

## **Windkanalstudie**

Windkomfort auf Freiflächen

Fürstenried West, München

Appenzeller Straße / Bellinzonastraße

Dieser Untersuchungsbericht umfasst 41 Seiten.  
Er wurde angefertigt durch die

# INHALT

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>WINDSTATISTIK .....</b>	<b>5</b>
2.1	Windstatistik an nahe gelegener Messstation .....	5
2.2	Orientierung der Gebäude zur Windrichtung .....	9
<b>3</b>	<b>VERSUCHSTECHNIK.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Simulation des Windfeldes .....</b>	<b>10</b>
3.1.1	Atmosphärische Grenzschichtströmung.....	10
3.1.2	Beschreibung des Windkanals.....	11
3.1.3	Die simulierte Grenzschicht.....	12
3.1.4	Modellierung des Gebäudekomplexes und der näheren Umgebung .....	14
<b>3.2</b>	<b>Messverfahren.....</b>	<b>17</b>
3.2.1	Messung von Strömungsgeschwindigkeiten .....	17
3.2.2	Quantifizierung des Windkomforts .....	17
<b>4</b>	<b>WINDKOMFORT AUF FREIFLÄCHEN .....</b>	<b>19</b>
4.1	Allgemeines.....	19
4.2	Bewertungskriterien.....	20
4.3	Ergebnisse aus den Geschwindigkeitsmessungen im Fußgängerbereich .....	21
4.4	Bewertung des Windkomforts auf den Freiflächen .....	37
<b>5</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>41</b>

# 1 Zusammenfassung

Die plant ihre ca. 13,5 Hektar große Wohnsiedlung in Fürstenried-West an der Appenzeller- und Bellinzonastraße weiterzuentwickeln. Die Bestandsanlage wurde in den 1960er Jahren erstellt. Im Rahmen eines städtebaulichen und landschaftsplanerischer Wettbewerbs wurde eine Nachverdichtung der bereits bestehenden 1500 Wohnungen um ca. 600 Wohnungen entwickelt, wobei einige Gebäude aufgestockt und zwei Gebäude durch Anbauten erweitert sowie zehn neue Wohnhäuser errichtet werden sollen.

Im Zuge des nun zu erstellenden Bebauungsplanverfahrens sollten die Auswirkungen der Neubauten auf das bodennahe Windfeld hinsichtlich einer geplanten und typischen Freiflächennutzung überprüft und eine Windkomfortanalyse erstellt werden.

Für diese Analyse sollte eine Windkanaluntersuchung zur Überprüfung der Windkomfortverhältnisse auf den Freiflächen durchgeführt werden. Aufgrund der Höhe der Neubauten ist in den Fußgängerbereichen eine Komfortbeeinträchtigung durch Windböen bei den in München vorherrschenden Starkwindlagen nicht ohne weiteres auszuschließen.

Dazu wurde ein Modell der gesamten Siedlung im Maßstab 1:300 eingesetzt. Unter Berücksichtigung der örtlichen Bebauungsverhältnisse in der weiteren und näheren Umgebung wurden im Grenzschichtwindkanal der TU München Strömungsverhältnisse eingestellt, welche hinsichtlich der Vertikalprofile von Windgeschwindigkeit und Turbulenz maßstäblich die realen Windverhältnisse am Standort nachbilden; ein entsprechender Nachweis der Ähnlichkeit wurde erbracht.

Für zwölf Windrichtungen wurde das bodennahe Strömungsfeld auf dem gesamten Gelände detailliert vermessen. Unter Berücksichtigung der Windstatistik für den Standort wurde eine Einteilung der umliegenden Freiflächen in Windkomfortklassen vorgenommen und daraus Nutzungsempfehlungen abgeleitet. In Kapitel 4 sind die erzielbaren Windkomfortklassen grafisch dargestellt und dabei die in den Außenbereichen besonders dem Wind ausgesetzten aber auch die windgeschützten Bereiche aufgezeigt. Eine als inakzeptabel definierte Schwelle der zu erwartenden Böengeschwindigkeiten wurde an keiner der untersuchten Stellen erreicht oder überschritten.

Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass eine Notwendigkeit zu treffender Festsetzungen von Schutzmaßnahmen an keiner Stelle des Bebauungsplans besteht. Optimierungsmaßnahmen, wie Vordächer oder Schutzwände waren nicht Gegenstand der Untersuchungen, sollten jedoch durch den Bebauungsplan zugelassen werden.

Besonderes Augenmerk ist auf die Außenbereiche der vier neuen Hochhäuser F-T1, F-T2, F-T3 und F-T4 entlang der Forst-Kasten-Allee zu legen, die neben dem bestehenden Hochhaus B-B1 die höchsten Gebäude auf dem Gelände darstellen. Im Umfeld dieser neuen Hochhäuser werden überall mindestens die Anforderungen für Zugangsbereiche (Windkomfortstufe B – gelb) erfüllt. In weiten Bereichen um die Hochhäuser sind noch deutlich ruhigere Windkomfortverhältnisse vorzufinden, hier werden die Windkomfortstufe C und D erreicht. Die über weite Bereiche als eher windgeschützten Zonen im Nahbereich dieser die durchschnittliche Bebauungshöhe deutlich überragenden Gebäude sind eine Folge der Anordnung der Gebäude zwischen den bestehenden Wohngebäuden, aber auch der Geometrie der Hochhäuser und vor allem der Ausrichtung ihrer Hauptachsen.

Größere Flächen mit eingeschränktem Windkomfort sind eher im Südwesten der Siedlung zu erwarten. Hier sind jedoch bereits bestehende Gebäude betroffen, insbesondere ist der Durchgang zwischen B-B1 und B-Y2 dem Wind als stark ausgesetzt zu bezeichnen. Diese Einschränkung müsste allerdings in der derzeitigen Bebauungssituation auch jetzt schon gegeben sein.

Im Umfeld von dem Bestandshochhaus B-H12 sind ebenso etwas höhere bodennahe Windgeschwindigkeiten gemessen worden. Die Ursachen für diese Einschränkungen sind in den An- und Umströmbedingungen dieses neun-geschossigen Hochhauses, vorrangig durch eine beschleunigte Kantenumströmung bei den am Standort vorherrschenden Starkwindlagen aus Südwest bis West begründet.

Ein Ziel der hier vorgelegten Planungen besteht darin, die gesamte Siedlung im Zuge der Nachverdichtung hinsichtlich der Außen- und Grünanlagen aufzuwerten. Die Untersuchungen zeigten, dass ohne weitere Schutzmaßnahmen die Möglichkeit besteht, sensible Freiflächennutzungen in einem umfangreichen Maße auszuweisen.

## 2 Windstatistik

### 2.1 Windstatistik an nahe gelegener Messstation

Als Grundlage für die Bewertung der Windverhältnisse standen aus den Publikationen des Deutschen Wetterdienstes [Deutscher Windatlas, 2. Auflage Version 5, 2010] statistische Daten am Flughafen München-Erding zur Verfügung. Aus den veröffentlichten Beobachtungen des DWD an der Messstation wird beispielsweise der Tagesgang deutlich (siehe Abb. 2.1), dem die Windgeschwindigkeit im Winter, im Sommer und im Jahresdurchschnitt unterliegt. Es ist ersichtlich, dass tages- und jahreszeitlich ausgeprägte Schwankungen auftreten: Der Jahresmittelwert der Windigkeit am Flughafen beträgt demnach in 10m Höhe 3,0m/s.

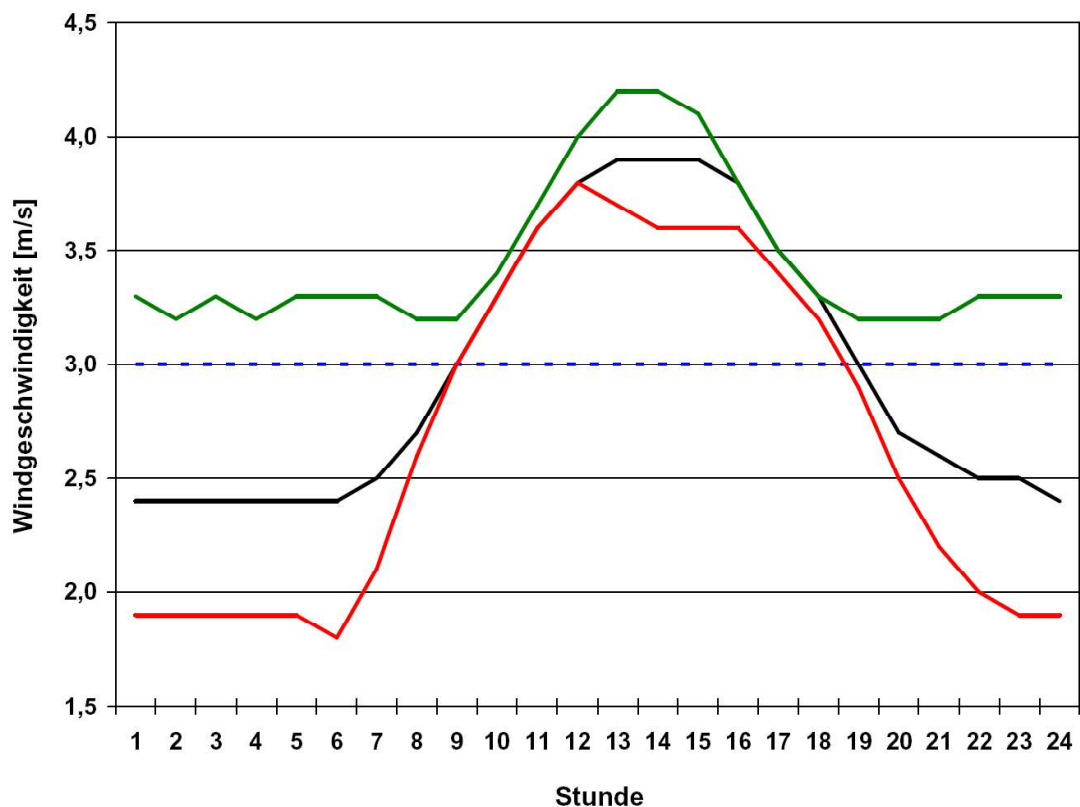


Abb. 2.1: Aus mehrjährigen Messreihen (1.1.1993 - 31.12.2000) ermittelter Tagesgang der Windgeschwindigkeit an der Messstation des deutschen Wetterdienstes am Flughafen München in einer Höhe von 10 m über freiem Gelände (schwarz: gesamter Jahresverlauf, grün im Januar, rot im Juli, blau gestrichelt: mehrjähriger Mittelwert von 3,0m/s)

Die Abb. 2.2 auf der nächsten Seite zeigt die prozentuale relative Häufigkeit der Windrichtungen basierend auf den Datensätzen des Deutschen Windatlases auf einer Bezugshöhe von 50 m über Grund bereits angepasst für den Standort in München Fürstenried-West. Hierzu ist die Windrichtungsskala in zwölf 30°-Sektoren eingeteilt, wobei z.B. Windrichtung aus West dem Sektor 270° entspricht, der den Bereich von 255° bis 285° repräsentiert. Die Summe der aufgetragenen Häufigkeiten für die 12 Sektoren beträgt 100%. In Abb. 2.3 sind die Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten aufgetragen, woraus sich der Jahresmittelwert der in dieser Höhe an diesem Standort herrschenden Windgeschwindigkeit zu 4,0 m/s errechnet.

Für die Bewertung der windklimatischen Verhältnisse ist die statistische Verteilung der auftretenden Windstärken insbesondere die Häufigkeit der Starkwindlagen wesentlich. Für die einzelnen Windstärken nach Beaufort werden in Abb. 2.4 die Häufigkeiten der Windrichtungen dargestellt. Bei einer Überlagerung der sechs Einzelbilder ergibt sich wiederum Abb. 2.2 (beachte abweichende Skalierung in den einzelnen Häufigkeits-Achsen).

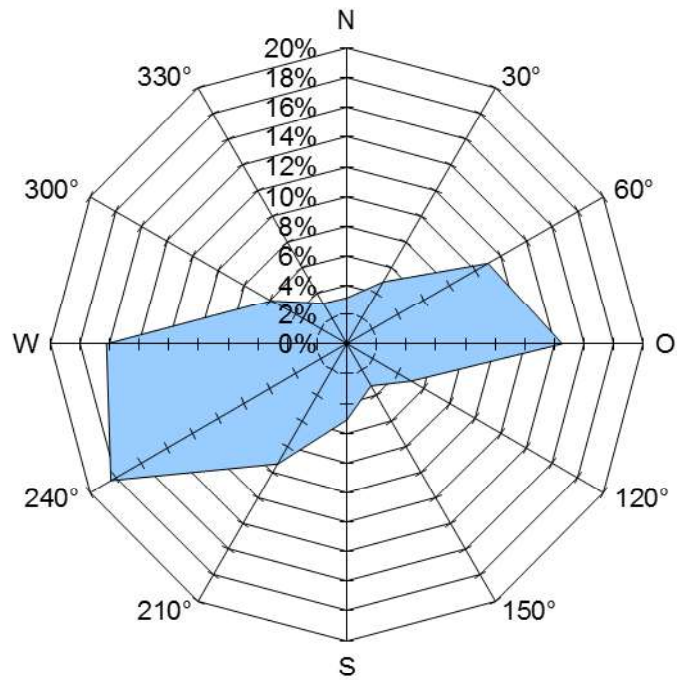


Abb. 2.1: Langjähriges Mittel der relativen prozentualen Häufigkeit der Windrichtungen am Standort der Wohngebäude in München Fürstenried-West in der Höhe von 50 m über Grund

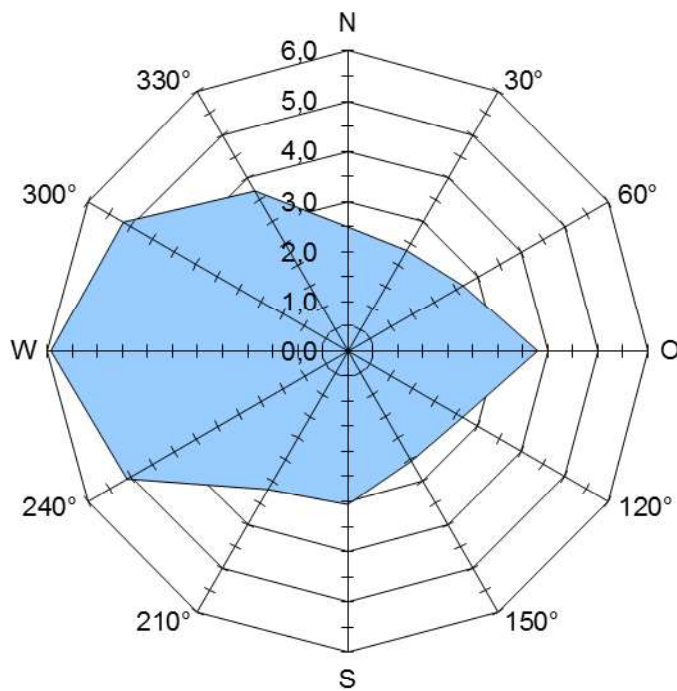
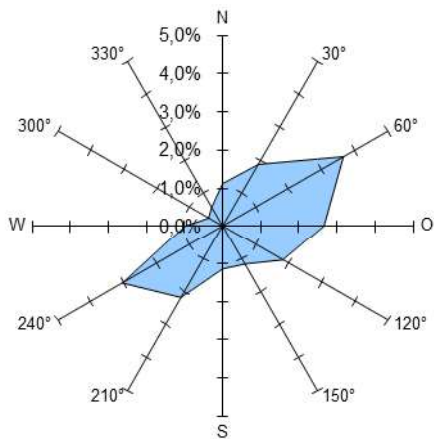
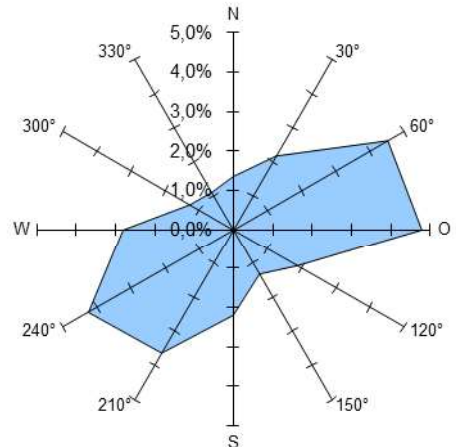


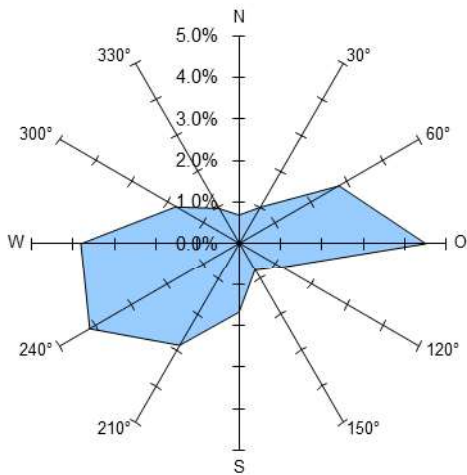
Abb.2.2: Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeiten in m/s in Abhängigkeit von der Windrichtung am Standort Wohngebäude der in Fürstenried-West in Höhe von 50 m über Grund



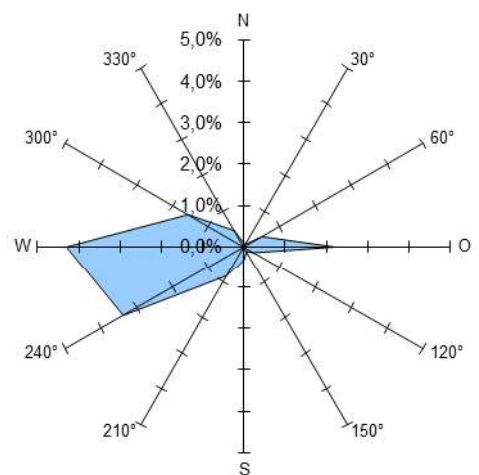
a) Stärke 1 - leiser Zug (0.3-1.8 m/s)



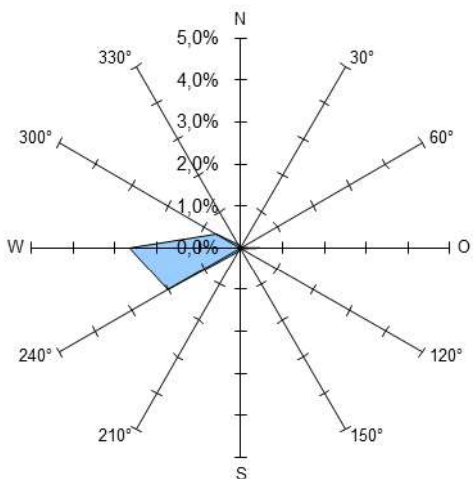
b) Stärke 2 - leichter Wind (1.8-3.6 m/s)



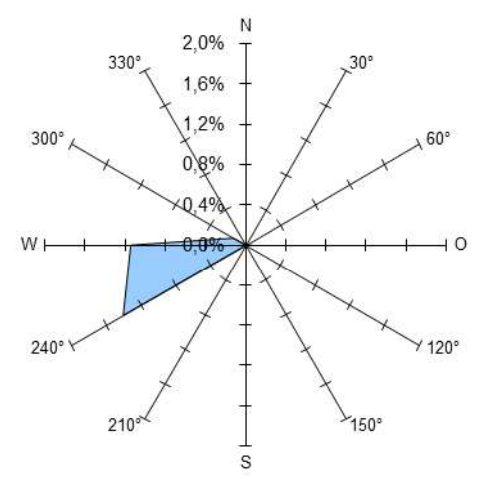
c) Stärke 3 - schwacher Wind (3.6-5.6 m/s)



d) Stärke 4 - mäßiger Wind (5.6-7.9 m/s)



e) Stärke 5 - frischer Wind (7.9-10.4 m/s)



f) ≥Stärke 6 - starker Wind (≥10.4 m/s)

Abb. 2.3: Windrichtungsverteilung für verschiedene Windstärken nach Beaufort angepasst an den Standort der Wohngebäude der in München Fürstenried-West und die Höhe 50 m über Grund.

Die relative Häufigkeit von Stundenmittelwerten gibt an, wie oft eine bestimmte Windgeschwindigkeit im langjährigen Mittel zu erwarten ist. In der Abb. 2.4 ist die Häufigkeitsverteilung über das gesamte Jahr für den Standort in einer Höhe von 50 m angegeben.

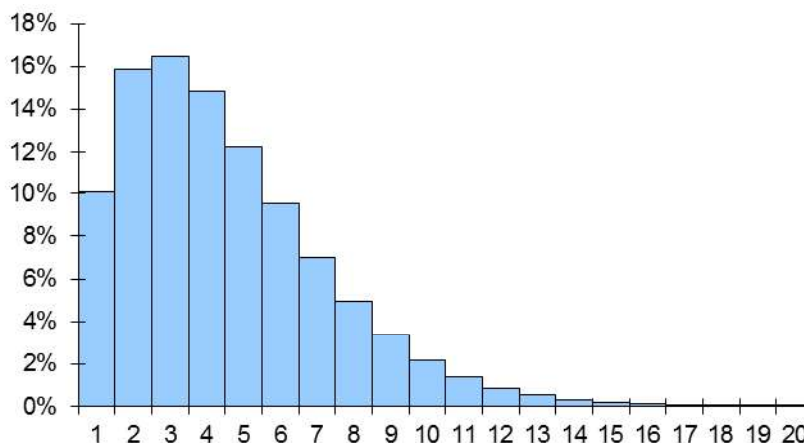


Abb.2.4: Relative Häufigkeitsverteilung auftretender Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit für das ganze Jahr am Gebäudestandort in einer Höhe von 50 m.

Die Summenhäufigkeit lässt eine Aussage zu, wie häufig mit der Überschreitung eines bestimmten Schwellenwertes der stunden gemittelten Windgeschwindigkeit zu rechnen ist. In der Abb. 2.5 ist die Summenhäufigkeit über dem Stundenmittelwert für das ganze Jahr aufgetragen. Abzulesen ist, dass in 50 m Höhe über dem Standort im Jahresdurchschnitt zu 0.2% der Zeit eine stündlich gemittelte Windgeschwindigkeit von 15 m/s überschritten wird und dass zu 21 % der Zeit mittlere Windgeschwindigkeiten unter 6 m/s zu erwarten sind.

Über die Häufigkeit, mit welcher kurze Windböen (z. B. 5s-Böen) bestimmte Geschwindigkeiten überschreiten macht diese Kurve keine Aussage, sie gilt ausschließlich für die stündlichen Mittelwerte.

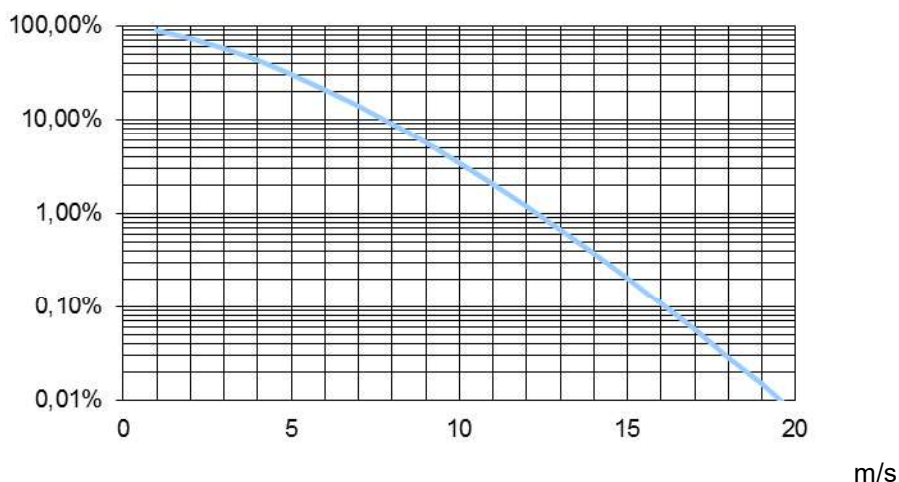


Abb.2.5: Überschreitenshäufigkeit der Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit am Gebäudestandort in einer Höhe von 50 m. Ablesebeispiel: Eine mittlere Windgeschwindigkeit von 11 m/s wird zu etwa 2,1% der Zeit überschritten und zu 97,9% der Zeit nicht erreicht.



## 2.2 Orientierung der Gebäude zur Windrichtung

In Abb. 2.6 ist eine Windrichtungsskala mit einer 360°-Einteilung zur Erläuterung der Windrichtungen über einen Lageplan projiziert.

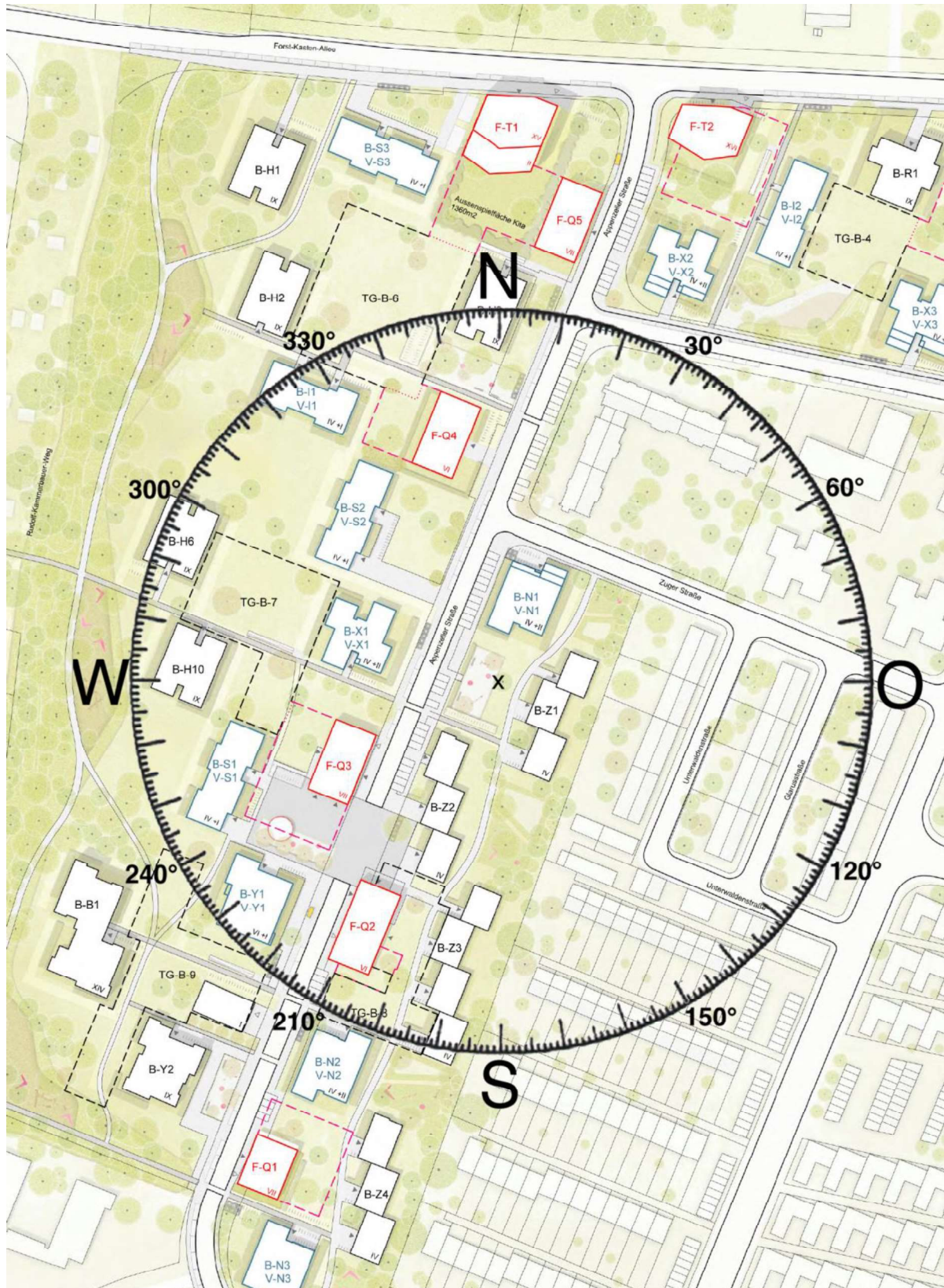


Abb.2.6: Lageplan der Wohngebäude mit Windrichtungsskala

## 3 Versuchstechnik

### 3.1 Simulation des Windfeldes

#### 3.1.1 Atmosphärische Grenzschichtströmung

Das in der Natur vorherrschende Windströmungsfeld wird durch die Bodenbeschaffenheit, d.h. durch die Rauigkeit sowie die topografischen Verhältnisse der Oberfläche beeinflusst. Maßgebend sind hier Bebauungsdichte, Höhe und Form der Gebäude. Hieraus resultiert eine Geschwindigkeitsverteilung über der Höhe, bei der mit zunehmendem Abstand vom Boden eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit verbunden ist. In Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit wird auch die Turbulenz der Windströmung, d.h. die lokalen Schwankungen von Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausgebildet.

Von der Oberflächenrauigkeit unbeeinflusste Windverhältnisse stellen sich über einer städtischen Bebauung in einer Höhe von mehreren hundert Metern ein. Für den untersuchten Stadtteil Fürstenried West in München wird hier eine Höhe von ca. 450 m zugrunde gelegt. Innerhalb dieser Höhe bildet sich eine Grenzschichtströmung aus, die für die durchzuführenden Versuche bis zu einer Höhe von ca. 200 m mit einer hinreichenden Genauigkeit nachzubilden ist.

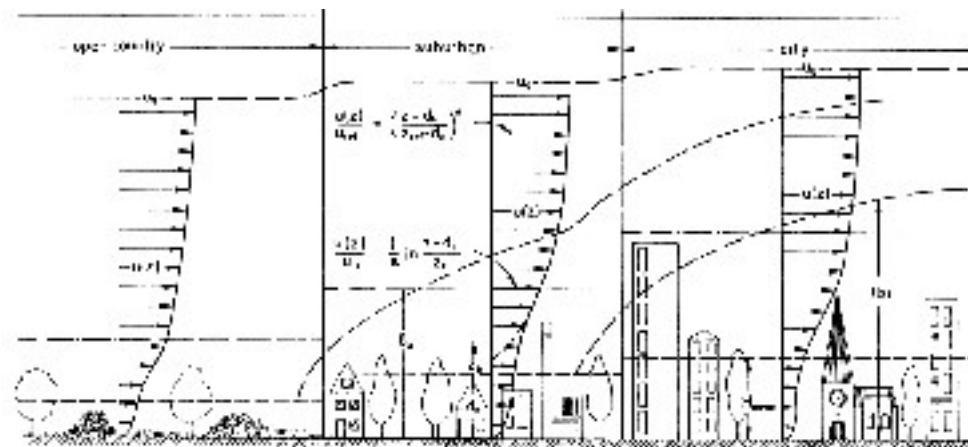


Abb. 3.1 Städtisches Windprofil für neutrale Grenzschichtströmung nach [Plate 1993]

Für das Höhenprofil der Windgeschwindigkeit, das durch ein Potenzgesetz bzw. ein logarithmisches Gesetz beschrieben werden kann, werden typische Verteilungen (vgl. Abb. 3.1) aus der Literatur herangezogen. Diese Profile gelten für die neutral geschichtete Atmosphäre, welche im Windkanalversuch mit guter Genauigkeit nachgebildet werden kann. Bei der Simulation der Anströmbedingungen ist vor allem die maßstäblich korrekte Einhaltung der Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit und der Turbulenzstruktur einzuhalten.

### 3.1.2 Beschreibung des Windkanals

Die Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit und die sich in der Natur bei einem solchen Windprofil einstellende Turbulenzstruktur werden durch eine von [Counihan 1973] beschriebene Methode in einem Grenzschicht-Windkanal maßstäblich verkleinert nachgebildet.

Für die Untersuchungen wurde ein Modellmaßstab von 1:300 mit dem Ziel einer möglichst hohen Auflösung gewählt. Durch Einbau der Gebäude- und Umgebungsmodelle darf eine Versperrung der frei durchströmten Querschnittsfläche von 5% nicht überschritten werden. Die Einhaltung der Ähnlichkeitsbedingung (eine von der Re-Zahl unabhängige Gebäudeumströmung) soll schon bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten erreicht werden können.

Die Modellversuche werden im Grenzschichtwindkanal des Lehrstuhls für Aerodynamik und Strömungsmechanik der Technischen Universität München durchgeführt. Der Aufbau des Windkanals ist in Abb. 3.2 schematisch dargestellt.

Es handelt sich hier um einen Windkanal der Bauart 'Eiffel' mit geschlossener Messstrecke. Die Abmessungen der Testsektion betragen  $L \times B \times H = 6,0\text{m} \times 2,7\text{m} \times 1,8\text{m}$ . Zur Einstellung verschiedener Anströmrichtungen wird das Gebäudemodell einschließlich seiner näheren Umgebung auf einer motorgesteuerten, stufenlos verstellbaren Drehplatte aufgebaut. Zur Erzeugung einer der natürlichen Windströmung entsprechenden Turbulenzstruktur sind Wirbelgeneratoren und eine Barriere nahe dem Einlauf angeordnet. Die nachfolgenden Rauigkeitselemente am Boden, bestehend aus im wechselnden Rhythmus aufgebauten Blöcken, dienen zur Stabilisierung der turbulenten Grenzschichtströmung und zur Einstellung des in Gl. 3.1 bzw. Gl. 3.2 beschriebenen Geschwindigkeitsprofils. Durch Reibungsverluste an den Windkanalwänden ergibt sich ein Energieverlust in Strömungsrichtung. Durch eine geneigte und höhenverstellbare Decke wird vermieden, dass sich in Strömungsrichtung ein in der Natur nicht vorhandener Druckgradient ausbildet. Die erforderlichen Strömungsgeschwindigkeiten werden durch ein stufenlos regelbares Axialgebläse eingestellt.

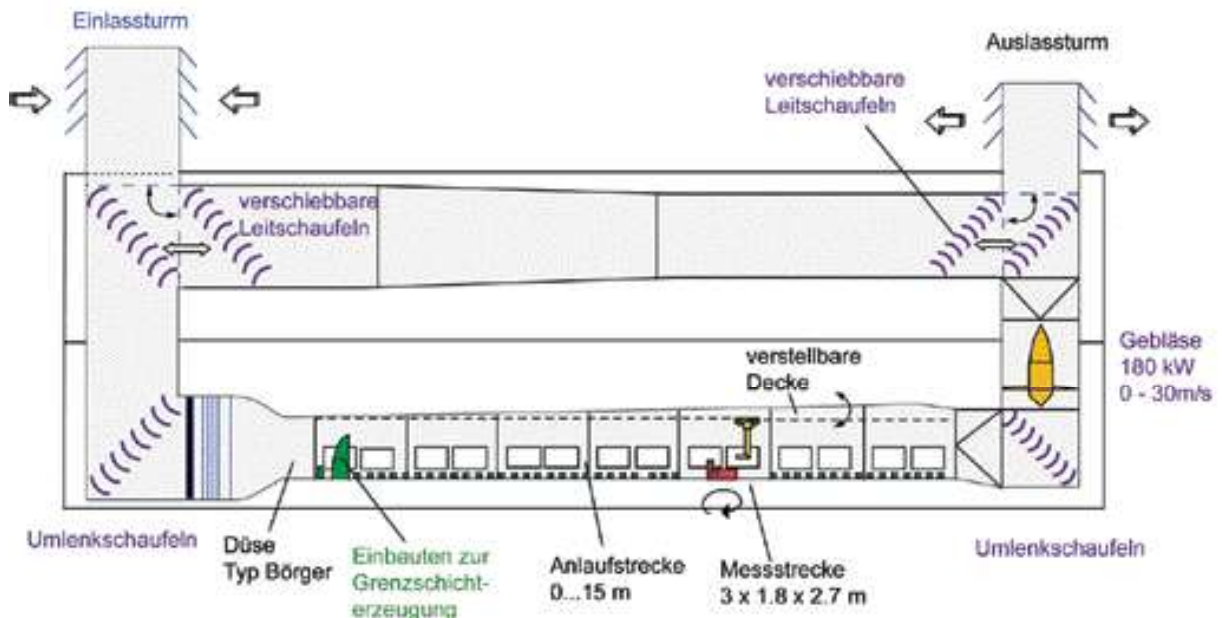


Abb. 3.2: Schematische Ansicht des Grenzschichtwindkanals

Quelle: Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik der TU München

### 3.1.3 Die simulierte Grenzschicht

Da das Umfeld des geplanten Standortes insbesondere in Richtung der Hauptwindlagen unterschiedlich dicht bebaut ist, wird bei der Simulation des Windprofils für den Untersuchungsbereich ein mittlerer Profilexponent  $\alpha = 0,24$  angenommen. Anhand dieses Profilexponenten kann mit dem Potenzgesetz der Form

$$\frac{u(z)}{u_{bez}} = \left( \frac{z - d_o}{z_{bez} - d_o} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

ausgehend von einer Bezugshöhe  $z_{bez}$ , bei der die Bezugsgeschwindigkeit  $u_{bez}$  bekannt ist, für eine Höhe  $z > d_o$  über dem Boden die örtliche Windgeschwindigkeit  $u(z)$  berechnet werden. Als Verdrängungsschichtdicke  $d_o$  kann näherungsweise das 0,5- bis 0,7-fache der durchschnittlichen Höhe der Umgebungsbebauung angenommen werden.

Im unteren Bereich der atmosphärischen Grenzschicht in einer Höhe zwischen 10m und 100m gilt ebenso das logarithmische Gesetz der Form

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z - d_o}{z_o} \quad (3.2)$$

mit

$u_*$	Schubspannungsgeschwindigkeit
$\kappa$	Kármánsche Konstante ( $\kappa = 0,4$ )
$d_o$	Verdrängungsschichtdicke
$z_o$	Rauhigkeitshöhe

Zur Überprüfung der Ähnlichkeit der Anströmung wurde das Geschwindigkeits- und Turbulenzprofil der Modellgrenzschicht sowie das Leistungsspektrum der Turbulenz mit Hilfe einer Dreidraht-Hitzdrahtsonde ermittelt und mit Naturmessungen [ESDU 1991] verglichen.

Das Profil der mittleren Geschwindigkeit wurde durch den Potenzansatz nach Gl. 3.1 approximiert. Eine der natürlichen Windsituation ähnliche Modellströmung wird im Windkanalversuch bei einer maßstabsgetreuen Nachbildung von  $d_o$  sowie bei Übereinstimmung des Profilexponenten  $\alpha$  erreicht.

Das Profil mit den approximierten Werten  $\alpha = 0,24$  und  $d_o = 6,6\text{m}$  ergibt sich bei einer städtischen Bebauung mit Gebäudehöhen in der Größenordnung von 10 bis 18 m.

Die Turbulenzintensität, als ein Maß für die Böigkeit des Windes, wird definiert zu Standardabweichungen der Geschwindigkeitsschwankungen bezogen auf die mittlere lokale Windgeschwindigkeit

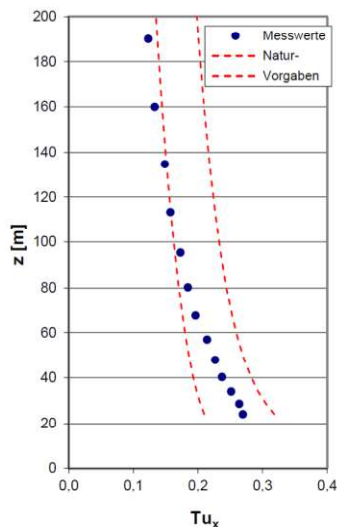
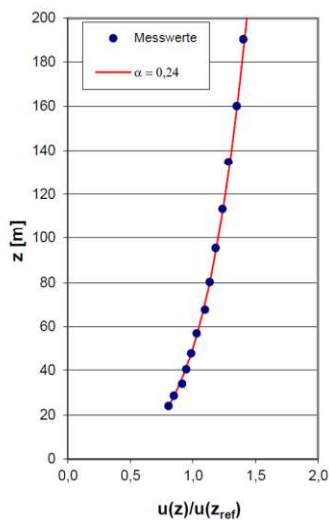
$$Tu = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{u}} \quad (3.3)$$

mit  $\overline{u'^2}$  als Varianz der Geschwindigkeitsschwankungen und  $\bar{u}$  als Mittelwert der lokalen Windgeschwindigkeit.

Die Daten der simulierten Grenzschicht finden sich in Abb. 3.3. Der zeitliche Verlauf der in der Messstrecke des Windkanals gemessenen Windgeschwindigkeit wurde einer Frequenzanalyse unterzogen. Das Ergebnis ist in normierter Form als Turbulenzspektrum in 45m Höhe zum Vergleich mit den aus den Naturmessungen verfügbaren Vergleichsdaten aufgetragen.

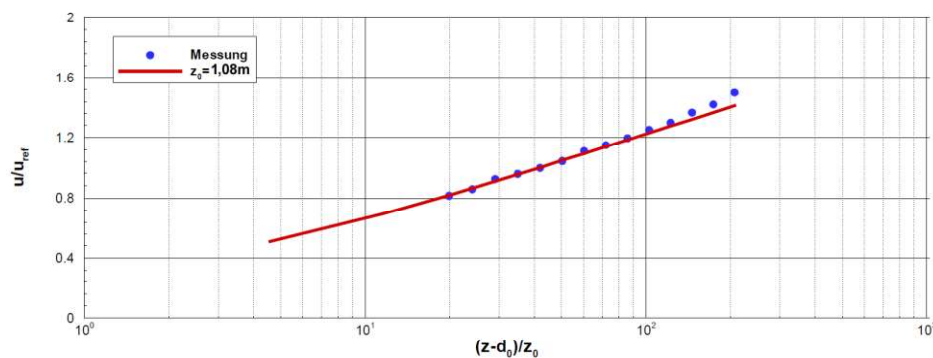
Potenzgesetz:

$$\frac{u(z)}{u(z)_{ref}} = \left( \frac{z-d_0}{z_{ref}-d_0} \right)^\alpha$$



a) Zeitgemitteltetes Geschwindigkeitsprofil nach dem Potenzgesetz

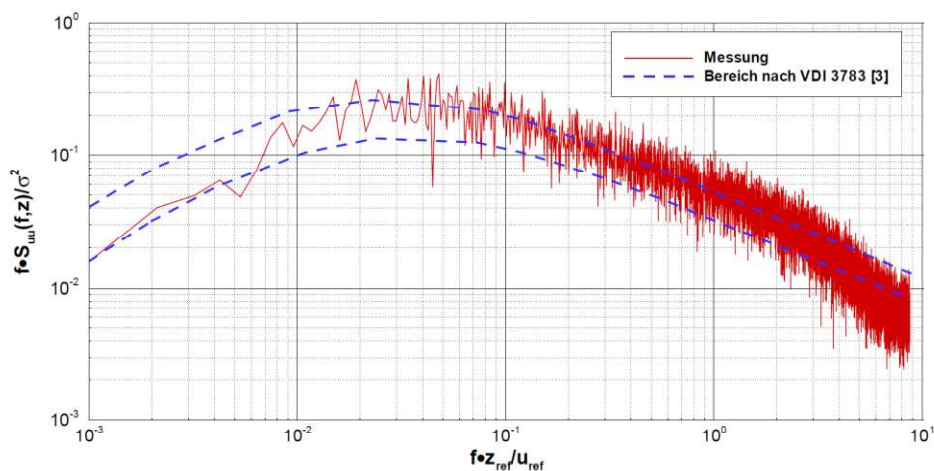
b) Profil der Turbulenzintensität



log. Gesetz:

$$\frac{u(z)}{u_r} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z-d_0}{z_0} \right)$$

c) Zeitgemitteltetes Geschwindigkeitsprofil nach dem logarithmischen Gesetz



d) Turbulenzspektrum in 45m Höhe

Abb. 3.3: Daten der simulierten Grenzschicht

### 3.1.4 Modellierung des Gebäudekomplexes und der näheren Umgebung

Da die Windströmung durch die Umgebungsbebauung des zu untersuchenden Gebäudekomplexes stark beeinflusst wird (vgl. Abb. 3.1), sind neben den zu betrachteten Neu- bzw. Umbauten die umgebenden Gebäude maßstabsgetreu nachzubilden. Hierbei wird es im vorliegenden Fall als ausreichend angesehen, den Umgebungsbereich bis in eine Entfernung von ca. 300m zu modellieren. Mit zunehmender Entfernung zu den zu untersuchenden Gebäudekomplexen ist ein geringerer Detaillierungsgrad der Gebäude angemessen.

Für die Nachbildung der Neubaukomplexe wurden von den eine  
Übersicht Schemaschnitte mit Stand Darstellungen in isometrischer Axono-  
metrie sowie ein Lageplan mit Stand zur Verfügung gestellt.

Für die Anordnung und Modellierung der Umgebungs- bzw. Bestandsgebäude wurde der im Maßstab 1:300 bereit gestellte Lageplan sowie weitere detaillierte Luftbildaufnahmen verwendet.

Abb. 3.4: Luftbildaufnahme des Standorts

Nahe dem Zentrum der Drehplatte werden die einzelnen Modelle der zu untersuchenden Gebäude installiert. Dabei werden zunächst die Hochhäuser F-T1, F-T2, FT-3 und F-T4 entlang der Forst-Kasten-Allee und in einer anschließenden Versuchsreihe die Neu- und Umbauten entlang der Appenzeller Straße ins Zentrum gerückt. Die angrenzenden Gebäude werden jeweils auf der Drehplatte gemäß Lageplan zugeordnet und fixiert. Die Abb. 3.5 zeigt das Modell

mit Blickrichtung in die Anlaufstrecke des Windkanals für den projektierten Planzustand mit den Hochhäusern im Zentrum. Abb. 3.6 ist eine Detailansicht der im Untersuchungsabschnitt 1 im Zentrum der Drehplatte gelegenen Gebäude zu entnehmen.



Abb. 3.5: Modellaufbau auf der Drehplatte für Untersuchungsabschnitt 1 mit Blick in die Windkanal-Anlaufstrecke

Quelle: Eigene Abbildung aus dem Windkanal des Lehrstuhls für Aerodynamik und Strömungsmechanik der TU München

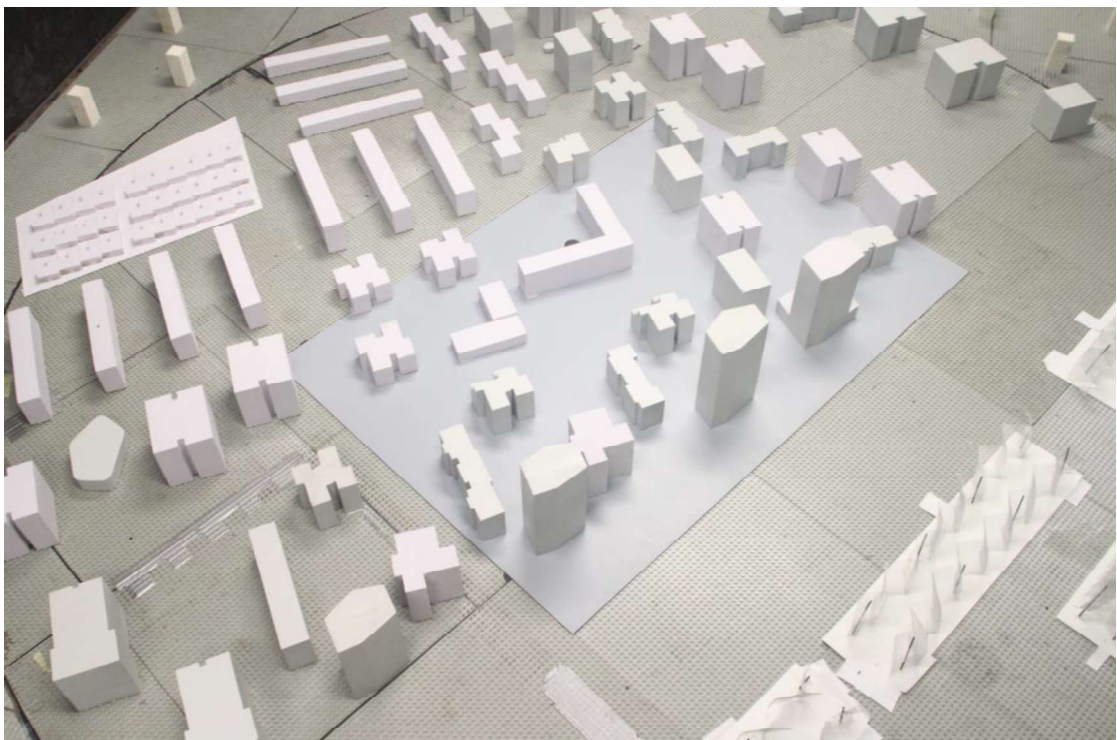


Abb. 3.6: Detailansicht der Neu- und Bestandsgebäude auf der Drehplatte (Abschnitt 1)

Quelle: Eigene Abbildung aus dem Windkanal des Lehrstuhls für Aerodynamik und Strömungsmechanik der TU München

In Abb. 3.7 und Abb. 3.8 sind die Modelle entlang der Appenzellerstraße für den Untersuchungsabschnitt 2 dargestellt.



Abb. 3.7: Modellaufbau für Untersuchungsabschnitt 2 mit Blick in die Windkanal-Anlaufstrecke  
Quelle: Eigene Abbildung aus dem Windkanal des Lehrstuhls für Aerodynamik und Strömungsmechanik der TU München

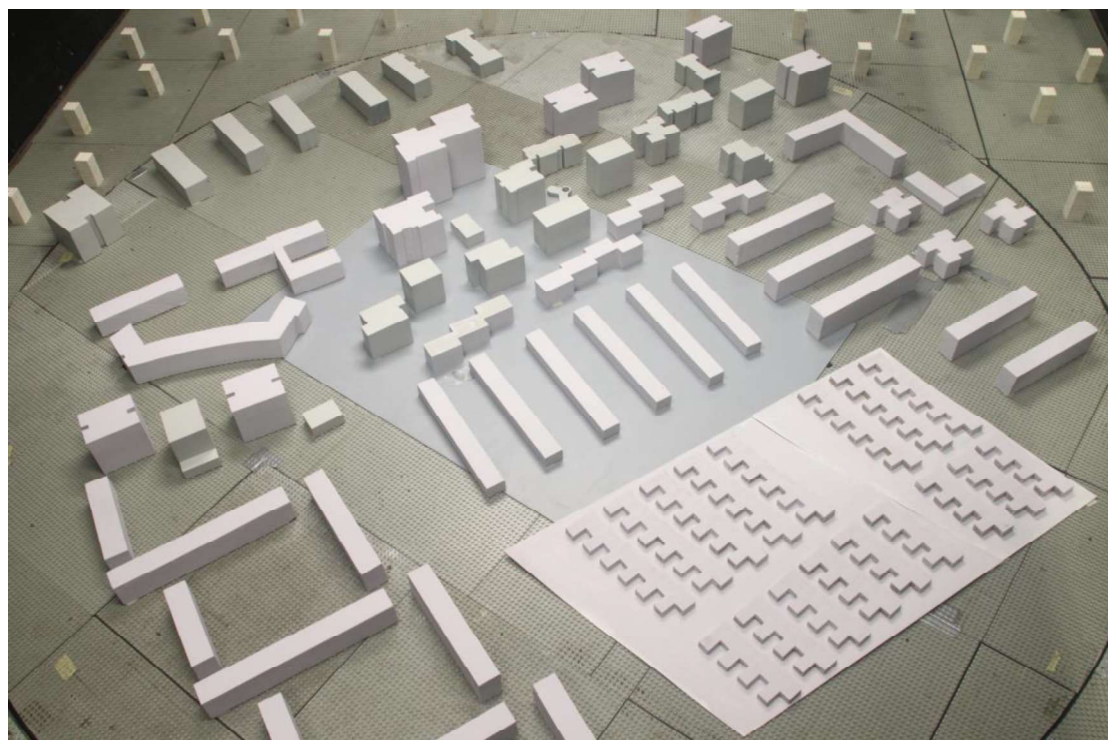


Abb. 3.8: Detailansicht der Neu- und Bestandsgebäude entlang der Appenzeller Straße auf der Drehplatte für Untersuchungsabschnitt 2

Quelle: Eigene Abbildung aus dem Windkanal des Lehrstuhls für Aerodynamik und Strömungsmechanik der TU München



## 3.2 Messverfahren

### 3.2.1 Messung von Strömungsgeschwindigkeiten

Im Einflussbereich von größeren Gebäuden sind stets sehr turbulente Strömungsverhältnisse zu erwarten. Hieraus resultieren starke Geschwindigkeitsschwankungen und häufige Strömungsrichtungsänderungen. Daher werden zeitlich hoch auflösende, richtungsunabhängige Geschwindigkeitssonden eingesetzt.

#### 3.2.1.1 Thermische Anemometrie

Auf der Basis der Konstant-Temperatur-Anemometrie werden Kugelsonden auf eine konstant zu haltende Temperatur von ca. 60°C beheizt. Bei Umströmung der Sonde tritt eine Abkühlung an der Oberfläche auf, die mit Hilfe eines thermischen Anemometers kompensiert wird. Der Sondenkopf weist einen Durchmesser von 2 mm auf. Beheizt wird hierbei nur ein sehr dünner Film an der Oberfläche, woraus sehr geringe Ansprechzeiten bei Geschwindigkeitsänderungen resultieren. Durch die Form der Sonde ist eine hinreichend genaue Richtungsunabhängigkeit gegeben.

Die Abhängigkeit des erforderlichen Heizstromes von der Strömungsgeschwindigkeit wird in einem Kalibrierverfahren vor den Messungen ermittelt. Die bei der Kalibrierung herrschende Umgebungstemperatur ist maßgebend für die Ermittlung der Geschwindigkeitswerte. Bei Abweichungen gegenüber dieser Temperatur bei den Versuchen wird eine entsprechende Temperaturkorrektur durchgeführt.

Die Ausgangsspannung des Anemometers und die Umgebungstemperatur werden für die einzelnen Messpunkte über eine Datenerfassung aufgezeichnet. Die Umrechnung in Geschwindigkeitswerte erfolgt anhand der erfassten Kalibrierkurven. Die Aufzeichnungsrate wird an die Anforderungen für eine statistische Signalanalyse angepasst.

#### 3.2.1.2 Auswertung zeitlicher Geschwindigkeitsverläufe

Die höhenabhängige, zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$  in der ungestörten Anströmung wird als arithmetischer Mittelwert der Momentangeschwindigkeiten  $u$  für einen Messzeitraum von 100 s erfasst. Die Intensität der Windgeschwindigkeitsschwankungen (Böigkeit) wird durch den Effektivwert (Standardabweichung) des zeitlichen Geschwindigkeitsverlaufes beschrieben

$$\sigma = \sqrt{u'^2} \quad \text{mit} \quad (3.4)$$

$$u' = u - \bar{u} \quad (3.5)$$

Die Turbulenzintensität  $Tu$  an einem Punkt errechnet sich aus dem Quotienten zwischen der Standardabweichung und der örtlichen mittleren Windgeschwindigkeit

$$Tu = \frac{\sigma}{u} \quad (3.6)$$

Für die Bewertung des Windkomforts wird die effektive Windgeschwindigkeit  $\hat{u}$ , oder auch Böenwindgeschwindigkeit genannt, in einer Höhe von 1.6 m definiert zu

$$\hat{u} = \bar{u} + 3 \cdot \sigma \quad (3.7)$$

### 3.2.2 Quantifizierung des Windkomforts

Für eine flächenhafte Darstellung des Bodenwindfeldes, d.h. für eine Lokalisierung der Punkte mit besonders hohen oder niedrigen Geschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich von Fußgängern wird ein Geschwindigkeitsmessverfahren mit einem feinmaschigen Messgitter angewendet. Dabei werden je Messpunkt zwölf Windrichtungen in 30° Schritten untersucht.

Zwischen den Geschwindigkeitsmesswerten, die für die verschiedenen Windrichtungen aufgenommen werden und den Aussagen über den lokalen Windkomfort liegt ein Rechenweg, der

die langjährige Windstatistik einer repräsentativen Messstation und die Übertragung dieser Daten auf die lokalen Verhältnisse zu berücksichtigen hat.

Mit diesem Verfahren wird die Böengeschwindigkeit  $\hat{u}$  an den jeweiligen Orten gemessen und ins Verhältnis gesetzt zu einer zeitlich gemittelten Windgeschwindigkeit in einer Bezugshöhe an einem Bezugsort (z.B. in Dachhöhe eines Hochhauses). Für jeden Punkt wird anschließend unter Verwendung der für die Messstation verfügbaren statistischen Daten die Häufigkeit bestimmt, mit der eine bestimmte Böenwindgeschwindigkeit erreicht wird.

Dabei wird die Häufigkeit des Auftretens von Stunden (tagsüber) bestimmt, in denen die Windrichtung  $\varphi$  herrscht und gleichzeitig die lokale Böenwindgeschwindigkeit einen Grenzwert  $\hat{u}_{grenz}$  überschreitet.

Die Häufigkeit, mit der dieser Grenzwert an dem betrachteten Punkt insgesamt überschritten wird, ergibt sich aus der Summation über alle Windrichtungen:

$$P(\hat{u}_{lokal} \geq \hat{u}_{grenz}) = \sum_{\varphi} P(\hat{u}_{lokal} \geq \hat{u}_{grenz})_{\varphi} \quad (3.8)$$

Die für diese Berechnung nötige Überschreitenshäufigkeit eines bestimmten Mittelwertes  $\bar{u}_{grenz}$  der Windgeschwindigkeit in Dachhöhe folgt einer Weibull-Verteilung, deren windrichtungsabhängige Parameter A und k dem Deutschen Windatlas entnommen und an die Verhältnisse am Standort angepasst werden können:

$$P(\bar{u}_{77m} \geq \bar{u}_{grenz}) = e^{-\left(\frac{\bar{u}_{grenz}}{A}\right)^k} \quad (3.9)$$

Erfasst werden die Böenwindgeschwindigkeiten in einer Höhe von etwa 1,6m über dem Boden mit Hilfe der in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen thermischen Anemometer.

## 4 Windkomfort auf Freiflächen

### 4.1 Allgemeines

Die windklimatischen Verhältnisse im Nahbereich hoher Gebäude unterliegen einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Während sich in der Regel auf den windabgewandten Seiten der Gebäude durch Leewirkung eine Windabschwächung einstellt, treten an den Kanten und an den windzugewandten Seiten häufig Geschwindigkeitserhöhungen auf. Im Luvbereich von Gebäuden werden die auftreffenden Luftmassen in einer beschleunigten Bewegung um und über das Gebäude transportiert. Ein beträchtlicher Teil wird dabei auch nach unten abgelenkt und der bodennahen Strömung überlagert. Dies führt gerade bei sehr hohen Gebäuden häufig zu merkbaren Geschwindigkeitserhöhungen in Fußgängerbereichen gegenüber der ungestörten Anströmung und u.U. zu Belästigungen oder auch Gefährdungen von Passanten.

Die folgende Skala nach Beaufort zeigt die Windwirkungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Wind mit Geschwindigkeiten unter 1m/s wird demnach noch nicht wahrgenommen, Geschwindigkeiten von über 3m/s können im Freien die Behaglichkeit z.B. beim Sitzen bereits beeinträchtigen.

Windstärke (Beaufort)	Bezeichnung Windstärke	Äußerung der Windstärke	Geschwindigkeit
0	Windstille	Rauch steigt senkrecht empor Wind nicht bemerkbar	0-0.2 m/s
1	leiser Zug	Rauch steigt fast senkrecht empor, behaglich beim Sitzen	0.3-1.5 m/s
2	leichter Wind	im Gesicht eben spürbar	1.6-3.3 m/s
3	schwacher Wind	bewegt Baumblätter und Fahnen Haare bewegen sich, Kleidung flattert	3.4-5.4 m/s
4	mäßiger Wind	bewegt kleine Zweige, streckt Fahnen Staub und loses Papier wird aufgewirbelt	5.5-7.9 m/s
5	frischer Wind	bewegt größere Zweige, Windkraft auf Körper wird fühlbar, behaglich beim schnellen Gehen, unbehaglich beim Schauensterbummel	8.0-10.7 m/s
6	starker Wind	als Sausen hörbar, Schirme nur mit Schwierigkeiten nutzbar, Geradeausgehen erschwert	10.8-13.8 m/s
7	steifer Wind	bewegt schwache Stämme, beim Gehen wird Unsicherheit empfunden	13.19-17.1 m/s
8	stürmischer Wind	bewegt Bäume, Vorwärtskommen erschwert, Gleichgewicht in Böen schwer zu halten	17.2-20.7 m/s
9	Sturm	verrückt leichte Gegenstände (Dachziegel), Menschen werden durch Böen umgeworfen	20.8-24.4
10	voller Sturm	wirft Bäume um	24.5-28.4
11	schwerer Sturm	zerstörende Wirkungen schwerer Art	28.5-32.6
12	Orkan	verwüstende Wirkungen	> 32.7

Abhängig von der Ausgesetztheit der von Passanten genutzten ebenerdigen Freiflächen bieten sich unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten an. Uneingeschränkter Windkomfort ist z.B. dann erwünscht, wenn auf der betrachteten Fläche sich Erholung suchende nicht nur kurzzeitig niederlassen können sollen oder z.B. Ruhebänke oder Spielplätze eingerichtet werden sollen. In diesem Zusammenhang sind die Zugänge zu den Gebäuden und die Außenflächen von z.B. Kindertagesstätten oder sonstige Spielplätze wesentlich

Da bei den in München herrschenden Windverhältnissen nicht ohne weiteres ausgeschlossen werden kann, dass zeitweilig Komforteinbußen auf den genannten Flächen und somit möglicherweise Nutzungseinschränkungen auftreten werden, sollten im Rahmen einer Windkomfortuntersuchung die zu erwartenden Verhältnisse aufgezeigt werden.

## 4.2 Bewertungskriterien

In der einschlägigen Literatur werden verschiedene Bewertungskriterien für den Windkomfort im Fußgängerbereich angegeben. Grundlage ist eine quantitative Erfassung des Bodenwindfeldes insbesondere für die Windrichtungen, bei denen Starkwindlagen sehr häufig auftreten. Ferner liegt diesen Bewertungen zugrunde, dass die Empfindung des Menschen für Wind einerseits von der zeitlich gemittelten Geschwindigkeit beeinflusst wird und andererseits aber auch von der Häufigkeit des Auftretens kurzzeitiger Böen.

Je nach Häufigkeit, mit der bestimmte spürbare Bodenwindgeschwindigkeitsspitzen auftreten, ergeben sich verschiedene Klassen des Windkomforts, die in folgender Tabelle dargestellt sind (nach [Davenport, 1972] und [Beranek, 1978]). Bei den hier angegebenen Schwellenwerten für die periodisch wiederkehrende Böengeschwindigkeit ist die Auftretenswahrscheinlichkeit 'höchstens eine Stunde tagsüber' zugrunde gelegt. Analoge Grenzwerte ergeben sich für die Auftretenswahrscheinlichkeit 'höchstens eine Stunde pro Woche' bzw. 'höchstens eine Stunde pro Monat'. Mit der Definition 'tagsüber' ist die typische Nutzungszeit der Freiflächen zwischen 6 Uhr morgens und 6 Uhr abends charakterisiert.

Windkomfort Klasse	Tätigkeit	Nutzung	Böenschwelle
A	Schnelles Gehen	Bürgersteige, Verkehrsflächen in Industriegebieten	< 11 m/s
B	Stetes Spaziergehen	Parks, Eingänge, Durchgangsbereiche	< 8.5 m/s
C	Bummeln, kurzes Stehen- und Sitzenbleiben	Parks, Einkaufspassagen, Wartebereiche	< 6.5 m/s
D	Ruhen, langes Stehen- und Sitzenbleiben	Parks, Ruhebänke, Spielplätze, Straßencafés	< 5 m/s

Tab.4.1: Windkomfortstufen und Nutzung von Freiflächen

Korrespondierend zu diesen Aussagen kann auch eine Bewertung an Hand von Verteilungsfunktionen gemäß einer von [Beranek, 1978] vorgeschlagenen Auftragung erfolgen, die in Abb. 4.1 dargestellt ist. Die den vorherigen Angaben entsprechende Häufigkeit, mit der Böen einer bestimmten Geschwindigkeitsschwelle auftreten, ist 8.33%. Das bedeutet, während einer Stunde tagsüber treten kurze, z.B. 5 Sekunden andauernde Böen auf, bei denen dieser Schwellenwert überschritten wird.

Zwischen den Werten der Windgeschwindigkeit, die für die verschiedenen Windrichtungen zu messen sind und den Aussagen über den lokalen Windkomfort liegt ein Rechenweg, der die langjährige Windstatistik einer nahe gelegenen Messstation und die Übertragung dieser Daten auf den Standort zu berücksichtigen hat.

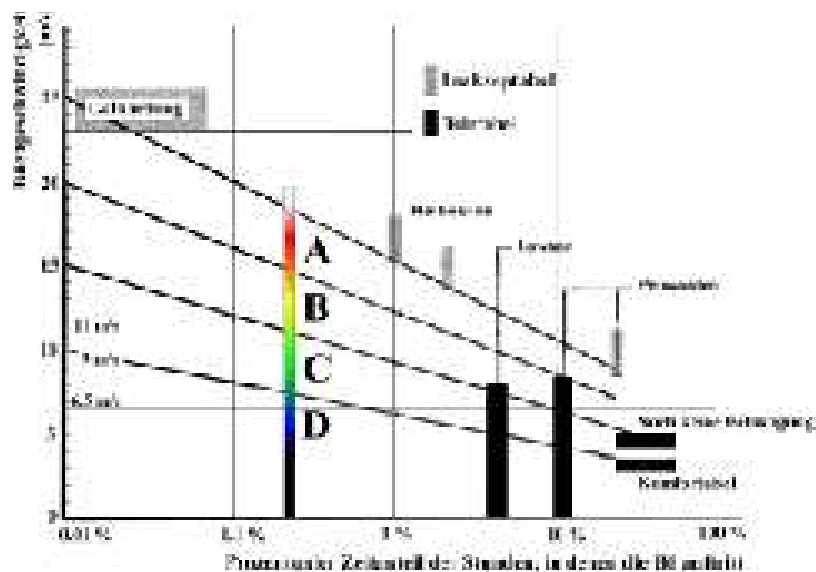


Abb. 4.1: Einteilung der Windkomfortstufen nach [Beranek, 1978]

### 4.3 Ergebnisse aus den Geschwindigkeitsmessungen im Fußgängerbereich

Für 12 Windrichtungen sind im bodennahen Fußgängerbereich mit eingesetzten Miniatursonden Messungen der Spitzenwindgeschwindigkeiten ausgeführt worden. Dabei wurde der Windkomfort an 162 Messpunkten auf dem gesamten Bebauungsgelände und vereinzelt auf den angrenzenden Straßen untersucht.

In Abb. 4.2 bis Abb. 4.4 ist in dem bereit gestellten Lageplane die Position der Messpunkte im ebenerdigen Fußgängerbereich eingetragen. Zur übersichtlicheren Darstellung ist die gesamte Bebauungsfläche in folgende drei Zonen A, B und C unterteilt:

Zone A: Bereich westlich der Appenzeller Straße begrenzt durch die Forst-Kasten-Allee und den Rudolf-Kammerbauer-Weg

Zone B: Bereich entlang der Forst-Kasten-Allee und der Bellinzonastraße östlich der Appenzeller Straße

Zone C: Bereich Östlich und südlich der Appenzeller Straße und südlich der Zuger Straße

Die fortlaufenden Messpunktnummern werden jeweils den entsprechenden Zonen Zugeordnet.

Die Abb. 4.5 bis Abb. 4.13 zeigen eine windrichtungsabhängige Auftragung der lokal zu erwartenden Böenwindgeschwindigkeiten. Diese sind zu Vergleichszwecken bezogen auf die ungestörte Anströmgeschwindigkeit in 50 m Höhe über Grund (Windgeschwindigkeit  $u_H$  entspricht in etwa der Geschwindigkeit in der Gebäudehöhe eines sechzehngeschossigen Hochhauses z.B. F-T2).

Aus diesen Daten wurden unter Berücksichtigung der Windstatistik Kennwerte für die einzelnen Messpunkte berechnet. In den nachfolgenden Abbildungen 4.14 bis 4.16 sind die Böenwindgeschwindigkeiten dargestellt, welche im langjährigen Durchschnitt eine Stunde tagsüber erreicht werden (vgl. Tab 4.1). Werte unter 5m/s gelten als sehr komfortabel, Werte über 11m/s als inakzeptabel.

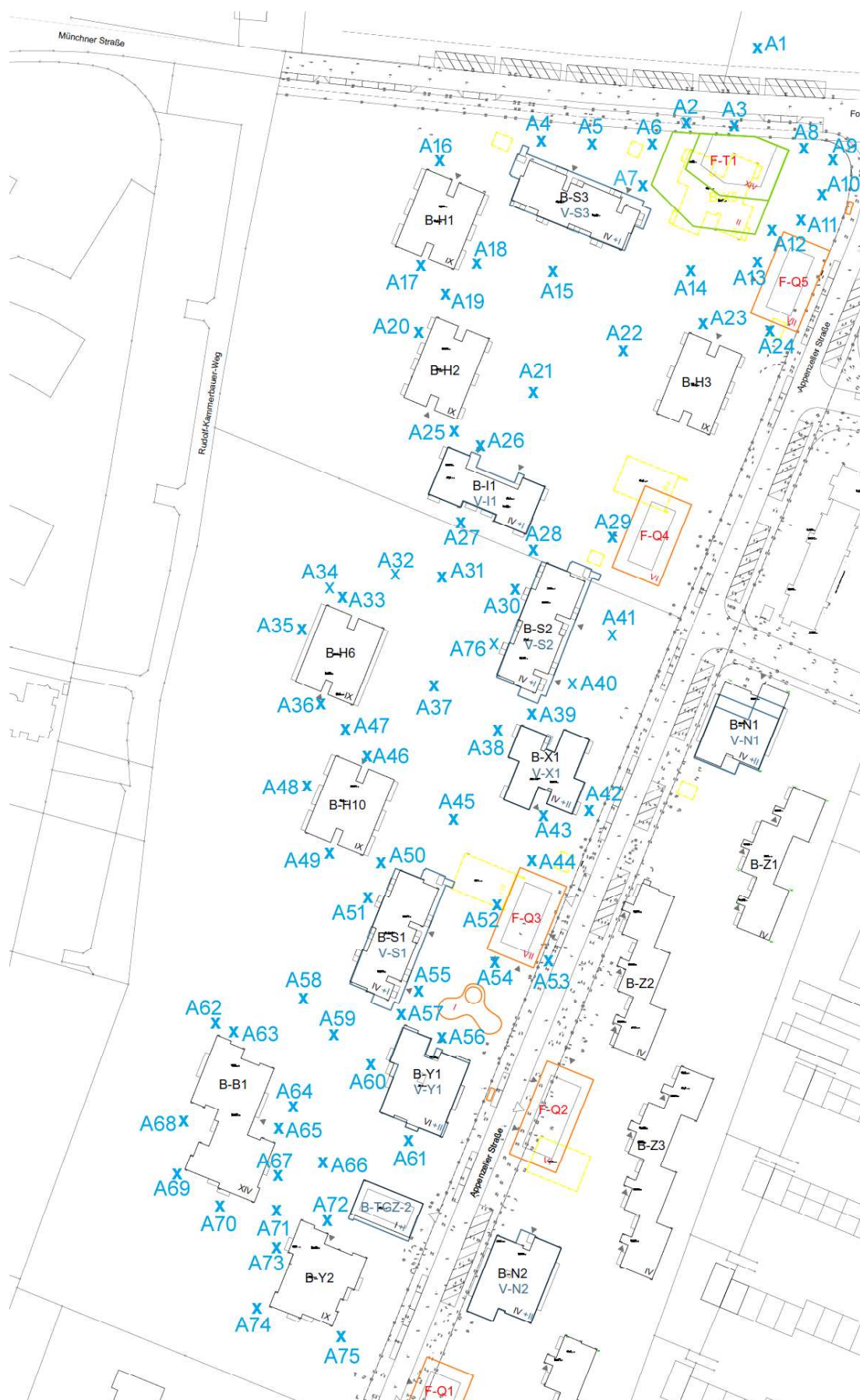


Abb. 4.2: Messstellennummerierung in Zone A für Geschwindigkeitsmessungen im Fußgängerbereich

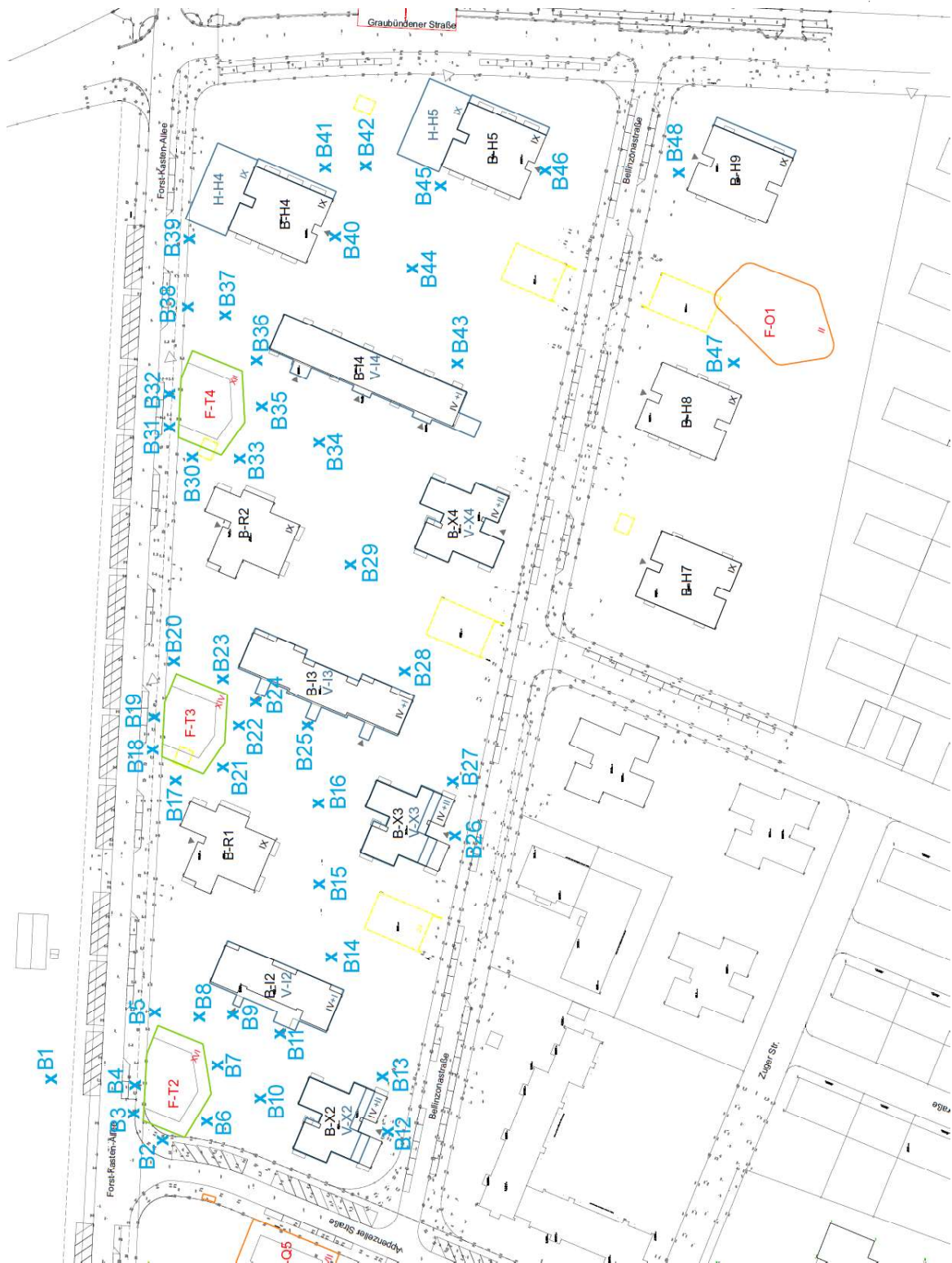


Abb. 4.3: Messstellennummerierung in Zone B für Geschwindigkeitsmessungen im Fußgängerbereich



Abb. 4.4: Messstellennummerierung in Zone C für Geschwindigkeitsmessungen im Fußgängerbereich



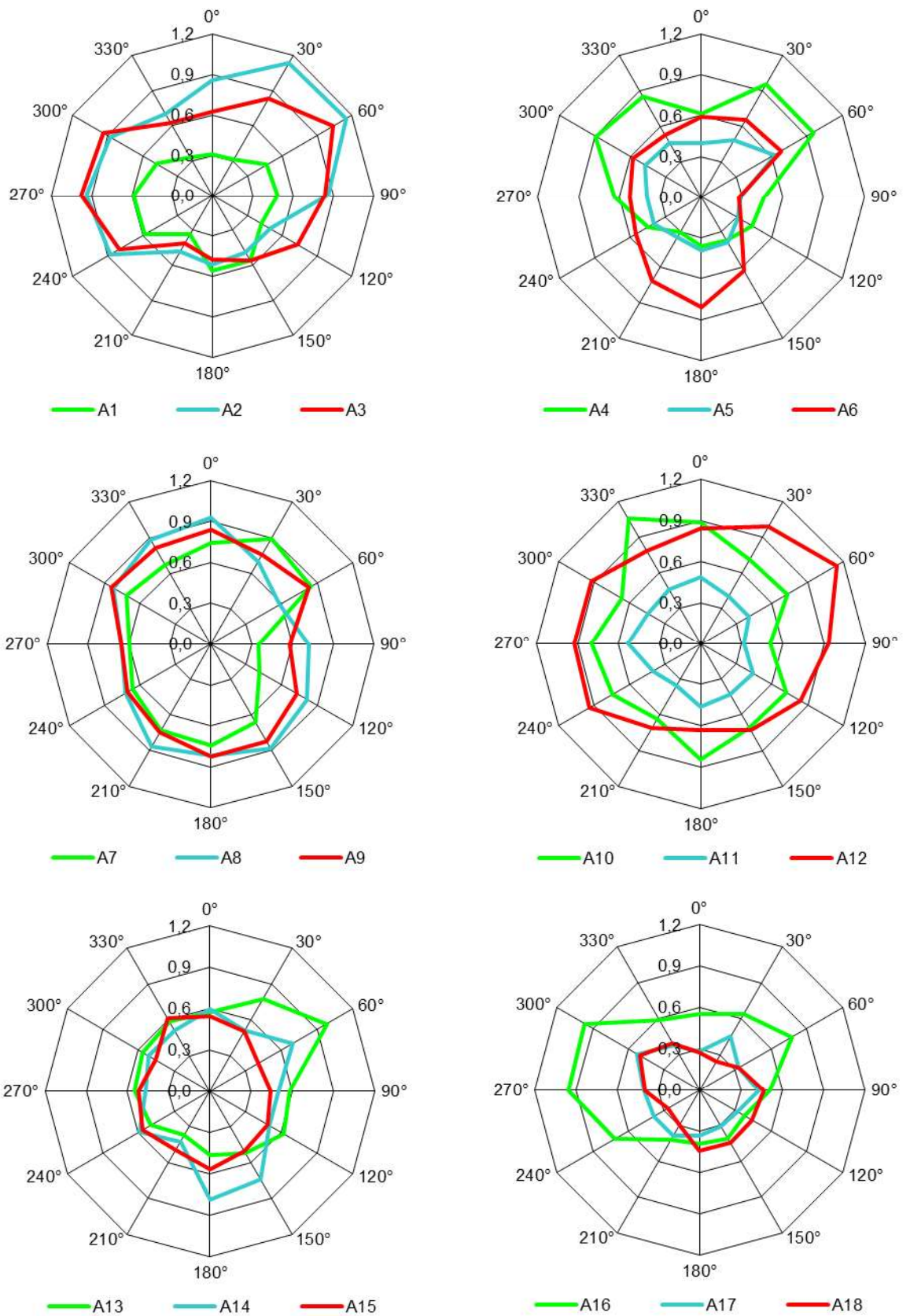


Abb. 4.5: Windrichtungsabhängige Böenwindgeschwindigkeit im bodennahen Bereich in der Zone A bezogen auf die zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe

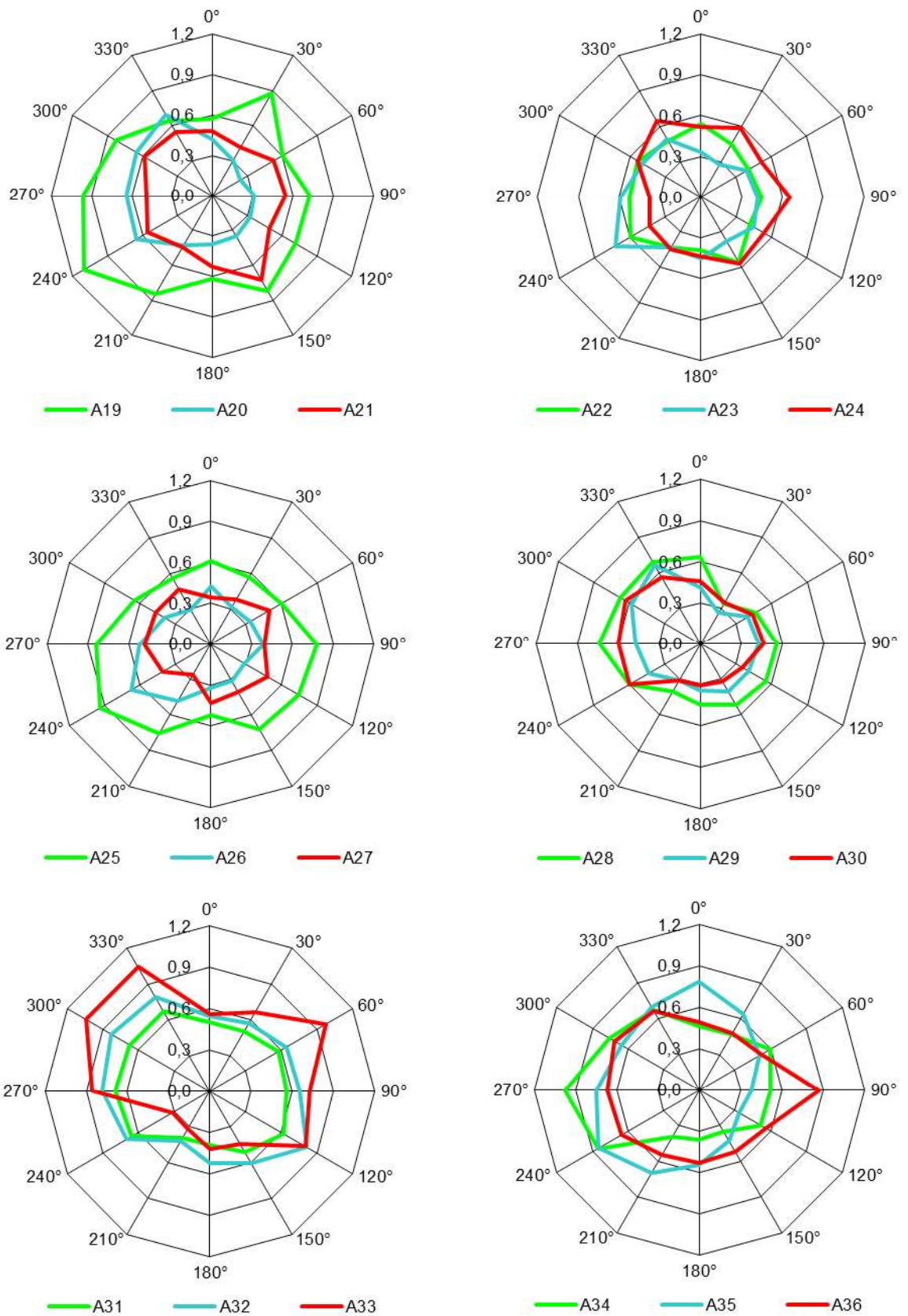


Abb. 4.6: Windrichtungsabhängige Böenwindgeschwindigkeit im bodennahen Bereich in der Zone A bezogen auf die zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe

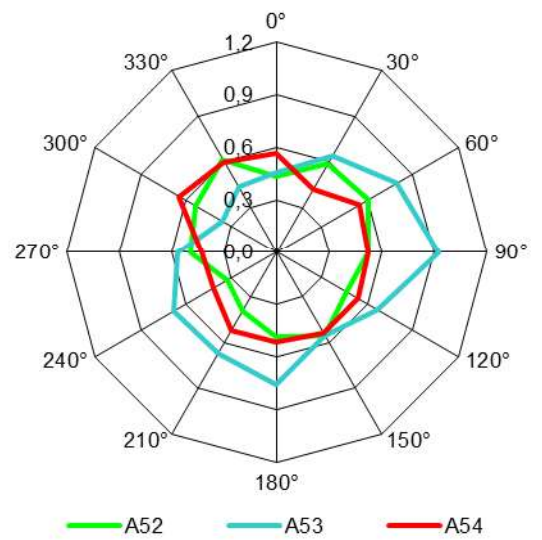
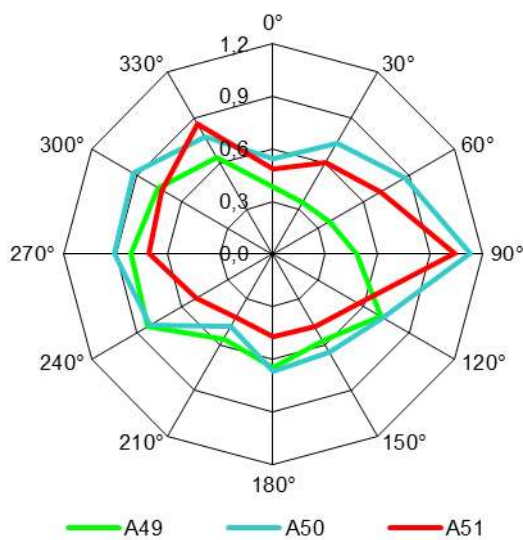
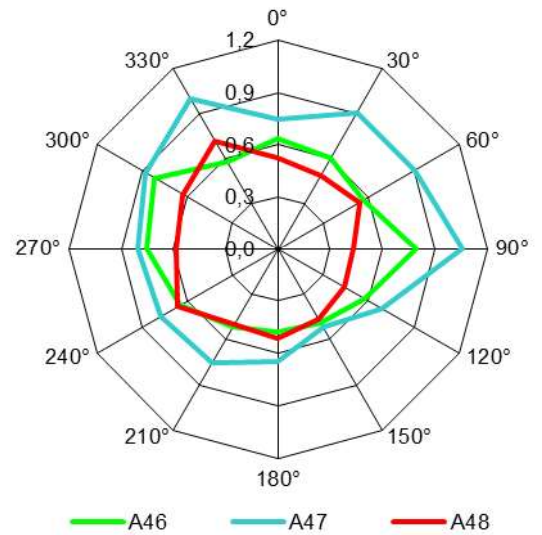
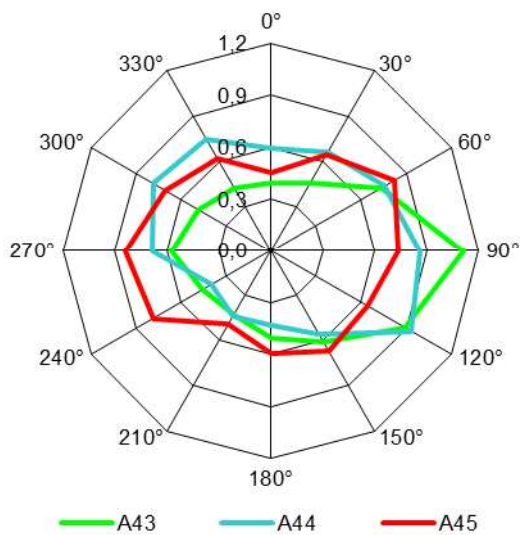
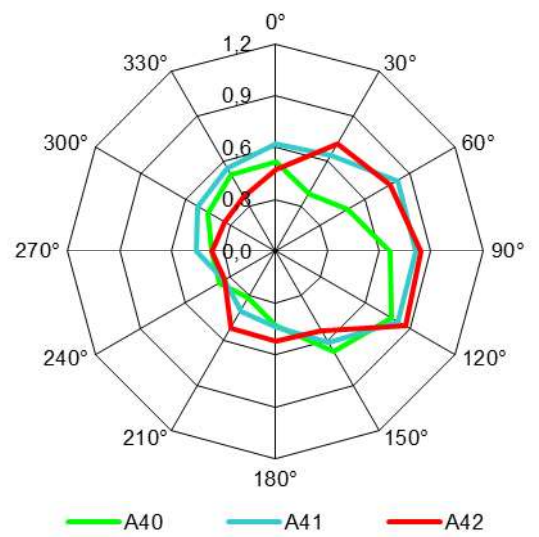
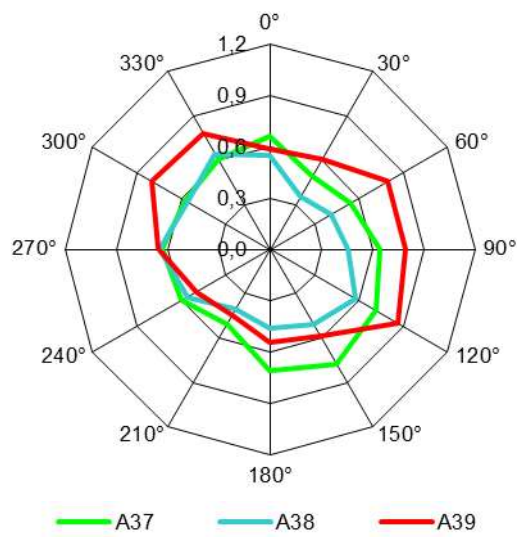


Abb. 4.7: Windrichtungsabhängige Böenwindgeschwindigkeit im bodennahen Bereich in der Zone A bezogen auf die zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe

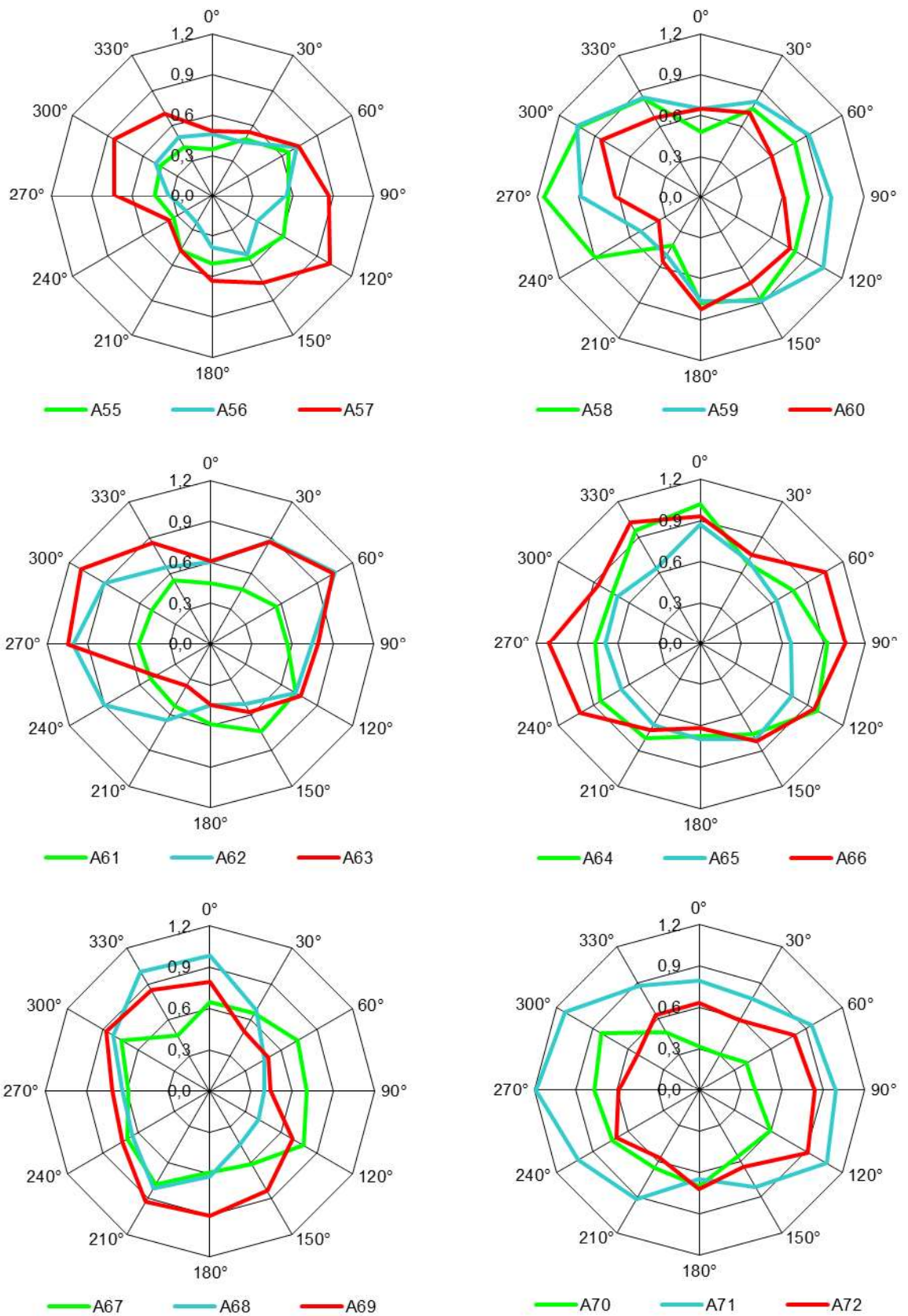


Abb. 4.8: Windrichtungsabhängige Böenwindgeschwindigkeit im bodennahen Bereich in der Zone A bezogen auf die zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe

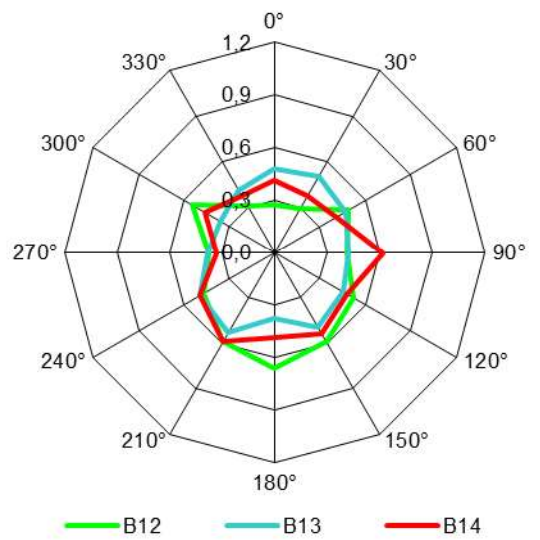
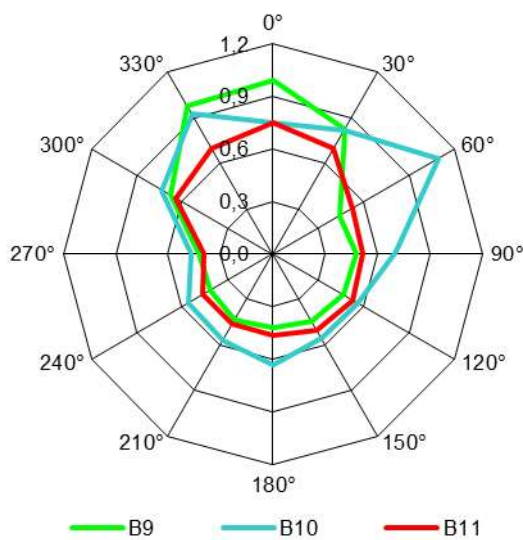
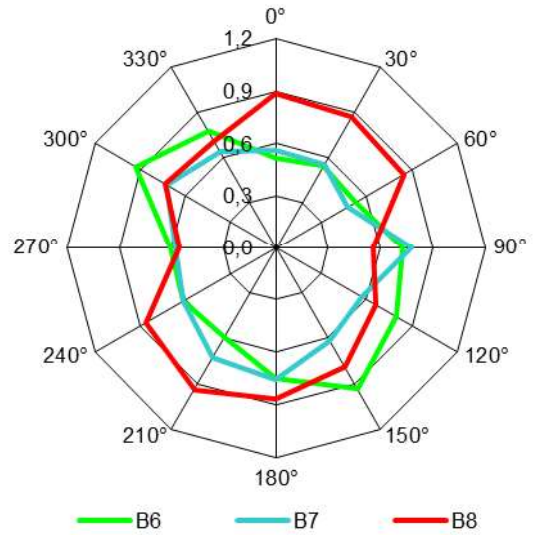
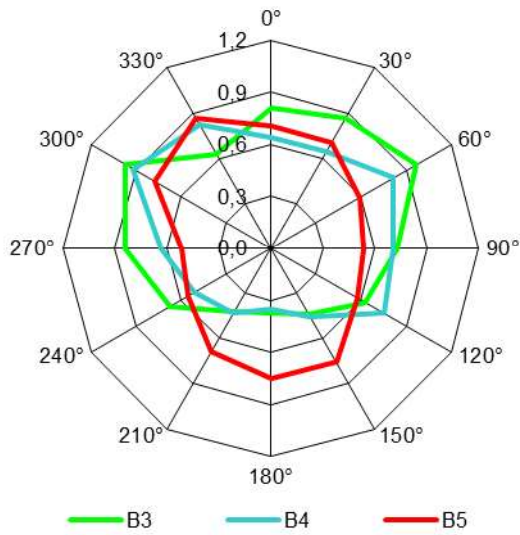
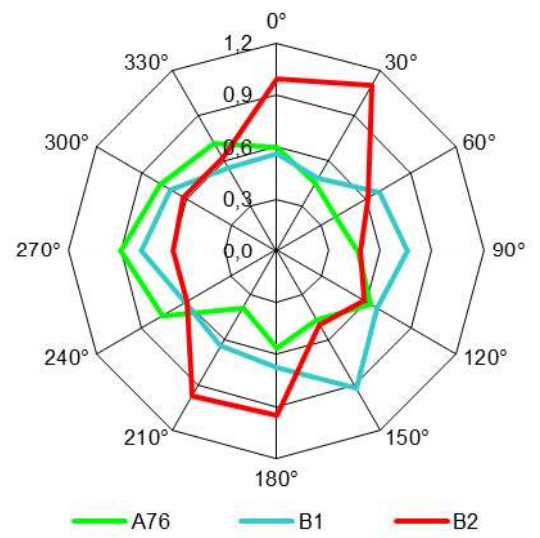
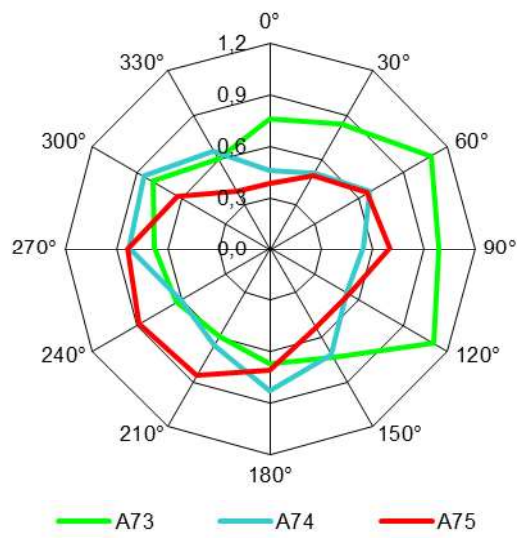


Abb. 4.9: Windrichtungsabhängige Böenwindgeschwindigkeit im bodennahen Bereich in der Zone A und Zone B bezogen auf die zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe

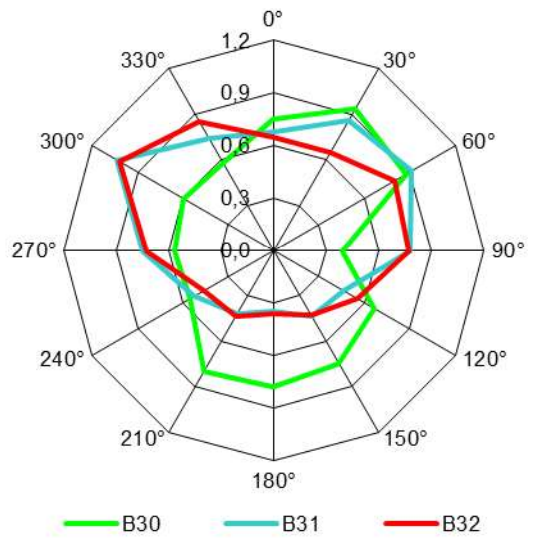
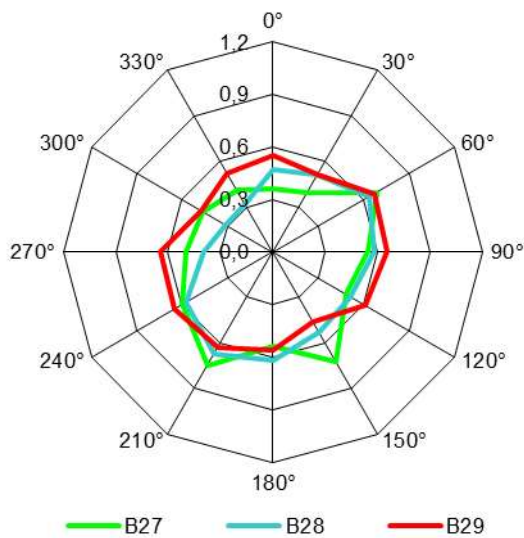
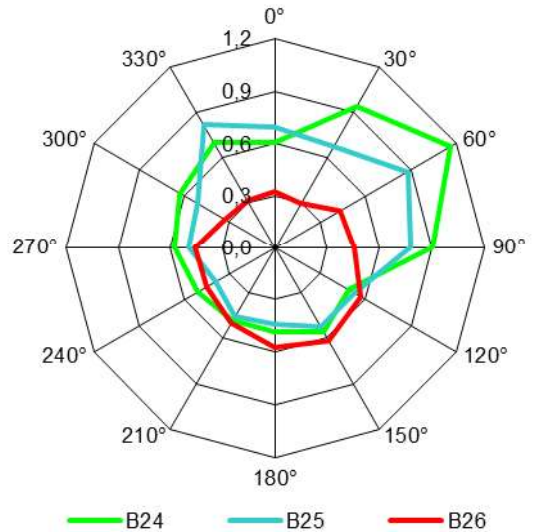
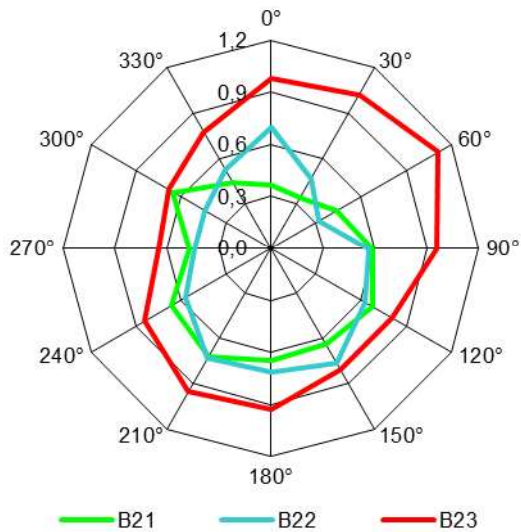
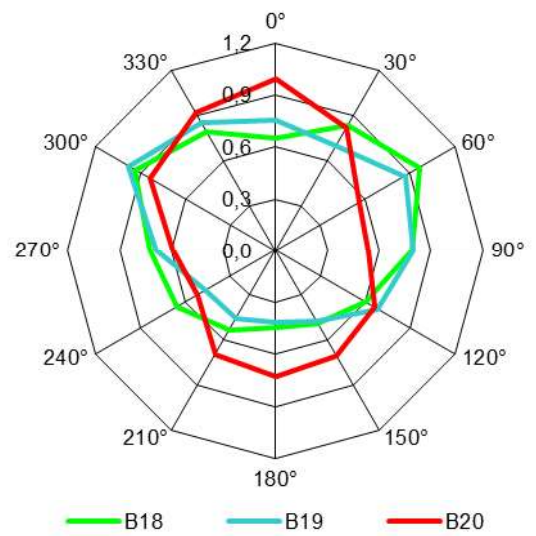
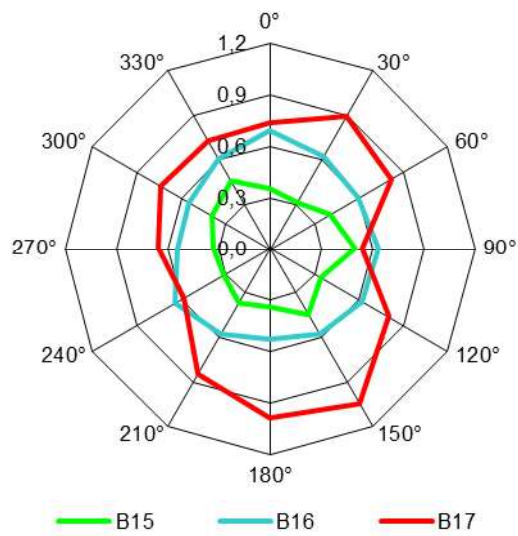


Abb. 4.10: Windrichtungsabhängige Böenwindgeschwindigkeit im bodennahen Bereich in der Zone B bezogen auf die zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe

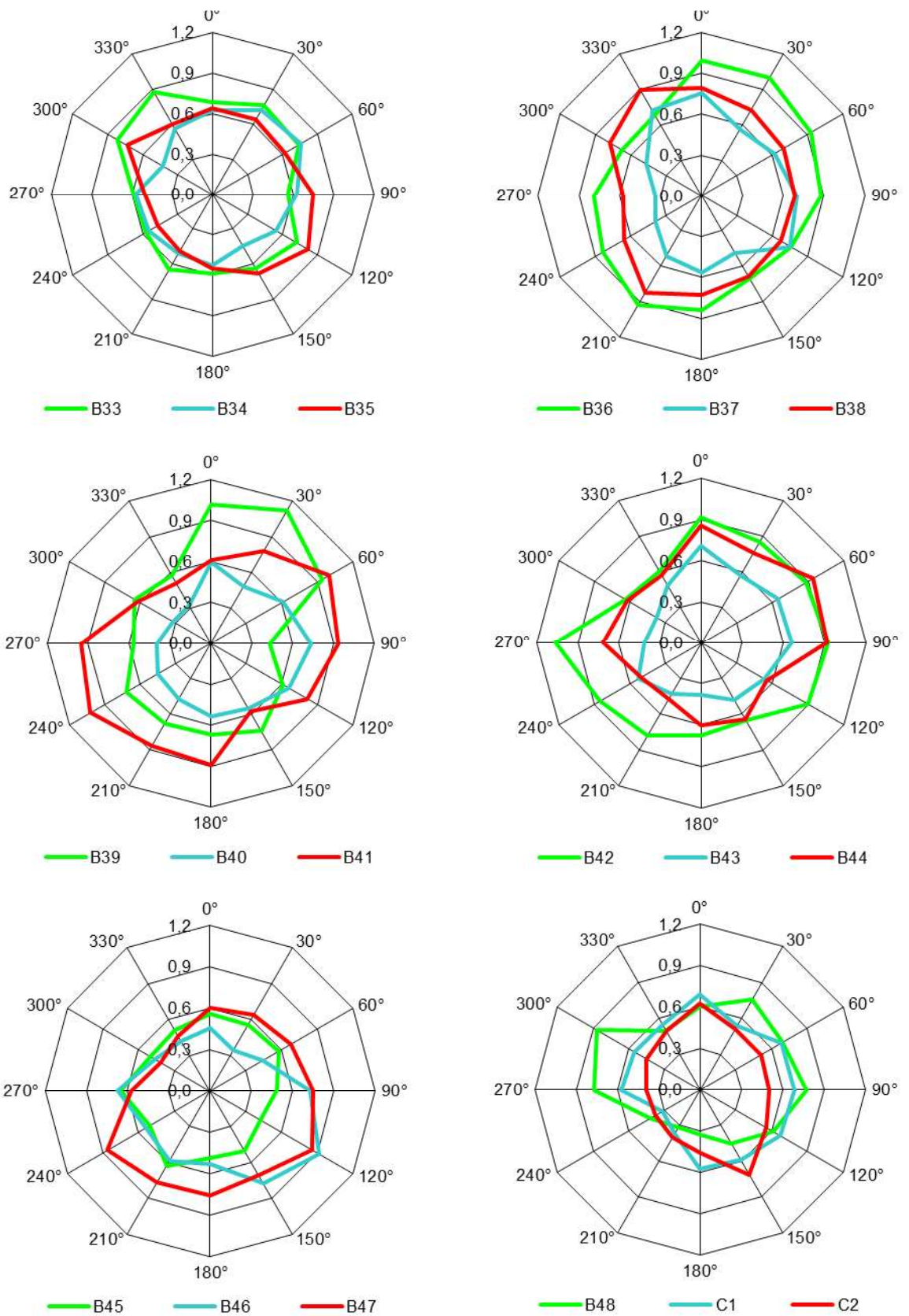


Abb. 4.11: Windrichtungsabhängige Böenwindgeschwindigkeit im bodennahen Bereich in der Zone B und Zone C bezogen auf die zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe

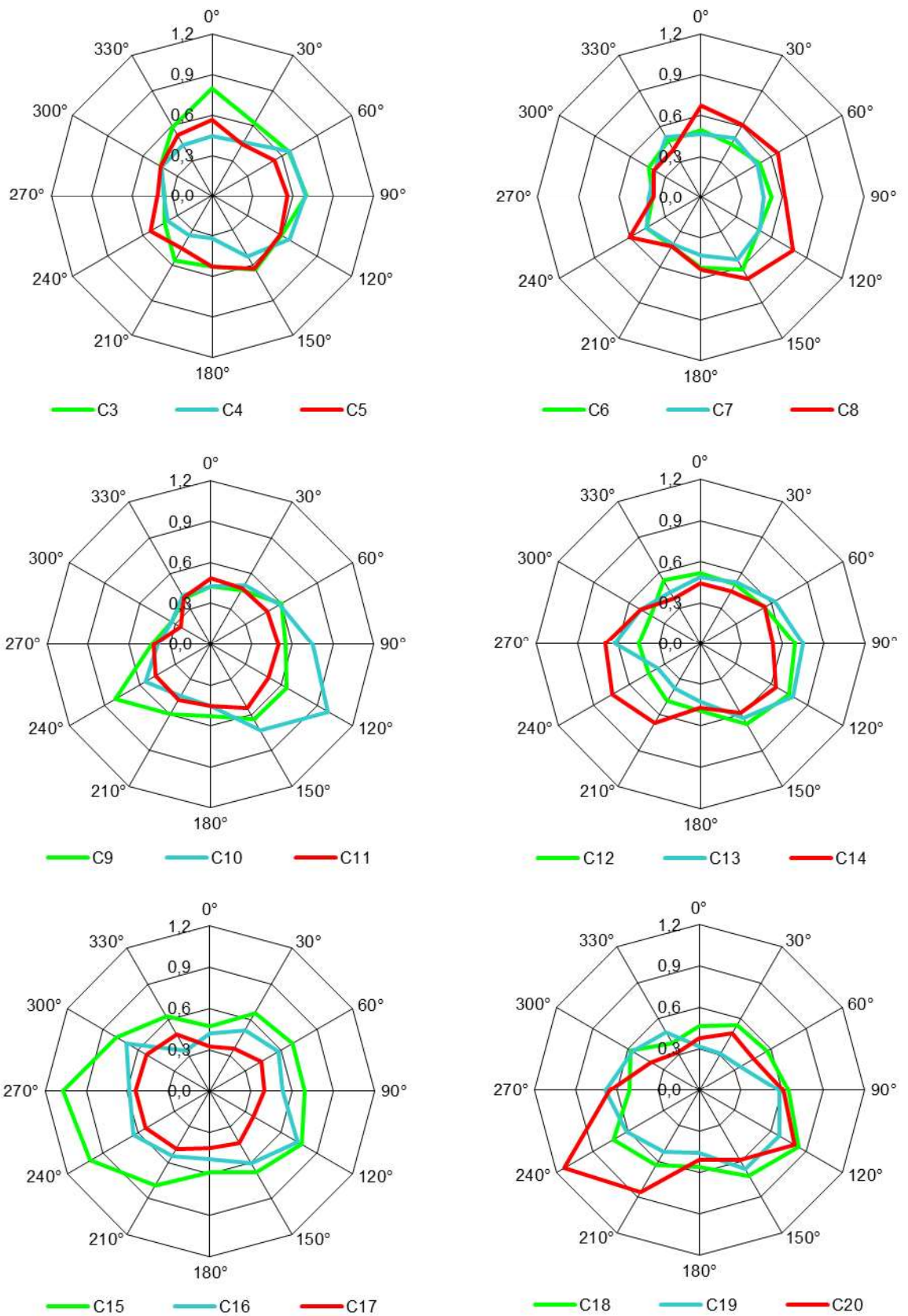


Abb. 4.12: Windrichtungsabhängige Böenwindgeschwindigkeit im bodennahen Bereich in der Zone C bezogen auf die zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe



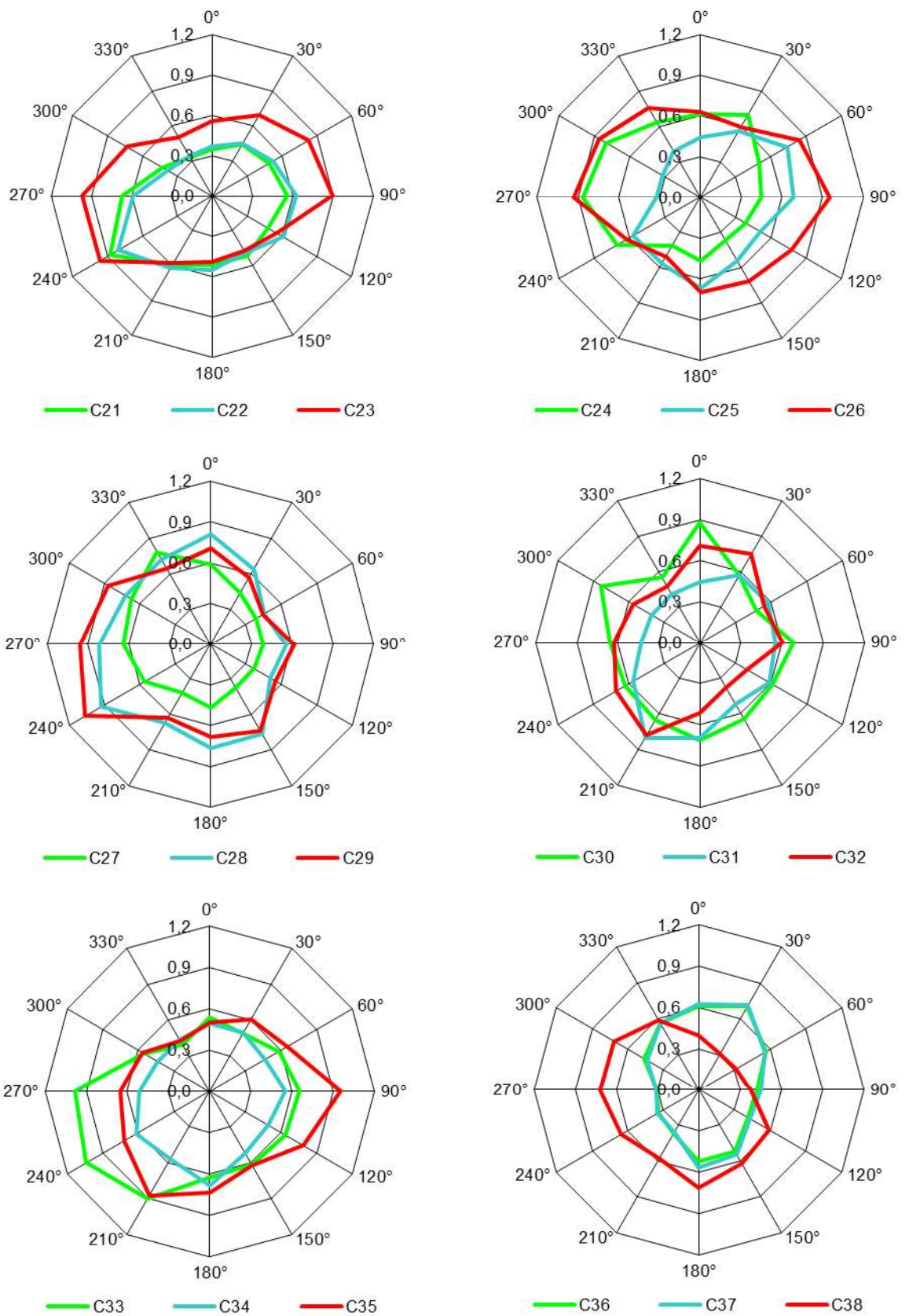


Abb. 4.13: Windrichtungsabhängige Böenwindgeschwindigkeit im bodennahen Bereich in der Zone C bezogen auf die zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe

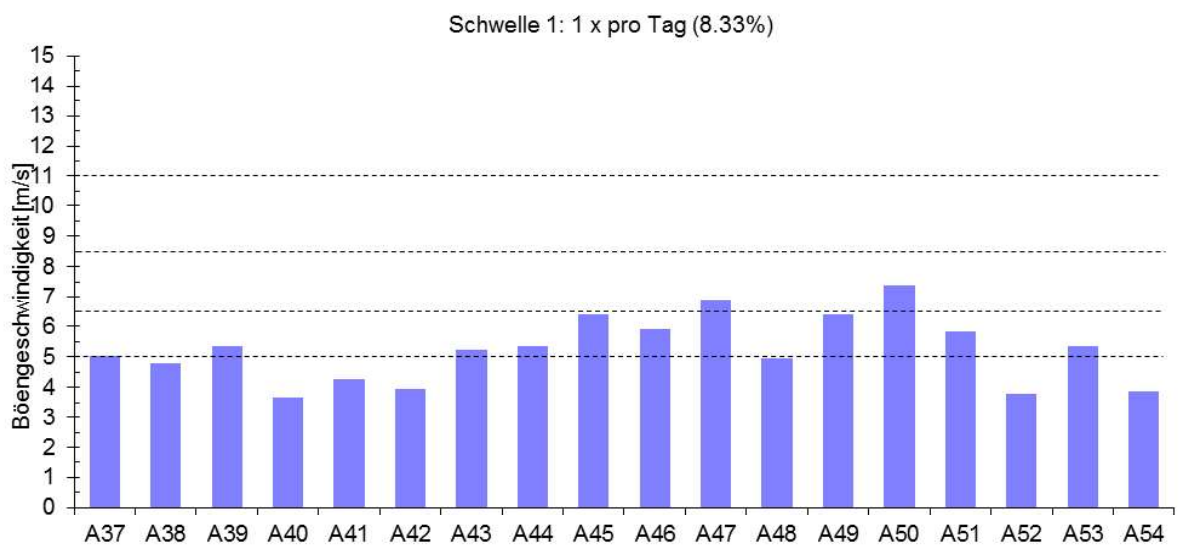
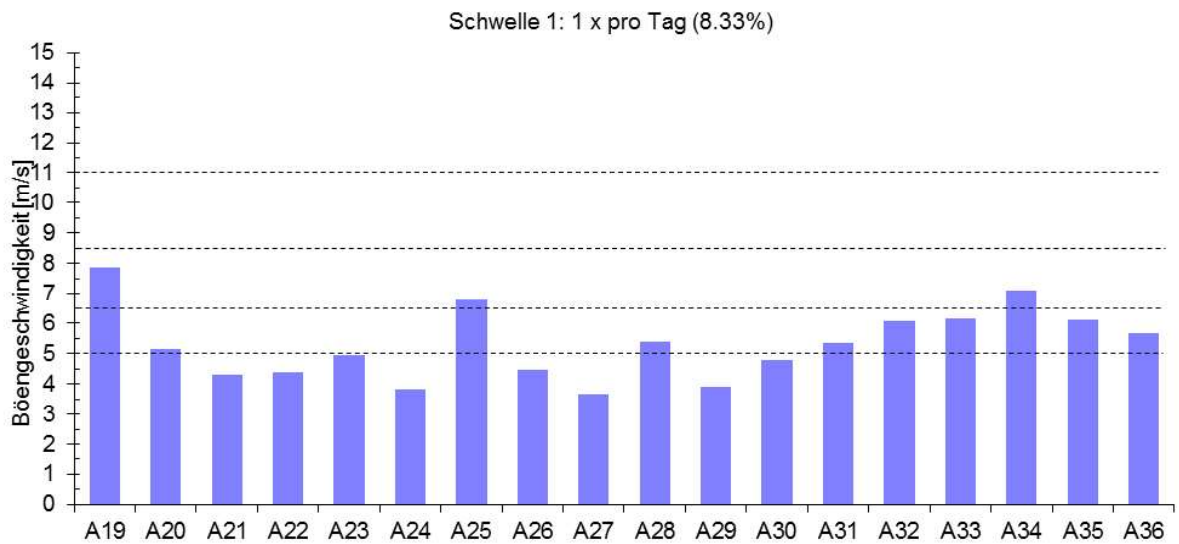
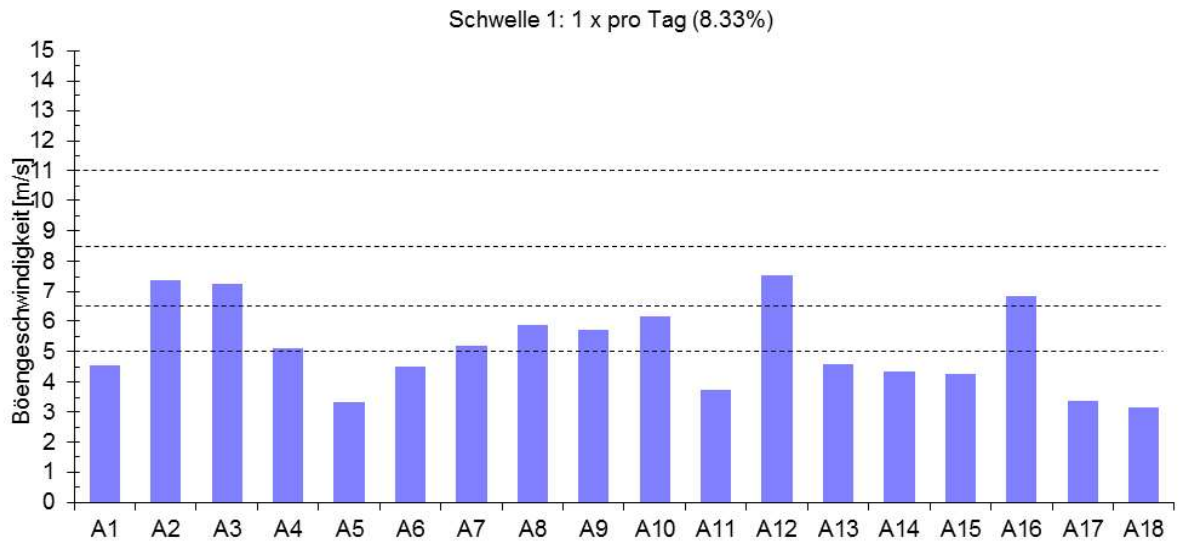


Abb. 4.14: Böengeschwindigkeit an Messpunkten in der Zone A, deren kurzzeitige Überschreitung im langjährigen Mittel etwa innerhalb einer Stunde pro Tag zu erwarten ist.

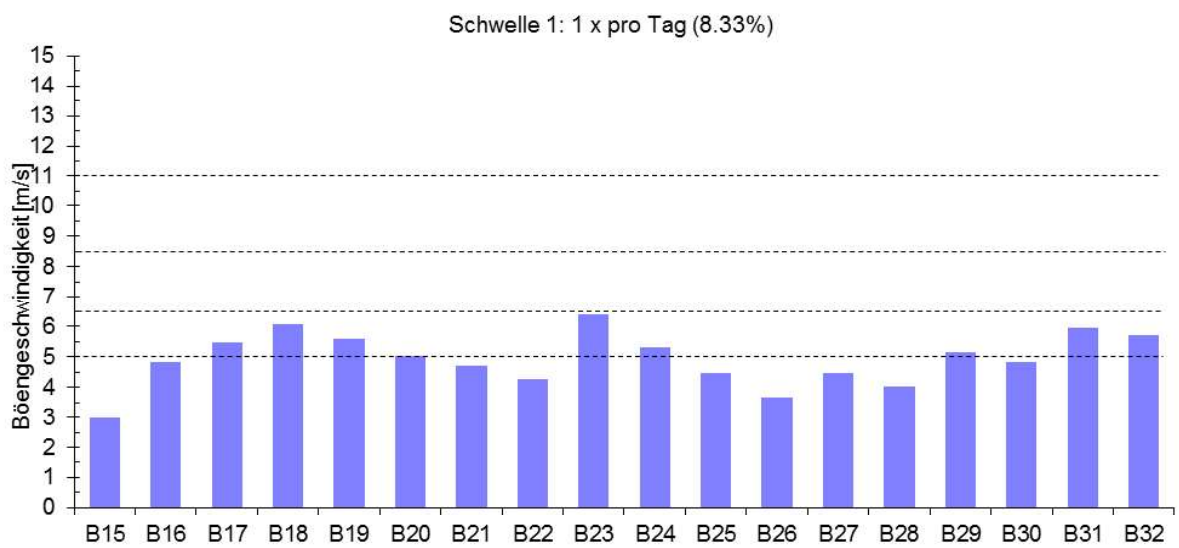
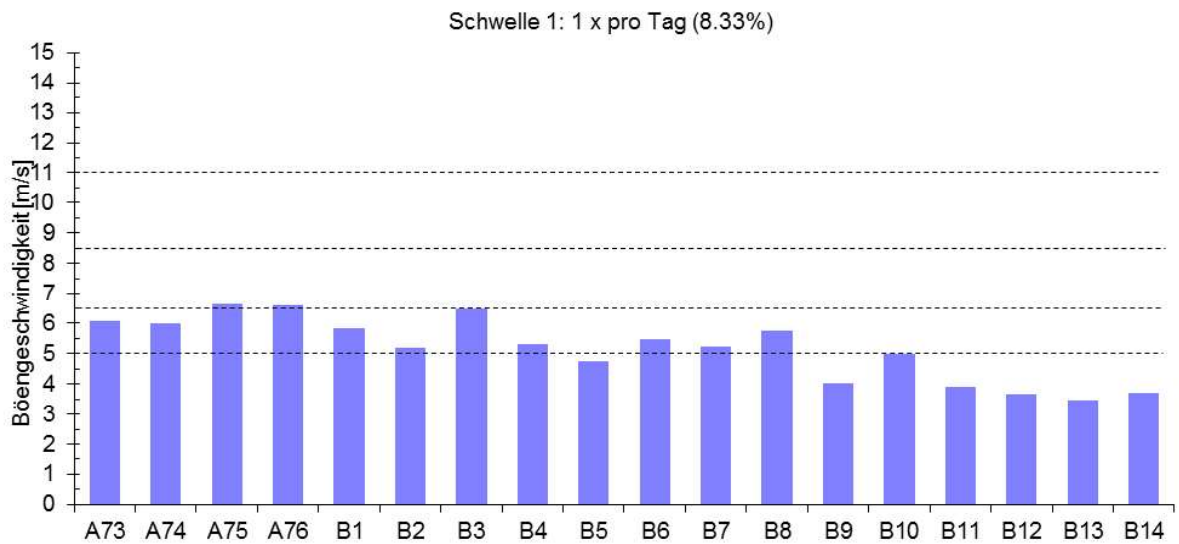
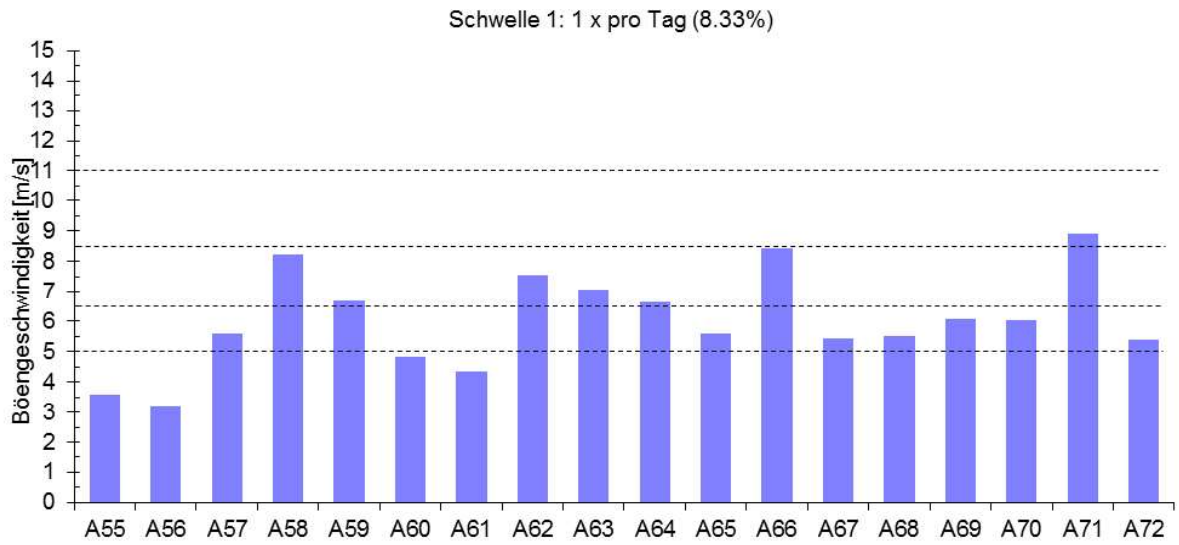


Abb. 4.15: Böengeschwindigkeit an Messpunkten in der Zone A und der Zone B, deren kurzzeitige Überschreitung im langjährigen Mittel etwa innerhalb einer Stunde pro Tag zu erwarten ist.

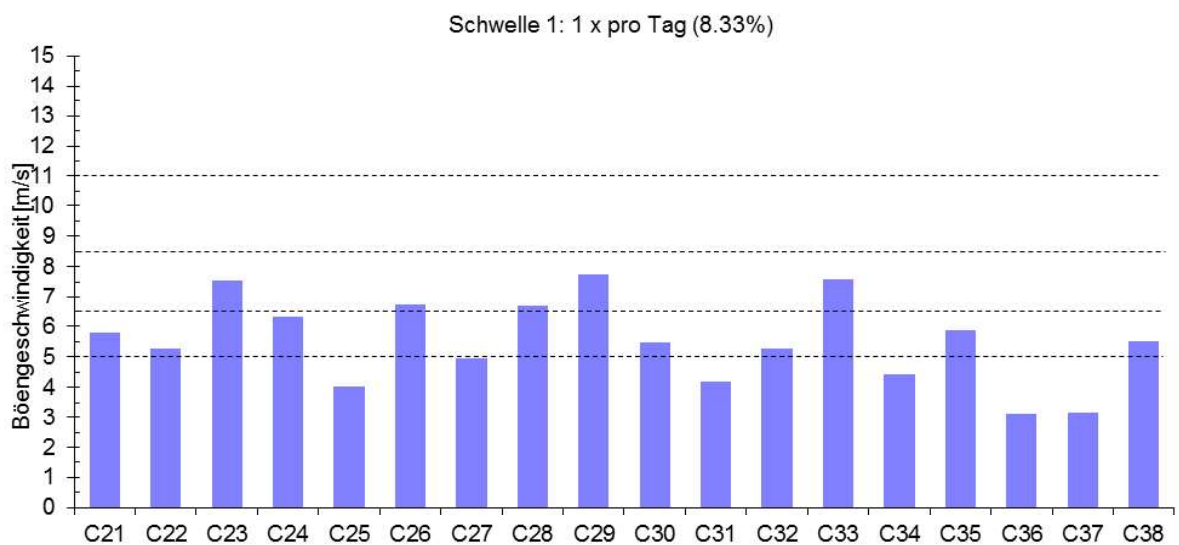
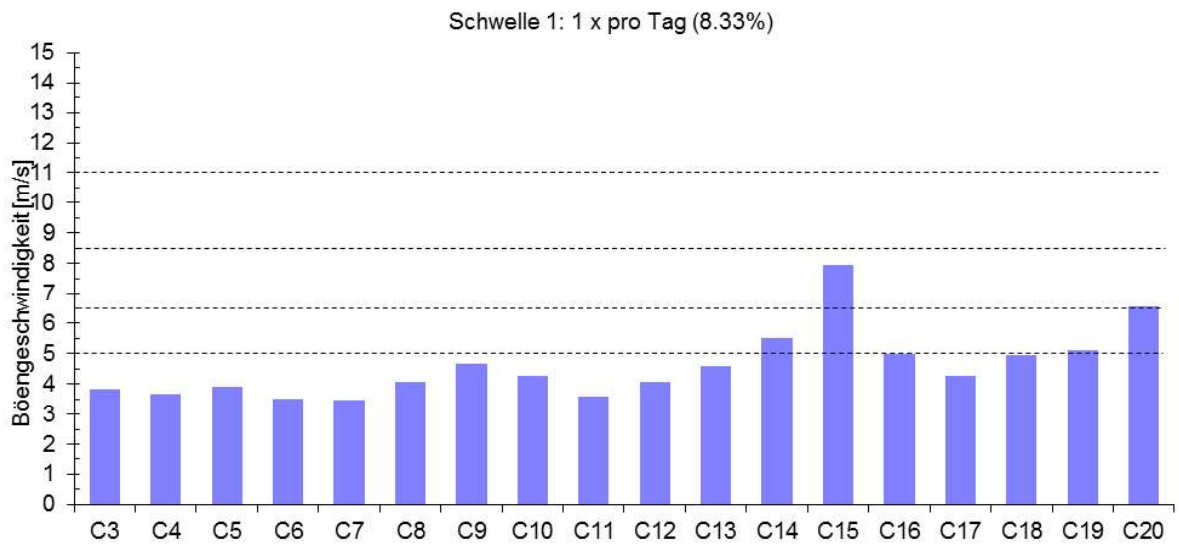
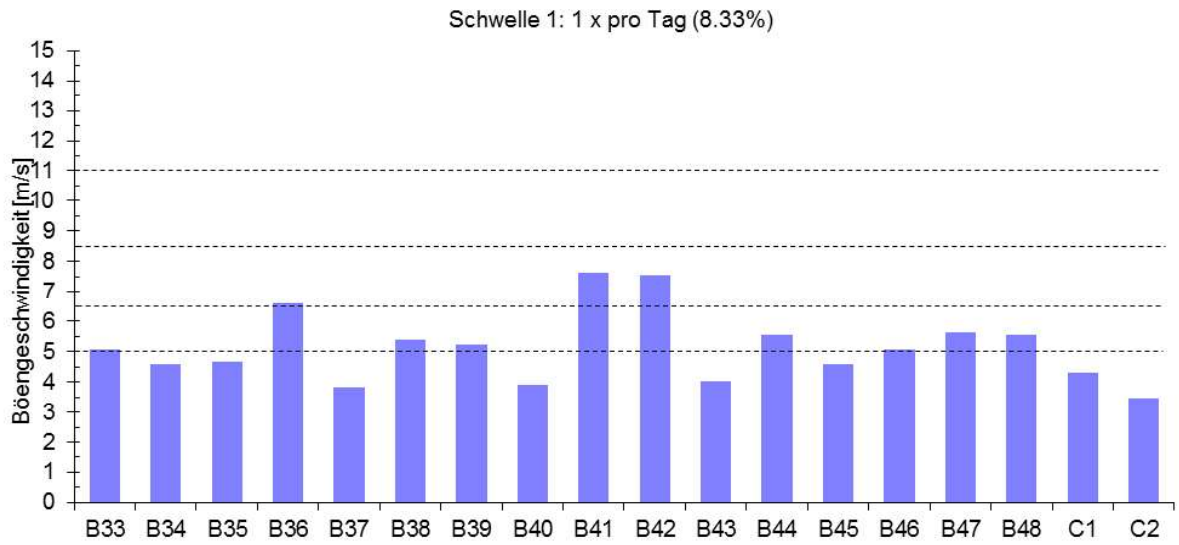


Abb. 4.15: Böengeschwindigkeit an Messpunkten in der Zone B und der Zone C, deren kurzzeitige Überschreitung im langjährigen Mittel etwa innerhalb einer Stunde pro Tag zu erwarten ist.

#### 4.4 Bewertung des Windkomforts auf den Freiflächen

Entsprechend Abb. 4.1 bzw. Tab. 4.1 lässt sich aus den vorgenannten Kennwerten eine Einordnung der untersuchten Bereiche in Windkomfortklassen durchführen, woraus eine typische Nutzung abgeleitet werden kann. Bei Überschreiten der Böenschwelle von 8,5m/s erfolgt eine Zuordnung in Komfortklasse A (rote Bereiche), bei Überschreiten der Schwelle von 6,5m/s in Komfortklasse B (gelb) und bei Überschreiten der Schwelle von 5m/s in Komfortklasse C (grün).

Die Abb. 4.16 bis 4.18 zeigen im Fußgängerbereich die Komfortverhältnisse für den projektierten Planstand der Nachverdichtung der Wohnanlagen der Bayerischen Versorgungskammer auf. Dabei werden die dem Wind mehr ausgesetzten (rot und gelb) aber auch die windgeschützten Bereiche (blau) deutlich. In den Abbildungen sind die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Unterteilungen westlich und östlich der Appenzeller Straße (Zone A bis Zone C) wieder aufgegriffen.

Die als inakzeptabel definierte Schwelle der zu erwartenden Böengeschwindigkeiten wurde an **keiner** der untersuchten Stellen überschritten. Diese Bereiche wären in den Grafiken grau hinterlegt. Hier wurde demzufolge auch eine Überschreitung der Gefährdungsgrenze (23m/s entspricht Schwelle einmal pro Jahr) nicht festgestellt.

Besonderes Augenmerk ist auf die Außenbereiche der vier **neuen** Hochhäuser F-T1, F-T2, F-T3 und F-T4 entlang der Forst-Kasten-Allee zu legen, die neben dem bestehenden Hochhaus B-B1 die höchsten Gebäude auf dem Gelände darstellen. Im Umfeld dieser neuen Hochhäuser werden überall mindestens die Anforderungen für Zugangsbereiche (Windkomfortstufe B – gelb) erfüllt. In weiten Bereichen um die Hochhäuser sind noch deutlich ruhigere Windkomfortverhältnisse vorzufinden, hier werden die Windkomfortstufe C und D erreicht. Die über weite Bereiche als eher windgeschützten Zonen im Nahbereich dieser die durchschnittliche Bebauungshöhe deutlich überragenden Gebäude sind eine Folge der Anordnung der Gebäude zwischen den bestehenden Wohngebäuden, aber auch der Geometrie der Hochhäuser und vor allem der Ausrichtung ihrer Hauptachsen.

Größere Flächen mit eingeschränktem Windkomfort sind eher im Südwesten der Siedlung zu erwarten. Hier sind jedoch bereits bestehende Gebäude betroffen, insbesondere ist der Durchgang zwischen B-B1 und B-Y2 dem Wind als stark ausgesetzt zu bezeichnen. Diese Einschränkung müsste allerdings in der derzeitigen Bebauungssituation auch jetzt schon gegeben sein.

Im Umfeld von dem Bestandshochhaus B-H12 sind ebenso etwas höhere bodennahe Windgeschwindigkeiten gemessen worden. Die Ursachen für diese Einschränkungen sind in den An- und Umströmbedingungen dieses neun-geschossigen Hochhauses, vorrangig durch eine beschleunigte Kantenumströmung bei den am Standort vorherrschenden Starkwindlagen aus Südwest bis West begründet. Wie bereits aber oben schon erwähnt, werden die Anforderungen für Zugangsbereiche stets erfüllt.

Ein Ziel der hier vorgelegten Planungen besteht darin, die gesamte Siedlung im Zuge dieser Nachverdichtung hinsichtlich der Außen- und Grünanlagen aufzuwerten. Die Untersuchungen zeigten, dass ohne weitere Schutzmaßnahmen die Möglichkeit besteht, sensible Freiflächenutzungen in einem umfangreichen Maße auszuweisen.



Abb. 4.16: Windkomfortklassen auf den Freiflächen in Zone A westlich der Appenzeller Straße begrenzt durch die Forst-Kasten-Allee und den Rudolf-Kammerbauer-Weg

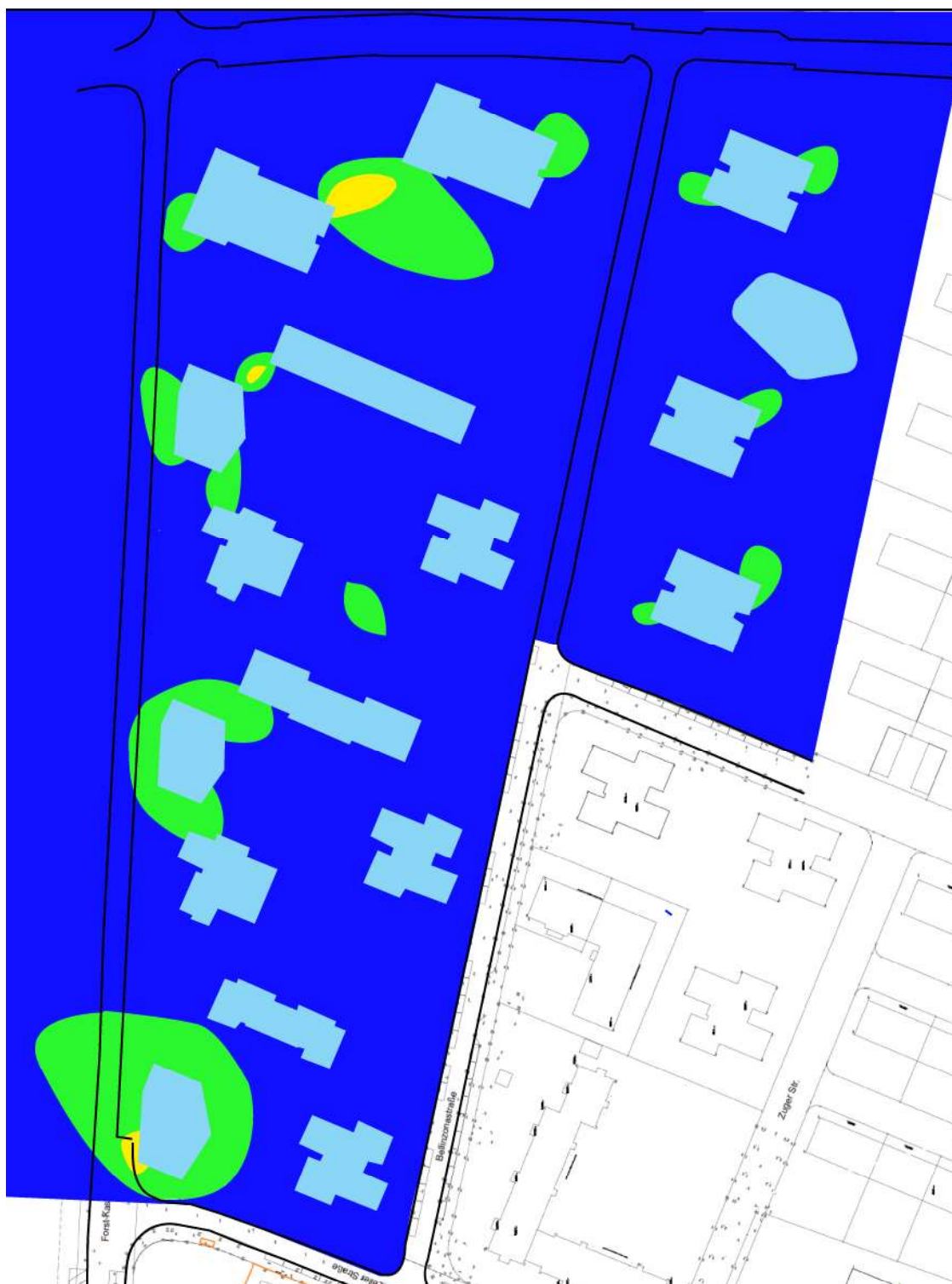


Abb. 4.17: Windkomfortklassen auf den Freiflächen in Zone B - Bereich entlang der Forst-Kasten-Allee und der Bellinzonastraße östlich der Appenzeller Straße (Bild gegenüber der Nordrichtung um 90° gedreht)  
 (Klasse A: rot – schnelles gehen, Klasse B: gelb – stetes Gehen, Klasse C: grün – Bum-meln, kurzes Stehen- und Sitzenbleiben und Klasse D: blau – Ruhen, langes Stehen und Sitzenbleiben)



Kartengrundlage: LIN Architekten Urbanisten, Berlin  
 HOLZWARTH Landschaftsarchitekten, Berlin  
 Grafische Aufbereitung: Eigene Darstellung

Abb. 4.18: Windkomfortklassen auf den Freiflächen in Zone C – Bereich östlich und südlich der Appenzeller Straße und südlich der Zuger Straße



## 5 Literatur

- [1] Christoffer, J und Ulbricht-Eissing M.: Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 147: Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main 1989
- [2] Counihan, J.: Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel. Atmospheric Environment, Vol.7, 673-689, Pergamon, 1973
- [3] Davenport, A.G.: An approach to human comfort criteria for environmental windconditions, CIBA/WMO Colloquium Teaching the Teachers, Swedish National Building Research Institute, Stockholm 1972
- [4] Deutscher Wetterdienst: Deutscher Windatlas, 2.Auflage Version 5, Potsdam 2010
- [5] European Wind Atlas, published for the Commission of the European Communities by Risø National Laboratory, Roskilde Denmark, 1989
- [6] ESDU Engineering sciences data, Wind Engineering: Vol. 1a+1b: Wind speeds and turbulence, ESDU International plc, London, 1991
- [7] Gandemer J. et Guyot A.: Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti, La Documentation Française, Paris, 1976
- [8] Gandemer J. et Guyot A.: La protection contre le vent, CSTB Paris, 1981Plate, E.J.: Urban Climates and Urban Climatic Modelling: An Introduction, edited in Wind Climate in Cities, Nato ASI Series E: Applied Sciences - Vol. 277,23-39, 1993
- [9] Lang, H. und Istel, W.: Ökologische Auswirkungen von Hochhäusern, IRB Verlag, Stuttgart, 1995
- [10] Van Koten, H. and Beranek, W.J.: Criteria for wind speeds around buildings (values and applications). Proceedings of the 3rd Colloquium on Industrial Aerodynamics, Aachen, June 14-16,1978