

WACKER INGENIEURE - Grundstraße 17 - D-75217 Birkenfeld

WACKER INGENIEURE



Bauwerksaerodynamik • Gebäudeklima

Windlasten
Schwingungen
Windkomfort
Gebäudelüftung
Raumluftrömungen

**Medienhafen Düsseldorf:
Bebauungsplanverfahren „Speditionstraße West“**

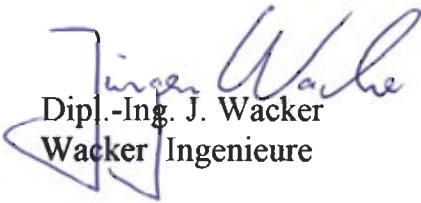
**Windkanaluntersuchung der Auswirkungen der
geplanten Neubebauung auf das bodennahe Windfeld
im unmittelbaren Nahbereich der geplanten Hochhäuser**

(überarbeitete Version)

Auftraggeber: Landeshauptstadt Düsseldorf
Umweltamt Abt. 19/3
Brinckmannstr. 7
40225 Düsseldorf

Projektbearbeitung: Dipl.-Met. A. Bitzer

27. September 2005


Dipl.-Ing. J. Wacker
Wacker Ingenieure

WACKER INGENIEURE
Grundstraße 17
D-75217 Birkenfeld

Telefon 07082-9 31 31
Telefax 07082-9 31 33
E-mail info@wacker-ingenieure.de
Internet www.wacker-ingenieure.de

Bankverbindung
Sparkasse Pforzheim
(BLZ 666 500 85) 691 046

Inhaber
Dipl.-Ing.
Jürgen Wacker

Gutachten, Messungen
Numerische Berechnungen
Windkanalversuche

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS.....	1
1. PROBLEMSTELLUNG	2
2. EXPERIMENTELLE VORGEHENSWEISE, WINDKANALVERSUCHE.....	4
2.1. METHODIK	4
2.2. BESTIMMUNG DES WINDKOMFORTS UND DER STRÖMUNGSVERHÄLTNISSE IM BODENNAHEN BEREICH	8
2.2.1. <i>Flächendeckende qualitative Ermittlung des Windkomforts/-diskomforts mittels der</i> <i>Sanderosionstechnik.....</i>	8
2.2.2. <i>Quantitative Ermittlung des Windkomforts mittels Hitzdrahtanemometrie.....</i>	9
2.3. VERSUCHSPROGRAMM	12
3. ERGEBNISSE DER WINDKANALUNTERSUCHUNGEN	13
3.1. SANDEROSIONSVERSUCHE.....	13
3.2. WINDKOMFORT/-DISKOMFORTUNTERSUCHUNG.....	17
4. LITERATUR.....	34

1. PROBLEMSTELLUNG

Auf der Speditionstraße im Düsseldorfer Hafen ist die Ausweisung eines Mischgebietes mit Wohnbebauung geplant (siehe Abb. 1.1). Südlich dieser Wohnbebauung sollen zwei Hochhäuser errichtet werden, außerdem existieren zwei Hochhäuser auf der Ostseite der Straße. Im Rahmen der für die Baugenehmigung erforderlichen Umweltverträglichkeitsuntersuchungen soll gemäß der Forderungen der Stadt Düsseldorf u. a. ein unabhängiges Fachgutachten erstellt werden, das die Auswirkungen der geplanten Neubebauung auf das bodennahe Windfeld beschreibt. Hauptziel ist die Klärung, ob und wo möglicherweise Personen (insbesondere Fußgänger und Radfahrer), die sich im Nahbereich der geplanten Hochhäuser aufhalten, durch Windeinwirkung gefährdet oder beeinträchtigt werden. Hierzu sollen der Ist-Zustand und ein Planungszustand verglichen werden.

Wacker Ingenieure wurden damit beauftragt zu untersuchen, welche Einflüsse durch die geplante Bebauung auf das bodennahe Windfeld in der näheren Umgebung und im Nahbereich der geplanten Hochhäuser zu erwarten sind. Durch Vergleich der Ergebnisse im Ist- und Plan-Zustand kann der Einfluss der geplanten Bebauung quantifiziert werden. Hierzu wurden im Windkanal am Modell Sanderosionsuntersuchungen und Geschwindigkeitsmessungen vorgenommen. Die Auftretenshäufigkeit bestimmter Strömungsgeschwindigkeiten wurde durch Verknüpfung der Messergebnisse mit der örtlichen Windstatistik ermittelt. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurden die Auswirkungen der geplanten Bebauung beurteilt.

Im vorliegenden Bericht wird die Vorgehensweise erläutert und die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen werden zusammengefasst.

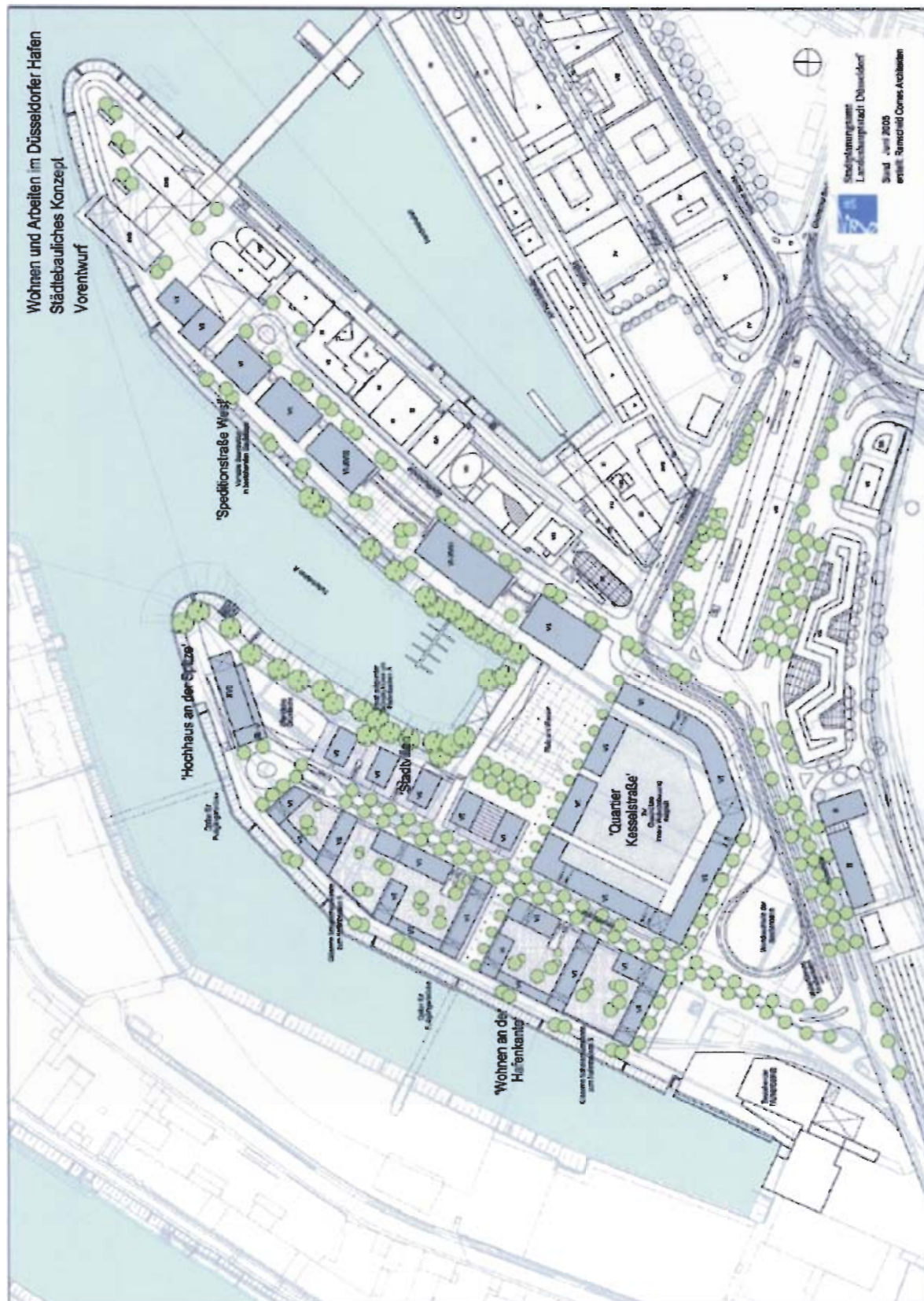


Abb. 1.1: Städtebauliches Konzept „Wohnen und Arbeiten im Düsseldorfer Hafen“ (Vorentwurf) (Stadtplanungsamt Düsseldorf, (2005))

2. EXPERIMENTELLE VORGEHENSWEISE, WINDKANALVERSUCHE

2.1. Methodik

Die Windkanaluntersuchungen erfolgten an einem maßstäblich verkleinerten Modell (Maßstab 1 : 300) des Untersuchungsgebietes (siehe Abb. 2.1 und Abb. 2.2). Untersucht wurden der Istzustand und ein mit dem Planungs- und Umweltamt der Stadt Düsseldorf abgestimmter Planzustand. Im Planzustand wurde auch der Bebauungsplan für das Gebiet der Kesselstraße mitberücksichtigt sowie einige geplante Gebäude, die sich außerhalb des Bereichs der Bebauungspläne „Speditionstraße West“ und „Kesselstraße“ befinden, die aber für das zu erwartende Windgeschwindigkeitsfeld im Bereich der Hochhäuser von Bedeutung sind.

Die maßgeblichen Ähnlichkeitsverhältnisse - insbesondere die geometrische Ähnlichkeit - wurden bei der Versuchsdurchführung entsprechend dem Stand der Wissenschaft eingehalten. Strömungsmechanisch relevante Details der Gebäude wurden (vereinfacht) berücksichtigt. Auf diese Weise kann gewährleistet werden, dass die tatsächlich zu erwartenden Strömungsfelder dem im Windkanal modellierten Strömungsgeschehen entsprechen.

Die für das Untersuchungsgebiet repräsentativen atmosphärischen Grenzschichtströmungsverhältnisse, d. h. die höhenabhängige Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeit und der Windböen (Turbulenz), wurden mit Hilfe von Rauigkeitselementen auf dem Windkanalboden und so genannten Vortex-Generatoren (Wirbelerzeugern) am Beginn der Windkanalteststrecke erzeugt. Das Modell war auf einem Drehteller zur Simulation unterschiedlicher Windrichtungen angebracht.

Die Geschwindigkeit der Windströmung an einer beliebigen Stelle setzt sich aus den Komponenten u , v , w in Richtung der 3 Koordinatenachsen x , y , z zusammen. Hierbei können die Geschwindigkeitsanteile in einen zeitlichen Mittelwert U und eine diesem Mittelwert überlagerte turbulente Schwankungsgröße u' unterteilt werden. Definiert man die x -Achse als Hauptströmungsrichtung nehmen die zeitlichen Mittelwerte der lateralen Geschwindigkeit v und vertikalen Komponente w den Wert Null an, jedoch bleibt der Schwankungsanteil dieser Komponenten erhalten.

Der Geschwindigkeitsvektor $U(t)$ der turbulenten Windströmung setzt sich somit folgendermaßen zusammen:

$$U(t) = \begin{pmatrix} U + u' \\ + v' \\ + w' \end{pmatrix}$$

mit U = zeitlicher Mittelwert der Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung x
 u', v', w' = Schwankungsanteile in Richtung der x -, y - und z -Achse

Neben dem zeitlichen Mittelwert U der Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung ist auch die fluktuierende Komponente u' von Bedeutung. Die turbulenten Schwankungen werden als Böen bezeichnet. Eine einfache Größe zur Beschreibung der longitudinalen Geschwindigkeitsfluktuationen $u'(z)$ ist der Turbulenzgrad oder die Turbulenzintensität $Tu(z)$. Dieser Parameter ist als das Verhältnis der Standardabweichung σ_u von $u'(t)$ zur mittleren Geschwindigkeit U definiert:

$$Tu = \frac{\sigma_u}{U}$$

Die Windgeschwindigkeiten können im Windkanalmodell mit Hitzdraht- oder Heißfilmsonden, Laser-Doppler-Velocimetern oder speziellen, richtungsunempfindlichen Sonden gemessen werden. In Rahmen dieser Untersuchung wurden die Messungen mit Hitzdrahtsonden durchgeführt (siehe auch Abb. 2.3). Dabei werden die zeitlich gemittelten Windgeschwindigkeiten und die Windgeschwindigkeitsschwankungen σ_u in der gleichen Position sowohl für den Ist-Zustand, als auch für den Planzustand ermittelt. Aus dem Verhältnis beider Messwerte lässt sich die Änderung des Windfeldes infolge des geplanten Neubaus quantifizieren.

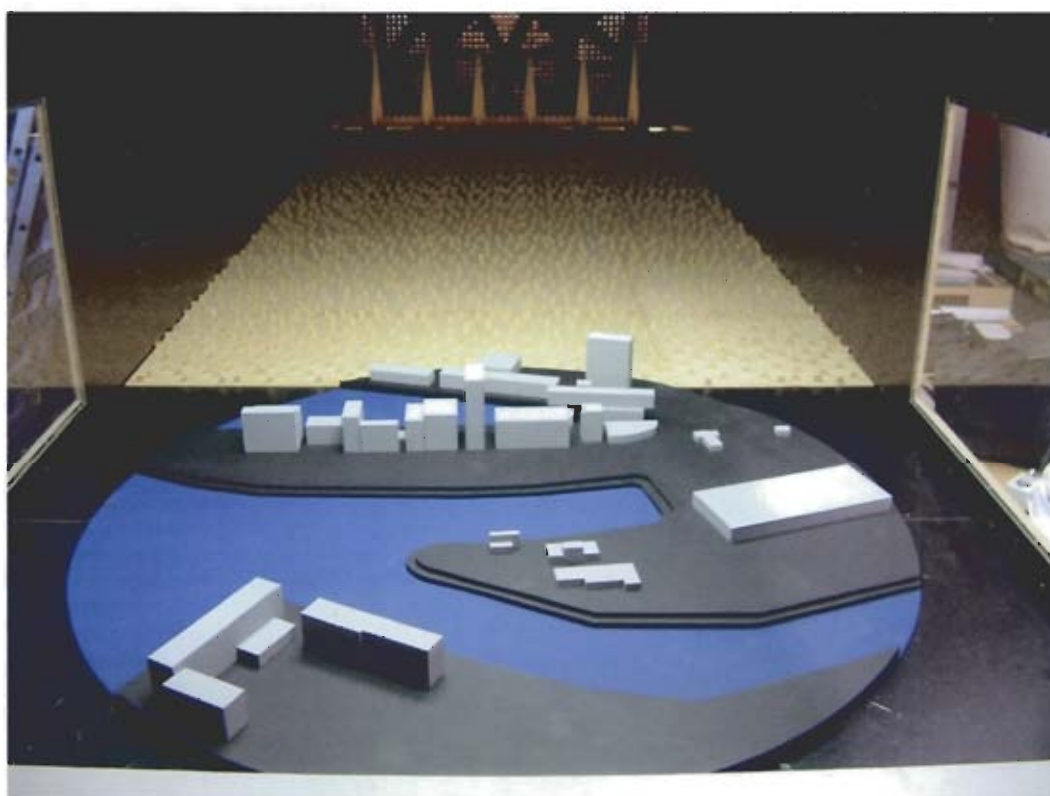


Abb. 2.1 Windkanalmodell, Ist-Zustand

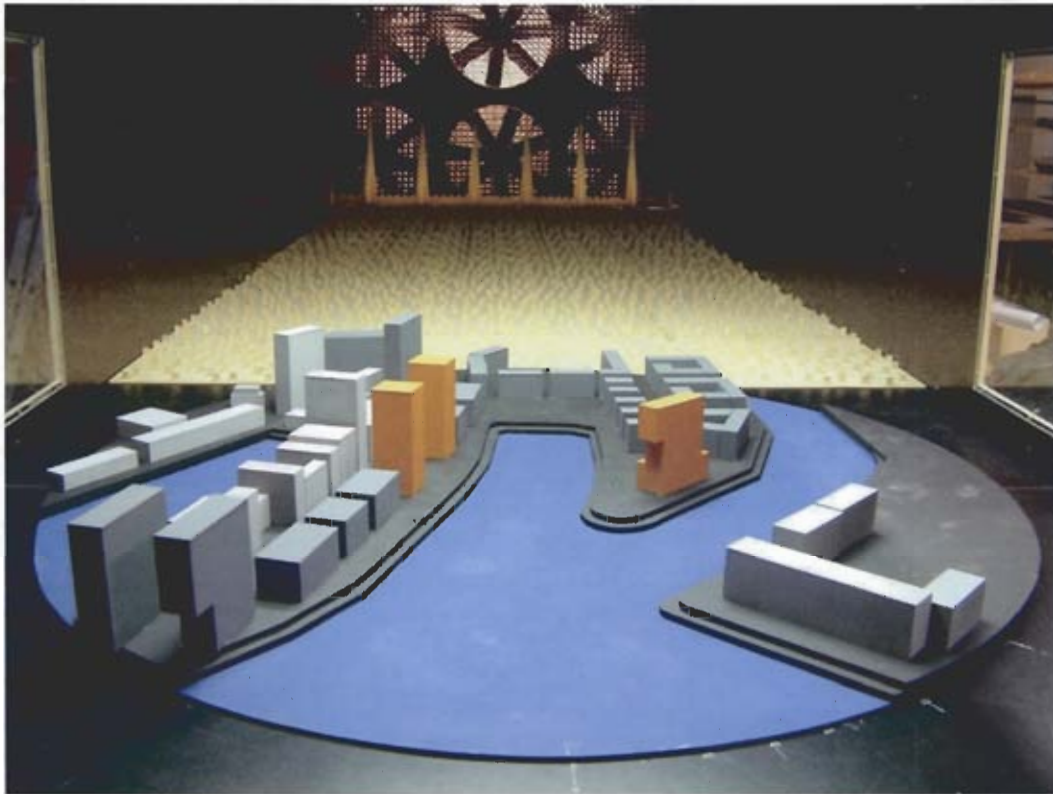


Abb. 2.2 Windkanalmodell, Planzustand (der Bebauungsplan für das Gebiet der Kesselstraße wurde mitberücksichtigt)

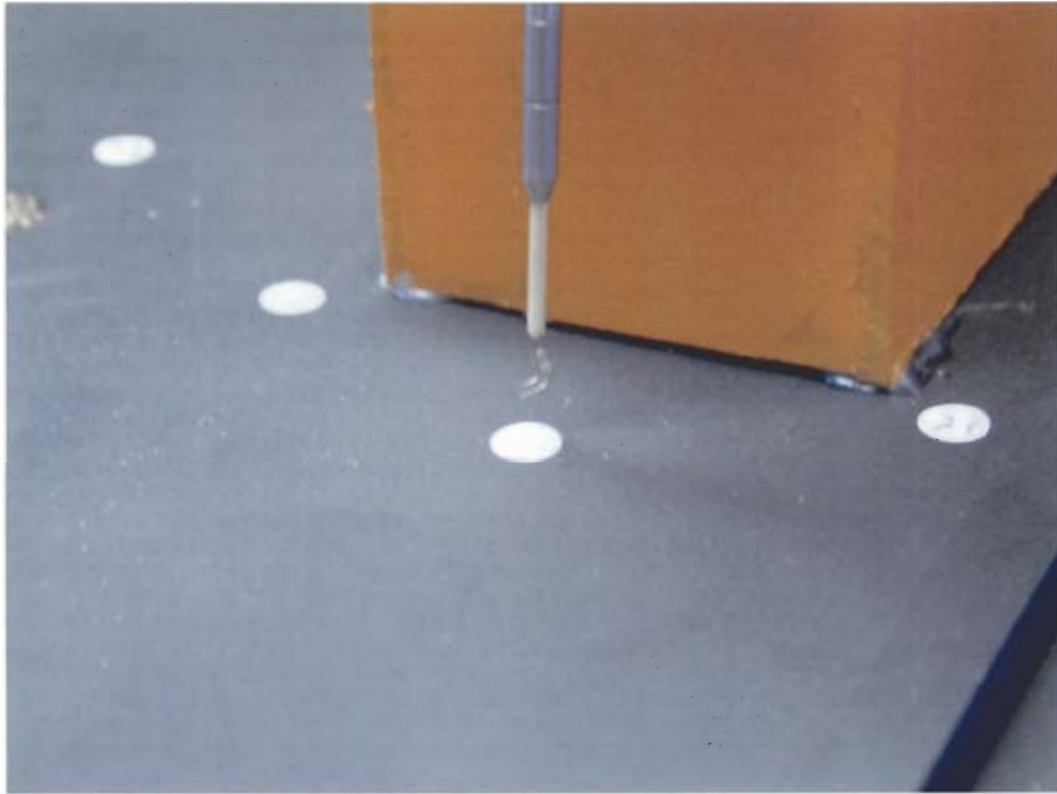


Abb. 2.3 Für die Geschwindigkeitsmessungen verwendete Hitzdrahtsonde

2.2. Bestimmung des Windkomforts und der Strömungsverhältnisse im bodennahen Bereich

Für die quantitative Beurteilung des Windkomforts bzw. Winddiskomforts müssen an entsprechend kritischen Punkten, deren Positionen auf der Basis der Ergebnisse der Sanderosionsversuche und von Erfahrungswerten aus früheren Projekten identifiziert werden, die örtlichen Windgeschwindigkeiten und Windgeschwindigkeitsschwankungen bestimmt, statistisch aufbereitet und bewertet werden.

2.2.1. Flächendeckende qualitative Ermittlung des Windkomforts/-diskomforts mittels der Sanderosionstechnik

Eine einfache und sehr anschauliche Möglichkeit zur qualitativen Ersteinschätzung bzw. Sichtbarmachung des bodennahen Windfeldes bietet die Sanderosionstechnik. Hierbei wird der Untersuchungsbereich gleichmäßig mit Sand bestreut. Das Freiwerden des Bodenbereiches bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten ist ein direktes Maß für die dort herr-

schenden Windgeschwindigkeiten. Sandbewegungen bei z. B. kleinen Windkanalwindgeschwindigkeiten bedeuten geringen Windkomfort, aber auch gute Durchlüftungsverhältnisse. Sanderosionsaufnahmen dienen zum einen einer ersten Abschätzung der Zonen, in denen mit erhöhten bodennahen Windgeschwindigkeiten zu rechnen ist, zum anderen der präzisen Auswahl der Messstellen, an denen mit höchster Wahrscheinlichkeit der Windkomfort eingeschränkt sein wird.

2.2.2. Quantitative Ermittlung des Windkomforts mittels Hitzdrahtanemometrie

Die Fußgänger-Behaglichkeit, der so genannte Windkomfort, wird nicht nur durch die zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit $\bar{U}$, sondern auch durch die Intensität der Windgeschwindigkeitsschwankungen, also die Böigkeit des Windes, bestimmt. Die Intensität der Windgeschwindigkeitsschwankungen (Böigkeit) wird durch deren Effektivwert erfasst:

$$\sigma = \sqrt{\overline{u'^2}}$$

Der Effektivwert ist die Wurzel aus dem Mittelwert der quadrierten Geschwindigkeitsschwankungen und wird daher auch als RMS-Wert (Root-Mean-Square) bezeichnet. Zur Quantifizierung des Windkomforts und der Windsicherheit von Passanten dient die Bezugswindgeschwindigkeit:

$$U_B = \bar{U} + \gamma \cdot \sigma$$

In der Literatur schwanken die Werte für den Wichtungsfaktor γ zwischen 1 und 4 (Gandemer, 1982). Zur Beurteilung des Windkomforts werden in aller Regel Wichtungsfaktoren zwischen 1 und 1,5, zur Beurteilung der Windsicherheit Werte zwischen 3 und 3,5 gewählt. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden γ -Werte von 1,5 (Windkomfort) bzw. 3 und 3,5 (Windsicherheit) angesetzt.

Bei der Festlegung von zu empfehlenden Obergrenzen für die Geschwindigkeit U_B wird als Grenzwindgeschwindigkeit für die mechanische Wirkung, also zur Quantifizierung der so genannten mechanischen Behaglichkeit, eine Geschwindigkeit

$$U_{B, mech. Grenz} = \bar{U} + \sigma = 6 \text{ m/s}$$

entsprechend der einschlägigen Literatur gewählt. Oberhalb dieses Wertes beginnen unangenehme Wirkungen für den Menschen, wie z. B. das Aufwirbeln von Staub, Druckempfindung an empfindlichen Körperstellen, sowie Irritation der Augen und anderes.

Die thermische Windwirkung ist insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen von Bedeutung. In Mitteleuropa sind häufig die östlichen Windrichtungen mit niedrigen Außentemperaturen korreliert, d.h. sie treten verstärkt in den Wintermonaten auf. Da bei niedrigen Außentemperaturen bereits niedrigere Windgeschwindigkeiten als störend bzw. unangenehm empfunden werden, wird in aller Regel – so auch in dieser Studie – bei winterlichen Windströmungen aus östlichen Windrichtungen eine Grenzwindgeschwindigkeit $U_{b, mech. Grenz} = 4 \text{ m/s}$ angesetzt.

Es gibt in der Literatur unterschiedliche Ansätze zur Bewertung. Einige Autoren definieren bei einer konstanten Böenwindgeschwindigkeit von 6 m/s mögliche Nutzungen aufgrund der Überschreitungshäufigkeiten, andere Autoren beurteilen Nutzungsmöglichkeiten aufgrund der Böenwindgeschwindigkeit bei konstant gehaltener Überschreitungshäufigkeit von max. 1% der Jahresstunden. In dieser Untersuchung erfolgt die Beurteilung mit einem plausiblen Mix unterschiedlicher Kriterien. Die genaue Beschreibung dieser Kriterien erfolgt im Zusammenhang mit der Darstellung der Ergebnisse.

Zur Quantifizierung des Windkomforts entwickelten Gandemer und Guyot (1976) den Geschwindigkeitsfaktor X_i :

$$X_i = \frac{(\overline{U} + \gamma \cdot \sigma)_{mB}}{(\overline{U} + \gamma \cdot \sigma)_{oB}}$$

X_i ist der Quotient der lokalen, durch die Bebauung beeinflussten Windgeschwindigkeit (Index mB) und der ungestörten Bezugsgeschwindigkeit ohne Bebauung (Index oB) an derselben Stelle in gleicher Höhe. Beide Bezugsgeschwindigkeiten können im Windkanalmodell mit Hitzdraht- oder Heißfilmsonden, Laser-Doppler-Velocimetern oder speziellen, richtungsunempfindlichen Sonden gemessen werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die Messungen mit Hitzdrahtsonden durchgeführt (siehe auch Abb. 2.3). Dabei werden die zeitlich gemittelten Windgeschwindigkeiten und die Windgeschwindigkeitsschwankungen in der gleichen Messhöhe (entsprechend 1.5 m im Naturmaßstab über dem Boden) mit und ohne Bebauung bestimmt. Geschwindigkeitsfaktoren $X_i < 1$ entsprechen einer Windberuhigung, $X_i > 1$ einer Erhöhung der örtlichen Windgeschwindigkeit relativ zur Windsituation ohne Bebauung.

Die Messung des Geschwindigkeitsfaktors ermöglicht es, zu berechnen, wie häufig im statistischen Jahresmittel die Grenzwindgeschwindigkeit überschritten wird. Hierzu müssen die lokalen Windgeschwindigkeitsdaten unter Berücksichtigung der von einer relevanten Wetter-

station vorliegenden Windhäufigkeitsverteilungen ausgewertet werden. Der Rechnungsgang wird im Folgenden stichwortartig beschrieben.

Im ersten Schritt wird die Änderung der Windgeschwindigkeit und der Windgeschwindigkeitsschwankung in Höhe des Messfühlers der für den Untersuchungsbereich relevanten meteorologischen Station (im Allgemeinen 10 m) beim Übergang vom Windprofil an der meteorologischen Station zum Windprofil im Stadtbereich berücksichtigt. In dieser Untersuchung wird auf die Windstatistik der Station Düsseldorf-Lohhausen (siehe Abb. 2.4) zurückgegriffen, welche für die Windverhältnisse im Bereich des geplanten Gebäudekomplexes repräsentativ ist.

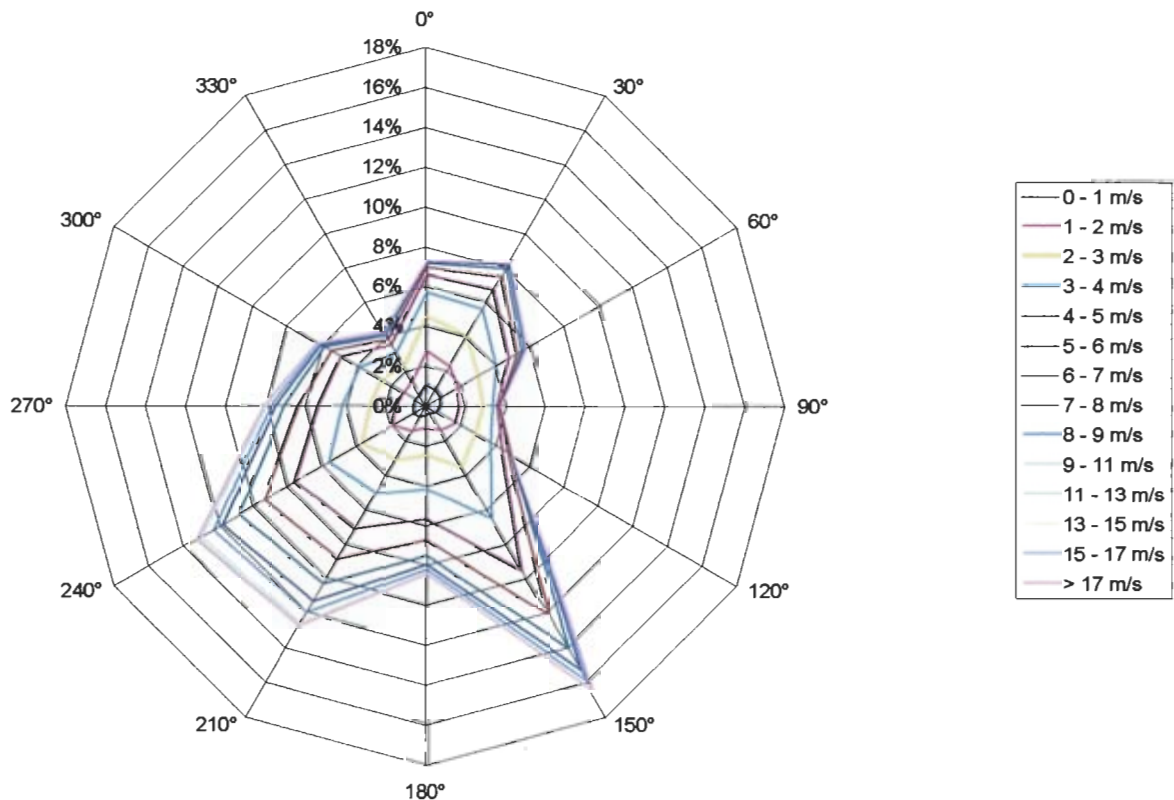


Abb. 2.4: Windstatistik Düsseldorf-Lohhausen (EWA, 1989), überprüft anhand aktueller Stationsdaten

Im zweiten Schritt wird mit dem Potenzansatz, der das ungestörte Windgeschwindigkeitsprofil in der atmosphärischen Grenzschicht beschreibt, die mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe $h_M = 10$ m im Untersuchungsgebiet auf diejenige der Höhe h des jeweiligen Messpunktes umgerechnet:

$$\frac{U_h}{U_{10}} = \left[\frac{h}{h_M = 10} \right]^\alpha$$

Der Profilexponent α beträgt 0,27; dies ist ein typischer Wert für eine gelockerte städtische Bebauungsstruktur wie die hier vorliegende. Näherungsweise kann angenommen werden, dass der Effektivwert der Geschwindigkeitsschwankungen für beide Höhen gleich ist.

Schließlich wird im dritten Schritt der Einfluss der Bebauung auf die lokalen Windgeschwindigkeiten mit Hilfe des Geschwindigkeitsfaktors X_i erfasst. Unter Berücksichtigung des o. a. Rechengangs lässt sich diejenige Geschwindigkeit ($U_{M,mech.Grenz}$) der Wetterstation angeben, bei welcher im Untersuchungsbereich örtlich die Grenzwindgeschwindigkeit ($U_{B,mech.Grenz}$) erreicht wird:

$$U_{M,mech.Grenz} = \frac{1}{(h/h_M)^\alpha + B} \cdot \frac{U_{B,mech.Grenz}}{X_i}$$

Die Konstante B setzt sich aus dem Wichtungsfaktor γ und der Turbulenzintensität in Messpunkthöhe ohne Einfluss des Bauwerkes zusammen

Die Auftretenshäufigkeit dieser Grenzwindgeschwindigkeit an der meteorologischen Station geht aus der Langzeitwindstatistik (Abb. 2.4) hervor.

2.3. Versuchsprogramm

Die Sanderosionsuntersuchungen wurden für 3 Windrichtungen durchgeführt (30°, 150° und 240°). Diese wurden entsprechend der Häufigkeitsverteilung ausgewählt (siehe Abb. 2.4).

Die Geschwindigkeitsmessungen im bodennahen Bereich erfolgten für insgesamt 12 Windrichtungen. Die Messpunkte werden in Abschnitt 3 definiert.

3. ERGEBNISSE DER WINDKANALUNTERSUCHUNGEN

3.1. Sanderosionsversuche

In Abb. 3.1 bis Abb. 3.6 sind die mit Hilfe der Sanderosionstechnik visualisierten bodennahen Geschwindigkeitsverhältnisse dargestellt. Untersucht wurden hierbei wie bereits erwähnt der Istzustand und der Planzustand.

Die Sanderosionsversuche wurden für die Windrichtungen Südwest (240°), Südost (150°) und Nordost (30°) durchgeführt. Durch die Auswahl dieser 3 Windrichtungen wird hinsichtlich der Häufigkeit der Windrichtungen (siehe auch Abb. 2.4) ein Großteil der zu erwartenden Situationen erfasst. Die nachfolgenden Abbildungen wurden durch Überlagerung der digitalen Fotos erstellt.

In den Darstellungen für den Istzustand erkennt man, dass im Bereich der geplanten Neubebauung im Uferbereich entlang der Speditionsstraße bei nordöstlicher und südwestlicher Anströmung leichte Geschwindigkeitsüberhöhungen auftreten, bedingt durch fehlende Strömungshindernisse in der Anströmung und der exponierten Lage zum Hafenbecken. Die bestehende Bebauung entlang der Speditionsstraße führt bei diesen Strömungen parallel zur Häuserflucht zu leichten Erhöhungen der bodennahen Windgeschwindigkeit.

Im Planzustand erkennt man im Bereich der Hochhäuser Zonen mit deutlich erhöhten Windgeschwindigkeiten entlang der Wind zugewandten Fassadenseite sowie im Bereich der Gebäudeecken. Ursache hierfür ist eine abwärts gerichtete Strömung an der Wind zugewandten Seite, die Luftpakete mit höherer Geschwindigkeit aus den höheren Luftschichten nach unten befördern.

Sanderosionsversuche vermitteln einen qualitativen Überblick über die zu erwartenden Geschwindigkeitsfelder bei komplexer Bebauung. Die in den Legenden angegebenen Geschwindigkeitsfaktoren stellen eine Näherung dar und dienen zur groben Einordnung der zu erwartenden Windgeschwindigkeiten in den markierten Bereichen. Detailliertere Ergebnisse liefern die Geschwindigkeitsmessungen im nachfolgenden Abschnitt.

Auf der Basis der vorliegenden Ergebnisse wurden 20 Messpunkte für die quantitative Bestimmung der Windgeschwindigkeiten ausgewählt, um ein repräsentatives Bild der bodennahen Windgeschwindigkeiten im Bereich der geplanten Hochhäuser zu erhalten.

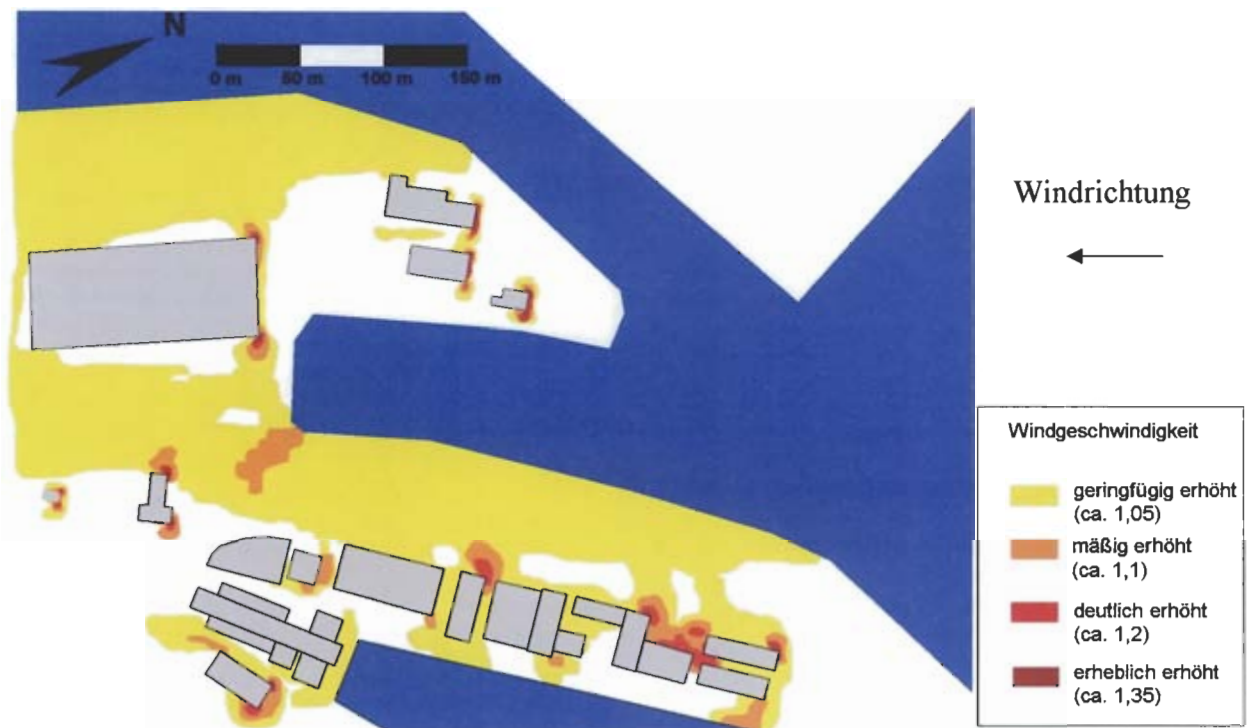


Abb. 3.1: Windrichtung 30° - Istzustand

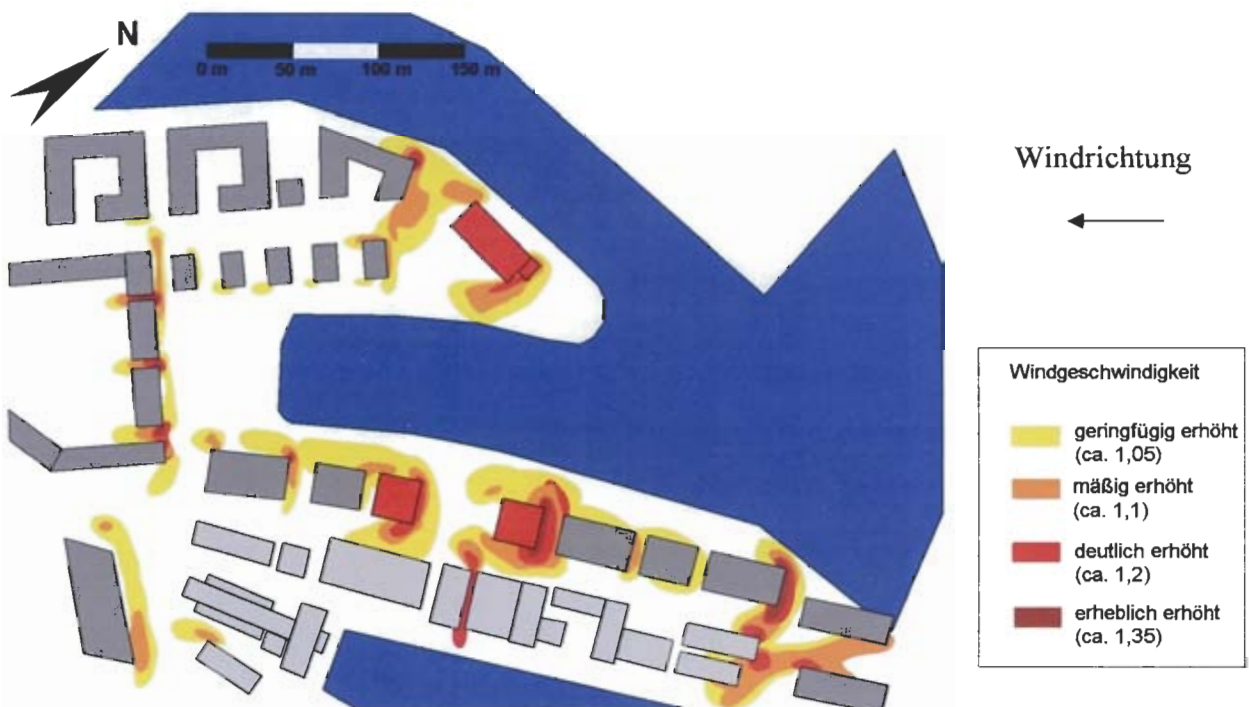


Abb. 3.2: Windrichtung 30° - Planzustand (die geplanten Hochhäuser sind rot gefärbt)

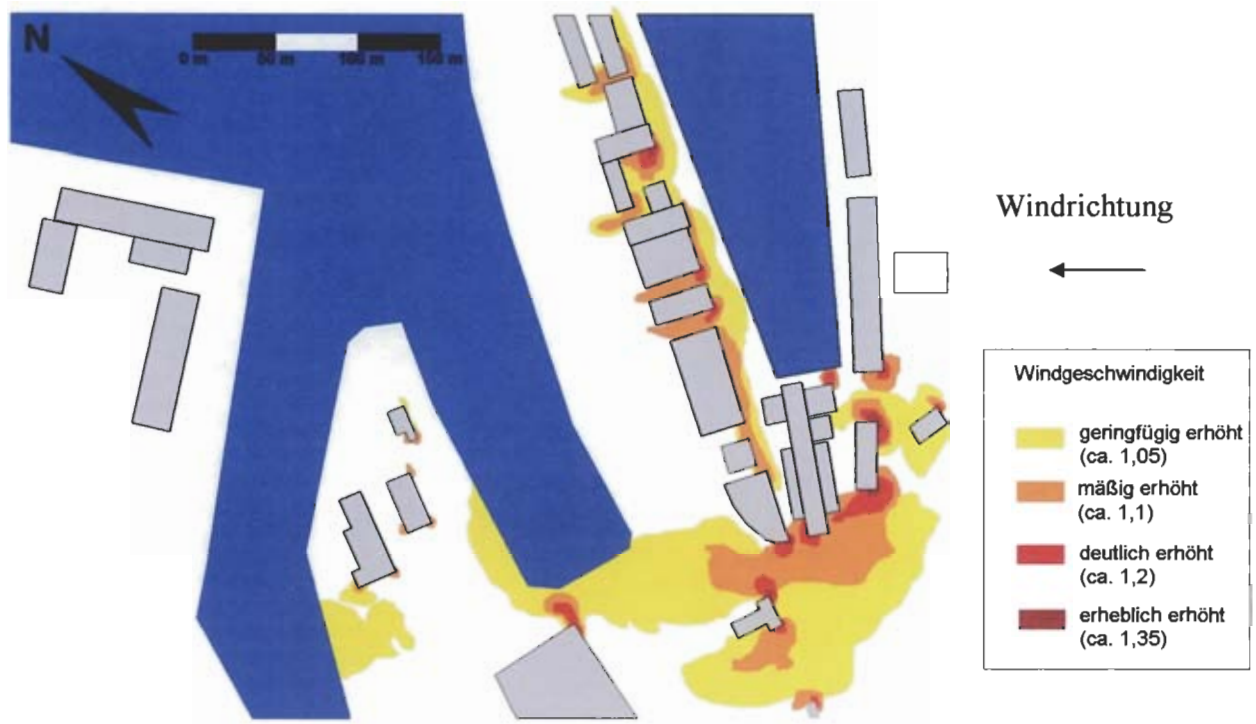


Abb. 3.3: Windrichtung 150° - Istzustand

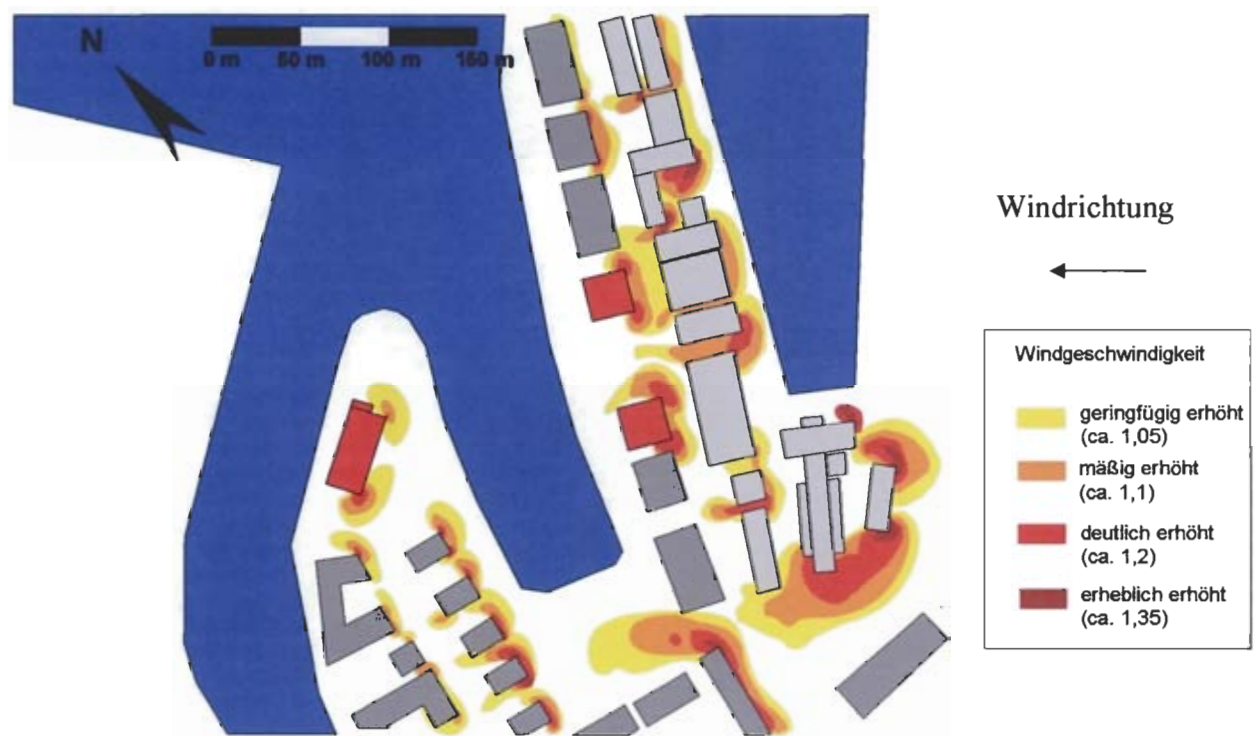


Abb. 3.4: Windrichtung 150° - Planzustand (die geplanten Hochhäuser sind rot gefärbt)

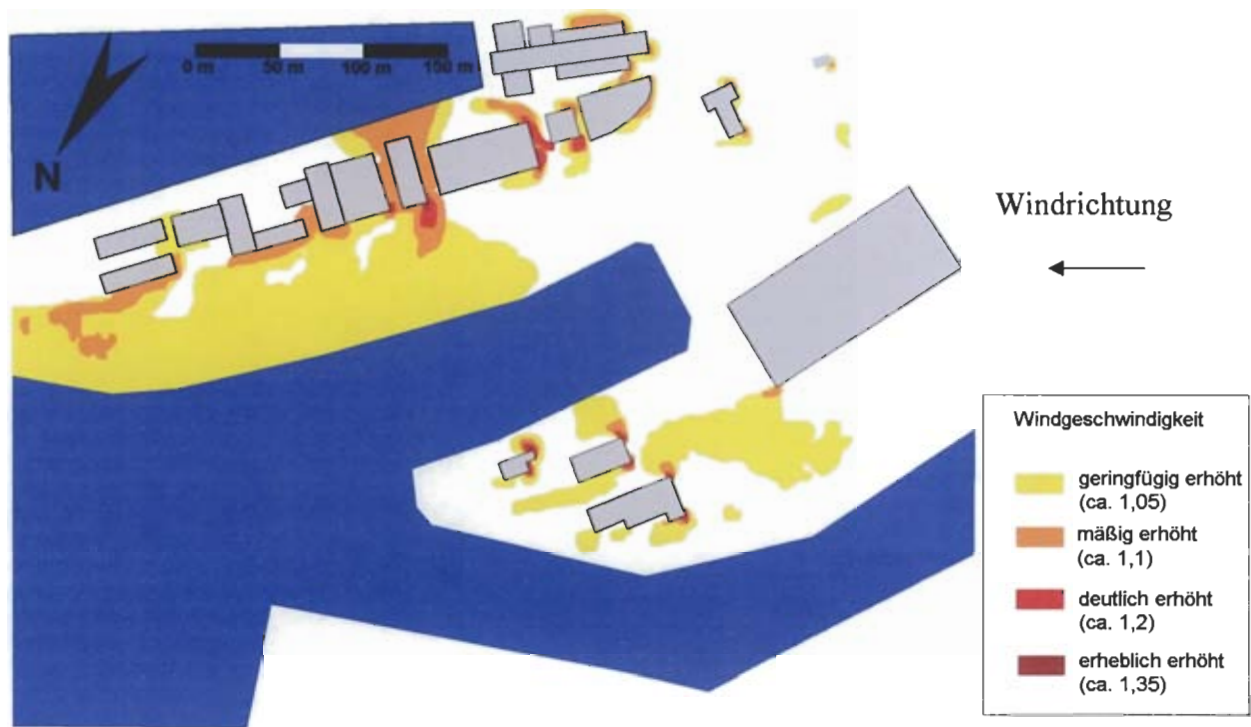


Abb. 3.5: Windrichtung 240° - Istzustand

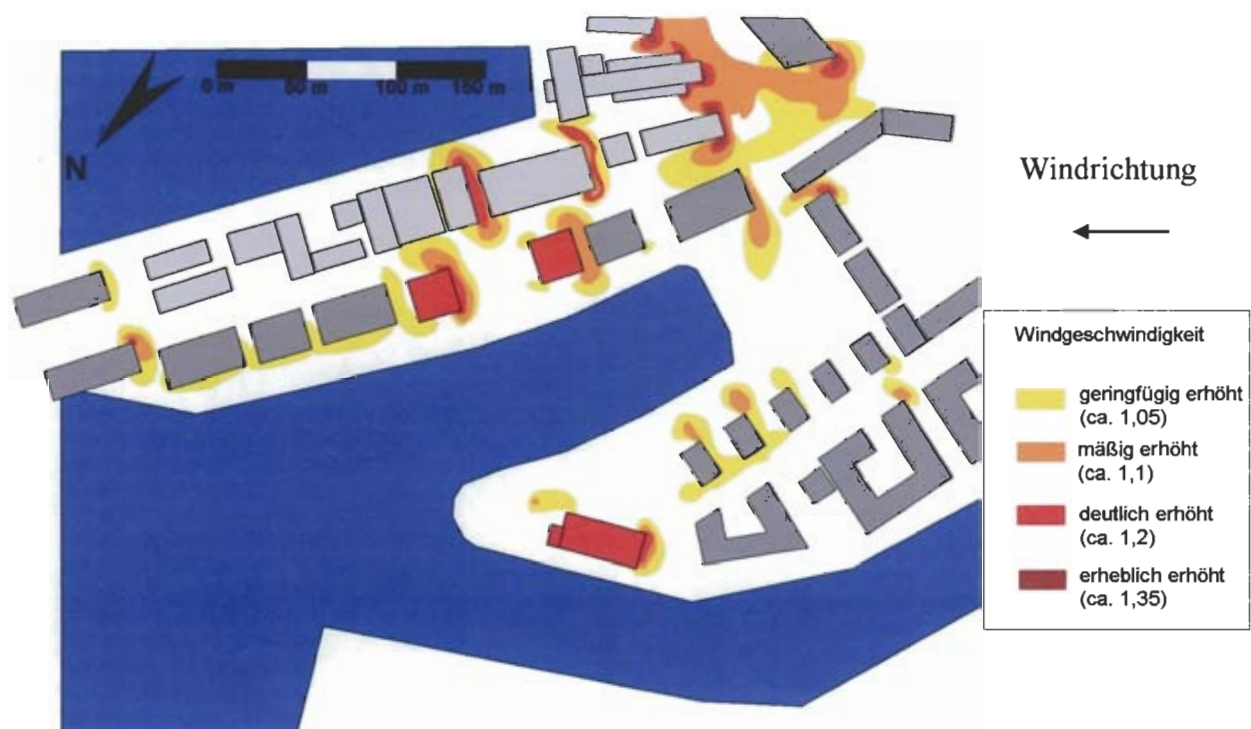


Abb. 3.6: Windrichtung 240° - Planzustand (die geplanten Hochhäuser sind rot gefärbt)

3.2. Windkomfort/-diskomfortuntersuchung

Die Bestimmung der Windgeschwindigkeit wurde für insgesamt 20 Punkte durchgeführt. Die Lage der Punkte ist in Abb. 3.7 dargestellt. Die Messpunkte wurden an den Stellen gewählt, an denen einerseits hohe Windgeschwindigkeiten zu erwarten sind oder aufgrund der Nutzung von besonderem Interesse sind. Die Messungen für das bodennahe Windfeld wurden in ca. 1.5 m Höhe (Naturmaßstab) über der Bodenoberfläche vorgenommen. Die Messungen wurden für 12 Windrichtungen durchgeführt. Da im Istzustand im interessierenden Bereich des Baufensters keine Bebauung vorhanden ist, bildet sich ein relativ gleichförmiges Geschwindigkeitsfeld aus. Zur quantitativen Erfassung dieses bodennahen Geschwindigkeitsfeldes wurden Messungen an 5 repräsentativen Punkten durchgeführt.

Für die Messpunkte wurden entsprechend der in Abschnitt 2 geschilderten Vorgehensweise die Geschwindigkeitsfaktoren X_i berechnet. In Tab. 3.1 sind die Ergebnisse der Messungen der bodennahen Windgeschwindigkeiten und der Geschwindigkeitsschwankungen zusammengestellt. Für jeden der 20 Messpunkte im bodennahen Bereich ist der Geschwindigkeitsfaktor X_i angegeben. Hierbei wurde dieser auf die ungestörte Anströmung in Bodennähe ($z = 1.5 \text{ m}$) bezogen. Die X_i -Faktoren wurden sowohl für den Istzustand als auch für den Planzustand berechnet. Ein Verhältnis $X_i > 1$ bedeutet, wie bereits erläutert, eine Erhöhung der lokalen Windgeschwindigkeit im Vergleich zur entsprechenden Windgeschwindigkeit ohne Bebauung (freie Anströmung). Zur besseren Veranschaulichung sind die Werte aus Tab. 3.1 in den Abbildungen Abb. 3.8 bis Abb. 3.15 zusätzlich graphisch dargestellt.

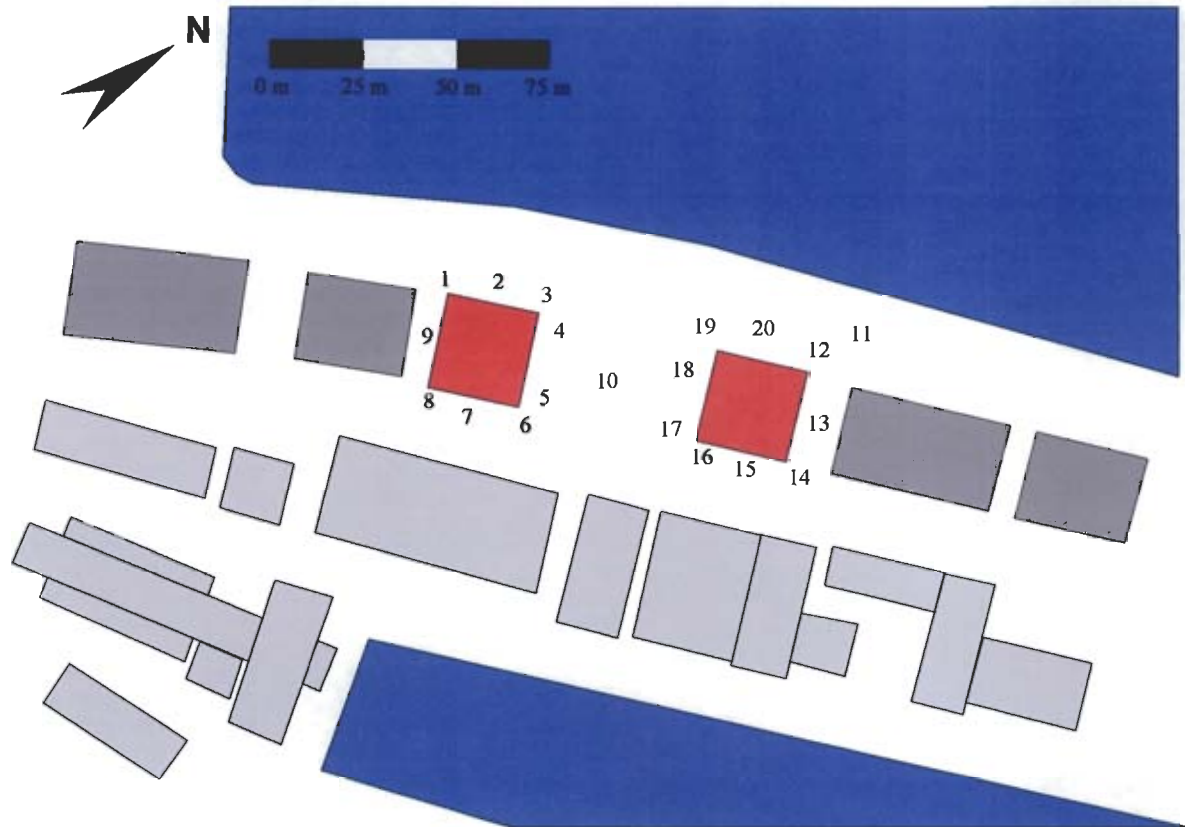


Abb. 3.7 Bezeichnungen und Positionen der Messstellen der Windfeldmessungen

Planzustand												
Messpunkt	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
1	1.25	1.20	0.63	0.60	1.25	0.85	0.55	0.85	0.81	0.97	0.83	1.20
2	1.15	1.18	0.75	0.47	0.68	0.61	0.45	0.88	0.72	1.02	0.80	0.85
3	1.04	1.09	1.00	0.80	0.82	0.85	0.58	0.87	0.87	1.14	1.04	0.74
4	0.72	0.72	0.80	0.91	0.77	0.79	0.91	0.67	0.76	1.31	1.36	0.85
5	1.08	0.87	0.79	0.71	0.93	0.86	0.95	0.61	0.59	1.01	1.10	0.97
6	1.19	1.07	1.00	0.88	1.03	0.95	1.39	0.84	0.93	1.20	0.91	1.07
7	0.71	0.94	1.20	0.62	0.81	0.72	0.58	0.66	0.99	1.11	1.00	0.73
8	0.95	0.71	0.79	0.62	1.13	0.97	0.62	0.90	1.10	1.20	1.10	0.96
9	1.15	0.50	0.54	0.58	1.22	0.85	0.37	0.55	0.58	0.75	0.99	1.39
10	1.46	0.78	1.01	1.03	0.77	0.87	0.92	0.99	0.75	1.33	1.10	1.17
11	0.83	1.12	0.96	0.75	0.69	0.73	0.55	0.65	0.86	1.07	0.85	0.76
12	0.87	0.88	1.07	1.05	0.67	0.78	0.52	0.55	0.94	1.16	0.96	0.87
13	1.26	0.67	0.60	0.72	0.66	0.76	0.53	0.54	0.46	0.87	1.26	1.18
14	1.00	1.12	0.71	0.85	0.96	0.92	0.70	0.63	0.64	0.97	0.85	0.99
15	0.91	1.07	0.64	0.67	0.63	0.60	0.73	0.79	0.95	0.82	0.84	0.81
16	1.19	1.07	0.72	1.04	1.12	1.03	0.78	0.89	1.11	1.41	1.18	0.81
17	1.09	1.13	0.85	1.32	1.09	0.97	0.68	0.65	0.78	1.06	0.92	0.92
18	0.79	0.59	0.66	1.24	0.59	0.57	0.71	0.53	0.56	0.79	0.80	1.15
19	1.24	1.13	1.05	1.03	0.72	0.70	0.89	0.76	0.77	0.99	0.83	1.16
20	0.89	1.00	0.95	1.02	0.59	0.52	0.64	0.87	0.90	1.11	0.71	0.71

Istzustand												
Messpunkt	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
2	0.99	1.08	1.09	0.76	0.57	0.67	0.92	1.10	1.04	0.84	0.67	0.84
8	1.10	1.01	0.91	0.57	0.45	0.59	0.55	0.88	0.91	0.90	0.56	0.85
10	0.90	1.04	1.02	1.02	0.77	0.65	0.69	0.89	0.93	0.80	0.66	0.73
11	0.89	1.02	1.00	0.83	0.54	0.68	0.72	1.02	1.07	1.01	0.95	0.80
17	0.92	0.98	0.84	0.92	0.95	0.78	0.84	0.96	1.16	1.03	0.64	0.79

Tab. 3.1 Windgeschwindigkeitsfaktoren X_i für die untersuchten Anströmrichtungen im Planzustand und im Istzustand (bezogen auf Referenzhöhe $z = 1.5\text{m}$ über Grund)

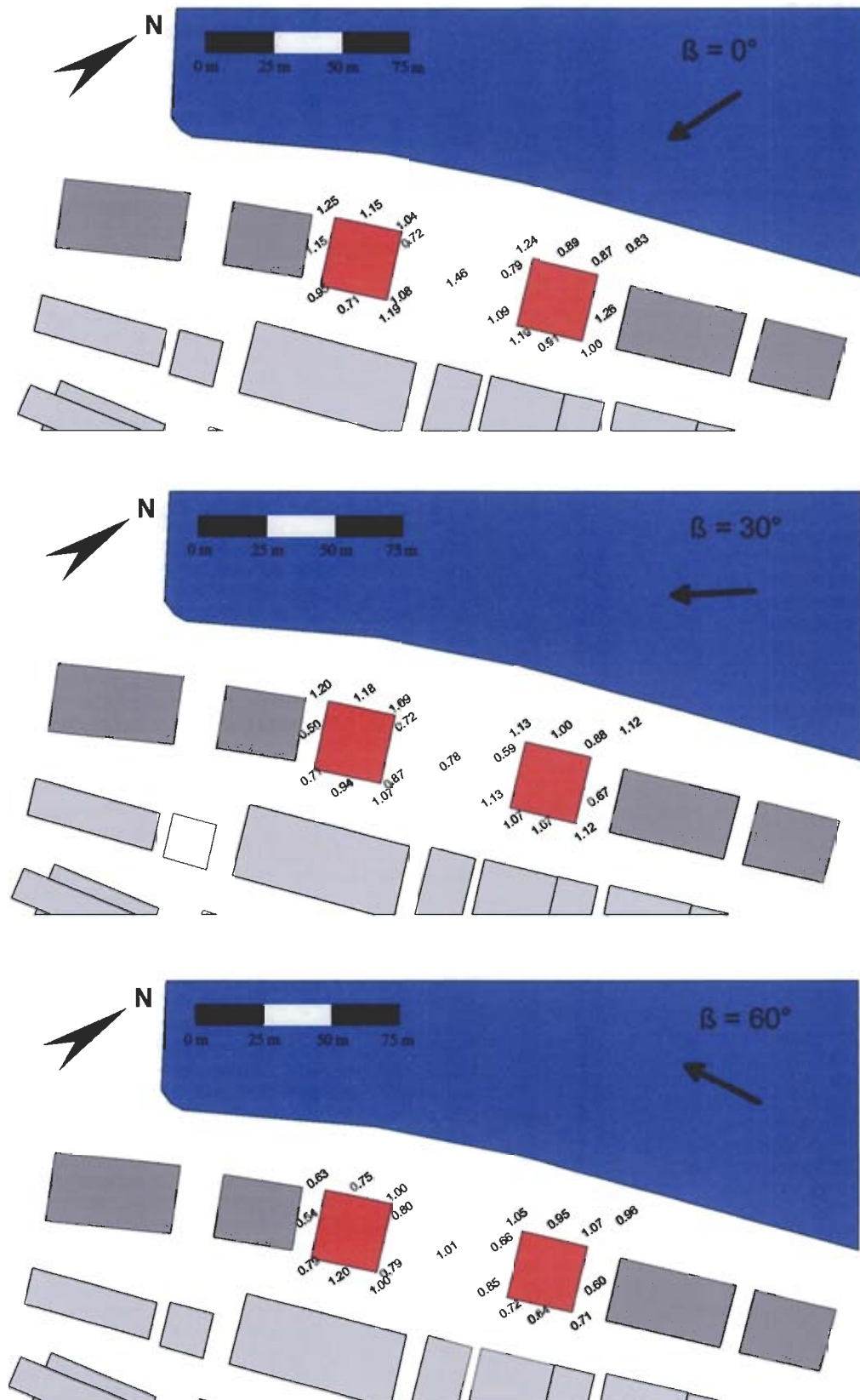


Abb. 3.8: Windgeschwindigkeitsfaktoren X_i für die untersuchten Anströmrichtungen 0° , 30° und 60° im Planzustand (bezogen auf Referenzhöhe $z = 1.5\text{m}$ über Grund)

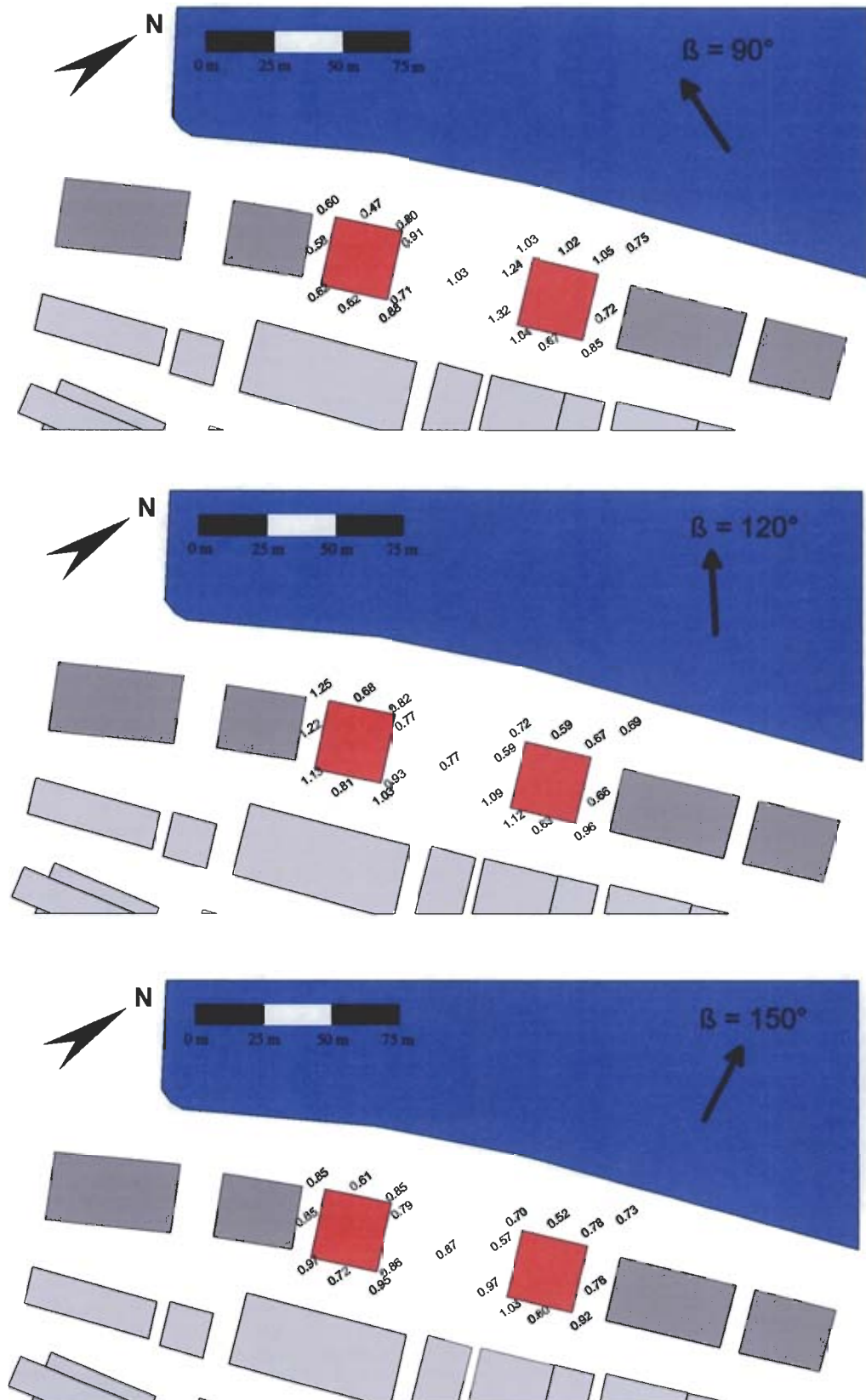


Abb. 3.9: Windgeschwindigkeitsfaktoren X_i für die untersuchten Anströmrichtungen 90° , 120° und 150° im Planzustand (bezogen auf Referenzhöhe $z = 1.5\text{m}$ über Grund)

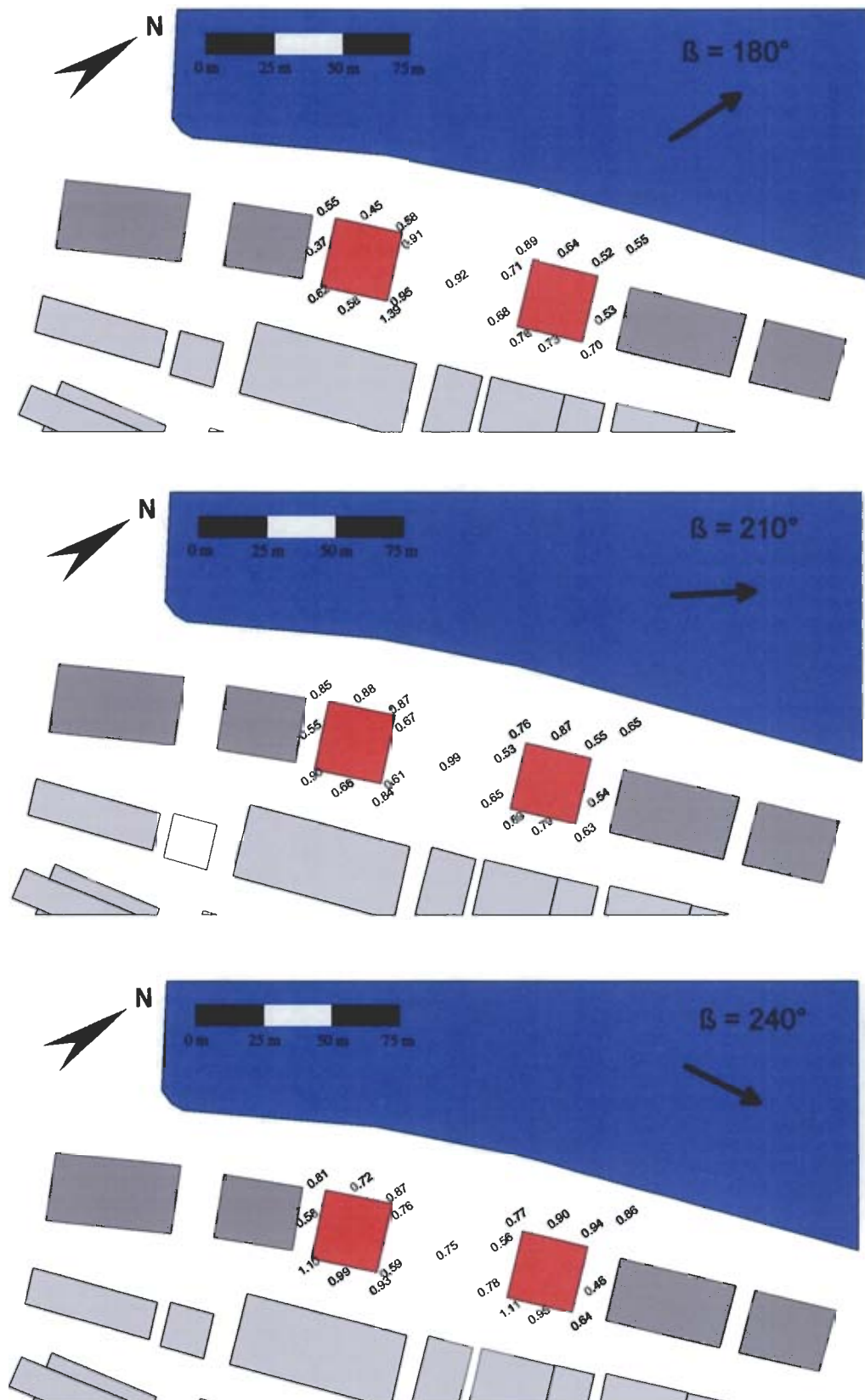


Abb. 3.10: Windgeschwindigkeitsfaktoren X_i für die untersuchten Anströmrichtungen 180° , 210° und 240° im Planzustand (bezogen auf Referenzhöhe $z = 1.5\text{m}$ über Grund)

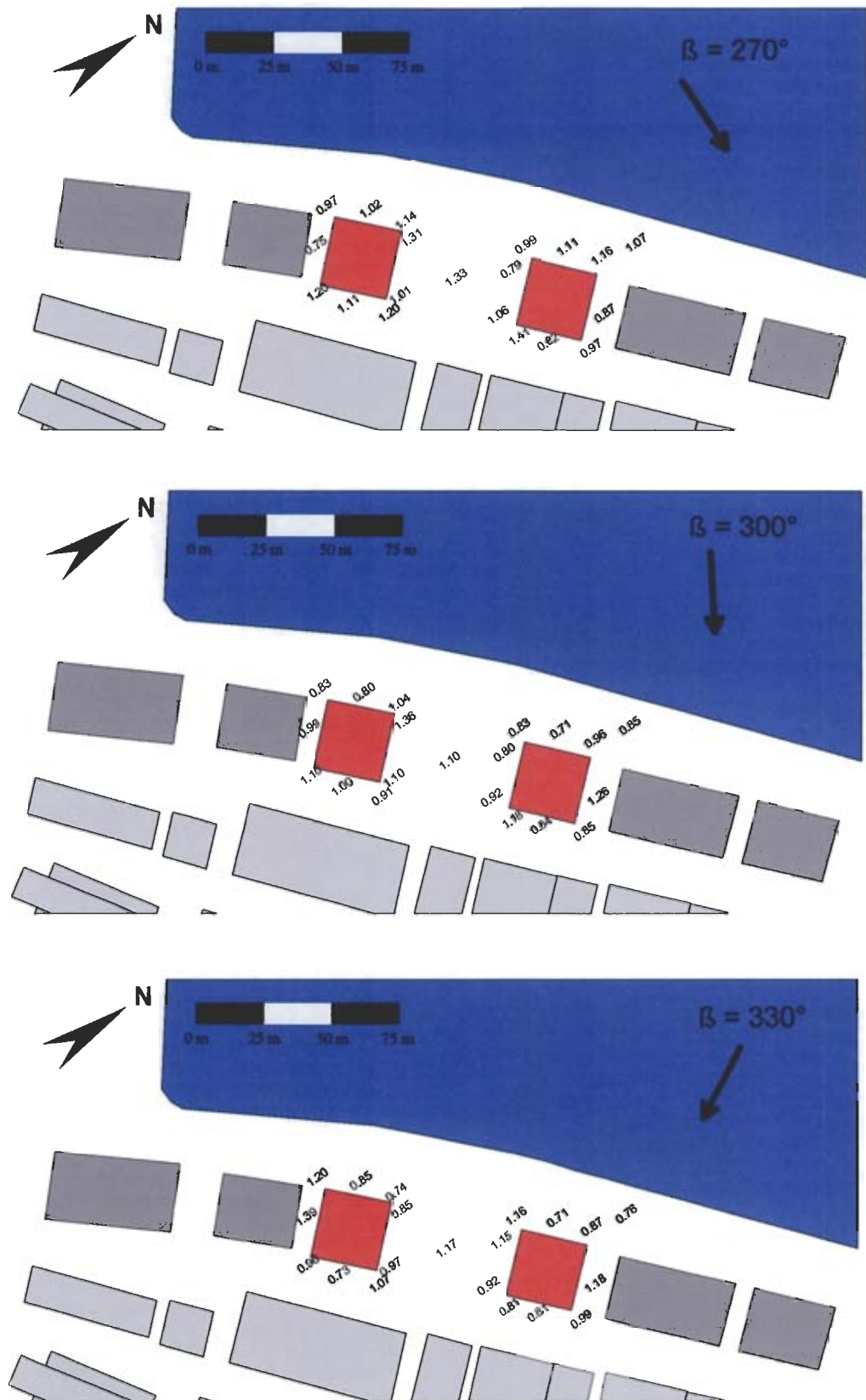


Abb. 3.11: Windgeschwindigkeitsfaktoren X_i für die untersuchten Anströmrichtungen 270° , 300° und 330° im Planzustand (bezogen auf Referenzhöhe $z = 1.5\text{m}$ über Grund)

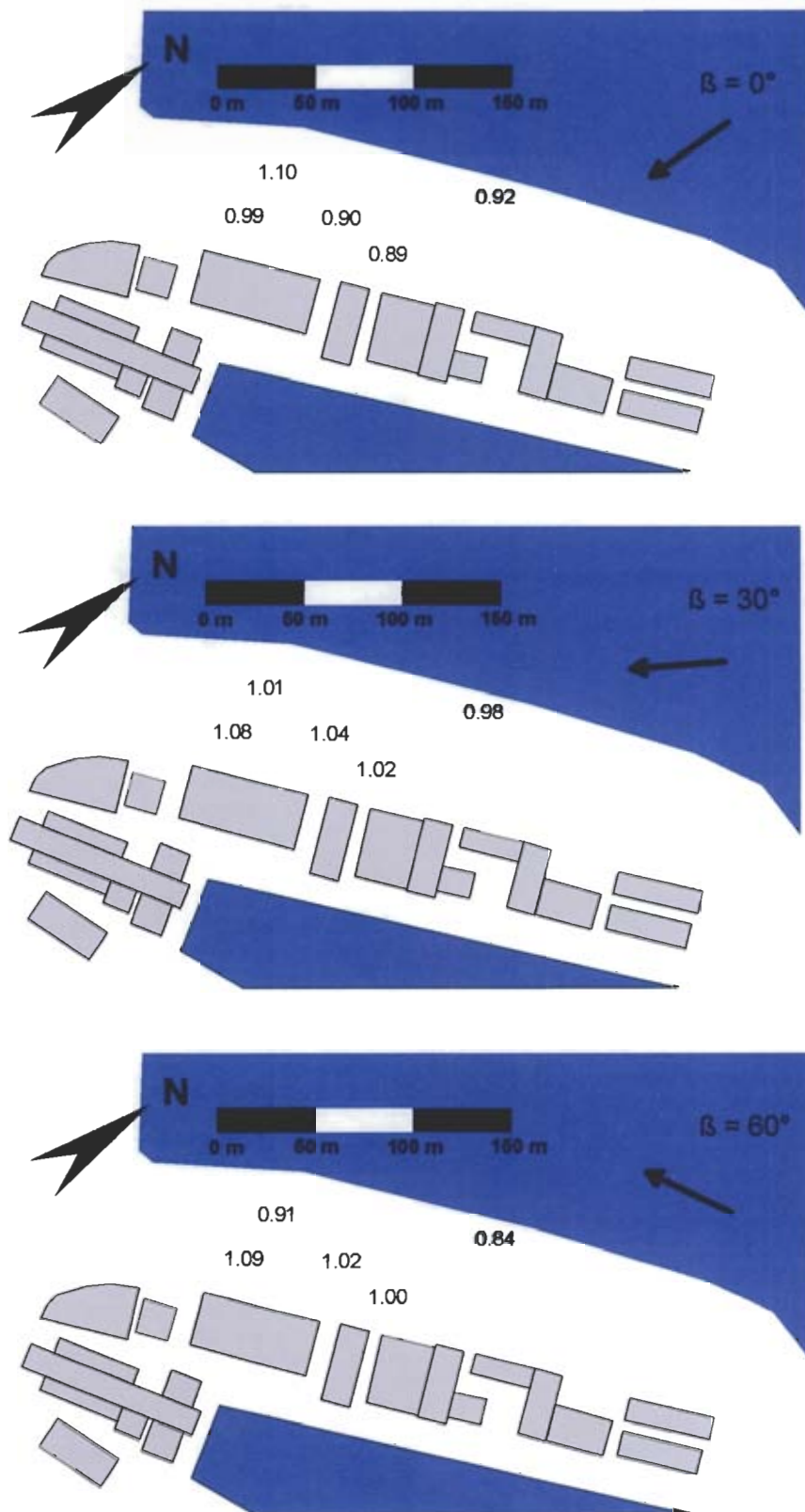


Abb. 3.12: Windgeschwindigkeitsfaktoren X_i für die untersuchten Anströmrichtungen 0° , 30° und 60° im Istzustand (bezogen auf Referenzhöhe $z = 1.5\text{ m}$ über Grund)

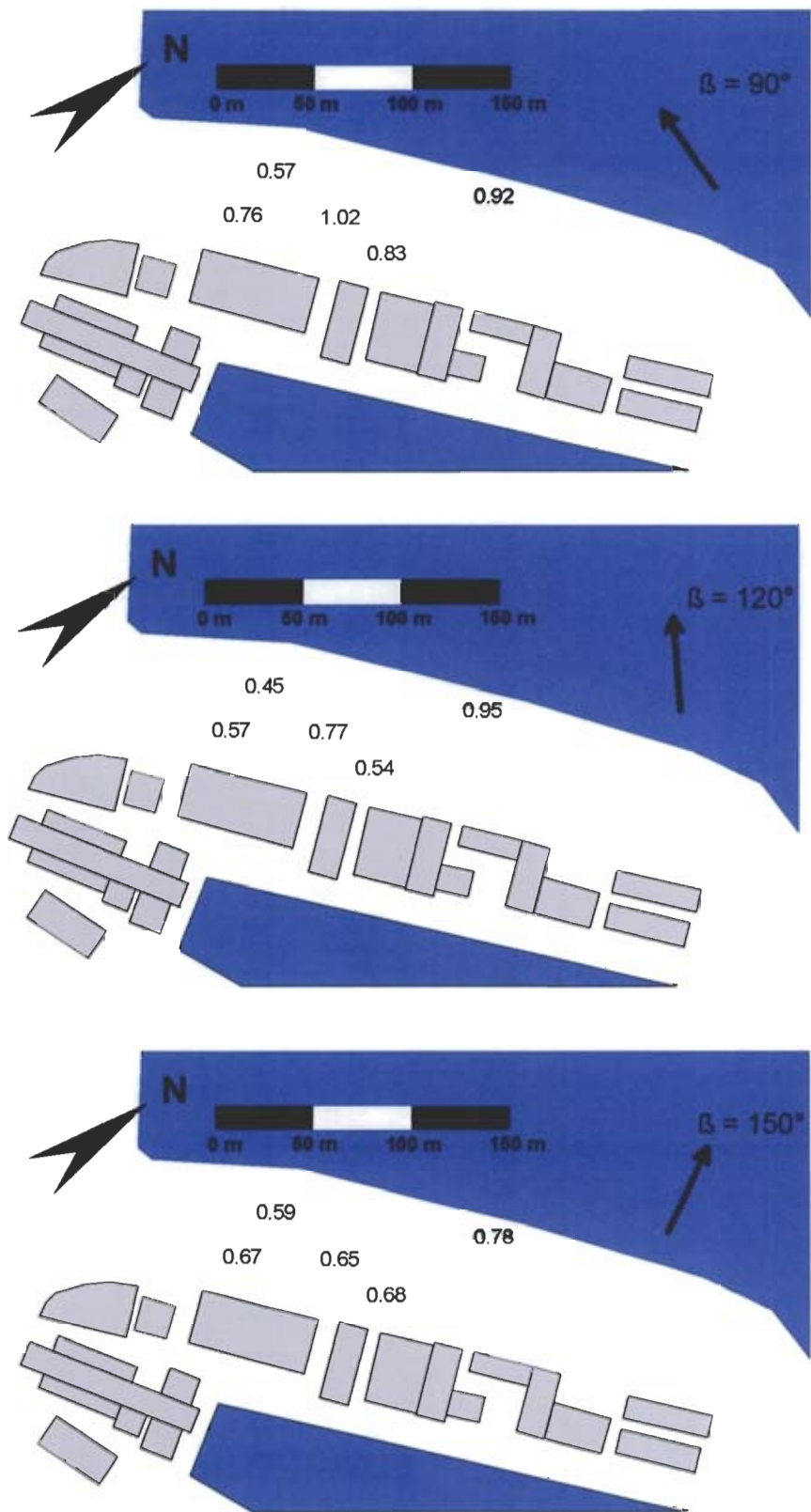


Abb. 3.13: Windgeschwindigkeitsfaktoren X_i für die untersuchten Anströmrichtungen 90° , 120° und 150° im Istzustand (bezogen auf Referenzhöhe $z = 1.5\text{ m}$ über Grund)

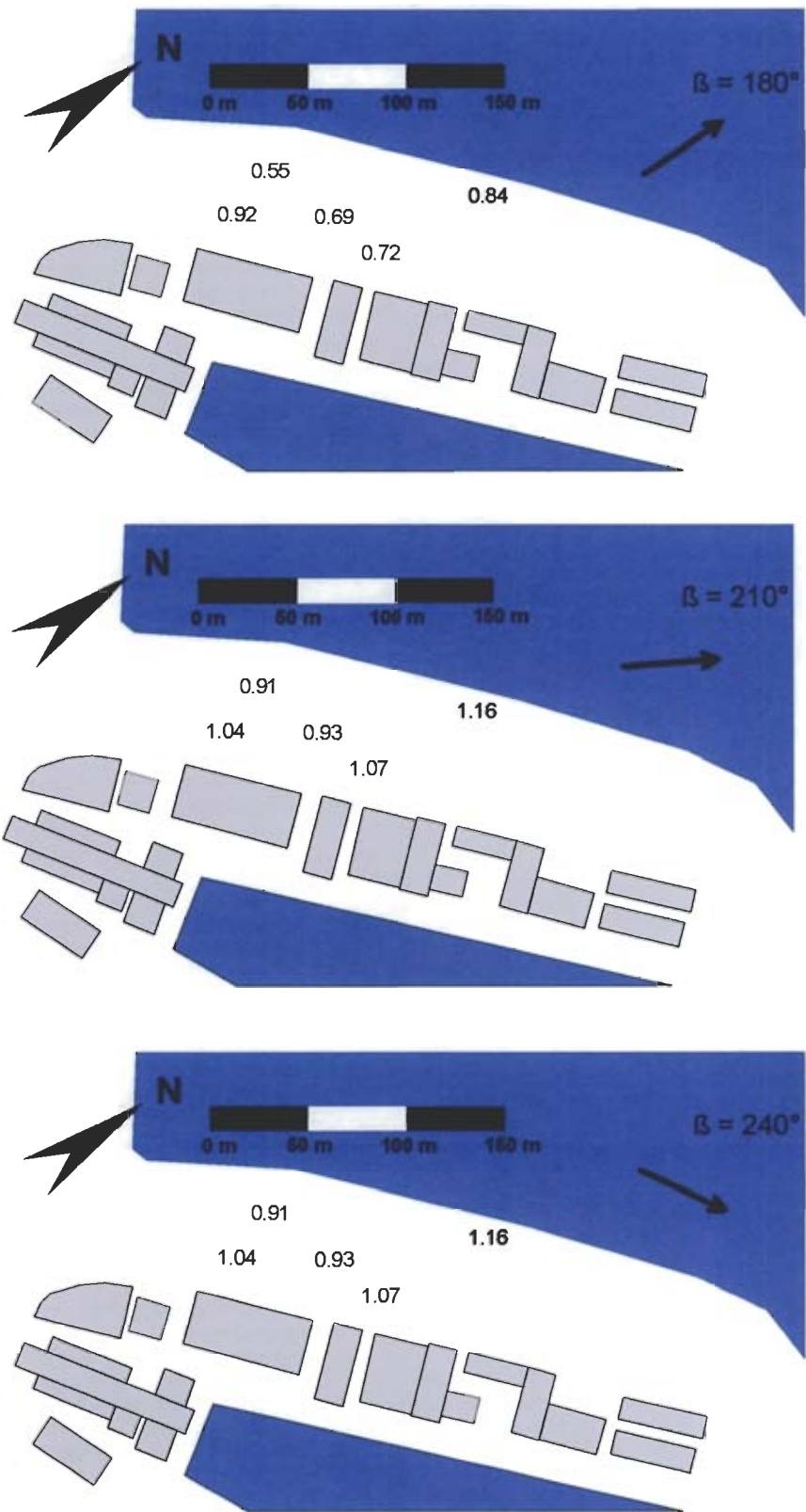


Abb. 3.14: Windgeschwindigkeitsfaktoren X_i für die untersuchten Anströmrichtungen 180° , 210° und 240° im Istzustand (bezogen auf Referenzhöhe $z = 1.5\text{m}$ über Grund)

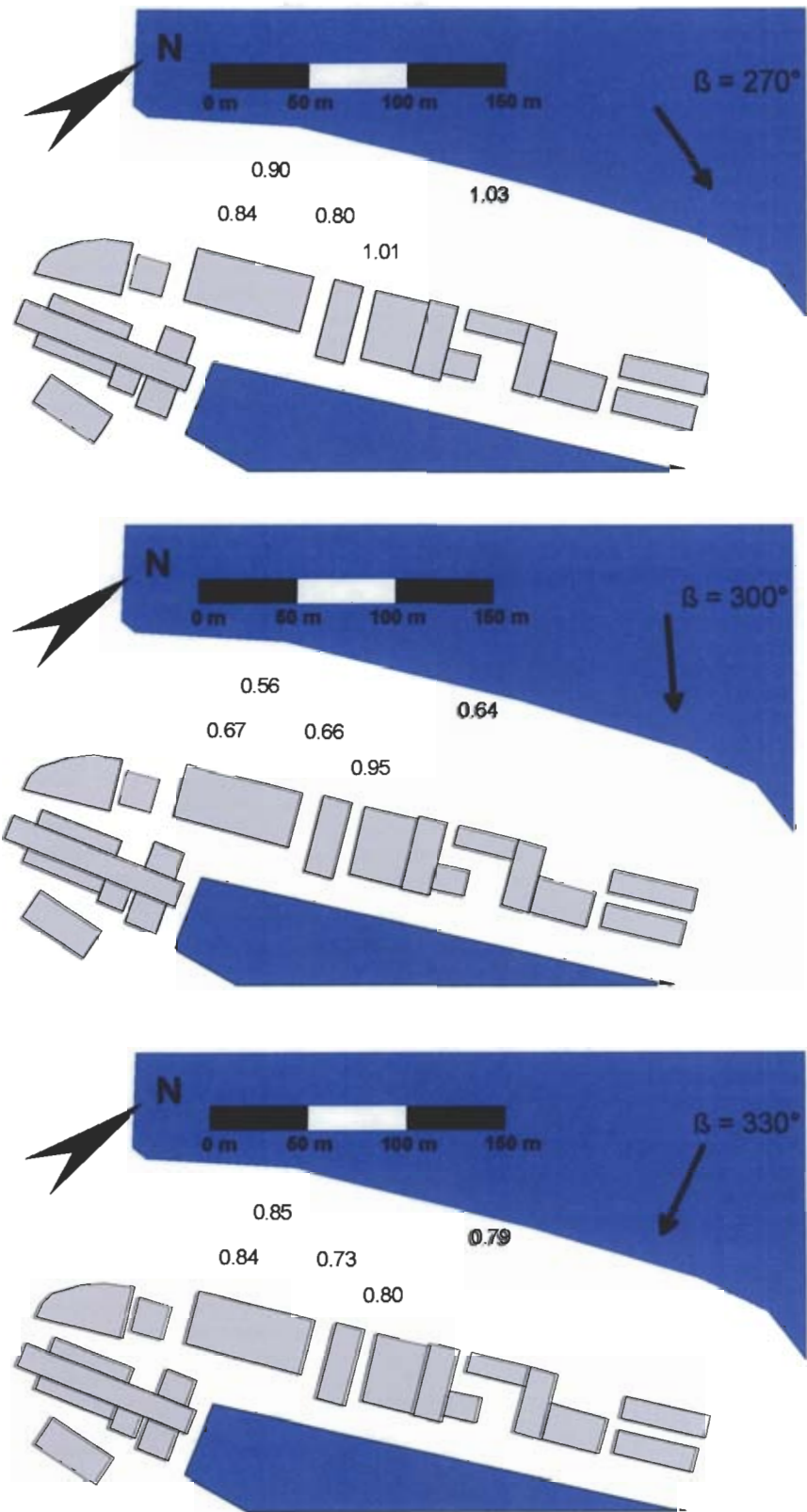


Abb. 3.15: Windgeschwindigkeitsfaktoren X_i für die untersuchten Anströmrichtungen 270° , 300° und 330° im Istzustand (bezogen auf Referenzhöhe $z = 1.5\text{m}$ über Grund)

Die in Tab. 3.1 angegebenen Geschwindigkeitsfaktoren X_i ermöglichen mit Hilfe der bereits angegebenen Gleichung die Berechnung der Grenzwindgeschwindigkeit $U_{M, mech. Grenz}$, welche an der meteorologischen Station auftreten muss, damit örtlich die Komfortgrenzgeschwindigkeit $U_{B, mech. Grenz}$ soeben erreicht wird. Sind diese Grenzwindgeschwindigkeiten der meteorologischen Station bekannt, lassen sich die Überschreitungshäufigkeiten aus der Windstatistik bestimmen. Zur Beurteilung der örtlichen Windsituation finden sich in der Literatur, wie bereits angesprochen, unterschiedliche Kriterien.

In dieser Untersuchung werden Kriterien von Gandemer und Guyot (1976), Hunt (1976), Williams et al. (1990) und Ratcliff et al. (1990) herangezogen. Auf der Basis von Untersuchungen dieser Autoren liegen für Böenwindgeschwindigkeiten $U_B < 6 \text{ m/s}$ keine Windkomfortprobleme und damit keine Nutzungseinschränkungen vor.

Nach Gandemer und Guyot (1976) ist in Wartebereichen, Parks, Cafés, Fußgänger- und Einkaufsbereichen etc. eine Überschreitung von $U_B = 6 \text{ m/s}$ in maximal 5% der Jahresstunden akzeptabel.

Zonen, in denen die Geschwindigkeit $U_B = 6 \text{ m/s}$ in maximal 20% der Zeit überschritten wird, sind als Zonen einzustufen, in denen nur ein kurzer Aufenthalt vorgesehen ist (Fußgängerbereiche, die schnell durchschritten werden etc.). Allerdings sollten dabei Geschwindigkeitsspitzen von $U_B = 15 \text{ m/s}$ nur in maximal 0,05% der Zeit überschritten werden.

In **Bereichen**, in denen mit plötzlich wechselnden Winden (z.B. Gebäudeecken etc.) zu rechnen ist, geben Hunt (1976) und Williams et al. (1990) als Sicherheitskriterium an, daß eine Böenwindgeschwindigkeit von 13 m/s in maximal 1% der Zeit überschritten werden sollte. Ein problemloses Laufen ist bei diesen Verhältnissen noch möglich.

Bei Überschreitungen in mehr als 1% der Zeit werden die Bedingungen als lästig eingestuft; in diesem Fall sind in den Bereichen, in denen sich Fußgänger und Radfahrer bewegen, Windschutzmaßnahmen vorzusehen.

In allen öffentlich zugänglichen Zonen, in denen in mehr als 1% der Jahresstunden mit Böenwindgeschwindigkeiten von $U_B = 18 \text{ m/s}$ zu rechnen ist, ist eine Gefahr für Fußgänger gegeben. In diesen Zonen sind Windschutzmaßnahmen unerlässlich.

Die **Windkomfortkriterien** sind nachfolgend in Tab. 3.2 zusammengefasst.

Böenwindgeschwindigkeit U_B [m/s]	Überschreitungshäufigkeit [%]	Beurteilungskriterien
< 6 m/s		keine Windkomfortprobleme
> 6 m/s	max. 5%	Zulässig in Cafés, Parks, Wartebereichen, auf Spielplätzen
> 6 m/s	max. 20%	Zulässig auf Flächen für kurzfrist. Aufenthalt
> 15 m/s	max. 0,05%	
> 13 m/s	max. 1%	Zulässig für problemloses Laufen
> 13 m/s	> 1%	Unangenehm, lästig (Windschutzmaßnahmen)
> 18 m/s	> 1%	Gefahr

Tab. 3.2 Kriterien zur Beurteilung der bodennahen Windverhältnisse (nach Gandemer und Guyot, 1976, Hunt, 1976, Williams et al. 1990, Ratcliff et al., 1990)

Die Ergebnisse für den untersuchten Bereich sind unter Berücksichtigung der Windkomfortkriterien in Tab. 3.3 unter Berücksichtigung der Nutzungsmöglichkeiten in Tab. 3.4 entsprechend den oben dargestellten Kriterien dargestellt. Hierbei können Tab. 3.3 und Tab. 3.4 auch als Skala mit von links nach rechts abnehmendem Windkomfort interpretiert werden.

Hinsichtlich des Windkomforts werden im Planzustand und im Istzustand an keinem der Punkte die Kriterien für eine Nutzung als Sitzplätze oder Straßencafé, etc. ausreichend erfüllt. Einige Messpunkte erfüllen die erforderlichen Bedingungen für kurzzeitigen Aufenthalt im Freien.

Hinsichtlich der Windsicherheit von Fußgängern und Radfahrern lässt sich sagen, dass an fast allen Messorten problemloses Laufen oder Radfahren möglich ist. Lediglich für den Punkt 16 ergaben die Messungen für den Planzustand, dass dort mit unter Umständen lästigen und unangenehmen Windverhältnissen zu rechnen ist. Die Überschreitungshäufigkeit der Böenwindgeschwindigkeit von 13 m/s liegt hier zwar knapp unter dem Grenzwert von 1%

(siehe Windkomfort-Kriterien in Tab. 3.2), es wird aber trotzdem empfohlen Windschutzmaßnahmen in diesem Bereich zu treffen.

Für die Konzeption von geeigneten Schutzmaßnahmen im Bereich des Messpunktes 16 ist anzumerken, dass die erhöhten bodennahen Windgeschwindigkeiten im wesentlichen aus horizontalen Geschwindigkeitskomponenten bestehen. Dies kann anhand der X_i -Faktoren in Tab. 3.1 festgestellt werden. Die X_i -Faktoren am Punkt 16 sind vor allem bei den Windrichtungen 240° bis 300° durch die Hochhausumströmung erhöht. Düsen- und Kanalisierungseffekte führen auch bei anderen Windrichtungen zu höheren Geschwindigkeiten. Generell kommen bei diesen Ursachen vertikale Windschutzzäune als Schutzmaßnahmen in Frage. Diese werden bei vorwiegend horizontalen Strömungsrichtungen wirksam, wie sie im vorliegenden Fall maßgeblich sind. Windschutzzäune können künstlich (Beton-, Bretterwände, o. ä.), natürlich (immergrüne Büsche, Hecken, o. ä.) oder eine Kombination davon (begrünte Wände) sein. Derartige Windschutzzäune sollten im vorliegenden Fall eine Porosität von ca. 30 bis 50 % und eine Höhe von ca. 3 m aufweisen.

Die mit der Umströmung im bodennahen Bereich verbundenen Beschleunigungseffekte können z.B. durch ca. 2 – 4 m auskragende vertikale Windschutzwände (-gitter oder -zäune) vermindert werden (siehe Skizze in Abb. 3.16). Durch die Windschutzwände wird zum einen ein Teil der umströmenden Luft über die Wandscheiben gelenkt, zum anderen wird durch den Windangriff an den auskragenden Wandscheiben kinetische Energie der Windströmung entzogen. Die Wände sollten eine Höhe von mindestens 3 m aufweisen. Alternativ wäre auch eine Windberuhigung durch entsprechende Bepflanzungen erzielbar.

Der in Abb. 3.16 skizzierte Vorschlag zur Platzierung der Windschutzwände hat nur vorläufigen Charakter und dient zur Verbesserung der Windsicherheit in dem relativ kritischen Eckbereich des Hochhauses im jetzigen Planungszustand. Eventuelle bauliche Änderungen am Hochhaus oder in den angrenzenden Bereichen könnten eine Nachbetrachtung nötig machen.

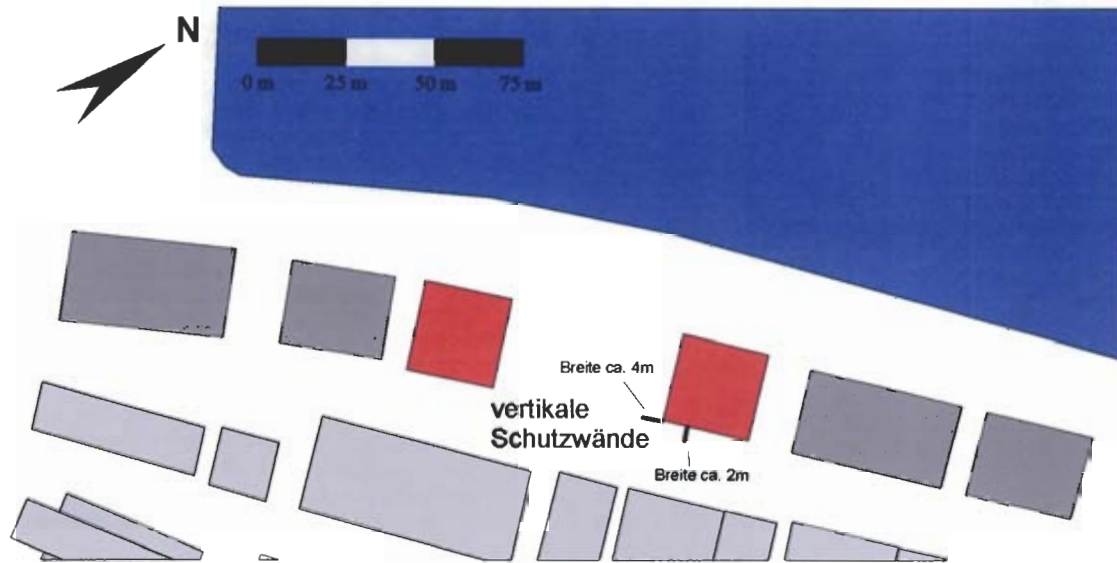


Abb. 3.16: Empfohlene Positionen von vertikalen porösen Windschutzwänden im Bereich der geplanten Hochhäuser in der Speditionstraße

Generell treten auch im Bereich der anderen Gebäudeecken überhöhte Geschwindigkeiten unter bestimmten Windrichtungen auf. Dies zeigen auch die Darstellungen der Sanderosionsversuche aus dem vorherigen Kapitel. Insgesamt erfüllen diese Punkte aber das Kriterium für problemloses Laufen. Durch das Vorsehen von Bepflanzungen vor allem im Bereich zwischen den Hochhäusern oder entlang der Hafenpromenade kann der Windkomfort noch weiter verbessert werden.

Die Verwendung von Windschutzzäunen, wie oben beschrieben, stellt das wirkungsvollste Mittel zur Vermeidung der kritischen Windkomfortbedingungen in dem Eckbereich des Hochhauses dar. Als weitere bauliche Maßnahme käme auch die Montage eines umlaufenden Vordachs (Breite ca. 5m, am besten im Höhenbereich Decke EG bis Decke 2.OG) in Frage, dass die abwärts gerichtete Strömung an der Hochhausfassade abbremsen würde. Eine Reduzierung der Gebäudehöhe (jetziger Planzustand ca. 67m) müsste sehr deutlich ausfallen (auf ca. 20m bis 25m) um relevante Verbesserungen der Windkomfortsituation zu erreichen. Die Abrundung der Gebäudeecken gilt in der Literatur zwar auch als Mittel um den Windkomfort zu verbessern, der Effekt ist aber schwer zu quantifizieren, da er von vielfältigen Randbedingungen abhängt und experimentell nur schwer zu bestimmen ist.

Die teilweise kritischen Windkomfortbedingungen sind auch bedingt durch die ungeschützte Lage der Hochhäuser zum Hafenbecken sowie durch die Strömungskanalisation entlang der Häuserschluchten. Flächenhafte aufgelockerte Bepflanzungen mit mittelhohen Bäumen

zusammen mit Hecken oder Büschen im Bereich zwischen den Hochhäusern und entlang der Hafenpromenade würden zusammen mit Bepflanzungen entlang der Speditionstraße zu einer allgemeinen Beruhigung der Windsituation führen, können aber die durch die Umströmung des Hochhauses hervorgerufenen Windgeschwindigkeitserhöhungen am Gebäudeeck nicht so effektiv entschärfen wie die vorgeschlagenen Windschutzzäune. Da die Überschreitungshäufigkeit der Böengeschwindigkeit am Punkt 16 aber im Grenzbereich bezüglich des Windkomfortkriteriums für lästige und unangenehme Windbedingungen liegt, könnten diese Bepflanzungen ausreichend sein, um eine Einstufung des Messortes in die nächst günstigere Windkomfortkategorie „Zulässig für problemloses Laufen“ zu erlauben.

Die Sanderosionsversuche zeigen teilweise auch Verwehungen im Mittelbereich der Hochhausfassaden bei senkrechter Anströmung. Diese sind hauptsächlich bedingt durch Turbulenzen mit relativen großen vertikalen Geschwindigkeitsanteilen, die durch die Ablenkung der Strömung an der Hochhausfassade entstehen. Die horizontale Geschwindigkeit in 1,5 m Höhe ist in diesen Bereichen allerdings relativ gering. Dies zeigen die Geschwindigkeitsmessungen mit den Hitzdrahtanemometern, die hauptsächlich den horizontalen Geschwindigkeitsanteil erfassen. Für die Beurteilung des Windkomforts und der Windsicherheit ist wegen der größeren Angriffsfläche vor allem der horizontale Geschwindigkeitsanteil von Bedeutung.

Mess- punkt Nr.	Böenwindgeschwindigkeiten und Auftretenshäufigkeit					
	< 6 m/s	> 6 m/s max. 5%	> 6 m/s max. 20% >15 m/s/ max. 0.05%	> 13 m/s max. 1%	> 13 m/s > 1%	> 18 m/s > 1%
Planzustand						
1			X	X		
2			X	X		
3				X		
4				X		
5			X	X		
6				X		
7			X	X		
8				X		
9			X	X		
10				X		
11				X		
12				X		
13			X	X		
14			X	X		
15			X	X		
16				(X)	(X)	
17				X		
18		(X)	X	X		
19			X	X		
20				X		
Istzustand						
2				X		
8			X	X		
10			X	X		
11				X		
17				X		

Tab. 3.3 Ergebnisse der Windkomfortuntersuchungen unter Berücksichtigung der Windkomfortkriterien (X bedeutet zutreffend, (X) bedeutet Ergebnis liegt im Grenzbereich)

Mess- punkt Nr.	Böenwindgeschwindigkeiten und Auftretenshäufigkeit					
	keine Wind- komfort- probleme	Parks, Straßen- cafés, Sitzplätze	kurzer Aufent- halt	Problem- loses Laufen	Unange- nehm, lästig, Wind- schutz	Gefahr
Planzustand						
1			X	X		
2			X	X		
3				X		
4				X		
5			X	X		
6				X		
7			X	X		
8				X		
9			X	X		
10				X		
11				X		
12				X		
13			X	X		
14			X	X		
15			X	X		
16				(X)	(X)	
17				X		
18		(X)	X	X		
19			X	X		
20				X		
Istzustand						
2				X		
8			X	X		
10			X	X		
11				X		
17				X		

Tab. 3.4 Ergebnisse der Windkomfortuntersuchungen unter Berücksichtigung der Nutzungskriterien (X bedeutet zutreffend, (X) bedeutet Ergebnis liegt im Grenzbereich)

4. LITERATUR

EWA, 1989: „European Wind Atlas“, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark

Gandemer, J., Guyot, A., 1976: „Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti“. La Documentation Française, Paris.

Gandemer, J., 1981: „La protection contre le vent“. CSTB Nantes.

Gandemer, J., 1982: „Simulation and Measurement of the Local Wind Environment“. In: T.A. Reinhold (ed), Wind Tunnel Modelling for Civil Engineering Applications, Cambridge University Press.

Hunt, J.C.R., 1976: „The Effects of Wind on People; New Criteria Based on Wind Tunnel Experiments“. Vol. 11, pp. 15-28, Pergamon Press.

Ratcliff, M.A., Peterka, J.A., 1990: „Comparison of Pedestrian Wind Acceptability Criteria“. Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodyn., Vol. 36, pp. 791-800.

Stadtplanungsamt Düsseldorf, 2005: „Pläne und Skizzen zum Bebauungsplan „Speditionstraße West“. Landeshauptstadt Düsseldorf, Stadtplanungsamt.

Williams, C.J., Hunter, M.A., Waechter, W.F., 1990: „Criteria for Assessing the Pedestrian Wind Environment“. Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodyn., Vol. 36, pp. 811-815.