

Kanton Zürich, Baudirektion
Tiefbauamt
Fachstelle Lärmschutz
Walcheplatz 2
8090 Zürich

Anforderungen an die Durchlüftung bei Lärmschutzriegelbauten

Bericht

09. August 2021

Impressum

Anforderungen an die Durchlüftung bei Lärmschutzriegelbauten

Auftraggeber: Kanton Zürich, Tiefbauamt, Fachstelle Lärmschutz
Projektverantwortliche: Daniela Kauf

Auftragnehmer: GEO Partner AG, Basel
Projektleitung: Dr. Andreas Wicki
Fachbearbeitung: Dr. Andreas Wicki
Qualitätssicherung: Regula Winzeler

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und Projektziele	4
2	Vorgehen	5
2.1	Literaturstudie.....	5
2.2	Numerische Simulation	5
2.3	Varianten	6
3	Windsysteme und Strömungsdynamik	8
3.1	Entstehung Berg-/Talwindsysteme	8
3.2	Rauigkeit.....	10
3.2.1	Kategorisierung	10
3.2.2	Berechnung der Einflussgrössen.....	11
3.3	Strömungsmechanik um Gebäude im Wind.....	12
3.3.1	Windfluss um Einzelgebäude.....	12
3.3.2	Gebäudestellung und Anordnung.....	13
3.4	Versuche zu Windstau von kleinen Hindernissen	14
3.5	Inputs Fachplanung Hitzeminderung	15
4	Resultate der Simulationen	16
4.1	Vorbemerkungen	16
4.2	Darstellung der Resultate.....	16
4.3	Hangabwind	18
4.4	Talabwind	20
4.5	Vergleich Hang-/Talabwind	22
4.6	Vergleiche Varianten Hangabwind.....	23
4.7	Resultatbeschreibung.....	24
4.7.1	Unterschiede zwischen Hang- und Talabwind.....	24
4.7.2	Unterschiede Riegel.....	25
5	Erkenntnisse	27
5.1	Beantwortung der Fragestellungen.....	27
5.2	Lösungsansätze	28
5.3	Datenbezug	28
	Anhang	29
A.1	Zitierte Grundlagen	29
A.2	Ansichten Käferberg und Albisriederplatz.....	30
A.3	Berechnung der Nullpunktverschiebung und Rauigkeitslänge.....	32

1 Ausgangslage und Projektziele

Lärmschutz und die Berücksichtigung von stadtklimatischen Effekten wie Kaltluftströmungen bei Bauvorhaben haben das gemeinsame Ziel, Wohnen im urbanen Raum angenehmer zu gestalten. Während mit einer möglichst geschlossenen Bebauung entlang von stark befahrenen Strassen und Bahnlinien versucht wird, den Anforderungen des Lärmschutzes gerecht zu werden, wird bei einer stadtklimatisch optimierten Bauweise für Frischluftströmungen ein möglichst hindernisfreier Zugang zu Wohnbauten angestrebt. Besonders in Hanglagen mit ausgewiesener Kaltluftströmung kann dies zu Zielkonflikten führen.

Gleiche Ziele, Konträre Umsetzung

Die Thematik Stadtklima hat in den letzten Jahren vermehrt an Bedeutung gewonnen und wird zunehmend in der Planung berücksichtigt. Gleichzeitig soll auch der Lärmschutz angemessen berücksichtigt werden.

Stadtklima mit grosser Beachtung

Folgende Fragestellungen werden mit dem Projekt beantwortet:

Fragestellungen

- Wie kann der Zielkonflikt entschärft werden? Welche Situationen sind besonders kritisch?
- Für eine ausreichende Lärmschutzwirkung genügen oftmals ein bis zweigeschossige Gebäude/Hindernisse. Kann ein Kaltluftstrom ein solches Hindernis überströmen?
- Unter welchen Bedingungen kann die Kaltluft ein Hindernis überfließen/umfließen/durchfließen?

Ziel der Analysen sind allgemeingültige Aussagen zur Hinderniswirkung unterschiedlicher Gebäudehöhen (Anzahl Geschosse) unter spezifischen Bedingungen und eine Formulierung von möglichen Lösungsansätzen (z.B. Stellung oder Staffelung von Gebäuden).

Ziel des Projektes

2 Vorgehen

Aufgrund der Komplexität der Thematik werden im Projekt umfangreiche Literaturstudien sowie Simulationen durchgeführt. Zum einen soll über eine Literaturstudie herausgefunden werden, was bereits bekannt ist und gemacht wurde, zum andern sollen mittels numerischer Simulationen spezifische Windsituationen mit unterschiedlichen Hindernissen, ähnlich einer Windtunnel-Analyse, getestet werden.

2.1 Literaturstudie

Berg-/Talwindssysteme gehören zu den meisterforschten lokalen Windsystemen, da ihr Auftreten allseits bekannt sowie regelmässig beobachtbar ist und ihre Auswirkungen von grosser Relevanz für die lokale Bevölkerung sind. Sie sind primär von der örtlichen Topographie abhängig und lassen sich besonders unter austauscharmen Wetterlagen sehr gut untersuchen. Gleichermassen ist jedes topographische System einzigartig in seiner Form und Ausrichtung, was jedem dadurch erzeugten Windsystem eine eigene Dynamik verleiht. Die Resultate von einzelnen Studien sind daher nur bedingt allgemein gültig. Grossräumige Tendenzen lassen sich jedoch ableiten und auf die Dynamik in anderen geographischen Gebieten schliessen.

Grundlegendes zu Berg-/Talwind-systemen

Eine Schwierigkeit ist, dass solche Windsysteme meist in ungestörtem Gelände ohne oder mit nur spärlicher Bebauung sowie in alpinen Gebieten mit stärkerer Ausprägung erforscht werden. Trotzdem sollen die Resultate aus vorangehenden Forschungsstudien analysiert und die Erkenntnisse daraus für die Situation in der Stadt Zürich genutzt werden.

Viele Studien in Räumen mit wenig Bebauung sowie im alpinen Raum

Einen wichtigen Beitrag für das Zusammenspiel von Windsystemen und städtischer Bebauung liefern Rauigkeitsstudien. Die städtische Rauigkeit ist dabei abhängig von Bebauungsdichte und Bebauungshöhe. Auch hier soll ein Überblick gegeben werden, welche Werte üblicherweise als «zu rau» für Windfluss gelten und wie stark sich die Rauigkeit bei der jeweiligen Bebauung ändert.

Städtische Rauigkeit als wichtiger Parameter

2.2 Numerische Simulation

Für die Beurteilung der Hinderniswirkung von Gebäuden in unterschiedlichen Hangsituationen und mit unterschiedlicher Geschossanzahl wird eine Versuchsreihe mittels numerischer Simulation konzipiert.

Versuchsreihe mit mehreren Simulationen

Die Analysen werden mit der Software ENVI-met durchgeführt. Das Programm beinhaltet ein vollumfängliches 3D CFD-Modell (Computational Fluid Dynamics oder numerische Strömungsmechanik). Da es sich im vorliegenden Fall um komplexe Windsysteme handelt, welche sich in ihrem Profil von normalen logarithmischen Windprofilen unterscheiden (siehe Abbildung 3, S. 9), müssen die Randbedingungen entsprechend angepasst werden. ENVI-met bietet die

Mikroklimatische Simulationen

Möglichkeit, solche Anpassungen am Standardwindfeld vorzunehmen. Die Inputs dafür stammen aus dem 5x5-m regionalklimatischen Windmodell der Firma GEO-NET.

2.3 Varianten

Nach Rücksprache mit der Fachstelle Lärmschutz wurden unterschiedliche Gebäudestellungen entworfen, wie sie in der Realität vorkommen. Orientiert hat man sich dabei am Beispiel Tièchestrasse mit mehreren Riegeln entlang der Strasse und rückwärtig offener Ein-/Mehrfamilienhausbebauung.

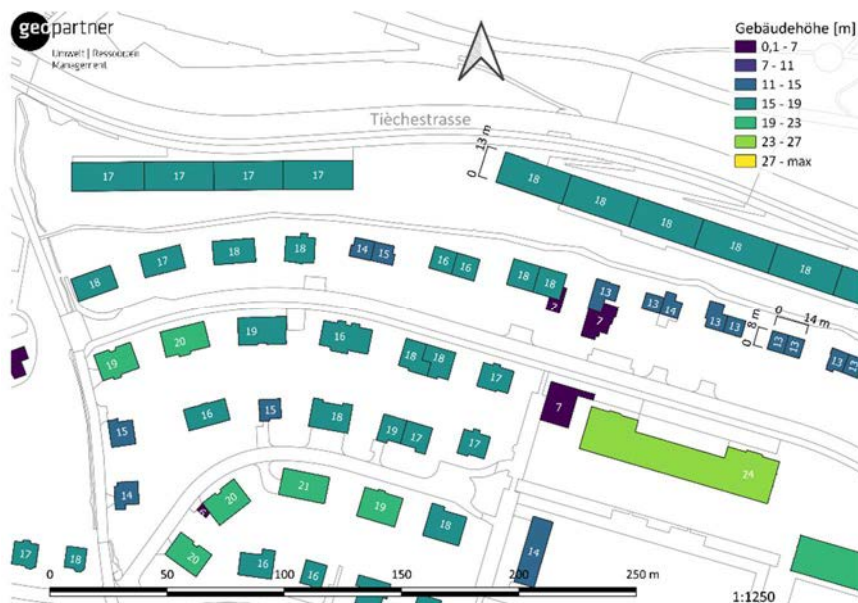


Abbildung 1: Gebäudehöhen und Grundrisse an der Tièchestrasse in Zürich.

Da Kaltluftströmungen sowohl als eher flächenhafte Hangabwinde als auch als kanalisierte Talabwindströme erfolgen können, wurden zwei unterschiedliche Strömungsbedingungen als Ausgangssituation angenommen. Die eine Windströmung repräsentiert einen Talabwind im Bereich Albisrieden/Altstetten, die andere einen flächenhaften Hangabwind vom Käferberg (westlich der Tièchestrasse, Ansicht siehe Anhang A.2).

Zwei Windströmungen:
- flächenhafter Hangabwind
- kanalisierte Talabwind

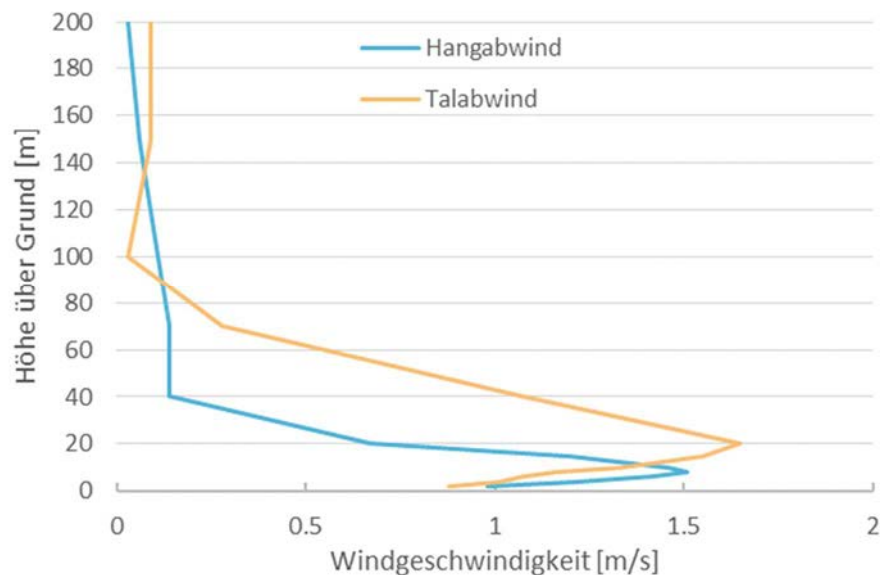


Abbildung 2: Vertikalprofile der beiden Windströmungen (Quelle: D. Funk, Firma GEO-NET)

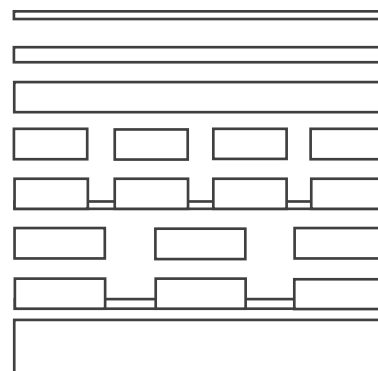
Für diese beiden Windsysteme sollen unterschiedliche Gebäudestellungen getestet werden, welche in Zusammenarbeit mit der Fachstelle Lärmschutz definiert wurden.

Grundvoraussetzungen: Die Gebäuderiegel werden 100 m breit und 12 m tief gerechnet. Pro Stockwerk werden 3 m einberechnet (plus 1 m für das unterste Stockwerk).

Daraus ergeben sich folgende 8 Varianten:

- V1: Eingeschossiger Riegel (4 m)
- V2: Zweigeschossiger Riegel (7 m)
- V3: Viergeschossiger Riegel (13 m)
- V4: Viergeschossiger Riegel (13 m) mit 3 Lücken à 10 m auf 0 m über Grund
- V5: Viergeschossiger Riegel (13 m) mit 3 Lücken à 10 m auf 3 m über Grund
- V6: Viergeschossiger Riegel (13 m) mit 2 Lücken à 15 m auf 0 m über Grund
- V7: Viergeschossiger Riegel (13 m) mit 2 Lücken à 15 m auf 3 m über Grund
- V8: Sechsgeschossiger Riegel (20 m)

Fassadenansicht Varianten:



3 Windsysteme und Strömungsdynamik

3.1 Entstehung Berg-/Talwindssysteme

Windfluss entsteht üblicherweise durch Druckunterschiede, welche ausgeglichen werden sollen. Auf einer grossräumigen Skala entsteht so unser Wetter. Doch auch ohne grossräumige Ausgleichsprozesse können sich Windsysteme entwickeln. Dies geschieht, sobald sich in heterogenem Gelände unter austauscharmen Bedingungen gewisse Flächen tagsüber stärker aufwärmen oder nachts effektiver auskühlen. Besonders in wolkenarmen und windschwachen Nächten bildet sich durch die thermische Ausstrahlung in Bodennähe kühle Luft, welche hangabwärts fliesst [1]. Die Topographie wirkt dabei als entscheidender Auslöser sowie als räumliches Steuerelement der Prozesse. Sie steuert über die Grösse und Art des Einzugsgebiets, die Hangneigung und die Weite der vorhandenen Täler die Intensität der Kaltluftflüsse.

Topographie als Auslöser und Steuerung

Weiter beeinflusst auch die Landnutzung die Bildung und Ausprägung von Kaltluftflüssen, denn die Erwärmungs- und Auskühlungsprozesse sowie Abbremsseffekte sind massgeblich von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Wälder produzieren beispielsweise ca. zweimal so viel Kaltluft wie offene Felder. Gleichzeitig kann sich Kaltluft über Wasser aufgrund der geringen Rauigkeit viel besser ausbreiten als z.B. auf einer Wiese.

Landnutzung beeinflusst Bildung von Kaltluft und Rauigkeit

Hangabwärts gerichtete Flüsse von kalter Luft werden als katabatische Winde bezeichnet. Unter vergleichbaren Wetterbedingungen mit schwachen Druckgradienten und starker Auskühlung nachts, besonders bei fehlender Wolkendecke, stellen sich diese Kaltluftsysteme regelmässig in ähnlicher Stärke für einen Standort ein. Der Abfluss muss aber keinesfalls regelmässig stattfinden. Bei Hangneigungen von mehr als 10° wurden bereits «Luftlawinen» beobachtet, welche in 5-minütigen Abständen talwärts flossen. Hangabwärts gerichtete Winde sind üblicherweise schwächer als die hangaufwärts gerichteten Winde tagsüber, welche gerne von Vögeln und Gleitschirmfliegern als thermischer Antrieb genutzt werden [2].

Regelmässig unter gleichen Bedingungen beobachtbar

Die primären Treiber dieser Windsysteme sind aus physikalischer Sicht Unterschiede in der potentiellen Temperatur mit der Höhe und unterschiedliche Erwärmung/Auskühlung entlang von Hängen, welche vertikale und horizontale Zirkulation hervorrufen. Zudem haben Orientierung, Neigung, Länge und Landnutzung der Hänge einen Einfluss auf die Ausbildung und Stärke dieser Windsysteme.

Physikalische Prozesse

Potentielle Temperatur = Temperatur auf Meeresniveau gerechnet (inkl. Erwärmung durch Druckzunahme)

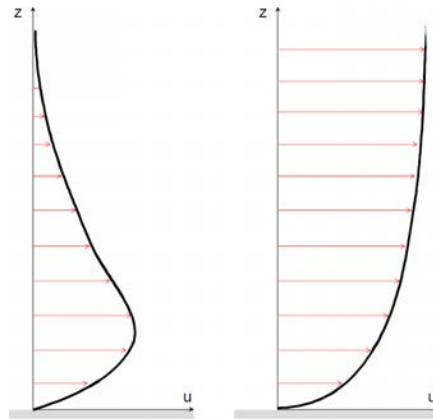


Abbildung 3: Typische vertikale Strömungsprofile in einem Kaltluftabfluss (links) und einer sonstigen Grenzschichtströmung. z = Kaltlufthöhe, u = Windgeschwindigkeit [4].

Da Kaltluftströme aufgrund des Abfließens von dichter Luft entstehen, unterscheidet sich ihr vertikales Windprofil von den übrigen atmosphärischen Strömungsflüssen (vgl. Abbildung 3). Bei Kaltluftströmungen stellt sich im Bereich zwischen einem Viertel bis zur Hälfte der Kaltlufthöhe ein Maximum der Windgeschwindigkeit ein. Die Ausprägung ist jedoch abhängig von der darunterliegenden Rauigkeit, wobei sich das Maximum bei hoher Rauigkeit in Richtung Mitte verschiebt [4]. Die vertikale Mächtigkeit der Kaltluftflüsse beträgt in alpinen Systemen typischerweise 20-50 m mit maximalen Windgeschwindigkeiten von 2-3 m/s. Diese Zahlen liegen in flacherem Gelände wohl ca. um den Faktor zwei tiefer (vgl. Abbildung 2, S. 7). Bei kleinem Einzugsgebiet sowie geringer horizontaler und vertikaler Erstreckung der Windbahnen liegen die Windgeschwindigkeiten gar unter 1 m/s. Kuttler fand für die Stadt Gütersloh ähnliche Werte mit konstanten Winden in 20-30 m Höhe. Gleichzeitig wurde in der entsprechenden Studie eine Einwirktiefe von 1.4 km in das Stadtgebiet entlang einem alten Güterbahnhof gefunden [6]. Für kleinere Hänge dürfte der Einflussbereich, je nach Fließgeschwindigkeit und Rauigkeit, im Bereich von wenigen Metern liegen.

Charakteristika Kaltluftflüsse

Die Mächtigkeit eines Kaltluftstroms kann über die vertikale Erstreckung eines Hanges relativ zur Talsohle geschätzt werden und beträgt ungefähr 5% der Differenz. Eine Differenz von 200 m ergibt somit eine Höhe des Kaltluftstroms von etwa 10 m und ein Maximum der Windgeschwindigkeit in ca. 2.5-5 m Höhe. Dies gilt jedoch nur für flächenhaften Hangabwind und nicht für zusammenfließenden Talabwind [4].

Abschätzung über vertikale Mächtigkeit des Entstehungsgebiets

Für katabatischen Wind sind Gefälle von 1:150 bis 1:100 notwendig. Bei flacherem Gelände entstehen zwar auch kleinskalige Austauschprozesse, jedoch ohne signifikanten Massenfluss. Die Windsysteme enden am Morgen typischerweise ± 20 Minuten vor/nach Sonnenaufgang [2].

Neigung

3.2 Rauigkeit

3.2.1 Kategorisierung

Die Ausbreitung von Wind ist massgeblich von der Oberflächenrauigkeit abhängig. Städte gehören dabei zu den rauesten Oberflächen überhaupt. Ob ein Stadtraum als Ventilationspfad für nächtlichen Kaltluftabfluss dienen kann und zu welcher Kategorie er gehört, ist abhängig von den folgenden Aspekten:

- Geometrische Eigenschaften von Stadträumen in Bezug zu der Orientierung, Länge, Breite, Höhe der Gebäude oder der Vegetationselemente
- Aerodynamische Oberflächenrauigkeit unter Berücksichtigung einzelner hoher Hindernisse
- Thermale und lufthygienische Eigenschaften sowie Grösse des Einzugsgebiets
- Reliefeinschnitte innerhalb der Stadt
- Charakteristika des regionalen Windfeldes

Für relevanten Windfluss auf lokaler Ebene darf die Rauigkeit gewisse Werte über eine minimale Breite (50 m) nicht überschreiten. Es gelten dabei eine maximale Rauigkeitslänge (z_0 , Mass für Rauigkeit) von 0.5 m und eine Nullpunktverschiebung (z_d , Anhebung des Windfeldes) von maximal 3 m. Die Breite von sehr hohen Gebäuden oder Elementen sollte nicht mehr als 10% der Pfadbreite betragen. Die maximale Gebäudehöhe (z_{Hmax}) darf nicht mehr als 10 m erreichen und die Gebäude sollten so gerichtet sein, dass ihre Achse entlang des Ventilationspfades zeigt. Das Verhältnis von Höhe zu Distanz zwischen den Objekten sollte 1 zu 10 betragen. Diese Eigenschaften müssen über eine Pfadlänge von mindestens 1 km eingehalten werden, damit die Fläche als Ventilationskorridor dienen kann [5].

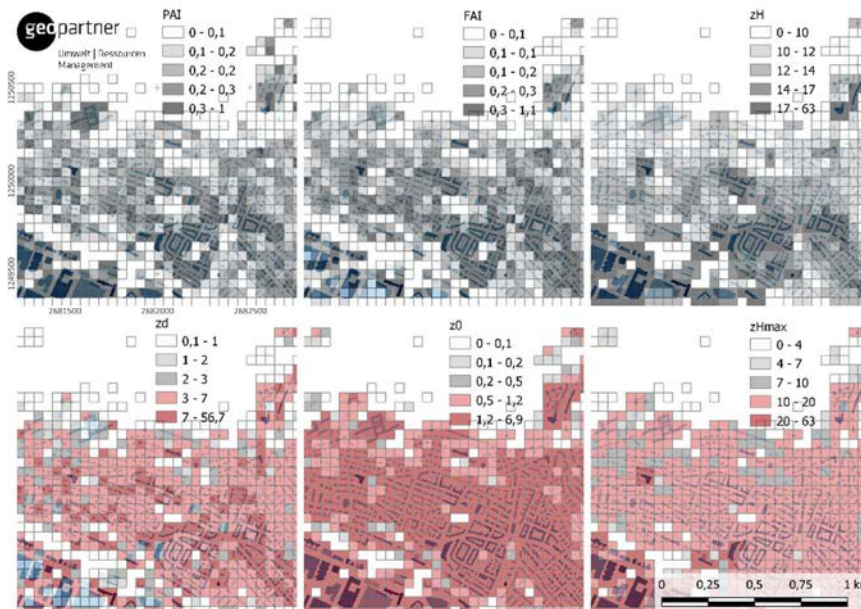
Definition von Ventilationskorridoren

Für die Berechnung von z_0 und z_d muss neben der mittleren Gebäudehöhe auch der Frontflächenindex (FAI), die maximale Gebäudehöhe und die Gebäudedefläche pro Grundfläche (PAI) berücksichtigt werden [5].

Frontflächenindex = windzugewandte Fläche pro Grundfläche

Es wird somit schnell klar, dass kaum eine städtische Oberfläche die Kriterien als Ventilationskorridor voll erfüllt. In Abbildung 4 sind die beschriebenen Parameter und ihre Grundlagen, berechnet in einem 50 m Gitter, für die Umgebung der Tièchestrasse dargestellt.

Kriterien in der Stadt in der Regel nicht erfüllt



PAI = Bebauungsdichte
FAI = Frontfläche pro Grundfläche
zH = mittlere Gebäudehöhe

zd = Nullpunktverschiebung
z0 = Rauigkeitslänge
zHmax = maximale Gebäudehöhe

Abbildung 4: Morphologische Parameter (oben), aus denen die relevanten Rauigkeitsparameter (unten) berechnet werden können. Die roten Flächen eignen sich laut dieser Definition nicht als Ventilationskorridore.

Die Tatsache, dass die meisten urbanen Flächen sich nicht als grossräumiger Ventilationskorridor eignen, bedeutet nicht, dass kein Luftmassenaustausch stattfindet. Die Luft sucht sich ihren Weg vorbei an Gebäuden durch jede Lücke und gewährleistet somit - gerade in den Randbereichen - Frischluftversorgung. Ventilationspfade ermöglichen der Luft, in ein Siedlungsgebiet einzuwirken. Ist das Ende eines Pfades erreicht, verringert sich die Geschwindigkeit des Windflusses und die dahinterliegenden Quartiere können nicht von den gleichen Frischluftmengen profitieren wie die Randbereiche des Pfades. Die Definition von Ventilationskorridoren hilft somit, den Kontaktsaum zu identifizieren und besonders schützenswerte Bereiche auszuscheiden.

Überbaute Flächen sind selten gute Ventilationspfade

3.2.2 Berechnung der Einflussgrößen

Die Größen z_0 und z_d können aus Windmessungen in unterschiedlichen Höhen anhand der Formel für das logarithmische Windprofil (vgl. Abbildung 3, S.9) für einen Punkt berechnet werden. Wie in Abbildung 4 ersichtlich ist, können diese Parameter abgeschätzt und flächenhaft berechnet werden. Häufig wird die Berechnung nach Kanda (2013) durchgeführt, welche die Dichte, Höhe und Variation von Rauigkeitselementen berücksichtigt [9]. Die Formel für die Berechnung der Parameter findet sich in Anhang A.3.

Berechnung nach Kanda (2013)

Kanda (2013) fand gute Resultate für Rauigkeitsparameter der Städte Tokyo und Nagoya. Auch in Basel konnten im Rahmen des URBANFLUXES-Projektes gute Ergebnisse mit dieser Berechnung erzielt werden. Die Berechnung nach diesem Schema ist mittlerweile ein weit verbreiteter Standard.

Gute Resultate in der Praxis

Praktische Anwendung könnten diese Formeln für die Prüfung der Rauigkeitswirkung neu geplanter Überbauungen finden. Da alle Faktoren aus Gebäudedaten abgeleitet werden können (Fläche, zu der die Bebauung in Relation gesetzt wird, könnte z.B. die Grundstückfläche sein), könnte somit für jedes Bauvorhaben die Veränderung der urbanen Rauigkeit berechnet werden. Gerade in Stadtrandbereichen und insbesondere im Einwirkungsbereich von Kaltluftabfluss könnte diese Berechnung hilfreich sein.

Praktische Relevanz

3.3 Strömungsmechanik um Gebäude im Wind

3.3.1 Windfluss um Einzelgebäude

Die primären Erzeuger von städtischer Rauigkeit sind die Gebäude. Anders als Vegetation sind sie nicht permeabel, unflexibel und üblicherweise scharf gekantet. Sie erzeugen dadurch Strömungswiderstand und starke Verwirbelungen in ihrer Umgebung und im Abstrombereich. Es entstehen Wellen mit erhöhter turbulenter kinetischer Energie auf Kosten der mittleren kinetischen Energie.

Gebäude erzeugen Rauigkeit

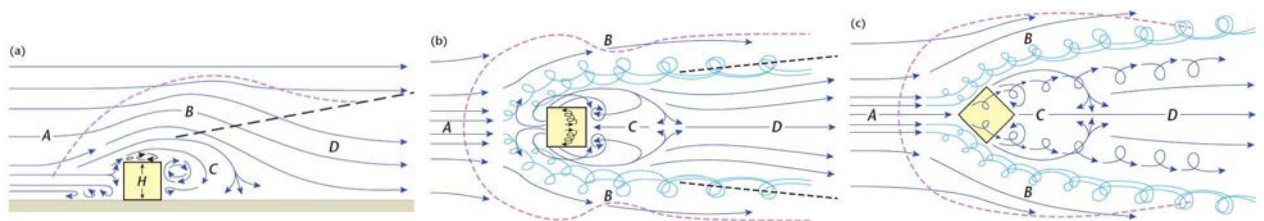


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Umfliessens eines Gebäudes [3].

Beim Auftreffen des Windes auf eine Fassade entstehen Störungen im Druckfeld, welche mit den Schwankungen des anströmenden Windes pulsieren. Windfluss in der Umgebung eines Gebäudes ist aus zwei Gründen äusserst dynamisch:

1. Der Wind muss um und über das Gebäude ausgelenkt werden.
2. Die Strömungsgeschwindigkeit von reibungsbehafteten Strömungen an einer festen Oberfläche muss stets gleich Null sein (Haftbedingung). Dies ist bei allen realen Strömungen der Fall. Trifft die Strömung auf scharfe Kanten, kann sie der Kontur nicht folgen und löst sich vom umströmten Körper ab (Grenzschichtablösung). Vergleichbar ist dies mit dem bekannten «Totwasserbereich» bei Flüssen oder Bächen.

Hinter der Ecke eines Gebäudes erzeugt der geringere Druck einen Fluss entgegen der ursprünglichen Richtung und erzeugt dadurch einen Wirbel. Ist die Länge des Gebäudes grösser als seine Höhe, setzt der Fluss wieder an der Oberfläche des Daches und der Fassaden an. In einer Höhe von ca. $\frac{2}{3}$ der Gebäudehöhe befindet sich der Stagnations-Punkt, von wo aus ein Fluss in alle Richtungen – über das Dach, links und rechts am Gebäude vorbei und nach unten – stattfindet (siehe Abbildung 5a).

Stagnationspunkt = $\frac{2}{3}$ der Gebäudehöhe

Hinter dem Gebäude entsteht eine Art Aushöhlung («C» in Abbildung 5, genannt «Cavity Zone») im Windfeld als Teil des gesamten Stroms, geformt aus dem Überfließen über das Gebäude und den umfliessenden Strömen um das Gebäude (Rollen). Die Ausmasse dieser Zone umfassen in lateraler Richtung ungefähr das 1-1,5-fache der Höhe. Längswindig kann sie 2- bis 3-mal die Höhe des Gebäudes für kubische Hindernisse erreichen. Hindernisse mit ausgeglichenem Höhe- zu Seite-Verhältnis bewirken eine Zone, welche das bis zu 12-fache der Höhe erreicht. Die Effekte eines Gebäudes auf den Windfluss sind laut Theorie in einer Entfernung des 5- bis 30-fachen der Gebäudehöhe spürbar ([3], S. 82 – 87).

Windstille Bereiche

3.3.2 Gebäudestellung und Anordnung

Sind Gebäude weit auseinandergesetzt ($H/B < 0.35$) entstehen individuelle Wellen ähnlich wie bei Einzelgebäuden (Abbildung 6a).

Geringe Dichte (a)

Bei höheren Dichten ($0.35 < H/B < 0.65$) beginnt die Distanz zwischen den Gebäuden mit der horizontalen Ausdehnung des Wind-Hohlraums hinter dem Gebäude übereinzustimmen (z.B. bei $B \leq 2H$). Daraus ergibt sich ein selbsterhaltendes System. In Realität sind diese stehenden Wirbel jedoch nicht statisch. Sie variieren in der Geschwindigkeit und formieren sich unregelmässig (Abbildung 6b).

Höhere Dichte (b)

Bei noch dichterem Gebäudestellung ($H/B > 0.65$) wechselt der Strom über das Gebäude in einen konstanten Fluss über Dach ohne Kontakt zu den bodennahen Schichten oder der Strassenschlucht. Der Fluss über Dach ist mehrheitlich entkoppelt von demjenigen in der Bestandsschicht. Der mittlere Windfluss darüber provoziert einen schwachen tangentialen Einfluss mit der Strassenschlucht, welcher einen leichten Vortex (Wirbel) erzeugt. In schwachwindigen Situationen ist jedoch auch dieser Einfluss nicht vorhanden (Abbildung 6c).

Dichte Strukturen (c)

Zusammengefasst bedeutet dies, dass durch eine weniger dichte Gebäudestellung die Durchlüftung auf mikrometeorologischer Ebene verbessert werden kann. Eine zu dichte Gebäudestellung führt dazu, dass das Windfeld vom Strassenniveau entkoppelt wird.

Gebäudestellung wichtig für Luftmassenaustausch im Strassenniveau

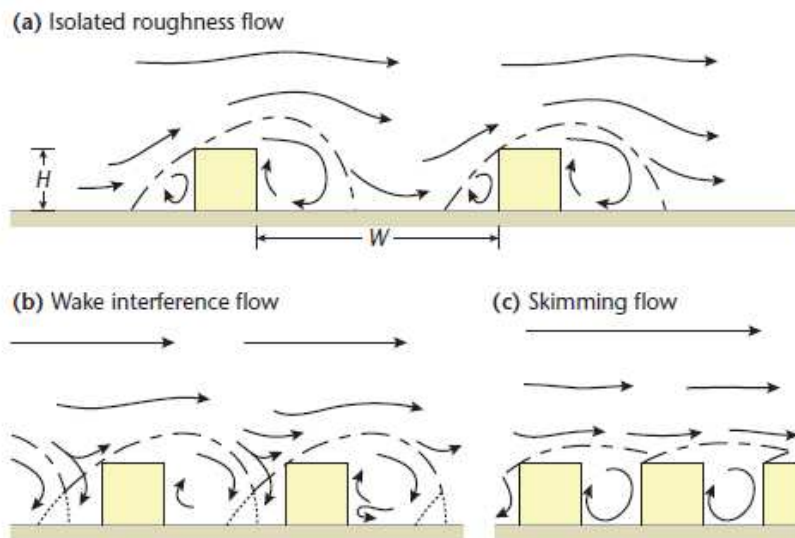


Abbildung 6: Effekt der Gebäudestellung auf den Windfluss [3].

3.4 Versuche zu Windstau von kleinen Hindernissen

Im Rahmen einer Feldstudie [7] aus den 1970er Jahren wurde die Verminderung von Kaltluftabfluss mittels Stauzaun zur Reduktion von Frostgefährdung untersucht. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass seichter Kaltluftabfluss innerhalb des Untersuchungsgebiets ein Hindernis von 5 m Höhe problemlos überströmen kann, sich jedoch die Geschwindigkeit dahinter verringert. Das entspricht den erwarteten physikalischen Prinzipien, da die Luft beim Übersteigen des Hindernisses kinetische Energie in turbulente Energie umwandelt und somit hinter dem Hindernis weniger Energie zur Verfügung hat, um die gleiche Geschwindigkeit aufrecht zu erhalten wie vor dem Hindernis. Je nach Hangneigung kann jedoch eine erneute Beschleunigung erfolgen.

Feldstudie mit Stauzaun

Mit dem gleichen Versuchsaufbau konnte zudem gezeigt werden, dass bereits eine Lücke von 10 m einen adäquaten Windfluss ermöglicht, und dass eine grössere Öffnung die Windgeschwindigkeit hinter dem Hindernis nicht zunehmend verstärkt. Es konnte zudem gezeigt werden, dass mehrere kleine Durchlässe von 10 m Breite in Bezug auf den Windfluss effektiver sind als ein einzelner grosser Durchlass.

Mehrere Lücken fördern Windfluss markant

Zudem konnte beobachtet werden, dass der Wind bereits mehrere Meter vor dem Hindernis abzuheben begann. Dies kann damit erklärt werden, dass sich zwischen Hindernis und Hang ein lokaler Kaltluftsee bildet, welcher - sobald er aufgefüllt ist - überströmt werden kann. Das Volumen dieses lokalen Stausees ist sowohl von der Hangneigung als auch von der Höhe des Hindernisses abhängig. Je grösser das Volumen, umso stärker wird das Windfeld abgebremst.

Kaltluftsee vor dem Hindernis

Die Resultate sind jedoch nur bedingt auch für die vorliegende Fragestellung gültig, da die aufgezogenen Hindernisse jeweils den gesamten Talbereich abdeckten und somit ein seitliches Umströmen nicht möglich war. Ausserdem handelte es sich um sehr schmale Hindernisse [7].

Vergleich nur unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Bedingungen

3.5 Inputs Fachplanung Hitzeminderung

Die Fachplanung Hitzeminderung (FPH) der Stadt Zürich [10] nimmt konkret Bezug zu Kaltluftleitbahnen. Es wird beschrieben, dass offene Gebäudestellungen zu den Kaltluftleitbahnen das Einfließen kühler Luft bis weit in die Stadt hinein ermöglichen sollen. Dazu gehören Typologie und Anordnung der Gebäude, insbesondere in Hang- und Tallagen. Dem weiteren Ausbremsen der Kaltluftströmung soll entgegengewirkt werden, damit das Siedlungsgebiet möglichst grossflächig von der nächtlichen Kaltluftentstehung profitieren kann und die Durchlüftung gewährleistet ist.

Einfließen kühler Luft ermöglichen

Es werden die folgenden Empfehlungen und Hinweise formuliert (S. 62-63):

«

- *Je höher die Gebäude, desto wichtiger ist ihre strömungsgünstige Stellung.*
- *Der Einfluss von Gebäudelänge und -stellung kann situationsbedingt sehr unterschiedlich ausfallen.*
- *Eine hohe Porosität bzw. Körnigkeit von Baustrukturen hat im Allgemeinen einen positiven Einfluss auf die Durchströmbarkeit und verringert den gebäudebedingten Widerstand.*
- *Die Hinderniswirkung längerer Gebäudekörper kann durch Höhenstaffelung reduziert werden, da eine Überströmbarkeit sichergestellt wird.*
- *Bei einer hangparallelen Bebauung haben Gebäudeabstände einen positiven Einfluss. Je grösser die Gebäudeabstände sind und je besser diese aufeinander ausgerichtet werden, umso geringer ist die Beeinträchtigung des Kaltluftvolumenstroms.*
- *Mit ausreichenden Gebäudeabständen können vergleichbare Effekte erzielt werden wie über eine strömungsparallele Stellung von Bauten.»*

Für Talabwindssysteme wird bezüglich Leitbahnen der Erhalt, Schutz und Ausbau des Grünanteils empfohlen. Entlang des Kontaktsaums, im Übergangsbereich von Umland zu Siedlungsgebiet, sollen kleinräumige Strömungsbahnen für den Eintritt von Kaltluft erhalten bleiben.

Erhalt, Schutz und Ausbau Grünanteil und Lücken

Für Hangabwindssysteme sollen vorhandene Grünflächen vernetzt werden, um «Trittsteine» zu schaffen. Es sollen weitere Flächen mit geringer Rauigkeit und zusätzliche Grünflächen zur Kaltluftproduktion geschaffen werden. Besonders der Kontaktsaum soll durch offene und gut durchströmbare Baustrukturen erhalten bleiben. Zum Schutz des Einwirkbereichs sollen Grünflächen erhalten und gegebenenfalls ausgebaut werden (FPH, S. 62-67 und S. 72-73).

Vernetzung

4 Resultate der Simulationen

4.1 Vorbemerkungen

Die Resultate wurden für die Windprofile eines Hang- und eines Talabwindes berechnet, die aus dem grossräumigen Klimamodell von GEO-NET mit 5-m-Auflösung an repräsentativen Standorten extrahiert wurden (siehe Abbildung 2, S. 7). Die Winde strömen dabei senkrecht auf die blockierenden Hausfassaden. In Realität wäre der Aufprallwinkel wohl selten genau 90° und würde auch fluktuieren. Dies führt zu einem weitaus kurioseren Windfeld hinter den Hindernissen. Ausserdem sollten Hang- und Talabwinde als pulsierende Ströme verstanden werden. Die Strömungseffekte sind somit nicht konstant, sondern schwanken in der Nacht stark.

Wind im Modell konstant und senkrecht

Da es sich beim Modell ENVI-met um ein Rastermodell handelt, können Höhenunterschiede nur als Stufen dargestellt werden. Zudem müsste das Windfeld so angepasst werden, dass es nur für die höchste Höhenstufe gilt, da es nicht an die Topographie direkt gebunden ist, sondern sich am absoluten Nullpunkt des Modells orientiert. Der Topographie wurde mit den Windprofilen und den Gebäudehöhen Rechnung getragen. Gravitative Effekte, welche an dieser Stelle keine übergeordnete Rolle spielen dürften, werden nicht berücksichtigt.

Versuche in ebener Fläche

Innerhalb des Modells herrscht Massenerhaltung. Ein natürliches System ist jedoch horizontal nicht abgeschlossen. In den Randbereichen kommt es dadurch zu Beschleunigungseffekten. Hinter dem Hindernis stellt sich nach 2-3 Häuserreihen im Modell wieder ein konstanter Windfluss ein, was mit dem durchgehenden Nachschub von neuen Luftmassen erklärt werden kann. In Realität ist der Fluss jedoch nicht konstant und würde daher wohl stärker beeinträchtigt.

Massenerhaltung

4.2 Darstellung der Resultate

In Kapitel 4.3 und 4.4 werden Absolutwerte als Windpfeile variabler Länge und Farbe entsprechend der Windgeschwindigkeit dargestellt.

Darstellung Windpfeile

Die Daten wurden in 1.5 m Höhe als horizontaler Querschnitt und bei 161 m Länge auf der X-Achse als vertikaler Querschnitt in Windrichtung extrahiert und dargestellt.

Schnitte durch das Modell

Das Hangabwindssystem weist in dieser Höhe stärkere Windgeschwindigkeiten auf als das Talabwindssystem. Dies liegt daran, dass der Hangabwind eine geringere vertikale Mächtigkeit hat und seine maximale Geschwindigkeit somit näher am Boden - auf ca. 10 m über Grund - erreicht. Der Talabwind erreicht seine maximale Geschwindigkeit, welche höher ausfällt als beim Hangabwind, auf ca. 20 m über Grund (vgl. Abbildung 2, S. 7).

Hangabwind in 1.5 m stärker als Talabwind

Bei dem Vergleich von Hang- und Talabwinden in Kapitel 4.5 wurde immer Hangabwind minus Talabwind gerechnet. Hierbei bedeuten die blauen Farbtöne, dass der Talabwind höhere Windgeschwindigkeiten hervorbringt, die roten, dass der Hangabwind höhere Windgeschwindigkeiten hervorbringt.

Hang- minus Talabwind

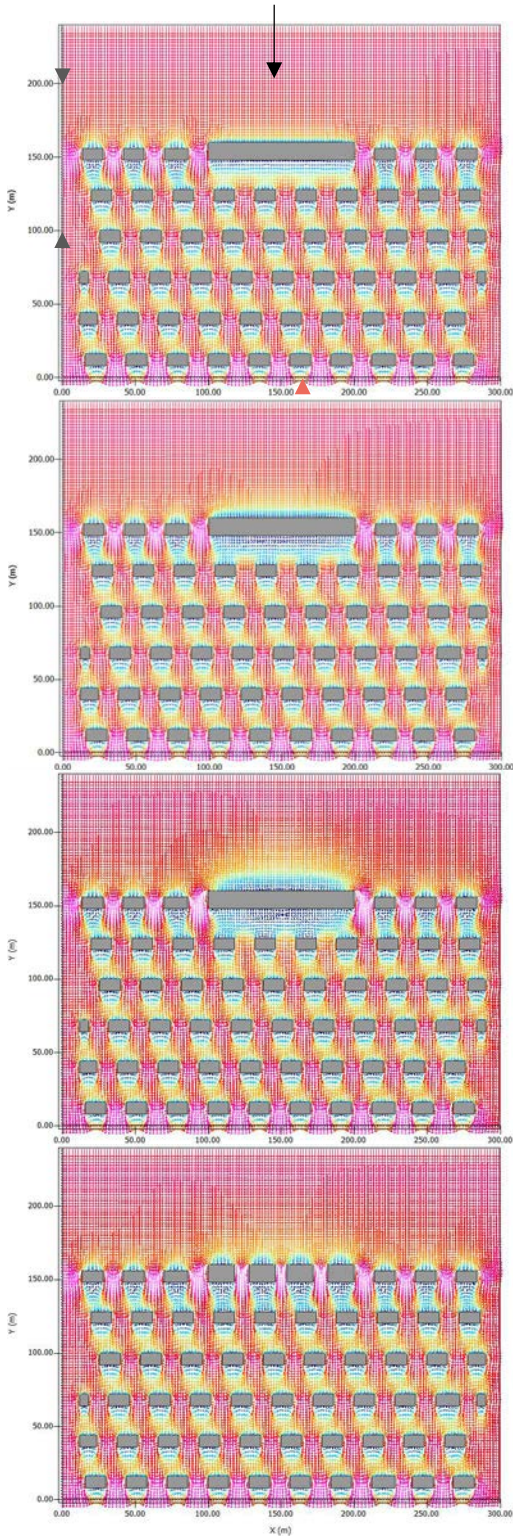
Bei den Differenzkarten in Kapitel 4.6 werden die verschiedenen Modellvarianten miteinander verglichen. In den Abbildungen werden mittlere Windgeschwindigkeiten pro Zelle dargestellt. Die Differenz wurde immer so gerechnet, dass die Modellvariante mit den besseren Strömungsbedingungen minus derjenigen mit der grösseren Blockwirkung gerechnet wurde. Blaue Farbtöne bedeuten dabei, dass die «schlechtere» Variante eine höhere Windgeschwindigkeit hervorruft. Die roten Farbtöne deuten darauf hin, dass die (theoretisch) besseren Strömungsbedingungen auch die Windgeschwindigkeiten erhöht.

Differenzkarten als Rasterzellen

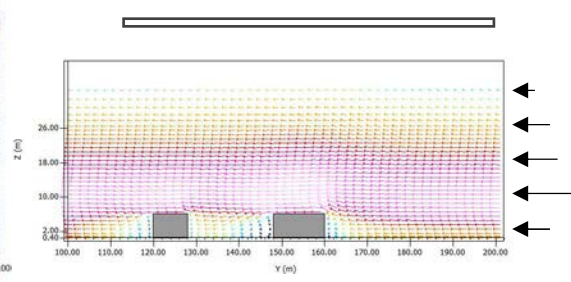
Die Resultate bewegen sich in einem Bereich mit sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten. Nach Beaufort entsprechen <0.5 m/s Windstille, was z.B. Rauch praktisch senkrecht aufsteigen oder die See spiegelglatt bleiben lässt. 0.5 bis 2 m/s sind ein leiser Zug, welcher z.B. noch keine Blätter rascheln lässt und auf der See «leichte Kräuselwellen» hervorruft. Es sind somit kaum merkliche Windgeschwindigkeitsänderungen, welche auf das subjektive Wärmeempfinden und die nächtliche Auskühlung trotzdem einen Einfluss haben. Dies kommt auch daher, da die Luftmassen deutlich kühler sind als ihre Umgebung.

Interpretation der Resultate

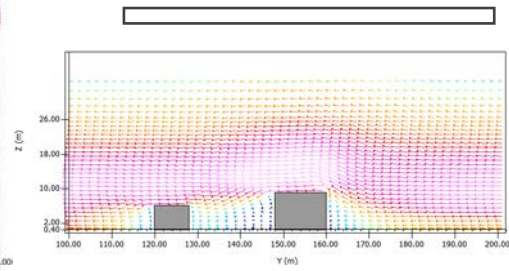
4.3 Hangabwind



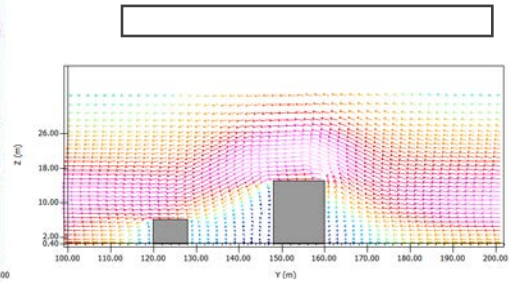
Höhe: 4 m **V1**



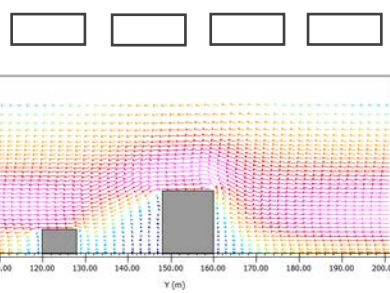
Höhe: 7 m **V2**



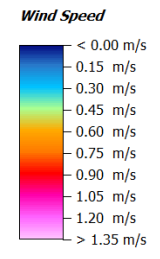
Höhe: 13 m **V3**



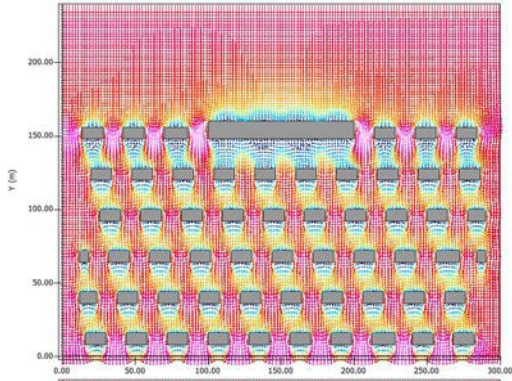
Höhe: 13 m
Lücken: 10 m breit **V4**



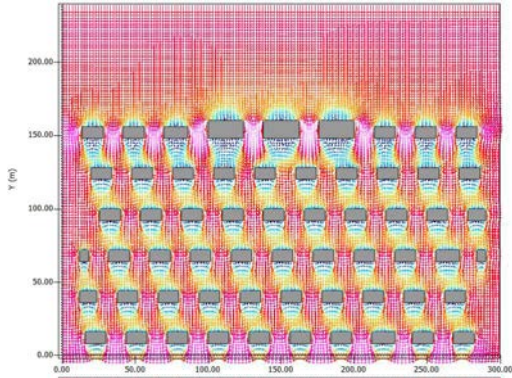
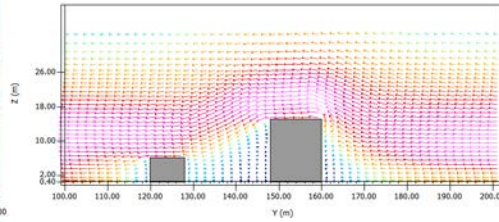
- ▼ Ausschnitt für
- ▲ Querschnitt
- ▲ Schnittstelle



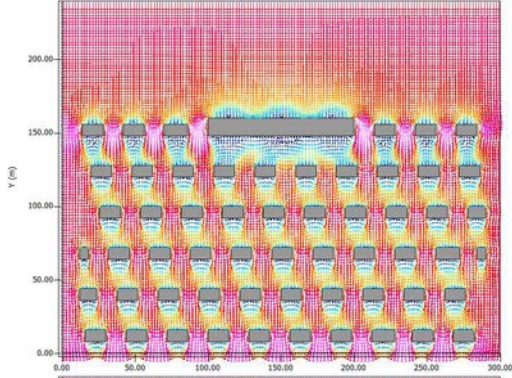
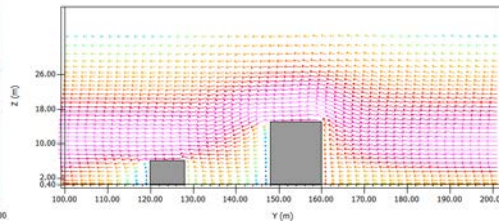
Windrichtung:
←



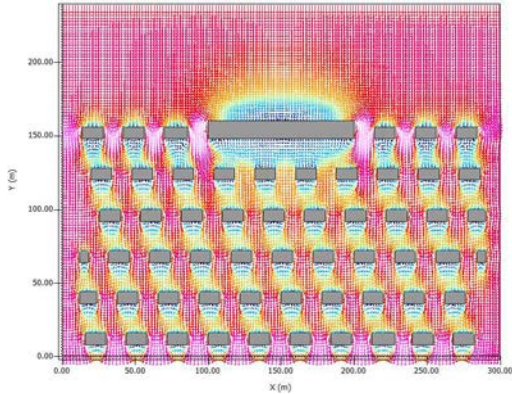
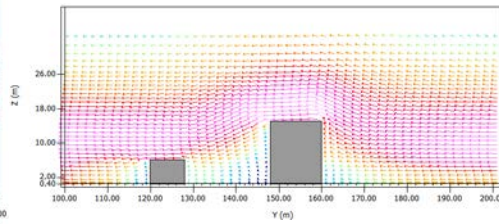
Höhe: 13 m **V5**
Lücken: 10 m breit, 3 m hoch



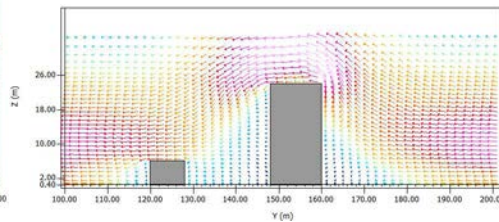
Höhe: 13 m **V6**
Lücken: 15 m breit



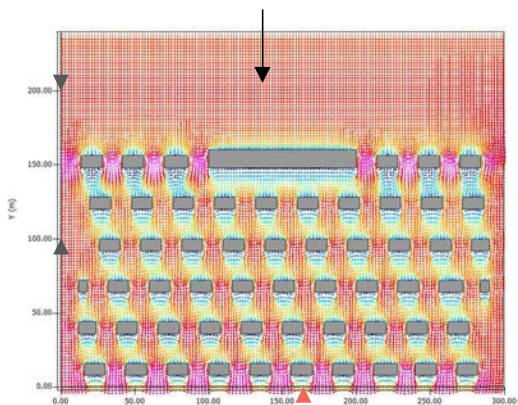
Höhe: 13 m **V7**
Lücken: 15 m breit, 3 m hoch



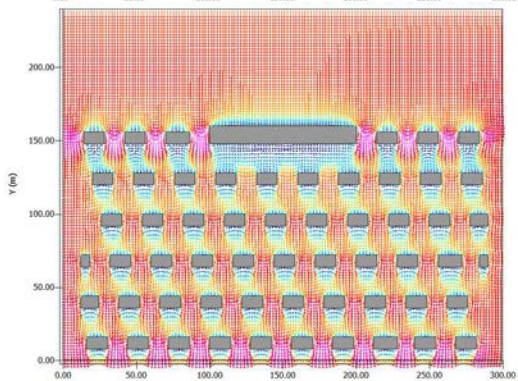
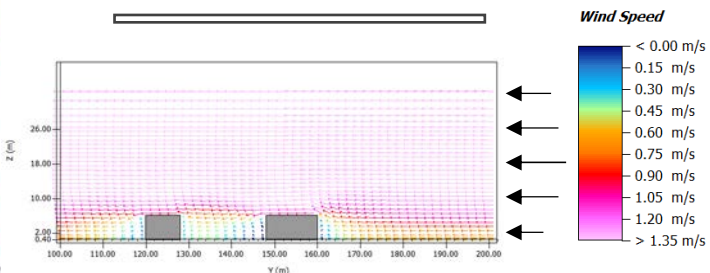
Höhe: 20 m **V8**



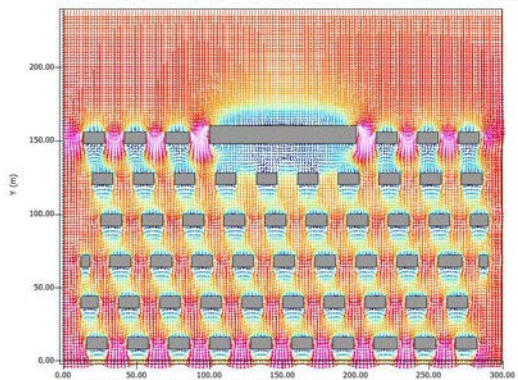
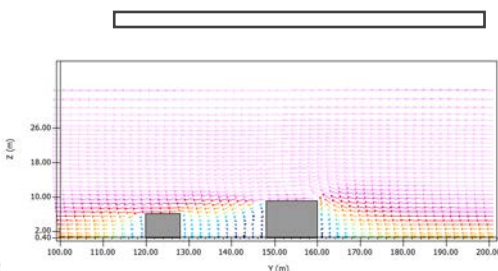
4.4 Talabwind



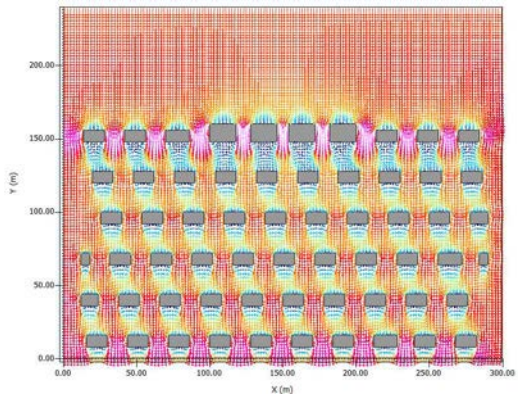
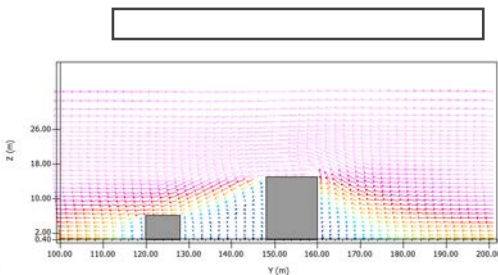
Höhe: 4 m **V1**



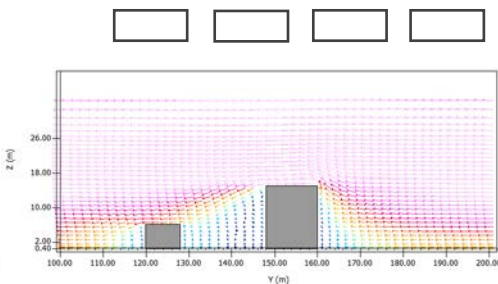
Höhe: 7 m **V2**

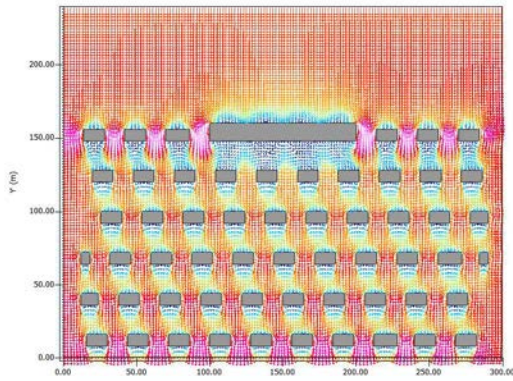


Höhe: 13 m **V3**

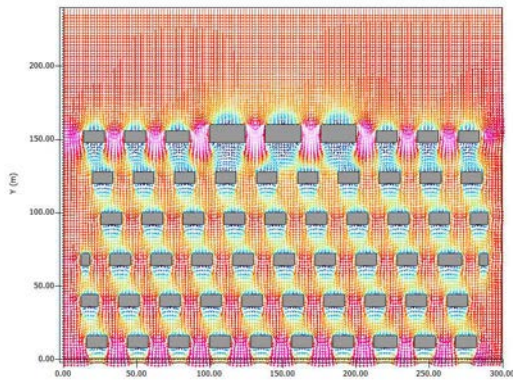
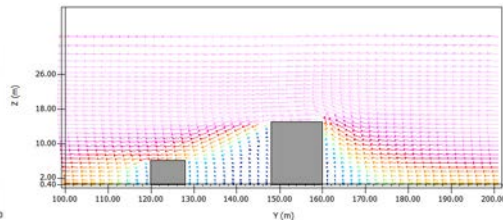


Höhe: 13 m
Lücken: 10 m breit **V4**

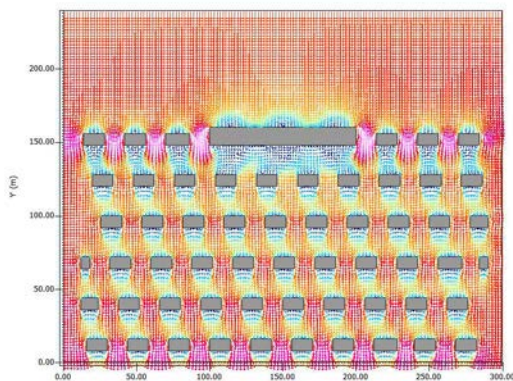
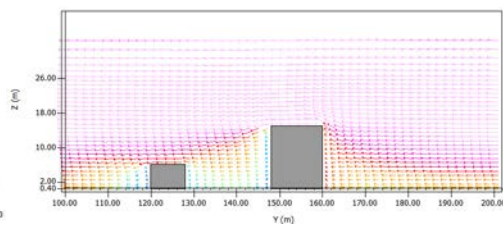




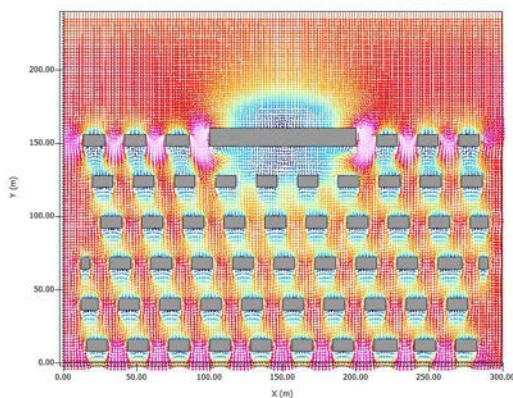
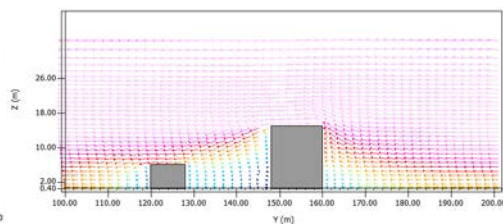
V5
Höhe: 13 m
Lücken: 10 m breit, 3 m hoch



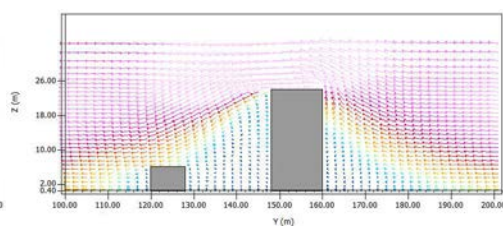
V6
Höhe: 13 m
Lücken: 15 m breit



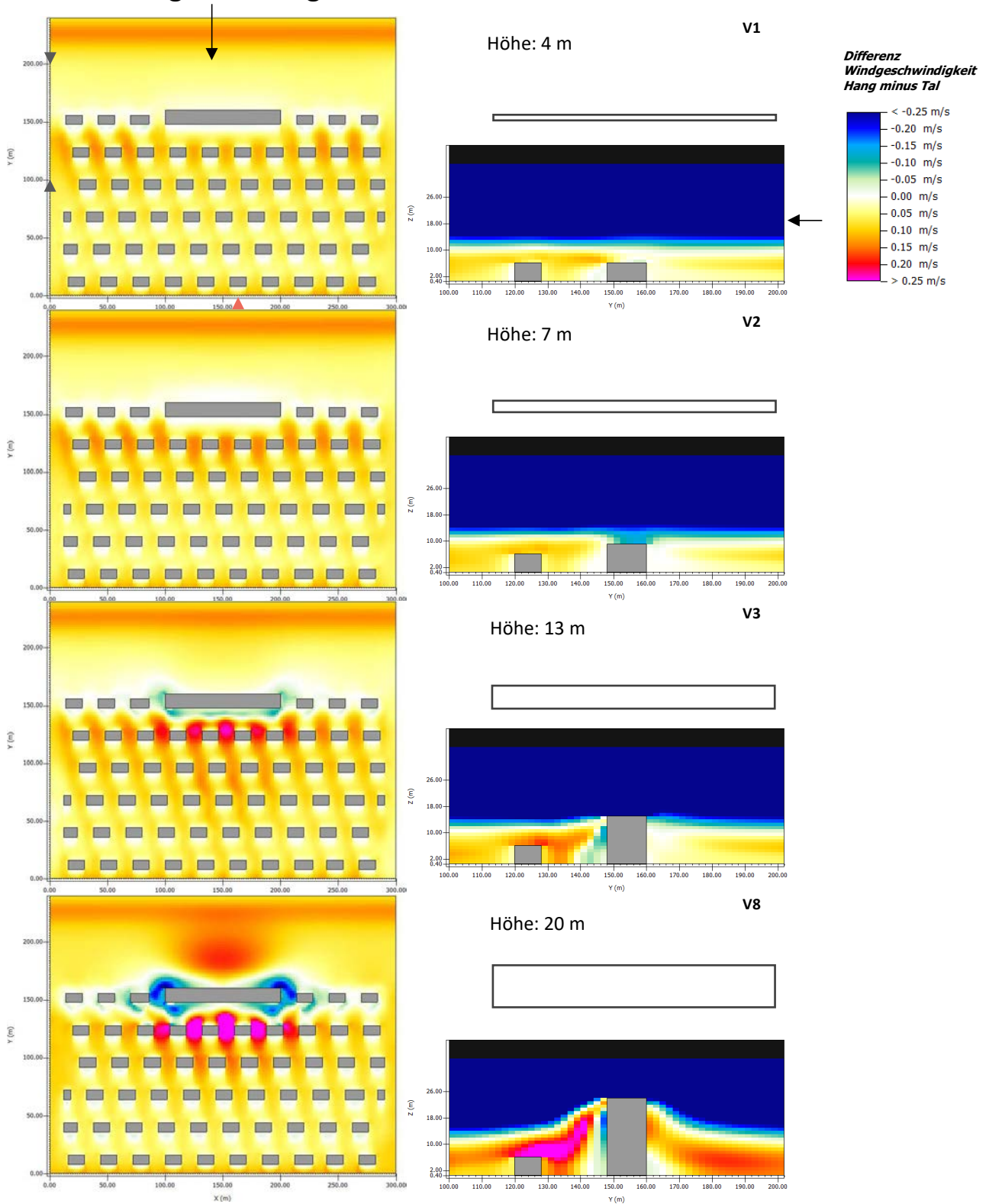
V7
Höhe: 13 m
Lücken: 15 m breit, 3 m hoch



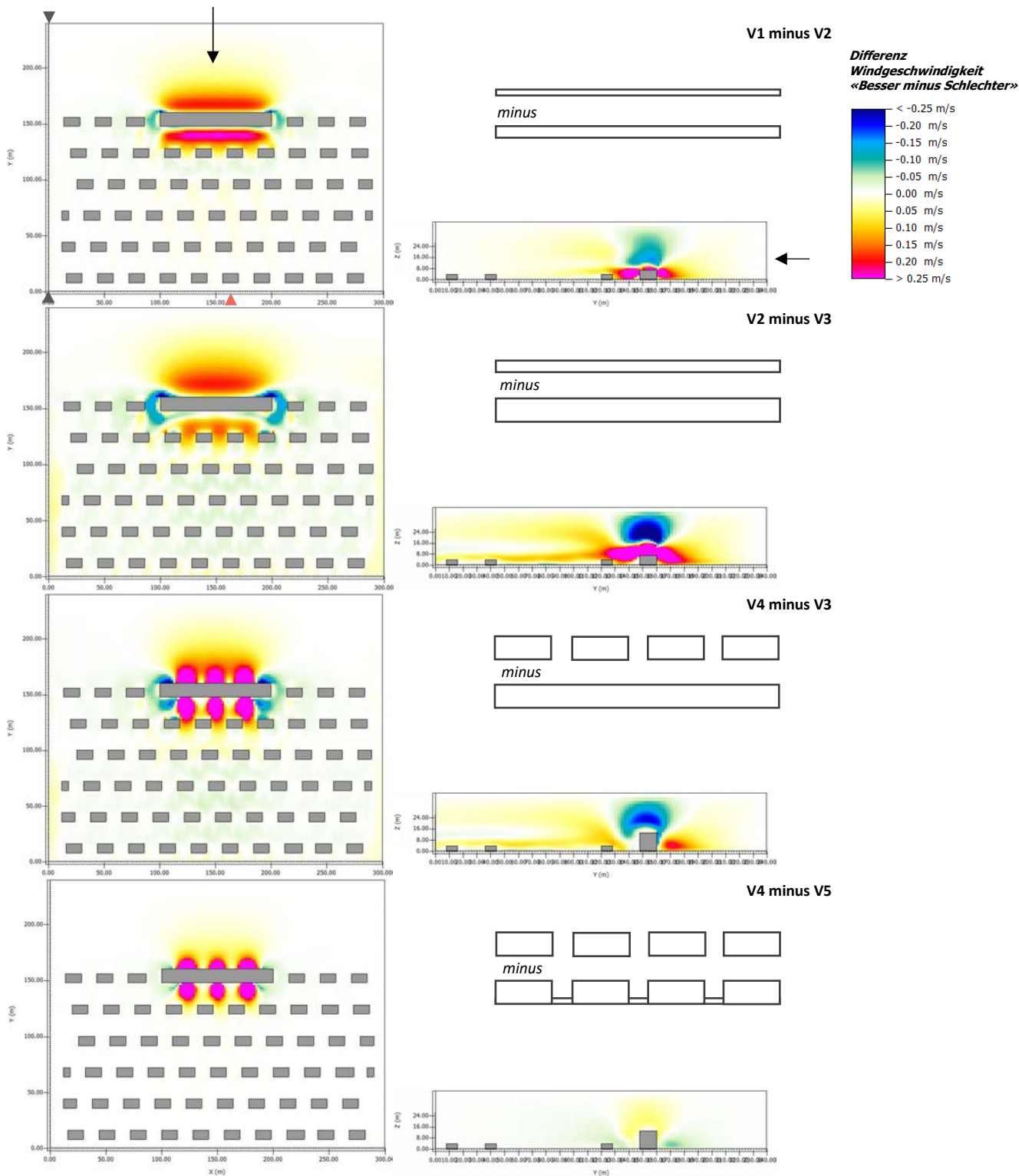
V8
Höhe: 20 m

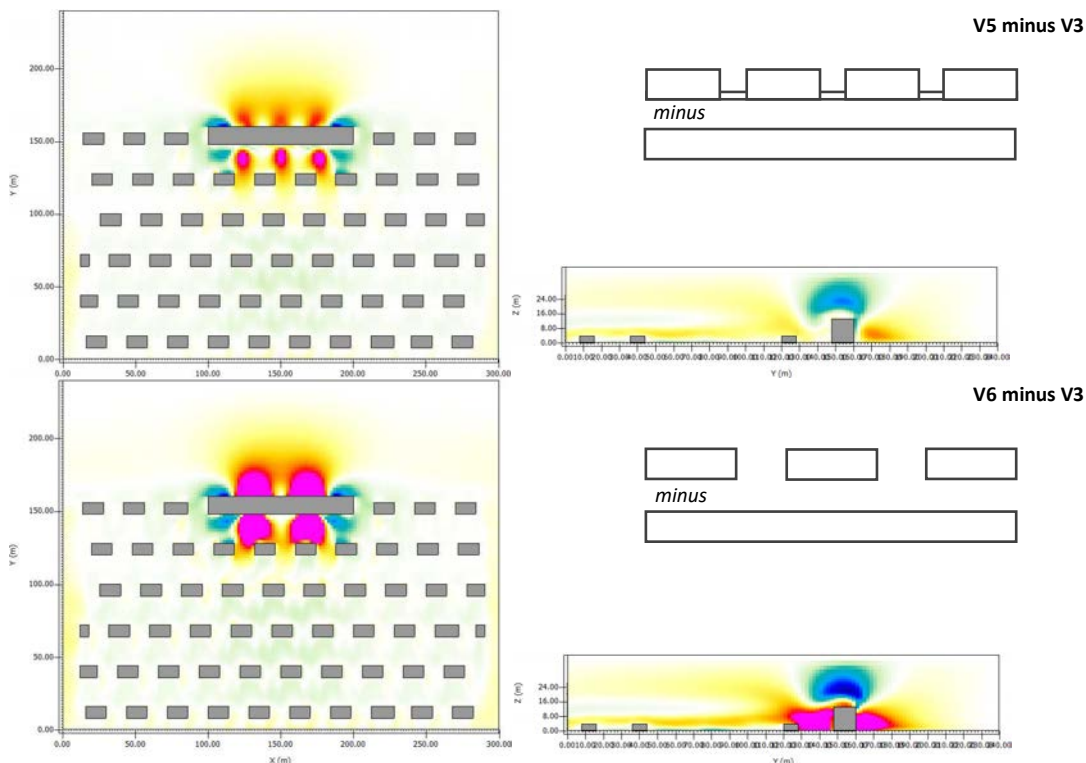


4.5 Vergleich Hang-/Talabwind



4.6 Vergleiche Varianten Hangabwind



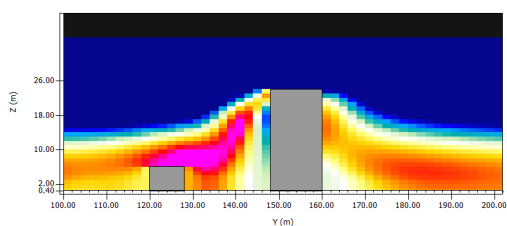


4.7 Resultatbeschreibung

4.7.1 Unterschiede zwischen Hang- und Talabwind

Allgemein scheint sich sowohl bei Hang- als auch bei Talabwinden die Strömung nach 1-2 Häuserreihen wieder in einem ähnlichen Masse wie vor dem Hindernis einzustellen (vgl. Kapitel 4.3 und 4.4). Theoretisch sollte dies ab dem 5-fachen der Gebäudehöhe der Fall sein [3] (vgl. Kapitel 3.3.1). Die Blockwirkung scheint dabei bei den Talabwinden in einer Höhe von 1.5 m etwas stärker zu sein. Dazu ist die Verwirbelung hinter dem Gebäude bei Talabwinden stärker, besonders bei Riegeln >13 m. Hinter dem Gebäudewindschatten («Cavity Zone») weisen die Hangabwinde jedoch stets höhere Geschwindigkeiten auf (vgl. Kapitel 4.5). Ab einer Höhe von ca. 12 m sind die Talabwinde aufgrund ihres vertikalen Windprofils klar stärker. Hinter dem Gebäude stellt sich diese Tendenz, auch nach dem Überströmen von hohen Riegeln, gleichermassen wieder ein.

Ähnliche Tendenzen

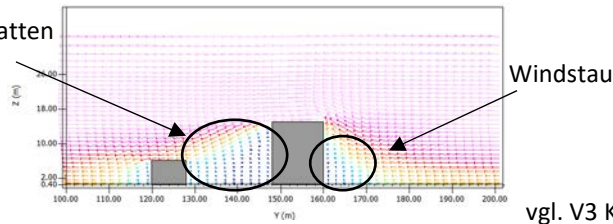


vgl. V8 Kapitel 4.5

Windstau findet auch vor dem Gebäude statt, ist aber im Vergleich zum Windstau hinter dem Gebäude weniger stark ausgeprägt und wird besonders bei höheren Riegeln beobachtet.

Windstau

Gebäudewindschatten
(«Cavity Zone»)



vgl. V3 Kapitel 4.4

Die beiden verglichenen Windsysteme sind in ihrer Art nicht komplett verschieden und zeigen daher auch ähnliche Charakteristika. Da man sich, verglichen mit mächtigen Alpentälern, in einer eher moderaten Topographie befindet, macht der Vergleich für Zürich Sinn.

Ähnliche Systeme

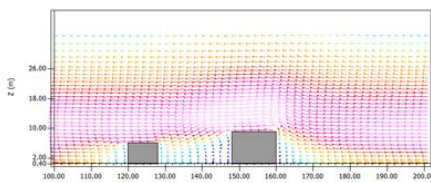
Ausschlaggebend für das Überfließen der Riegel ist die Höhe des Kaltluftstroms, besonders bei sehr seichten Strömungen. Idealerweise sollte der höchste Massefluss über dem Riegel stattfinden. Sehr seichte Kaltluftströmungen könnten daher auch bei niedrigeren Riegeln beeinträchtigt werden. Die Mächtigkeit des jeweiligen Stroms ist daher in die Betrachtung miteinzubeziehen.

Entscheidender Massefluss über dem Riegel

4.7.2 Unterschiede Riegel

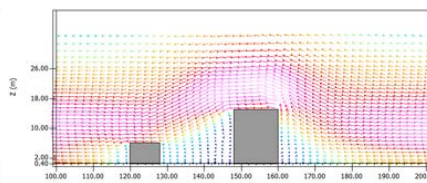
Bis 7 m Höhe scheint der Hangabwind das Hindernis gut überströmen zu können, es treten lediglich leicht höhere Windgeschwindigkeiten über Dach auf. Ab 13 m Höhe scheint das Windfeld leicht abzubrechen, aber erst ab 20 m ist eine deutliche Unterbrechung zu beobachten. Ab der dritten Häuserreihe scheint sich wieder ein konstanter Windfluss einzustellen, was auch mit der Massenerhaltung im Modell erklärt werden könnte. Wie im vorigen Kapitel 4.7.1 erwähnt, wird dieser Effekt auch in Lehrbüchern beschrieben und soll sich frühestens nach dem 5-fachen der Höhe der Objekte einstellen [3] (vgl. Kapitel 3.3.1). Das Überströmen hat jedoch auch zur Folge, dass sich direkt hinter dem Hindernis, auch bei geringer Höhe, windstille Bereiche ausbilden. Die Dimensionen dieser Bereiche hängen direkt von der Höhe des Riegels ab.

Windfluss über Gebäude

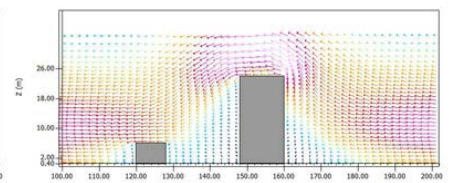


Vgl. Kapitel 4.3

V2



V3



V8

In diesen Grössenordnungen, bezogen auf Höhe der Gebäude und Mächtigkeit der Luftströmungen, hat der Riegel im Modell besonders auf die nächsten 1-2 Häuserreihen einen markanten Effekt. Dahinter stellt sich die Strömung, sofern die Bebauung lichter ist, wieder ein. Dies setzt aber voraus, dass konstant Luft nachströmt. In Realität würde der Abfluss eher pulsierend ablaufen, wodurch die Hinderniswirkung wohl auch in den hinteren Bereichen stärker ausfällt.

Besonders die ersten beiden Häuserreihen betroffen

Vor allem direkt hinter dem Hindernis fallen die Windgeschwindigkeiten auf null. Bei höheren Riegeln entsteht so zwischen dem Riegel und der ersten Reihe ein Gebiet mit kompletter Windstille («Cavity Zone»). Würde die Bebauung mit gleichen Riegeln hintereinander fortgeführt, gäbe es daher bodennah keinen Windfluss mehr. Daher ist die Art der Bebauung hinter dem Riegel ebenfalls sehr wichtig.

Windstille hinter Gebäude

Einen grossen Nutzen bringen Lücken innerhalb des Riegels. Wird die Lücke einstöckig bebaut, fällt dieser Effekt unmittelbar hinter dem Hindernis bodennah weitaus geringer aus. Ab der dritten Häuserreihe ist jedoch kein Unterschied zwischen einstöckig bebauter und unbebauter Lücke mehr erkennbar.

Lücken mit grossem Nutzen

Drei Lücken scheinen auf das Windfeld einen ähnlichen Effekt zu haben wie zwei breite Lücken, was sich an der starken Verwirbelung an den Rändern und der dadurch höheren Windgeschwindigkeit beim Riegel ohne Lücken (blaue Bereiche in der Differenzkarte) erkennen lässt. Dabei kommt es auch darauf an, wie die Bebauung hinter dem Riegel angeordnet ist.

Drei Lücken ähnlich wie Zwei

Höhere Riegel scheinen hinter der zweiten Häuserreihe bodennah höhere Windgeschwindigkeiten hervorzurufen. Erklären lässt sich dies mit erhöhter Turbulenz hinter dem Hindernis. Dies mag zwar die Auskühlung bodennah und/oder das subjektive Wärmeempfinden leicht verbessern. Für die Weiterentwicklung des Windsystems ist dies jedoch hinderlich, da dies einen Verlust an kinetischer Energie bedeutet. Gleichzeitig kann man daraus folgern, dass bodennah der negative Einfluss von «schlechteren» Bauungsvarianten ab der dritten Häuserreihe nicht mehr beobachtbar ist, sondern lokal eine eher etwas bessere Durchlüftung dank stärkerer Durchmischung stattfindet.

Höhere Riegel erzeugen mehr Turbulenz

Obschon bodennah und in einer Höhe von 8-16 m teilweise höhere Windgeschwindigkeiten beobachtet werden, nimmt über die gesamte Säule die Windgeschwindigkeit hinter dem Hindernis bei jeder «schlechteren» Variante ab. Eine Ausnahme stellt dabei die Bebauung der Lücken mit eingeschossigen Gebäuden dar, da hier ab einer gewissen Distanz kein negativer Einfluss auf das gesamte Windfeld mehr feststellbar ist.

Abnahme der Windgeschwindigkeit im Mittel innerhalb der Luftsäule

5 Erkenntnisse

5.1 Beantwortung der Fragestellungen

Die in Kapitel 1 formulierten Fragestellungen werden anhand der Simulationsresultate und der theoretischen Grundlagen beantwortet.

Wie kann der Zielkonflikt zwischen Lärmschutz und Stadtklima entschärft werden? Welche Situationen sind besonders kritisch?

Als besonders kritisch werden Situationen beurteilt, bei welchen der grösste Massefluss des entsprechenden Kaltluftstroms unterhalb von $\frac{2}{3}$ der Gebäudehöhe stattfindet. Dies betrifft zumeist Kaltluftströmungen mit geringer vertikaler Mächtigkeit. Entschärft werden kann der Konflikt z.B. durch bauliche Lücken im Gebäuderiegel, wodurch die Bereiche direkt hinter dem Riegel insgesamt gut belüftet werden. Ausserdem können Konflikte vermieden werden, wenn die maximale Riegelhöhe an die vertikale Mächtigkeit des Kaltluftstroms und insbesondere an die Höhe seiner maximaler Fließgeschwindigkeit angepasst wird. Die Situation ist zudem von der Bebauung hinter dem Riegel abhängig. Mehrere Riegel mit geringem Abstand hintereinander führen dazu, dass die bodennahen Bereiche vom Windfeld entkoppelt und damit nicht mehr belüftet werden. Hintereinander gestaffelte Riegel mit zunehmender Geschosshöhe fördern das Überströmen der Gebäude.

Aus den Überlegungen zur städtischen Rauigkeit können vorhandene Kaltluftpfade eruiert werden. Wird ein solcher Kaltluftpfad verbaut, ist seine Wirkung stark beeinträchtigt. Unbebaute Flächen sind stets gute Kaltluftpfade, während der Siedlungsraum ein kritischer, oft schlecht belüfteter Bereich ist.

Für eine ausreichende Lärmschutzwirkung genügen oftmals ein- bis zweigeschossige Gebäude/Hindernisse. Kann ein Kaltluftstrom ein solches Hindernis überströmen?

Die Modellresultate deuten darauf hin, dass Kaltluftströmungen, welche eine deutlich höhere vertikale Mächtigkeit als die Hindernisse haben, diese auch problemlos überströmen können. Direkt hinter dem Riegel entsteht jedoch immer eine Zone mit sehr geringen Windgeschwindigkeiten, welche mit zunehmender Riegelhöhe grösser wird. Problematisch wären ein- bis zweigeschossige Hindernisse somit nur bei sehr flachen Kaltluftströmungen.

Unter welchen Bedingungen kann die Kaltluft ein Hindernis überfließen/umfließen/durchfließen?

Wie bereits erwähnt, kann ein Kaltluftstrom das Hindernis gut überfließen, wenn ein Grossteil seines Masseflusses über $\frac{2}{3}$ der Gebäudehöhe stattfindet. Steht das Gebäude im Hang, kann je nach Topographie der Bereich zwischen Gebäude und Hang aufgefüllt und - nachdem dieser Kaltluftsee komplett ausgebildet ist - auch überflossen werden. Ein Umfließen findet ebenfalls statt. Oftmals entsteht an den Rändern jedoch starke Turbulenz, wodurch der Windfluss gestört wird. Für effektives Durchfließen scheinen bereits Lücken mit 10 m

Breite auszureichen. Diese reduzieren auch die Turbulenz in den Randbereichen.

5.2 Lösungsansätze

Neben dem Beachten der Mächtigkeit einer Kaltluftströmung für die Festlegung der maximalen Riegelhöhe sind auch Baulücken im Riegel ein hilfreiches Mittel, um den Windfluss zu verbessern. Gestaffelte Bebauungen - im Sinne von mehreren Riegeln hintereinander mit zunehmender Höhe - waren nicht Teil der Analyse, werden aber in der Theorie als Mittel zum besseren Überströmen von Gebäuden genannt. Vermieden werden sollen mehrere parallele und gleich hohe Riegel hintereinander mit geringem Abstand. Eine weitere Lösung, um den Windfluss zu verbessern, sind abgerundete Kanten, da diese die Bildung von Turbulenz verringern und dadurch einen besseren Windfluss ermöglichen (Aerodynamik).

5.3 Datenbezug

Aus den Geodaten, welche via Web-Browser zugänglich sind, lassen sich die nötigen Informationen über die Höhe des maximalen Luftstroms nicht herauslesen. Wir empfehlen daher, diese Daten bei der Autorenschaft der Klimakarten zu bestellen (z.B. Höhe der maximalen Fliessgeschwindigkeit pro Rasterzelle).

Kein Standarddatensatz

Die Dimensionen eines Kaltluftstroms lassen sich auch über die vertikale Mächtigkeit eines Hanges relativ zur Talsohle abschätzen. Diese beträgt ca. 5% der Höhendifferenz. Dies gilt jedoch nur für flächenhaften Hangabwind und nicht für zusammenfliessenden Talabwind [4]. Bei einem Viertel bis zur Hälfte der Kaltluflhöhe stellt sich ein Maximum der Windgeschwindigkeit ein (vgl. Kapitel 3.1). Diese Abschätzung ist jedoch sehr allgemein und kann im Einzelfall abweichen.

Aschätzung über vertikale Mächtigkeit des Entstehungsgebiets

Auch die Modellierung des regionalen Klimas kann fehlerhaft sein. Will man die Eigenschaften einer nächtlichen Kaltluftströmung exakt bestimmen, sind Messungen mit vertikalen Masten, Fesselballonen oder Rauchtracern unumgänglich. Da sich die Systeme unter ähnlichen Bedingungen vergleichbar verhalten, sollten bereits einzelne Messkampagnen verlässliche Informationen liefern.

Messungen am verlässlichsten

Anhang

A.1 Zitierte Grundlagen

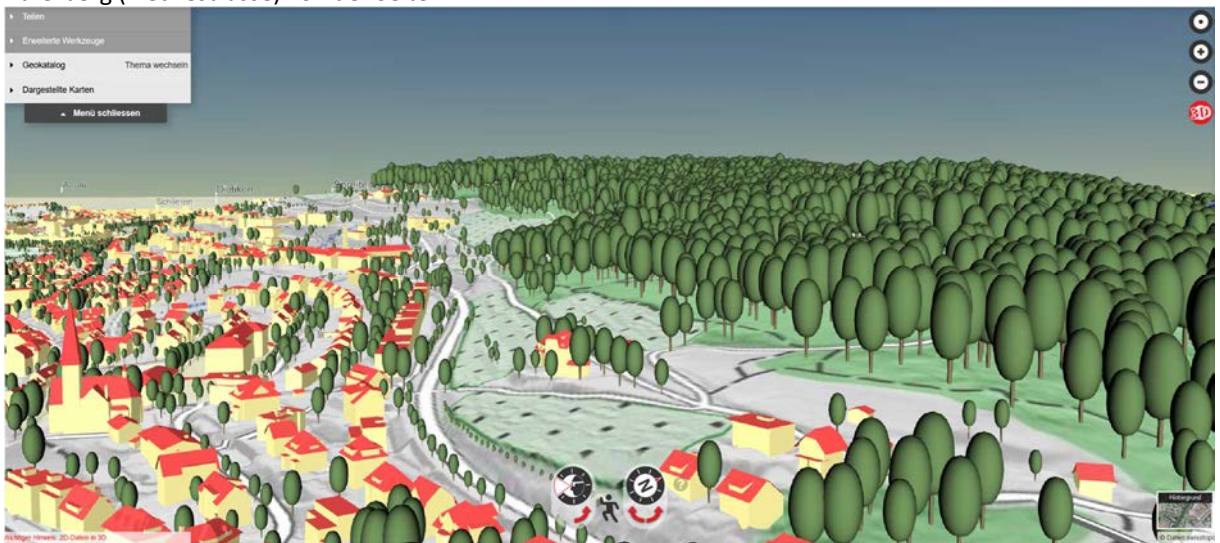
- [1] Zenger, A.: Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und -qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn. Fachhochschule Mainz.
- [2] Barry, R. G. (1992). Mountain weather and climate. Psychology Press.
- [3] Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). Urban climates. Cambridge University Press. S. 93-94, 404.
- [4] Röckle, R. und Richter, C.-J.: Ausbreitung von Gerüchen in Kaltluftabflüssen.
- [5] Matzarakis, A. and Mayer, H. (1992): Mapping of urban air paths for planning in Munich. Proceeding of the IFHP. Berlin.
- [6] Weber, S. und Kuttler, W. (2003): Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und -qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn. In: Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 63 (2003) Nr. 9.
- [7] King, E. (1973): Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.
- [8] Gal G., T. and Unger, J. (2009). Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. Building and Environment, 44(1):198-206.
- [9] Kanda, M., Inagaki, A., Miyamoto, T., Gryschka, M., and Raasch, S. (2013). A new aerodynamic parametrization for real urban surfaces. Boundary-Layer Meteorology, 148(2):357-377.
- [10] Stadt Zürich (Hrsg.) (2020): Fachplanung Hitzeminderung.

A.2 Ansichten Käferberg und Albisriederplatz

Käferberg (Tiéchestrasse) von vorne:



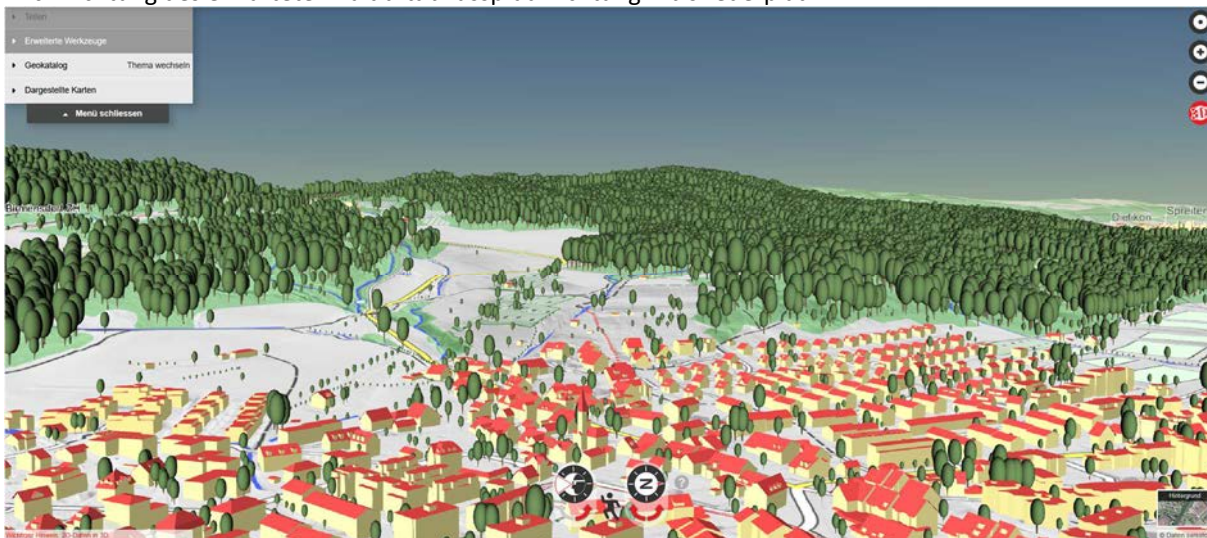
Käferberg (Tiéchestrasse) von der Seite:



Blick entlang des erwarteten Kaltluftabflusspfad Richtung Albisriederplatz:



Blick Richtung des erwarteten Kaltluftabflusspfad Richtung Albisriederplatz:



A.3 Berechnung der Nullpunktverschiebung und Rauigkeitslänge

Nach Kanda (2013) [9]:

$$\frac{zd}{zH_{max}} = c * X^2 + (a * PAI^b - c) * X,$$

wobei:

$$X = \frac{zH_{std} + zH}{zH_{max}}, 0 \leq X \leq 1$$

Mit:

$a = 1.29$, $b = 0.36$ und $c = -0.17$; zH_{std} ist die Standardabweichung der Gebäudehöhe, X = relevante Gebäudehöhe über zH

Die Parameter a , b und c resultieren dabei aus Modellläufen. X hilft zwischen homogenen Gebäudehöhen ($X=1$) und isolierten hohen Gebäuden mit kleinem Durchmesser umgeben von kleinen Gebäuden zu differenzieren ($X \sim 0$).

Für die Berechnung von $z0$ kann ähnlich vorgegangen werden:

$$\frac{z0}{z0(mac)} = b * Y^2 + c * Y + a,$$

wobei:

$$Y = \frac{PAI * zH_{std}}{zH}, 0 \leq Y$$

Mit:

$a = 0.71$, $b = 20.2$ und $c = -0.77$

$z0(mac)$:

$$\frac{z0(mac)}{zH} = 1 - \frac{zd}{zH} e^{-\left\{0.5\beta\frac{C}{kz}\left(1-\frac{zd}{zH}\right)\right\}^{-0.5}},$$

mit:

$\beta = 1.0$, k = von Karman Konstante (0.4) und C = Strömungswiderstandskoeffizient (1.2)