

**Professur für Bauphysik – ETH Zürich**

## **Wind bei Hochhäusern**

**Kriterien für die Notwendigkeit von Windanalysen und Windsimulationen bei Hochhäusern, sowie präventive Massnahmen für einen guten Windkomfort, Stadtklima im Rahmen den neuen Hochhausrichtlinien für Zürich**

**im Auftrag von**

des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich

**Verfasst von**

Aytaç Kubilay

Andreas Rubin

Birgit Sützl

Dominik Strebel

Jan Carmeliet

**Mai 2022**

## **Inhaltsverzeichnis**

Inhaltsverzeichnis .....	2
1. Einleitung.....	4
1.1. Projektbeschrieb .....	4
1.2. Hochhäuser und Stadtklima .....	4
1.3. Ziel und Bearbeitung .....	4
2. Windanalyse und Windkomfort .....	5
2.1. Kriterien für Windkomfort und -sicherheit .....	5
2.2. Theoretischer Hintergrund.....	7
2.2.1. Windströmung um ein freistehendes Gebäude.....	7
2.2.2. Windprofil in der bodennahen Grenzschicht .....	7
3. Hochhausanalyse Zürich.....	8
3.1. Analysierte Geometrien - Plan und Ansicht .....	8
3.2. Simulationsbedingungen.....	10
3.3. Resultate der Windsimulationen.....	12
3.3.1. Verstärkungsfaktoren um das Hochhaus .....	12
3.3.2. Vergleichung der maximalen Verstärkungsfaktoren.....	17
4. Windkomfortanalyse Zürich .....	18
4.1. Hintergrund .....	18
4.2. Winddaten für Zürich .....	19
4.3. Resultate der Windkomfortanalyse .....	19
5. Schlussfolgerung und Beschränkungen.....	23
6. Vorschlag für Richtlinien.....	25
6.1. Vorgehen betreffend Windkomfort - Faustregeln .....	25
6.2. Vorgehen betreffend Mikroklima.....	27
7. Allgemeine Faustregeln für eine gute Durchlüftung/Mikroklima der Stadt .....	28
7.1. Durchlüftung bei Windsituationen.....	28
7.2. Kaltluft aus der Umgebung bei klaren Nächten .....	29
7.3. Thermisch induzierte Schwachwinde im Stadtkörper bei klaren Nächten .....	30
Appendix A .....	31
Appendix B .....	32
Literaturliste .....	33
Weiterführende Literatur.....	35

**Wind bei Hochhäusern** **im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich**

---

## **1. Einleitung**

### **1.1. Projektbeschreibung**

Die Stadt Zürich überprüft und aktualisiert ihre Hochhausrichtlinien. Dabei soll insbesondere der Windkomfort sowie das Mikroklima ausserhalb der Gebäude überprüft und aktualisiert werden. Die Professur für Bauphysik der ETH Zürich wurde beauftragt, den Prozess der Erarbeitung neuer Richtlinien zu begleiten, wozu diese Studie einen Beitrag liefert.

### **1.2. Hochhäuser und Stadtklima**

Hochhäuser verändern das Windfeld sowie das Mikroklima ihres Umfeldes. Da sie über die übliche Dachhöhe des Stadtkörpers hinaus in die Grenzschicht des Windes reichen, kann dadurch der Wind in die Stadt abgelenkt werden. Die Windgeschwindigkeiten nehmen in der Grenzschicht mit der Höhe zu, dies kann die Umgebung der Hochhäuser sowohl negativ als auch positiv beeinflussen. So können Starkwinde den Windkomfort massiv reduzieren oder gar zu gefährlichen Situationen führen, sie helfen aber auch bei der Durchlüftung und Auskühlung der Stadt. Bei Schwachwinden bekommt die Thermik einen grösseren Einfluss (siehe Abschnitt 7.2-7.3) und die Wärmeabfuhr aus dem urbanen Raum ist bei signifikantem thermischen Auftrieb möglich (hier sind die umliegenden cool-spots wie beispielsweise Parks wichtig).

Gebäude beeinflussen das Mikroklima auf verschiedene Arten: Einerseits durch die Verschattung der Umgebung andererseits durch die verminderte Wärmeabstrahlung an den Himmel sowie der Verminderung der Durchlüftung. Ebenso spielen die Materialien und Farbgebung, sowie eine eventuelle Bepflanzung der Gebäude dabei eine entscheidende Rolle. Durch diese wird die Wärmespeicherung in der Stadt entscheidend beeinflusst.

### **1.3. Ziel und Bearbeitung**

Im Hauptteil des Berichts werden die vorgeschlagenen Hochhausgebiete in Zürich genauer auf ihre Empfindlichkeit betreffend Windkomfort untersucht. Ziel ist es, ein Kriterium für Windkomfort und -sicherheit zu definieren und festzustellen, welche Gebäudehöhen detaillierte Windstudien erfordern. Diese Kriterien können dann in die Richtlinien für Hochhaus-Bauprojekte aufgenommen werden.

Hierzu werden zunächst drei verschiedene Szenarien definiert, um den Windkomfort in der Umgebung eines Hochhauses zu untersuchen. Als Erstes wird das Hochhaus in unbebautem Gebiet betrachtet. Für Hochhäuser in einem urbanen Umfeld werden zwei weitere Szenarien mit umgebenden Gebäuden in unterschiedlicher Konfiguration definiert. Kriterien für Windkomfort und -sicherheit werden mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen für alle drei Szenarien mit verschiedenen Gebäudehöhen ermittelt. Ausschlaggebend sind dabei die Verstärkungsfaktoren, die angeben, wie sehr sich die Windgeschwindigkeiten auf Strassenhöhe durch das Hochhaus relativ zum Basisszenario (selber Ort ohne jegliche Bebauung) verstärken. Typische Windgeschwindigkeiten für Zürich sind dem Windatlas der Schweiz entnommen. Daraus ergeben sich statistische Windgeschwindigkeiten die mit den Komfortkriterien abgeglichen werden.

Ein weiteres Ziel dieses Berichts ist es die Planenden für mögliche Problematiken und Massnahmen zum Umgang damit zu sensibilisieren. Im letzten Kapitel werden daher Faustregeln zum Thema Hochhäuser und Stadtklima vorgestellt. Dabei wird neben Windkomfort (Sicherheit und Komfort) auch die Durchlüftung der Stadt (Hangwinde, Talwinde, Starkwinde, Flurwinde) sowie der Einfluss der Hochhäuser auf die Temperatur der Umgebung thematisiert.

## 2. Windanalyse und Windkomfort

### 2.1. Kriterien für Windkomfort und -sicherheit

Bereits in den 1970er Jahren wurde untersucht, wie Menschen auf den Wind reagieren und von welchen Windverhältnissen sie sich bei welcher Aktivität gestört fühlen. Die Windkriterien wurden dabei durch Versuche im Windkanal und durch Befragung von Personen (unter anderem von Hunt, Poulton, Mumford 1976) definiert. Dabei zeigte sich, dass ab einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s bei einem stetigen Wind erste Beeinträchtigungen auftreten. Bei höheren Windgeschwindigkeiten verbraucht der Körper auch mehr Energie beim Zufussgehen (Lawson und Penwarden, 1975/ Davenport, 1972).

Weiter hat die Böigkeit einen Einfluss auf den Komfort. Je häufiger und abrupter sich die Windgeschwindigkeit ändert, umso störender ist es, weil sich der Körper immer wieder ausbalancieren muss. Dies führt auch zum Kriterium für die Gefährdung respektive Windsicherheit von Personen, bei dem es typischerweise zwei Schwellenwerte gibt, ein Standardwert und einen strengeren Schwellenwert für ältere Personen, da diese das Gleichgewicht schlechter halten können.

*Tabelle 1. Beaufortskala und Windgeschwindigkeit 1.8m über Boden (80% der Windgeschwindigkeit 10m über Boden) und deren Einfluss auf Personen und Umwelt (nach: "Witterung und Klima"; Hupfer et al., 2005; Seite 124 / Janssen et al., 2013 / <https://de.wikipedia.org/wiki/Beaufortskala> (4.4.2022), (Arens und Ballanti, 1977).*

Beaufort	Beschreibung	Windgeschwindigkeit m/s		Auswirkungen des Windes
		mittlere	ober und untere	
0	Windstille	0.1	0 – 0.2	Rauch steigt senkrecht empor
1	leiser Zug	0.8	0.2 – 1.3	Kein spürbarer Wind, Rauch treibt leicht ab,
2	leichte Brise	1.8	1.3 – 2.7	Windfahne bewegt sich, Wind im Gesicht spürbar, Blätter rascheln, Zeitungslesen wird schwierig
3	schwache Brise	3.6	2.7 – 4.4	Blätter und dünne Zweige konstant bewegt, Wimpel streckt sich, Haare werden gestört, Kleider flattern
4	mässige Brise	5.3	4.4 – 6.7	Hebt Staub und loses Papier, bewegt Zweige und dünnere Äste, Haare werden zerzaust, Schlagregen
5	frische Brise	7.6	6.7 – 8.9	Windkraft spürbar, kleine Laubbäume schwanken, Schaumköpfe auf Seen, Limit für angenehmen Wind an Land
6	starker Wind	9.8	8.9 – 11.1	Laufen und stehen wird schwierig, Windgeräusche im Ohr sind unangenehm, starke Äste in Bewegung, Pfeifen an Drahtseilen, Regenschirme sind schwer zu halten
7	steifer Wind	12.4	11.1 – 13.8	Bäume in Bewegung, fühlbare Hemmung bei Gehen gegen den Wind
8	stürmischer Wind	15.1	13.8 – 16.9	Grosse Bäume werden bewegt, Zweige werden abgerissen, beim Gehen erhebliche Behinderung, bei Böen schwierig das Gleichgewicht zu halten

Die Tabelle 1 zeigt die Beaufort-Skala, eine Einteilung der Windstärke, welche auf beobachteten Auswirkungen des Windes basierte. Windstärken können so Auswirkungen in der Umwelt und auf den Menschen zugeordnet und somit eingeordnet werden. Die Skala geht bis zu 12 Beaufort. Die Winde von 9-12 Beaufort sind aber so stark, dass diese über der für den Menschen gefährlichen Grenze liegen.

In den Niederlanden wurde 2006 die Norm NEN (Nederlandse Norm) 8100 für die Windanalyse und den Windkomfort verfasst. Darin wurden die Komfortkriterien nach Nutzung und Gefahren neu evaluiert und klar definiert.

In den Windrichtlinien der City of London (2019) werden adaptierte Kriterien nach Lawson verwendet, d.h. es wurde jeweils eine Windgeschwindigkeit definiert, die nur in 5% der Zeit (stündlich) überschritten werden dürfen.

Die Autoren entschieden sich die Kriterien der Windqualitätsklassen nach der NEN 8100 zu verwenden, weil sich diese auf die Wahrscheinlichkeit nur einer Windgeschwindigkeit von über 5 m/s über ein Jahr definieren, wie in Tabelle 2 gezeigt wird.

*Tabelle 2. Windkriterien Betreffend Nutzung und Windgefahr (Umwerfen von Personen) in NEN-8100 gem. Willemsen und Wisse, 2007.*

<b>Kriterien für Windkomfort NEN-8100</b>				
Wahrscheinlichkeit der Überschreitung P (U>5m/s)	Qualitätsklasse -	Aktivität		
		Traversieren	Schlendern	Sitzen
<2.5	A	Gut	Gut	Gut
2.5-5	B	Gut	Gut	Mässig
5-10	C	Gut	Mässig	Mangelhaft
10-20	D	Mässig	Mangelhaft	Mangelhaft
>20	E	Mangelhaft	Mangelhaft	Mangelhaft

<b>Kriterien für Windgefahr NEN-8100</b>		
Wahrscheinlichkeit der Überschreitung P ( $U_{Schwelle}>15m/s$ ) in % Stunden pro Jahr	Begrenztes Risiko	
		Gefahr

In dieser Studie betrachten wir die mittels Verstärkungsfaktoren abgeleitete Windgeschwindigkeit, sowie deren Häufigkeit und vergleichen diese mit den Windkriterien. Die Böigkeit wird hier nicht berücksichtigt, da es hier nur darum geht zu entscheiden, ob eine lokale Windstudie durchgeführt werden sollte oder nicht. Im Rahmen einer potentiellen lokalen Windstudie würde dann die Böigkeit ebenfalls untersucht werden.

Ebenso beeinflusst die Windgeschwindigkeit den thermischen Komfort. Dieser ist aber noch von weiteren Faktoren wie der Bekleidung, der Aktivität sowie der Besonnung und der Luftfeuchtigkeit abhängig. So kann der Schatten eines Hochhauses im Sommer kühlend wirken. Im Winter betrifft der (negative) Effekt des Schattens einen grösseren Bereich, da durch den niedrigen Stand der Sonne eine grössere Fläche verschattet wird. Weiter beeinflusst der Wind andere Umweltfaktoren wie die Aufwirbelung von Staub und Blättern, die Dispersion von Luftverschmutzung, die Ausrichtung von Regen, etc. Diese Faktoren werden hier nicht weiter betrachtet.

## 2.2. Theoretischer Hintergrund

### 2.2.1. Windströmung um ein freistehendes Gebäude

Gebäude behindern die freie Strömung der Luft. Bei einem hohen Gebäude wird bei direkter Anströmung (rechtwinklig) ein Teil der Luft gegen den Boden abgelenkt (Nummer 1 in Abbildung 1). Dabei manifestiert sich eine stehende Walze vor dem Gebäude (Nummer 2 in Abbildung 1) und die Luft fliesst mit erhöhter Geschwindigkeit um die Ecken des Gebäudes ab. An diesen Ecken entstehen die höchsten Windgeschwindigkeiten (Nummer 3 in Abbildung 1). Die Luftströmung in der Höhe hat typischerweise eine grössere Geschwindigkeit (Abbildung 2a). Je höher ein Gebäude nun ist umso mehr und umso schneller fließende Luft wird abwärts gelenkt, was zu umso höheren Windgeschwindigkeit am Boden, insbesondere der Eckströme, führt.

Die Windströmungsstruktur um ein Gebäude wird hauptsächlich von der Gebäudedimension, Gebäudeform, Windgeschwindigkeit und Windrichtung beeinflusst. Die erhöhte Windgeschwindigkeit auf Höhe der Fussgänger:innen kann, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, insbesondere den Windkomfort und somit die Nutzung negativ beeinflussen, kann aber bei zu hohen Windgeschwindigkeit und insbesondere bei Böen sogar gefährlich werden.

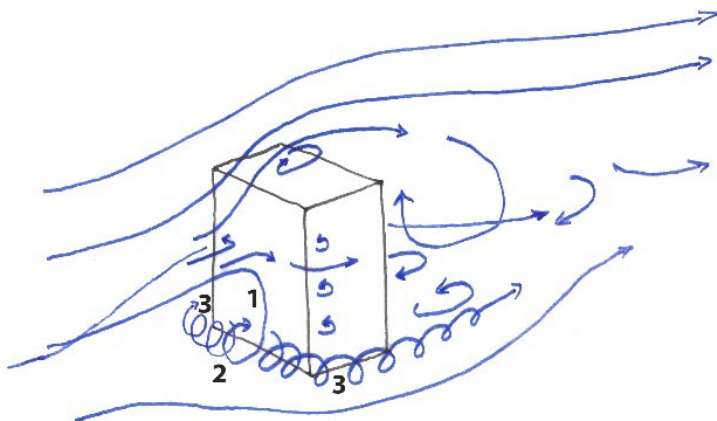


Abbildung 1. Windströmungsstruktur eines alleinstehenden Hochhauses (Bild: A. Rubin, abgeändert von Beranek und van Koten, 1979). *Wird noch ersetzt werden.*

In diesem Bericht konzentrieren wir uns auf die Windsituation auf Strassenhöhe (2 m über Boden), da dies die Umgebung ist, die von den meisten Menschen benutzt wird und den öffentlichen Raum betrifft, also direkt in der Verantwortung der Stadt liegt. Generell sollte der Windkomfort aber in allen Bereichen, die von Personen benutzt werden, gewährleistet werden. Dies betrifft nicht nur die Umgebung eines Gebäudes am Boden, wie Passagen im oder zwischen Gebäuden, etc., sondern auch die Nutzung von Balkonen, Terrassen oder Dächern.

### 2.2.2. Windprofil in der bodennahen Grenzschicht

Der Wind wird abgebremst, je näher er der Erdoberfläche kommt. Dadurch entsteht je nach Oberflächenstruktur ein charakteristisches Windgeschwindigkeitsprofil. Auf einem freien Feld bei einer Rauheit  $z_0 = 0.03$  m oder über offenen Gras- oder Wasserflächen wird der Wind weniger abgebremst. Dadurch ist das Windprofil steiler, das heisst es hat höhere Windgeschwindigkeiten in Bodennähe, wie in Abbildung 2a zu sehen ist. In der Stadt bei einer Rauheit von  $z_0 = 1$  m ist das Windprofil flacher und Windgeschwindigkeiten in Bodennähe sind generell geringer. Wie im Abbildung 2b zu sehen ist, wird der Wind in einem überbauten Gebiet stark abgebremst und das Windprofil entwickelt sich erst richtig

## Wind bei Hochhäusern

im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich

über den Dächern der Gebäude. Hochhäuser erstrecken sich aber weit über die mittlere Dachhöhe der Umgebung und reichen somit wieder ins freie Windfeld. Dabei wird, wie bei einem alleinstehenden Gebäude, eine abwärts gerichtete Strömung erzeugt, wodurch die Windgeschwindigkeit am Boden erhöht wird (siehe Nummer 1 in Abbildung 1). Dies zeigt sich in den im nächsten Kapitel vorgestellten numerischen Ergebnissen.

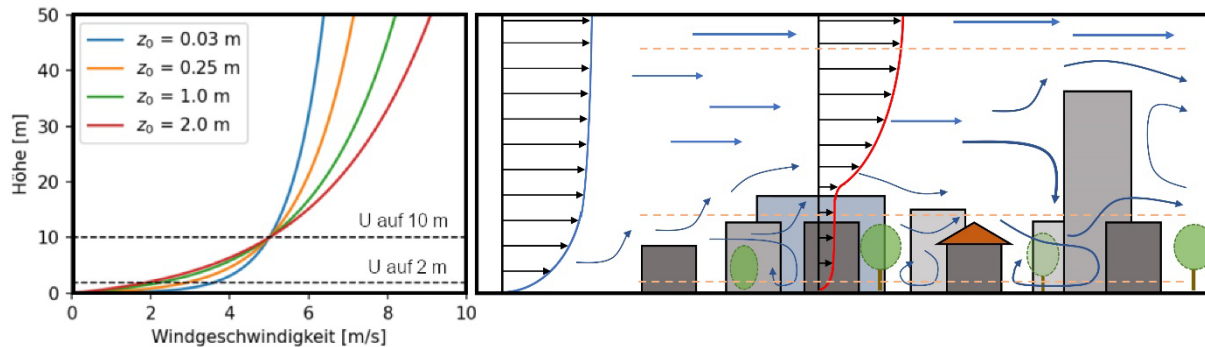


Abbildung 2. Atmosphärische Grenzschicht Windprofil bei verschiedenen Rauigkeiten der Oberfläche (links), Windprofil über Land und Stadt (rechts) (Bild: A. Kubilay, A. Rubin)

## 3. Hochhausanalyse Zürich

### 3.1. Analyisierte Geometrien - Plan und Ansicht

Abbildung 3 zeigt die drei analysierten Szenarien: a) ein freistehendes Hochhaus, ein Hochhaus in einer Umgebung mit b) gereihten, sowie einer c) versetzt angeordneten Bebauung. Diese vereinfachten Konfigurationen wurden gewählt, um verschiedene urbane Morphologien geometrisch vereinfacht abzubilden. Das Hochhaus basiert auf einem rechteckigen Grundriss und der Wind bläst bei den Simulationen immer aus der gleichen Richtung, rechtwinklig zur breiteren Fassade der Gebäude. Dies entspricht einer stärkeren Abwärtsströmung als ob der Wind auf die schmalere Gebäudeseite treffen würde und ist somit repräsentativ für die grösstmöglichen Windeffekte.

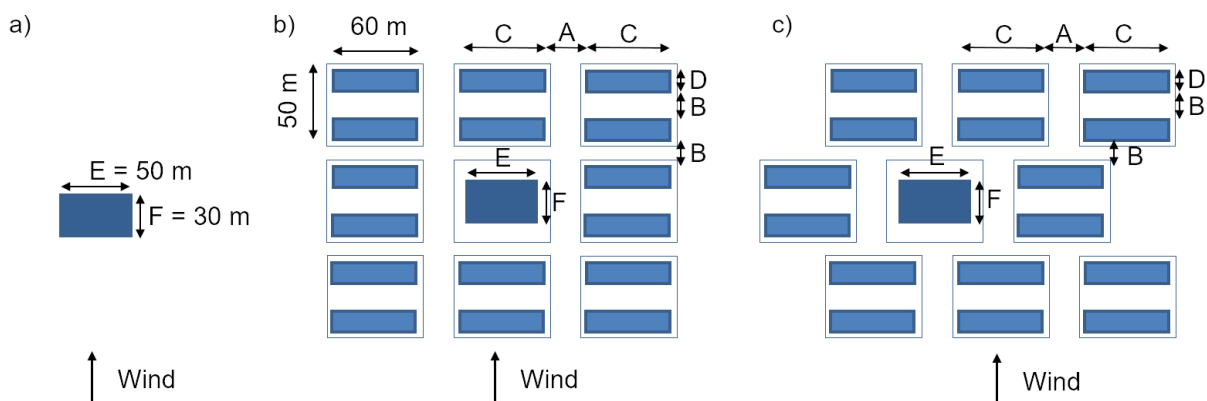


Abbildung 3. Planansicht des Hochhauses (in dunkler Farbe) als a) freistehendes Gebäude, und in einer urbanen Umgebung mit b) gereiht und c) versetzt angeordneter Gebäudekonfiguration. Die Dimensionen sind: A: 30 m, B: 20 m, C: 60 m, D: 15 m, E: 50 m, F: 30 m. (Bild: A. Rubin)



Wind bei Hochhäusern

im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich

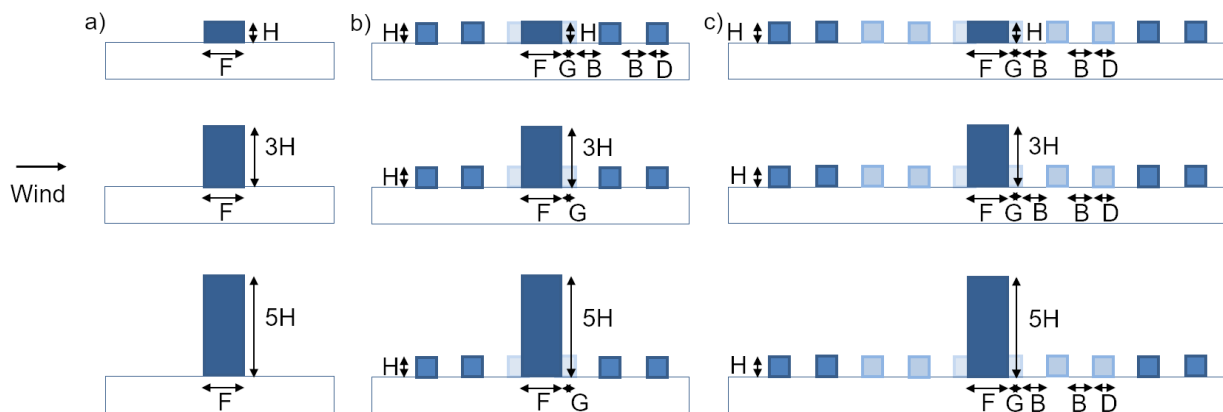


Abbildung 4. Seitenansicht des Hochhauses mit unterschiedlichen Höhen als a) freistehendes Gebäude, und in einer urbanen Umgebung mit b) gereiht und c) versetzt angeordneter Gebäudekonfiguration. Referenzhöhe der umgebenden Gebäude ist  $H = 16\text{ m}$ , repräsentativ für ein 5-geschossiges Gebäude. Übrige Dimensionen sind wie folgend: A: 30 m, B: 20 m, C: 60 m, D: 15 m, E: 50 m, F: 30 m. (Bild: A. Rubin)

Die Höhe der umliegenden Gebäude, die eine urbane Umgebung repräsentieren soll, wird mit  $H = 16\text{ m}$  (ca. 5 Geschosse) angenommen (Abbildung 4). Diese wurde als mittlere Höhe der Bebauung in Zürich angenommen. Die Bebauung in Zürich ist je nach Quartier unterschiedlich (Abbildung 5). So sind die Gebäude im Zentrum eher höher (5-7 Geschosse) und an den Hang- und Randlagen eher niedriger (3-5 Geschosse) (genauere Angaben in der Bau- und Zonenordnung). Hochhäuser sind gemäss dem kantonalen Planungs- und Baugesetz Gebäude mit einer Höhe von mehr als 25m und befinden sich in Abbildung 5 hauptsächlich in den gelben Bereichen.

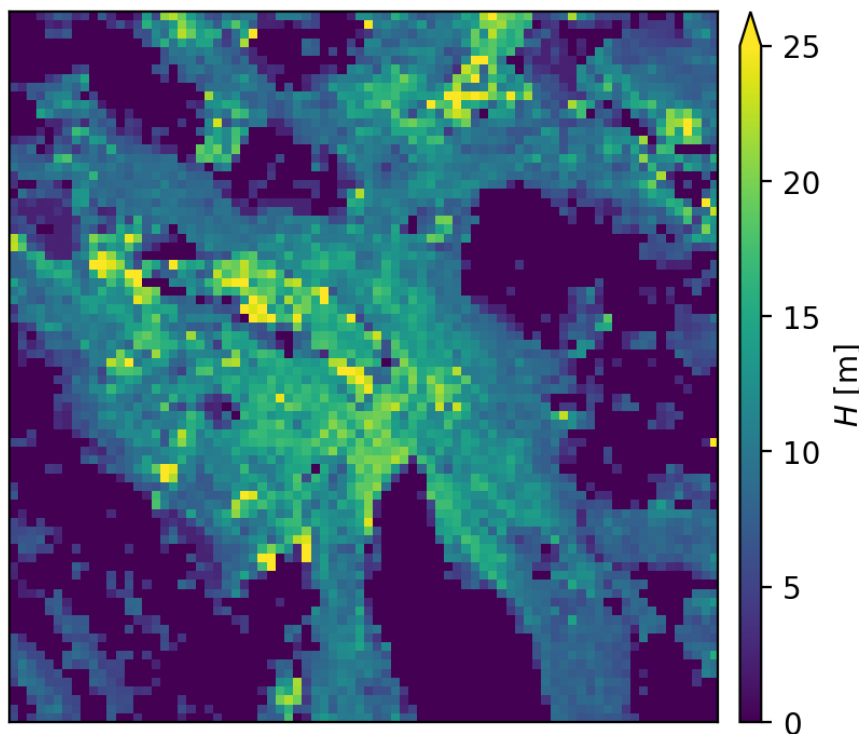


Abbildung 5. Mittlere Gebäudehöhen in Zürich berechnet mit  $125\text{ m} \times 125\text{ m}$  Auflösung. (Bild: B. Sützl)

## Wind bei Hochhäusern

## im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich

Um ebenso den Einfluss der Höhe des Hochhauses auf den Windkomfort in diesen Situationen zu betrachten, werden in jeder der drei Anordnungen acht verschiedene Höhen des Hochhauses untersucht. Die Hochhaus-Höhen werden jeweils in Relation zur mittleren Höhe  $H$  (16 m) der umgebenden Bebauung gesetzt. Die Höhen betragen  $H$  (16m),  $1.5H$  (24m),  $2H$  (32m),  $3H$  (48m),  $4H$  (64m),  $5H$  (80m),  $10H$  (160m) und  $15H$  (240m). Die Höhe des Prime Towers beträgt 126m, was etwa  $8H$  entspricht, und die Höhe der Hardturm Tower wird 137m betragen, was etwa  $8.5H$  entspricht. Für jede Hochhaushöhe wird eine Windsimulation durchgeführt, wobei zusätzlich eine Simulation ohne jedes Gebäude erfolgt. Daraus werden dann die Verstärkungsfaktoren ermittelt. Der Verstärkungsfaktor sagt aus, um wie viel sich die Windgeschwindigkeit an einem bestimmten Ort mit Bebauung gegenüber der Windgeschwindigkeit an dieser Position ohne jegliche Bebauung verändert.

Um den Einfluss der Höhe der umgebenden Bauten abzuschätzen, wurden für die urbane Konfiguration mit gereihten Gebäuden (Abbildung 3b) zwei weitere Gebäudehöhen  $H = 12.5m$  und  $25 m$  untersucht. Dazu sind jeweils die Verstärkungsfaktoren für die Hochhaushöhen von  $2H$  (25m/50m) und  $3H$  (37.5m/75m) bestimmt und mit den Ergebnissen von  $H = 16m$  verglichen worden (Abbildung 13). Tabelle 3 zeigt die Liste aller simulierten Fälle.

Tabelle 3. Liste aller simulierten Fälle, Farben entsprechend Abbildung 12 und 13, rot betrifft Zusatzsimulationen zur Sensibilitätsanalyse (Abschnitt 3.3.2.)

Hochhaushöhe	1H	1.5H	2H	3H	4H	5H	10H	15H	
freistehendes Gebäude	x	x	x	x	x	x	x	x	H = 16 m
urbane Umgebung (gereiht)			x	x					H = 12.5 m
	x	x	x	x	x	x	x	x	H = 16 m
			x	x					H = 25 m
urbane Umgebung (versetzt)	x	x	x	x	x	x	x	x	H = 16 m

### 3.2. Simulationsbedingungen

CFD-Simulationen werden durchgeführt, um das Windströmungsfeld um die Hochhäuser der verschiedenen in Abschnitt 3.1 angegebenen Konfigurationen zu berechnen. Für jede geometrische Konfiguration wird dann die Windgeschwindigkeit auf Fussgängerhöhe (2m) verglichen.

Die Betrachtung erfolgt unter isothermen Bedingungen (d.h. ohne Berücksichtigung von Temperaturunterschieden), da der Windkomfort nur bei hohen Windgeschwindigkeiten kritisch wird, bei denen die Auswirkungen durch den thermischen Auftrieb vernachlässigbar werden.

Die Berechnungen (3D-stationäre isotherme RANS-Simulationen (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) unter Verwendung des RNG-k- $\epsilon$ -Turbulenzmodells) erfolgen stationär (d.h. unter gleichbleibenden Bedingungen) und liefern eine von zeitlichen Effekten (Böigkeit) unabhängige Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten. Dies ist die allgemein validierte Herangehensweise, die in der wissenschaftlichen Literatur (Blocken et al., 2004 / Blocken et al., 2012 / Kubilay et al., 2020) und den Windkomfortstandards (NEN 8100:2006) empfohlen wird.

Die Simulationen werden mit OpenFOAM v6 durchgeführt, einer kostenlosen und quelloffenen CFD-Software. Es wird der Standard-OpenFOAM-Solver für stationäre, inkompressible, turbulente Strömungen namens «simpleFoam» verwendet, der den SIMPLE-Algorithmus verwendet, um RANS-Gleichungen zu lösen.

## Wind bei Hochhäusern

im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich

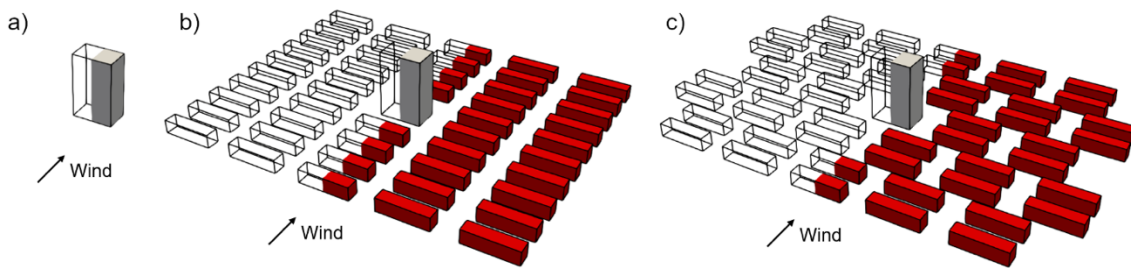


Abbildung 6. Berechnungsdomäne für a) das freistehende Gebäude, und urbanes Umfeld mit b) gereiht und c) versetzt angeordneter Gebäudekonfiguration. Hochhäuser sind grau und die umliegenden Gebäude rot gekennzeichnet. Die Berechnungsdomäne entspricht der Hälfte der Morphologie. (Bilder: A. Kubilay)

Die Berechnungsdomänen für die drei geometrischen Konfigurationen sind in Abbildung 6 dargestellt. Da die Situation symmetrisch ist, wurden die Simulationen nur für eine Hälfte (eingefärbte Volumina in Abbildung 6) simuliert, um den Rechenaufwand (Zeit und Rechenpower = Kosten) zu minimieren. Dabei wurden an der zentralen vertikalen Ebene symmetrische Konditionen gesetzt.

Einlassrandbedingungen und Wandfunktionen am Boden mit Rauheitsmodifikationen werden so eingestellt, dass die Strömungsentwicklung zwischen Einlassebene der Berechnungsdomäne und dem Standort des Hochhauses minimiert wird (Blocken et al., 2007). Darüber hinaus wird für alle Simulationen eine identische Domänengrösse in Übereinstimmung mit den Best-Practice-Richtlinien für die Windumströmung von Gebäuden gewählt. Der Abstand zwischen Eingangsebene und Hochhaus ist in allen Simulationen gleich. Auf diese Weise wäre die Auswirkung einer eventuellen Strömungsentwicklung in allen Fällen gleich.

Die Berechnungsgitter für die Simulationen werden mit dem OpenFOAM-Netzwerkzeug «snappyHexMesh» erzeugt, welches ein gebäudeangepasstes Gitter erzeugt. Dabei sind die Zellen in Gebäudenähe feiner und werden mit Abstand zu den Gebäuden grösser (siehe Abbildung 7). Damit sollen die Windströmungen an den Bauten besser erfasst werden. Als Eingabe für das Vernetzungswerkzeug werden Gebäudeoberflächen aus Blender (3D-CAD-Software) im STL-Format (3D-Datenformat) exportiert.

Damit die Berechnungen die Bedingungen um die Gebäude präzise wiedergeben wird eine Analyse betreffend der minimal erforderlichen Gittergrösse vorgenommen. Diese Gitteranalyse wird durchgeführt, um zu ermitteln, ab welcher Feinheit des Gitternetzes keine wesentlichen Veränderungen mehr ersichtlich sind. Die erste Zellenhöhe ist auf allen Gebäudeflächen einheitlich und der Abstand zwischen Zellenmitte und Gebäudefläche beträgt bei der gewählten Gittergrösse 2.5 cm. Die Resultate der Gitteranalyse sind in Appendix A erläutert.

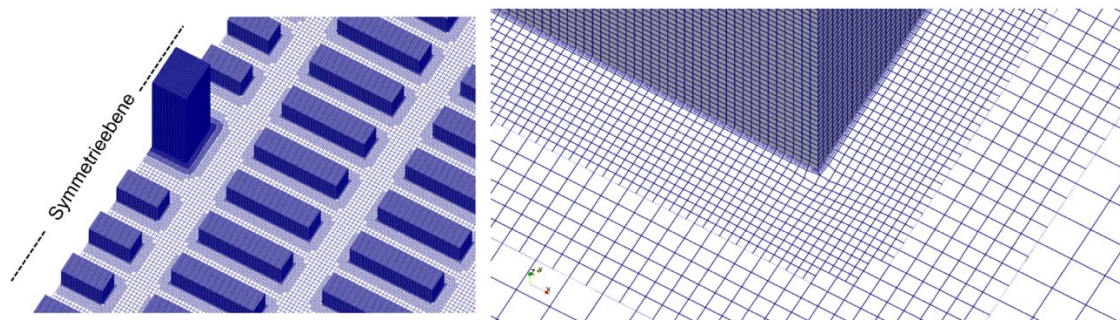


Abbildung 7. Rechenraster auf den Gebäudeflächen und dem Boden mit der Hochhaushöhe von 5H in gereihter Konfiguration. (Bilder: A. Kubilay)

### 3.3. Resultate der Windsimulationen

Abbildung 8 zeigt, dass die Höhe des Gebäudes für die Windströmung eine wesentliche Rolle spielt. Der Wind wird vom Hochhaus in den Stadtkörper umgelenkt. Je höher das Hochhaus nun reicht, umso mehr Luft aus höheren Schichten, wo eine höhere Windgeschwindigkeit vorherrscht, wird zum Boden umgelenkt und umso höher wird die Windgeschwindigkeit am Boden.

Dies kann dazu führen, dass, je nach Nutzung der Flächen rund um das Gebäude, der Windkomfort nicht mehr gewährleistet ist. Im schlimmsten Fall kann selbst die Sicherheit von Personen gefährdet werden. Windgeschwindigkeiten können sich um Gebäude sehr abrupt und unerwartet verändern. Insbesondere bei böigen Winden kann diese auch stark schwanken. Dies kann für Zufussgehende, insbesondere Kinder und älteren Personen, aber auch Fahrradfahrenden gefährlich werden. Daher gibt es unterschiedliche Kriterien für Windgeschwindigkeits-Gefahrgrenzwerte, die in Abschnitt 2.1 genauer besprochen werden.

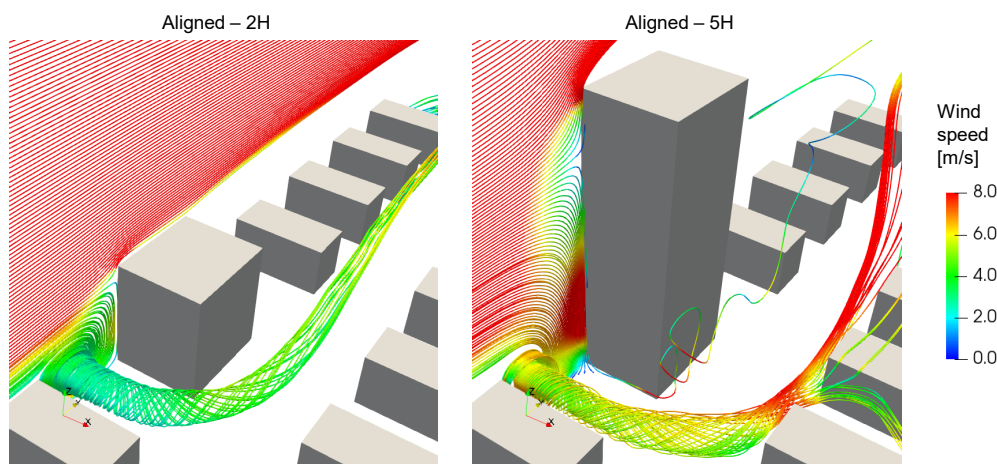


Abbildung 8. Visualisierung der Umlenkung der Windströmung bei einem Hochhaus mit a) der doppelten Höhe b) der fünffachen Höhe der umgebenden Bauten in einer gereihten Konfiguration mittels Partikelverfolgung. (Bild: A. Kubilay)

#### 3.3.1. Verstärkungsfaktoren um das Hochhaus

Aus dem Vergleich zwischen der Windgeschwindigkeit am selben Ort über freiem Feld zu der Situation mit Bebauung wird der Verstärkungsfaktor abgeleitet. Mit anderen Worten beschreibt der Verstärkungsfaktor die Zunahme (bei einem Wert grösser als 1) der lokalen Windgeschwindigkeit, hier in zwei Meter über Boden, die durch das Vorhandensein von Gebäuden verursacht werden kann. Diese werden später (Kapitel 4) verwendet um aus den aus dem Windatlas abgeleiteten lokalen Winddaten

die möglichen durch entsprechend hohe Hochhäuser induzierten Windgeschwindigkeiten abzuschätzen.

In Abbildung 9 werden die Verstärkungsfaktoren in 2m über Boden für alle analysierten Varianten aufgezeigt. Die Varianten alleinstehend, gereiht und versetzt sind jeweils entsprechend der Höhe des Hochhauses untereinander angeordnet. Die Höhe des Hochhauses steigt von links nach rechts an. Dadurch wird die räumliche Situation deutlicher ersichtlich. So sieht man klar, dass beim alleinstehenden Gebäude (Abbildung 9 obere Reihe) die Eckströmung schon bei geringerer Höhe zu einem erhöhten Faktor führt. Beim alleinstehenden Gebäude mit einer Höhe von  $1H$  beträgt der grösste Verstärkungsfaktor bereits 1.4. Dieser Wert steigt mit zunehmender Gebäudehöhe weiter an. Darüber hinaus erweitert sich der von höheren Verstärkungsfaktoren betroffene horizontale Bereich und erstreckt sich auf beiden Seiten des Gebäudes weiter stromabwärts.

In beiden urbanen Varianten (Abbildung 9 mittlere und untere Reihe) führen die umliegenden Gebäude bis zu einer Höhe von  $2H$  des Hochhauses zu einer, im Vergleich zum offenen Feld, windstilleren Umgebung mit Verstärkungsfaktoren unter 1.0. Bei einer Gebäudehöhe von  $2H$  erhöht sich die Windgeschwindigkeit gegenüber dem freien Feld (Verstärkungsfaktor über 1.0) im urbanen Gebiet und je höher das Gebäude ist umso grösser wird auch das Gebiet, das beeinflusst wird. Die betroffene Region mit hohem Verstärkungsfaktor wird durch die Anordnung der umgebenden Gebäude beeinflusst, was zu Unterschieden in der Verteilung der Verstärkungsfaktoren zwischen den ausgerichteten und gestaffelten Fällen führt. Bei sehr hohen Hochhaushöhen führt die Präsenz dessen auch bei den umliegenden niedrigeren Gebäuden zu hohen Verstärkungsfaktoren, welche auf Komfortprobleme hindeuten können, so z.B. bei einer Höhe des Hochhauses von über  $10H$  bei den versetzt angeordneten Nachbargebäuden um die Ecken der stromabwärts hinter dem Hochhaus liegenden Gebäude.

Hierbei ist anzumerken, dass diese Ergebnisse nicht so interpretiert werden dürfen, dass Häuser mit einer Höhe bis zu  $2H$  zwangsläufig zur Reduktion der Windgeschwindigkeit in den umliegenden Bereichen führen. Die Anordnung von Gebäuden im urbanen Raum ist meist komplexer als in den zwei angenommenen Szenarien (gereiht und versetzt), und dadurch ist es nicht möglich, die Windströmungen anhand einfacher Regeln vollständig zu beschreiben. Grundsätzlich kann man aber davon ausgehen, dass dicht aneinander stehende Gebäude hohe Windgeschwindigkeiten abfangen und dadurch tendenziell zu niedrigeren Windgeschwindigkeiten auf Strassenniveau führen.

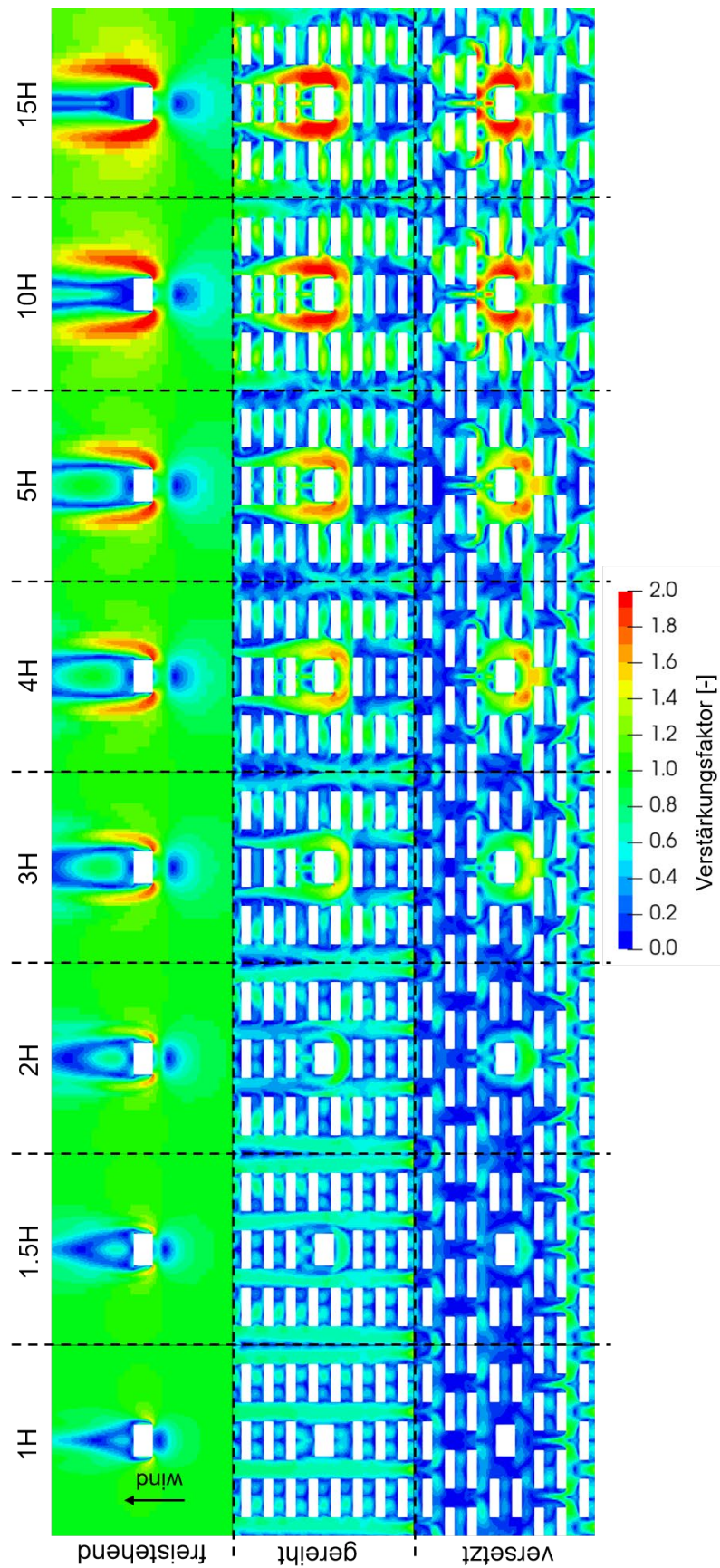


Abbildung 9. Verstärkungsfaktoren in einer horizontalen Ebene in 2 m Höhe für das freistehende Gebäude und die beiden urbanen Varianten. (Bild: A. Kubilay)

**Wind bei Hochhäusern**

**im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich**

Als nächstes, in Abbildung 10 ersichtlich, wird für jede Konfiguration der Faktor auf einer Linie 2m über Boden und in einem Abstand von 2 m zum Hochhaus betrachtet. Die Abbildung jeder Konfiguration ist in drei Teile unterteilt. Der schwarze Pfeil neben der gestrichelten Linie auf der Aufsicht des Hochhauses (Abbildung 10a) zeigt jeweils den auf der x-Achse (Abwicklung der gestrichelten Linie in der Aufsicht) zwischen den gestrichelten Linien abgebildeten Abschnitt an.

Die grössten Faktoren liegen seitlich der dem Wind zugewandten Ecke. Dabei wird ersichtlich, dass beim freistehenden Hochhaus bereits bei einer Höhe von 1H lokal eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit stattfindet, also ein Faktor von über 1.0 herrscht. Je höher das Hochhaus umso höher wird der Faktor, also der lokale Wind gegenüber dem Wind im freien Feld. In beiden urbanen Umgebungen wird Faktor 1.0 erst bei einer Höhe des Hochhauses von etwa 2H erreicht.

Weiter ist ersichtlich, dass ab einer Höhe von 10H bei allen Varianten kein wesentlicher Anstieg des Verstärkungsfaktors mehr stattfindet. Betrachtet man die Werte auf einer Linie im Abstand von 5 m um das Gebäude, wie in Abbildung 11 aufgezeigt, sind die maximalen Verstärkungsfaktoren nicht wesentlich kleiner, verschieben sich jedoch von der Ecke weg in die Seite. Beim Vergleich der Abbildungen 10 und 11 wird klar ersichtlich, dass je näher an der Wand je abruptere Wechsel in der Windgeschwindigkeit auftreten.

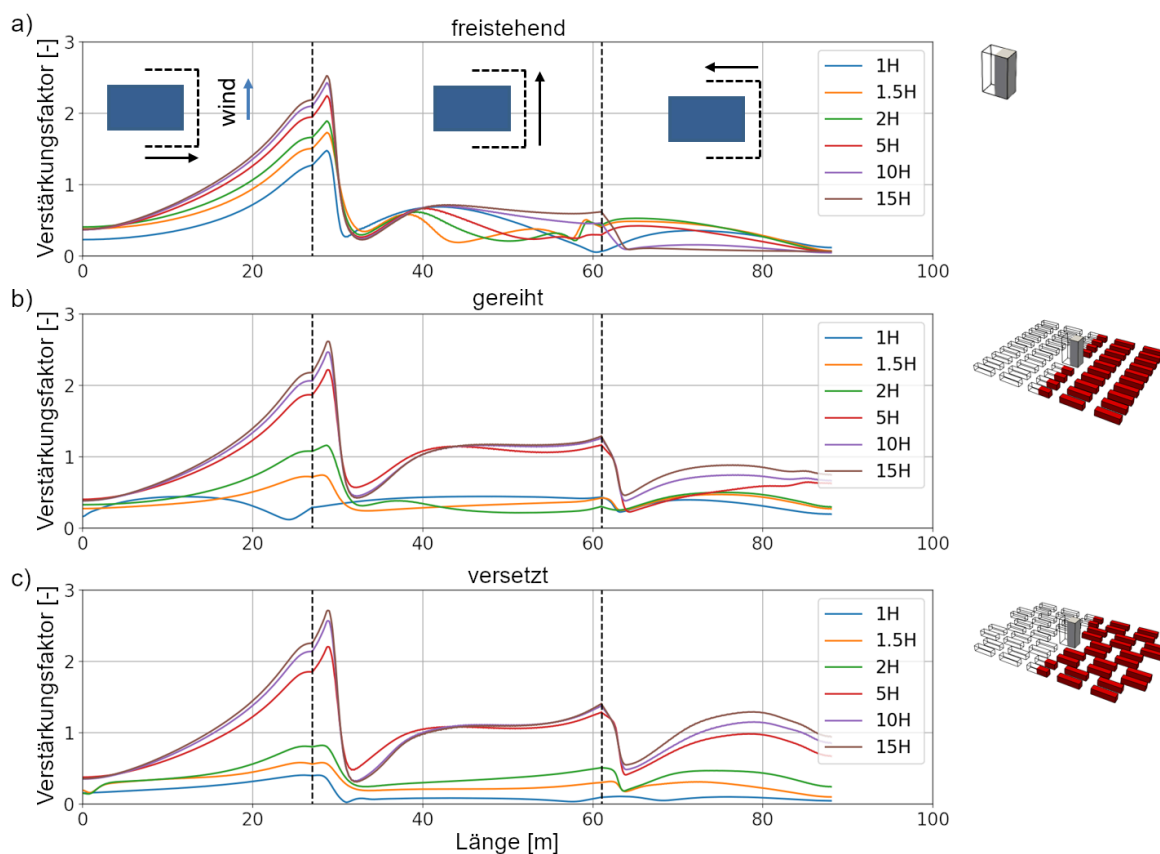


Abbildung 10. Verstärkungsfaktor im jeweiligen Abschnitt in einer Höhe von 2m und einem Abstand von 2m vom Hochhaus. (Grafiken: A. Kubilay)

Wind bei Hochhäusern

im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich

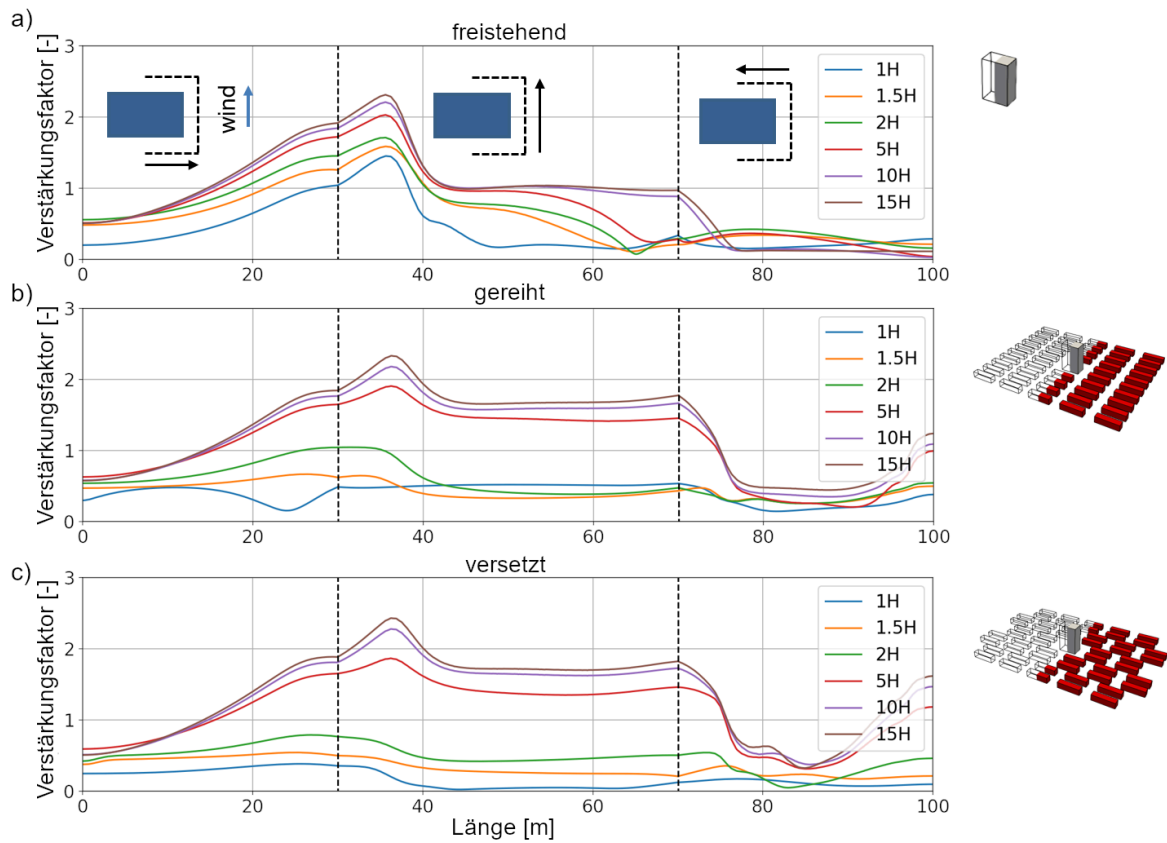


Abbildung 11. Verstärkungsfaktor im jeweiligen Abschnitt in einer Höhe von 2m und einem Abstand von 5m vom Hochhaus. (Grafiken: A. Kubilay)

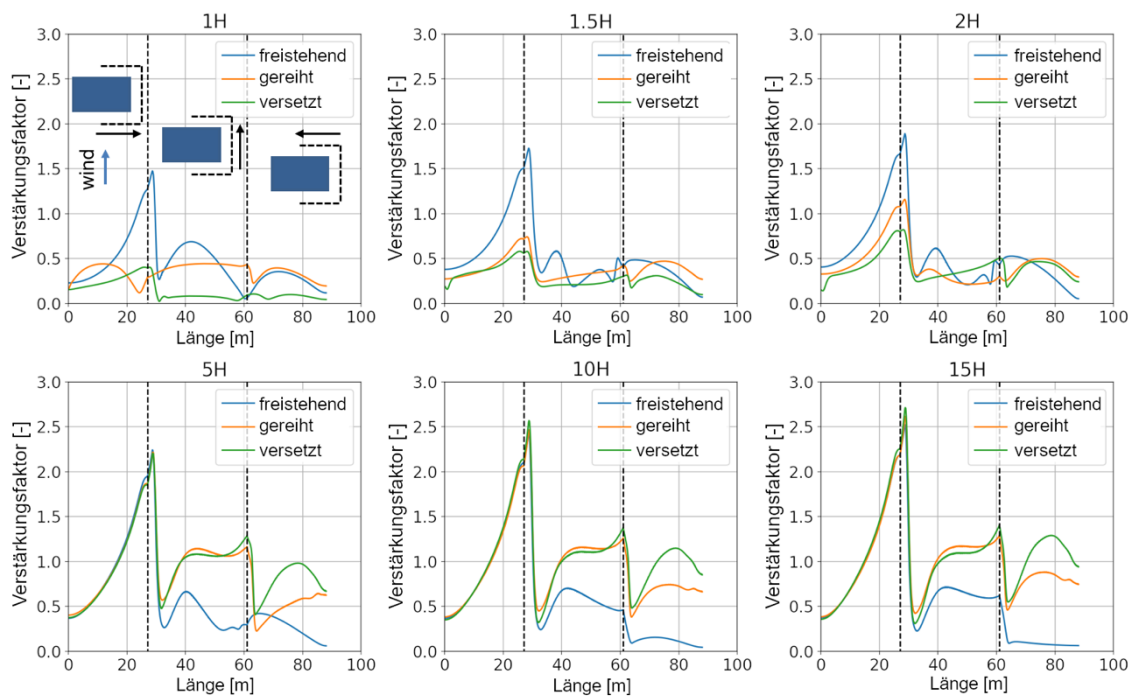


Abbildung 12. Vergleich der Verstärkungsfaktoren auf gleicher Höhe und bei gleichem Abstand von 2m aber bei unterschiedlicher Höhe des Hochhauses. (Grafiken: A. Kubilay)



Vergleicht man nun die verschiedenen Situationen bei gleicher Höhe miteinander (2 m über Boden und in 2 m Abstand zum Gebäude), so wird in Abbildung 12 ersichtlich, dass sich die grössten Verstärkungsfaktoren ab einer Hochohshöhe von 5H nicht mehr signifikant unterscheiden. Auch sieht man klar, dass ab einer Höhe von 5H der Wind seitlich des Gebäudes nicht mehr abgebremst wird (Verstärkungsfaktoren über 1.0) und wenn man sich um das Hochhaus bewegt an jeder Ecke abrupte Wechsel der Windgeschwindigkeiten auftreten.

### *3.3.2. Vergleich der maximalen Verstärkungsfaktoren*

Der jeweils beobachtete maximale Verstärkungsfaktor in Fussgängerhöhe (2 m) lässt sich anhand Abbildung 13 zusammenfassen. Beide urbanen Fälle weisen einen ähnlichen maximalen Verstärkungsfaktor auf. Aufgrund des Kurvenverhaltens kann man den Gebäudehöhenbereich in 3 Gruppen einteilen:

Unterhalb von 2H zeigen beide urbanen Fälle deutlich geringere Verstärkungsfaktoren um das Hochhaus, nur der ausgerichtete Fall zeigt Werte grösser 1. Bei diesen Höhen weisen beim freistehenden Gebäude bestimmte Positionen bereits hohen Verstärkungsfaktoren auf.

Zwischen 2H und 4H steigen die Verstärkungsfaktoren für die urbanen Fälle mit der Gebäudehöhe deutlich an.

Oberhalb von 4H weisen alle Konfigurationen einen maximalen Verstärkungsfaktor von über 2.0 auf. Dies stimmt mit Abbildung 10 überein, die nahelegt, dass die umliegenden Gebäude oberhalb dieser Höhe keinen Einfluss auf den maximalen Verstärkungsfaktor haben.

Wenn, im Fall der alignierten Variante, die Höhe der umgebenden Gebäude variiert wird, verschieben sich die Kurven für die Verstärkungsfaktoren leicht, wobei das allgemeine Verhalten gleichbleibt. Für die reduzierte Gebäudehöhe von  $H=12.5\text{m}$  verkleinern sich der Verstärkungsfaktor und bei Gebäudehöhen von  $H=25\text{m}$  vergrössert sich diese. Dies deutet daraufhin, dass bei einer Situation mit einer grösseren Referenzhöhe  $H$  ein Hochhaus mit der Höhe von 3H auch kritisch sein kann.

Es ist zu beachten, dass diese Werte nur den maximalen Verstärkungsfaktor um das Gebäude herum angeben. Es gibt auch Punkte mit viel niedrigeren Verstärkungsfaktoren in der Umgebung des Gebäudes, wie in Abbildung 9 zu sehen ist. Weiter ist zu beachten, dass sich die tatsächliche Position des maximalen Verstärkungsfaktors in der Realität mit der Windrichtung ändern kann. In Abbildung 13 werden daher hauptsächlich die Bereiche, entsprechend der Gebäudehöhen, aufgezeigt, bei denen grundsätzlich auf den Windkomfort geachtet werden muss. Die räumliche Verteilung respektive die exakte Position hoher Verstärkungsfaktoren können bei einem realen Projekt nur durch eine detaillierte Studie bestimmt werden.

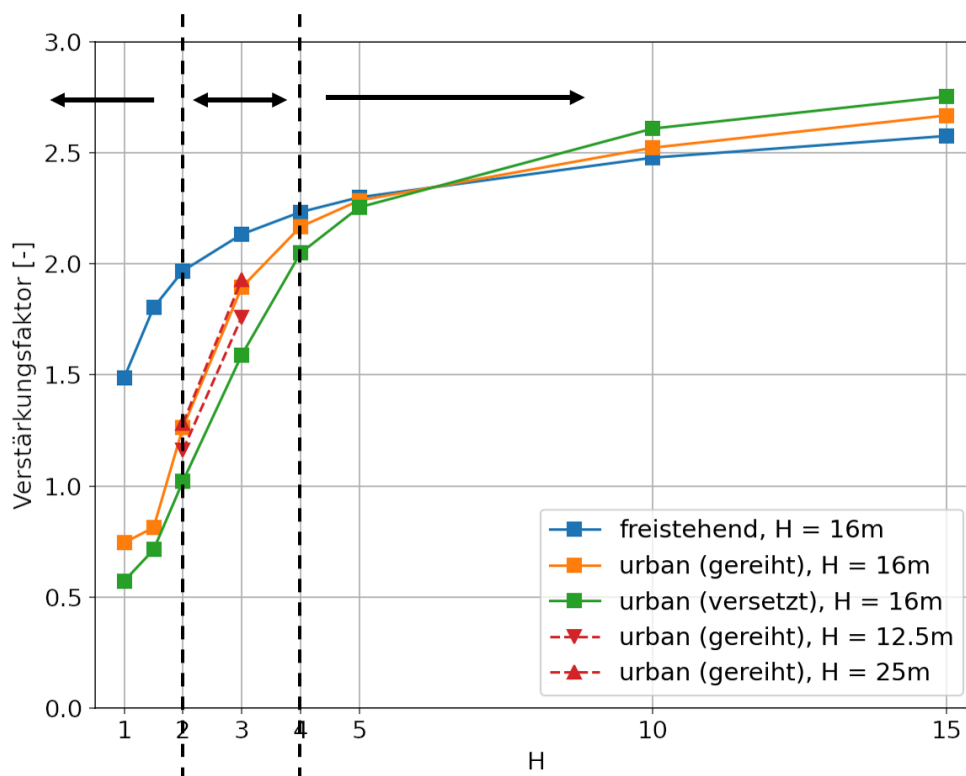


Abbildung 13. Maximale Verstärkungsfaktoren in alle Fällen und Bereiche zur Klassierung betreffend der Berücksichtigung des Windkomfort. (Grafik: A. Kubilay)

## 4. Windkomfortanalyse Zürich

Die berechneten Verstärkungsfaktoren der unterschiedlichen Hochhaus-Konfigurationen werden nun mit einer räumlichen Analyse für die ausgewiesenen Gebiete für Hochhäuser in Zürich verbunden.

### 4.1. Hintergrund

Bei einer Windkomfortanalyse wird die Windsituation vor dem Bau des neuen Gebäudes mit der Situation nach dem Bau verglichen. So können bereits im Bestand existierende unangenehme Situationen erkannt werden, sowie die Veränderungen des Windkomforts nach dem Bau aufgezeigt werden.

Es werden normalerweise mindestens 12 Windrichtungen (in 30° Schritten) für eine vollständige Windanalyse analysiert. Mittels Simulation der näheren Umgebung werden die aktuellen und die zukünftigen lokalen Verhältnisse bestimmt. Die Verstärkungsfaktoren werden mit meteorologischen Daten verknüpft, um festzustellen, ob die Windkomfortkriterien rund um das Hochhaus und seiner Umgebung unter den aktuellen und zukünftigen Bedingungen gewährleistet sind.

Typischerweise werden die Referenz-Winddaten einer geeigneten nahegelegenen meteorologischen Station verwendet. Um diese Referenzdaten an den zu untersuchenden Standort anzupassen, wird zuerst das Windprofil entsprechend der in der Umgebung des Hochhauses vorherrschenden Oberflächenrauigkeit angepasst. Dadurch können dann die Winddaten auf einer Höhe von 2m statistisch ausgewertet und mit den Komfortkriterien abgeglichen werden.

## 4.2. Winddaten für Zürich

Da sich die Simulationen in dieser Studie nicht auf ein bestimmtes Gebäude oder einen bestimmten Ort beziehen, wird anstelle einer einzelnen meteorologischen Station die Verteilung der Windgeschwindigkeit aus dem Windatlas verwendet. Diese vom BAFU beauftragte Studie für die Windenergiepotentialanalyse der gesamten Schweiz gibt die Windgeschwindigkeiten in einer Auflösung vom 100m x 100m an. Die Daten des Windatlas sind auf verschiedenen Höhen über Grund (50m, 75m, 100m, 125m, 150m) für 12 Windrichtungen verfügbar, ebenso wie die jeweilige windrichtungsunabhängige Weibull-Verteilung der Windgeschwindigkeiten. Im nächsten Schritt werden die Windgeschwindigkeiten in einer Höhe von 50m über Grund verwendet (Abbildung 14), was die niedrigsten (d.h. am nächsten zum Boden) verfügbaren Daten sind. Diese Winddaten werden, da den Windatlas- und den CFD-Berechnungen unterschiedliche Rauigkeiten zugrunde liegen, zu 2m CFD Winddaten umgerechnet. Mit den maximalen Verstärkungsfaktoren der CFD-Simulationen und den umgerechneten windrichtungsunabhängigen statistischen Daten aus dem Windatlas werden anschliessend die potenziellen Boden-Windgeschwindigkeiten in der Umgebung von Hochhäusern an verschiedenen Standorten in der Stadt Zürich zu berechnen. Daraus werden die statistische Möglichkeit der, für die verschiedenen Hochhaus-Szenarien, zeitlichen Überschreitung der Windgeschwindigkeit von 5m/s in % berechnet. Dies ermöglicht einen Abgleich mit der Klassifizierung betreffend des Windkomfort nach den in der niederländischen Norm NEN-8100:2006 definierten Kriterien.

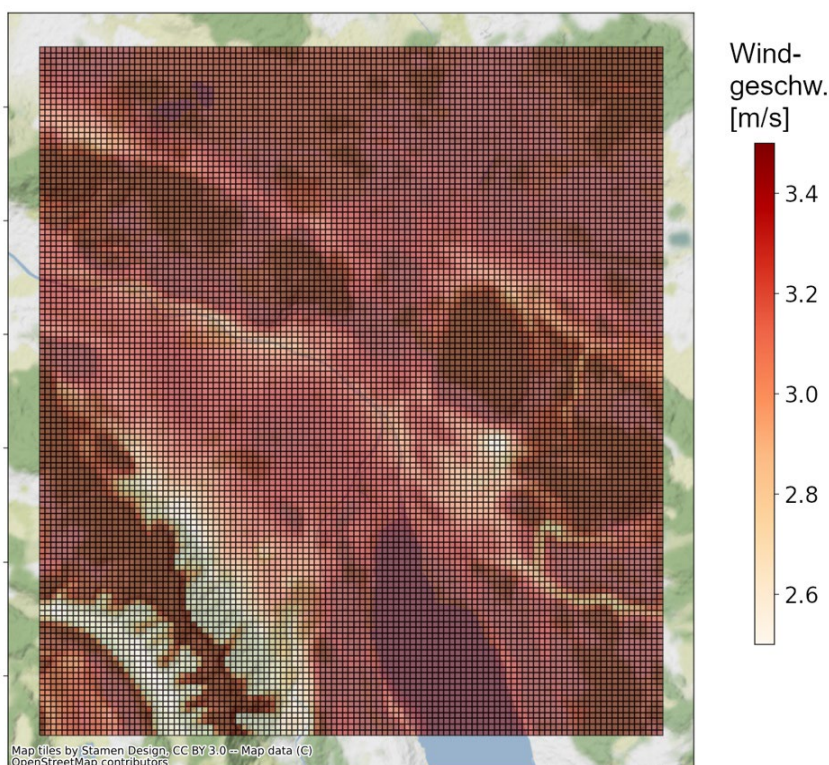


Abbildung 14. Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in Zürich 50m über Grund. Data aus dem Windatlas Schweiz. (Bild: A. Kubilay)

## 4.3. Resultate der Windkomfortanalyse

In den folgenden Karten (Abbildung 16) sind die Windkomfort-Qualitätsklassen gemäss NEN-8100 (Tabelle 2) pro Zelle (100mx100m) abgebildet, die aus den Windgeschwindigkeiten des Windatlas (auf 2m umgerechnet) und den Verstärkungsfaktoren der CFD Simulationen (entsprechend den verschiedenen Gebäudehöhen des Hochhauses) ermittelt wurden. Als Verstärkungsfaktoren wurden jeweils die stärksten Windgeschwindigkeiten angenommen, unabhängig von der Windrichtung und der Position um das Gebäude. Dies stellt somit ein Worst-Case-Szenario dar. In den folgenden Karten sind die Zellen, die in den Bauzonen gemäss ÖREB-Kataster (2018) liegen, sowie die Umriss der Hochhausgebiete gemäss dem Hochhauskonzept als Orientierung dargestellt. Die Berechnungen für den Verstärkungsfaktor wurden nur für flaches Gelände durchgeführt und sind nicht ohne Weiteres auf Hanglagen übertragbar. Respektive sie sind nicht repräsentativ und sollten noch präziser untersucht werden. Diese Präzisierung sollte im Rahmen der Windanalyse und falls erforderlich der Windsimulation erfolgen. Dabei ist insbesondere windexponierten Lagen, wie Hügelspitzen, erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen.

In Abbildung 15c ist ersichtlich, dass ab einer Hochhaushöhe von etwa 2H erste Qualitätseinbussen auftreten, und das Sitzen in unmittelbarer Nähe zum Hochhaus bereits mässig komfortabel sein kann. Bei einer Hochhaushöhe von ca. 3H (48m, Abbildung 15d) mit der gereihten Situation ist die Qualität für Aktivitäten wie Sitzen und Schlendern bereits mangelhaft, und nur für Traversieren mit mässig gerade noch akzeptabel. Bei der gestaffelten Situation verbessert sich der Zustand leicht. So ist in dieser Situation das Traversieren noch angenehm, Schlendern jedoch nur mässig angenehm und der Komfort für das Sitzen bereits mangelhaft. Ab der Höhe von 3H verschlechtert sich die Qualität rapide und bereits bei 4H (Abbildung 15e) ist der Komfort in allen betrachteten Situationen mangelhaft.

Diese Bewertung betrifft grundsätzlich nicht den gesamten Bereich um das Hochhaus, sondern nur die oben aufgezeigten Bereiche mit den höchsten Verstärkungsfaktoren. Da bei diesen Gebäudehöhen aber auch tiefere Verstärkungsfaktoren zu ungenügender Qualität führen können, wird dieses Kriterium («Worst-Case») herangezogen, um zu bestimmen ab welcher Gebäudehöhe eine genauere Betrachtung inklusive Windsimulation oder Windmessungen im Windkanal vorgenommen werden sollte.

Die in den Karten eingezeichneten Gebiete repräsentieren die nach Hochhauskonzept für einen jeweiligen Typ von Hochhaus definierten Gebiete.

Wind bei Hochhäusern

im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich

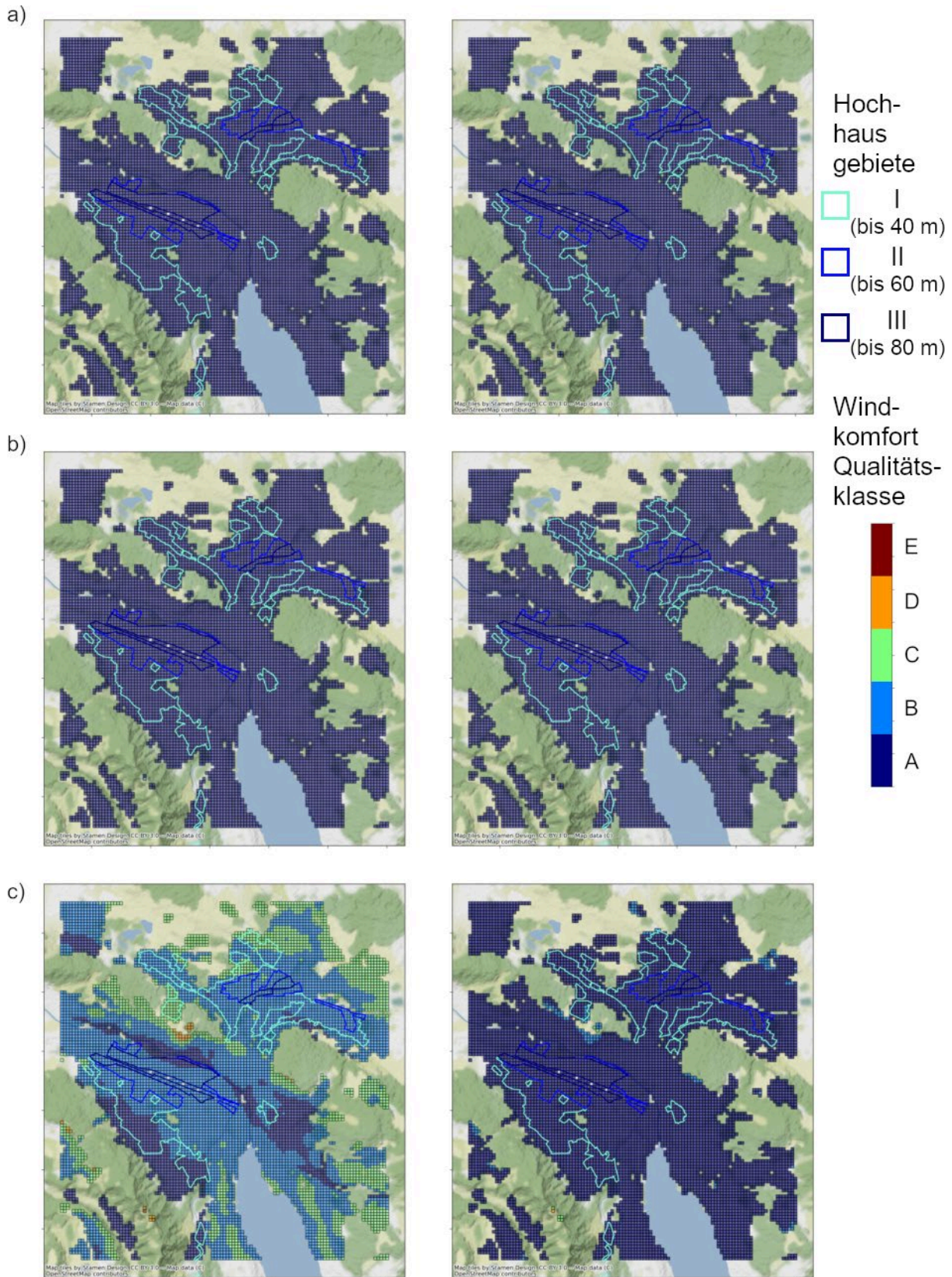
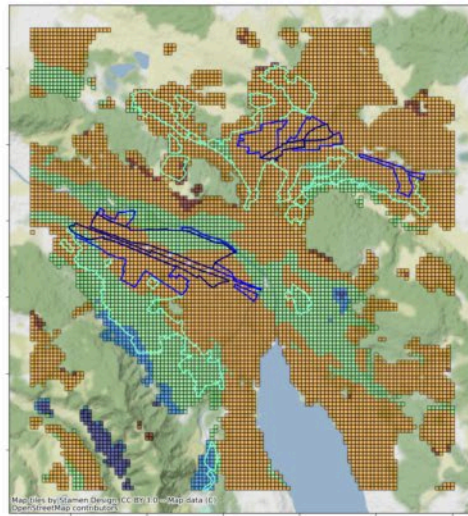
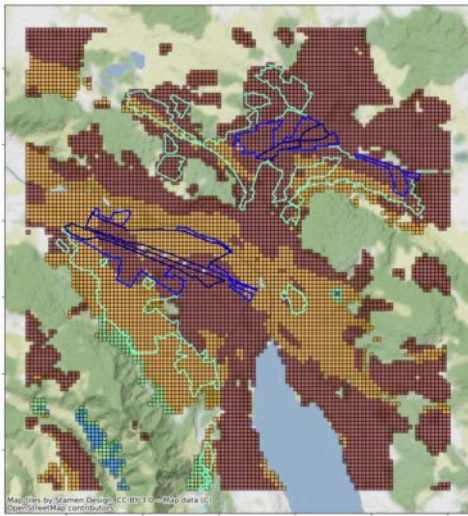


Abbildung 15. Windkomfort Qualitätsklasse gemäss NEN in Zürich für urbanes Umfeld mit gereiht (links) und versetzt (rechts) angeordneter Gebäudekonfiguration. Höhe des Hochhauses: a) 1H, b) 1.5H, c) 2H. (Bilder: A. Kubilay, Umrisse der Hochhausgebiete AfS)

Wind bei Hochhäusern

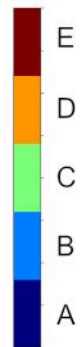
im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich

d)

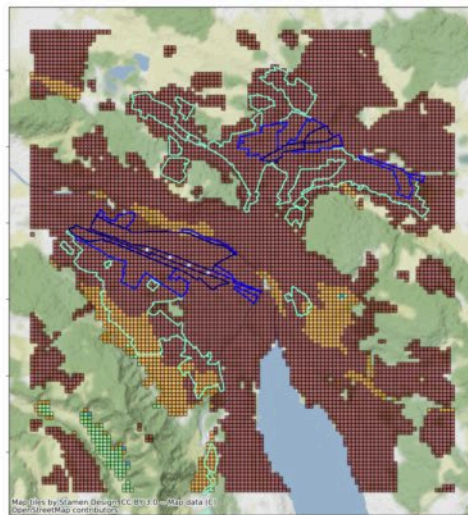
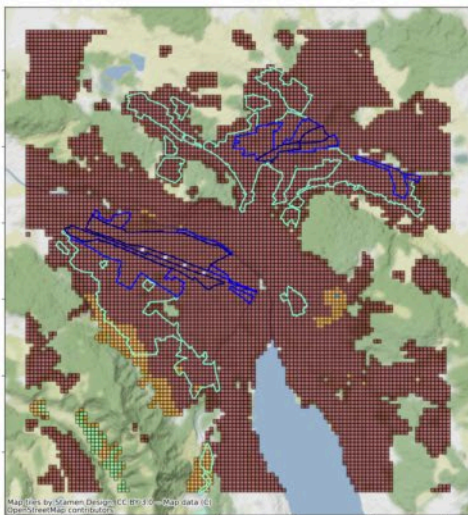


- Hochhausgebiete
- I (bis 40 m)
  - II (bis 60 m)
  - III (bis 80 m)

Windkomfort  
 Qualitätsklasse



e)



f)

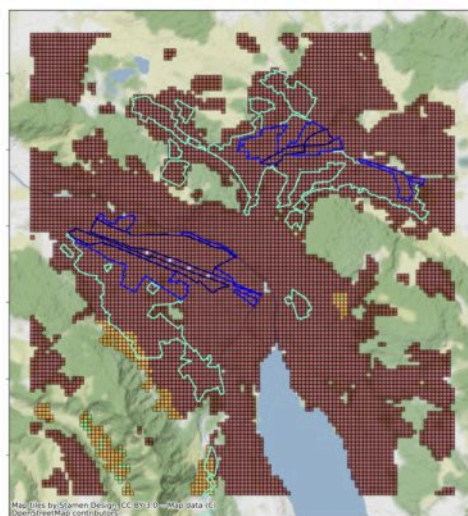
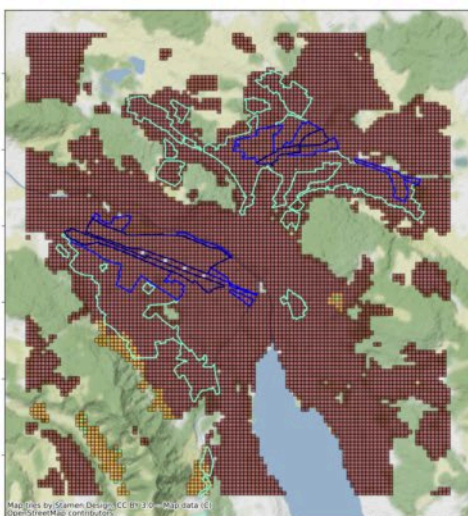


Abbildung 16 (Fortsetzung). Höhe des Hochhauses: d) 3H, e) 4H, f) 5H. (Bilder: A. Kubilay, Umrisse der Hochhausgebiete AfS)

## 5. Schlussfolgerung und Beschränkungen

Aus den obigen Analysen können drei generelle Empfehlungen abgeleitet werden:

1. Gebäude die weniger hoch als die doppelte Durchschnittshöhe der umliegenden Gebäude sind (d.h. mit einer Höhe unter  $2H$ ), können in einer urbanen Situation, die den Simulationen ähnlich ist als sicher eingestuft werden (Abbildung 17a). Dabei ist zu berücksichtigen, dass in besonderen Situationen auch bei Gebäuden mit einer Höhe unter  $2H$  der Einfluss des Windes näher betrachtet werden sollte, z. B. wenn die Gebäude weit auseinanderstehen und die Windströmungen somit einer Freifeldsituation ähneln (Abbildung 17b).
2. Bei Gebäuden mit einer Höhe zwischen  $2H$  und  $4H$  muss ein:e Expert:in entscheiden, ob eine genauere Untersuchung erforderlich ist, da der Windkomfort zwischen  $2H$  und  $3H$  sprunghaft schlechter wird (siehe Abbildung 15) und je nach Nutzung nur noch mässiger bis mangelhafter Windkomfort erreicht wird.
3. Ab einer Höhe von  $4H$  ist der Windkomfort grossflächig mangelhaft, daher sind ab diesen Höhen detaillierte Studien zwingend erforderlich.

Wie in Abbildung 9 ersichtlich, nimmt der Verstärkungsfaktor auch in der weiteren Umgebung des Hochhauses zu und erreicht hohe Faktoren, sodass auch dort kritische Situationen auftreten können. Dieser Effekt ist umso stärker, je höher das Gebäude ist. Daher sollte man nicht nur die nähere Umgebung untersuchen, sondern den Windkomfort auch in einer der Situation angemessenen weiteren Distanz berücksichtigen. Diese sollte durch einen Experten bestimmt werden.

Bei den Berechnungen dieser Studie handelt es sich um eine allgemeine Einschätzung des potenziellen Windkomforts, und nicht um eine detaillierte Fallstudie. Der Windkomfort wurde basierend auf dem Windatlas für  $100m \times 100m$  Zellen an verschiedenen Orten in Zürich berechnet. Dies sagt aber nicht aus, dass der Windkomfort in der ganzen Zelle dem berechneten Wert entspricht. Auch die Verstärkungsfaktoren der CFD-Simulationen sind räumlich begrenzt, und wurden aus den schlechtesten räumlichen Bereichen erstellt. Da heisst auch, dass einige Bereiche um das Hochhaus immer noch einen guten Windkomfort aufweisen könnten. Andererseits handelt es sich bei den Windgeschwindigkeiten um jährliche Durchschnittswerte, in denen ausserordentliche meteorologische Ereignisse nicht abgebildet sind (z.B. Sturm-Downburst 13.Juli 2021 in Zürich).

Bei allen Szenarien wird eine rechteckige Gebäudegeometrie betrachtet. Wird die Geometrie oder das Umfeld verändert, so verändert sich auch das Windfeld in der Umgebung des Gebäudes. Bei einem Hochhaus sollte daher speziell auch die Form (gesamte Gebäudeform wobei insbesondere die Ecken sowie die Modellierung der Gebäudeoberflächen) (Abbildung 18) und das Verhältnis zum Umfeld betrachtet werden (Abbildung 17). Es besteht ein grosser Unterschied, ob ein Hochhaus in seinem Umfeld singulär hervorsticht, weil es zum Beispiel an einer offenen Fläche liegt, oder ob es in einer Gruppe von Hochhäusern steht (Abbildung 19). Dabei spielt auch die Einbettung in der weiteren Landschaft, wie z.B. vor oder hinter einem Hügel (vom Wind aus gesehen) oder an einem See, eine wesentliche Rolle, da dadurch das Windprofil, also die Windgeschwindigkeit in der Höhe, beeinflusst wird.

**Wind bei Hochhäusern**

**im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich**

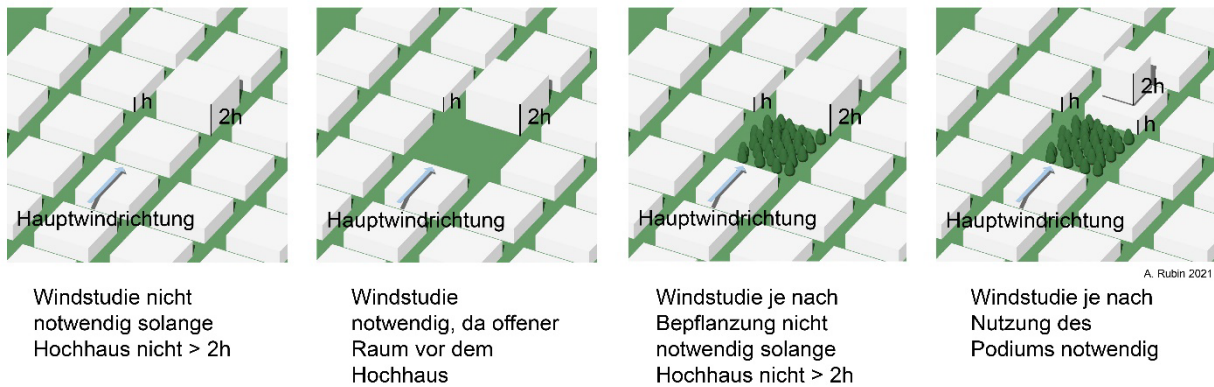


Abbildung 17. Einbettung eines Hochhauses im urbanen Umfeld a) geschlossenes / b) aufgebrochenes Umfeld c) mit Bäumen besetztes Umfeld d) in geschlossenem Umfeld auf Podest. (Bilder: A. Rubin)

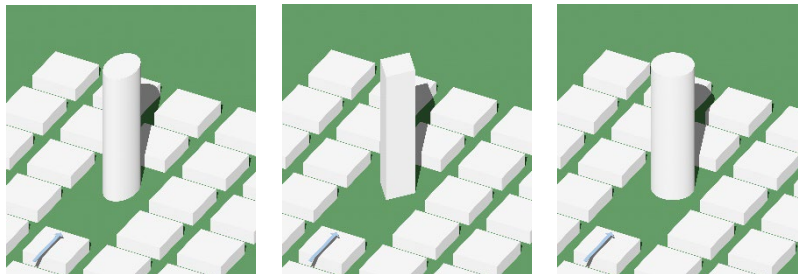


Abbildung 18. Beispiele von Form und Ausrichtung zur Hauptwindrichtung eines Hochhauses a) oval b) quadratisch aber Hauptwindrichtung über Eck c) Rund. (Bilder: A. Rubin)

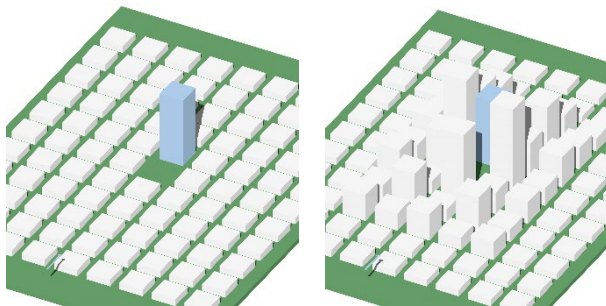


Abbildung 19. Einbettung eines Hochhauses im urbanen Umfeld a) alleinstehend b) gruppier. (Bilder: A. Rubin)

Weiter ist darauf hinzuweisen, dass eine Veränderung der Umgebung, auch bei kleineren Bauten, die Windsituation entscheidend verändern kann und somit der Komfort nicht mehr gewährleistet ist. Daher sollten die Gebäude nicht nur im jetzig bestehenden Umfeld, sondern immer auch unter Berücksichtigung von im Umfeld laufende Planungen und allenfalls auch mögliche zukünftige Planungsszenarien untersucht werden (insbesondere bei Gestaltungsplänen). Dabei sollte ein möglichst langer Zeithorizont berücksichtigt werden.



## **6. Vorschlag für Richtlinien**

Dieser Abschnitt fasst die besprochenen Ergebnisse der Studie zusammen. Ziel ist es, eine Übersicht zu schaffen, was betreffend Windkomfort und Windsicherheit zu berücksichtigen ist, und wie bei einem Projekt konkret vorgegangen werden sollte. Die Stadt Zürich sollte sich auf ein spezifisches Vorgehen festlegen, damit jedes Projekt gleich bewertet wird. Allenfalls sollte dies auch mit der SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein) diskutiert werden, damit in der Schweiz die gleichen Vorgaben gelten. Eine Zusammenfassung für die Vorgehensweise bei der Planung neuer Hochhausprojekte findet sich in Appendix B. Im Weiteren folgt eine ausführliche Beschreibung.

### **6.1. Vorgehen betreffend Windkomfort - Faustregeln**

#### **1. Windanalyse**

Nicht nur Hochhäuser, sondern alle Bauten, aber auch Pflanzen, beeinflussen das Windfeld. Die Veränderungen können sowohl negative als auch positive Einflüsse haben. Um sich der existierenden Situation bewusst zu sein und um diese möglichst zu verbessern, also zum Vorteil des Projektes zu nutzen und die Negativen zu vermeiden, sollte bei allen Projekten durch den Architekten oder bereits einen Spezialisten eine Analyse zu den Windverhältnissen im Projektperimeter erstellt werden. Diese kann dann als Basis für den weiteren Umgang mit Wind aber auch als Grundlage für eine allfällige Windsimulation dienen.

#### **2. Nutzungsplan der Umgebung**

Je nach Nutzung führt ein Wind, abhängig von der Windgeschwindigkeit, zu Unbehagen und bei sehr starken Winden und Böen kann dieser, insbesondere für ältere Menschen, sogar lebensgefährlich werden. Die Kriterien dazu sind, wie in Kapitel 2.1 aufgezeigt, je nach Nutzungsintention betreffend der Windsicherheit definiert. Daher sollte für jedes Projekt bereits in einer frühen Phase der Planung ein Nutzungsplan der Umgebung erstellt werden. In diesem sollte auch die geplante Aussenraumgestaltung inklusive der Vegetation ersichtlich sein, da diese auch den Wind beeinflussen. Entsprechend der Nutzung können danach die Anforderungen an den Windkomfort definiert werden. Falls öffentliche Räume am Gebäude (Terrassen, etc.) vorgesehen sind, so sind diese jeweils individuell mit zu beurteilen. Dabei sollte auch der öffentliche Raum mit einbezogen werden, respektive der gesamte durch das Projekt beeinflusste Raum.

Dabei sollten windsensible Nutzungen, wie Eingänge, Parkanlagen, Terrassen, Spielplätze, Einkaufsstrassen, etc. auf dem Nutzungsplan hervorgehoben werden. Auch die Eigenschaften des Bodens sind zu berücksichtigen, da erhöhte Windgeschwindigkeit entsprechend leichte Partikel, z.B. von offenen versickerungsfähigen mineralischen Flächen / Sand im Sandkasten, aufwirbeln kann, welche so allenfalls ins Auge gelangen können.

Kritische Orte können aber im urbanen Umfeld, wie in Abbildung 9 ersichtlich, auch an benachbarten Gebäuden auftreten. Insbesondere auch dort wo hohe Druckunterschiede auf Grund der Anordnung der Gebäude (Abbildung 22 b-e) oder aufgrund der Gestaltung des Gebäudes selber z.B. Durchbrüchen, etc. (Abbildung 22 a) kurzgeschlossen werden (pressure shortcut) entstehen hohe Windgeschwindigkeiten. Auch können Dachterrasse oder Balkone kritisch sein und sollten genauer betrachtet werden.

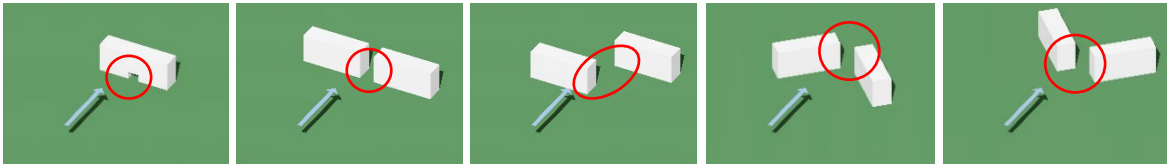


Abbildung 22 Beispiele für sensible Orte betreffend Windkomfort bei Bauten a) pressure shortcut b) schmale Zwischenräume bei Bauten c) schmale Zwischenräume bei versetzt hintereinanderliegenden Gebäuden d) e) bei Lücken zwischen angewinkelten Gebäuden. (Bilder: A. Rubin)

### 3. Windgutachten respektive Windsimulation

Der Wind sollte bei allen alleinstehenden Gebäuden mit einer Höhe von mehr als 16m genauer betrachtet werden. Liegt das Gebäude aber in einem geschlossenen urbanen Umfeld, so sollte der Wind ab einer Gebäudehöhe, die der doppelten der mittleren Gebäudehöhe der umgebenden Gebäude entspricht, genauer betrachtet werden. Dies gemäss den bereits in Kapitel 5 aufgeführten Kriterien. Die Vegetation sollte dabei mit in die Betrachtung einfließen.

Dazu sollte jeweils von einem Spezialisten ein Bericht verfasst werden. Dieser kann betreffend den Betrachtungen zur Wind- und Luftsituation bereits ein Teil der Nutzungsvereinbarung mit dem Bauherrn sein.

### 4. Bereits beim Entwurf zu berücksichtigende grundlegende Abhilfemassnahmen

Die Form des Gebäudes, die Orientierung zum Wind sowie der Kontext haben einen entscheidenden Einfluss auf die Windsituation am sowie ums Gebäude (Abbildung 18,19). Daher kann eine den lokalen Windverhältnissen angepasste aerodynamische Form hilfreich sein um die Umlenkung des Windes zu minimieren.

Weitere mögliche Massnahmen:

- am Gebäude um den Fallwind abzuwenden oder zu minimieren: Vordächer / Balkone / Gebäudesockel (Podium) ähnliche Erweiterungen speziell an sensiblen Stellen (Abbildung 23 a und b)
- um das Gebäude herum, um direkte oder umgelenkte Fallwinde abzumindern oder abzulenken: Bepflanzung (Bäume, Pergola), Windschutzwände / -zäune oder Hecken (diese müssen aber präzise eingesetzt werden) (Abbildung 23 c)

Bepflanzungen (Bäume, Sträucher, Hecken, Pergolen, etc.) können zur Umlenkung des Windes und zur Abminderung der Windgeschwindigkeit eingesetzt werden. Dabei ist zu beachten, ob die Bäume Blätter tragen (Sommer) oder nicht (Winter). Weiter sollte auch beachtet werden, dass die Bepflanzung auch vom Wind beeinflusst wird und entsprechend gepflegt werden muss (Windbruch, etc.). Daher sollten der Situation angepasste Pflanzen ausgewählt werden.

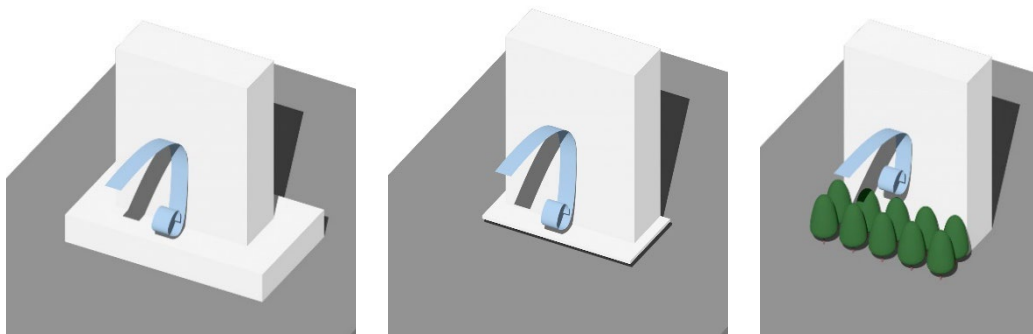


Abbildung 23 Beispiele für Massnahmen zur Vermeidung von Windwalzen am Boden durch a) Podest b) Vordach c) Bepflanzung mit Bäumen/Pergola. (Bilder: A. Rubin)

## 5. Hinweis betreffend Planungssicherheit / -aufwand

Dieses Wissen sollte bereits zu Beginn in den Entwurf einfließen, denn ein schlechter Windkomfort kann die Gebrauchsfähigkeit eines Gebäudes stark einschränken. Da effiziente Abhilfemassnahmen im Allgemeinen bauliche Massnahmen, also teuer sind und den jeweiligen Entwurf wesentlich verändern, sollten diese bereits in den dieser Phase einfließen.

Da Vorhersagen der Aerodynamik von Gebäuden im Allgemeinen und insbesondere im urbanen Umfeld kompliziert ohne entsprechende Werkzeuge (Windkanal/CFD) nicht möglich sind und bis zum Erfüllen der Kriterien allenfalls ein iterativer Prozess notwendig ist, sollte dieser Aufwand, Zeit und Kosten, bereits frühzeitig berücksichtigt werden.

## 6.2. Vorgehen betreffend Mikroklima

Im Rahmen der vom UGZ (Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich) im Jahr 2015 bei der Professur für Bauphysik ETHZ sowie der Abteilung Multiscale Studies for the Built Environment der Empa in Auftrag gegebenen Mikroklimastudie zur Testplanung «Thurgauerstrasse West» wurde für drei Testentwürfe das Mikroklima an einem heissen Sommertag simuliert. Aus den CFD Simulationen ergaben sich folgende Erkenntnisse:

- Gebäudeoberflächen, insbesondere die der Sonne zugewandten, können sich stark aufheizen. Durch ein hohes Albedo (helle Farbe) kann dieses Aufheizen vermindert werden, was auch einen Einfluss auf die Lufttemperatur der Umgebung hat. Bleibt diese erwärmte Luft zwischen den Gebäuden stehen, so können sich sehr lokale Wärmeinseln bilden.
- Weiter sollte keine über den umgebenden Dachflächen erwärmte Luft durch ein Hochhaus in den Stadtkörper abgelenkt werden, was zu einer Verschlechterung des thermischen Komforts führen würde. Die umgebenden Dachflächen sollen also klimaoptimiert sein und die Luft sollte nicht entlang von erwärmten (tiefes Albedo, hohe Speicherkapazität) Oberflächen in den Stadtkörper strömen.

## 7. Allgemeine Faustregeln für eine gute Durchlüftung/Mikroklima der Stadt

Damit man die Windverhältnisse an einem Ort versteht, sollten diese genau analysiert werden, wobei nicht nur auf die Windrichtung und Windmuster sondern auch auf die Lufttemperatur geachtet werden sollte, um so die kühlenden Winde, insbesondere während Hitzeperioden, zu identifizieren. Dazu existieren bereits einige Informationen wie z.B. die Fachplanung Hitzeminderung betreffend Kaltluftströmen auf welche kurz im Kapitel 6.2. und 6.3 eingegangen wird.

Dieses Wissen zur Windsituation und dazu auch der Luftqualität ist bereits heute, und zukünftig noch mehr, für die kontrollierte sowie passive Lüftung/Nachtauskühlung der Innenräume wichtig.

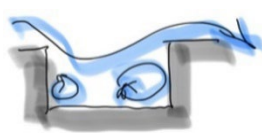
### 7.1. Durchlüftung bei Windsituationen

Häuser jeder Höhe sowie Vegetation, insbesondere Hecken und Bäume, verändern die Rauigkeit der Erdoberfläche und bremsen den Wind ab. Je höher und dichter diese sind umso mehr wird der Wind abgebremst und umgelenkt oder gestaut und fliesst dann darüber. Dadurch verringert sich die Durchlüftung des Stadtkörpers. Einzelne Hochhäuser, die über diesen Stadtkörper hinausreichen können, durch Umlenkung des Windes, aber wieder zu einer besseren Durchlüftung beitragen, da durch diese Umlenkung wieder kühlere Luft aus höher liegenden Luftschichten in den Stadtkörper geführt wird. Dabei sollte aber auf die vorgängig erläuterten Massnahmen geachtet werden, damit der Windkomfort nicht beeinträchtigt wird.

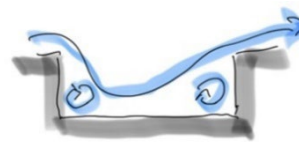
Für eine gute Durchlüftung ist eine heterogene Höhe der Gebäude von Vorteil, die Durchlüftung kann aber auch durch Anpassung der Proportionen zwischen den Gebäuden kontrolliert werden. Hierbei ist zum Beispiel zu beachten, dass nahe aneinander stehende Gebäude zu einem sogenannten «skimming flow regime» (Abbildung 20a) führen, bei dem frische/kühle Luft nur über den Dächern vorbeiströmt, und die Durchlüftung des Strassenraums somit nicht ausreichend stattfindet (siehe Skizze) Wird die Distanz zwischen den Gebäuden erhöht, so verändert sich die Strömung und der Wind reicht, je weiter diese auseinanderstehen, je eher wieder bis auf den Boden (Abbildung 20c).



Skimming flow  
H/B: 1



wake interference flow  
H/B: 0.66



isolated roughness flow  
H/B: 0.4

Abbildung 20 Beispiele für Proportionen des Raumes zwischen Bauten a) skimming flow b) wake interference flow c) isolated roughness flow. (Bilder: A. Rubin)

Die Proportionen in Abbildung 20 gelten auf ebenem Terrain und sind Annäherungen da es keine scharfen Grenzen gibt, da dies unter anderem auch von der Länge der Strassenschlucht abhängt (nach Oke 1988 und Baik und Kim 1998, aus City an Wind, Climate as an Architectural Instrument, DOM publishers, 2014, page 75). Sind zusätzlich noch Bäume in diesem Raum vorhanden, so verändern sich die Verhältnisse wieder, da diese den Wind blockieren können.

Auch sollten am Rand der Stadt keine hohen linearen und kompakten Strukturen aufgebaut werden (Abbildung 21 a /c), die den gewünschten kühlenden Wind blockieren. Diese Winde sollten in den Stadtkörper eindringen können. Offene Windkorridore ermöglichen ein effizientes Durchlüften

## Wind bei Hochhäusern

im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich

(Abbildung 21 b). Dies insbesondere hinsichtlich der Auskühlung der Stadt und Abtransport der Schadstoffe nach einer Hitzeperiode.



Abbildung 21 a) Vermeidung von windblockierenden Grossstrukturen b) Bildung von offenen Windkorridoren im Stadtkörper c) Vermeidung des Blockierens des Windes an der Stadtgrenze durch hohe kompakte und lineare Bebauung. (Bilder: A.Rubin, nach E. Ng, 2009 und Städtebauliche Klimafibel) *Bilder müssen aus Copyright Gründen noch verändert werden, also momentan noch weglassen!*

### 7.2. Kaltluft aus der Umgebung bei klaren Nächten

In klaren Nächten bildet sich in der Umgebung von Städten über offenen Vegetationsflächen und Wäldern kalte Luft. Ist ein geneigtes Terrain vorhanden so fliesst diese senkrecht zur Neigung den Hang herunter. Ist dieses nun, wie in Zürich, in Richtung der Stadt geneigt, so sollte diese Luft möglichst weit in den Stadtkörper geleitet werden (siehe Fachplanung Hitzeminderung, Kaltluftsystem). Dafür sollten Kaltluftleitbahnen ausgebildet werden. Damit diese Luftleitbahnen die Kaltluft möglichst weit in die Stadt hineinführen, sind folgende Randbedingungen zu erfüllen (nach Mayer et al., 1994; aus Henninger und Weber, 2019, S.118):

Eindringtiefe / Breite im Verhältnis von etwa 20:1, z.B. 1km Eindringtiefe erfordert eine 50m breite Kaltluftschneise welche folgende Anforderungen erfüllt:

- Hindernisbreite innerhalb der Luftleitbahn < 10% der Breite der Luftleitbahn
- Hindernishöhe innerhalb der Luftleitbahn < 10m
- Aerodynamische Rauigkeitslänge  $z_0$  < 0.5m (sehr rau = kultivierte Landschaft mit grösseren Objekten mit grossem Abstand)
- Bei mehreren Hindernissen innerhalb der Luftleitbahn sollte das Verhältnis von Hindernishöhe zu horizontalem Abstand der Hindernisse < 0,1 für Gebäude und < 0,2 für Bäume sein.
- Keine Bebauungs- und Bewuchsvorsprünge an den Rändern der Luftleitbahn
- Die längere Seite eines Hindernisses sollte parallel zur Achse der Luftleitbahn ausgerichtet sein.

Bevorzugt werden diese Kaltluftleitbahnen als Grünflächen / Parkanlagen oder Fließgewässer realisiert. Auch sollten keine hohen linearen Baukörper oder Hecken dem Kaltluftstrom den Zugang zur Luftleitbahn blockieren oder von den zu kühlenden Stellen weggleiten.

### **7.3. Thermisch induzierte Schwachwinde im Stadtkörper bei klaren Nächten**

Thermische Winde entstehen dort, wo ein grosser Temperaturunterschied herrscht. Wird eine Fläche von der Sonne erhitzt, so wärmt sich diese je nach Eigenschaften des Materials stärker oder weniger stark auf und kühlt sich je nach Beschaffenheit wieder schneller oder langsamer ab, wenn die Sonnenstrahlen oder andere Wärmequellen weg sind.

Entstehen in der Stadt, oder zwischen der Stadt und dem Umland, kleinräumig grössere Temperaturunterschiede, so könne Flurwinde entstehen. Dies geschieht am ehesten abends und nachts, wenn die UHI (Urbane Hitzeinsel) am grössten ist, d. h. zwischen stark überhitzten Gebieten und bereits abgekühlten, meist offenen Parkanlagen, oder umlegenden ruralen Gebieten die Lufttemperaturdifferenz am grössten ist. Diese wenig mächtigen kühlen Ausgleichswinden sollten keine Hindernisse (Mauern, Hecken, etc.) in den Weg gestellt werden, damit diese ihre Wirkung entfalten können. Diese reicht aber trotzdem meist nur wenig tief ins bebaute Gebiet. Dabei ist auch die Grösse der Ausgleichsflächen wichtig. So entwickeln Flächen von unter 1ha oft keine breite Wirkung sondern nur lokal einen Effekt.

Eine weitere thermisch induzierter Windart sind die Seewinde. So bläst dieser tagsüber vom kühleren See in Richtung aufgewärmtes Land und bringt kühle Seeluft. Abends respektive nachts kehrt die Windrichtung und kühler Wind bläst von der abgekühlten Landschaft in Richtung warmem See. Die Winde am Zürichsee sind dabei stark durch die nähere und weitere Topographie geprägt.

Tagsüber ist der See kühler als die Stadt und ein kühler thermisch induzierte Wind bringt kühle Luft vom See in die Stadt. Diese wird aber durch die dichte Uferverbauung am Eindringen in diese behindert. Nur dort wo breite Strassen oder hier insbesondere die Mündung der Limmat ist kann diese weiter in die Stadt vordringen. Nachts besteht kein substanzieller Temperaturunterschied mehr zwischen dem warmen See und der aufgewärmten Stadt, es kann also keine thermisch induzierten Winde entstehen.

Die kühlen Berg- und Hangwinde sind darum für die nächtliche Kühlung der Stadt von grösserer Bedeutung.

## Appendix A

Für die Gitteranalyse wird die Situation mit einem alleinstehenden Gebäude der Höhe  $2H$  herangezogen. Es werden vier unterschiedliche Gittergrößen, die einen Verfeinerungsfaktor von Wurzel 2 aufweisen, simuliert: Grob:  $180'000$  Zellen, Basis:  $460'000$  Zellen, Fein:  $1'300'000$  Zellen, Feinste:  $3'600'000$  Zellen. Dadurch wird garantiert, dass die Resultate entsprechend präzise sind, dadurch aber nicht unnötig Rechenressourcen verbraucht werden. Alle weiteren Simulationen werden dann mit der damit bestimmten Gittergröße durchgeführt.

Im Detail werden aus den vier Berechnungen die vertikalen Windgeschwindigkeitsprofile an zwei verschiedenen Positionen in der Mitte, im Abstand von 2 und 5 Metern vor dem Gebäude, und die Windgeschwindigkeiten entlang einer Linie in 2m Höhe und im Abstand von 2m um das Gebäude miteinander verglichen. Dadurch kann die Abweichung zwischen den Berechnungen aufgezeigt werden. Sobald von einer Zellengröße zur nächstkleineren keine wesentlichen Abweichungen mehr ersichtlich ist kann auf eine weitere Verfeinerung der Zellen verzichtet werden.

Die Resultate der Analyse zeigen in Abbildung A1, dass eine Gittergröße mit  $1'300'000$  Zellen die gewünschte Präzision bringt. Wie die Grafiken zeigen, sind die Unterschiede ab der Variante «fein» nicht mehr wesentlich.

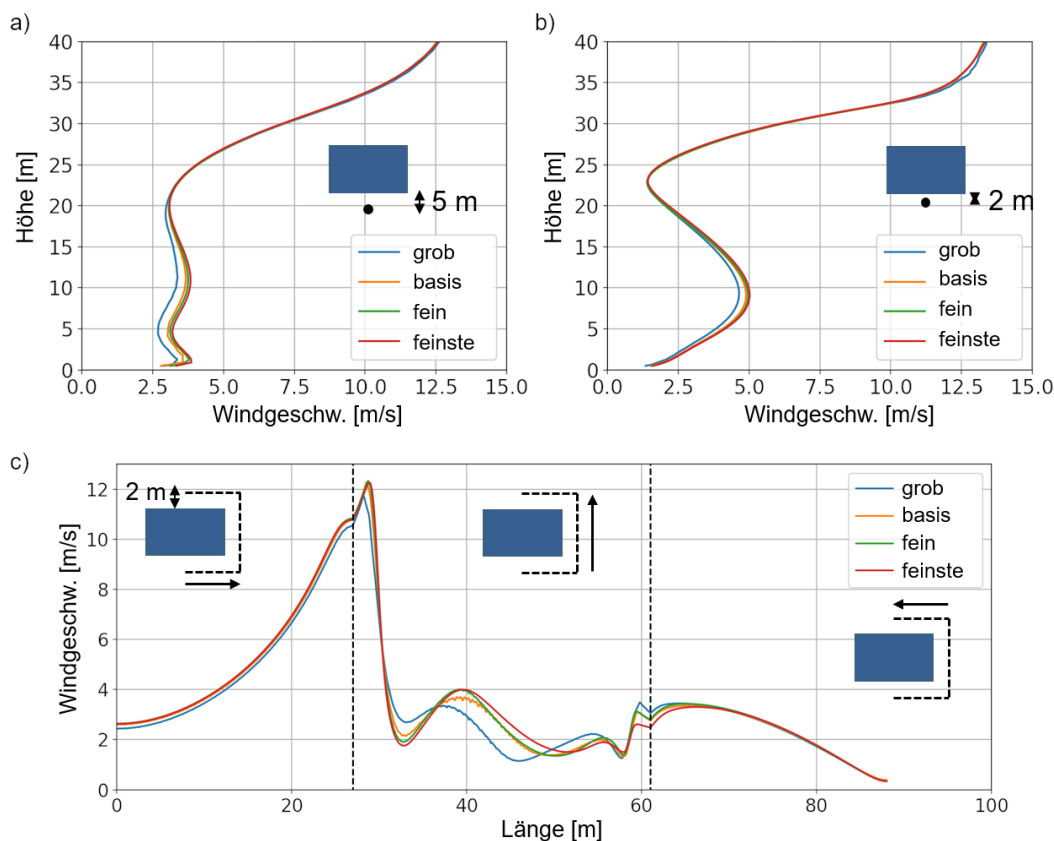


Abbildung A1. Vertikale Windgeschwindigkeitsprofile mit vier unterschiedlichen Gittergrößen im Abstand von a) 5 und b) 2 m vor dem Gebäude. Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 2m und einem Abstand von 2m vom Hochhaus. (Grafiken: A. Kubilay)

## **Appendix B**

Vorgehen betreffend Windkomfort – Faustregeln (Zusammenfassung)

1. Erste Analyse des lokalen Windfelds
  - a. Befinden sich bereits Hochhäuser in unmittelbarer Umgebung?
  - b. Ist das geplante Gebäude (teilweise) freistehend, zum Beispiel am Rande eines Parks?
  - c. Wie hoch ist die mittlere Gebäudehöhe der umliegenden Bebauung?
2. Nutzungsanalyse
  - a. Welche Aktivitäten sind im unmittelbaren Umfeld um das Gebäude geplant? Gibt es z.B. Restaurants mit Terrassen, Parkanlagen, Einkaufsstrassen, etc.?
  - b. Gibt es sensible Orte in unmittelbarer Nähe oder im weiteren Einflussgebiet des Gebäudes? Dies sind z.B. Krankhäuser, Kindergärten und Schulen, Spielplätze, Parks, etc.
3. Erstellen einer Windstudie
  - a. Eine detaillierte Windstudie durch numerische (CFD) Simulationen oder Windkanal-Messungen sollte in Betracht gezogen werden, wenn die vorläufige Windfeld- und Nutzungsanalyse aufgezeigt hat, dass es sensible Bereiche gibt, auf die das Gebäude Einfluss hat.
  - b. (Teilweise) freistehende Gebäude mit einer Höhe über 16m: hier muss die Gebäudenutzung und Gebäudegeometrie sorgfältig überprüft werden, beispielsweise, dass sich die Gebäudeeingänge nicht an den Ecken des Gebäudes befinden, wo grössere Windverstärkungen stattfinden. Eine Windstudie kann in einigen Fällen ratsam sein.
  - c. Kleine Hochhäuser mit einer Höhe bis zu 2H (H = mittlere Höhe der umgebenden Bebauung): hier ist ebenfalls eine Windstudie ratsam, falls es sensible Bereiche in der Nähe oder exzessive Nutzung der umliegenden Aussenräume gibt.
  - d. Mittlere Hochhäuser mit einer Höhe von 2H bis 4H: hier sollte ein:e Expert:in eine Analyse zum Wind vornehmen und abschätzen, ob eine Simulation/Windkanalstudie notwendig ist, und dies in einem ausführlichen Bericht zum vorgesehenen Projekt darlegen. Dabei sollte nicht nur das Projekt alleine, sondern auch die Umgebung betrachtet werden. Es sollten auch die Auswirkungen auf die zukünftig mögliche Umgebung berücksichtigt werden, insbesondere etwaige Pläne zur Verdichtung des Stadtgebiets.
  - e. Hochhäuser mit einer Höhe über 4H: in diesem Fall sollte zwingend ein Windgutachten gemäss der international bekannten Richtlinien eingefordert werden (z.B. City of London – Wind Microclimate Guidelines, NEN 8100-2006)



## Literaturliste

- J. Allegrini, M. Neophtou, A. Rubin, Mikroklimastudie "Thurgauerstrasse West" im Auftrag von Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich, 2015
- E. Arens, D. Ballanti, Outdoor comfort of pedestrians in cities. In: G. M. Heisler, L. P. Herrington, eds. Proceedings of the conference on metropolitan physical environment; Gen. Tech. Rep. NE-25. Upper Darby, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. (1977) 115-129. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/11538>
- W. J. Beranek, H. Van Koten, Beperken van windhinder om gebouwen, deel 1, Stichting Bouwresearch no. 65 (1979)
- B. Blocken, S. Roels, J. Carmeliet, Modification of pedestrian wind comfort in the Silvertop Tower passages by an automatic control system, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92 (2004) 849-873. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.04.004>.
- B. Blocken, T. Stathopoulos, J. Carmeliet, CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems, Atmospheric Environment. 41 (2007) 238–252. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.019>.
- B. Blocken, J. Carmeliet, Pedestrian wind conditions at outdoor platforms in a high-rise apartment building: generic sub-configuration validation, wind comfort assessment and uncertainty issues, Wind and Structures. 11 (2008) 51–70. <https://doi.org/10.12989/WAS.2008.11.1.051>.
- B. Blocken, P. Moonen, T. Stathopoulos, J. Carmeliet, Numerical Study on the Existence of the Venturi Effect in Passages between Perpendicular Buildings, Journal of Engineering Mechanics, 134 (2008) 1021-1028. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2008\)134:12\(1021\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:12(1021)).
- B. Blocken, W. D. Janssen, T. van Hooff, CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus, Environmental Modelling & Software 30 (2012) 15-34. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.009>.
- A. G. Davenport, An Approach to Human Comfort Criteria for Environmental Wind Conditions, Teaching the Teachers Colloquium on Building Climatology Stockholm, 1972
- J. C. R. Hunt, E. C. Poulton, J. C. Mumford, The Effects of Wind on People; New Criteria Based on Wind Tunnel Experiments, Building and Environment. 11 (1976) 15-28. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(76\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0360-1323(76)90015-9)
- S. Henninger, S. Weber, Stadtklima, UTB, 2019
- P. Hupfer, W. Kuttler, F. M. Chmielewski, H. Pethe, Witterung und Klima, 11. Auflage, Teubner-Springer 2005. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-322-96749-7>
- W.D. Janssen, B. Blocken, T. van Hoff, Pedestrian wind comfort around buildings: Comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study, Building and Environment 59 (2013) 547-562. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.012>
- M. Krautheim, R. Pasel, S. Pfeiffer, J. Schultz-Granberg, City an Wind - Climate as an Architectural Instrument, DOM publishers, 2014

- A. Kubilay, J. Allegrini, D. Strebel, Y. Zhao, D. Derome, J. Carmeliet, Advancement in Urban Climate Modelling at Local Scale: Urban Heat Island Mitigation and Building Cooling Demand, Atmosphere 11 (2020) 1313. <https://doi.org/10.3390/atmos11121313>.
- T. V. Lawson, A. D. Penwarden, The Effect of Wind on People in the vicinity of Buildings, Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures (1975) 605-622.
- H. Mayer, W. Beckröge u. A. Matzarakis, Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. In: UVP-Report, 5, (1994) pp. 265-268.
- NEN 8100:2006, Windhinder en windgevaar in de gebouwde omgeving.
- E. Ng, Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities – air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong, Building and Environment 44 (2009) 1478 – 1488.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.013>
- ÖREB-Kataster, 2018, Kanton Zürich Nutzungsplanung (öffentlich-rechtliche Eigentumsbeschränkungen).
- M. Plame, A. Salvati, Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies, Springer, 2021.  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-65421-4>
- Städtebauliche Klimafibel – Hinweise für die Bauleitplanung, Baden-Württemberg – Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau, 2012. <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de>
- E. Willemsen, J. A. Wisse, Design for wind comfort in the Netherlands: Procedures, criteria and open research issues, Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 95 (2007) 1541-1550.  
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.02.006>
- Windatlas Schweiz - windatlas.ch, Bundesamt für Energie, Zugriff auf Daten über <https://opendata.swiss/de/dataset/windatlas-schweiz-jahresmittel-der-modellierten-windgeschwindigkeit-und-windrichtung-in-50-m-ho>
- Wind Microclimate Guidelines for developments in the City of London, August 2019, City of London Corporation. <https://www.cityoflondon.gov.uk/assets/Services-Environment/wind-microclimate-guidelines.pdf>

**Wind bei Hochhäusern** **im Auftrag des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich**

---

**Weiterführende Literatur**

Outdoor Human Comfort and its Assessment, ASCE, 2004

Urban Aerodynamics – Wind Engineering for Urban Planners and Designers, ASCE, 2011

Thermal Comfort Guidelines for developments in the City of London, December 2020, City of London Corporation. <https://www.cityoflondon.gov.uk/assets/Services-Environment/thermal-comfort-guidelines-for-developments-in-the-city-of-london.pdf>

Hitze in Städten, BAFU, 2018.

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/hitze-in-staedten.html>

Fachplanung Hitzeminderung, Stadt Zürich, 2020. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>