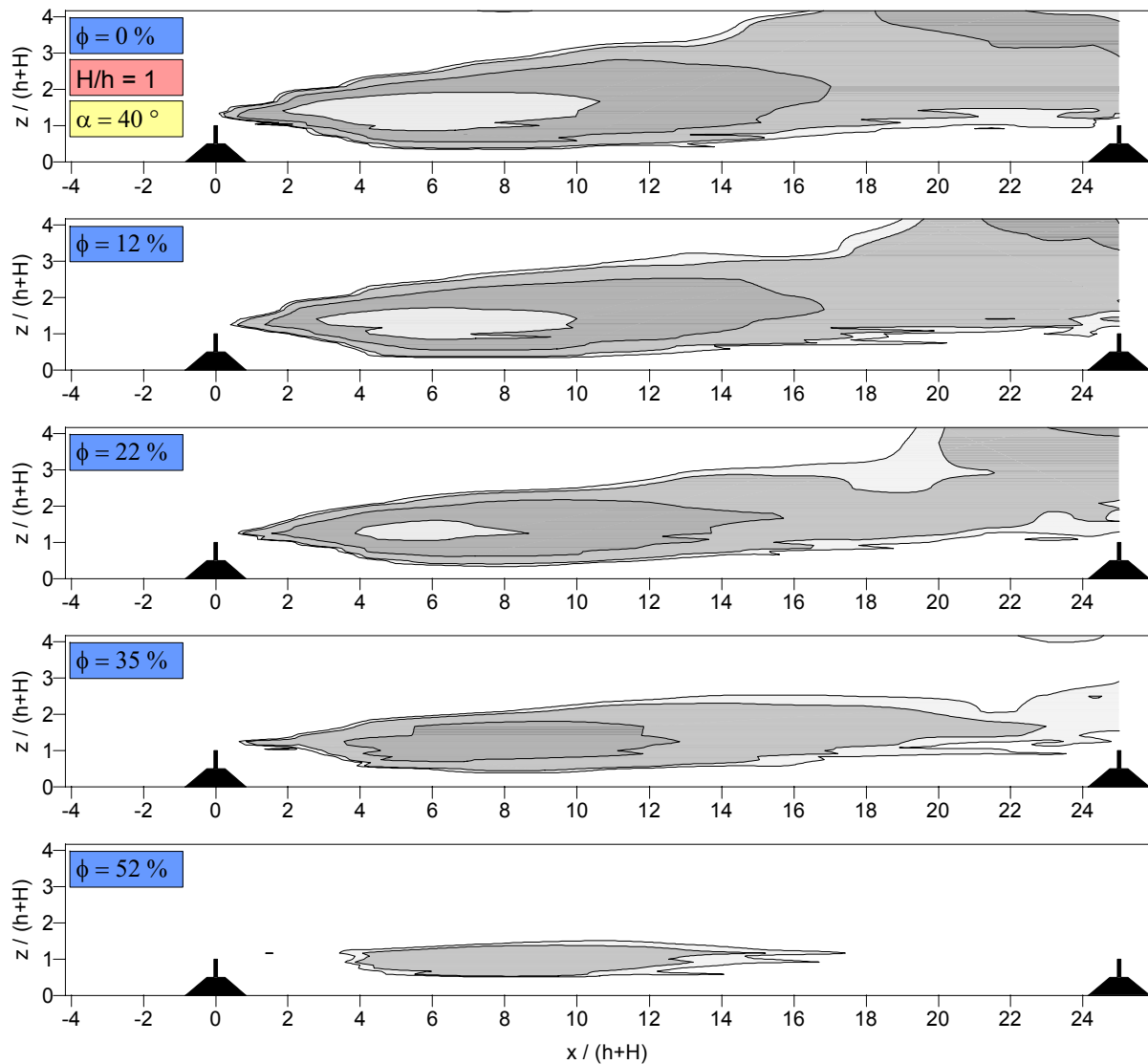
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

**Anlage 34:**

Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)

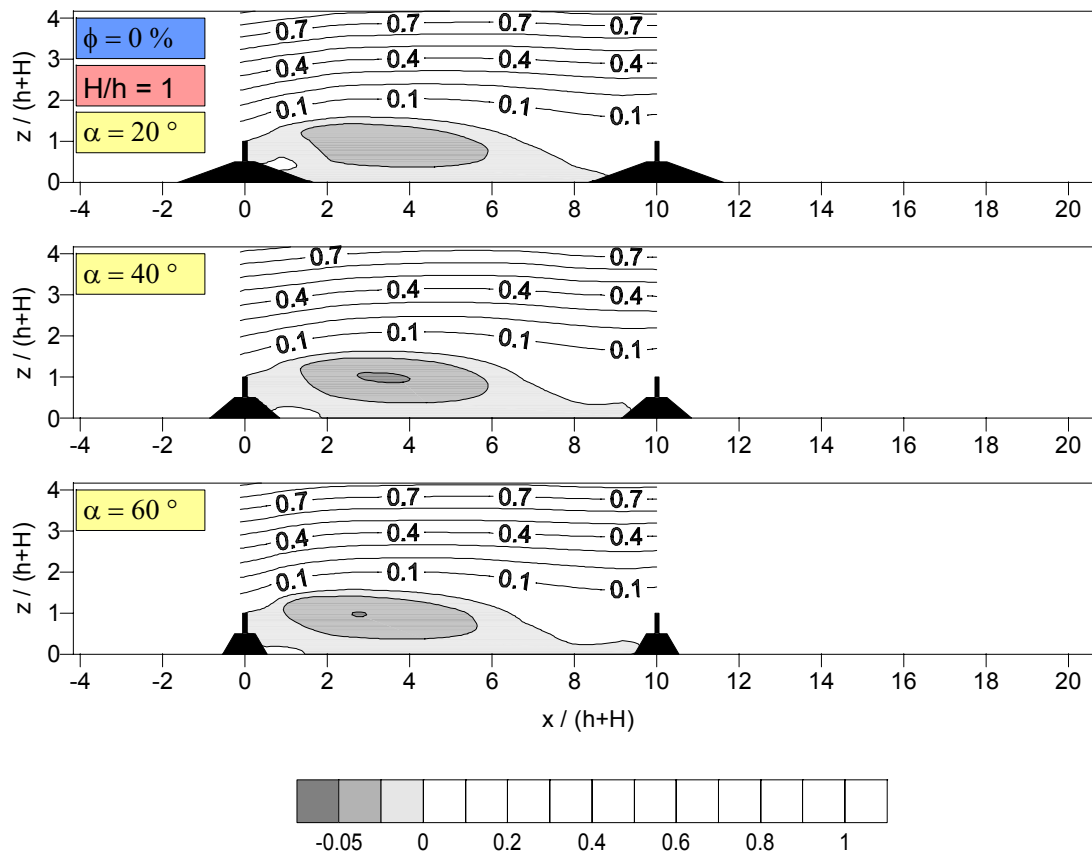


$$\text{Windschutzfaktor } S_{u'w'} = 1 - u'w'_2(x,z) / u'w'_1(z)$$

Anlage 35:

Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit von der Porosität ϕ .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Sockelwallwinkel $\alpha = 40^\circ$, Abstand $a = 25 \cdot (h+H)$)

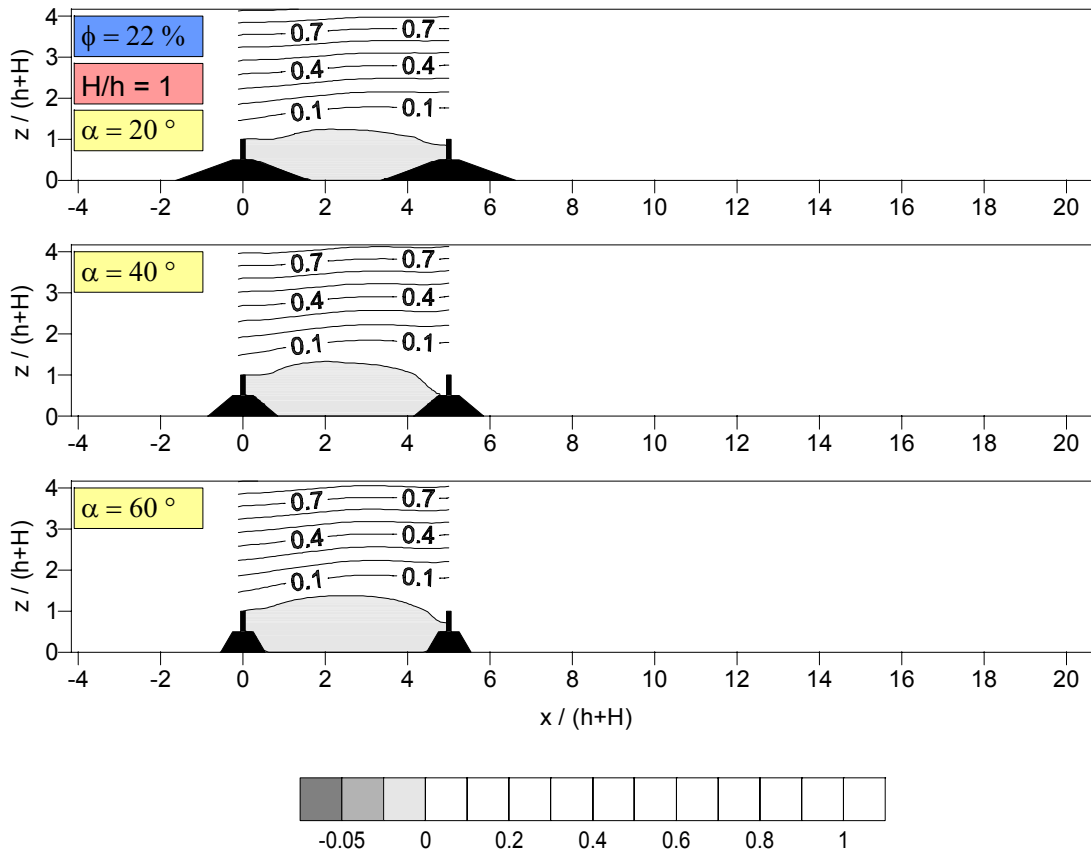


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 36:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

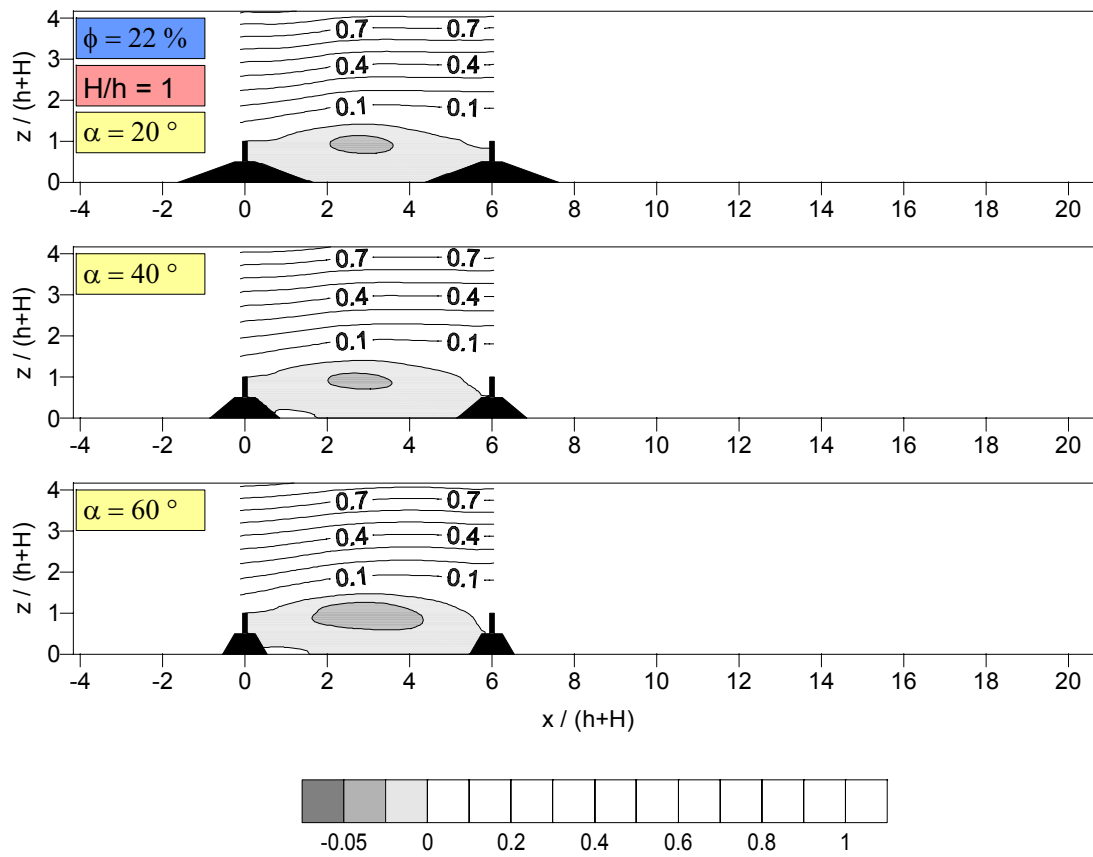


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 37:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)

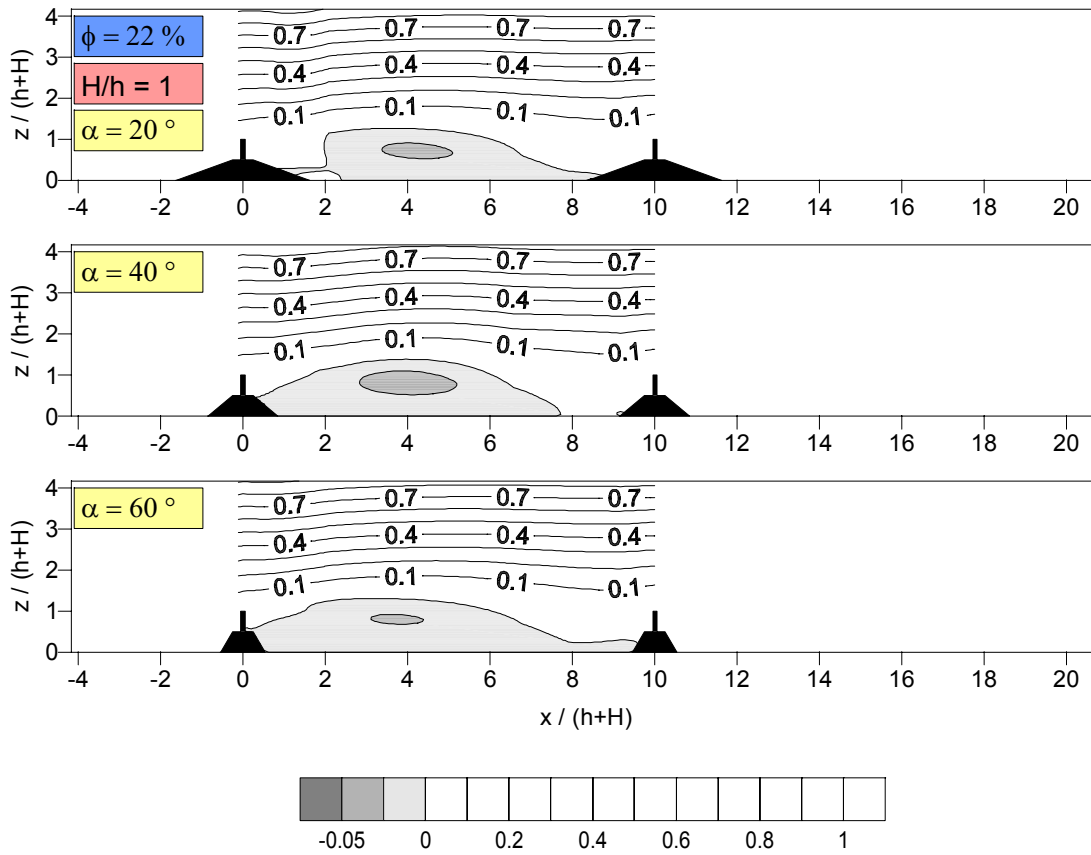


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 38:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 6 \cdot (h+H)$)

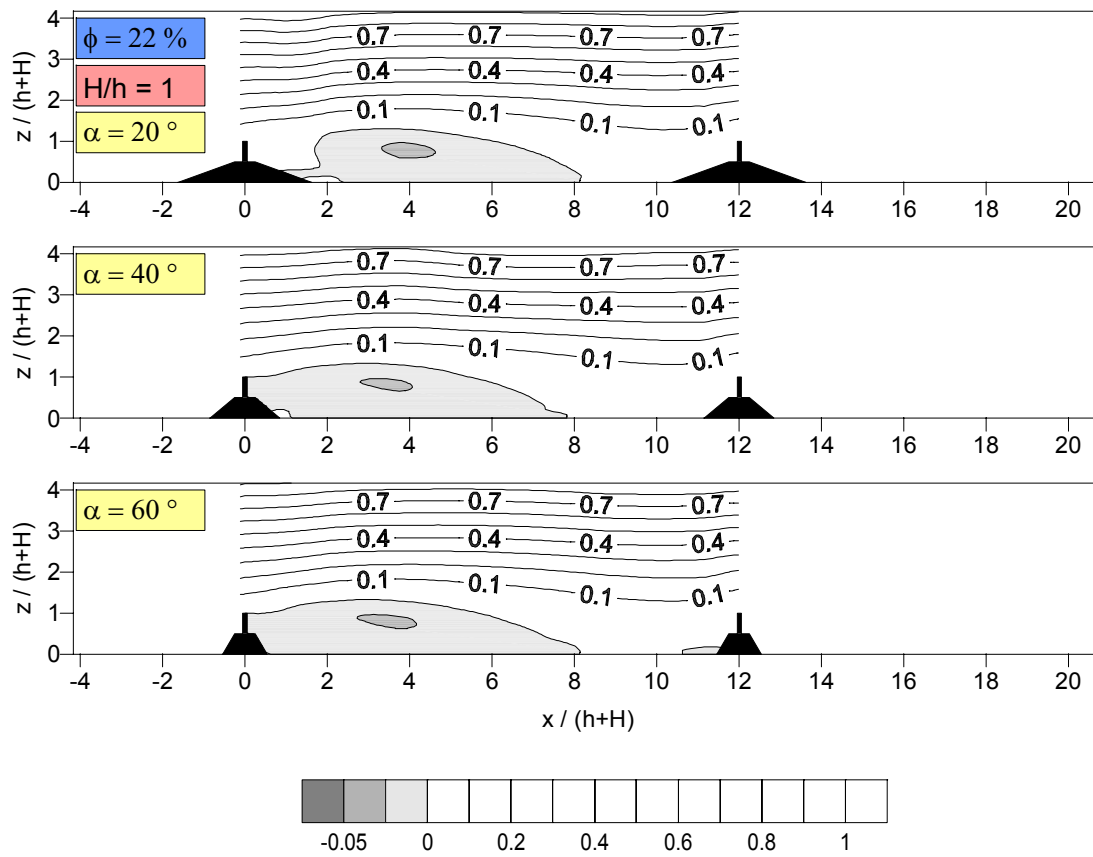


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 39:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

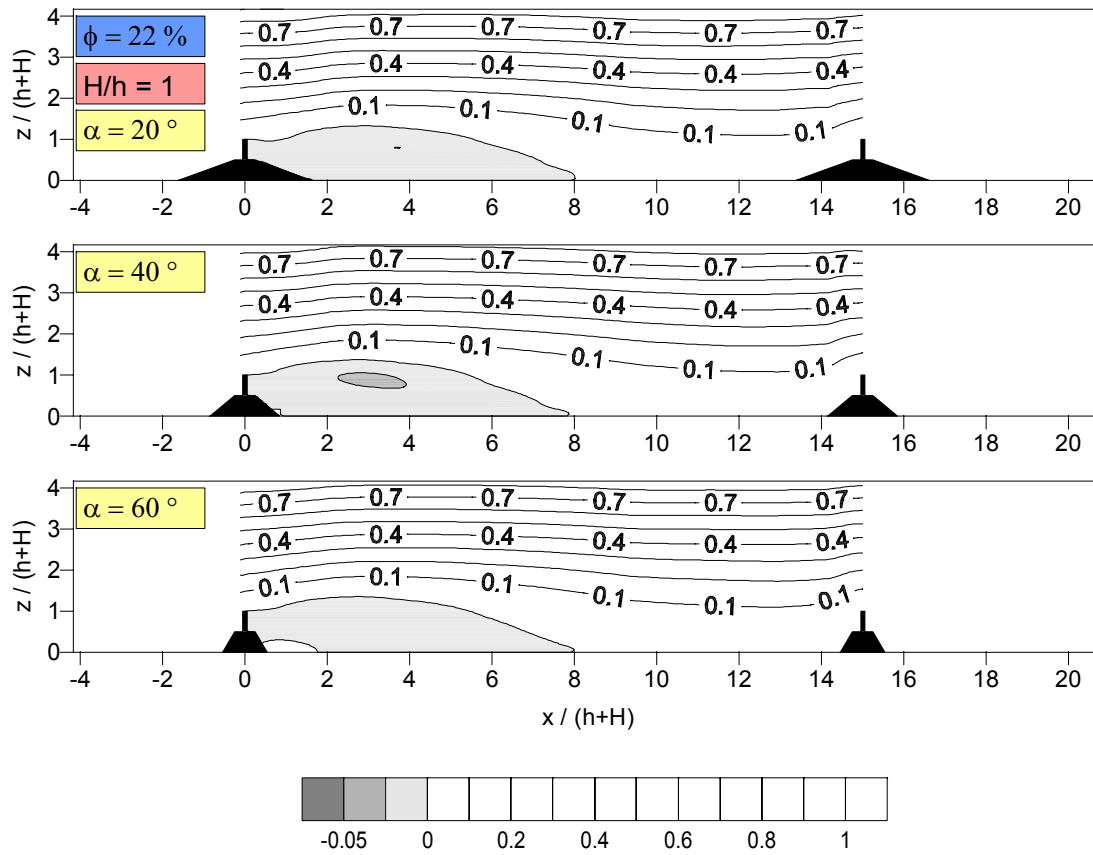


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 40:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 12 \cdot (h+H)$)

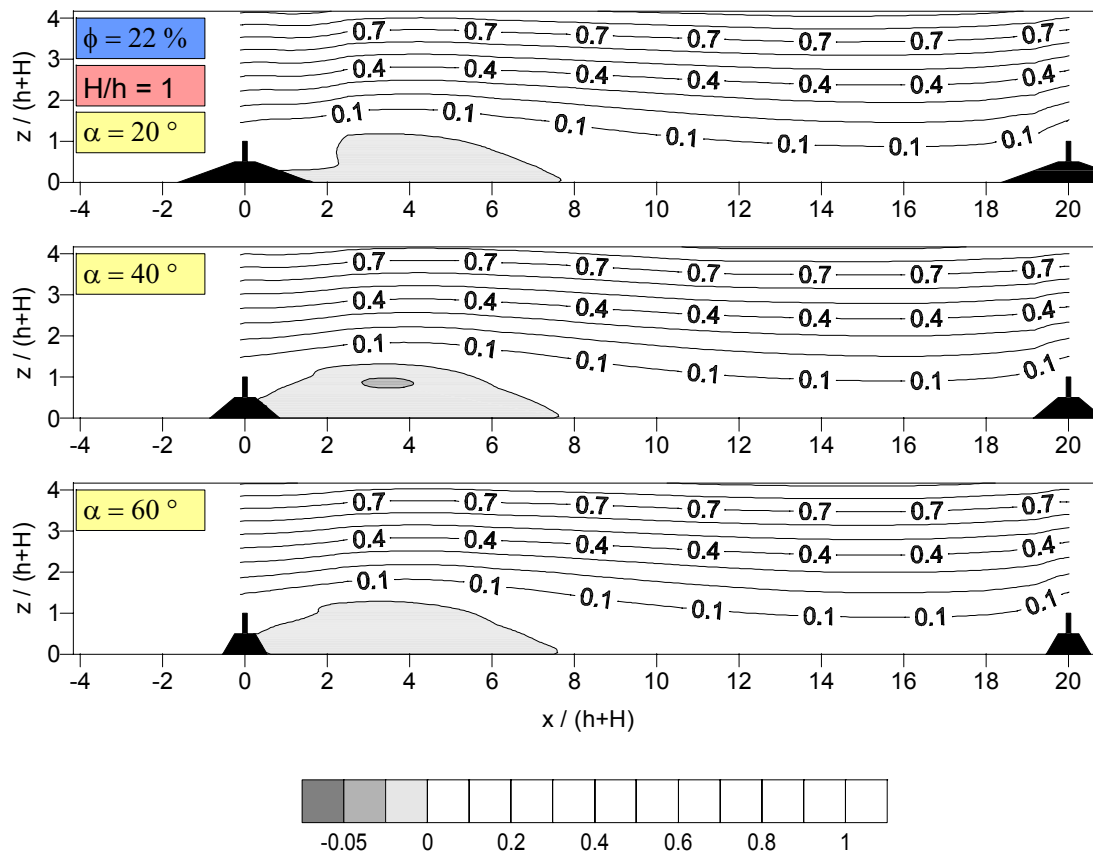


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 41:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

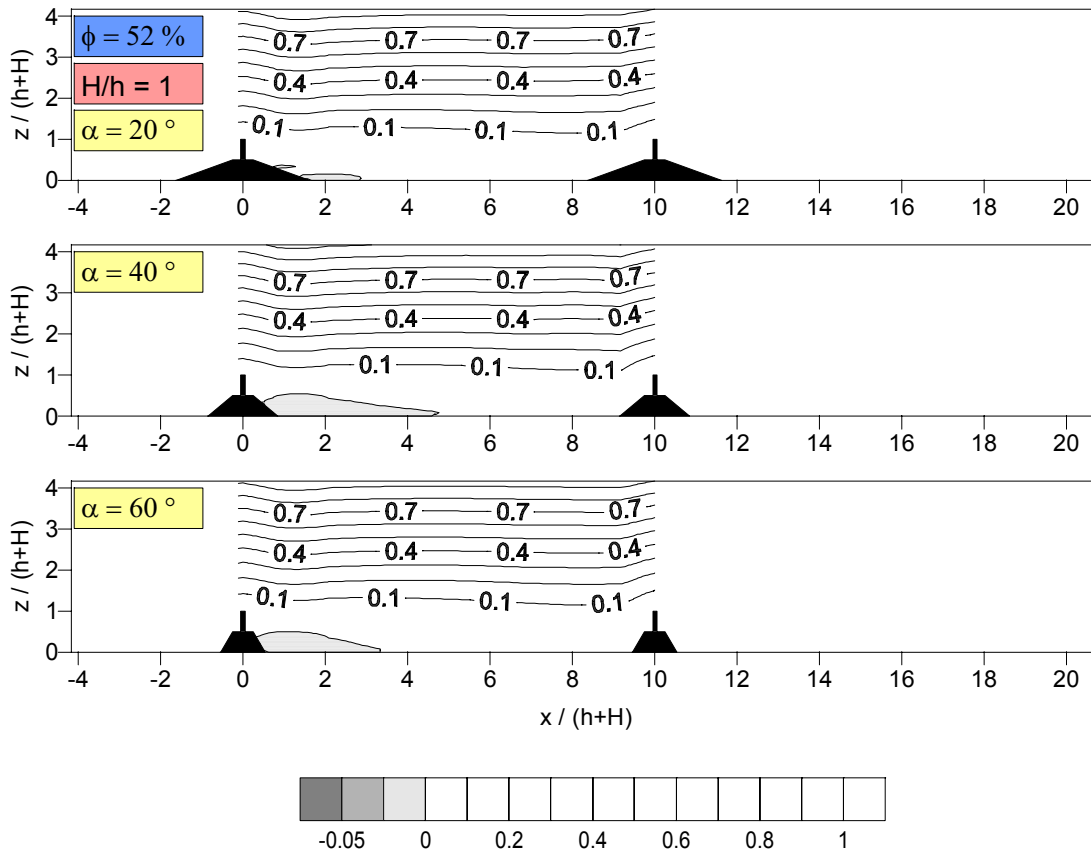


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 42:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)

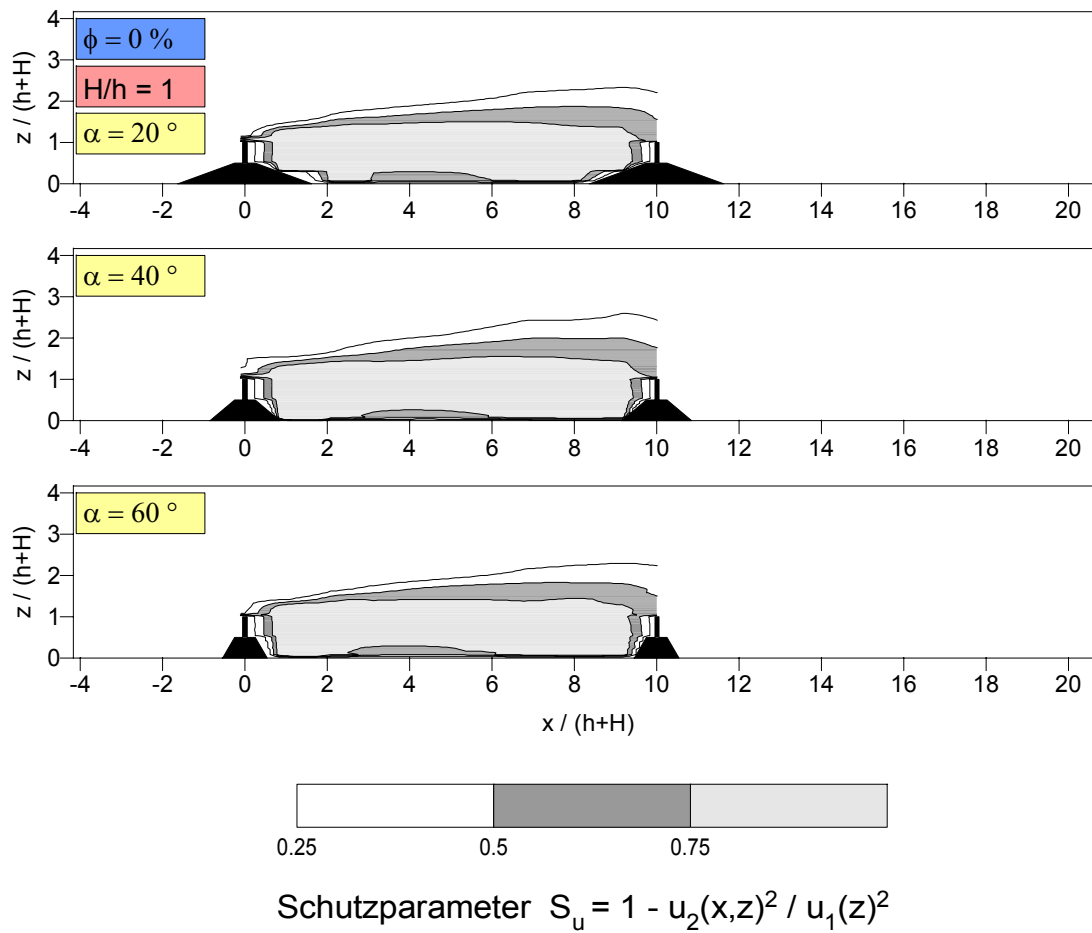


Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

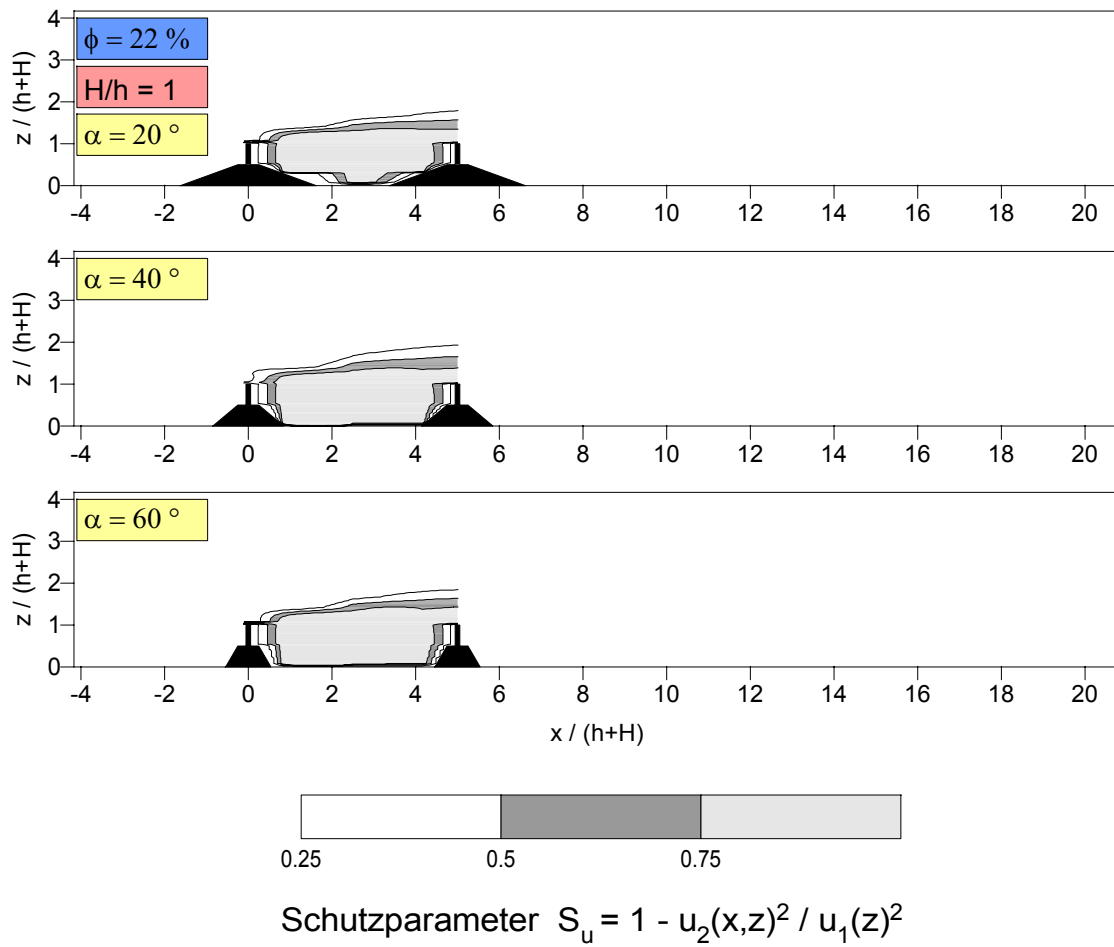
Anlage 43:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel (Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

**Anlage 44:**

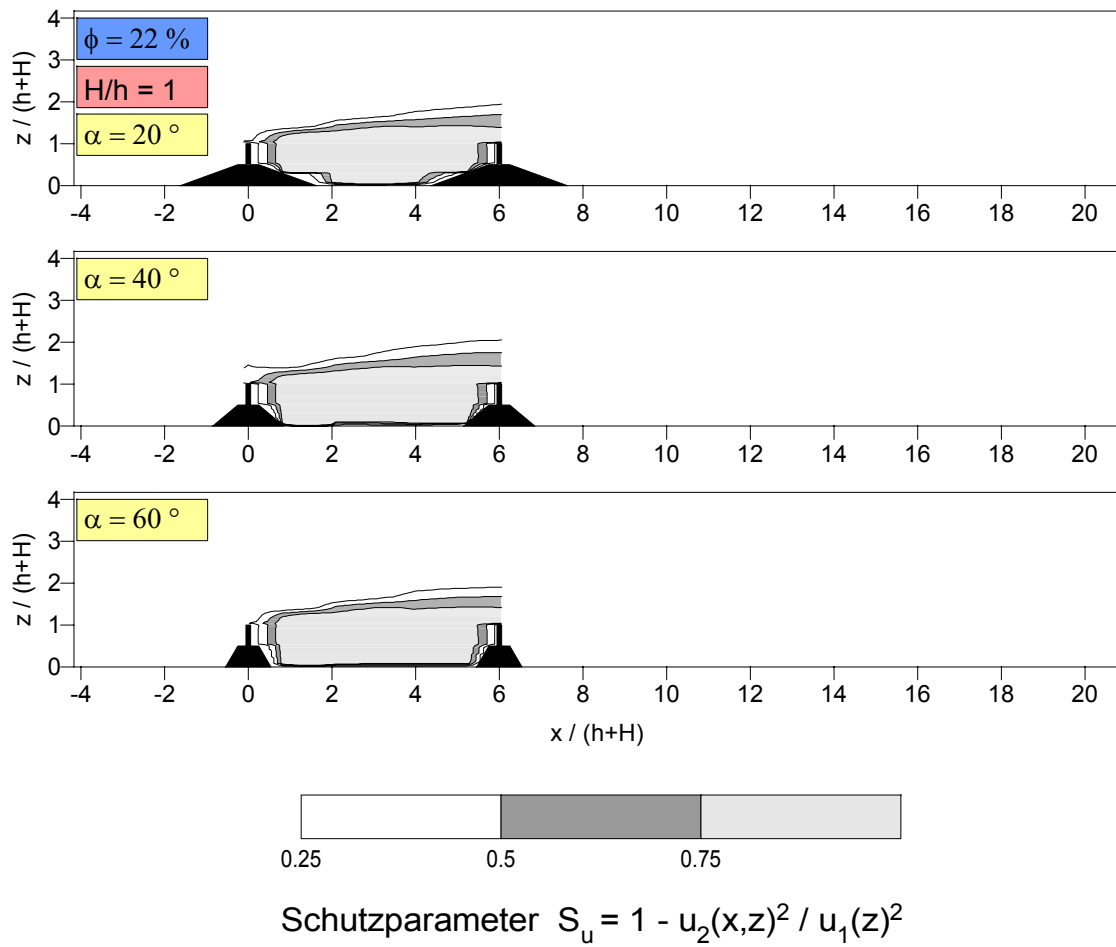
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

**Anlage 45:**

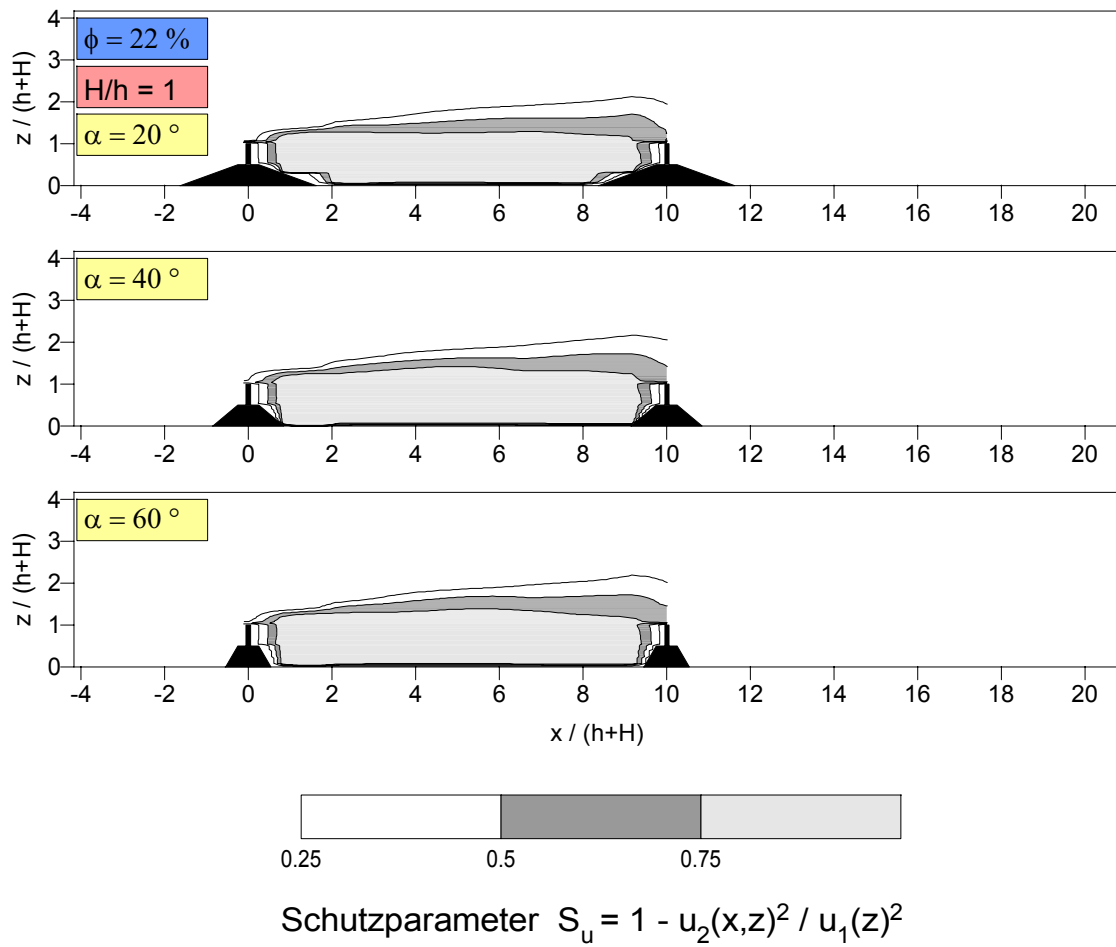
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)

**Anlage 46:**

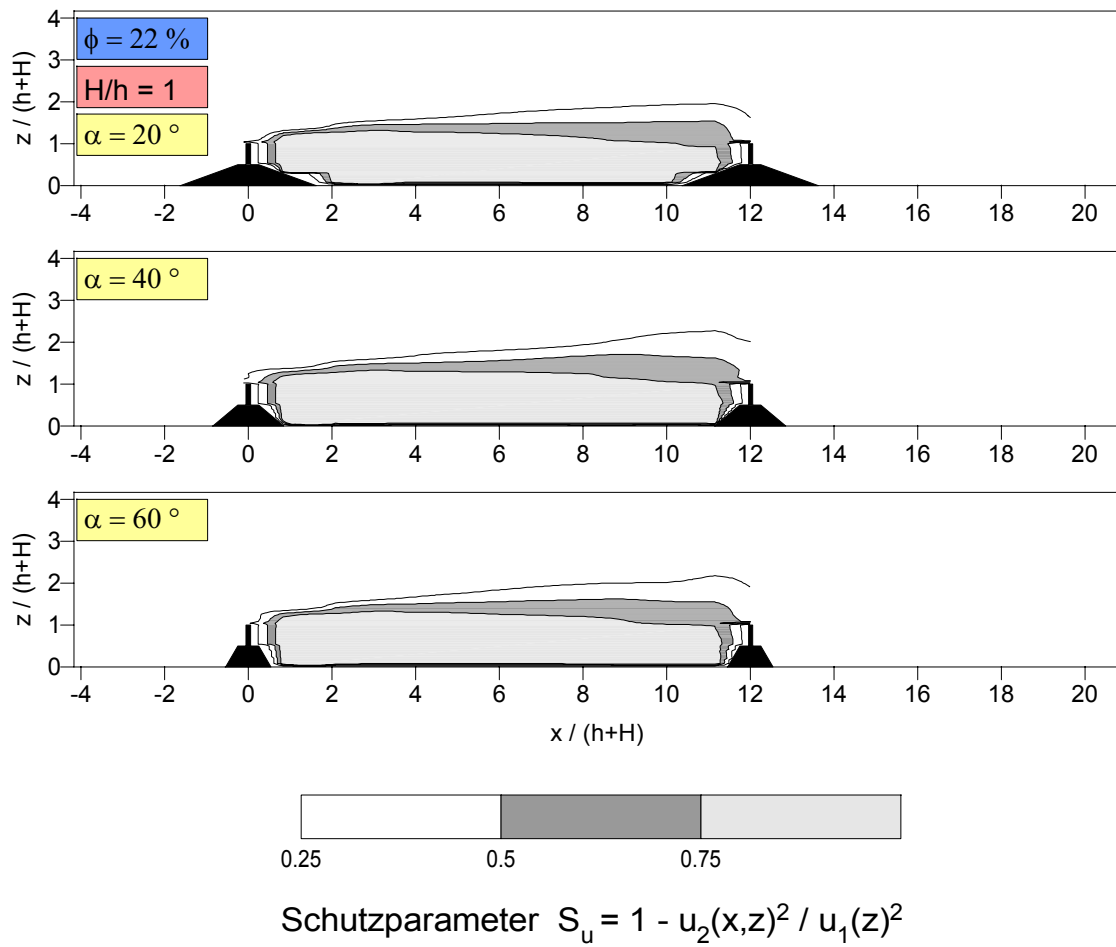
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 6 \cdot (h+H)$)

**Anlage 47:**

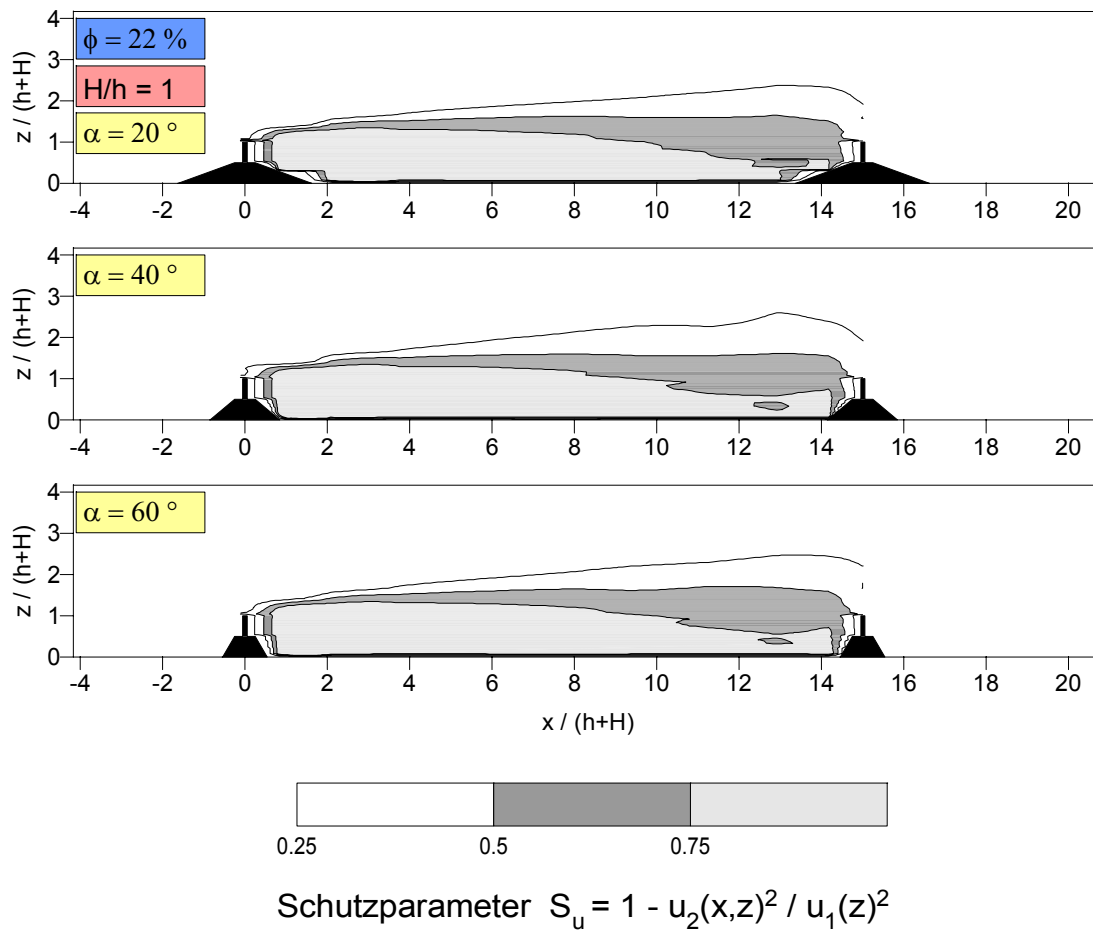
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

**Anlage 48:**

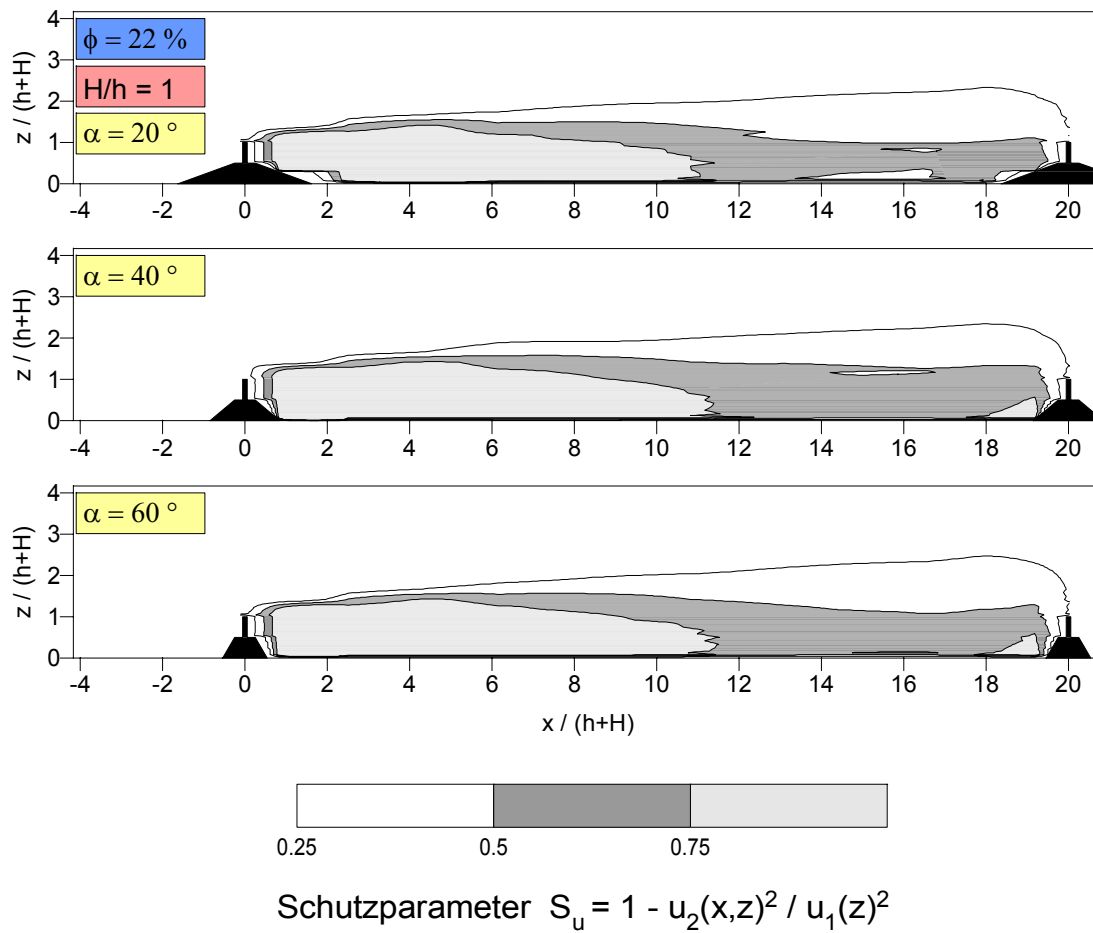
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 12 \cdot (h+H)$)

**Anlage 49:**

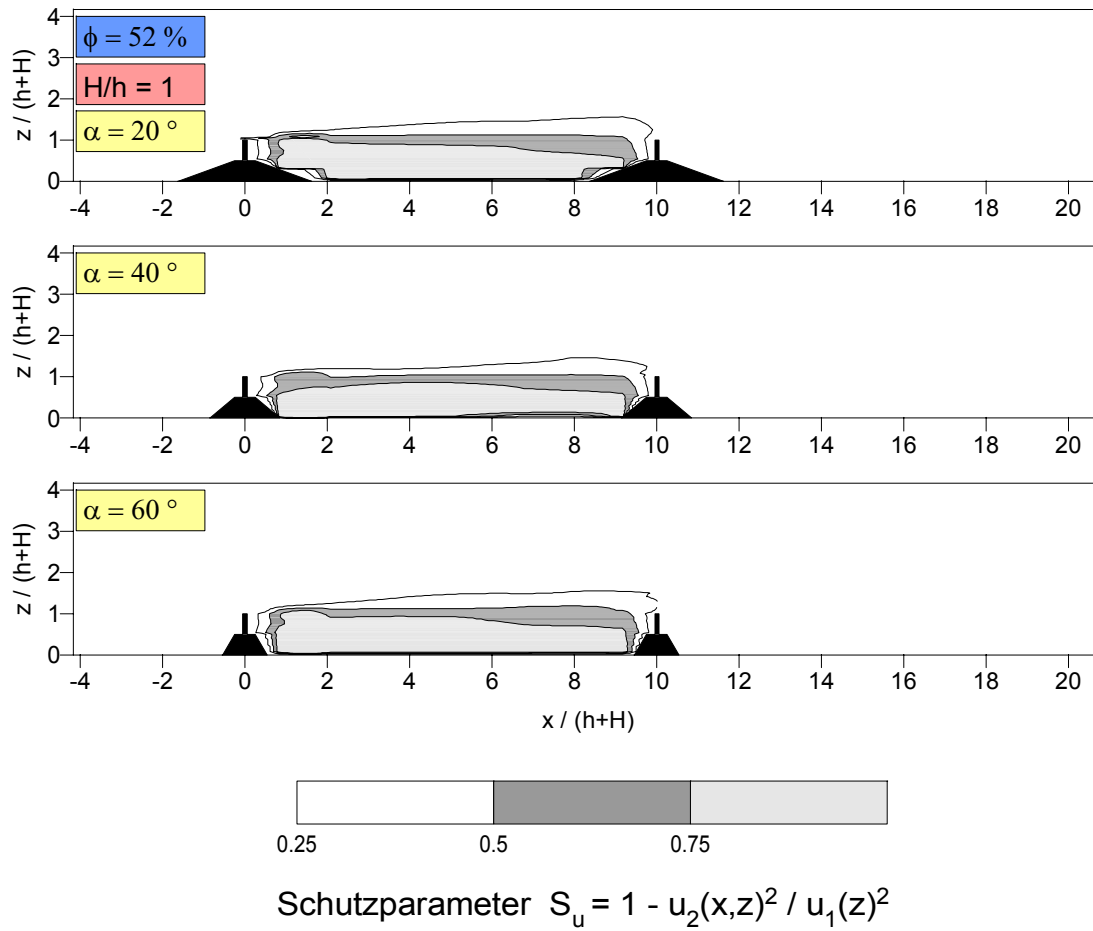
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

**Anlage 50:**

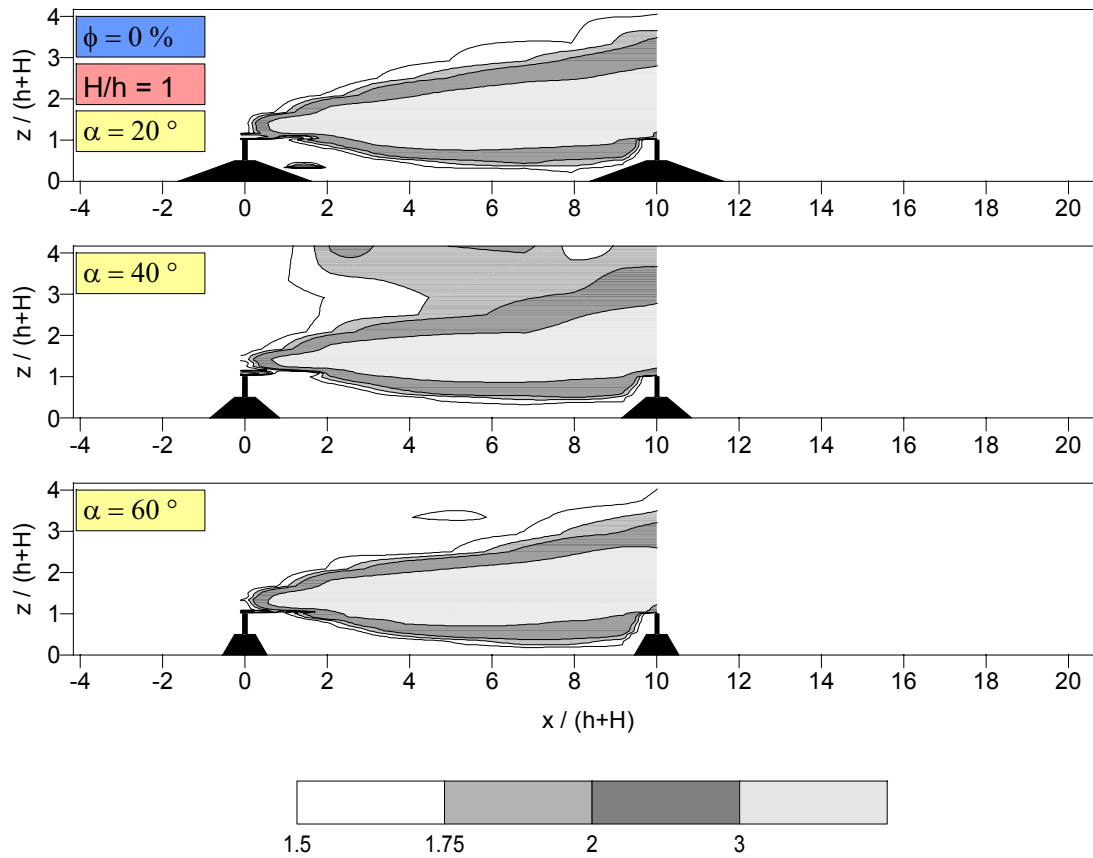
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)

**Anlage 51:**

Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)



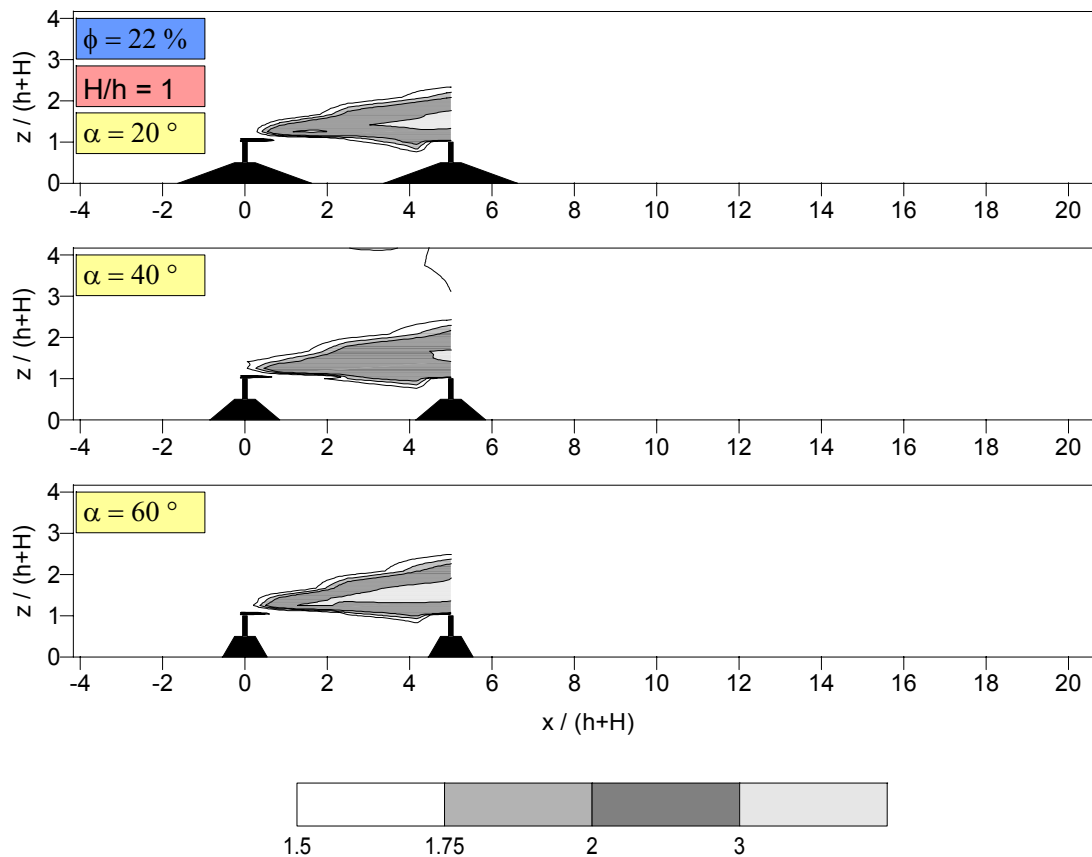
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 52:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 0 \%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)



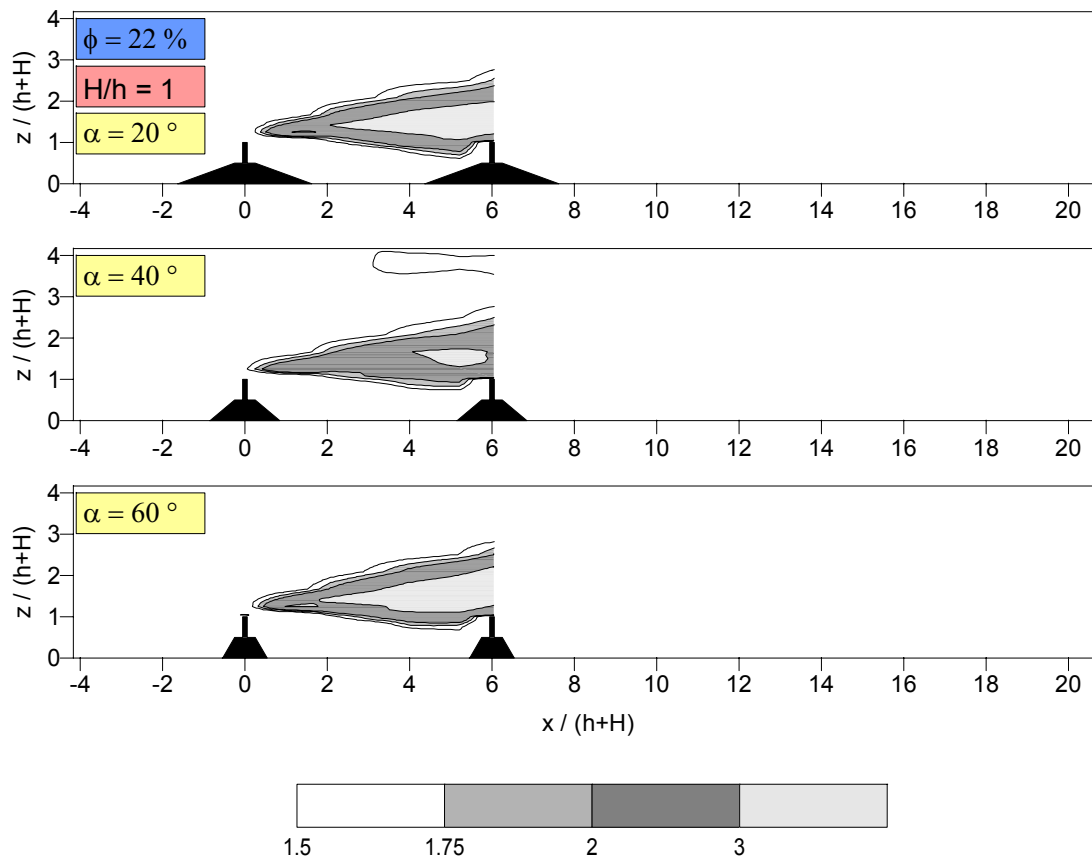
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 53:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)



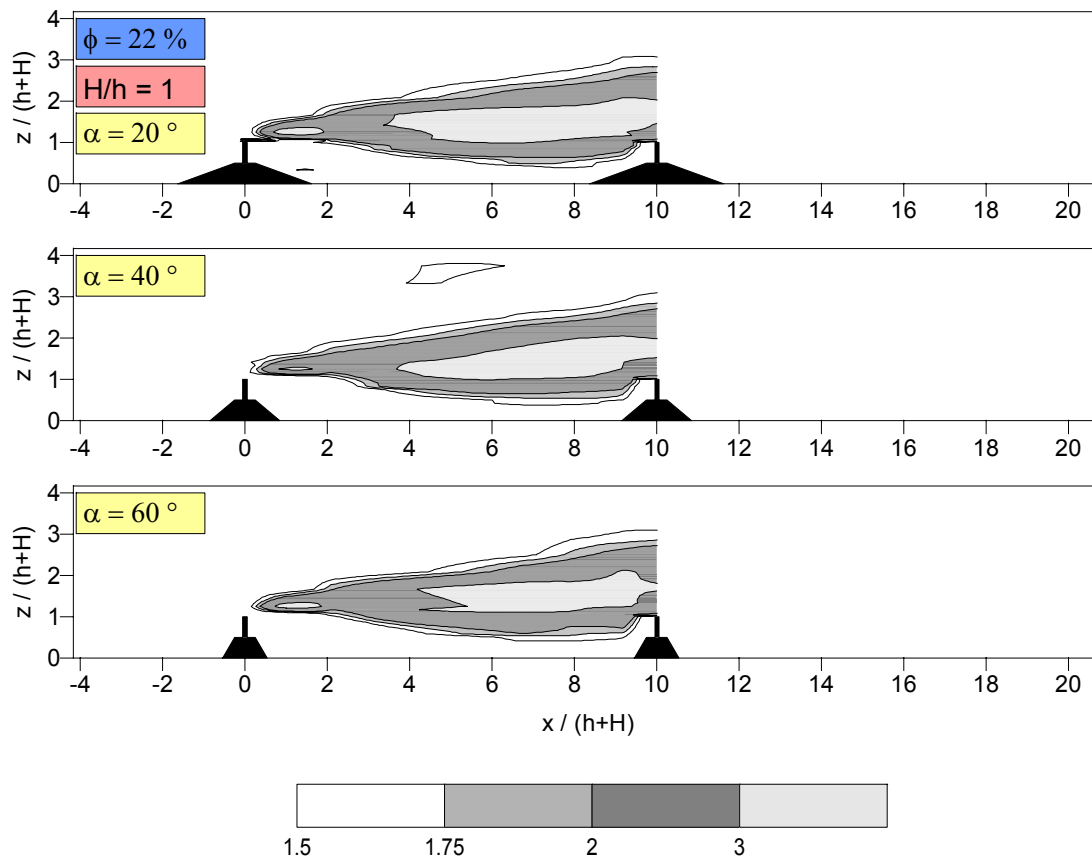
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 54:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 6 \cdot (h+H)$)



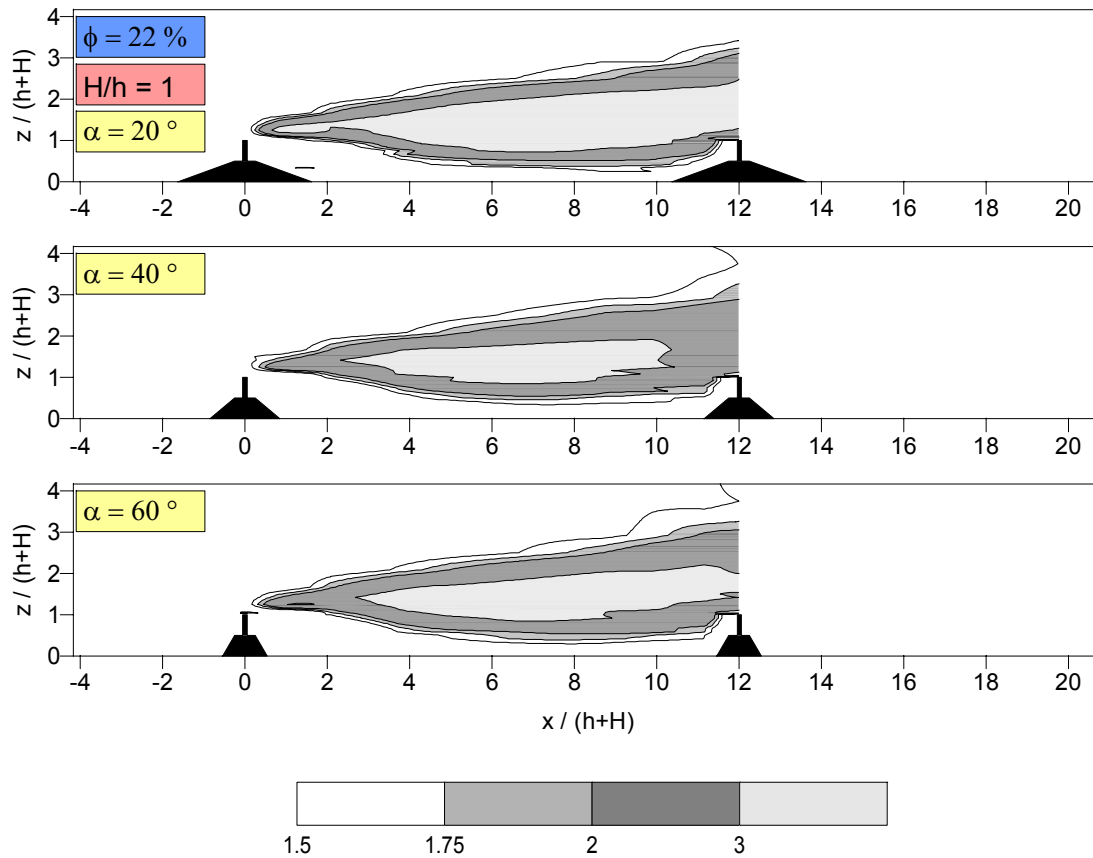
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 55:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)



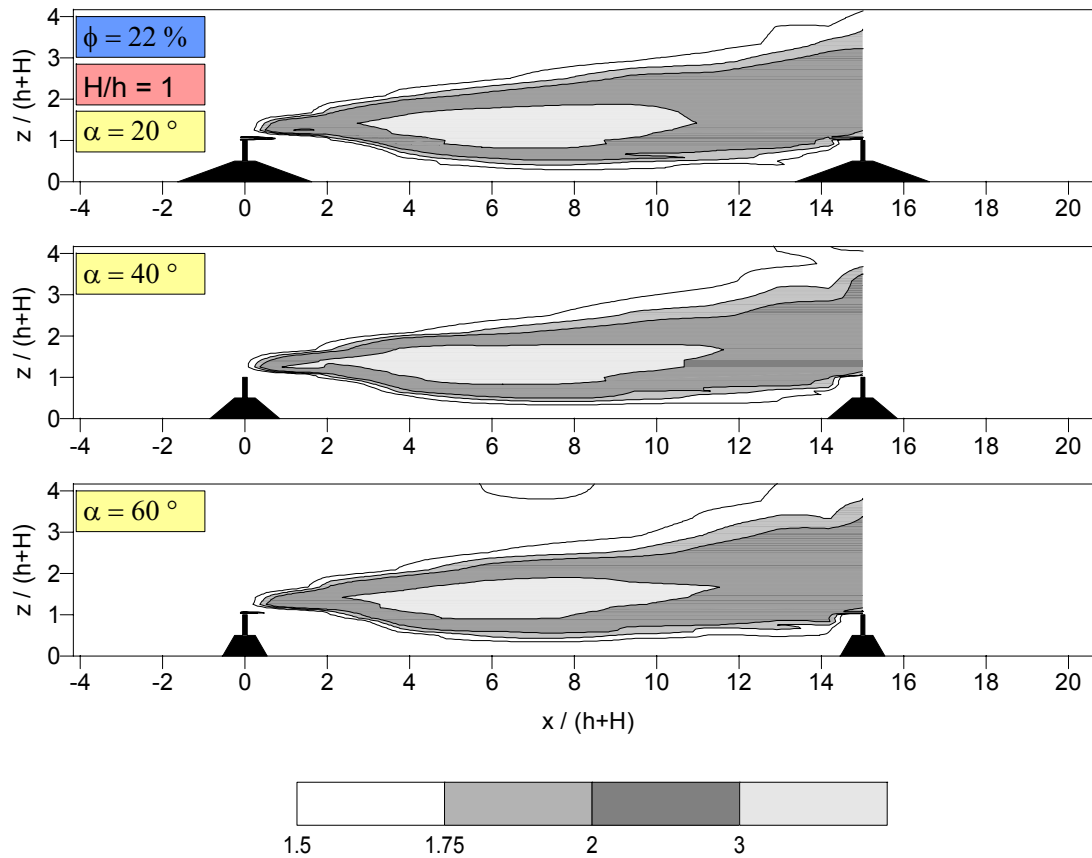
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 56:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 12 \cdot (h+H)$)



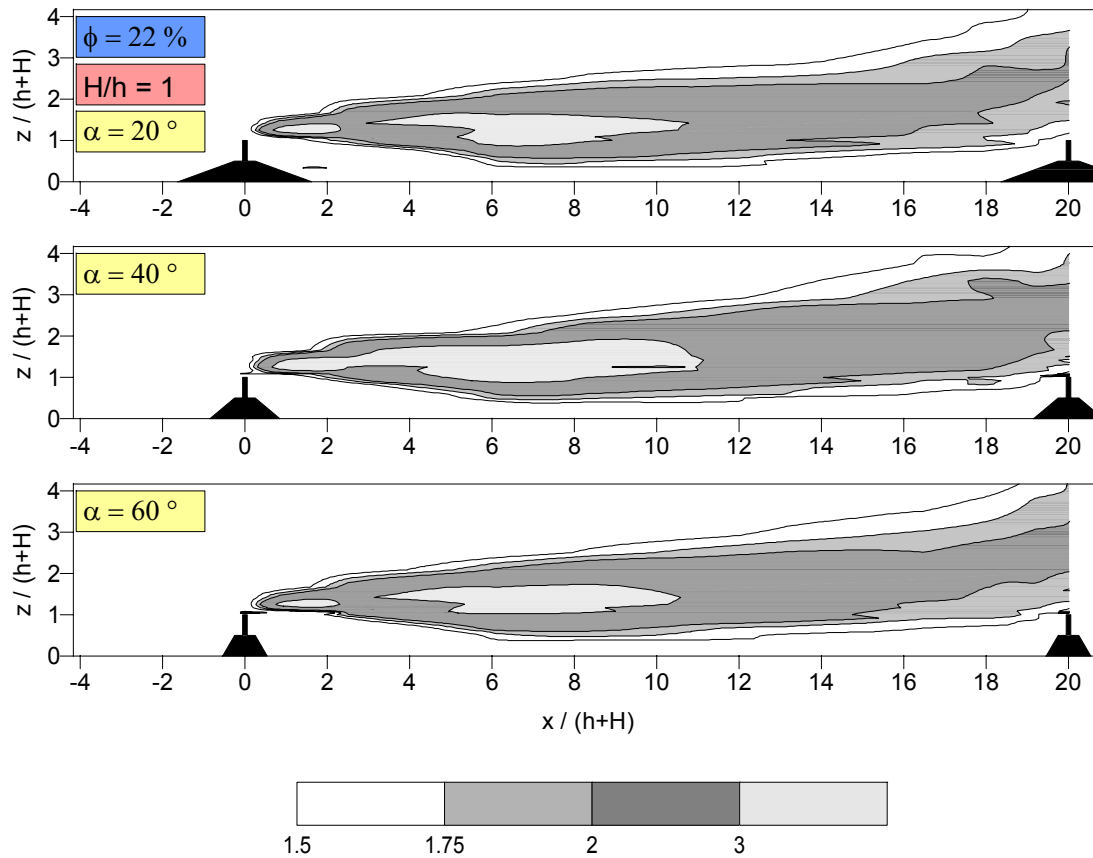
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 57:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)



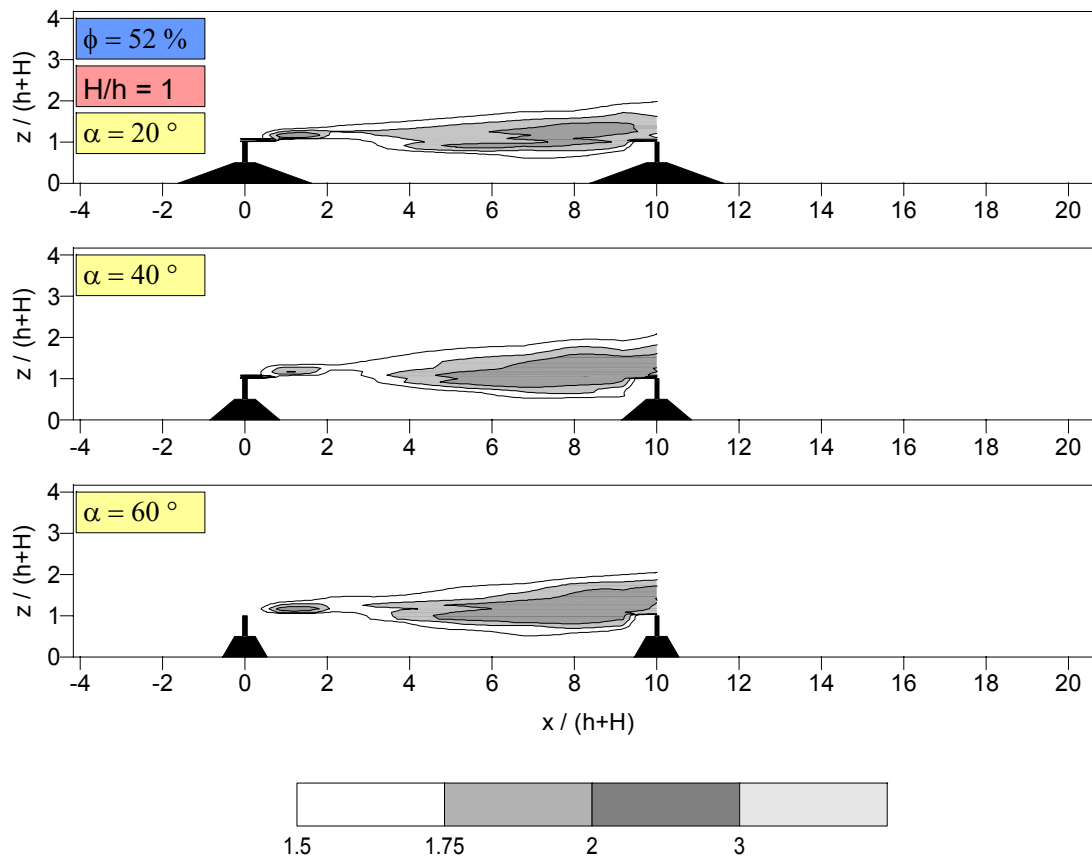
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 58:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)



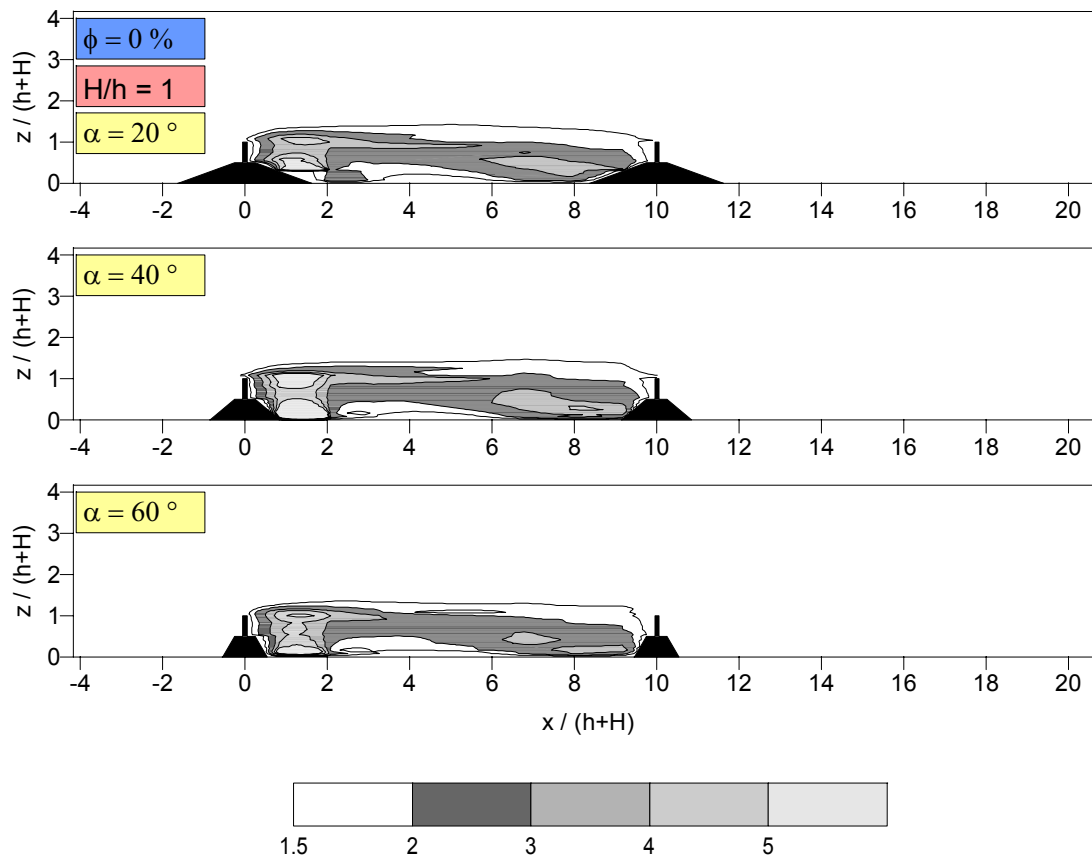
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 59:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 52 \%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)



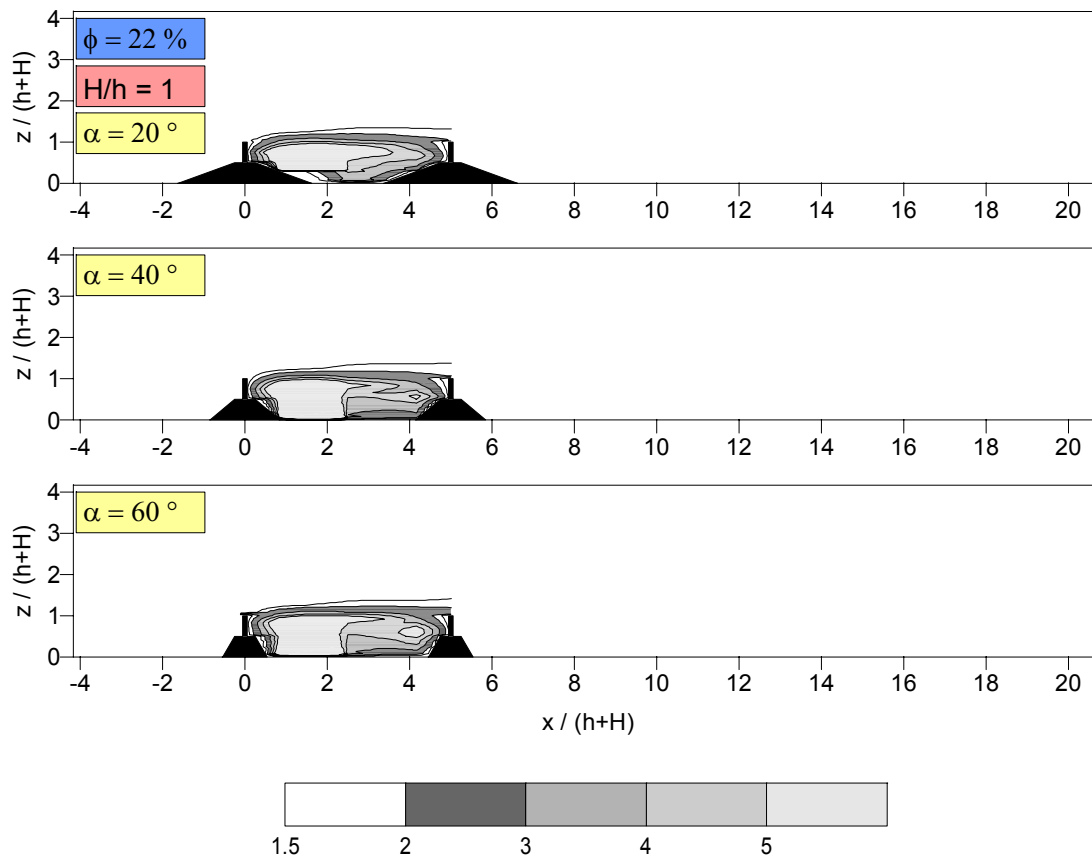
Windschutzparameter nach Gandemer

$$f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$$

Anlage 60:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 0 \%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)



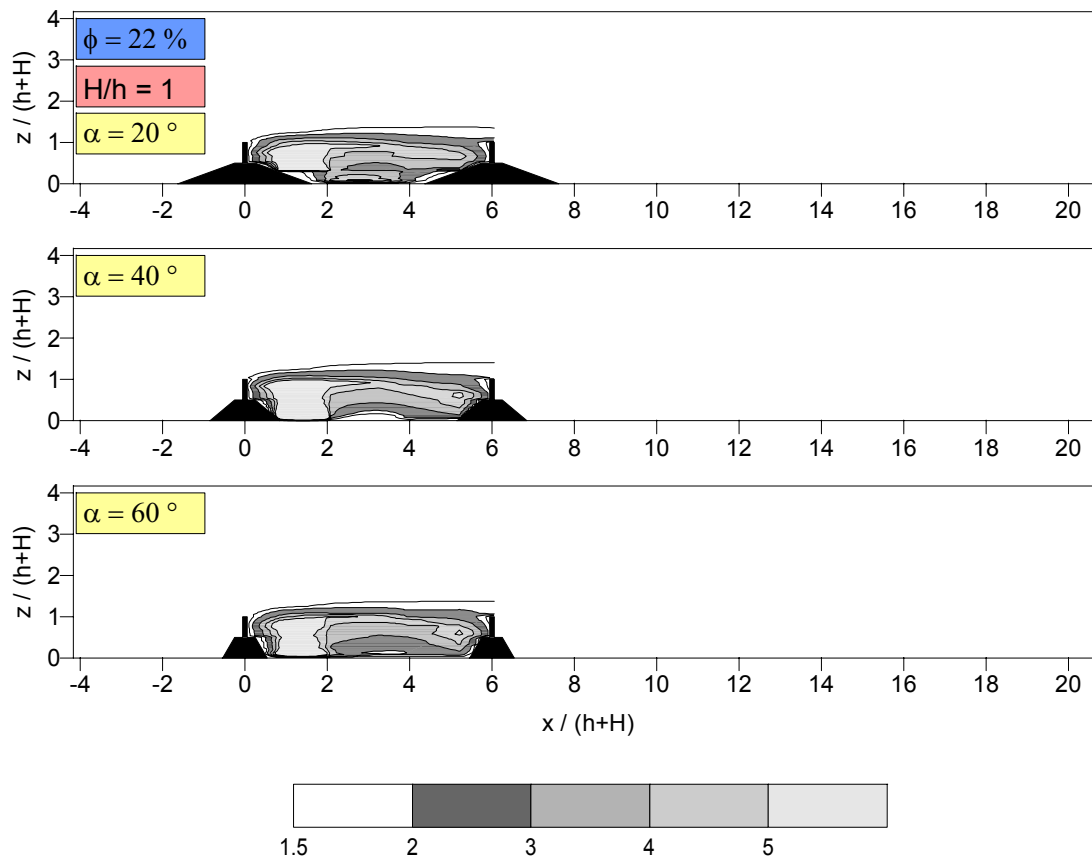
Windschutzparameter nach Gandemer

$$f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$$

Anlage 61:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22 \%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)



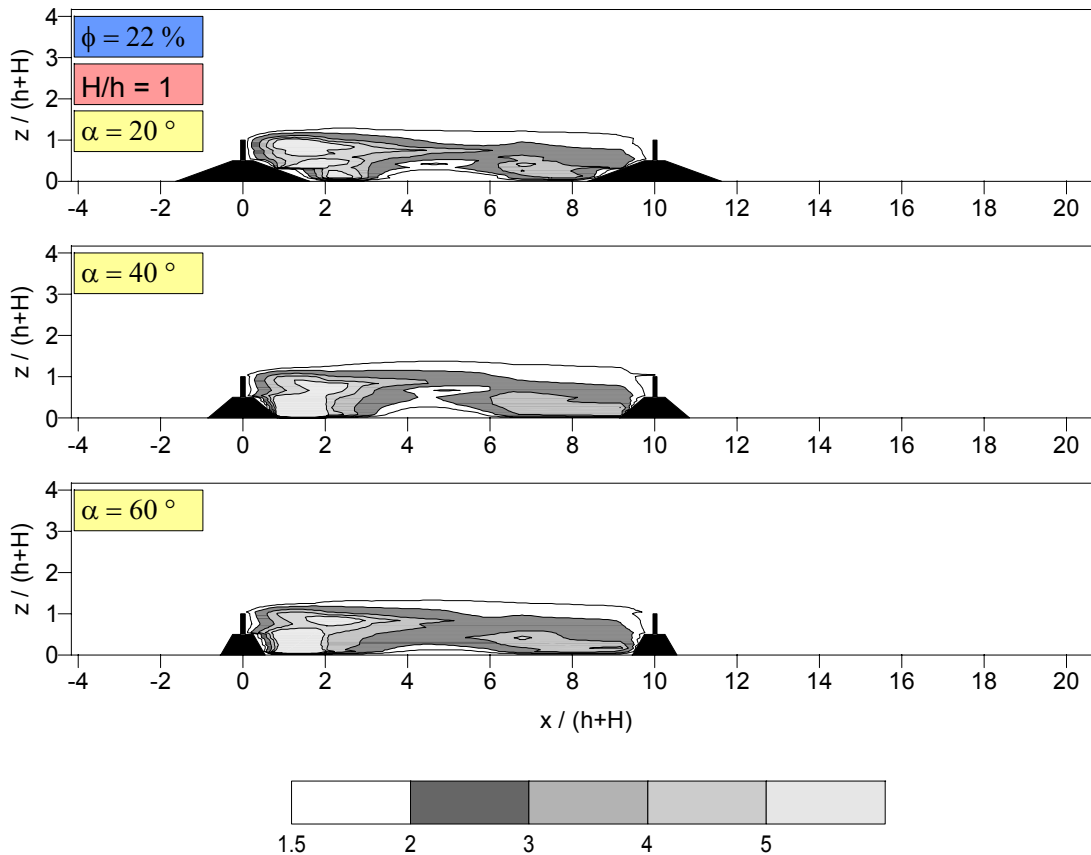
Windschutzparameter nach Gandemer

$$f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$$

Anlage 62:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 6 \cdot (h+H)$)

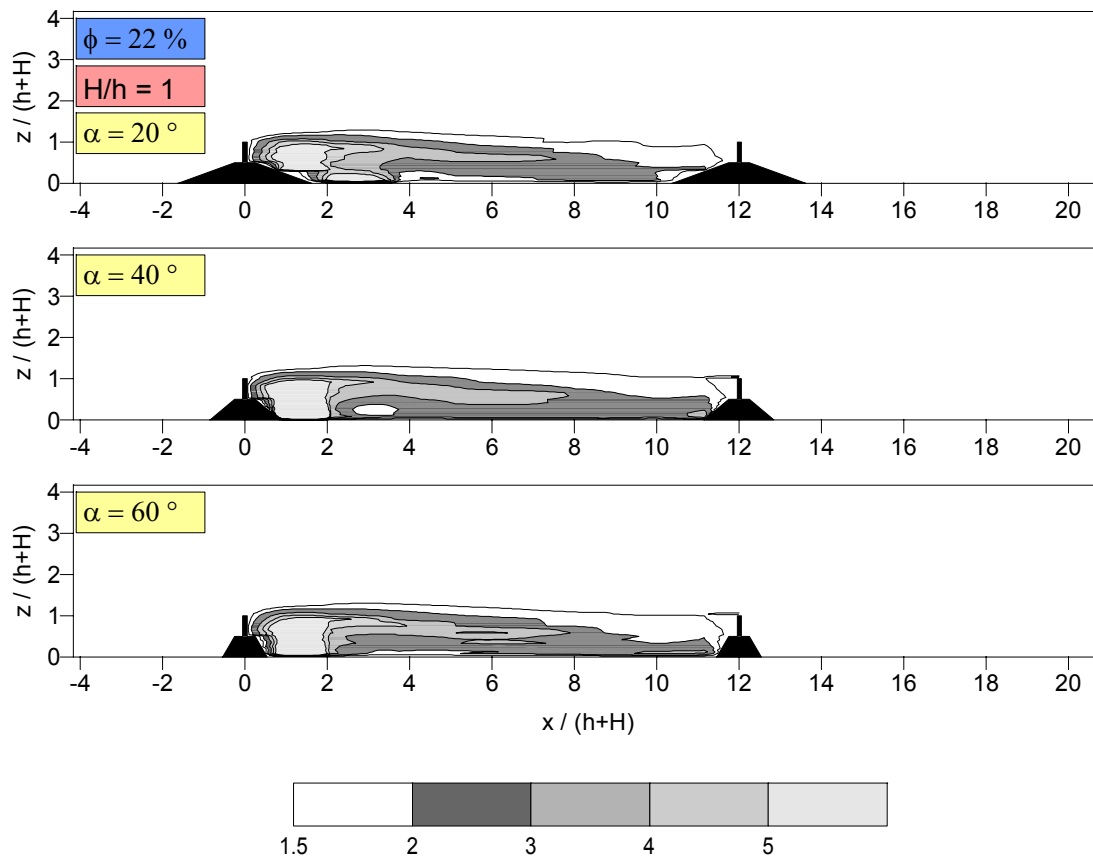


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 63:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

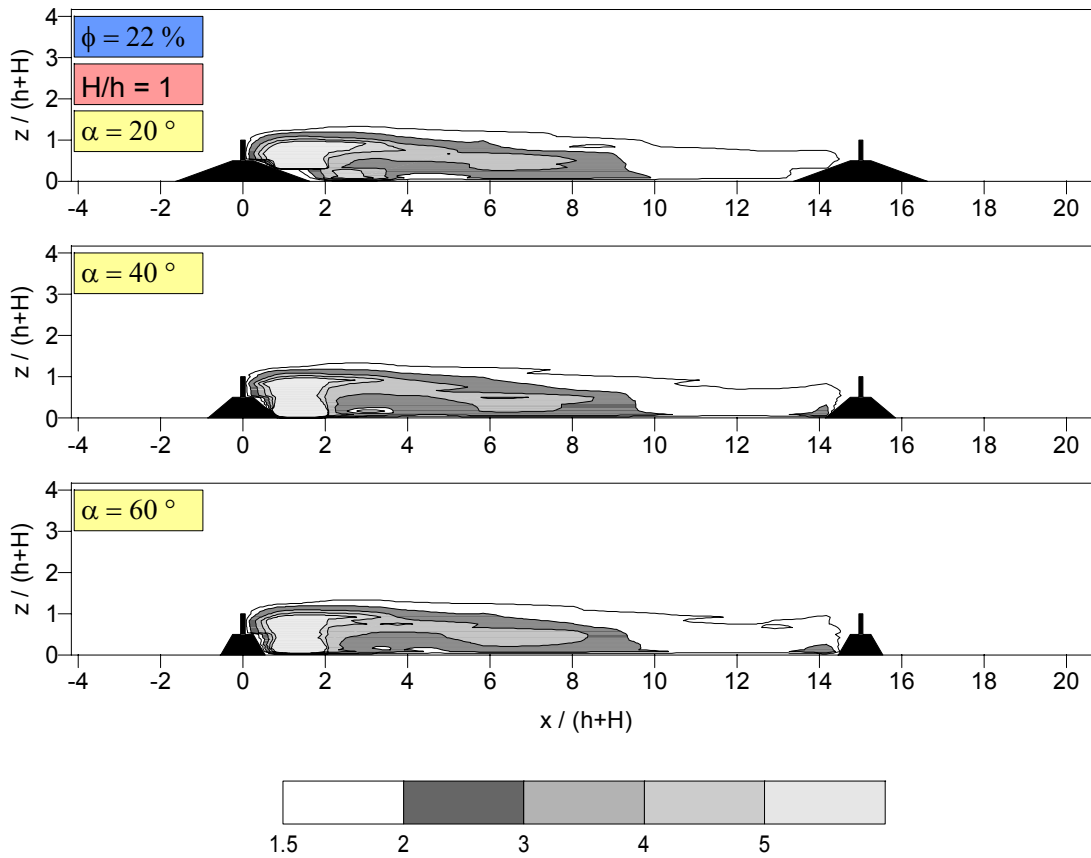


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 64:

Isolinen des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 12 \cdot (h+H)$)



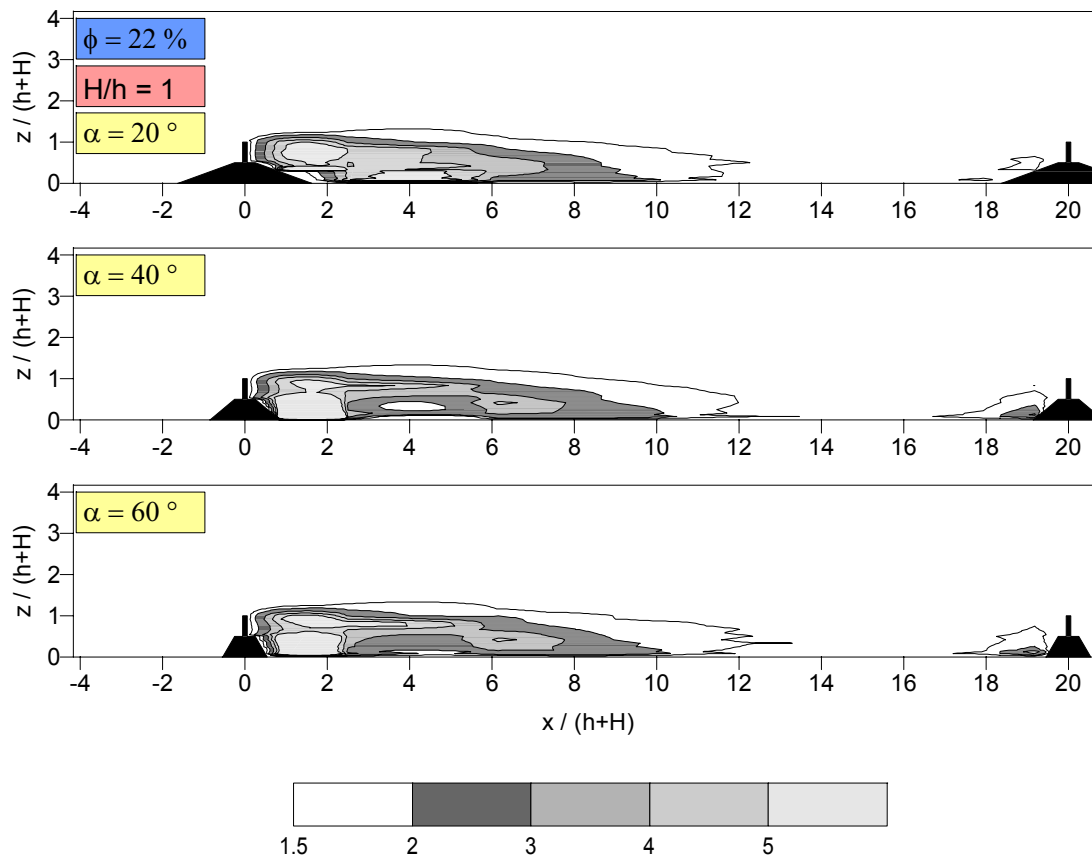
Windschutzparameter nach Gandemer

$$f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$$

Anlage 65:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)



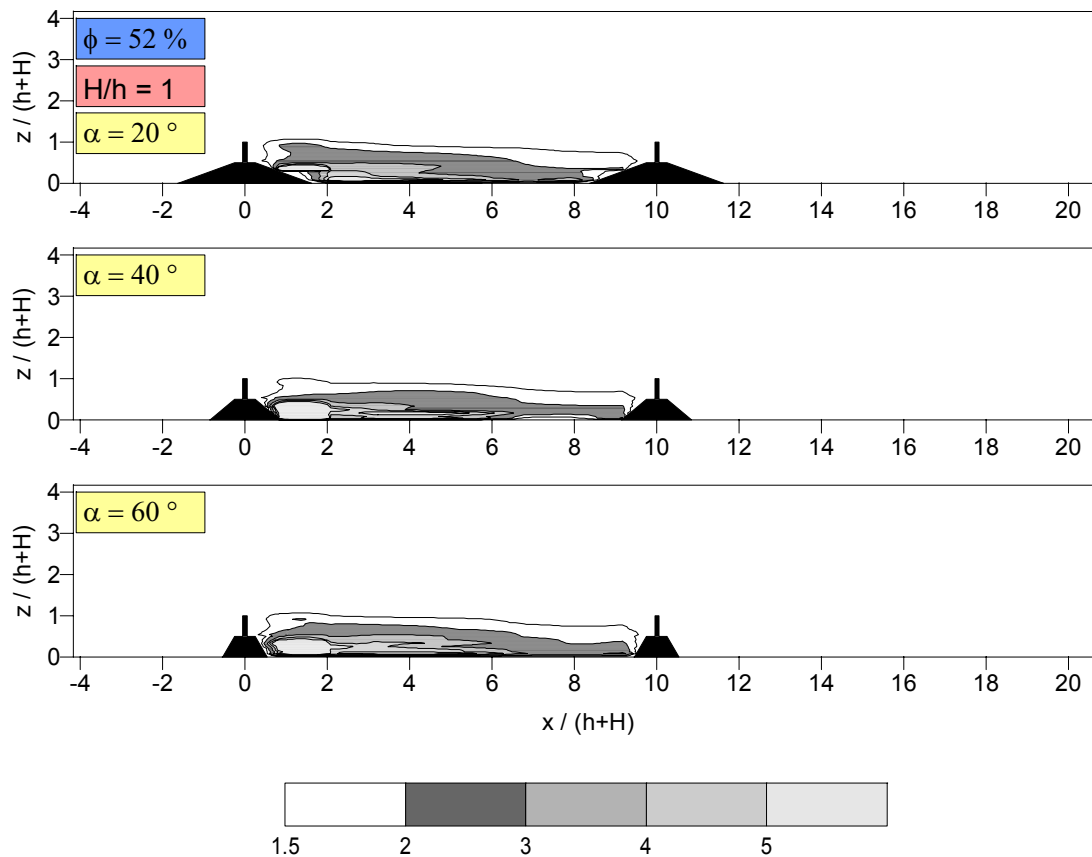
Windschutzparameter nach Gandemer

$$f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$$

Anlage 66:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)



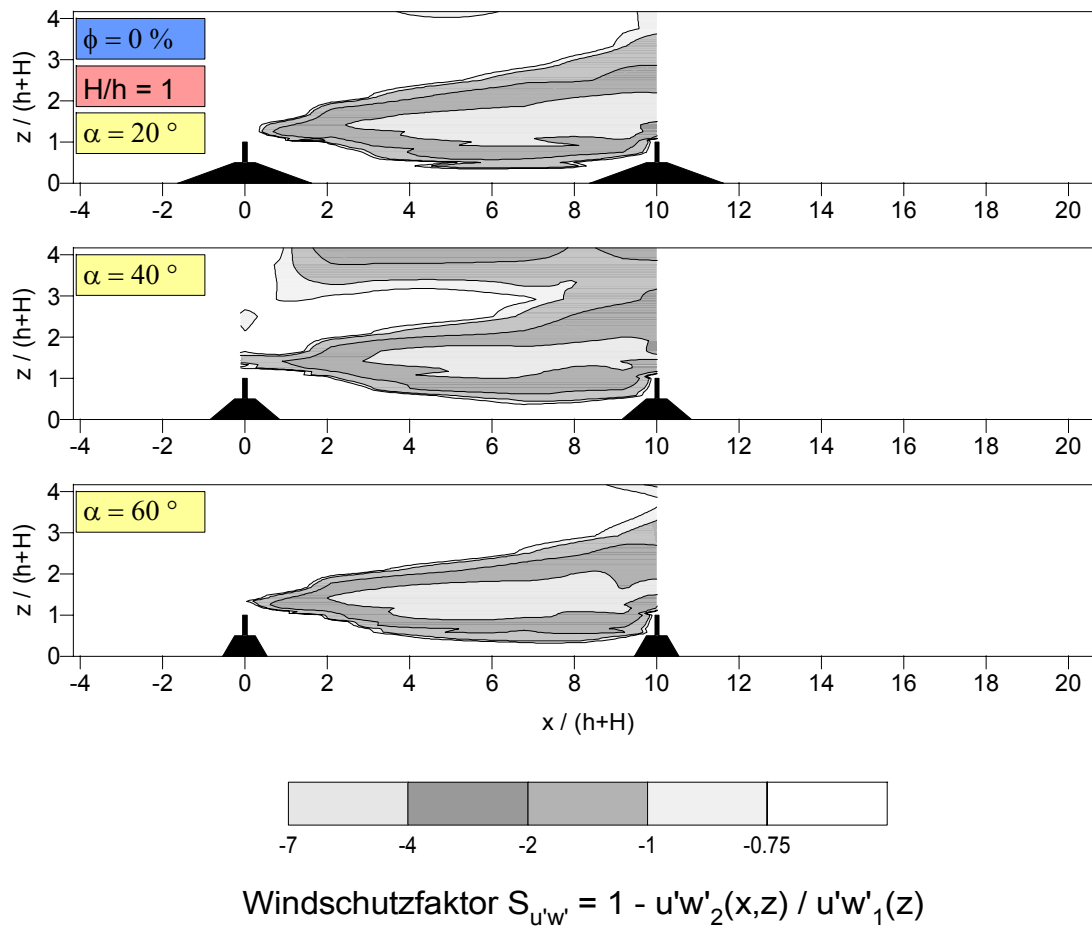
Windschutzparameter nach Gandemer

$$f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$$

Anlage 67:

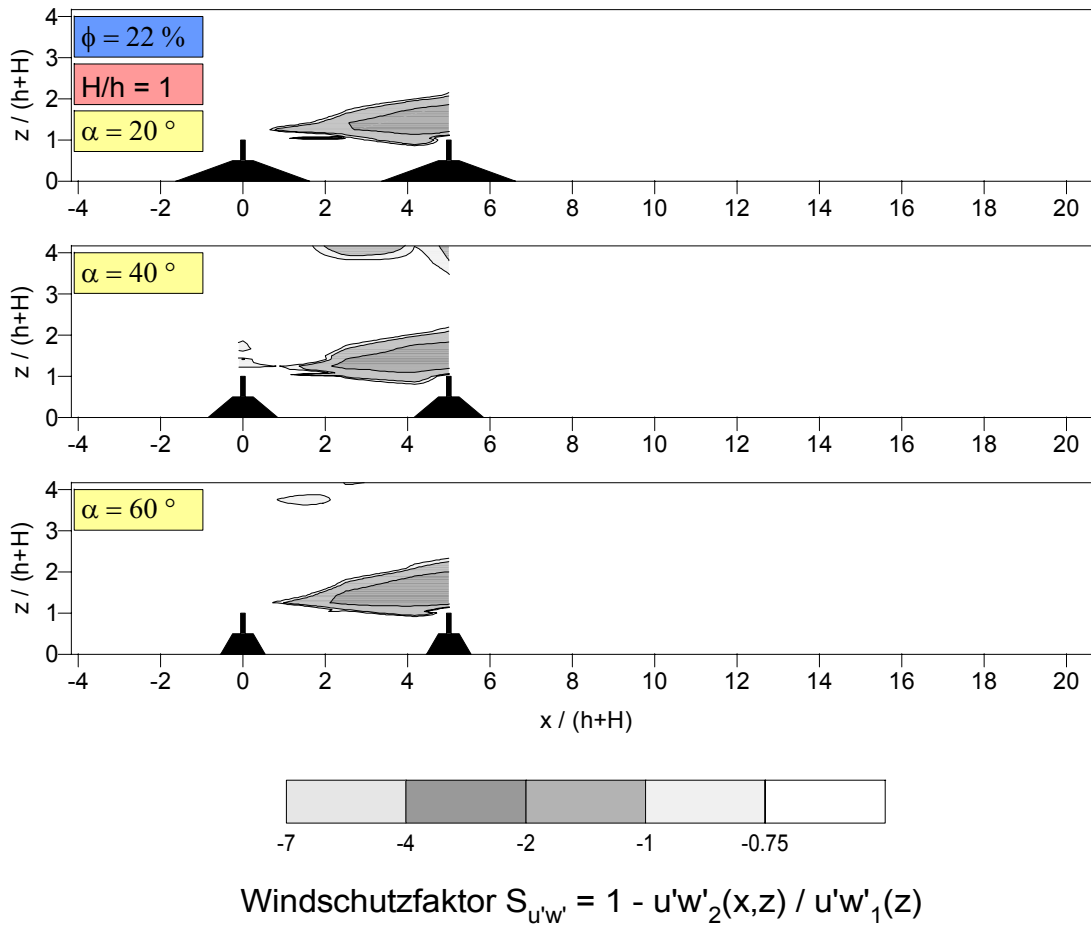
Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 52 \%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

**Anlage 68:**

Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

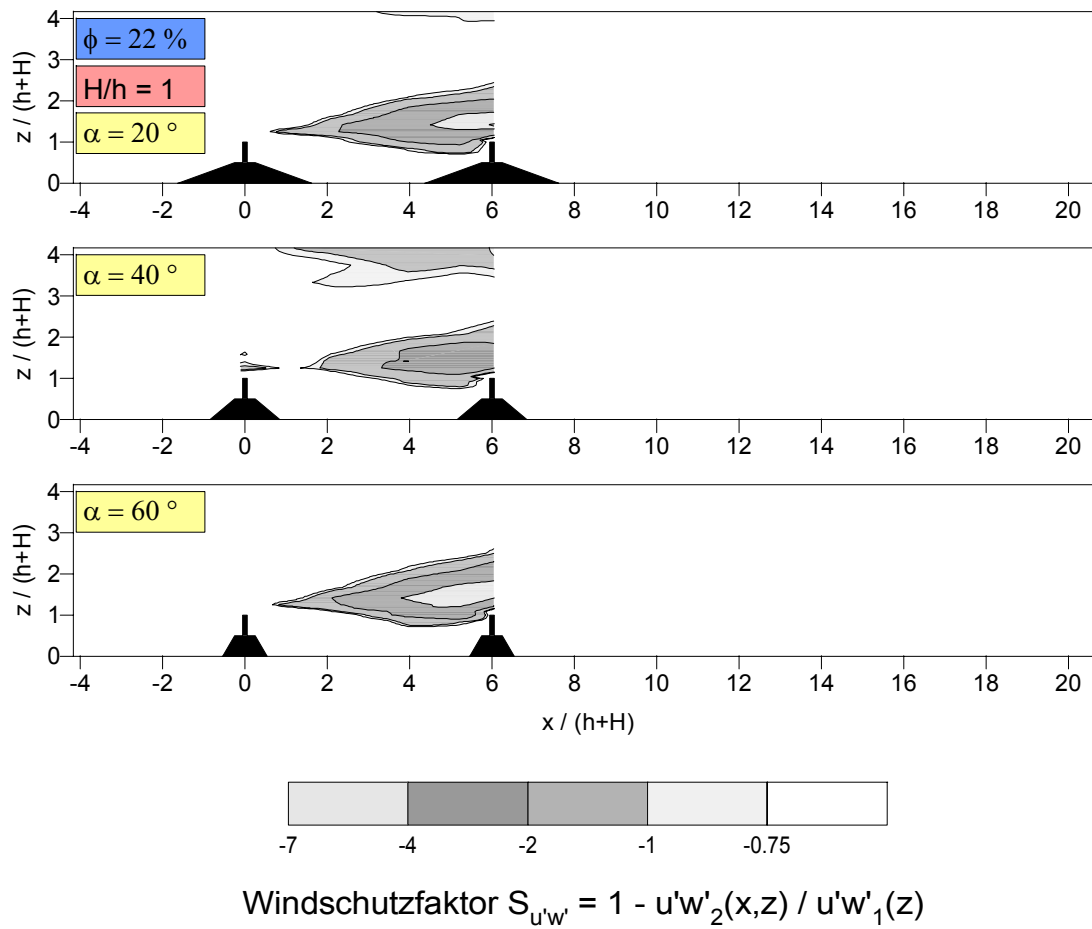
(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 0 \%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)



Anlage 69:

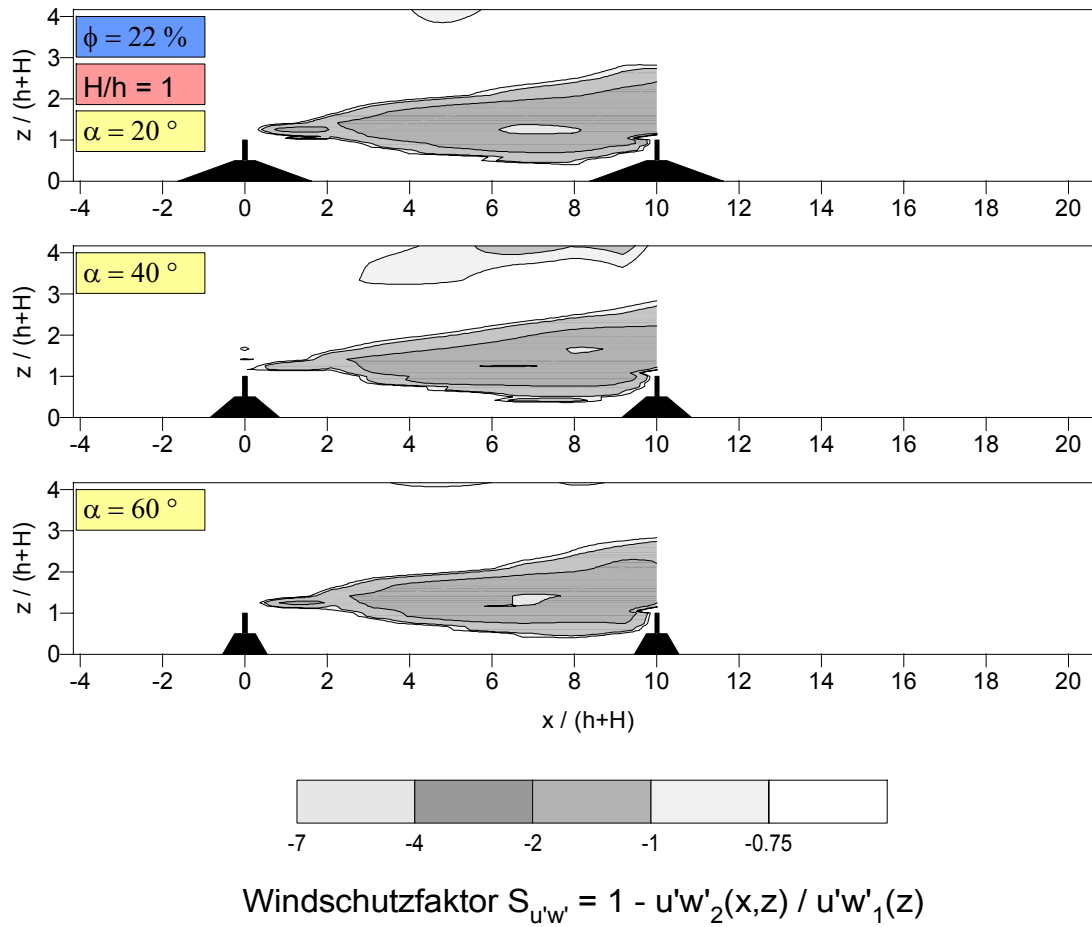
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)

**Anlage 70:**

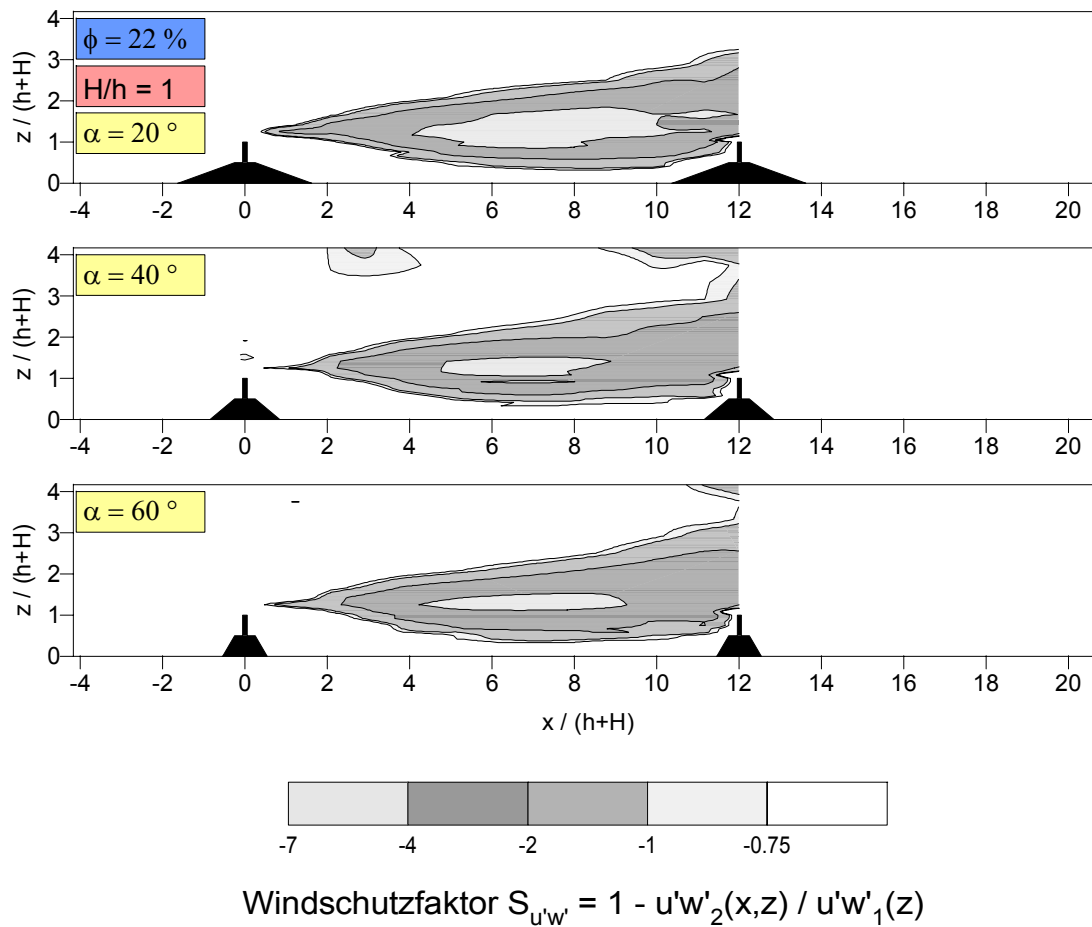
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 6 \cdot (h+H)$)

**Anlage 71:**

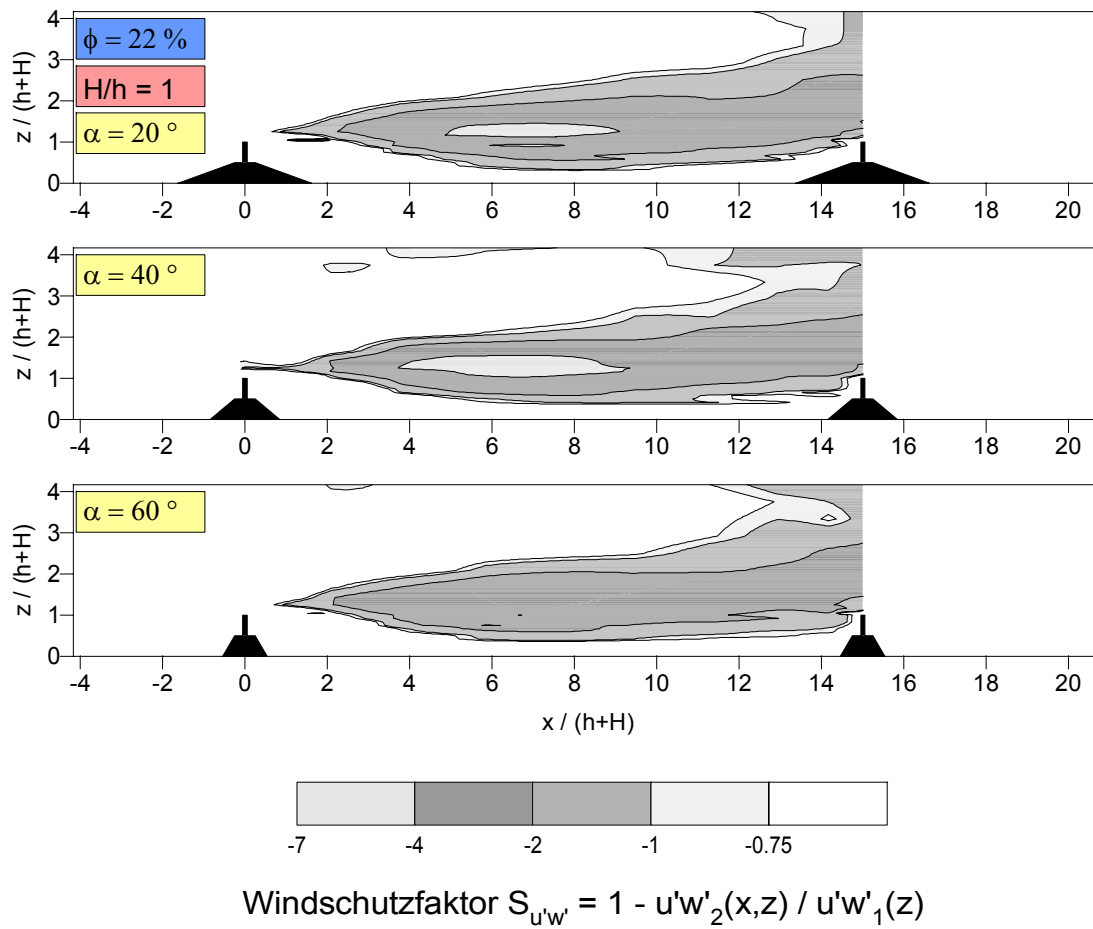
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

**Anlage 72:**

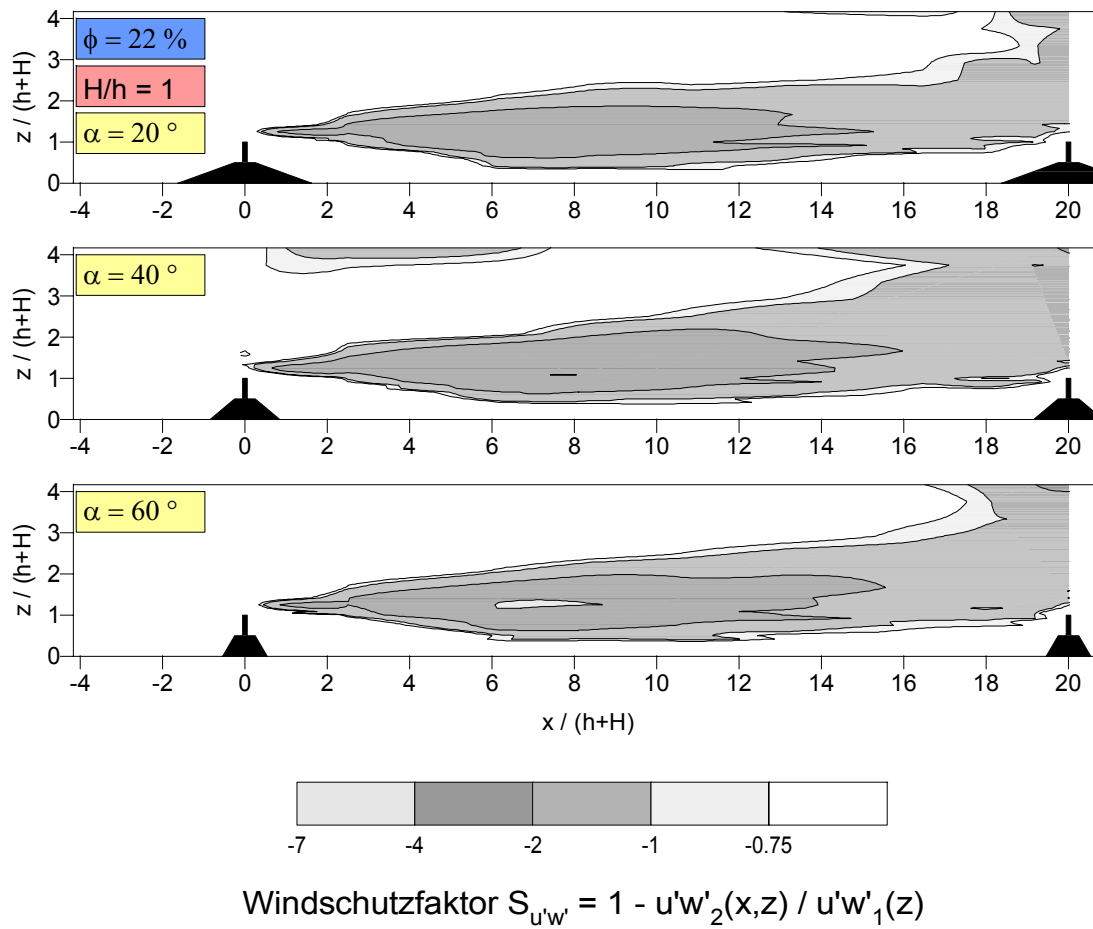
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 12 \cdot (h+H)$)

**Anlage 73:**

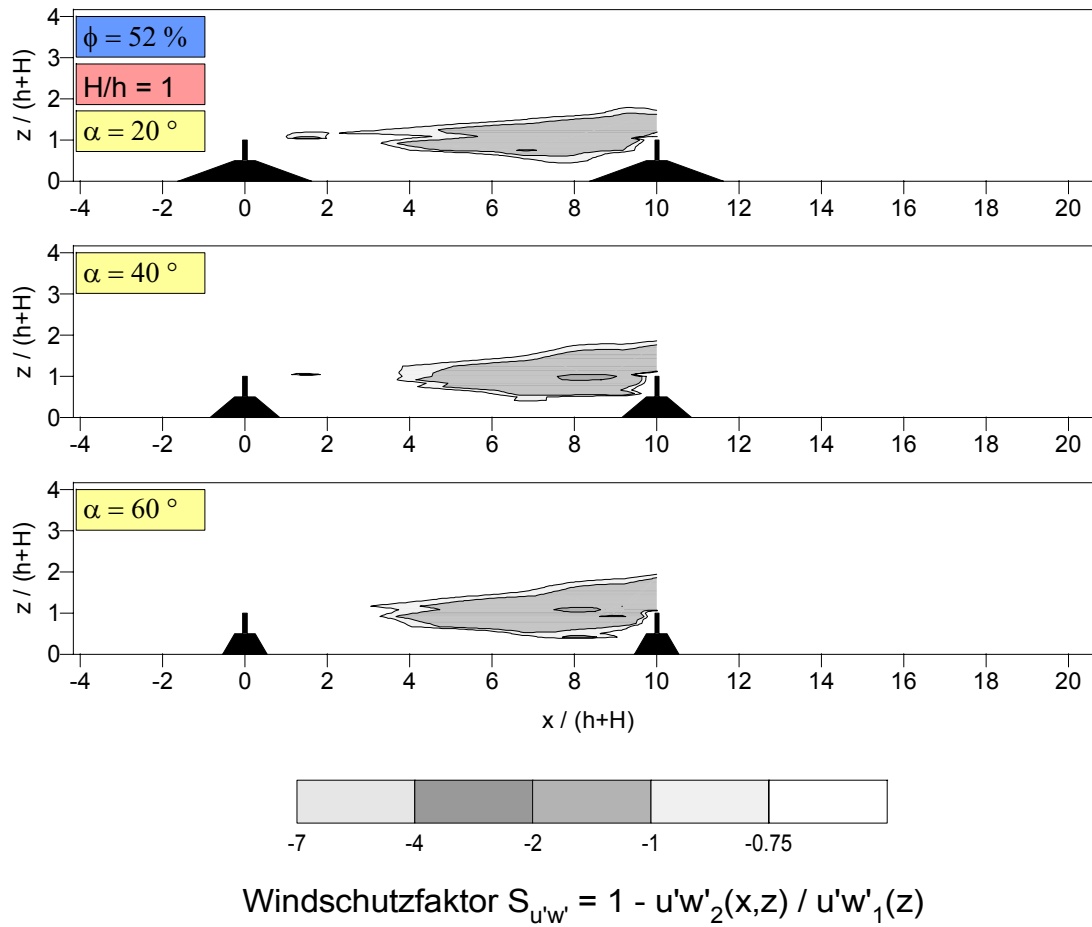
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

**Anlage 74:**

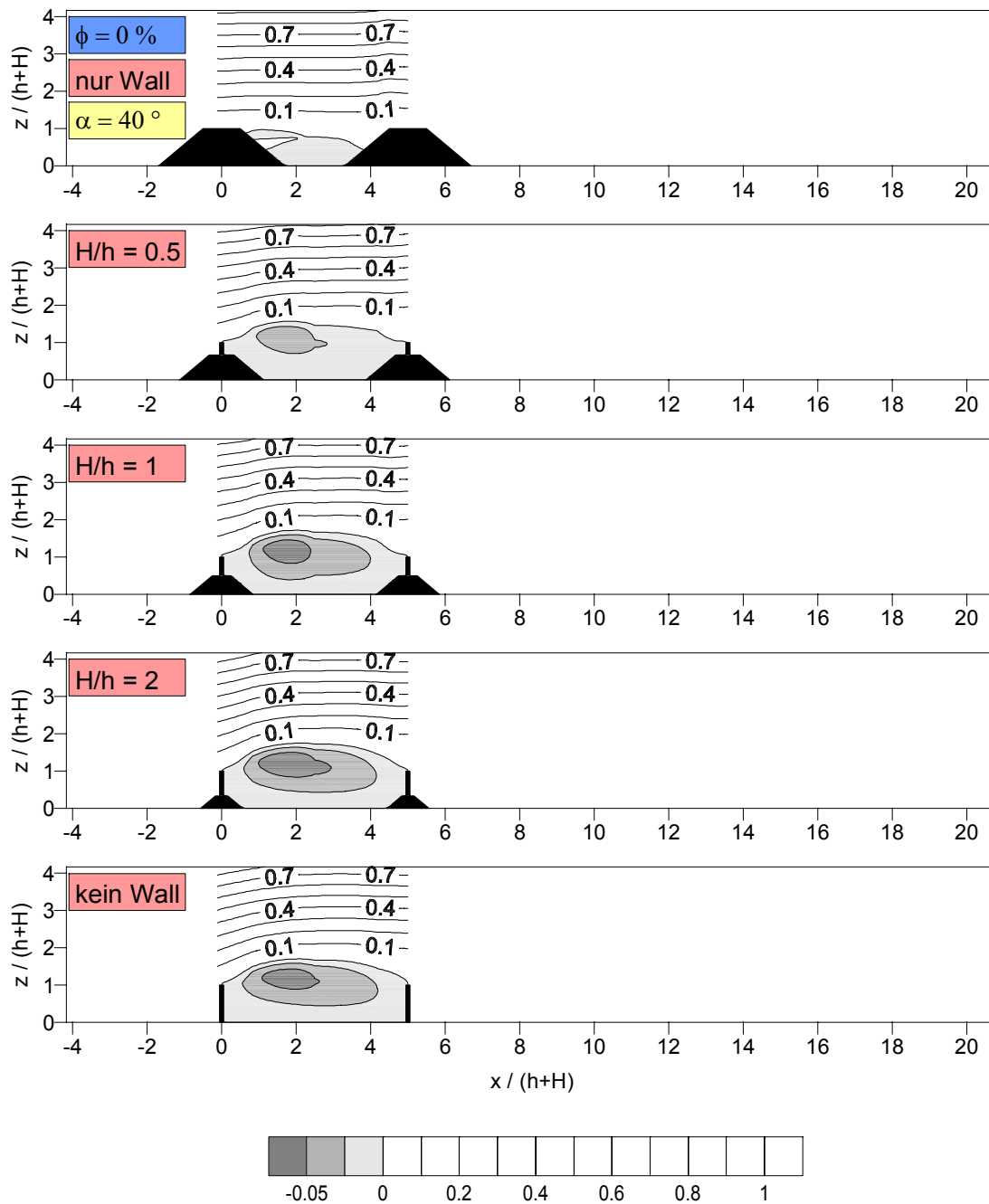
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 22\%$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)

**Anlage 75:**

Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w'}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Böschungswinkel α .

(Verhältnis Bewuchs-/ Sockelhöhe $H/h = 1$, Porosität $\phi = 52 \%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)



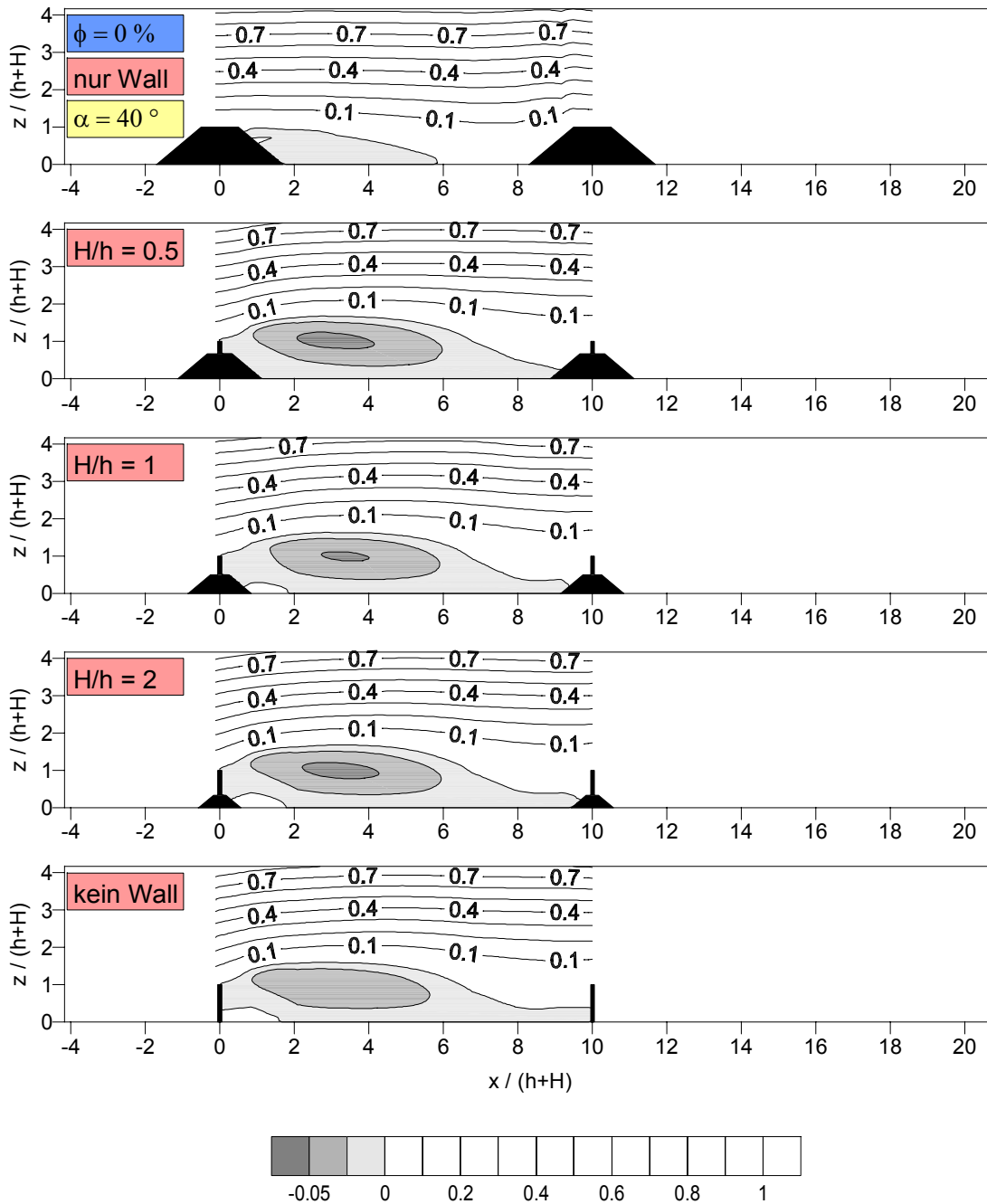
Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 76:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)



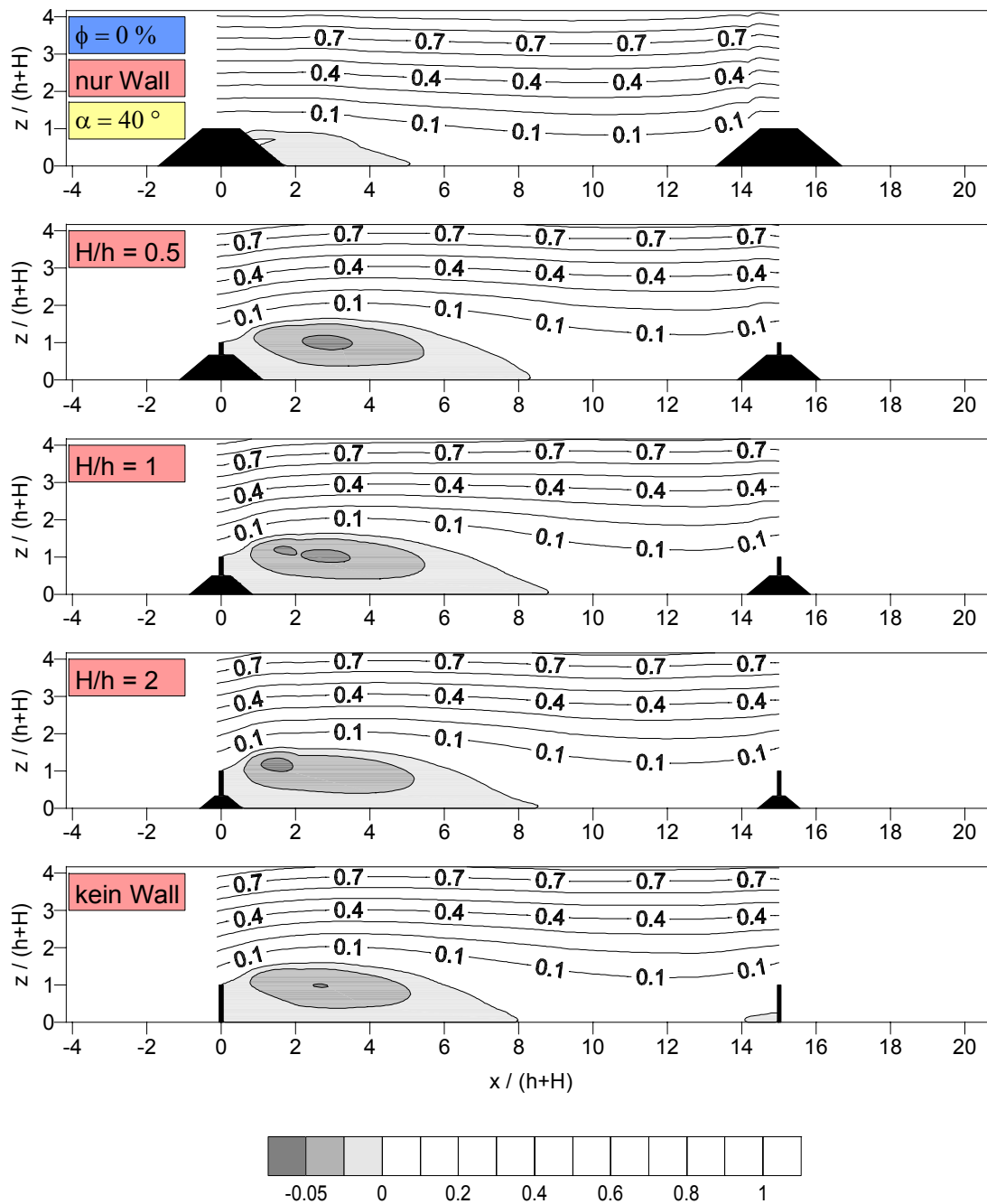
Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 77:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)



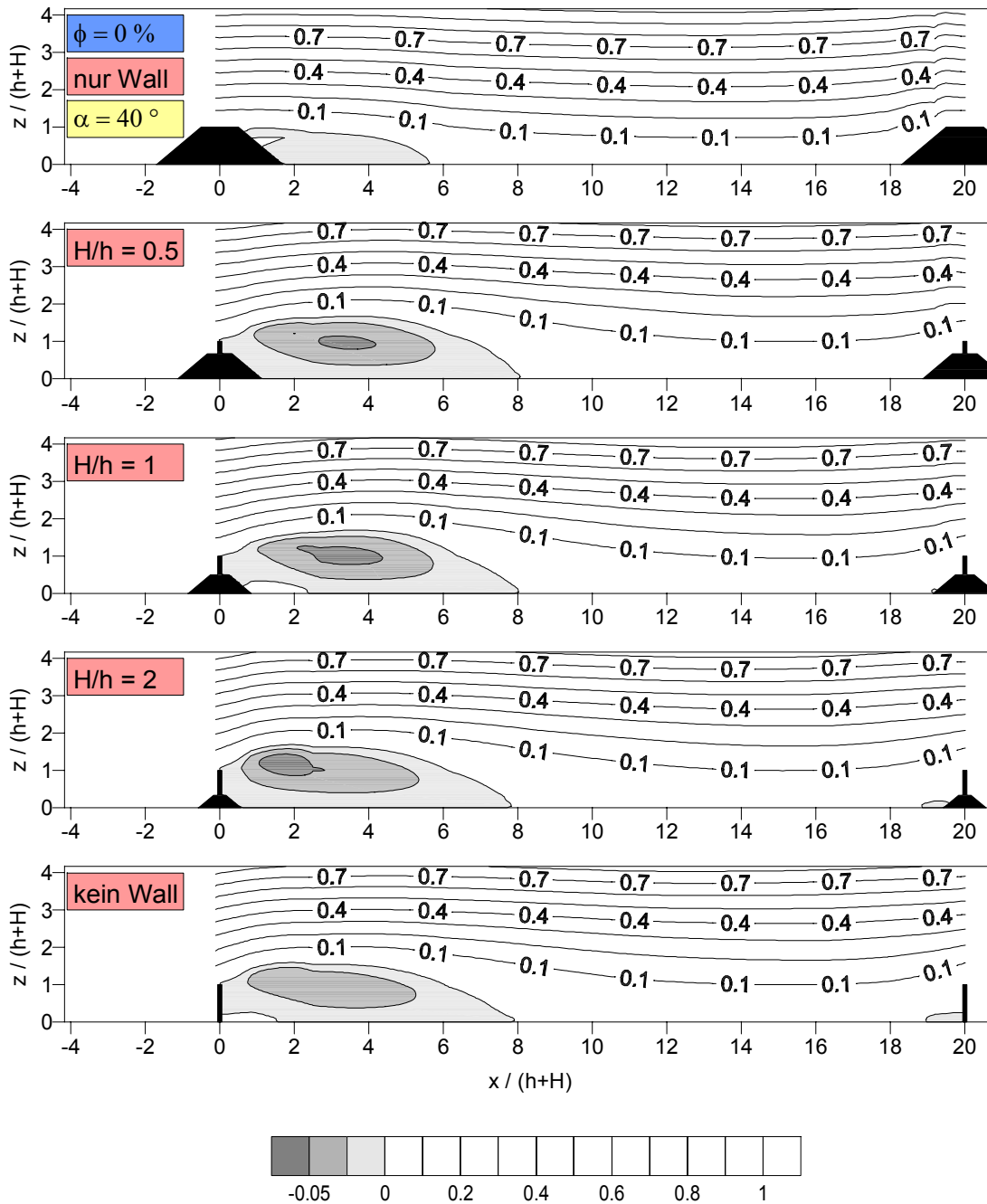
Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 78:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)



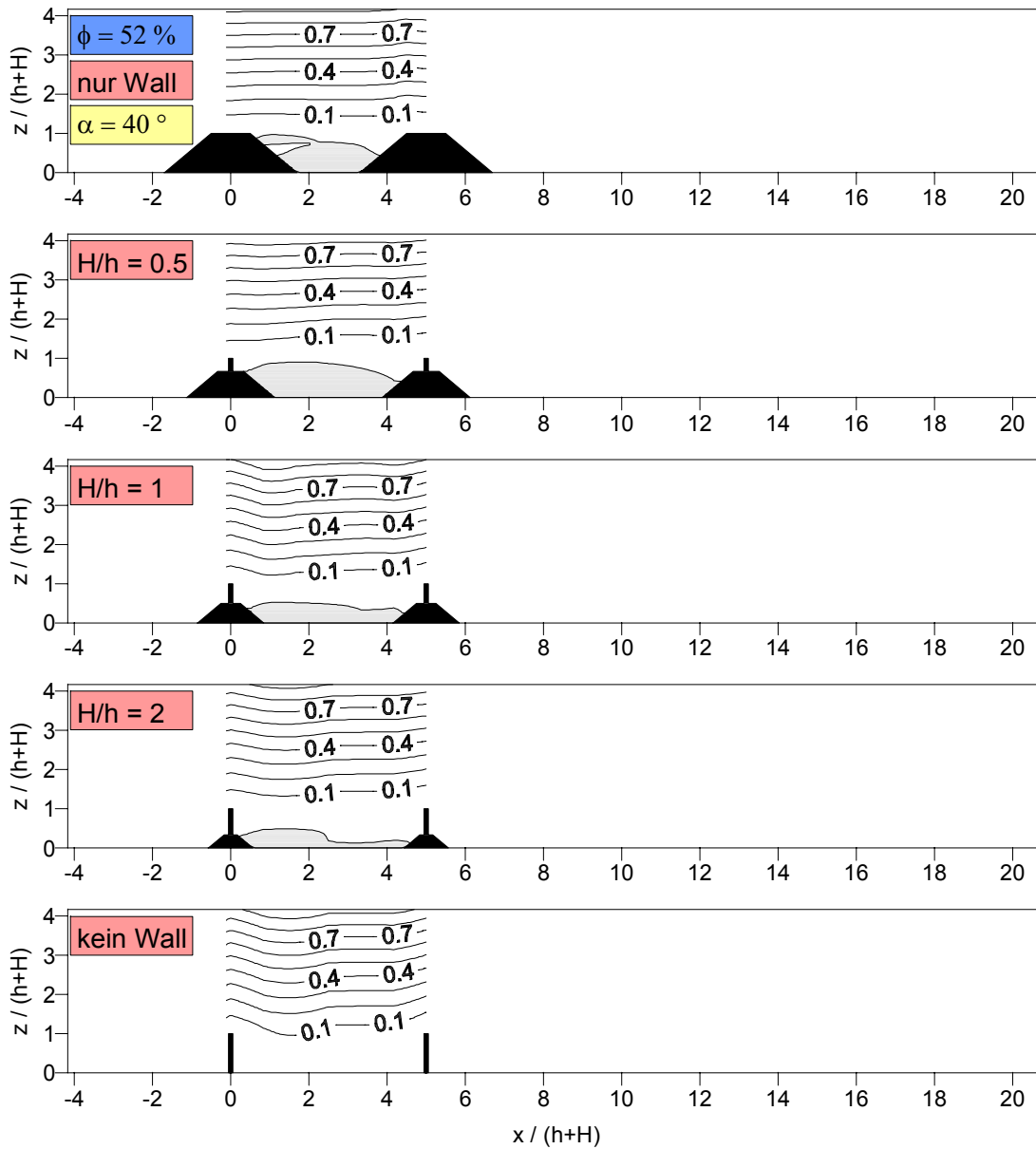
Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 79:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)



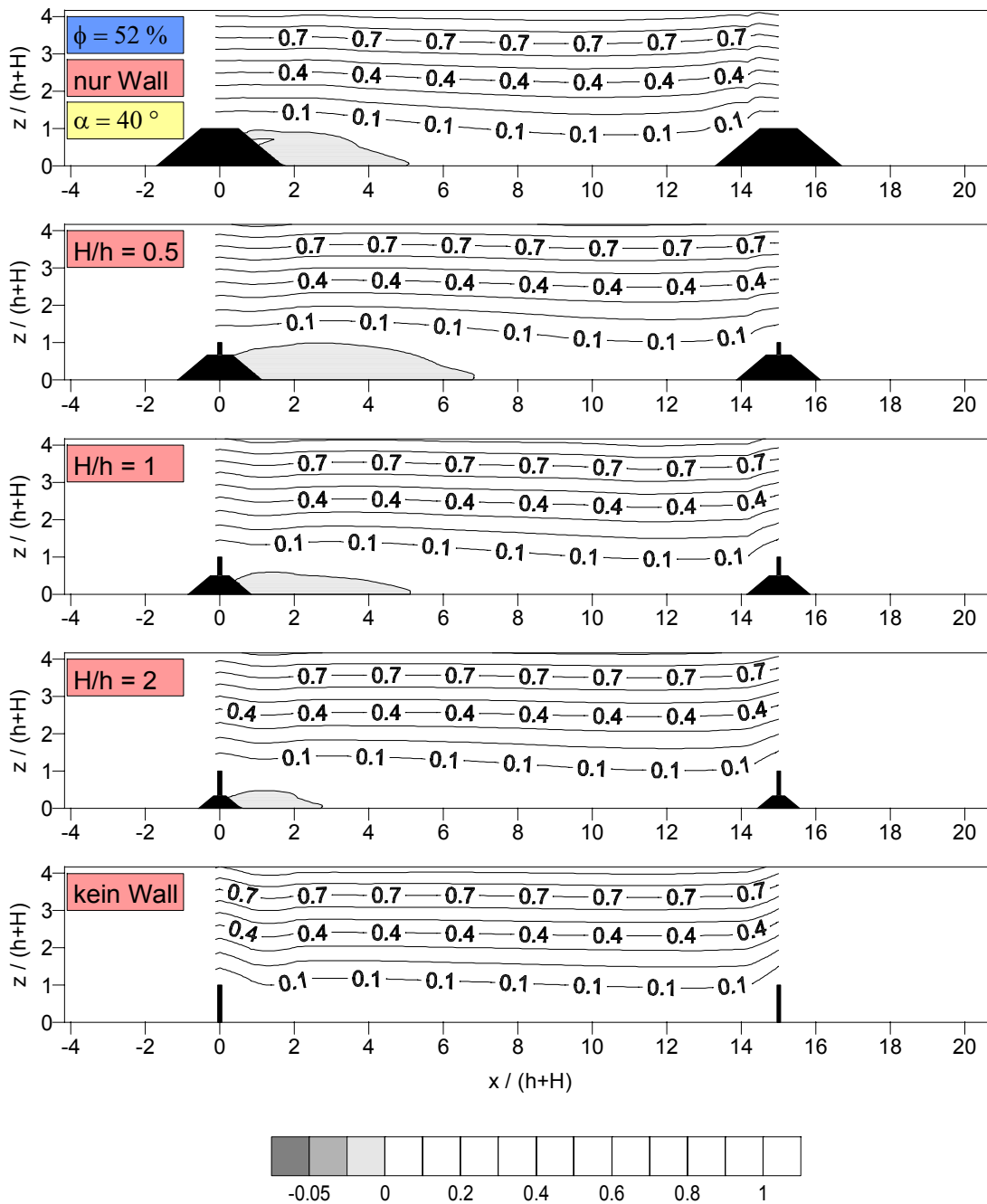
Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{ref}$$

Anlage 80:

Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h.

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)



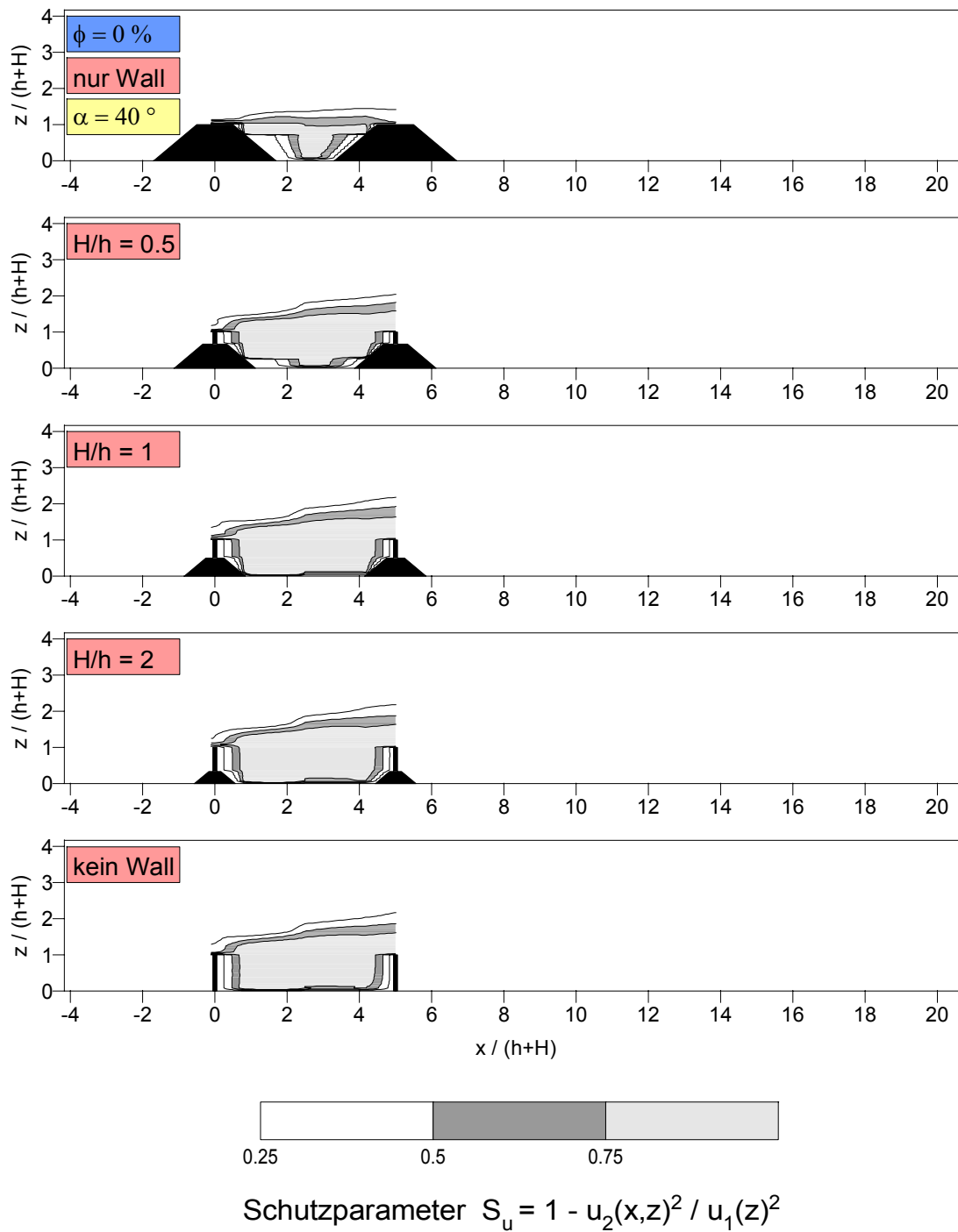
Stromlinien der mittleren Geschwindigkeit

$$\psi = \int_0^{\delta} u(z) dz / \psi_{\text{ref}}$$

Anlage 81:

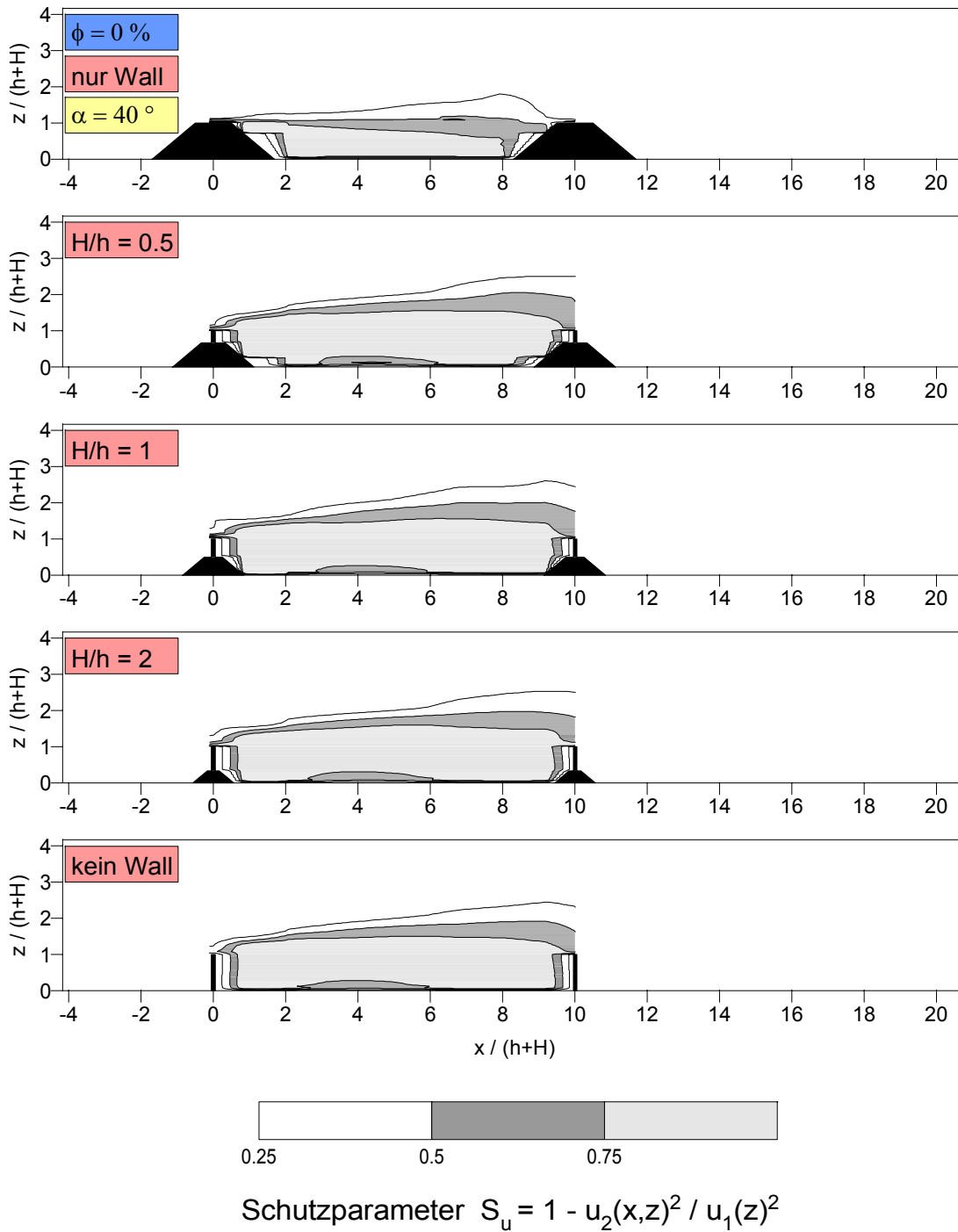
Stromlinien im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

**Anlage 82:**

Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

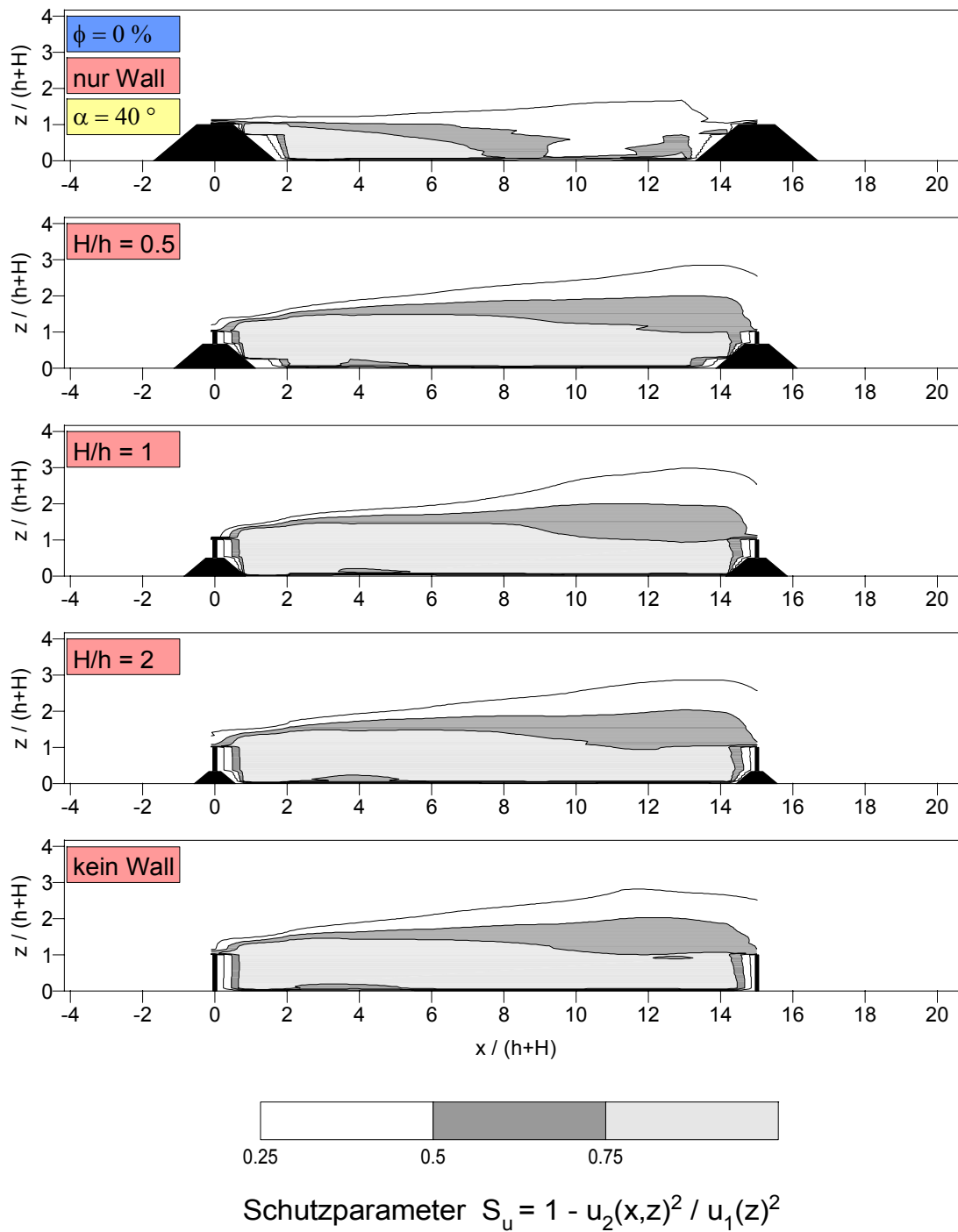
(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)



Anlage 83:

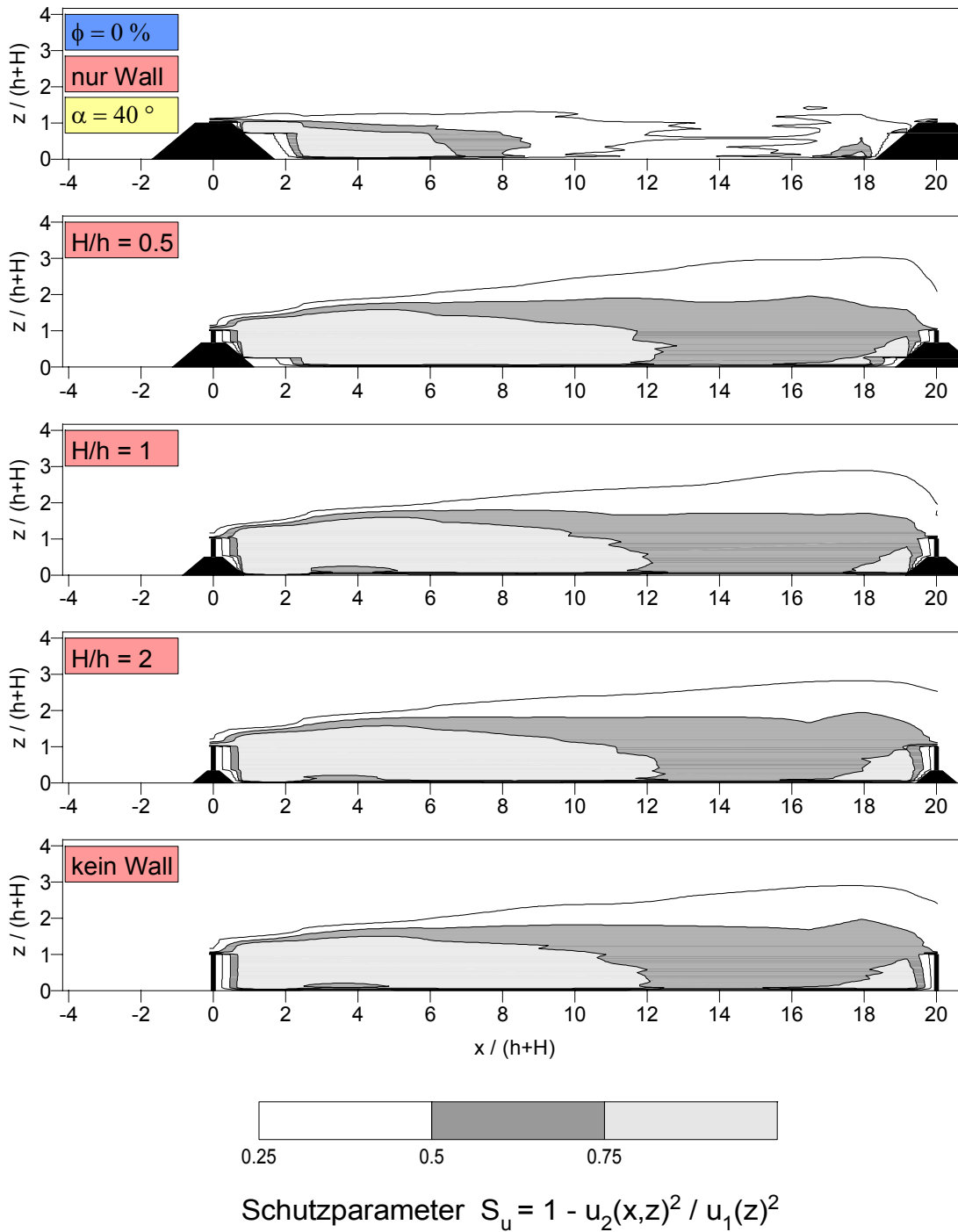
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

**Anlage 84:**

Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

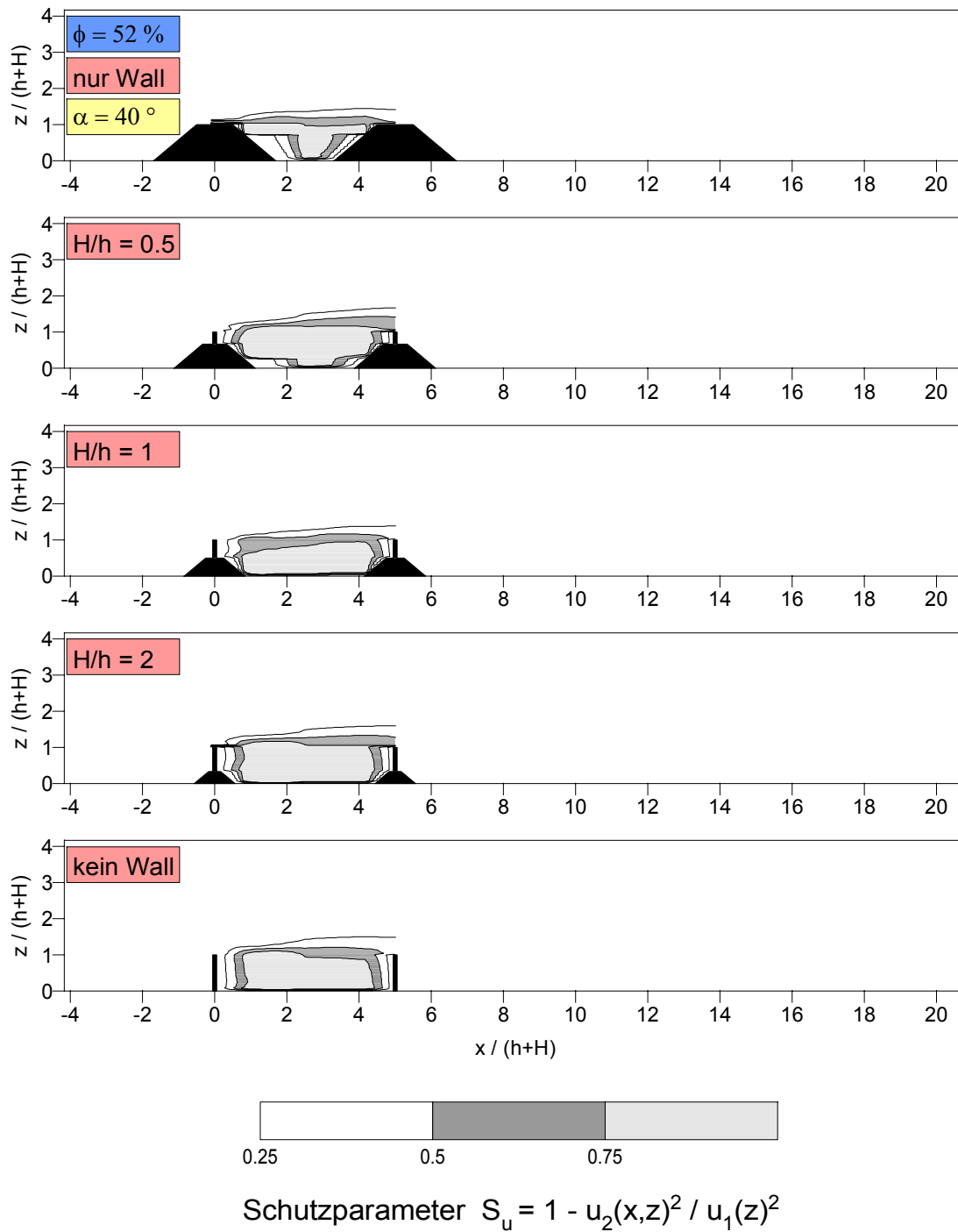
(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)



Anlage 85:

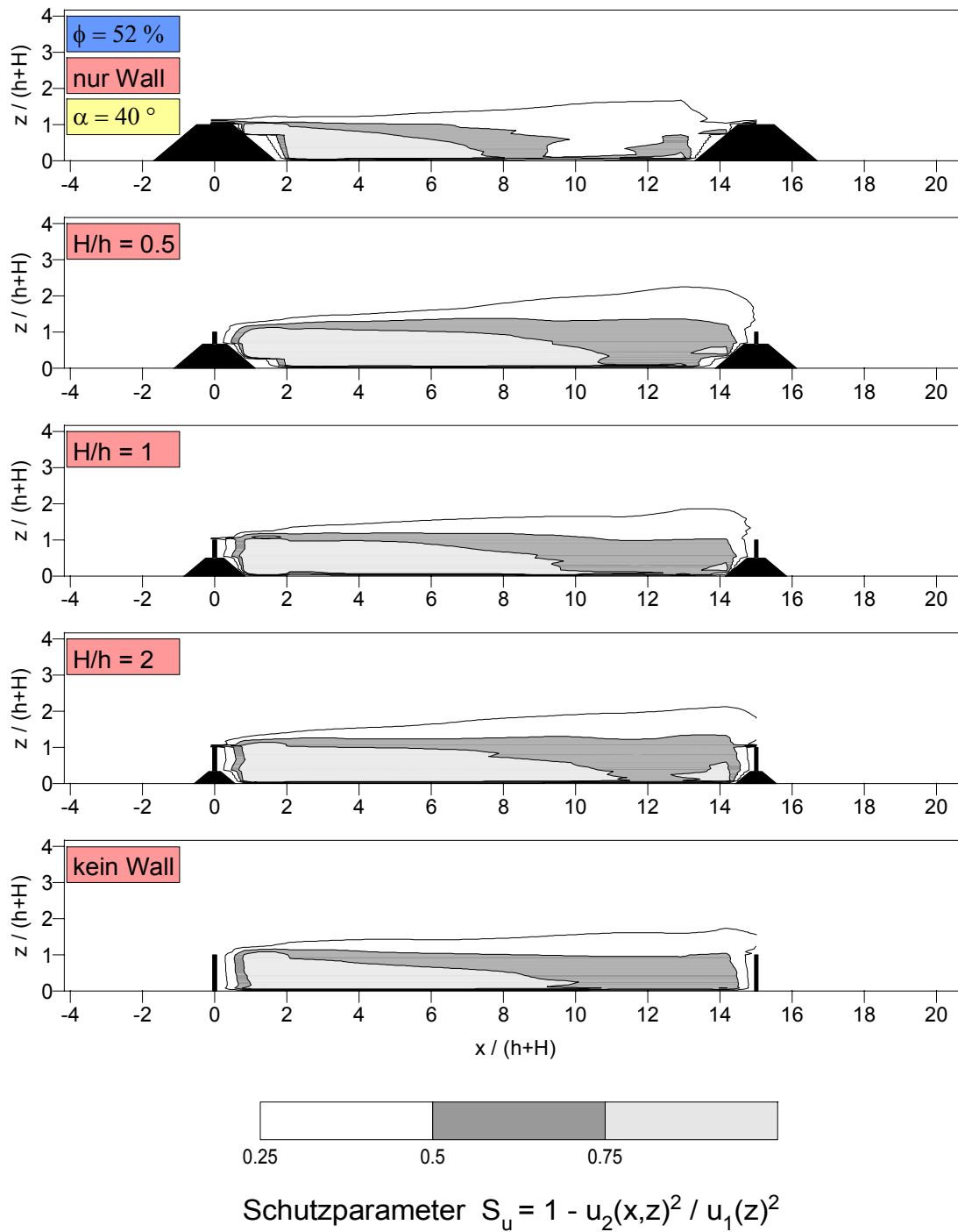
Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)

**Anlage 86:**

Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

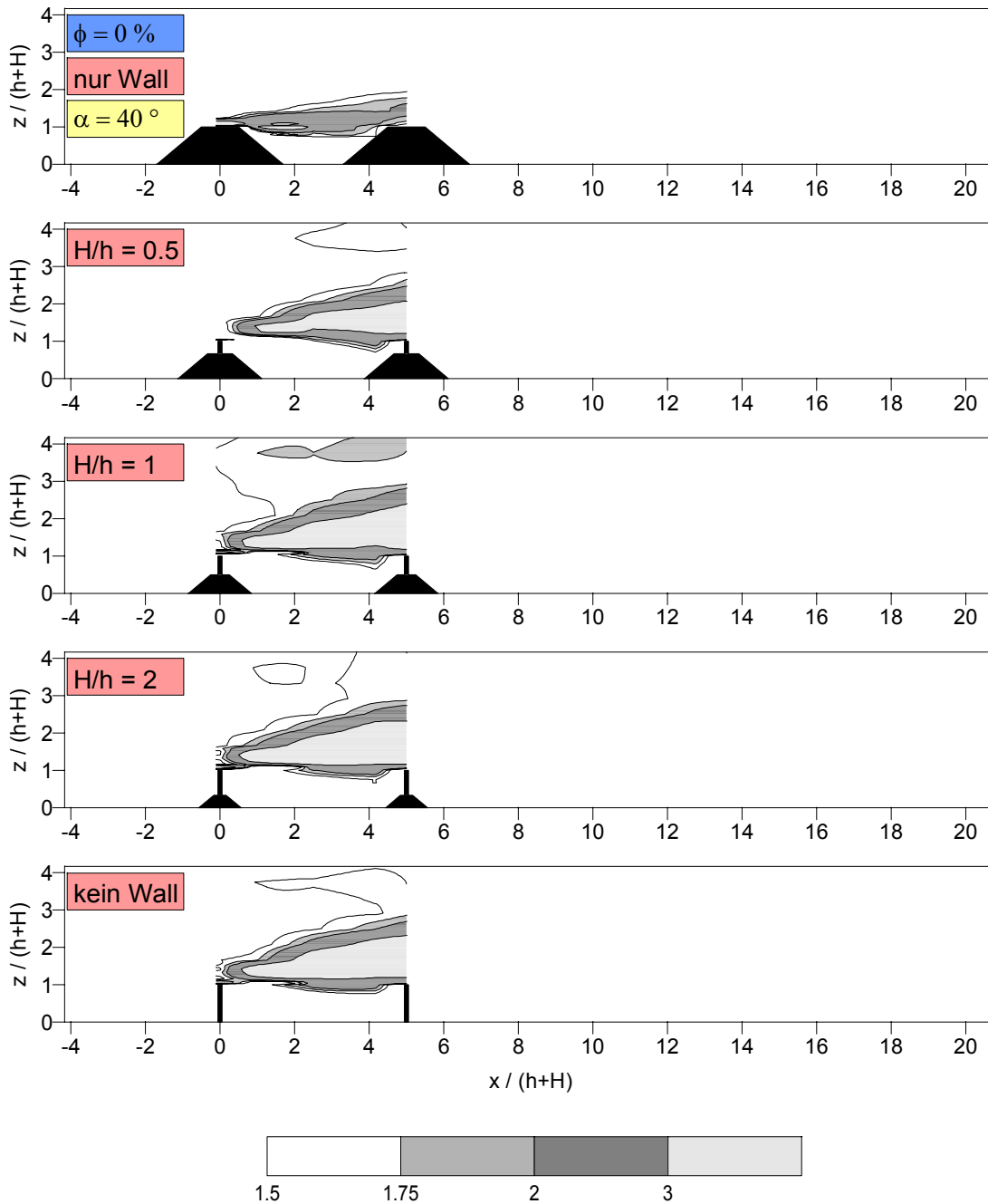
(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)



Anlage 87:

Isolinien des Schutzparameters S_u im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)



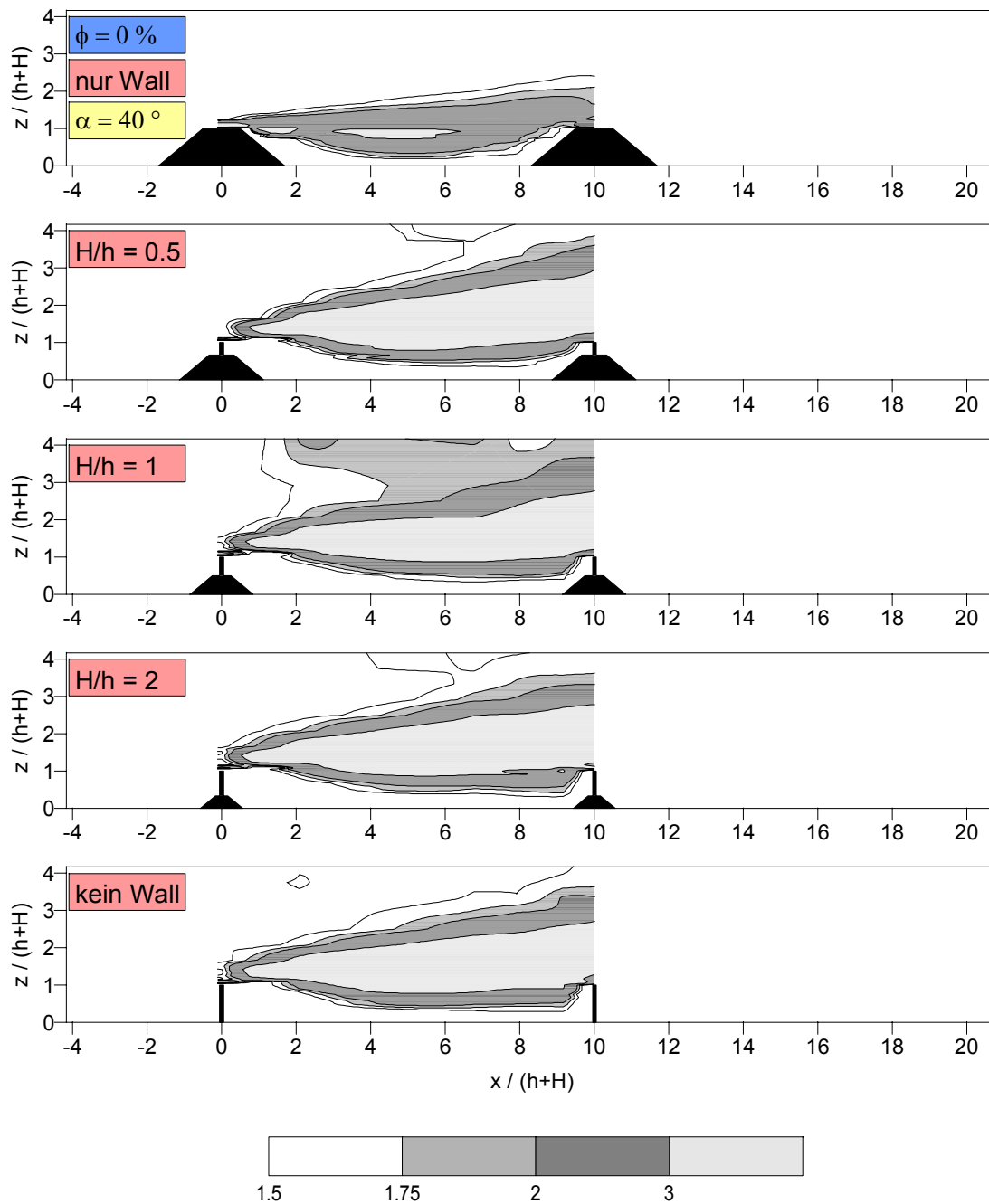
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 88:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)



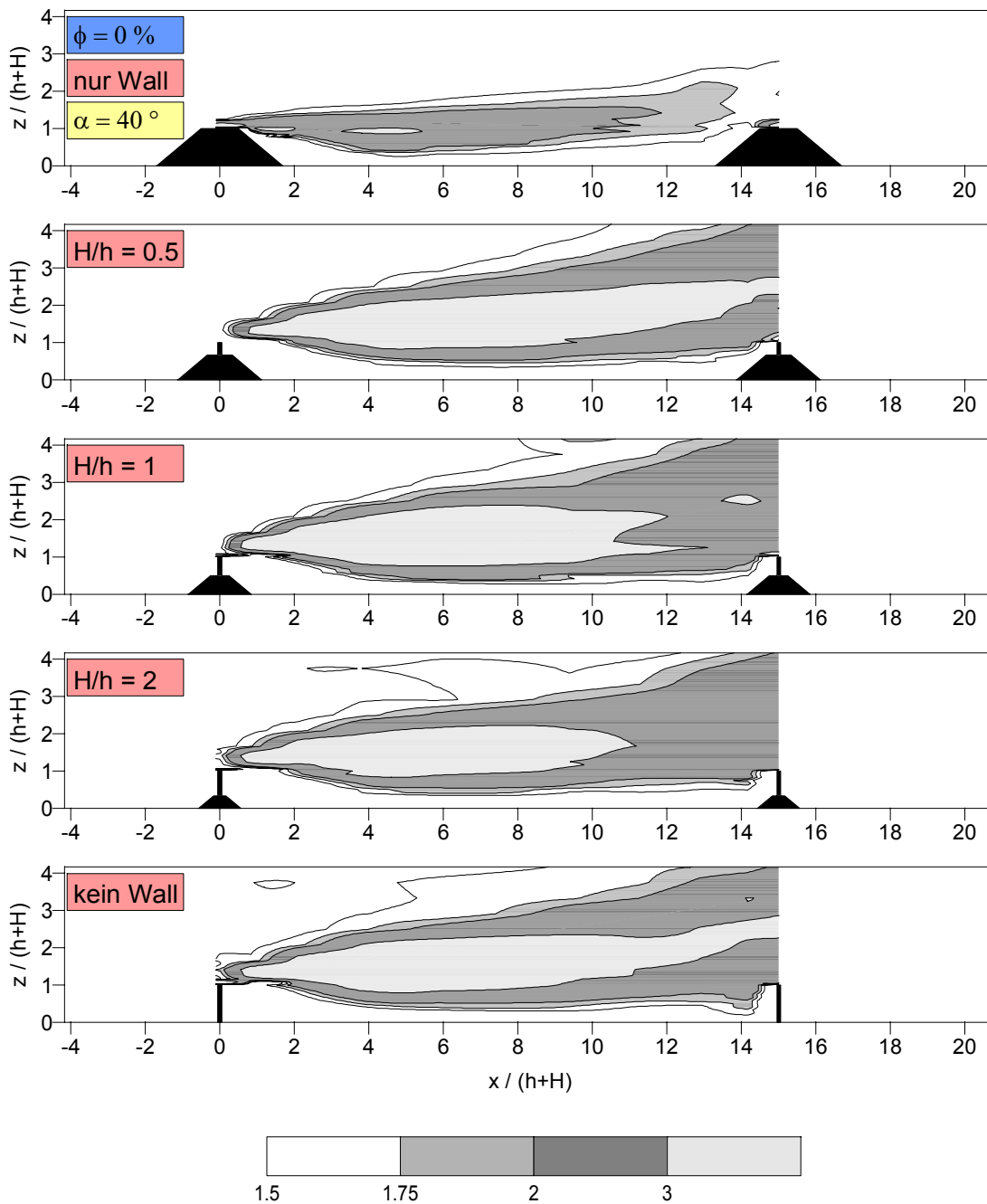
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 89:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0 \%$, Abstand $a = 10 * (h+H)$)



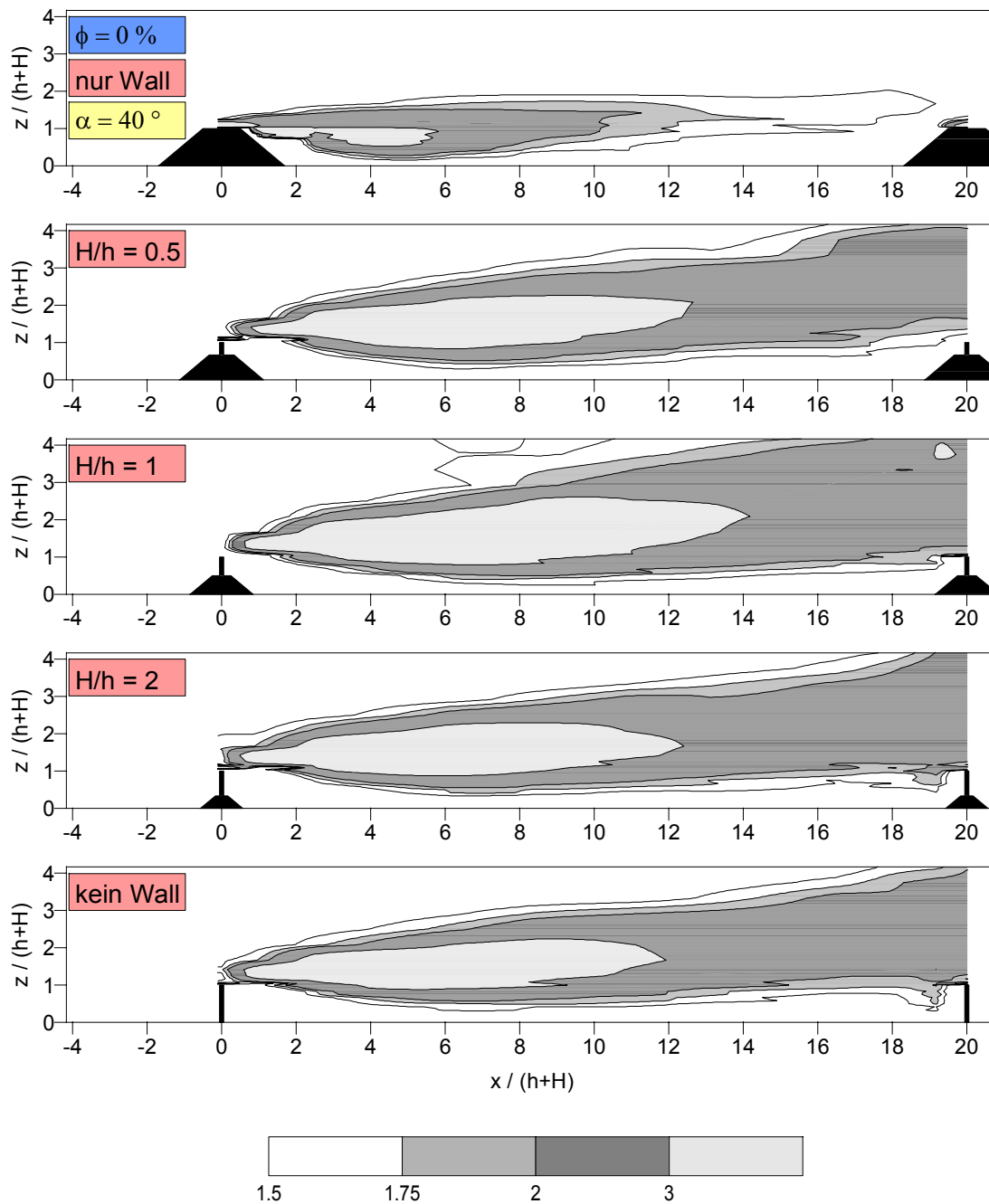
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 90:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)



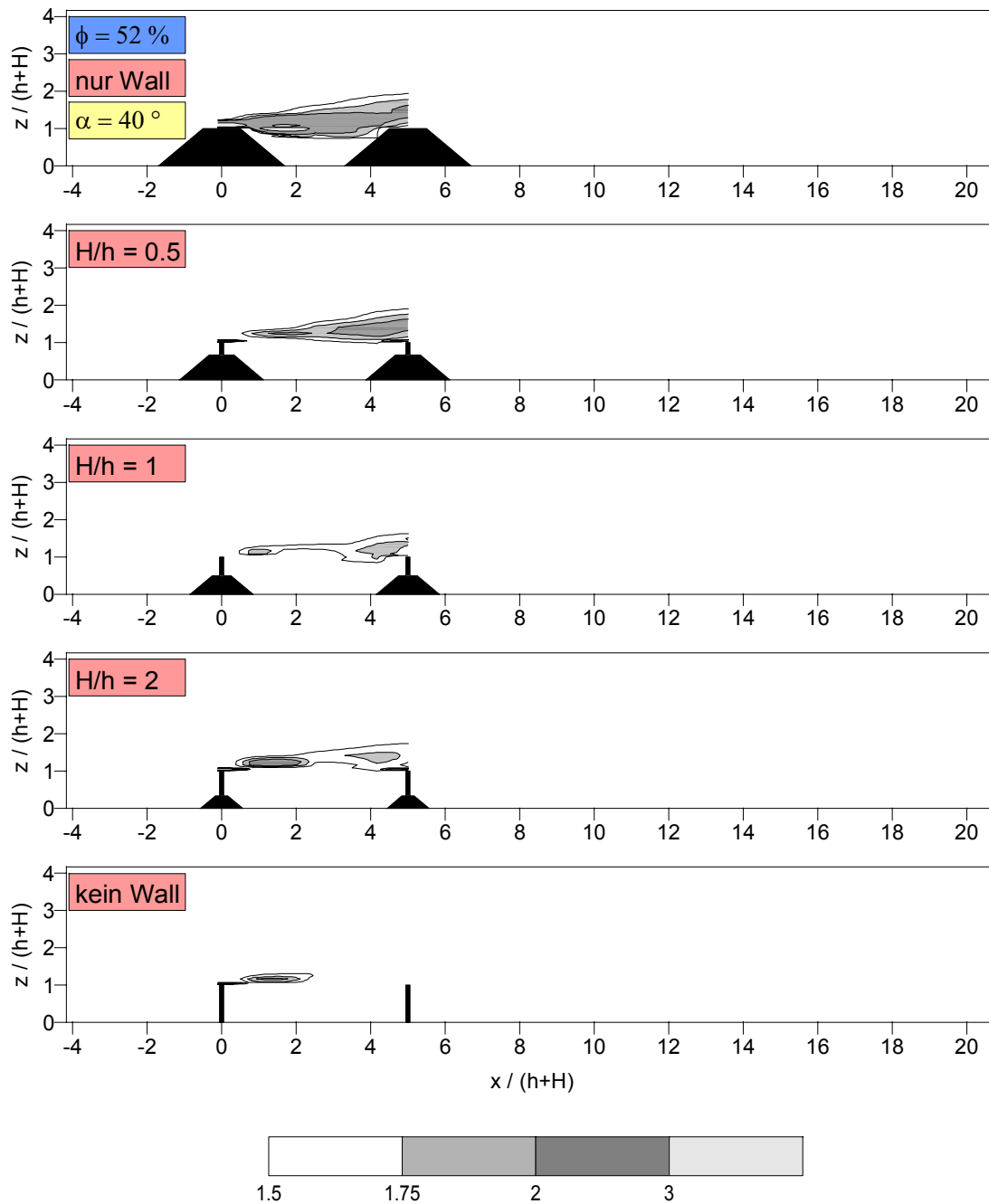
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 91:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)



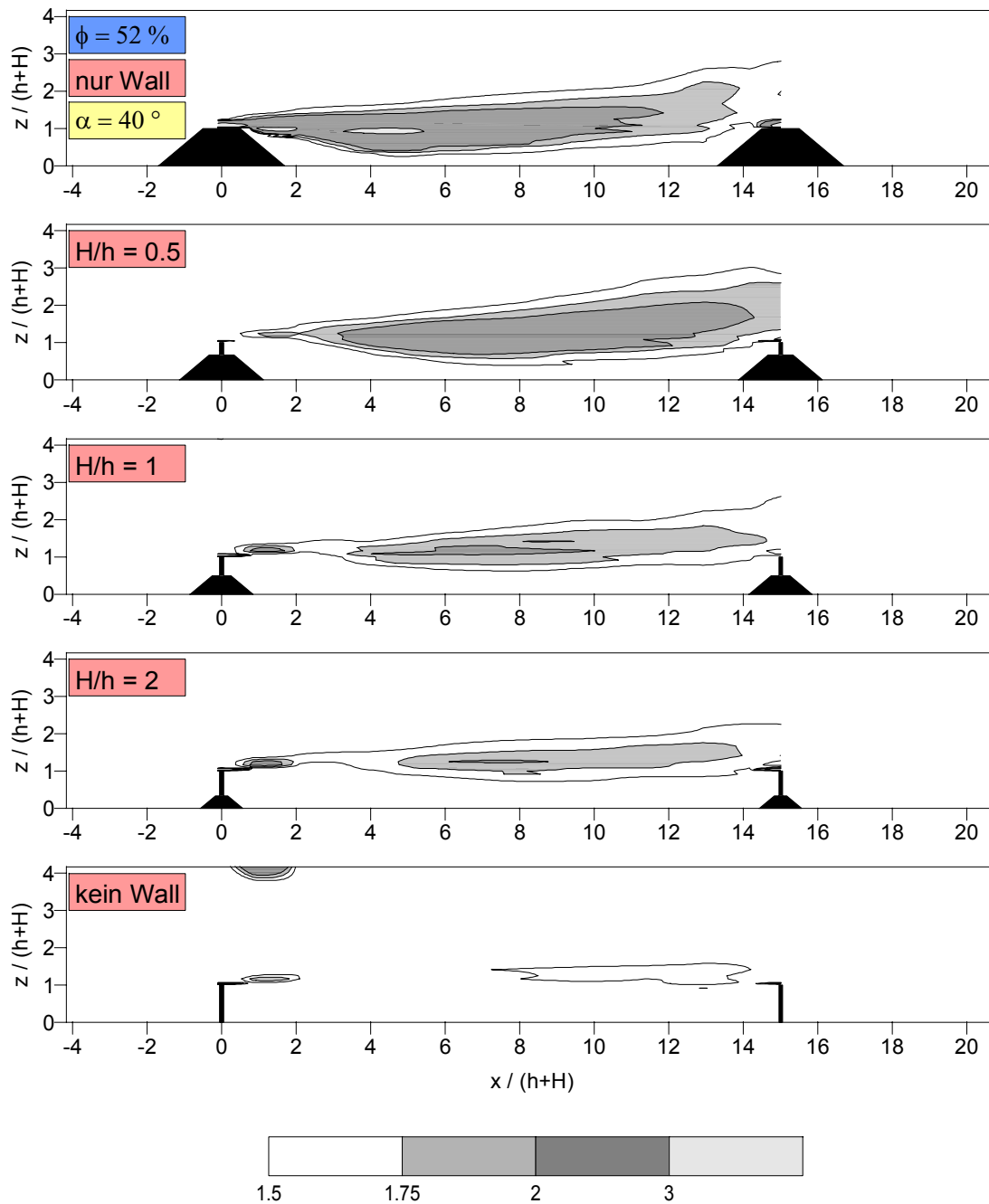
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 92:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)



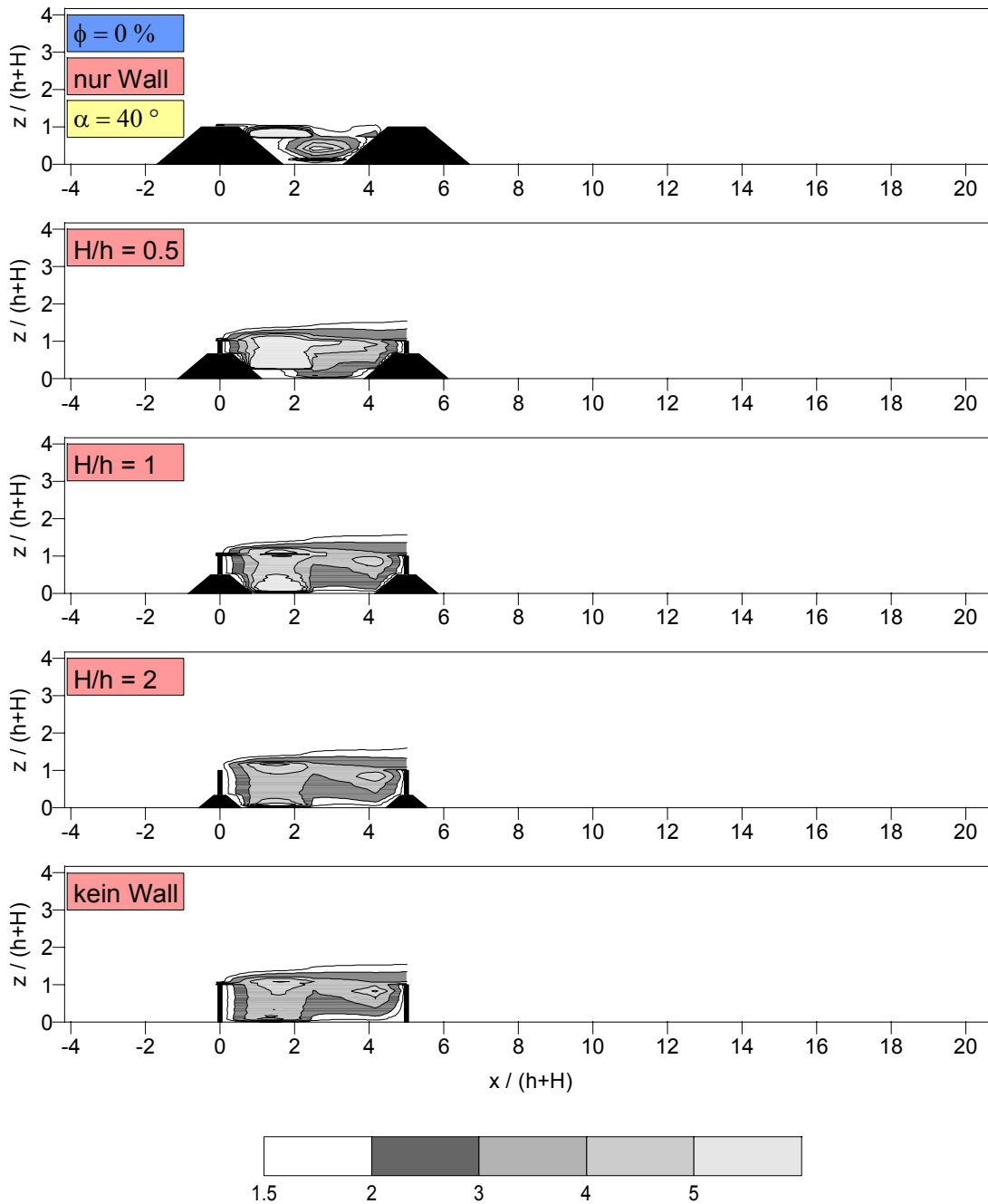
Relative turbulente kinetische Energie $TKE_{rel} = TKE_2(x,z) / TKE_1(z)$

$$TKE_2(x,z) = 0.75 * (u'_2(x,z)^2 + w'_2(x,z)^2)$$

Anlage 93:

Isolinien der relativen turbulenten kinetischen Energie im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

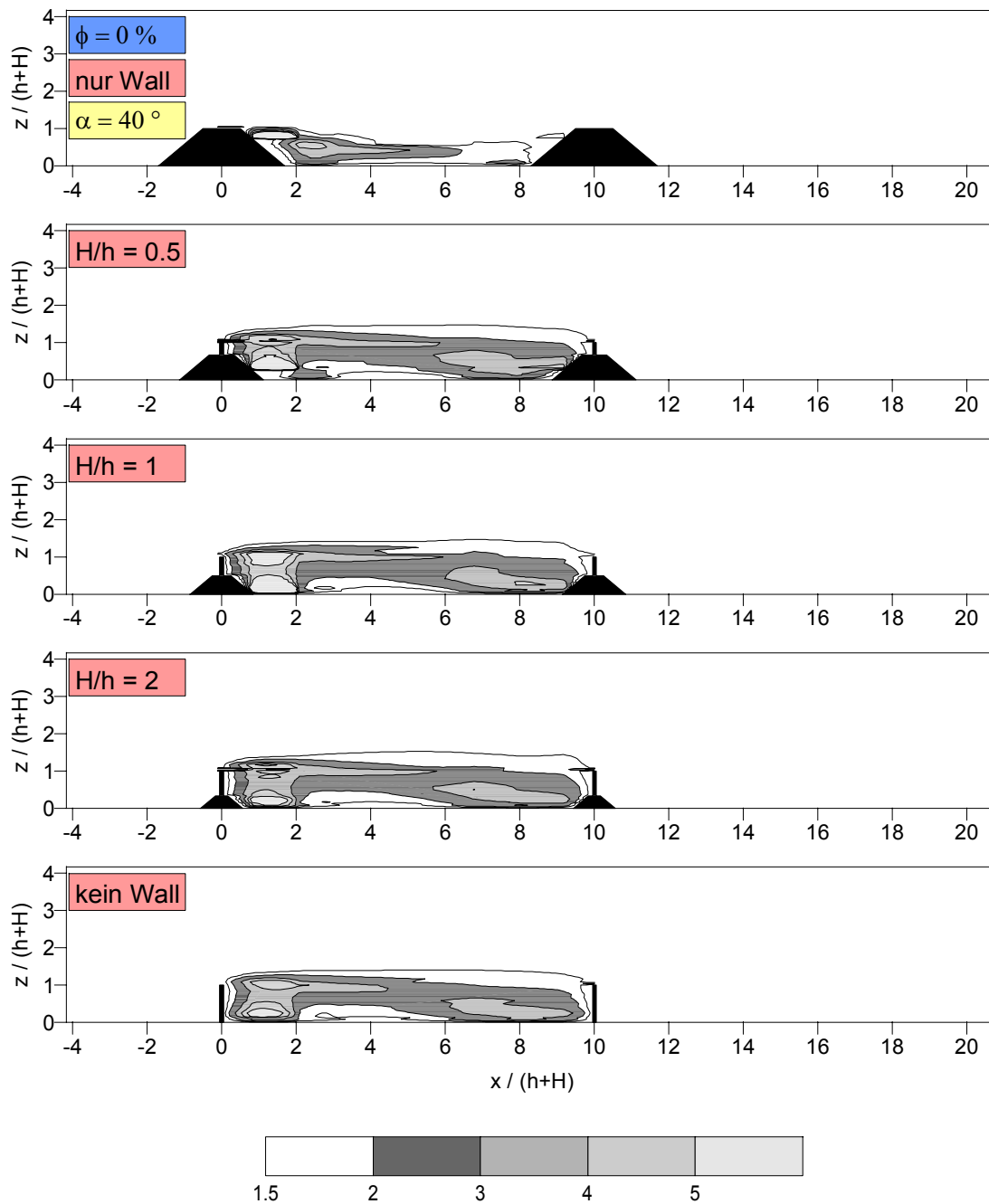


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 94:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)

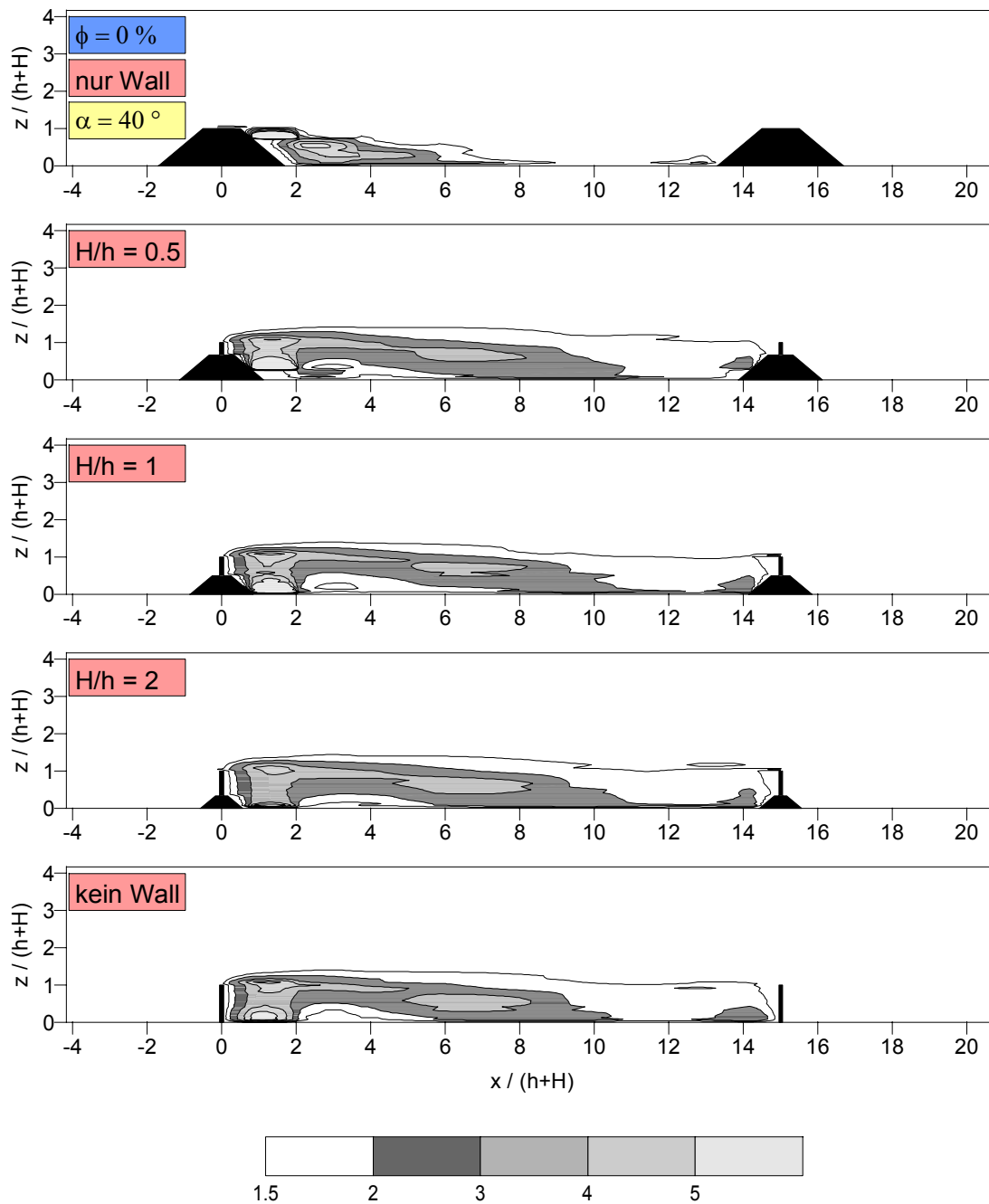


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 95:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)



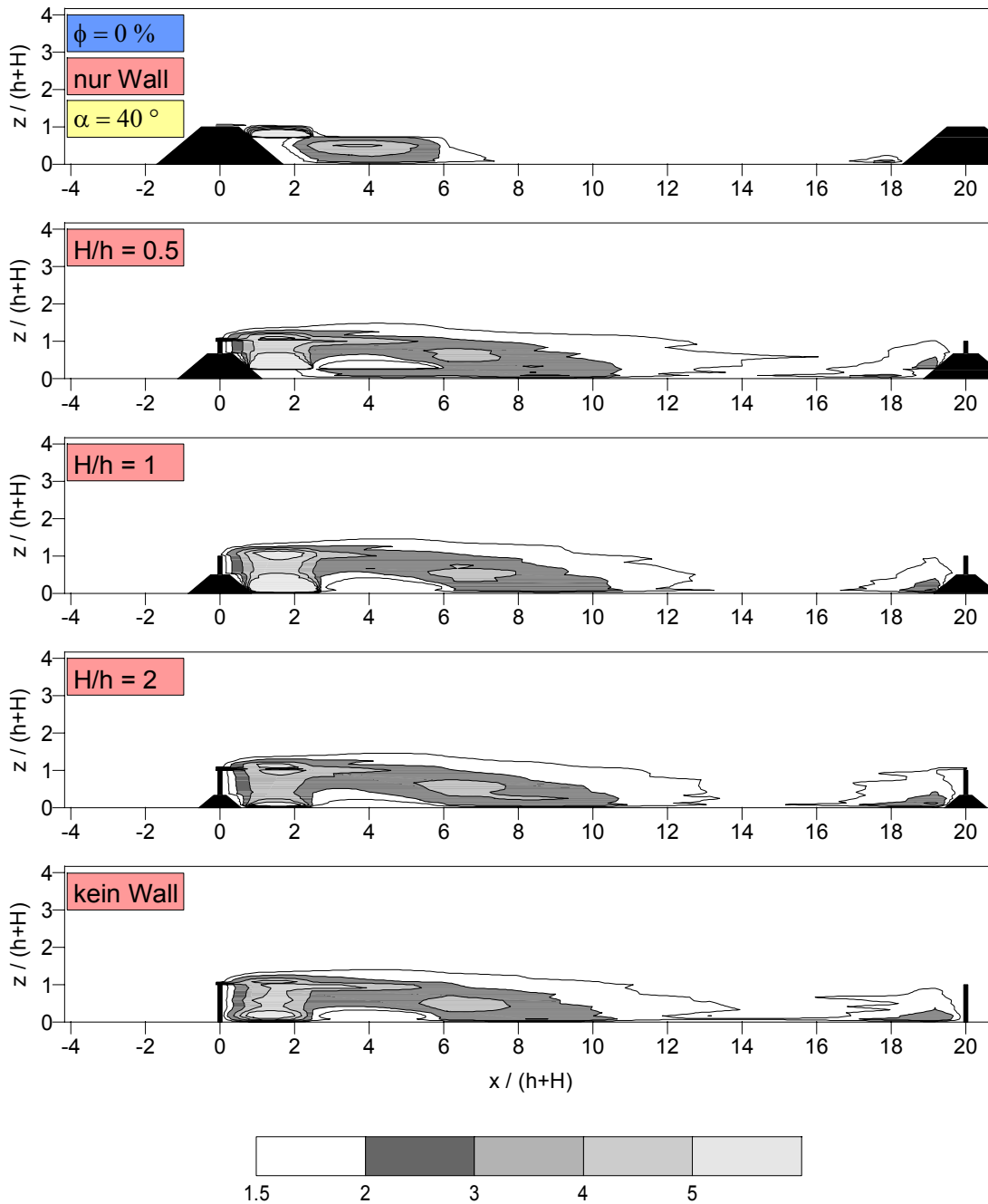
Windschutzparameter nach Gandemer

$$f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$$

Anlage 96:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0 \%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

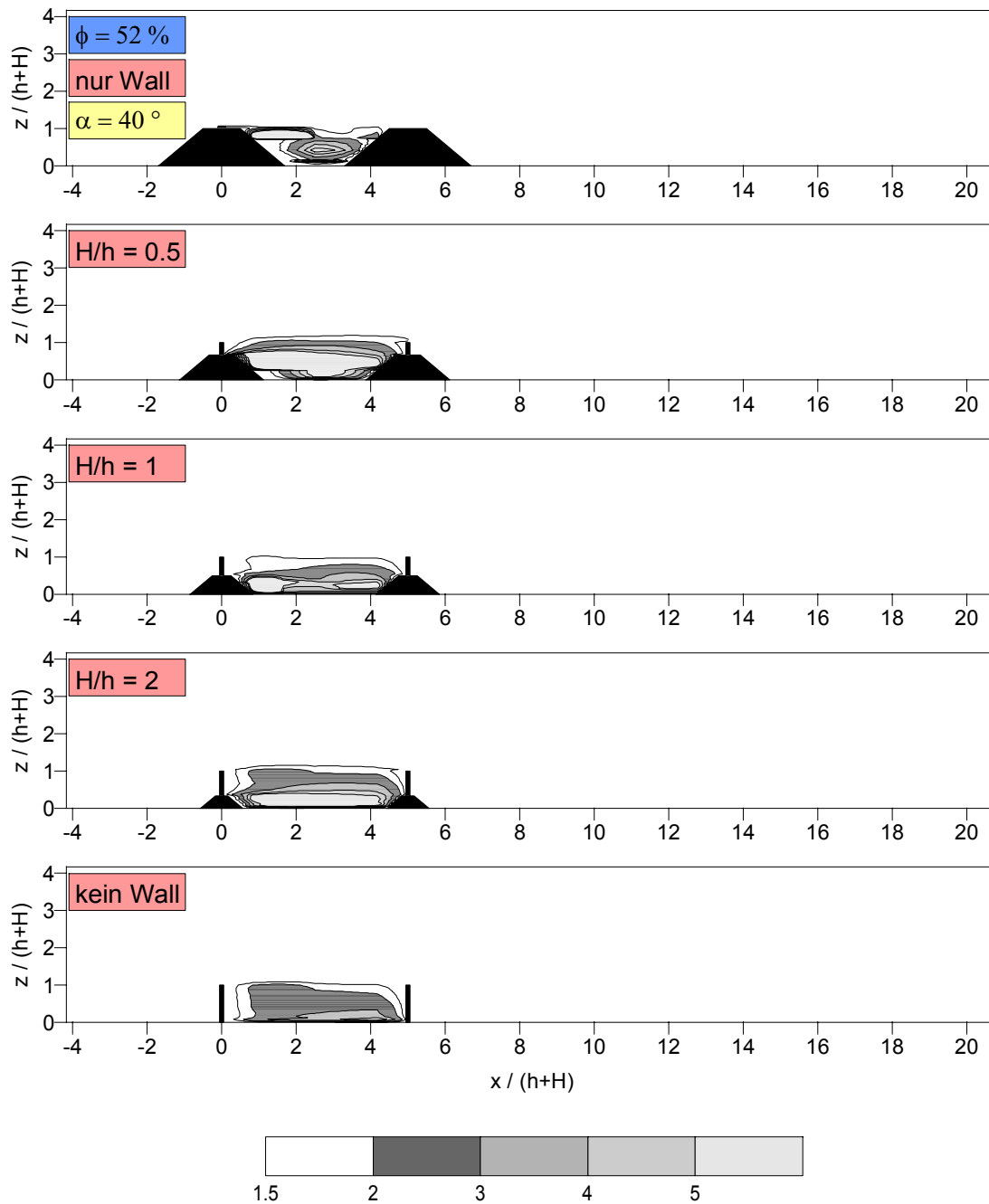


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 97:

Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)

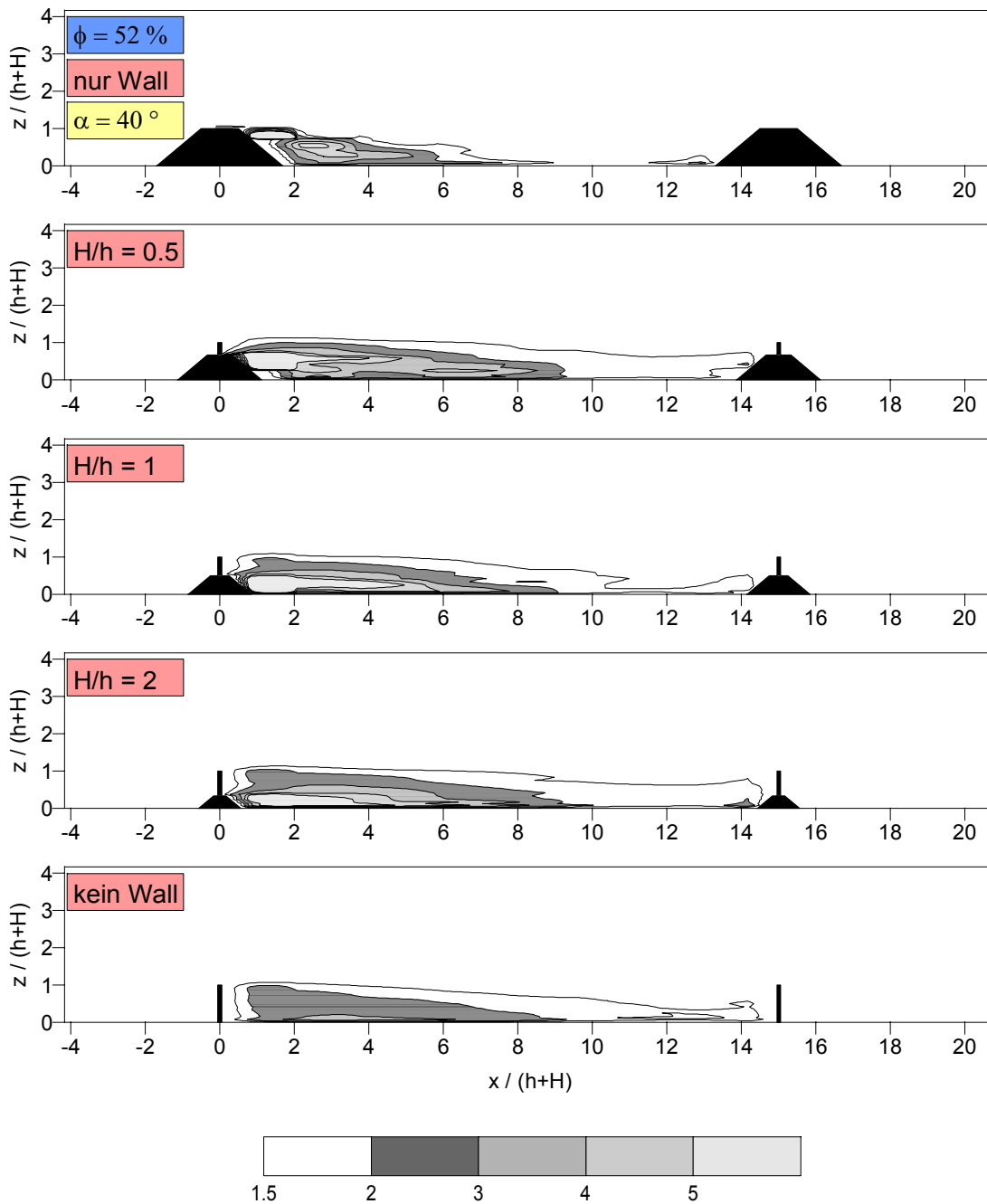


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 98:

Isolinen des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)

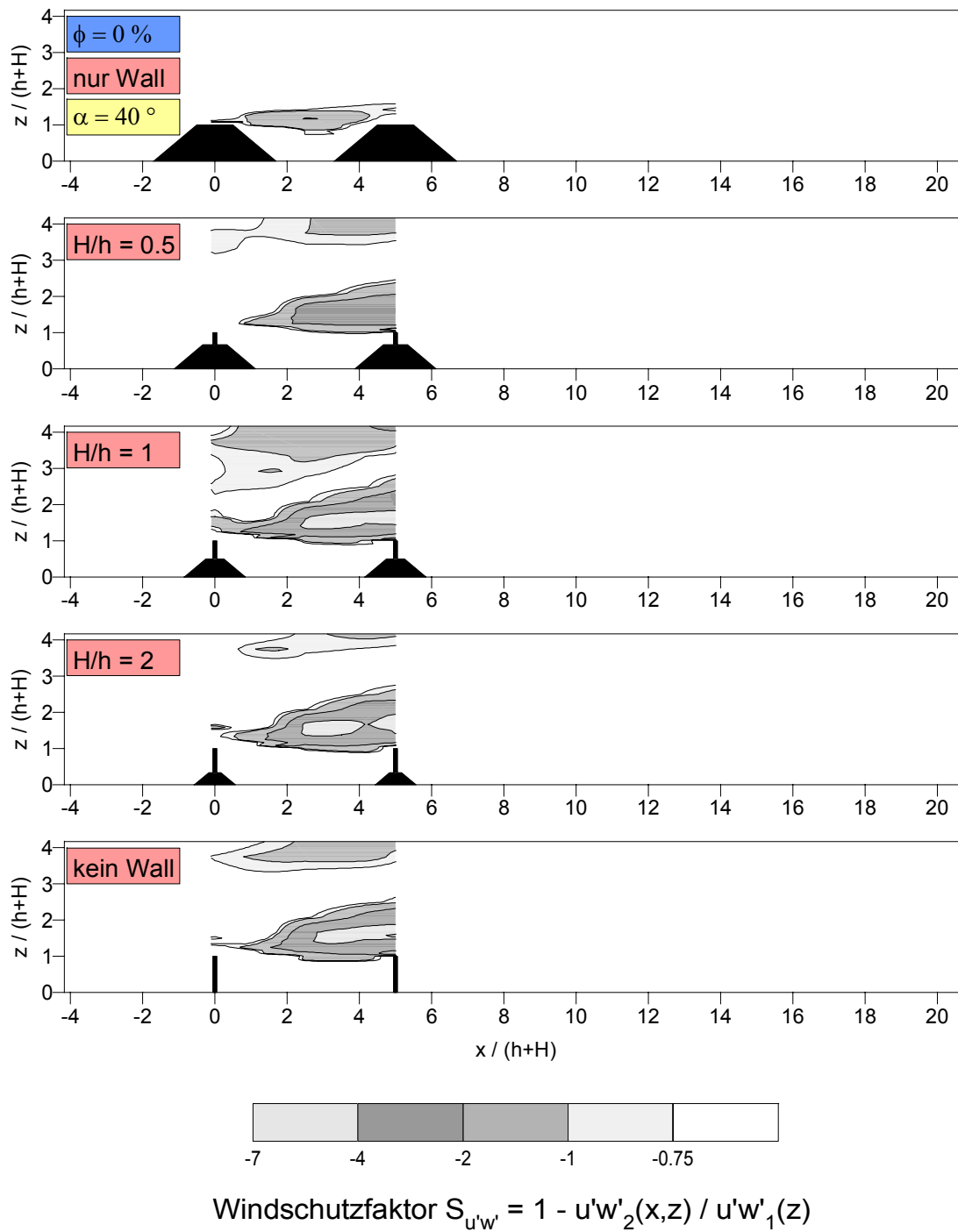


Windschutzparameter nach Gandemer
 $f(x,z) = (u_1(z) + \sigma(u_1(z))) / (|u_2(x,z)| + \sigma(u_2(x,z)))$

Anlage 99:

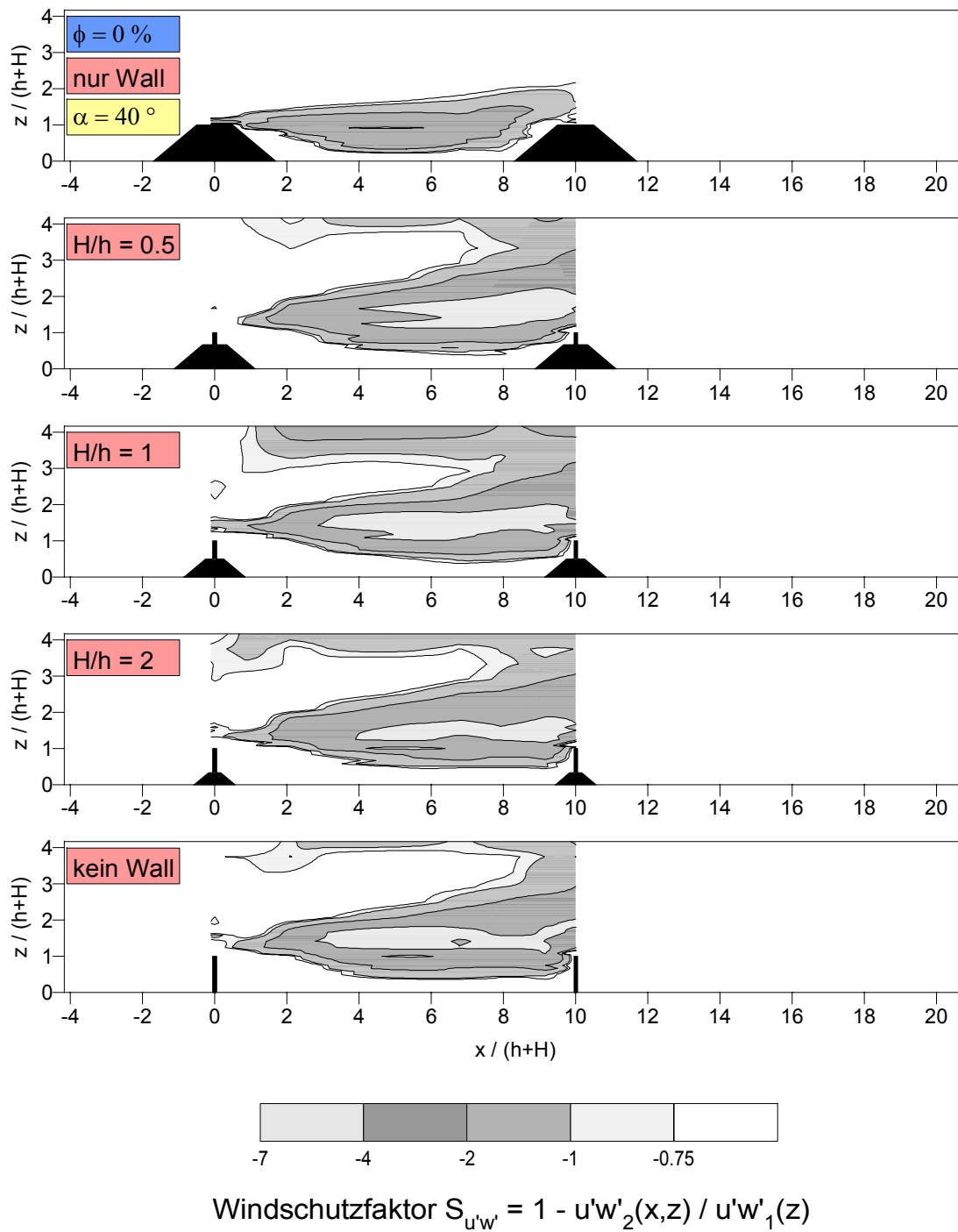
Isolinien des Komfortparameters f im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

**Anlage 100:**

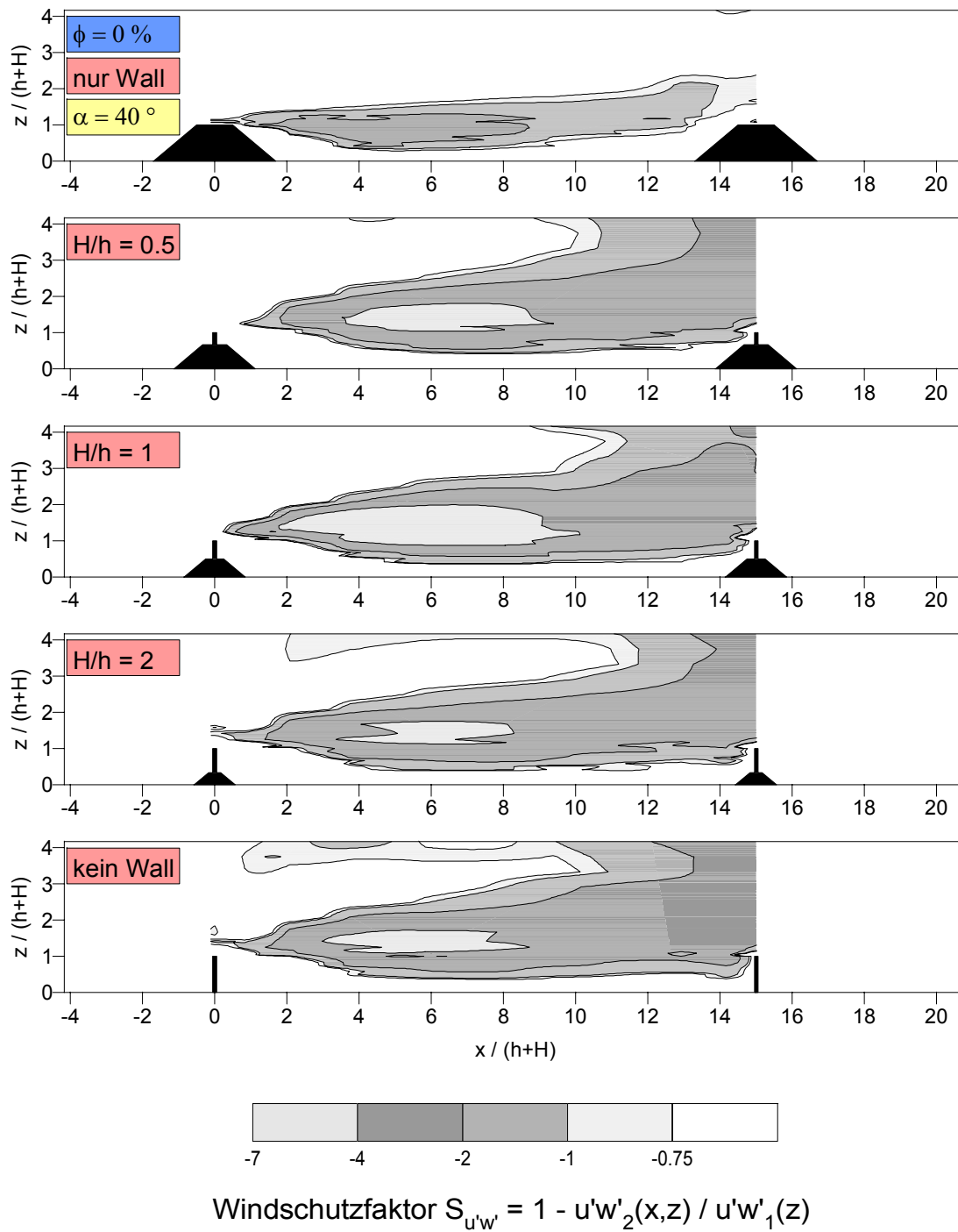
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)

**Anlage 101:**

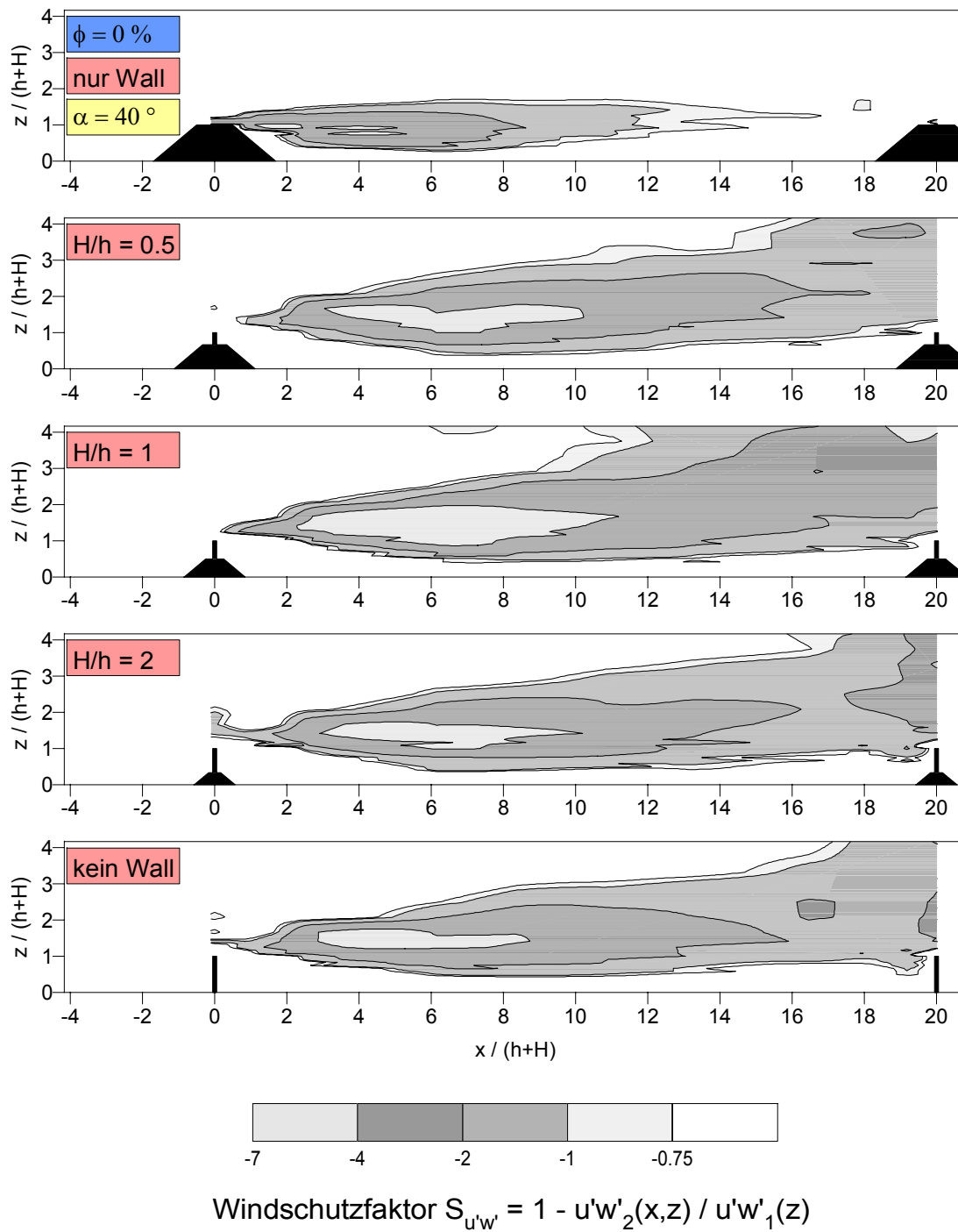
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 10 \cdot (h+H)$)

**Anlage 102:**

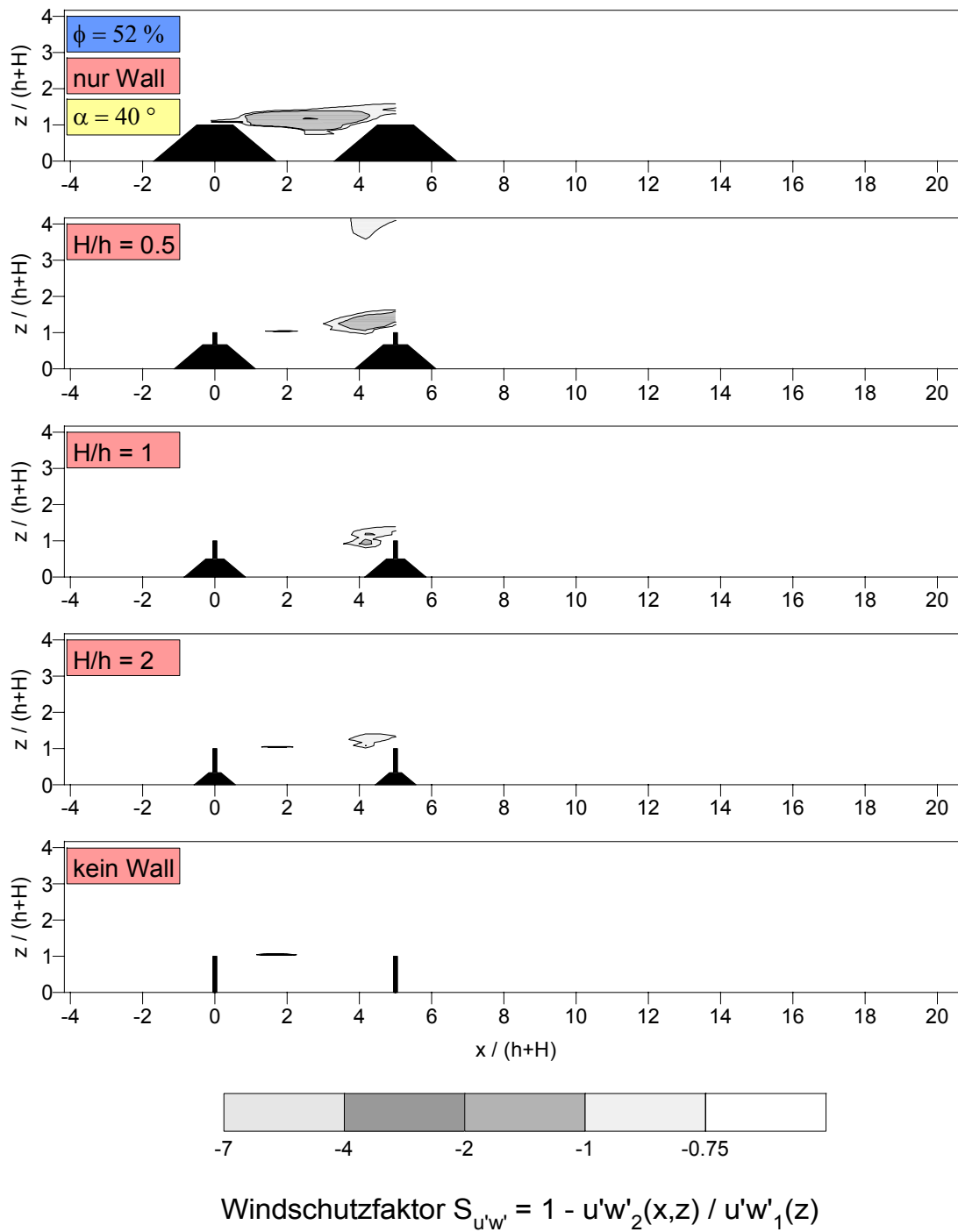
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

**Anlage 103:**

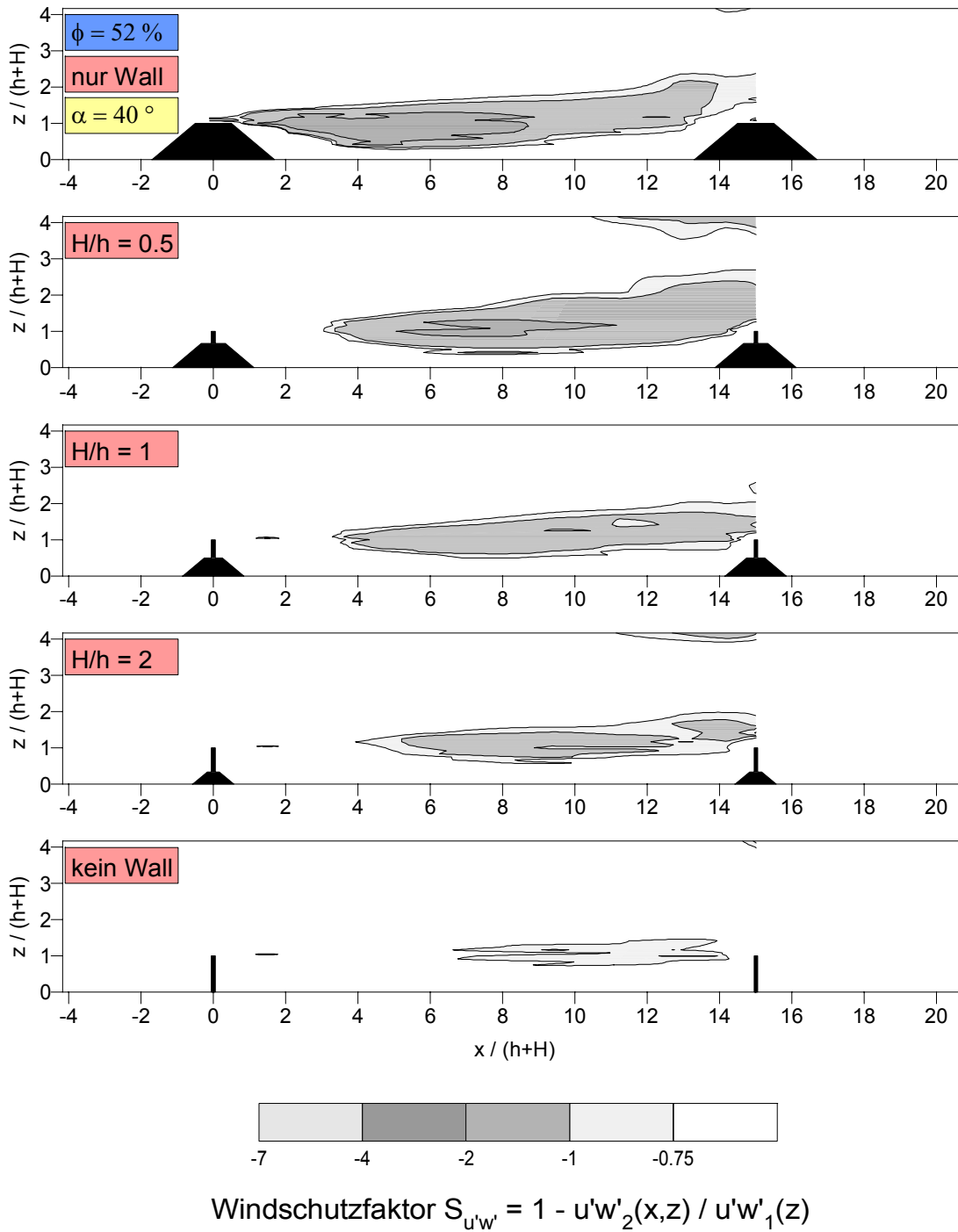
Isolinien des Schutzparameters $S_{u,w}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 0\%$, Abstand $a = 20 \cdot (h+H)$)

**Anlage 104:**

Isolinien des Schutzparameters S_{u_w} im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 5 \cdot (h+H)$)



Anlage 105:

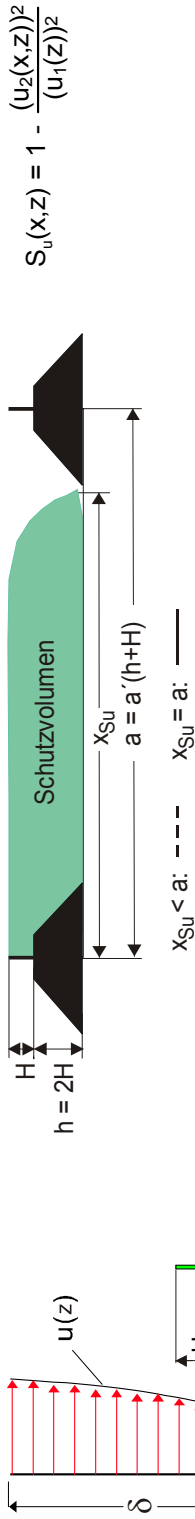
Isolinien des Schutzparameters $S_{u'w}$ im Zwischenfeld zweier Windschutzstreifen in Abhängigkeit vom Verhältnis Bewuchs- zu Sockelwallhöhe H/h .

(Böschungswinkel $\alpha = 40^\circ$, Porosität $\phi = 52\%$, Abstand $a = 15 \cdot (h+H)$)

Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen

Variation des Abstandes a zweier Windschutzstreifen

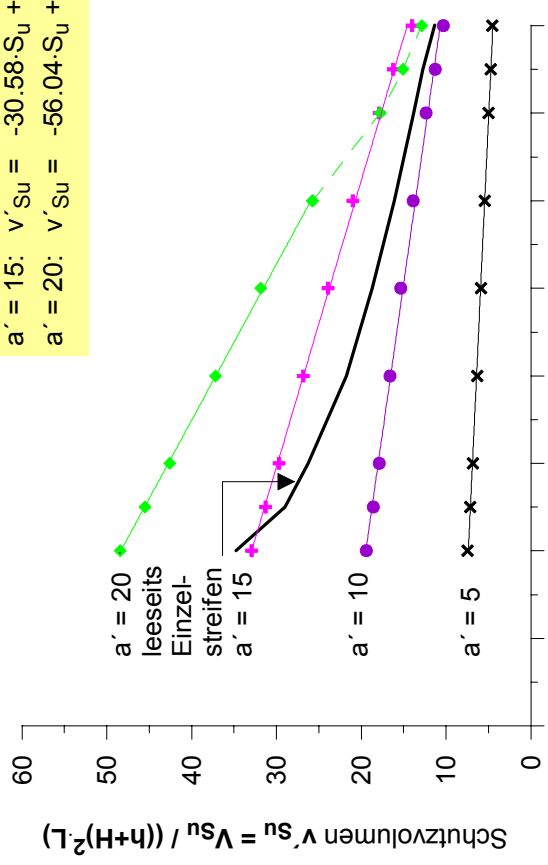
$H/h = 0.5, \alpha = 40^\circ, \phi = 0 \%$



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

$x_{Su} < a$: - - - - $x_{Su} = a$: —

$a' = 5$:	$v'_{Su} = -4.81 \cdot S_u + 8.33$
$a' = 10$:	$v'_{Su} = -14.62 \cdot S_u + 22.38$
$a' = 15$:	$v'_{Su} = -30.58 \cdot S_u + 39.05$
$a' = 20$:	$v'_{Su} = -56.04 \cdot S_u + 59.57$ für $S_u \leq 0.6$

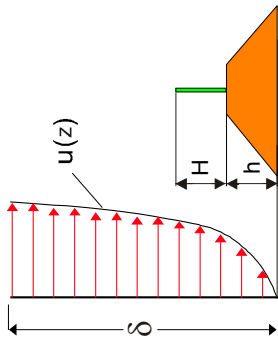


Die Kurven geben die Größe der Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen an, in denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf dort vorhandene Körper um mindestens 100-Su-Wert (%) im Vergleich zur Kraftwirkung der ungestörten Anströmung in gleicher Höhe reduziert.

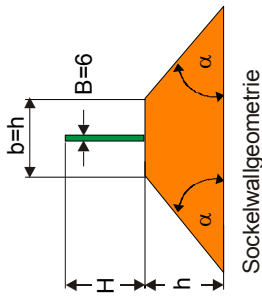
Mindestwert der Verminderung der aerodynamischen Kraftwirkung S_u

Zugehörige Einzelmessreihen sind in den Anlagen 82 - 85 dargestellt.

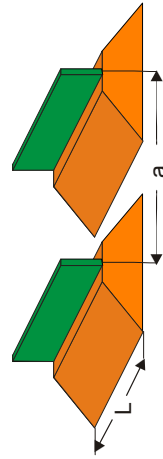
Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen
 Variation des Abstandes a zweier Windschutzstreifen
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ, \phi = 0 \%$



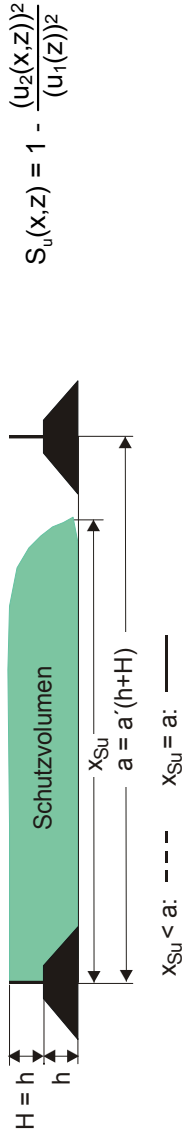
atmosphärische Anströmung



Sockelwalengeometrie

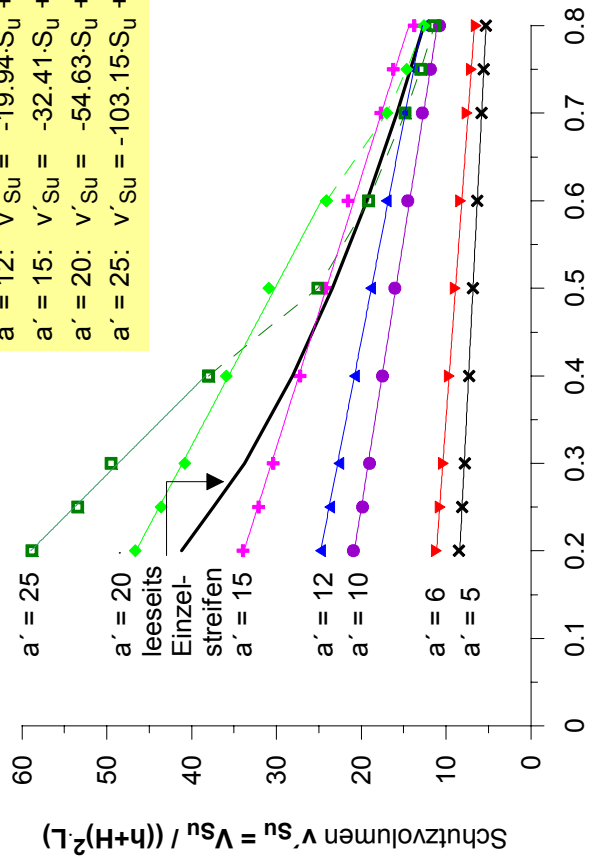


Die Kurven geben die Größe der Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen an, in denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf dort vorhandene Körper um mindestens 100-Su-Wert (%) im Vergleich zur Kraftwirkung der ungestörten Anströmung in gleicher Höhe reduziert.



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

$a' = 5$:	$v'_{Su} = -5.13 \cdot S_u + 9.39$
$a' = 6$:	$v'_{Su} = -7.46 \cdot S_u + 12.61$
$a' = 10$:	$v'_{Su} = -16.28 \cdot S_u + 24.06$
$a' = 12$:	$v'_{Su} = -19.94 \cdot S_u + 28.77$
$a' = 15$:	$v'_{Su} = -32.41 \cdot S_u + 40.31$
$a' = 20$:	$v'_{Su} = -54.63 \cdot S_u + 57.48$ für $S_u \leq 0.6$
$a' = 25$:	$v'_{Su} = -103.15 \cdot S_u + 79.61$ für $S_u \leq 0.4$

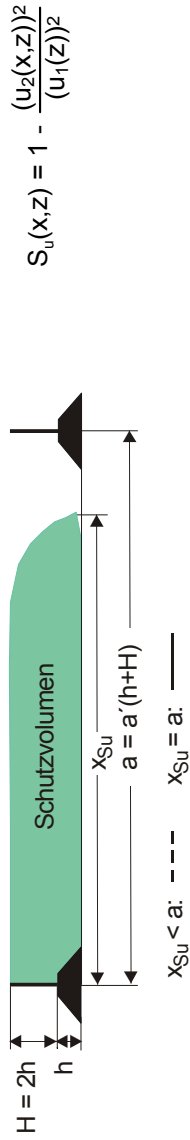


Mindestwert der Verminderung der aerodynamischen Kraftwirkung S_u

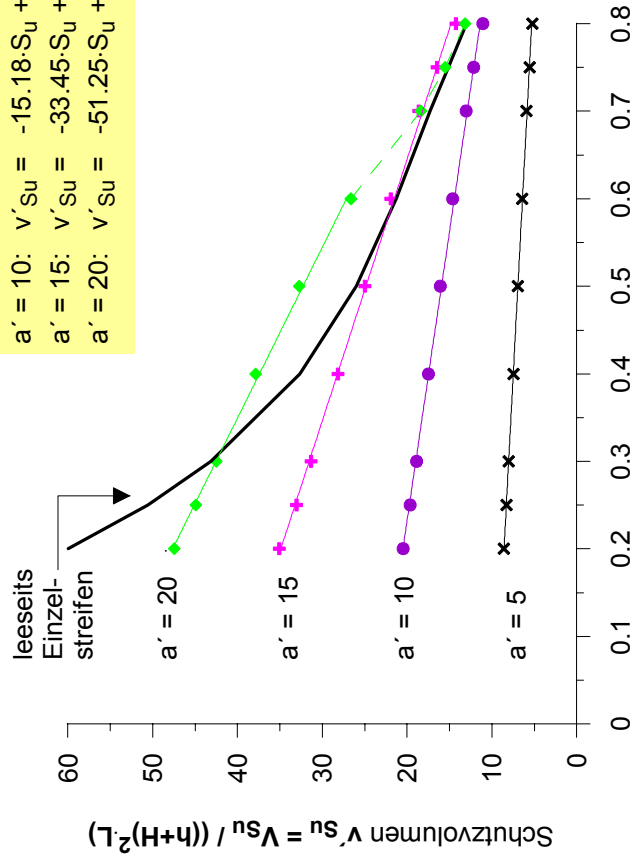
Zugehörige Einzelmessreihen sind in den Anlagen 8 - 14 dargestellt.

Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen

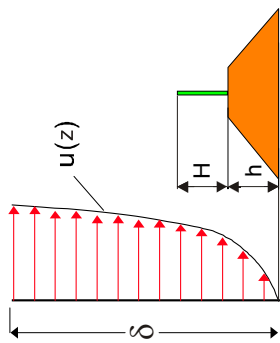
Variation des Abstandes a zweier Windschutzstreifen
 $H/h = 2, \alpha = 40^\circ, \phi = 0 \%$



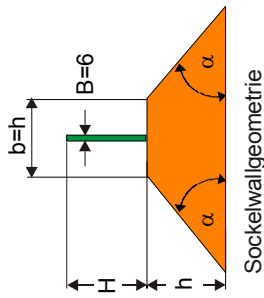
$a' = 5$:	$v'_{Su} = -5.44 \cdot S_u + 9.66$
$a' = 10$:	$v'_{Su} = -15.18 \cdot S_u + 23.53$
$a' = 15$:	$v'_{Su} = -33.45 \cdot S_u + 41.57$
$a' = 20$:	$v'_{Su} = -51.25 \cdot S_u + 57.90$ für $S_u \leq 0.6$



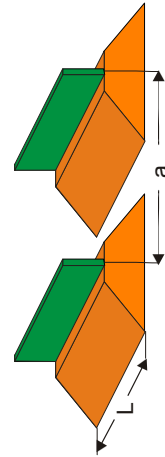
Mindestwert der Verminderung der aerodynamischen Kraftwirkung S_u



atmosphärische Anströmung



Sockelwalengeometrie

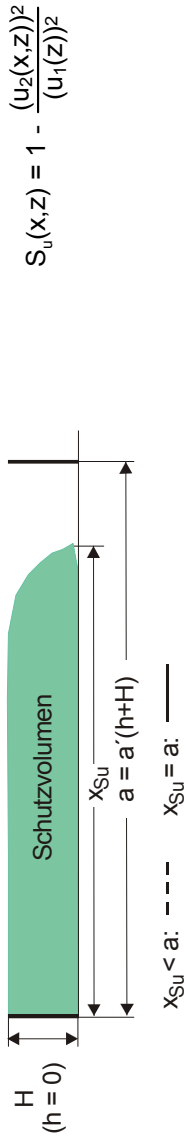


Die Kurven geben die Größe der Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen an, in denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf dort vorhandene Körper um mindestens 100-Su-Wert (%) im Vergleich zur Kraftwirkung der ungestörten Anströmung in gleicher Höhe reduziert.

Zugehörige Einzelmesstreifen sind in den Anlagen 82 - 85 dargestellt.

Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen

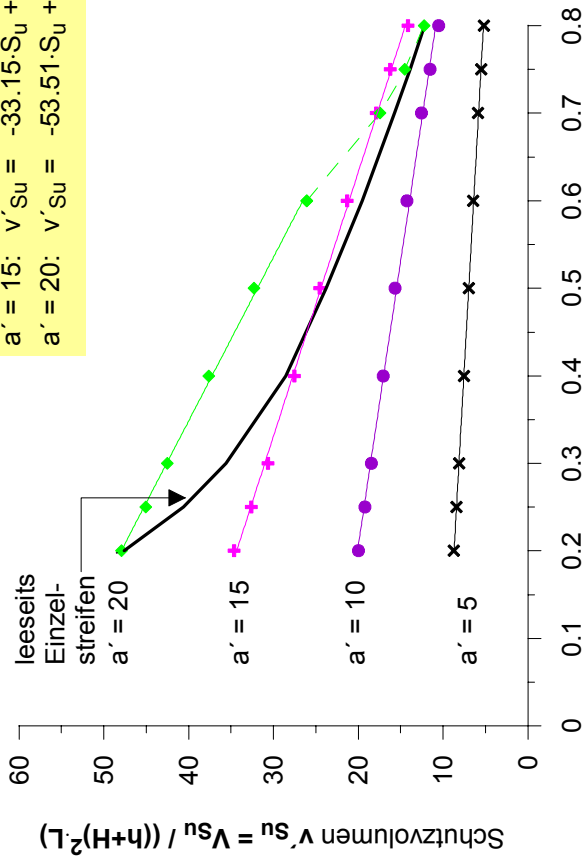
Variation des Abstandes a zweier Windschutzstreifen
Kein Wall, $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 0\%$



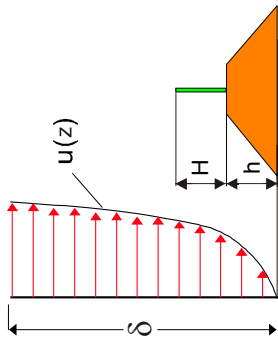
$x_{Su} < a$: - - - $x_{Su} = a$: —

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

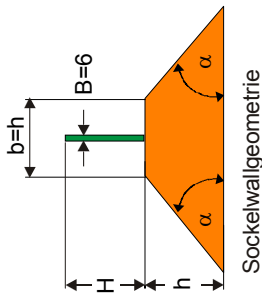
$a' = 5$:	$v'_{Su} = -5.78 \cdot S_u + 9.86$
$a' = 10$:	$v'_{Su} = -15.39 \cdot S_u + 23.16$
$a' = 15$:	$v'_{Su} = -33.15 \cdot S_u + 40.96$
$a' = 20$:	$v'_{Su} = -53.51 \cdot S_u + 58.65$ für $S_u \leq 0.6$



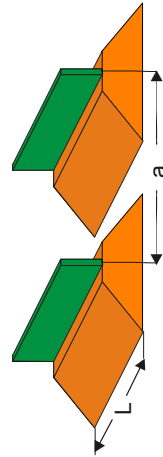
Mindestwert der Verminderung der aerodynamischen Kraftwirkung S_u



atmosphärische Anströmung



Sockelwallgeometrie



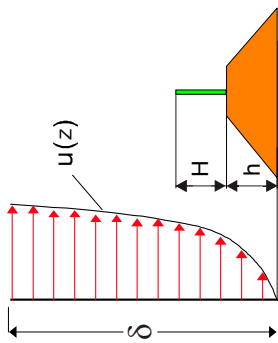
Die Kurven geben die Größe der Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen an, in denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf dort vorhandene Körper um mindestens 100·Su-Wert (%) im Vergleich zur Kraftwirkung der ungestörten Anströmung in gleicher Höhe reduziert.

Zugehörige Einzelmesstreifen sind in den Anlagen 82 - 85 dargestellt.

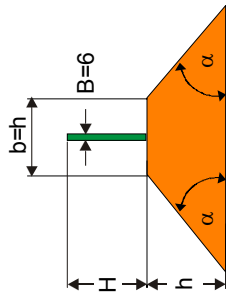
Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen

Variation des Abstandes a zweier Windschutzstreifen

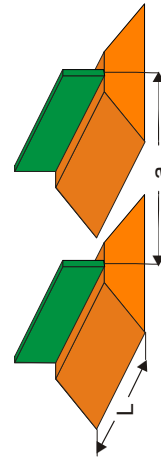
$H/h = 1, \alpha = 40^\circ, \phi = 12\%$



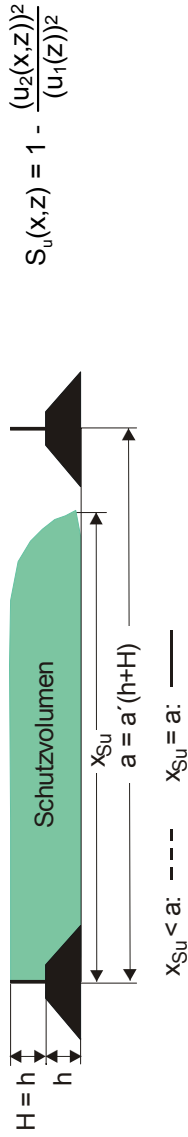
atmosphärische Anströmung



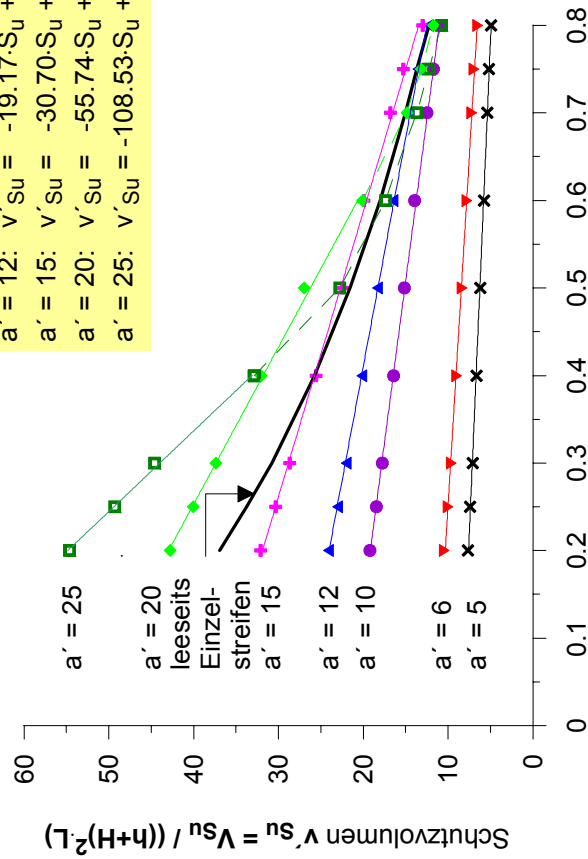
Sockelwallgeometrie



Die Kurven geben die Größe der Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen an, in denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf dort vorhandene Körper um mindestens 100-Su-Wert (%) im Vergleich zur Kraftwirkung der ungestörten Anströmung in gleicher Höhe reduziert.



$a' = 5:$	$V'_{Su} = -4.43 \cdot S_u + 8.46$
$a' = 6:$	$V'_{Su} = -6.31 \cdot S_u + 11.59$
$a' = 10:$	$V'_{Su} = -13.52 \cdot S_u + 21.86$
$a' = 12:$	$V'_{Su} = -19.17 \cdot S_u + 27.86$
$a' = 15:$	$V'_{Su} = -30.70 \cdot S_u + 38.02$
$a' = 20:$	$V'_{Su} = -55.74 \cdot S_u + 54.10$ für $S_u \leq 0.6$
$a' = 25:$	$V'_{Su} = -108.53 \cdot S_u + 76.53$ für $S_u \leq 0.4$

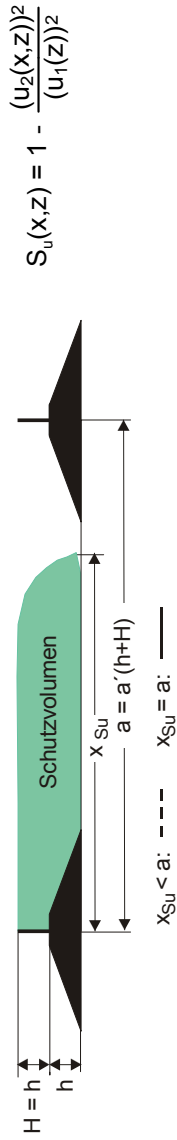


Mindestwert der Verminderung der aerodynamischen Kraftwirkung S_u

Zugehörige Einzelmesreihen sind in den Anlagen 8 - 14 dargestellt.

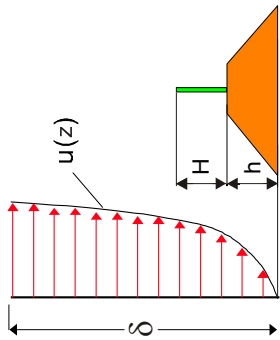
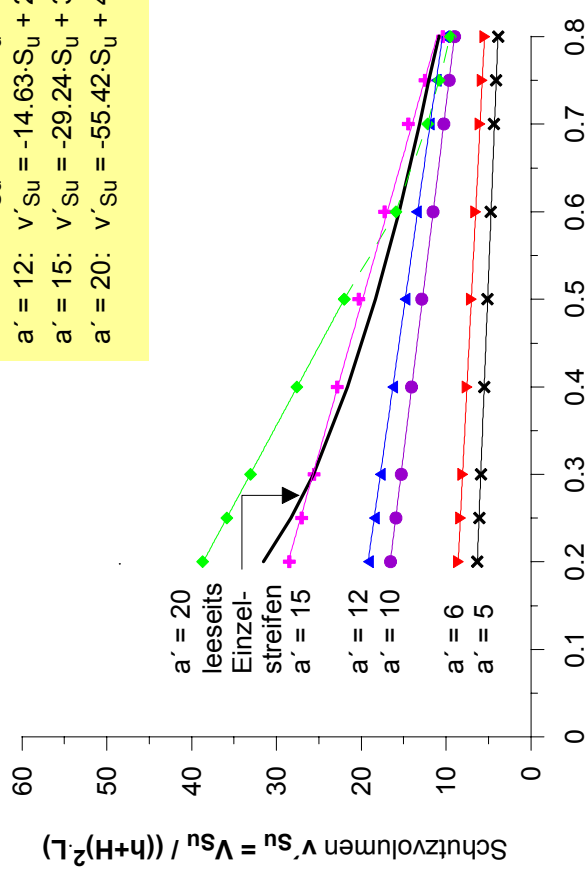
Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen
 Variation des Abstandes a zweier Windschutzstreifen

$H/h = 1, \alpha = 20^\circ, \phi = 22\%$

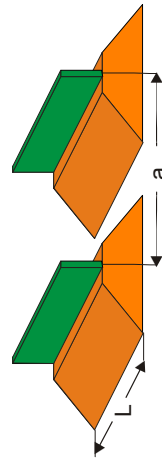
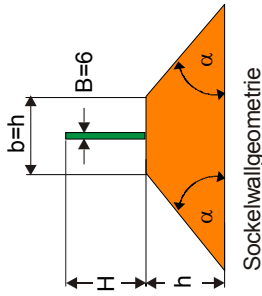


$$S_u(x,z) = 1 - \frac{(u_2(x,z))^2}{(u_1(z))^2}$$

- $a' = 5: \quad v'_{Su} = -4.05 \cdot S_u + 7.12$
- $a' = 6: \quad v'_{Su} = -5.15 \cdot S_u + 9.59$
- $a' = 10: \quad v'_{Su} = -12.60 \cdot S_u + 19.08$
- $a' = 12: \quad v'_{Su} = -14.63 \cdot S_u + 22.12$
- $a' = 15: \quad v'_{Su} = -29.24 \cdot S_u + 34.47$
- $a' = 20: \quad v'_{Su} = -55.42 \cdot S_u + 49.72$ für $S_u \leq 0.5$



atmosphärische Anströmung

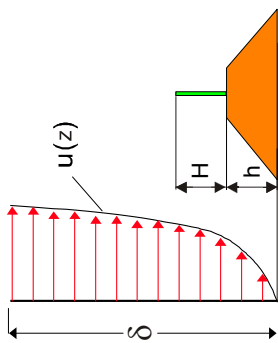


Die Kurven geben die Größe der Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen an, in denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf dort vorhandene Körper um mindestens 100-Su-Wert (%) im Vergleich zur Kraftwirkung der ungestörten Anströmung in gleicher Höhe reduziert.

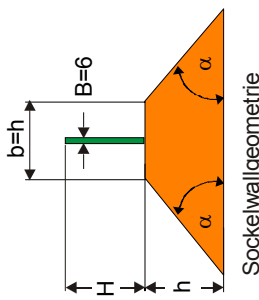
Mindestwert der Verminderung der aerodynamischen Kraftwirkung S_u

Zugehörige Einzelmessreihen sind in den Anlagen 45 - 50 dargestellt.

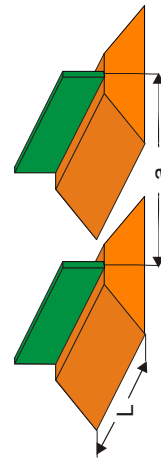
Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen
 Variation des Abstandes a zweier Windschutzstreifen
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ, \phi = 22\%$



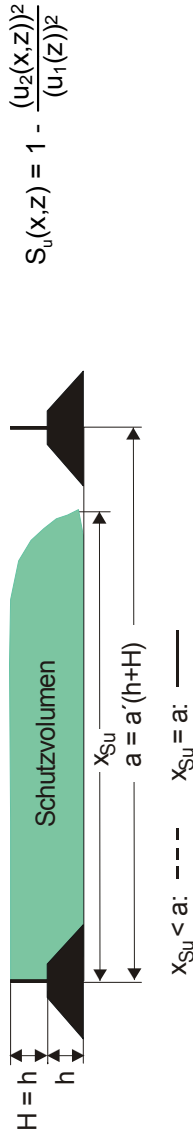
atmosphärische Anströmung



Sockelwallgeometrie



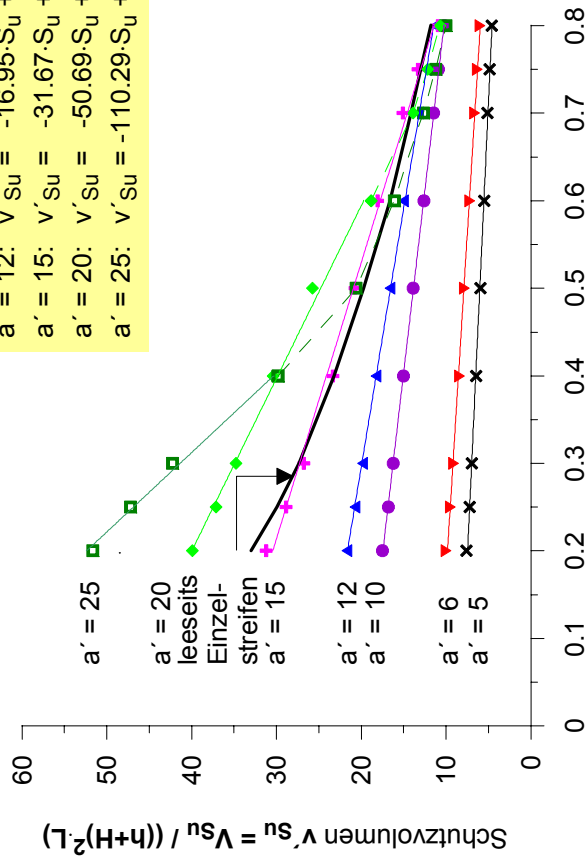
Die Kurven geben die Größe der Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen an, in denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf dort vorhandene Körper um mindestens 100-Su-Wert (%) im Vergleich zur Kraftwirkung der ungestörten Anströmung in gleicher Höhe reduziert.



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

$x_{Su} < a$: - - - $x_{Su} = a$: —

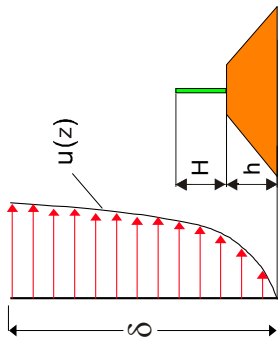
$a' = 5$:	$V'_{Su} = -4.81 \cdot S_u + 8.42$
$a' = 6$:	$V'_{Su} = -6.44 \cdot S_u + 11.11$
$a' = 10$:	$V'_{Su} = -12.01 \cdot S_u + 19.84$
$a' = 12$:	$V'_{Su} = -16.95 \cdot S_u + 25.01$
$a' = 15$:	$V'_{Su} = -31.67 \cdot S_u + 36.76$
$a' = 20$:	$V'_{Su} = -50.69 \cdot S_u + 50.12$ für $S_u \leq 0.6$
$a' = 25$:	$V'_{Su} = -110.29 \cdot S_u + 74.45$ für $S_u \leq 0.4$



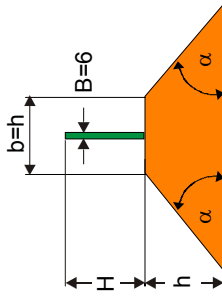
Mindestwert der Verminderung der aerodynamischen Kraftwirkung S_u

Zugehörige Einzelmessreihen sind in den Anlagen 8 - 14 dargestellt.

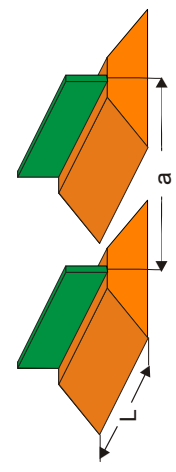
Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen
 Variation des Abstandes a zweier Windschutzstreifen
 $H/h = 1, \alpha = 60^\circ, \phi = 22\%$



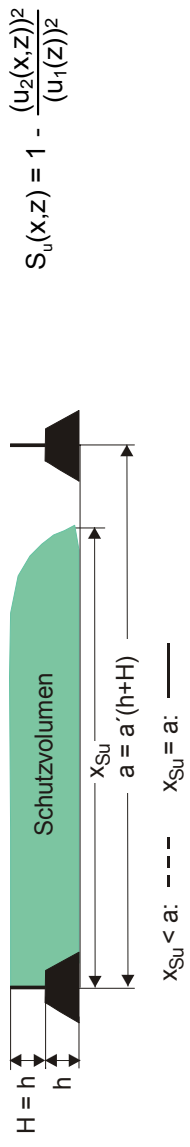
atmosphärische Anströmung



Sockelwallgeometrie



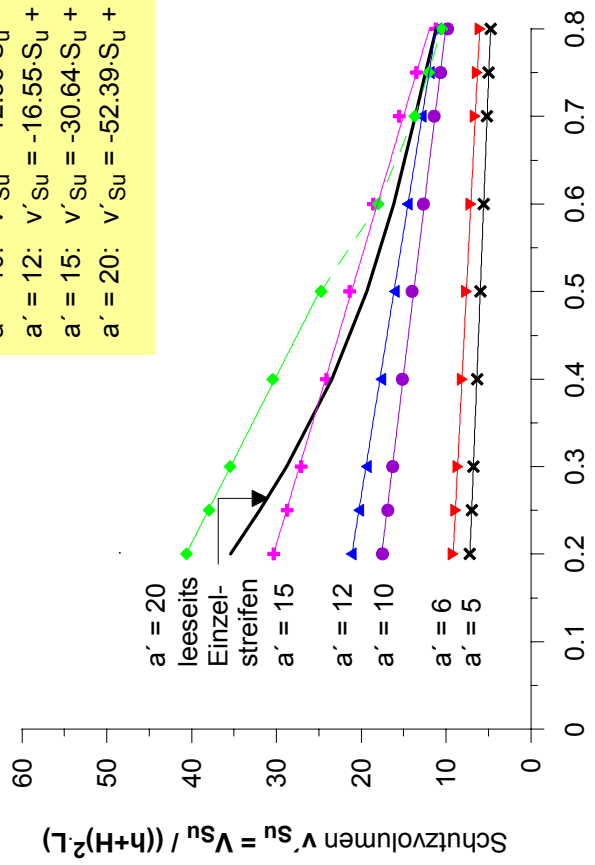
Die Kurven geben die Größe der Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen an, in denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf dort vorhandene Körper um mindestens 100-Su-Wert (%) im Vergleich zur Kraftwirkung der ungestörten Anströmung in gleicher Höhe reduziert.



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

$x_{Su} < a$: - - - $x_{Su} = a$: —

$a' = 5$:	$V'_{Su} = -4.06 \cdot S_u + 7.99$
$a' = 6$:	$V'_{Su} = -5.20 \cdot S_u + 10.19$
$a' = 10$:	$V'_{Su} = -12.56 \cdot S_u + 20.09$
$a' = 12$:	$V'_{Su} = -16.55 \cdot S_u + 24.41$
$a' = 15$:	$V'_{Su} = -30.64 \cdot S_u + 36.47$
$a' = 20$:	$V'_{Su} = -52.39 \cdot S_u + 51.13$ für $S_u \leq 0.5$

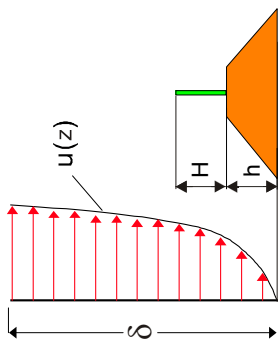


Mindestwert der Verminderung der aerodynamischen Kraftwirkung S_u

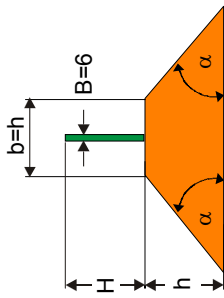
Zugehörige Einzelmesstreifen sind in den Anlagen 45 - 50 dargestellt.

Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen

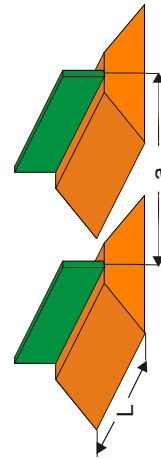
Variation des Abstandes a zweier Windschutzstreifen
 $H/h = 1, \alpha = 40^\circ, \phi = 35\%$



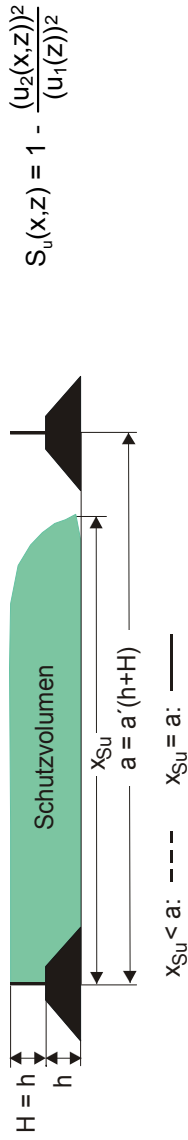
atmosphärische Anströmung



Sockelwallgeometrie



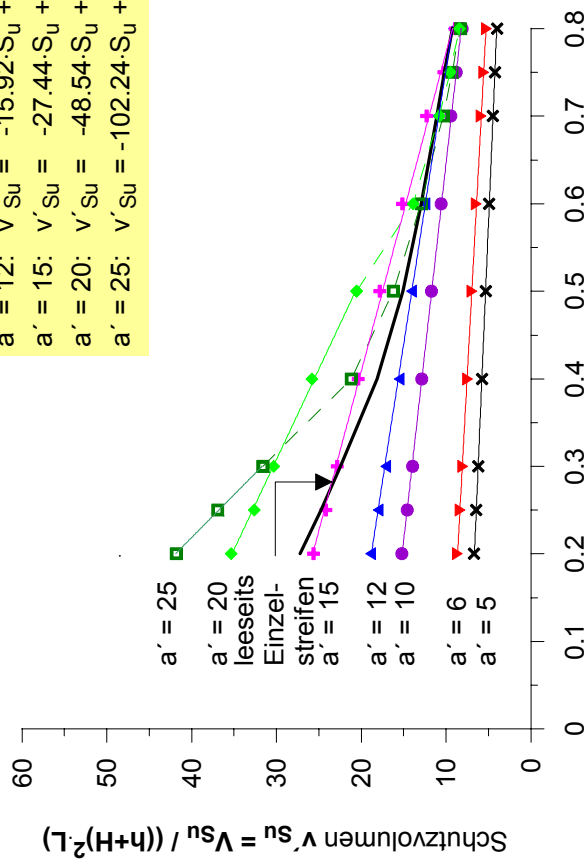
Die Kurven geben die Größe der Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen an, in denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf dort vorhandene Körper um mindestens 100·Su-Wert (%) im Vergleich zur Kraftwirkung der ungestörten Anströmung in gleicher Höhe reduziert.



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

$x_{Su} < a$: - - - $x_{Su} = a$: —

$a' = 5$:	$v'_{Su} = -4.39 \cdot S_u + 7.53$
$a' = 6$:	$v'_{Su} = -5.59 \cdot S_u + 9.75$
$a' = 10$:	$v'_{Su} = -11.60 \cdot S_u + 17.49$
$a' = 12$:	$v'_{Su} = -15.92 \cdot S_u + 21.99$
$a' = 15$:	$v'_{Su} = -27.44 \cdot S_u + 31.21$
$a' = 20$:	$v'_{Su} = -48.54 \cdot S_u + 44.94$ für $S_u \leq 0.5$
$a' = 25$:	$v'_{Su} = -102.24 \cdot S_u + 62.36$ für $S_u \leq 0.3$

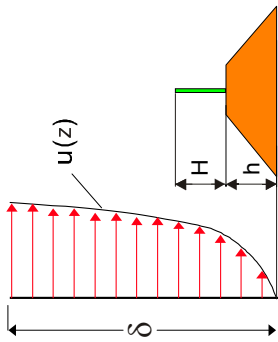


Mindestwert der Verminderung der aerodynamischen Kraftwirkung S_u

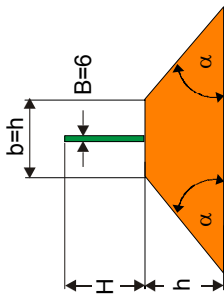
Zugehörige Einzelmesstreifen sind in den Anlagen 8 - 14 dargestellt.

Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen
 Variation des Abstandes a zweier Windschutzstreifen

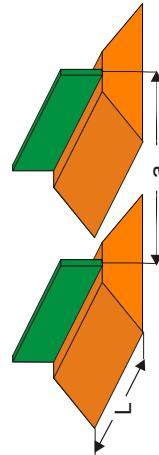
$H/h = 1, \alpha = 40^\circ, \phi = 52\%$



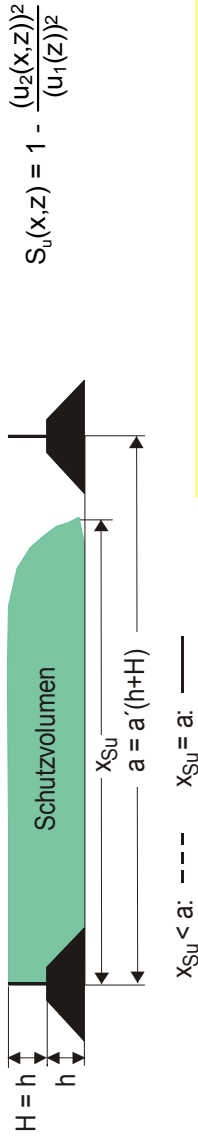
atmosphärische Anströmung



Sockelwallgeometrie

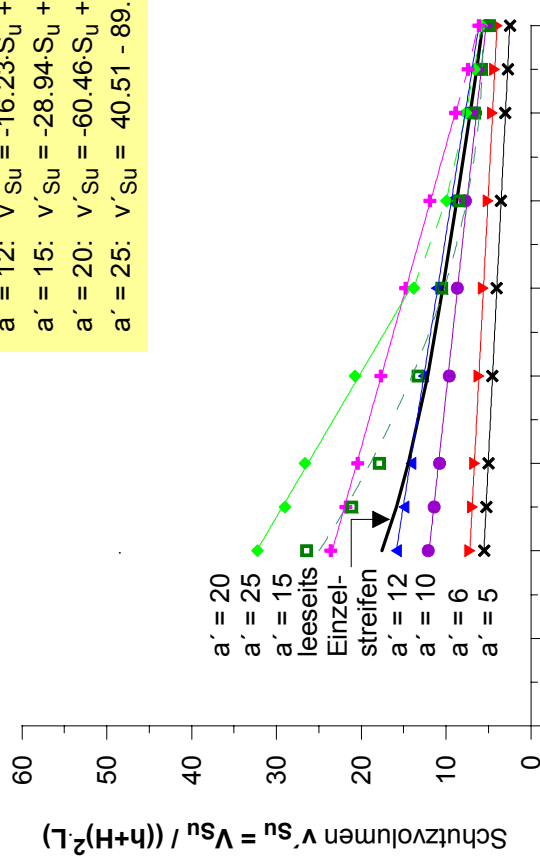


Die Kurven geben die Größe der Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen an, in denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf dort vorhandene Körper um mindestens 100·Su-Wert (%) im Vergleich zur Kraftwirkung der ungestörten Anströmung in gleicher Höhe reduziert.



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

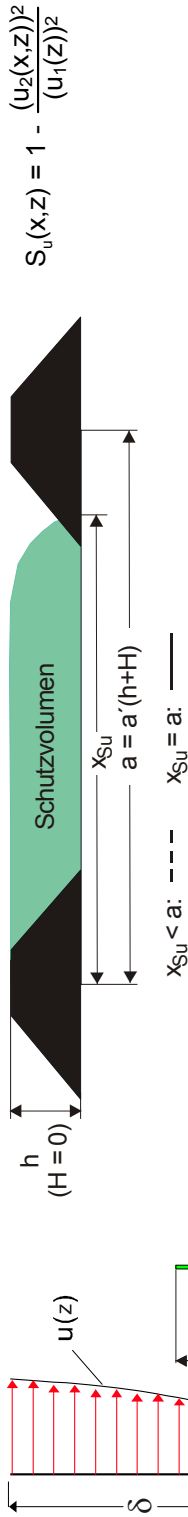
- a' = 5: v'Su = -5.08·Su + 6.55
- a' = 6: v'Su = -5.33·Su + 8.26
- a' = 10: v'Su = -11.18·Su + 14.23
- a' = 12: v'Su = -16.23·Su + 19.10
- a' = 15: v'Su = -28.94·Su + 29.21
- a' = 20: v'Su = -60.46·Su + 44.43 für Su ≤ 0.5
- a' = 25: v'Su = 40.51 - 89.00·Su + 56.84·Su²



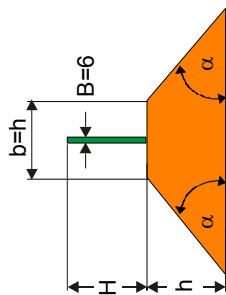
Mindestwert der Verminderung der aerodynamischen Kraftwirkung Su

Zugehörige Einzelmesstreifen sind in den Anlagen 8 - 14 dargestellt.

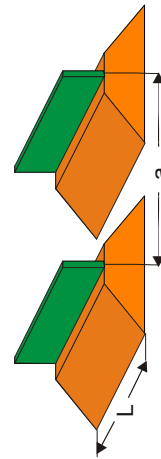
Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen
 Variation des Abstandes a zweier Windschutzstreifen
 Nur Wall, $\alpha = 40^\circ$, $\phi = 100\%$



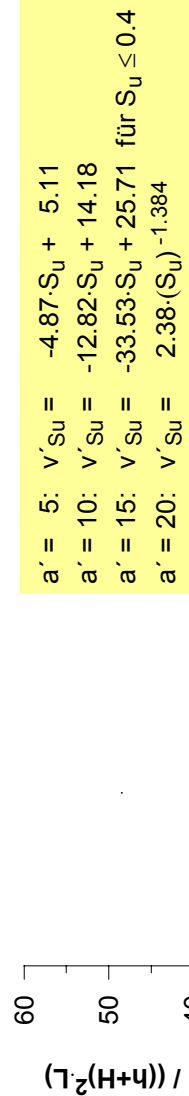
atmosphärische Anströmung



Sockelwalengeometrie



Die Kurven geben die Größe der Schutzvolumina zwischen zwei Windschutzstreifen an, in denen sich die aerodynamische Kraftwirkung auf dort vorhandene Körper um mindestens 100-Su-Wert (%) im Vergleich zur Kraftwirkung der ungestörten Anströmung in gleicher Höhe reduziert.



Mindestwert der Verminderung der aerodynamischen Kraftwirkung S_u

Zugehörige Einzelmessreihen sind in den Anlagen 82 - 85 dargestellt.

