

**Ingolstadt Hauptbahnhof  
Neubau Bahnhofsgebäude  
Turm 101  
(Ingolstadt)**

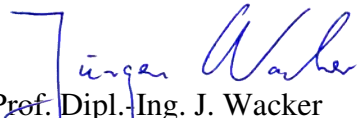
**Windkanalversuche:**

**Untersuchung des Windkomforts und der Windsicherheit im  
bodennahen Außenbereich und auf dem Dachbereich des  
Sockelgebäudes**

**Auftraggeber:** Fäth Immobilien Aschaffenburg  
Mörswiesenstraße 9 – 11  
63741 Aschaffenburg

**Projektbearbeitung:** B. Eng. Jan Lay

Birkenfeld, 04. August 2021

  
Prof. Dipl.-Ing. J. Wacker  
Wacker Ingenieure

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Im vorliegenden Bericht wird eine Prognose über die zukünftige Windkomfortsituation im bodennahen Außenbereich sowie auf dem Dachbereich des Sockelgebäudes des Bauvorhabens *Tower 101* (Neubau Bahnhofsgebäude) in Ingolstadt, Deutschland erstellt. Anhand von meteorologischen Klimadaten und Windkanaluntersuchungen und unter Berücksichtigung der angrenzenden Umgebungsbebauung werden die untersuchten Bereiche in Komfortstufen eingeordnet, die bestimmten Nutzungsanforderungen zugeordnet sind. Zudem wird auf mögliche unangenehme Bereiche und Gefährdungsstellen untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen nach Anwendung der Komfortkriterien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es wurden keine Gefahrenbereiche im Sinne der Kriterien für Personen im bodennahen Außenbereich sowie auf den Dachterrassen des Sockelgebäudes identifiziert.
- Während der Hauptnutzungszeit der Dachterrassen auf dem Sockelbau im Sommer werden in allen Bereichen gute Windkomfortbedingungen erwartet. Im Nahbereich des Hochhausturms sind kurz- bis mittelfristige Aufenthalte möglich. Längerfristiges Verweilen im Sitzen ist nur bedingt möglich. Typische Nutzungsmöglichkeiten sind Wartebereiche oder auch Parkanlagen. Die beste Komfortsituation wird für den südlichen Dachbereich prognostiziert. Hier sind auch längerfristige Aufenthalte ohne weitere Maßnahmen möglich.
- Im bodennahen Außenbereich des Gebäudes kann im Sommer mit sehr guten Windkomfortverhältnissen gerechnet werden. Die Flächen östlich und westlich des Bahnhofsgebäudes eignen sich beispielsweise für Außengastronomie und sind für längerfristige Aufenthalte geeignet.
- Aufgrund des Windklimas im Winter im Vergleich zum Sommer ergeben sich für diesen Zeitraum sowohl für die Dachterrassen als auch für die bodennahen Bereiche ungünstigere Ergebnisse hinsichtlich des Windkomforts.
- Die Dachterrassen des Sockelgebäudes sind in den Wintermonaten nur bedingt für kurzfristige Aufenthalte geeignet. In Bezug auf die Dachterrassen ist allerdings zu erwähnen, dass während des Winterhalbjahres auch bei guten Windkomfortbedingungen allein aus Temperaturgründen der Nutzungskomfort in der Regel nicht gegeben ist.
- Für die Verkehrsflächen und Wartebereiche im bodennahen Außenbereich des Gebäudes kann aber auch während der windintensiveren Wintermonate mit guten bis sehr guten Windkomfortverhältnissen gerechnet werden.

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	Beschreibung des Projekts.....	1
1.2	Problemstellung, Auflistung der Leistungen .....	3
<b>2</b>	<b>EXPERIMENTELLE VORGEHENSWEISE, WINDKANALVERSUCHE .....</b>	<b>4</b>
2.1	Windklima am Standort.....	6
2.2	Quantitative Ermittlung des Windkomforts .....	10
2.3	Komfortkriterien.....	11
2.4	Beschreibung der Versuchsvarianten .....	13
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE DER WINDKOMFORTUNTERSUCHUNGEN.....</b>	<b>15</b>
3.1	Windkomfort am Standort als Referenz .....	15
3.2	Windkomfort auf den Dachterrassen des Sockelgebäudes.....	15
3.3	Windkomfort im bodennahen Außenbereich .....	21
<b>4</b>	<b>HINWEISE.....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>VERWENDETE UNTERLAGEN .....</b>	<b>27</b>

## **1 PROBLEMSTELLUNG**

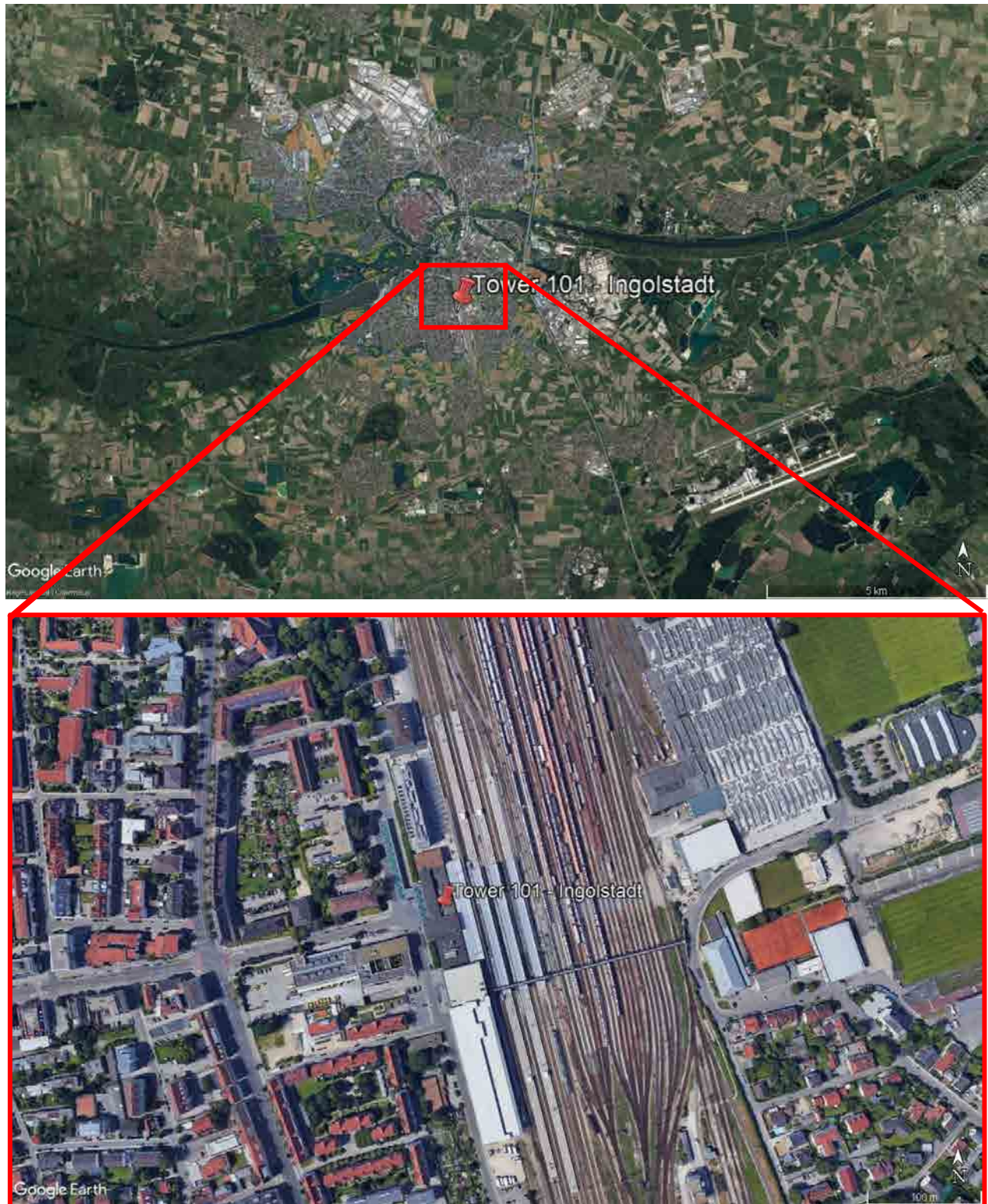
### **1.1 Beschreibung des Projekts**

In Ingolstadt soll das Bahnhofsgebäude am Hauptbahnhof umgestaltet bzw. neu gebaut werden. Geplant ist der Rückbau des alten Bahnhofs und die anschließende Errichtung eines neuen Bahnhofgebäudes mit Hochhausturm (Turm 101 - Höhe ca. 65 m – Abb. 1.1).



**Abb. 1.1:** Visualisierung des Gebäudeentwurfes (Fäth, 2021)





**Abb. 1.2:** Lage des geplanten Bauvorhabens *Tower 101* in Ingolstadt, Deutschland (Google Earth 2021)

## **1.2 Problemstellung, Auflistung der Leistungen**

Im Zusammenhang mit der weiteren Planung des Bauvorhabens wurde das Büro Wacker Ingenieure beauftragt, zu mehreren Aspekten der Bauwerksaerodynamik Untersuchungen durchzuführen:

- Ermittlung der lokalen Windlasten zur Fassadendimensionierung
- Ermittlung des Windkomforts und der Windsicherheit im bodennahen Außenbereich und auf dem Dachbereich des Sockelgebäudes
- Numerische Simulation der globalen Gebäudedurchströmung für den RDA-Betrieb

Im vorliegenden Bericht wird der Aspekt:

- **Ermittlung des Windkomforts und der Windsicherheit im bodennahen Außenbereich und auf dem Dachbereich des Sockelgebäudes**

dokumentiert.

## **2 EXPERIMENTELLE VORGEHENSWEISE, WINDKANALVERSUCHE**

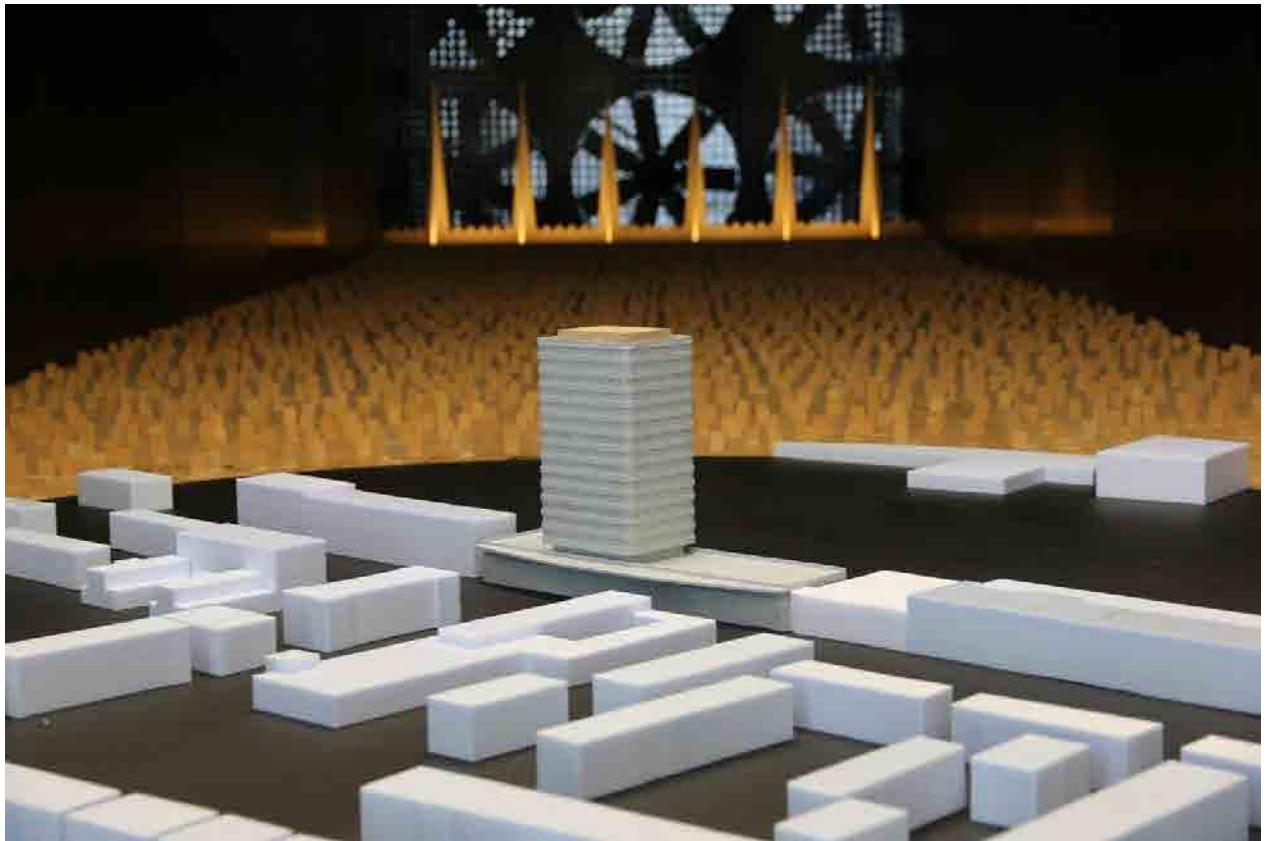
Für eine quantitative Prognose des Windkomforts bzw. Winddiskomforts in den Außenbereichen von Bauwerken müssen an definierten Messstellen die örtlichen Windgeschwindigkeiten und Windgeschwindigkeitsschwankungen mittels spezieller Messsonden bestimmt, statistisch aufbereitet und bewertet werden. Die Position der Messstellen wird auf der Basis von Erfahrungswerten aus früheren Projekten definiert.

Die Windkanaluntersuchungen erfolgen an einem maßstäblich verkleinerten Modell (geometrischer Maßstab 1/250) des Gebäudes mit der relevanten Umgebungsbebauung in einem Grenzschichtwindkanal. In Abb. 2.1 sind Bilder des Modells dargestellt.

Die Messungen wurden unter Einhaltung der maßgeblichen Ähnlichkeitsgesetze (siehe Plate, 1982) durchgeführt. Die unmittelbare Umgebungsbebauung wurde, soweit sie einen entscheidenden Einfluss auf die Strömungsverhältnisse hat, nachgebildet. Strömungsmechanisch relevante Details wurden berücksichtigt.

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





**Abb. 2.1:** Bilder des geplanten *Tower 101* in Ingolstadt mit Umgebungsbebauung im Grenzschicht-windkanal; Geometrischer Modellmaßstab: 1/250



## **2.1 Windklima am Standort**

Für die Bewertung des Windkomforts wurden langjährige Windklimadaten der Wetterstation Flugplatz Ingolstadt-Manching verwendet. Es wurden aus den Klimadaten spezifische Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeiten erstellt (Abb. 2.2 – Abb. 2.4). Hierbei handelt es sich um durchschnittliche Häufigkeitsverteilungen. Es ist daher zu beachten, dass es in einzelnen Jahren zu Abweichungen vom Durchschnitt kommen kann.

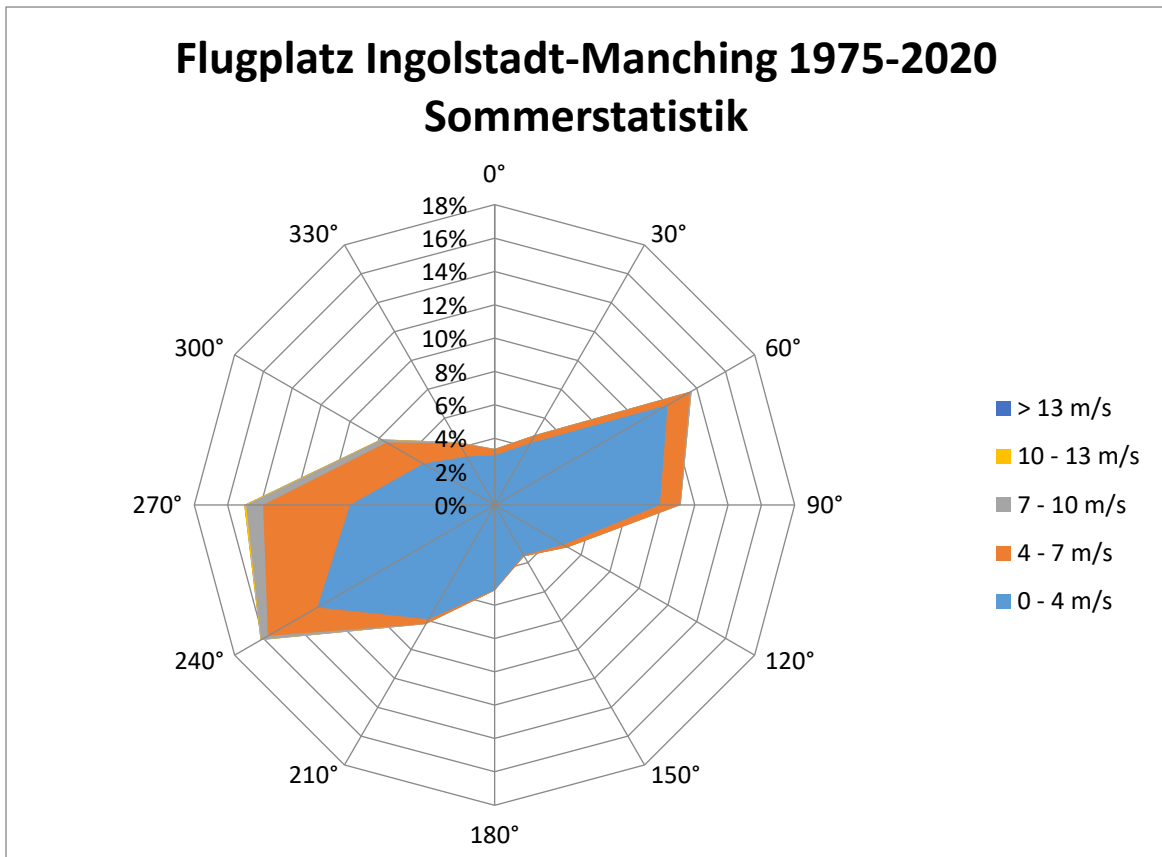
Für die Bewertung des Windkomforts im bodennahen Außenbereich und auf dem Dachbereich des Sockelgebäudes wurde eine Aufteilung der Windinformation in eine Sommer- und eine Winterstatistik (Abb. 2.2 und 2.3) durchgeführt. Für die Bewertung der Windsicherheit wurde die ganzjährige Windstatistik verwendet (Abb. 2.4).

Das Sommer- und Winterhalbjahr sind wie folgt definiert:

**Sommerhalbjahr:** Monate April – September

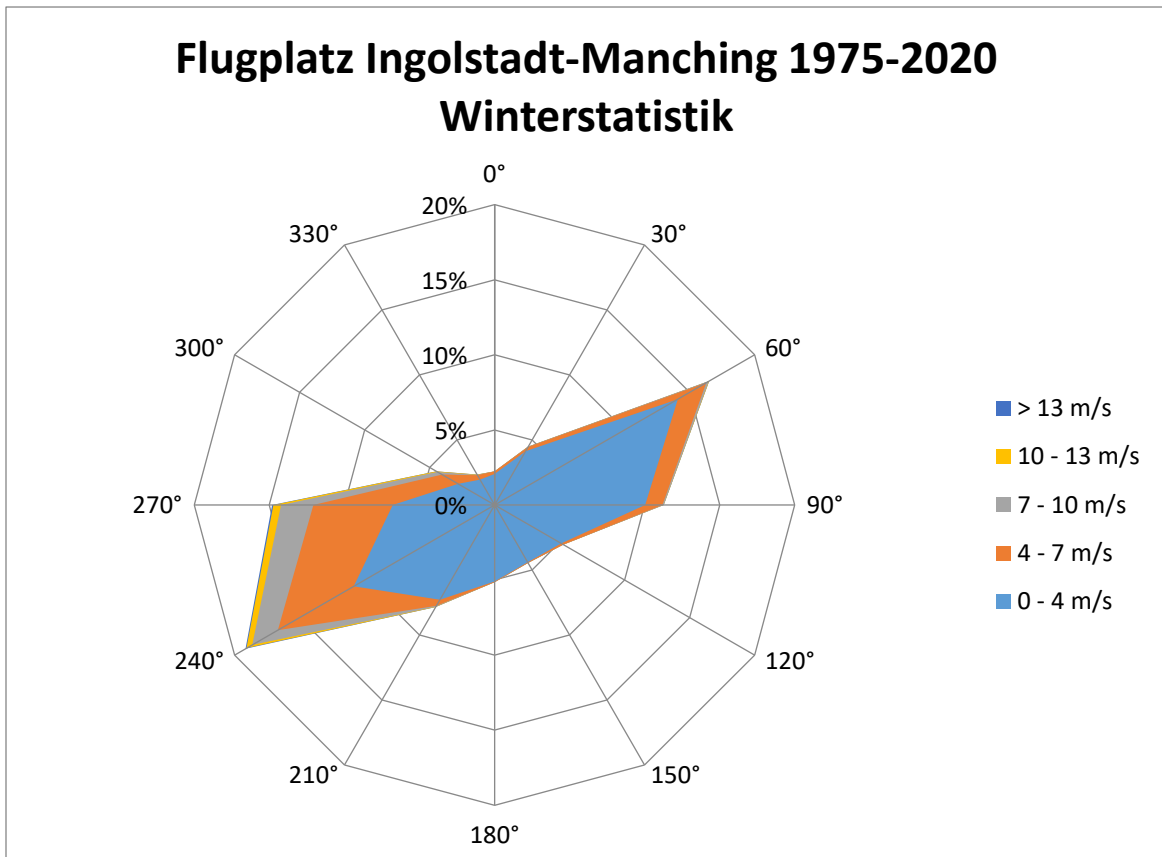
**Winterhalbjahr:** Monate Oktober - März

Für die Anwendung der Statistik wird der Einfluss der unterschiedlichen Bodenrauigkeiten von Messstation und Projektstandort nach DIN EN 1991-1-4/NA (2010) berücksichtigt.



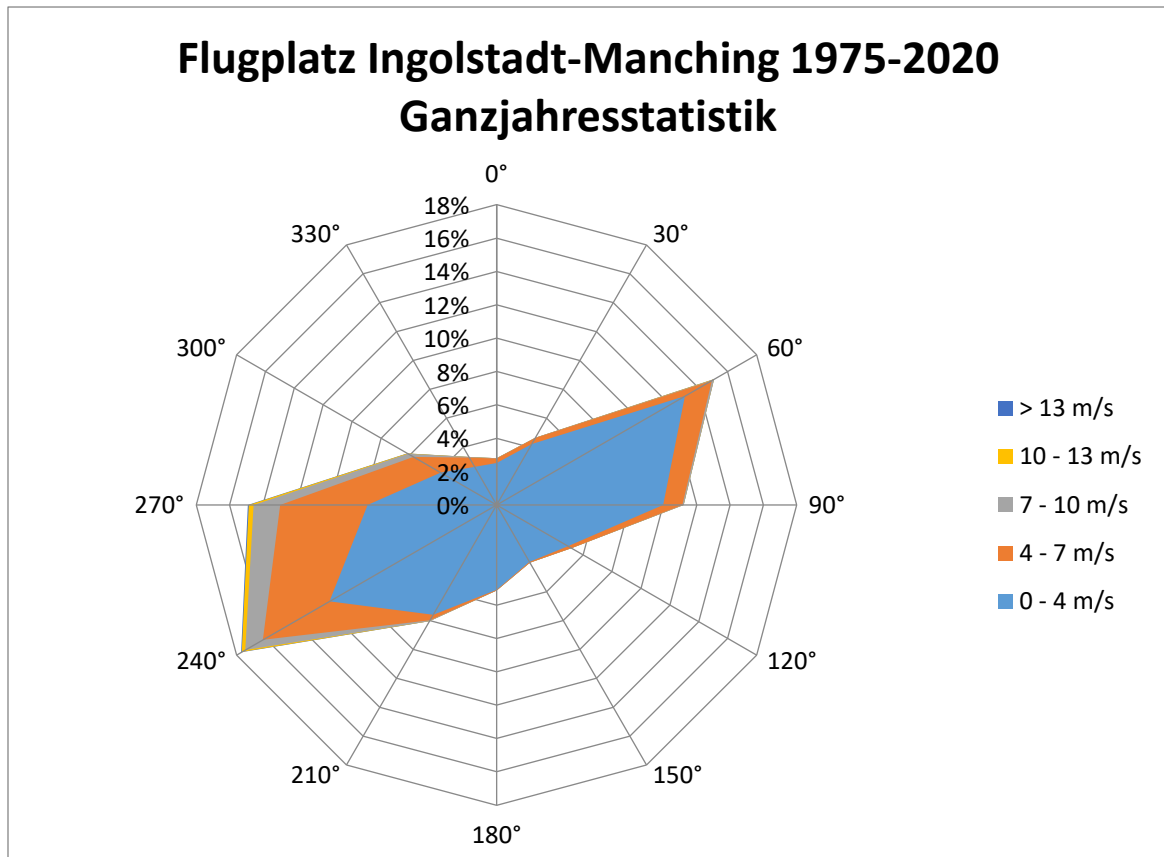
Wind- richtung	Überschreitungshäufigkeit bestimmter Windgeschwindigkeiten - Ganzjahresstatistik											
	0 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s	13 m/s
0°	3.35%	2.79%	1.91%	0.89%	0.38%	0.13%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
30°	4.83%	4.00%	2.63%	1.23%	0.54%	0.17%	0.05%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
60°	13.64%	11.92%	7.42%	3.39%	1.66%	0.69%	0.29%	0.10%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%
90°	11.17%	9.40%	5.56%	2.68%	1.25%	0.44%	0.17%	0.05%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%
120°	5.07%	3.84%	2.07%	0.90%	0.33%	0.07%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
150°	3.54%	2.05%	0.68%	0.18%	0.06%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
180°	5.13%	3.17%	0.74%	0.17%	0.05%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
210°	8.24%	6.34%	2.64%	0.85%	0.34%	0.11%	0.05%	0.03%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%
240°	16.20%	15.00%	11.26%	6.70%	3.92%	2.00%	1.09%	0.51%	0.25%	0.09%	0.04%	0.00%
270°	15.00%	14.37%	12.59%	9.26%	6.34%	3.73%	2.23%	1.14%	0.60%	0.24%	0.12%	0.01%
300°	7.87%	7.43%	6.30%	4.48%	2.93%	1.67%	0.88%	0.38%	0.17%	0.06%	0.02%	0.00%
330°	4.34%	3.96%	3.01%	1.79%	1.00%	0.42%	0.17%	0.06%	0.03%	0.01%	0.01%	0.00%
<b>Gesamt:</b>	<b>98.38%</b>	<b>84.27%</b>	<b>56.80%</b>	<b>32.52%</b>	<b>18.81%</b>	<b>9.45%</b>	<b>4.99%</b>	<b>2.29%</b>	<b>1.11%</b>	<b>0.42%</b>	<b>0.19%</b>	<b>0.01%</b>

**Abb. 2.2:** Summenhäufigkeit in [%] für verschiedene mittlere Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen an der meteorologischen Station Flugplatz Ingolstadt-Manching; Sommerhalbjahr April - September



Windrichtung	Überschreitungshäufigkeit bestimmter Windgeschwindigkeiten - Ganzjahresstatistik											
	0 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s	13 m/s
0°	2.24%	1.48%	0.81%	0.37%	0.16%	0.06%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
30°	4.47%	3.33%	1.88%	0.84%	0.33%	0.11%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
60°	16.50%	14.57%	10.06%	5.02%	2.41%	1.02%	0.49%	0.21%	0.09%	0.03%	0.01%	0.00%
90°	11.28%	9.45%	5.69%	2.60%	1.23%	0.51%	0.24%	0.10%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%
120°	5.29%	3.84%	1.54%	0.48%	0.16%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
150°	4.46%	2.82%	0.70%	0.15%	0.05%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
180°	5.13%	3.41%	0.83%	0.18%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
210°	7.86%	6.31%	3.01%	1.13%	0.57%	0.29%	0.18%	0.11%	0.07%	0.04%	0.02%	0.01%
240°	19.15%	18.05%	14.90%	11.16%	8.33%	5.72%	3.90%	2.48%	1.60%	0.90%	0.51%	0.09%
270°	14.81%	14.12%	12.55%	10.20%	8.03%	5.80%	4.23%	2.75%	1.77%	1.02%	0.59%	0.09%
300°	4.48%	4.00%	3.17%	2.32%	1.68%	1.12%	0.73%	0.44%	0.25%	0.12%	0.07%	0.01%
330°	2.33%	1.87%	1.24%	0.72%	0.39%	0.17%	0.09%	0.04%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%
<b>Gesamt:</b>	<b>98.00%</b>	<b>83.25%</b>	<b>56.38%</b>	<b>35.18%</b>	<b>23.37%</b>	<b>14.87%</b>	<b>9.94%</b>	<b>6.15%</b>	<b>3.83%</b>	<b>2.12%</b>	<b>1.21%</b>	<b>0.19%</b>

**Abb. 2.3:** Summenhäufigkeit in [%] für verschiedene mittlere Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen an der meteorologischen Station Flugplatz Ingolstadt-Manching; Winterhalbjahr Oktober-März



Windrichtung	Überschreitungshäufigkeit bestimmter Windgeschwindigkeiten - Ganzjahresstatistik											
	0 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s	13 m/s
0°	2.80%	2.13%	1.36%	0.63%	0.27%	0.09%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
30°	4.65%	3.67%	2.26%	1.04%	0.43%	0.14%	0.05%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
60°	15.07%	13.24%	8.74%	4.21%	2.03%	0.85%	0.39%	0.15%	0.06%	0.02%	0.00%	0.00%
90°	11.22%	9.42%	5.62%	2.64%	1.24%	0.48%	0.20%	0.07%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%
120°	5.18%	3.84%	1.80%	0.69%	0.24%	0.05%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
150°	4.00%	2.43%	0.69%	0.16%	0.06%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
180°	5.13%	3.29%	0.79%	0.17%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
210°	8.05%	6.32%	2.83%	0.99%	0.45%	0.20%	0.11%	0.07%	0.04%	0.02%	0.01%	0.00%
240°	17.68%	16.53%	13.08%	8.93%	6.13%	3.86%	2.49%	1.50%	0.93%	0.50%	0.28%	0.04%
270°	14.91%	14.24%	12.57%	9.73%	7.19%	4.77%	3.23%	1.94%	1.18%	0.63%	0.36%	0.05%
300°	6.17%	5.72%	4.74%	3.40%	2.30%	1.39%	0.81%	0.41%	0.21%	0.09%	0.04%	0.01%
330°	3.33%	2.92%	2.12%	1.25%	0.69%	0.30%	0.13%	0.05%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%
<b>Gesamt:</b>	<b>98.19%</b>	<b>83.76%</b>	<b>56.59%</b>	<b>33.85%</b>	<b>21.09%</b>	<b>12.16%</b>	<b>7.47%</b>	<b>4.22%</b>	<b>2.47%</b>	<b>1.27%</b>	<b>0.70%</b>	<b>0.10%</b>

**Abb. 2.4:** Summenhäufigkeit in [%] für verschiedene mittlere Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen an der meteorologischen Station Flugplatz Ingolstadt-Manching; **Ganzjahresstatistik**

## 2.2 Quantitative Ermittlung des Windkomforts

Die Fußgänger-Behaglichkeit, der sogenannte Windkomfort, wird in der Literatur in der Regel über die Häufigkeit bestimmter Windgeschwindigkeiten am Untersuchungsstandort quantifiziert. Bei der Bewertung müssen daher das regionale Windklima sowie lokale Beschleunigungs- und Abschattungseffekte bedingt durch die umgebende Bebauung berücksichtigt werden.

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

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

mit  $\overline{U}$ : zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeit;  $\sigma$ : Standardabweichung der Windgeschwindigkeitsschwankungen und  $\gamma$ : Wichtungsfaktor.

$X_i$  ist der Quotient der lokalen, durch die Bebauung beeinflussten Windgeschwindigkeit (Index „mB“) und der ungestörten Bezugsgeschwindigkeit ohne Bebauung (Index „oB“) an derselben Stelle auf Fußgängerniveau (etwa 1.5 m über Boden). Über die Standardabweichung  $\sigma$  und den Wichtungsfaktor  $\gamma$  kann die Böigkeit des Windes berücksichtigt werden. In der Literatur schwanken die Werte für den Wichtungsfaktor  $\gamma$  zwischen 1 und 4 (z.B. Gandemer, 1982). Zur Beurteilung des Windkomforts werden in aller Regel Wichtungsfaktoren zwischen 0 und 1.5, zur Beurteilung der Windsicherheit Werte zwischen 3 und 3.5 gewählt. Beide Bezugsgeschwindigkeiten können im Windkanalmodell z.B. mit Hitzdrahtsonden, Laser-Doppler-Anemometern oder Irwin-Sensoren gemessen werden. Dabei werden die zeitlich gemittelten Windgeschwindigkeiten und die Windgeschwindigkeitsschwankungen am Messpunkt (mit Bebauung) und in ungestörter Strömung (ohne Bebauung) auf Fußgängerniveau bestimmt.

Geschwindigkeitsfaktoren  $X_i < 1$  bedeuten, dass durch die Bebauung eine Verringerung der Windgeschwindigkeiten auftritt; bei Geschwindigkeitsfaktoren  $X_i > 1$  wurde eine Erhöhung der örtlichen Windgeschwindigkeiten relativ zur Windsituation ohne Bebauung ermittelt. Die  $X_i$ -Faktoren werden anhand von Messungen im Windkanal bestimmt.

Im Anschluss werden die Geschwindigkeitsfaktoren mit dem Windklima am Standort gekoppelt. Das Windklima wird dabei anhand einer statistischen Auswertung von langjährigen Messreihen (z.B. von Flughäfen) ermittelt. Daraus können dann Aussagen darüber getroffen werden, wie häufig eine bestimmte Geschwindigkeit am Messpunkt überschritten wird.



### **2.3 Komfortkriterien**

Bei vorliegendem Projekt wurden sowohl Messpunkte im bodennahen Bereich an den Gebäudeeingängen und den Freiflächen als auch auf den Dachterrassen des Sockelbaus angeordnet. Im Folgenden werden die für den bodennahen Außenbereich bzw. für die Dachterrassen relevanten Kriterien erläutert.

#### Windkomfort im Umfeld des Gebäudes

Je nach geplanter Nutzung der Außenbereiche werden unterschiedliche Anforderungen an den Windkomfort gestellt. Bei einem Café sollte längeres Sitzen möglich sein und dementsprechend geringere Windgeschwindigkeiten vorherrschen. Auf reinen Verkehrsflächen werden hingegen höhere Windgeschwindigkeiten weniger als störend empfunden. Aus verschiedenen wissenschaftlichen Studien und aus langjähriger Erfahrung in der Bearbeitung von Windkomfort-Fragestellungen wurden daher die in Tab. 2.1 aufgeführten Windkomfort-Kriterien erstellt, anhand derer der Komfort für unterschiedliche Aktivitäten bewertet wird. Diese Kriterien erfüllen u.a. auch die Anforderungen der holländischen Norm (NEN 8100, 2005), die als bisher einzige Windkomfort-Norm im europäischen Raum eingeführt wurde. Um die Schwächen dieser Normkriterien im Hinblick auf die fehlende Berücksichtigung der Windgeschwindigkeits-schwankungen (Böigkeit) auszugleichen, wurden die Kriterien der holländischen Norm noch durch Kriterien basierend auf Fachliteratur ergänzt.

Für einen Bereich, in dem ein Café entstehen soll, wäre demnach die Klasse 1 erstrebenswert. Zu beachten ist, dass die Bewertung des Windkomforts stets ein subjektives Empfinden ist. Die Kriterien wurden jedoch so gewählt, dass die Bewertung für einen Großteil der Passanten zutrifft.

Da manche Aktivitäten eher in den Sommermonaten stattfinden (etwa Aufenthalt in Cafés oder auf Spielplätzen), kann die Klassifizierung des Windkomforts getrennt für das Sommer- und Winterhalbjahr ermittelt werden.

Neben dem Windkomfort wird stets auch das Sicherheitskriterium (Klasse 6) überprüft. Das Sicherheitskriterium besagt, dass eine mittlere Geschwindigkeit von  $> 15$  m/s in weniger als 26 h pro Jahr (entspricht ca. 0,3% der Jahresstunden) auftreten sollte, bzw. eine Böenwindgeschwindigkeit von  $> 25$  m/s in weniger als 9 h pro Jahr (0,1%). Bei so hohen Windgeschwindigkeiten besteht die Gefahr, dass Passanten umgeweht werden. In Bereichen, die in Klasse 6 eingestuft werden, ist diese potenzielle Gefährdung inakzeptabel hoch. Windschutzmaßnahmen sind hier erforderlich. Für die Beurteilung der Gefährdung wird stets die Ganzjahres-statistik herangezogen.

Windkomfortkriterien						Beispiele für mögliche Nutzung
Grenzgeschwindigkeit [m/s]	Überschreitung [% - Jahresstunden]	Klasse	Aktivitäten			
			Durchqueren	Schlendern	Sitzen	
$U_m = 5 \text{ m/s}$	< 2.5	1	Gut	Gut	Gut	Cafés, Sitzplätze
$U_{Böe,eff} = 6 \text{ m/s}$	< 5.0					
$U_m = 5 \text{ m/s}$	2.5 - 5.0	2	Gut	Gut	Moderat	Wartebereiche, Parkanlagen
$U_{Böe,eff} = 6 \text{ m/s}$	5.0 - 10.0					
$U_m = 5 \text{ m/s}$	5.0 - 10.0	3	Gut	Moderat	Schlecht	Einkaufspassagen, Eingänge
$U_{Böe,eff} = 6 \text{ m/s}$	10.0 - 20.0					
$U_m = 5 \text{ m/s}$	10.0 - 20.0	4	Moderat	Schlecht	Schlecht	Gehwege
$U_{Böe,eff} = 6 \text{ m/s}$	> 20.0					
$U_m = 5 \text{ m/s}$	> 20.0	5	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Windschutz empfohlen
$U_m = 15 \text{ m/s}$	> 0.05					
$U_{Böe,eff} = 13 \text{ m/s}$	> 1.0					
Sicherheitskriterien						
$U_m = 15 \text{ m/s}$	> 0.3	6	pot. Gefährdung			Windschutz erforderlich
$U_{Spitzenböe} = 25 \text{ m/s}$	> 0.1					

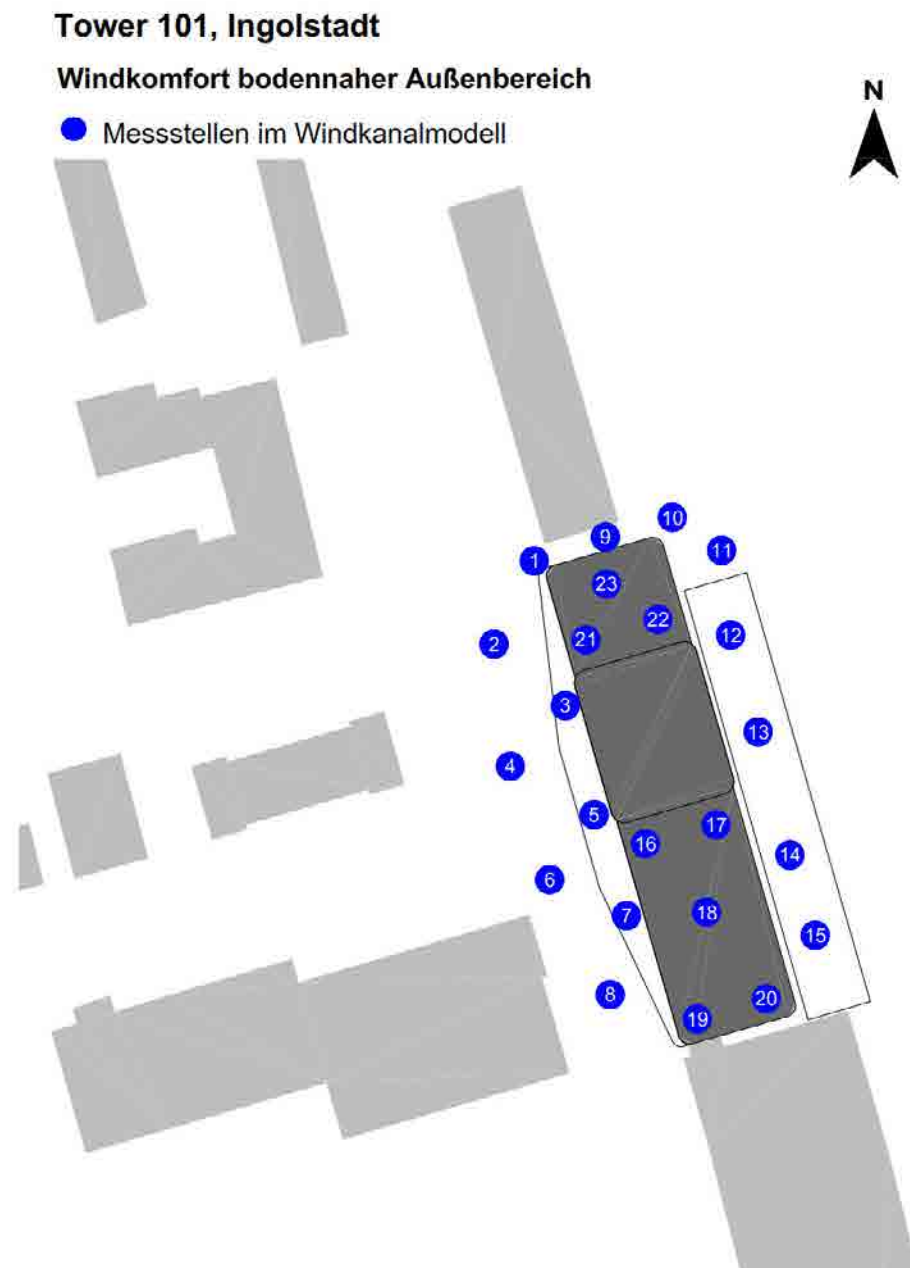
**Tab. 2.1:** Kriterien zur Beurteilung der Windverhältnisse in Außenbereichen (nach Gandemer und Guyot 1976, Hunt 1976, Williams et al. 1990, Ratcliff und Peterka 1990), NEN 8100, 2005, ASCE, 2004

Zu beachten ist, dass für den empfundenen Komfort von Personen neben den Windverhältnissen und der Aktivität noch weitere Parameter eine Rolle spielen, etwa die Temperatur, die Luftfeuchte, die Sonnenstrahlung oder die Bekleidung. Diese werden in der Untersuchung nicht berücksichtigt.

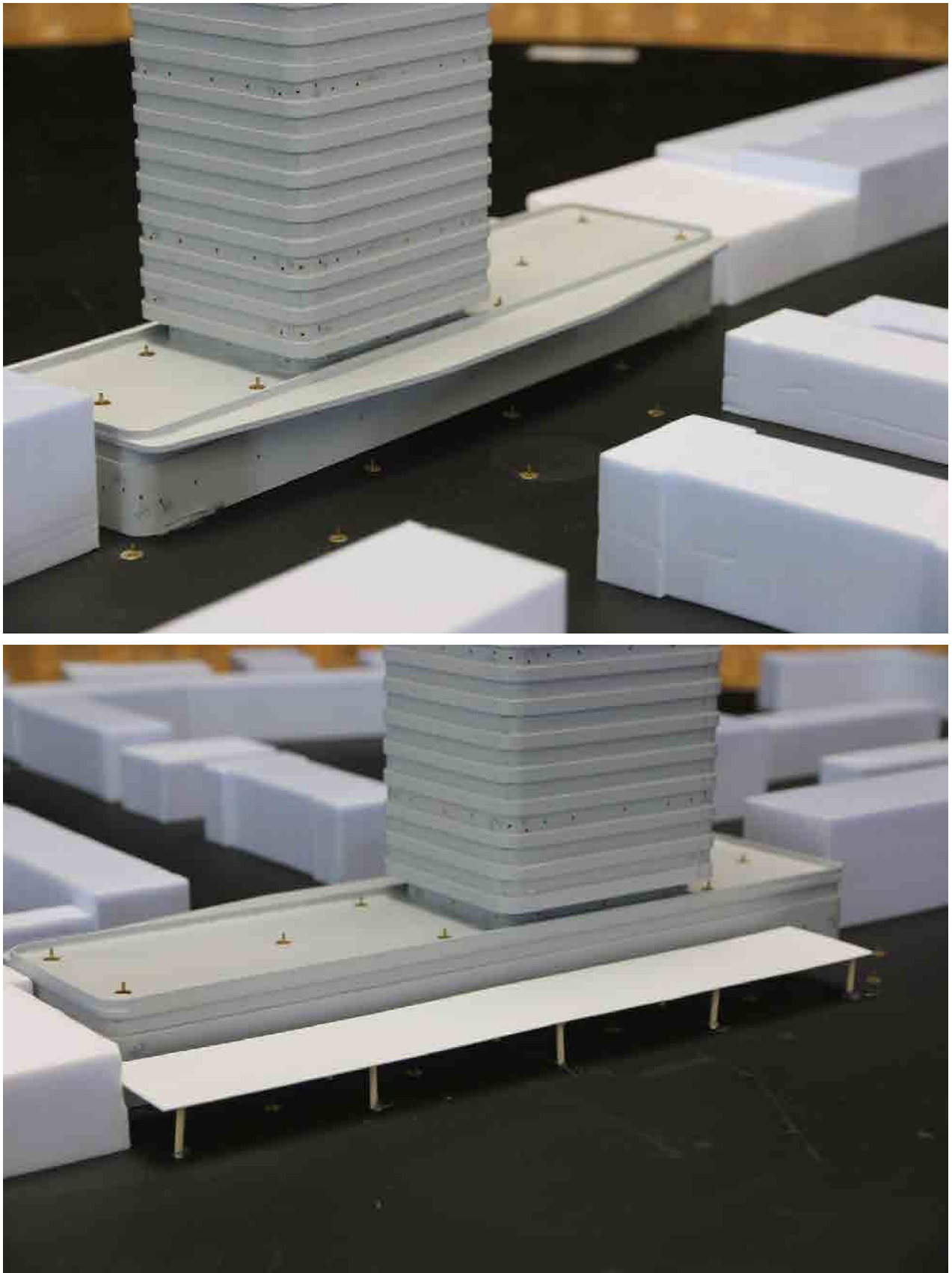
**Hinweis:** Für die Beurteilung des Windkomforts auf Balkonen, Loggien und Dachterrassen von Gebäuden wird davon ausgegangen, dass bei Starkwindereignissen (Stürme/Orkane) diese Bereiche nicht genutzt werden. Generell können hier deutlich erhöhte Windgeschwindigkeiten im Vergleich zum bodennahen Windfeld auftreten. Bei Stürmen oder Orkanen ist in diesen Bereichen daher prinzipiell auch mit potentiell gefährlichen Windbedingungen zu rechnen, selbst wenn eine gute WindkomfortEinstufung vorliegen sollte. Es sollten daher Empfehlungen ausgesprochen werden, dass bei Starkwindereignissen der Aufenthalt auf den Dachterrassen vermieden werden sollte und Gegenstände ausreichend gesichert werden müssen, um ein Herabstürzen unter Windeinwirkung zu verhindern.

## 2.4 Beschreibung der Versuchsvarianten

Die Bestimmung der Geschwindigkeitsfaktoren  $X_i$  wurden an insgesamt 23 verteilten Punkten im bodennahen Umgebungsbereich des Gebäudes und auf dem Dachbereich des Sockelgebäudes durchgeführt. Die Positionen der Messstellen wurden anhand von Erfahrungswerten an besonders gefährdeten Zonen sowie nutzungssensiblen Bereichen gewählt und sind in Abb. 2.5 definiert. Die Messungen wurden für insgesamt 24 Anströmrichtungen in  $15^\circ$ -Schritten in ca. 1.5 m Höhe (entspricht ca. 5 mm im Modell) über der jeweiligen Bodenoberfläche durchgeführt und erfolgten mit druckbasierten Geschwindigkeitssensoren (Irwin-Sensoren; siehe Abb. 2.6).



**Abb. 2.5:** Bezeichnungen und Positionen der Messstellen der Windkomfortmessung im bodennahen Außenbereich und auf den Dachterrassen des Sockelgebäudes *Tower 101*



**Abb. 2.6:** Nahaufnahmen des Windkanalmodells mit Irwin - Sonden zur Geschwindigkeitsmessung im bodennahen Außenbereich und auf dem Dachbereich des Sockelgebäudes

### 3 ERGEBNISSE DER WINDKOMFORTUNTERSUCHUNGEN

#### 3.1 Windkomfort am Standort als Referenz

Die Winddaten der verfügbaren Wetterstation zeigen, dass die häufigsten und größten Windgeschwindigkeiten aus west- südwestlichen Windrichtungen zu erwarten sind. Um die nachfolgenden Ergebnisse einschätzen zu können, wurde zunächst der Windkomfort am Standort in Fußgängerhöhe  $h = 1.5$  m, wie er sich ohne unmittelbaren Einfluss von lokalen Gebäuden (ohne Projektgebäude und lokaler Umgebungsbebauung, jedoch unter Berücksichtigung der zur Umgebung passenden generischen Geländerauigkeit) einstellen würde, bewertet (Referenzsituation). Hierzu wurde die Windstatistik der Wetterstation auf die generische Geländerauigkeit am Projektstandort angepasst (nach DIN EN 1991-1-4/NA (2010)) und ein konstanter Erhöhungsfaktor  $X_i = 1$  aus allen Windrichtungen angenommen.

*Referenz Sommerhalbjahr:* Im Sommerhalbjahr wird alleine aufgrund des Windklimas am Standort ohne Einfluss von Gebäuden nach den Kriterien aus Tab. 2.1 die **Windkomfortklasse 1** erreicht. Der Standort wäre also während des Sommerhalbjahres ohne Einschränkungen nutzbar.

*Referenz Winterhalbjahr:* Im Winterhalbjahr wird alleine aufgrund des Windklimas am Standort ohne Einfluss von Gebäuden nach den Kriterien aus Tab. 2.1 die **Windkomfortklasse 3** erreicht. Der Standort ist im Winterhalbjahr tendenziell schlechter zu bewerten als im Sommerhalbjahr. Während des Winterhalbjahres wäre der Standort noch gut für kurzfristige Aufenthalte (beispielsweise zum Durchqueren bestimmter Bereiche), aber für mittel- längerfristige Aufenthalte im Sitzen nur moderat bis wenig geeignet.

#### 3.2 Windkomfort auf den Dachterrassen des Sockelgebäudes

Aus den Windkanalmessungen an den einzelnen Messpunkten lassen sich windrichtungsabhängig die Erhöhungsfaktoren  $X_i$  bestimmen. Diese geben an, um wie viel sich die Geschwindigkeit als Folge der Bebauung im Vergleich zu einer ungestörten Fläche ändert. Die Matrix der Erhöhungsfaktoren  $X_i$  für sämtliche Windrichtungen und Messpunkte ist in Tab. 3.1 dargestellt. Erhöhungsfaktoren von 1.2 bedeuten beispielsweise, dass die Geschwindigkeiten um 20 % höher sind als in unbebautem Gelände, Faktoren von 0.8 bedeuten eine Geschwindigkeitsreduktion um 20 %.

Generell können auf Balkonen / Terrassen und Dachbereichen durch die allgemeine Windzunahme mit der Höhe und durch Umströmungseffekte deutlich höhere Windgeschwindigkeiten als in Bodennähe im ungestörten Fall auftreten. Im vorliegenden Fall wurden auf den Dachterrassen des



Sockelgebäudes nur vereinzelt und nur für bestimmte Windrichtungen Windbeschleunigungen festgestellt. Lokal können dort bis zu 77% höhere Windgeschwindigkeiten im Vergleich zum unbebauten Fall auftreten. Größtenteils liegen die gemessenen Beschleunigungsfaktoren allerdings unter 1, was bedeutet, dass die meisten Bereiche durch die umliegende Bebauung eher abgeschattet in Bezug auf die Windbedingungen sind.

$X_i$ ( $\gamma = 1.5$ )												
Messpunkt	Windrichtung $\beta$ [°] (0° = Nord)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
16	0.60	0.71	0.91	1.07	1.19	1.20	1.04	0.99	1.34	1.43	1.30	0.90
17	0.85	1.51	1.61	1.37	0.92	0.98	1.14	1.20	1.13	1.04	0.79	0.54
18	0.93	1.49	1.62	1.15	0.82	0.74	0.77	1.02	1.24	1.57	1.69	1.11
19	0.89	1.17	1.14	1.07	0.82	0.56	0.51	0.59	0.71	0.85	0.99	0.91
20	0.88	1.16	0.93	0.86	0.77	0.60	0.64	0.87	1.00	1.05	1.15	0.94
21	1.27	1.37	1.23	1.03	0.75	0.56	0.65	1.08	1.08	0.80	0.64	0.95
22	0.93	0.96	1.51	1.77	1.58	0.80	0.57	0.79	0.93	1.11	1.23	1.16
23	1.13	1.15	1.23	1.53	1.53	0.91	1.02	1.67	1.64	1.37	1.11	1.09

**Tab. 3.1:** Erhöhungsfaktoren  $X_i$  an den in Abb. 2.5 angegebenen Messpunkten auf den Dachterrassen des Sockelgebäudes im Vergleich zur unbebauten Referenzsituation. Maxima sind orange hervorgehoben

Aus der Kopplung der windrichtungsabhängigen Erhöhungsfaktoren mit der Windstatistik werden die Häufigkeiten bestimmt, mit denen bestimmte Grenzgeschwindigkeiten überschritten werden. Hierbei wird die Auswertung für das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr getrennt bewertet, da der Nutzungsschwerpunkt der Außenanlagen bzw. der Dachterrassen üblicherweise im Sommer liegt. Jeder Messpunkt wird anhand dieser Häufigkeiten nach den Komfortkriterien in die entsprechenden Windkomfortklassen eingeordnet. Ein Minuszeichen hinter der Windkomfortklasse (z.B. 2-) wird vergeben, wenn die Werte an der Schwelle zur nächsthöheren Komfortklasse liegen.

Prognose Windkomfort im Sommerhalbjahr:

Während des Sommerhalbjahres werden die in Abb. 3.1 angegebenen Komfortklassen prognostiziert.

Auf den Dachterrassen des Sockelgebäudes werden während der Hauptnutzungszeit im Sommer in allen untersuchten Bereichen gute Windkomfortverhältnisse erwartet. Im Nahbereich des Hochhausturms muss aber generell, bedingt durch Abwinde und Beschleunigungseffekte aufgrund der Umströmung des Turms, mit schlechteren Bedingungen im Vergleich zur Referenzsituation gerechnet werden. Diese Bereiche werden während des Sommerhalbjahres mit der Komfortklasse 2 klassifiziert und eignen sich für kurz- bis mittelfristige Aufenthalte, aber nur bedingt für längerfristiges Verweilen im Sitzen. Typische Nutzungsmöglichkeiten sind Wartebereiche oder auch Parkanlagen.

Im südlichen Dachbereich des Sockelgebäudes haben die oben erwähnten Effekte aufgrund der Entfernung zum Turm keinen Einfluss mehr. Diese Bereiche werden während des Sommerhalbjahres mit der Komfortklasse 1- bewertet und sind somit prinzipiell für längerfristige Aufenthalte auch im Sitzen und für die Nutzung beispielsweise für Cafés geeignet.

Sollte der Komfortanspruch für die Nahbereiche des Hochhausturm eine Nutzung bspw. als Außengastronomie sein, kann die Windkomfortsituation durch lokale windschützende Maßnahmen verbessert werden. Windschützende Maßnahmen können grundsätzlich folgendermaßen aussehen:

Windschutz gegen horizontalen Wind

- Erhöhung der Attika. Dies würde insbesondere den Windkomfort für einen sitzenden Aufenthalt verbessern.
- Lokale horizontale Versperrungen (z.B. Windschutzwände, Scheiben, dichte Bepflanzungen).

Prognose Windkomfort im Winterhalbjahr:

Die Hauptnutzungszeit der Dachterrassen des Sockelgebäudes bezieht sich wie eingangs erwähnt auf das Sommerhalbjahr zwischen April und September, da während des Winterhalbjahres allein aus Temperaturgründen der Nutzungskomfort in der Regel nicht gegeben ist. Die Ergebnisse der zu erwartenden Komfortklassen während des Winterhalbjahres sind in Abb. 3.2 angegebenen.

Insgesamt sind die Windkomfortbedingungen im Winterhalbjahr tendenziell ungünstiger als in den Sommermonaten, da in dieser Zeit generell mit höheren Windgeschwindigkeiten zu rechnen ist und

zusätzlich das Komfortkriterium für östliche Windrichtungen während der Wintermonate herabgestuft ist (östliche Winde sind im Winter meist sehr kalt und werden als sehr unangenehm empfunden; dies wurde vereinfacht berücksichtigt). In den meisten Bereichen verschlechtern sich die Windkomfortbedingungen um etwa eine Klasse im Vergleich zum Sommerhalbjahr.

Im Bereich des Hochhausturms muss auf den Dachterrassen im Winter mit der Komfortklasse 3 und 4 gerechnet werden. Diese Bereiche eignen sich in den Wintermonaten dann nur noch für kurzfristige Aufenthalte (Komfortklasse 3), wobei teilweise selbst das Durchqueren als unangenehm empfunden werden kann (Komfortklasse 4). Auf dem südlichen Bereich der Dachterrassen wird mit Komfortklasse 2 ein guter Windkomfort prognostiziert.

Prognose Windsicherheit:

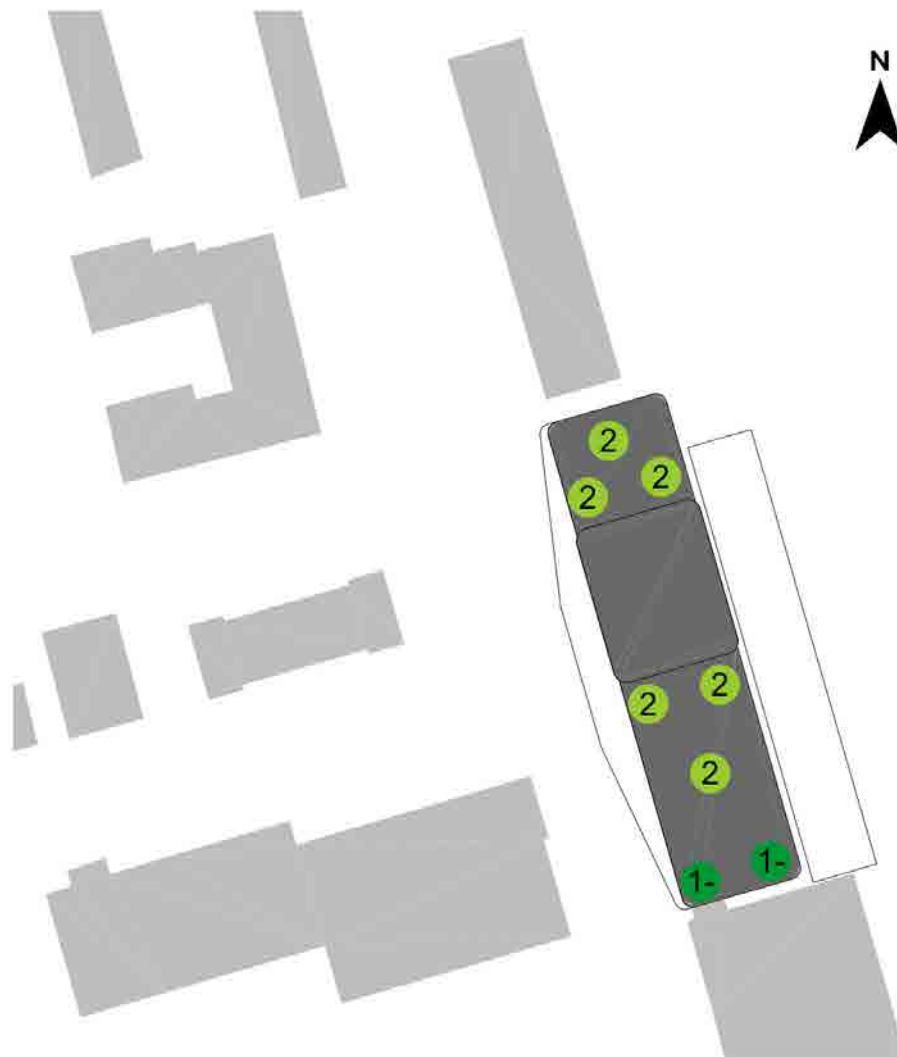
Die Auftretungswahrscheinlichkeit von Windböen  $> 25$  m/s ist an allen untersuchten Messpunkten geringer als 0.1% sowie die Auftretenswahrscheinlichkeit einer mittleren Windgeschwindigkeit von  $> 15$  m/s geringer als 0.3%, so dass das in Kap. 2.3 definierte Sicherheitskriterium für öffentlich zugängliche Bereiche überall eingehalten wird.

Eine potentielle Gefährdung von Nutzern der Dachterrassen im Sinne der Komfortkriterien konnte daher in den untersuchten Bereichen des Gebäudes nicht festgestellt werden.

**Tower 101, Ingolstadt**

**Windkomfort Dachbereiche des Sockelbaus**

Windkomfort Klassifizierung - Sommerhalbjahr



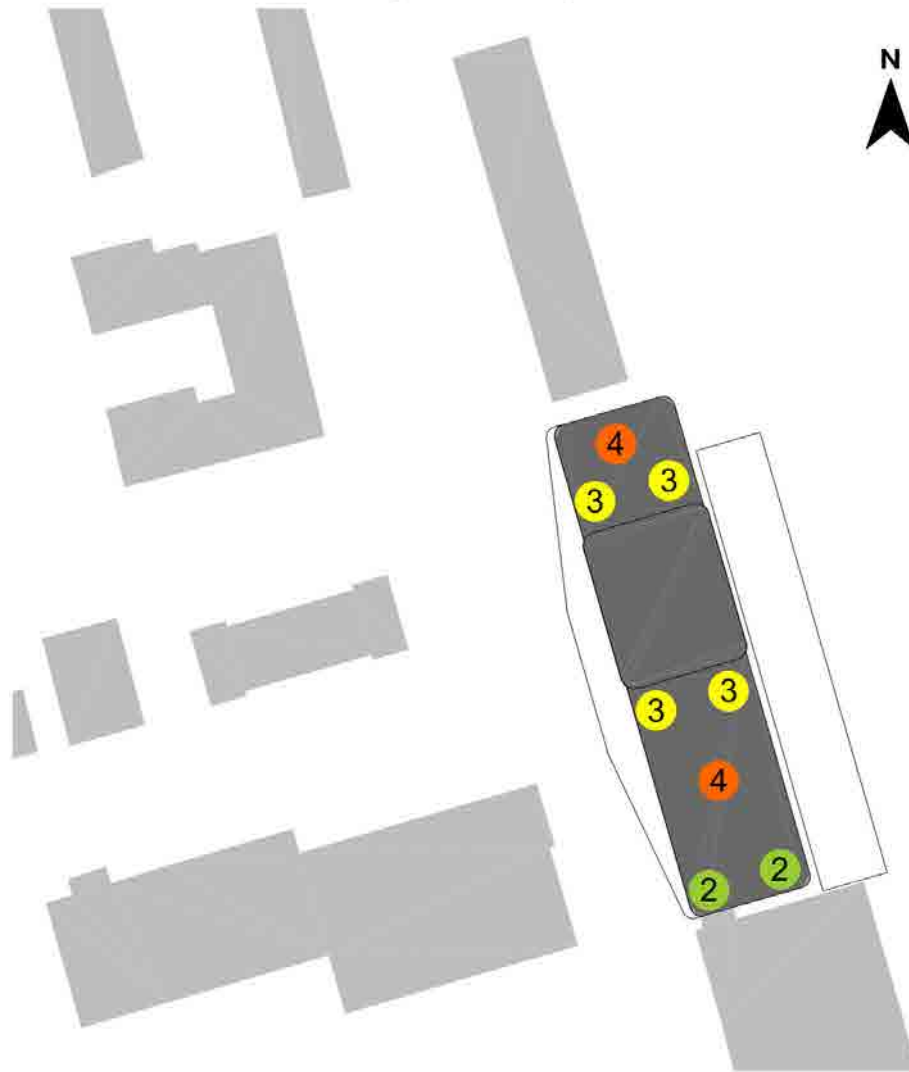
Klasse	Aktivitäten			Beispiele für mögliche Nutzung
	Durchqueren	Schlendern	Sitzen	
1	Gut	Gut	Gut	Cafés, Sitzplätze
2	Gut	Gut	Moderat	Wartebereiche, Parkanlagen
3	Gut	Moderat	Schlecht	Einkaufspassagen, Eingänge
4	Moderat	Schlecht	Schlecht	Gehwege
5	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Windschutz empfohlen
6	pot. Gefährdung			Windschutz erforderlich

**Abb. 3.1:** Prognose der Komfortklassen bzw. Nutzungsmöglichkeiten an den einzelnen Messpunkten auf der Dachfläche des Sockelgebäudes auf Basis der Klimadaten am Standort sowie der Windkanaluntersuchungen für das **Sommerhalbjahr (April – September)**

**Tower 101, Ingolstadt**

**Windkomfort Dachbereiche des Sockelbaus**

Windkomfort Klassifizierung - Winterhalbjahr



Klasse	Aktivitäten			Beispiele für mögliche Nutzung
	Durchqueren	Schlendern	Sitzen	
1	Gut	Gut	Gut	Cafés, Sitzplätze
2	Gut	Gut	Moderat	Wartebereiche, Parkanlagen
3	Gut	Moderat	Schlecht	Einkaufspassagen, Eingänge
4	Moderat	Schlecht	Schlecht	Gehwege
5	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Windschutz empfohlen
6	pot. Gefährdung			Windschutz erforderlich

**Abb. 3.2:** Prognose der Komfortklassen bzw. Nutzungsmöglichkeiten an den einzelnen Messpunkten auf der Dachfläche des Sockelgebäudes auf Basis der Klimadaten am Standort sowie der Windkanaluntersuchungen für das **Winterhalbjahr (Oktober – März)**



### 3.3 Windkomfort im bodennahen Außenbereich

In Tab. 3.2 sind die pro Windrichtung gemessenen Erhöhungsfaktoren  $X_i$  der Windgeschwindigkeit im bodennahen Außenbereich um das Gebäude im Vergleich zur ungestörten Windgeschwindigkeit in 1.5 m über Boden dargestellt. Der maximale Erhöhungsfaktor für die bodennahen Bereiche um das Gebäude liegt bei 1.62 [-]. Größtenteils liegen die gemessenen Beschleunigungsfaktoren allerdings unter 1, was bedeutet, dass die meisten Bereiche durch die umliegende Bebauung eher abgeschattet in Bezug auf die Windbedingungen. Dies ist maßgeblich auf die dichte Umgebungsbebauung zurückzuführen, die für viele Windrichtungen eine Reduktion der lokalen Windgeschwindigkeit bewirkt.

$X_i$ ( $\gamma = 1.5$ )												
Messpunkt	Windrichtung $\beta$ [°] (0° = Nord)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
1	0.76	0.87	0.83	0.89	0.75	0.75	0.84	0.92	0.98	0.95	1.02	0.87
2	1.00	1.03	0.90	0.74	0.92	1.29	1.16	1.15	1.13	1.01	0.90	0.95
3	1.15	1.18	0.93	0.65	0.91	1.03	1.00	0.99	0.96	0.90	1.01	1.11
4	1.25	1.37	1.04	0.83	1.36	1.38	1.08	0.96	0.94	0.94	0.96	1.09
5	0.99	0.89	0.68	0.76	1.12	1.16	1.02	0.80	0.82	1.00	1.05	1.05
6	1.19	1.02	0.80	1.09	1.23	1.05	0.88	0.81	0.90	1.11	1.15	1.15
7	0.89	0.83	0.70	0.73	0.97	0.92	0.85	0.82	0.94	1.12	1.10	1.04
8	1.00	0.81	0.73	0.84	0.96	0.95	0.89	0.78	0.90	1.12	1.20	1.18
9	0.98	1.45	1.62	1.55	1.04	0.61	0.74	1.04	1.19	1.18	1.13	0.91
10	0.81	0.79	0.92	1.11	1.21	0.92	0.85	1.23	1.24	1.01	0.87	0.83
11	0.90	0.74	0.73	0.89	1.01	0.95	0.80	0.84	0.73	0.83	1.05	1.02
12	1.08	0.88	0.85	1.00	1.06	0.95	0.92	0.78	0.57	0.68	0.96	1.13
13	0.99	1.00	0.93	0.91	0.92	0.92	0.98	0.87	0.54	0.53	0.79	0.96
14	0.80	0.94	0.86	0.72	0.65	0.77	0.80	0.90	0.61	0.49	0.56	0.64
15	0.72	0.88	0.82	0.68	0.63	0.53	0.51	0.73	0.66	0.46	0.52	0.55

**Tab. 3.2:** Erhöhungsfaktoren  $X_i$  an den in Abb. 2.5 angegebenen Messpunkten im bodennahen Außenbereich im Vergleich zur unbebauten Referenzsituation. Maxima sind orange hervorgehoben

Prognose Windkomfort im Sommerhalbjahr:

Während des Sommerhalbjahres sind die in Abb. 3.3 angegebenen Komfortklassen zu erwarten.

In nahezu allen Nahbereichen um das geplante Bauvorhaben ist im Sommer mit sehr guten Windkomfortverhältnissen zu rechnen, die sich auch für längerfristige Aufenthalte im Freien eignen. Eine Ausnahme stellt die Gasse im nördlichen Bereich zwischen dem geplanten Bauvorhaben und der angrenzenden Bebauung dar. Hier wird die Komfortklasse 2 vergeben. In allen anderen Bereichen wird die Komfortklasse 1 erreicht. Diese Flächen, sind prinzipiell für längerfristige Aufenthalte auch im Sitzen und für die Nutzung beispielsweise für Cafés geeignet. Im Vergleich zur Referenzsituation am Standort muss durch das geplante Bauvorhaben mit keiner Verschlechterung des Windkomforts gerechnet werden.

Prognose Windkomfort im Winterhalbjahr:

Während des Winterhalbjahres sind die in Abb. 3.4 angegebenen Komfortklassen zu erwarten.

Insgesamt sind die Windkomfortbedingungen im Winterhalbjahr wie erwähnt tendenziell ungünstiger als in den Sommermonaten. In den meisten Bereichen verschlechtern sich die Windkomfortbedingungen um etwa eine Klasse im Vergleich zum Sommerhalbjahr.

Dennoch weisen im Winterhalbjahr die Flächen im bodennahen größtenteils bessere Windkomfortbedingungen auf, als dies am Standort ohne Bebauungseinfluss der Fall wäre (Komfortklasse 3). Die ungünstigsten Windkomfortbedingungen werden auch hier in der Gasse im nördlichen Bereich zwischen dem geplanten Bauvorhaben und der angrenzenden Bebauung (Komfortklasse 3). Im westlichen Bereich (zur Straße hin) treten im Vergleich zum östlichen Bereich (zum Bahngleis hin) schlechtere Windkomfortbedingungen auf (Komfortklasse 2). Dieser Bereich ist während des Winterhalbjahres aber immer noch für kurz – mittelfristige Aufenthalte geeignet. Im östlichen Bereich wird die Komfortstufe 1-, bereichsweise sogar 1 erreicht, was einer sehr guten Windkomfortsituation für das windintensivere Winterhalbjahr entspricht.

Prognose Windsicherheit:

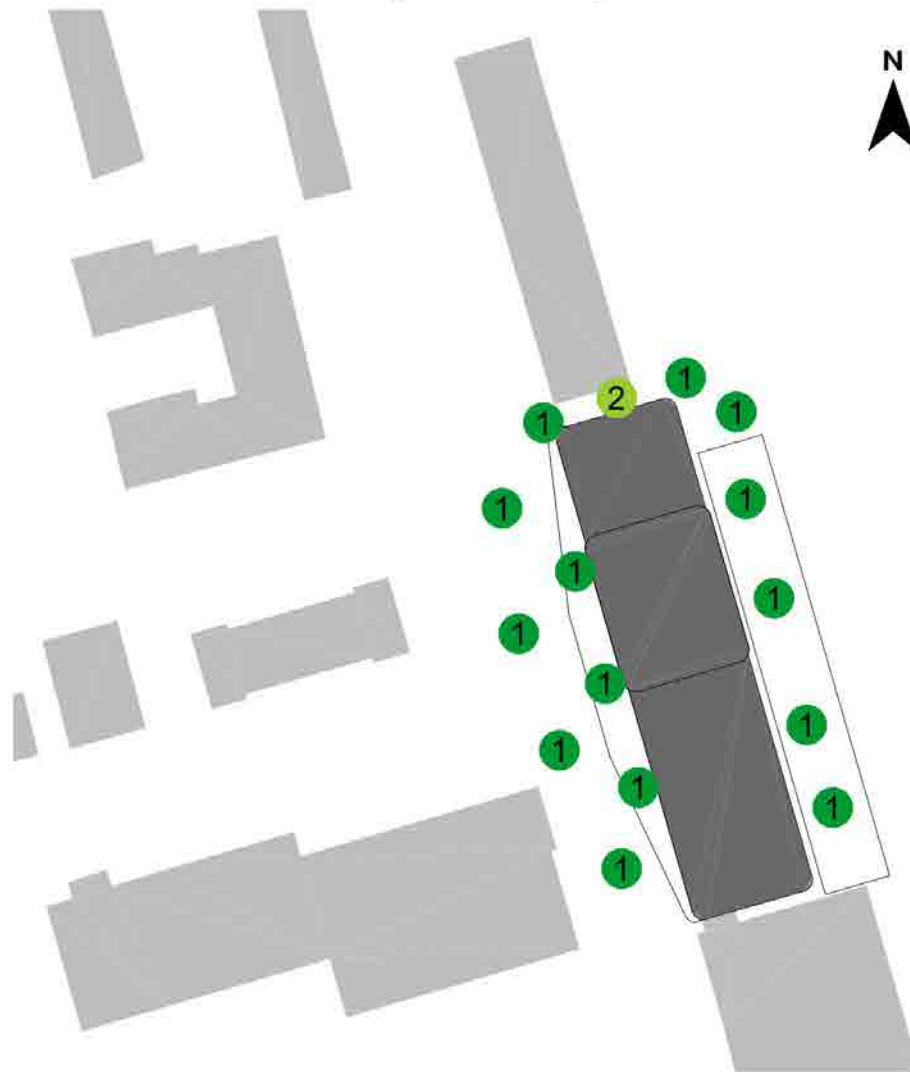
Die Auftretungswahrscheinlichkeit von Windböen  $> 25$  m/s ist an allen untersuchten Messpunkten geringer als 0.1% sowie die Auftretenswahrscheinlichkeit einer mittleren Windgeschwindigkeit von  $> 15$  m/s geringer als 0.3%, so dass das in Kap. 2.3 definierte Sicherheitskriterium für öffentlich zugängliche Bereiche überall eingehalten wird.

Eine potentielle Gefährdung von Fußgängern oder Radfahrern im Sinne der Komfortkriterien konnte daher im untersuchten Nahbereich des Gebäudes nicht festgestellt werden.

**Tower 101, Ingolstadt**

**Windkomfort bodennaher Außenbereich**

Windkomfort Klassifizierung - Sommerhalbjahr



Klasse	Aktivitäten			Beispiele für mögliche Nutzung
	Durchqueren	Schlendern	Sitzen	
1	Gut	Gut	Gut	Cafés, Sitzplätze
2	Gut	Gut	Moderat	Wartebereiche, Parkanlagen
3	Gut	Moderat	Schlecht	Einkaufspassagen, Eingänge
4	Moderat	Schlecht	Schlecht	Gehwege
5	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Windschutz empfohlen
6	pot. Gefährdung			Windschutz erforderlich

**Abb. 3.3:** Prognose der Komfortklassen bzw. Nutzungsmöglichkeiten an den einzelnen Messpunkten im bodennahen Außenbereich auf Basis der Klimadaten am Standort sowie der Windkanaluntersuchungen für das **Sommerhalbjahr (April – September)**

**Tower 101, Ingolstadt**

**Windkomfort bodennaher Außenbereich**

Windkomfort Klassifizierung - Winterhalbjahr



Klasse	Aktivitäten			Beispiele für mögliche Nutzung
	Durchqueren	Schlendern	Sitzen	
1	Gut	Gut	Gut	Cafés, Sitzplätze
2	Gut	Gut	Moderat	Wartebereiche, Parkanlagen
3	Gut	Moderat	Schlecht	Einkaufspassagen, Eingänge
4	Moderat	Schlecht	Schlecht	Gehwege
5	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Windschutz empfohlen
6	pot. Gefährdung			Windschutz erforderlich

**Abb. 3.4:** Prognose der Komfortklassen bzw. Nutzungsmöglichkeiten an den einzelnen Messpunkten im bodennahen Außenbereich auf Basis der Klimadaten am Standort sowie der Windkanaluntersuchungen für das **Winterhalbjahr (Oktober – März)**



#### **4 HINWEISE**

Bei der Anwendung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Einordnung in die verschiedenen Komfortstufen aufgrund der Windklimadaten der Wetterstation Flugplatz Ingolstadt-Manching vorgenommen wurde, d.h. die oben getroffenen Aussagen bezüglich der Häufigkeit sind repräsentativ für ein Durchschnittsjahr. In einzelnen Jahren kann es zu Abweichungen vom Durchschnitt kommen.

Die Bewertung des Windkomforts basiert auf einer statistischen Auswertung des jeweiligen Betrachtungszeitraumes. Als Ergebnis wird der betrachtete Bereich einer Windkomfortklasse zugeordnet. Einzelereignisse können hiervon jedoch abweichen.

Neben der Windgeschwindigkeit hängt der Aufenthalt im bodennahen Außenbereich und auf den Dachterrassen von vielen weiteren Parametern ab, unter anderem von der Außentemperatur. So ist beispielsweise eine längerfristige Nutzung bei niedrigen Lufttemperaturen selbst bei Windstille nicht komfortabel.

Für die Beurteilung des Windkomforts auf Balkonen, Loggien oder Dachterrassen von Gebäuden wird davon ausgegangen, dass bei Starkwindereignissen (Stürme/Orkane) diese Bereiche nicht genutzt werden. Generell können hier deutlich erhöhte Windgeschwindigkeiten im Vergleich zum bodennahen Windfeld auftreten. Bei Stürmen oder Orkanen ist in diesen Bereichen daher prinzipiell auch mit potentiell gefährlichen Windbedingungen zu rechnen, selbst wenn eine gute WindkomfortEinstufung vorliegen sollte. Es sollten daher Empfehlungen ausgesprochen werden, dass bei Starkwindereignissen der Aufenthalt auf den Dachterrassen vermieden werden sollte und dass bei längerer Abwesenheit Gegenstände ausreichend gesichert werden müssen, um ein Herabstürzen unter Windeinwirkung zu verhindern.

Bei einer abweichenden Umgebungssituation kann sich eine abweichende Windkomfortsituation einstellen.

## **5 VERWENDETE UNTERLAGEN**

**ASCE, 2004:** "Outdoor Human Comfort And Its Assessment – State of the art". American Society of Civil Engineers, USA.

**Fäth, 2021:** „Planunterlagen, Informationen, Kommunikation zum Bauvorhaben Tower 101, Ingolstadt, Deutschland“, Fäth Immobilien Aschaffenburg, Aschaffenburg, Deutschland.

**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.

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

**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.

**K+K, 2021:** „Planunterlagen, Informationen, Kommunikation zum Bauvorhaben Tower 101, Ingolstadt, Deutschland“, Kammerl + Kollegen, Pfaffing, Deutschland.

**NEN 8100:2006:** "Nederlandse Norm: Windhinder en windgevaar in de gebouwde omgeving“, Nederlands Normalisatie-instituut.

**ÖNORM B 1991-1-4, 2019:** „Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten; Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-4 und nationale Ergänzungen“.

**Plate, E.J., 1982:** "Wind tunnel modeling of wind effects in engineering". In E.J. Plate (ed.), Engineering Meteorology, Chapter 13, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York, pp. 573-639;

**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.

**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.

## **Anhang: Abhebesicherheit der Dachabdichtung/ -dämmung**

Sollte die Dachabdichtung/ -dämmung rein durch Auflast gegenüber Windsog gesichert werden, ist hierzu ein Mindestmaß der Auflastschichtdicke als minimal erforderliche Ballastierung je nach Ausführungsart und Belastungszone innerhalb des Dachgrundrisses erforderlich.

In Anlehnung an einschlägige Fachliteratur, bspw. Flachdachrichtlinie (FDRL, 2016), ist **ohne zusätzliche** (mechanische) Befestigung folgender Abhebenachweis zu erfüllen:

$$1.5 \cdot W_{\text{Sog}} \leq 0.9 \cdot M_{\text{Auflast}} ,$$

wobei das Eigenwicht der Auflast nur zu 90% angerechnet wird (ständige Lasten).

Wird die benötigte Auflast (aufsummierte Lasten bis zur Dachabdichtung) für den jeweiligen Bereich eingehalten oder überschritten, so ist der Abhebenachweis erfüllt. Andernfalls ist eine entsprechende Erhöhung der Auflast bzw. eine konstruktive Befestigung der Dachabdichtung (z.B. Verklebung/Verdübelung) vorzusehen, um den Abhebenachweis zu erbringen.

### **Referenzen:**

**FDRL, 2016:** "Fachregel für Abdichtungen - Flachdachrichtlinie"

## **Anhang: Lagesicherheit von Plattenbelägen**

Die Lagesicherheit der Plattenbeläge gegenüber Windeinwirkung ist nachzuweisen. An einer einzelnen Platte greifen bei Windeinwirkung die Windsogkraft auf der Oberseite entsprechend der äußeren Druckverteilung, die Windsogkraft auf der Unterseite entsprechend der unterseitigen Druckverteilung und das Gewicht der Platte an. Der unterseitige Windsog bei lose verlegten Platten führt dazu, dass die resultierenden abhebenden Windkräfte geringer als die oberseitigen Windkräfte ausfallen. Dieser unterseitige Sog wird im Wesentlichen von den Druckverhältnissen in den Fugen entlang der Plattenränder bestimmt, die wiederum der oberseitigen Druck- bzw. Sogverteilung folgen.

### **Lagesicherheit von Beton-/Natursteinplatten (oder Ähnlichem) unmittelbar auf flachem Untergrund oder auf einem Kiesbett**

Um die im Windkanal ermittelten Ergebnisse auf die Großausführung übertragen zu können, müssen die Ähnlichkeitsbedingungen für die Versuche beachtet werden. Die wesentlichen Ähnlichkeitsbedingungen sind hierbei: Geometrische Ähnlichkeit sowie Ähnlichkeit der An-, Um- und Innenströmung.

Im vorliegenden Gutachten wird der Nachweis mittels zweier verschiedener Ansätze durchgeführt:

- (1) Die Lagesicherheit loser verlegter windundurchlässiger Platten auf Flachdächern wurde von Gerhardt (1989, 1990) untersucht. Auf dieser Basis ist auch für den vorliegenden Fall eine Abschätzung der kritischen Windgeschwindigkeit, ab welcher mit einem Abheben einer Platte zu rechnen ist, möglich. Ein wesentlicher Parameter hierbei ist die Plattengröße: Je kleiner eine Platte ist, desto geringer fällt in der Regel der Unterschied zwischen ober- und unterseitigem Druck bzw. Sog aus. Wesentlich hierfür ist die Luftdurchlässigkeit der Fugen zwischen den einzelnen Platten. Es wird davon ausgegangen, dass diese im Regelfall gegeben ist und es wird daher belastungsseitig ein Sicherheitsbeiwert von  $\gamma = 1.5$  angesetzt.
- (2) Für den Fall, dass eine Verschmutzung der Fugen zwischen den Platten nicht ausgeschlossen werden kann, wird zusätzlich die Annahme getroffen, dass aus aerodynamischer Sicht ein Zusammenhalt zwischen mehreren Platten entsteht, der zu einer deutlichen Reduktion des Druckausgleichs führt. Grundlage hierfür ist die

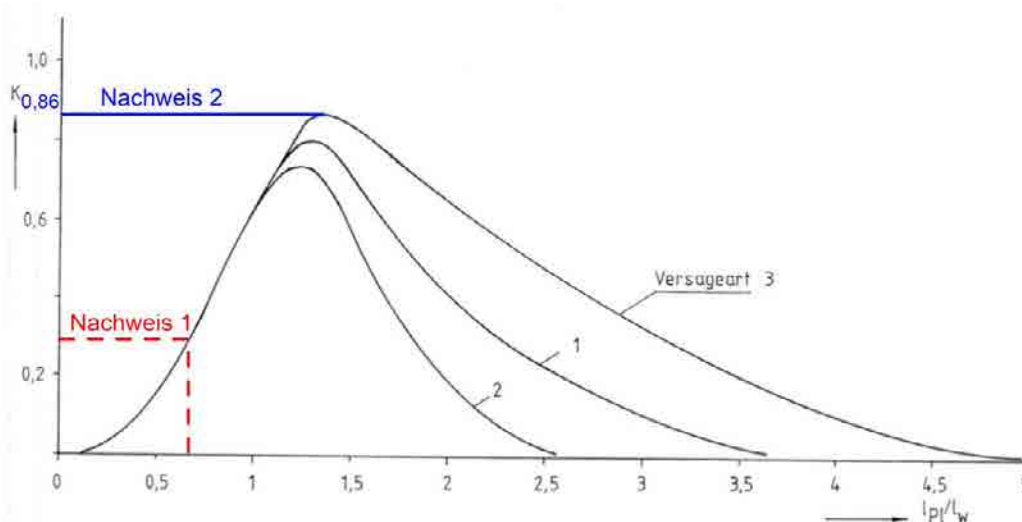
Annahme, dass eine Verstopfung der Fugen dazu führt, dass effektiv eine größere Fläche als undurchlässige Schicht wirkt und schneller ein horizontaler Druckausgleich durch die unterliegende Splittschicht stattfindet als ein vertikaler Druckausgleich durch die Fugen zwischen den Einzelplatten. Dieses Szenario wird als außergewöhnlicher Lastfall betrachtet und ohne zusätzlichen Sicherheitsbeiwert behandelt.

Nachweis 1. Das benötigte Flächengewicht des Plattenbelags um ein Abheben der Platten unter Windsogwirkung zu verhindern lässt sich in Anlehnung an Gerhardt (1989, 1990) zu

$$G/A = W_{sog} \cdot K \cdot \gamma$$

berechnen. In der o.g. Formel ist  $G/A$  das Flächengewicht der einzelnen Platten,  $W_{sog}$  die charakteristische Windsoglast im betrachteten Bereich,  $\gamma$  der oben erwähnte Sicherheitsbeiwert und  $K$  ein effektiver Abminderungsfaktor, der vom Verhältnis der Plattenlänge  $l_{pl}$  zur typischen Länge der kantennahen Sogzonen  $l_w$  abhängt. Bezogen auf Flachdächer und den maßgeblichen Fall der Schräganströmung wird  $l_w$  als Maß für die laterale Erstreckung des konischen Wirbels definiert. Für die verschiedenen Dachflächen können sich hierfür in den Eckbereichen unterschiedliche Längenmaße  $l_w$  und relative Plattengrößen  $l_{pl}/l_w$  ergeben. Aus diesem Verhältnis kann der Abminderungsfaktor  $K$  bestimmt werden (Abb. 1, Nachweis 1). Liegt der Abminderungsfaktor  $K$  unterhalb von 0.2 wird für die weitere Berechnung der in der Literatur empfohlene untere Schwellenwert von  $K = 0.20$  verwendet.

Nachweis 2. Ergänzend zu obiger Betrachtung wird wie noch der Nachweis für den Fall eines verminderten Druckausgleichs zwischen Ober- und Unterseite der Platten infolge verstopfter Fugen geführt. Hierbei wird der ungünstigste Fall nach Gerhardt et al. (1989, 1990) zu Grunde gelegt. In diesem Fall ist ein Abminderungsfaktor nach Gerhard von  $K = 0.86$  anzusetzen (Abb. 1, Nachweis 2), da dieser bereits greift, wenn über ca. 3 Platten ein verminderter Druckausgleich bedingt durch Verschmutzung der Fugen zu verzeichnen ist.



**Abb. 1:** Abhängigkeit des Faktors  $K$  vom Verhältnis der Plattenlänge  $l_p$  zum typischen Ausmaß der Sogzone  $l_w$  für verschiedene Versagensfälle (flächennormales Abheben, Drehen um Anström- bzw. Abströmkante nach Gerhardt et al. (1989, 1990))

### Lagesicherheit von aufgeständerten Beton-/Natursteinplatten (oder Ähnlichem)

Nachweis nach Irwin et. al. Der Nachweis nach Irwin et al. (2014) berücksichtigt den Einfluss des Verhältnisses von Fugenbreite zu Aufständerungshöhe (bis zur Unterkante der Platten). Wesentlich für einen Druckausgleich ist die Luftdurchlässigkeit der Fugen zwischen den einzelnen Platten. Es wird davon ausgegangen, dass diese im Regelfall gegeben ist und es wird daher belastungsseitig ein Sicherheitsbeiwert von  $\gamma = 1.5$  angesetzt.

### Referenzen:

**Gerhardt, H.J., Bofah, K.K., Kramer, C., 1989:** "Lagesicherheit lose verlegter Wärmedämmplatten auf Flachdächern gegen Abheben durch Windwirkung", Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben "Lose verlegte Wärmedämmplatten", Fraunhofer IRB Verlag.

**Gerhardt, H.J., Kramer, C., Bofah, K.K., 1990:** "Wind loading in loosely laid pavers and insulation boards for flat roofs", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 36, pp 309-318.

**Irwin et al (2014):** „Wind Uplift of Concrete Roof Pavers“, Structures Congress 2014, Boston, Massachusetts.

## **Anhang: Verwehsicherheit von Kiesschüttungen**

In der Fachliteratur veröffentlichte Untersuchungen erlauben die Berechnung einer kritischen Windgeschwindigkeit, bei der erstmals mit Kiesbewegungen (Verwehungen) auf Flachdächern zu rechnen ist. Es wird unterschieden zwischen sporadisch einsetzender Kiesbewegung einzelner Körner (UC1) und großflächigerer Bewegung/Verwehung (UC2). Eingangsparameter für die Berechnungen der Verwehgeschwindigkeiten sind unter anderem der mittlere Korndurchmesser und die lokalen Druckverhältnisse im betrachteten Abschnitt.

### **Referenzen:**

**Gerhardt, H.J., Kramer, C., 1982:** "Untersuchungen zur Lagesicherung von Flachdächern mittels Kies- und Plattenabdeckungen", Fraunhofer IRB Verlag.



## **Anhang: Abhebesicherheit der Substratschicht**

Es wird davon ausgegangen, dass der Bewuchs und das darunterliegende Substrat eine weitgehende zugfeste Einheit bilden und somit nur ein großflächiges Abheben der Begrünung möglich ist, während sich keine kleinflächigen Teile ( $A \approx 1 \text{ m}^2$ ) aufgrund lokaler Sogspitzen lösen können. Dieser Zusammenhalt ist hinsichtlich der Lagesicherheit von Vorteil und könnte durch Auflegen von Bewehrungsgittern, Durchwurzelungsgewebe, etc. zusätzlich erhöht werden.

Eine weitere wesentliche Randbedingung ist die Luftdurchlässigkeit der Vegetationsschicht. Hierzu werden im Folgenden zwei Szenarien betrachtet:

- A) Die Substrat- und Vegetationsschicht ist luftdurchlässig und ein oberseitig aufgebrachtener Windsog breitet sich durch die Schicht hindurch nach unten hin aus. Dies führt zu einer zügigen Reduktion des effektiven Soges. Von den Herstellern entsprechender Begrünungssysteme ist bekannt, dass auf diese Weise effektive Sogreduktionen um mindestens 40% erreicht werden können. Dieser Fall wird als Regelzustand betrachtet, der mit einem entsprechenden Sicherheitsbeiwert ( $\gamma=1.5$ ) zu beaufschlagen ist.
  
- B) Die Vegetationsschicht ist infolge von Feuchtigkeit oder Verschmutzung nicht mehr luftdurchlässig. In diesem Fall werden in konservativer Weise ausschließlich die oberseitig wirkenden Windsogkräfte angesetzt und es wird keine effektive Reduktion durch Druckausgleich in Rechnung gestellt. Gegenüber Fall (A) wird kein erhöhtes Gewicht der Begrünungsschicht angesetzt, da ein Zusetzen der Schicht infolge Verschmutzung oder Nässe auch ohne vollständige Wassersättigung eintreffen kann. Dieser Fall wird allerdings als außergewöhnliche Belastung eingestuft und es wird kein Sicherheitsbeiwert angesetzt (d.h.  $\gamma=1.0$ ).

Ausgangspunkt für die Ermittlung der Lagesicherheit bzw. des notwendigen Gewichtes der Begrünungsschicht sind sowohl in Fall (A) wie auch in Fall (B) die im entsprechenden Kapitel angegebenen oberseitigen Windsoglasten. Bei Zugrundelegung des eingangs erwähnten Zusammenhaltes zwischen Substratschicht und Vegetation sind hierbei die auf eine Einzugsfläche von  $A = 10 \text{ m}^2$  bezogenen Windlasten ausschlaggebend. Diese werden auch für zusammenhängende schmale längliche Flächen der Dachbegrünung als repräsentativ erachtet.

Wie oben erwähnt, ist für Fall A davon auszugehen, dass die außen- bzw. oberseitig angreifenden Windsoglasten mindestens mit dem Faktor 0.6 reduziert werden können, um den Druckausgleich

aufgrund der Durchlässigkeit der Schicht zu berücksichtigen, der eine effektive Reduktion der resultierenden Windlasten bewirkt. Der in diesem Fall in Rechnung zu stellende Windsog ist mit einem Sicherheitsbeiwert von  $\gamma=1.5$  zu beaufschlagen. Das Gewicht der Vegetationsmatte muss also effektiv 90% der angreifenden oberseitigen Windlasten kompensieren, damit die Lagesicherheit für diesen Fall sichergestellt ist. Somit ist diese Situation günstiger als Fall (B), bei dem das Gewicht 100% der gesamten oberseitigen Windlasten abdecken muss. Somit ist Fall (B) maßgebend für die Lagesicherheit.