New Energy Scout GmbH
Neuwiesenstrasse 95
CH-8400 Winterthur
Tel. +41 52 728 92 70
Fax +41 52 728 92 71
info@newenergyscout.com
www.newenergyscout.com

Windpotentialstudie

Kanton Zürich

im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL

29.01.2014

Auftraggeber:

Kanton Zürich

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL

Walcheplatz 2

8090 Zürich

Auftragnehmer:

New Energy Scout GmbH

Neuwiesenstrasse 95

CH- 8400 Winterthur

Erstellt von:	Michael Altherr, Michael Dietl
Geprüft von:	Peter Schwer
Projektnummer:	KZH0002
Bericht Nr.:	13 - 0021
Version:	04
Datum:	29.01.2014
Dokumentenname:	Windpotentialstudie-KtZH_2014-01-29.docx

Inhalt

INHALT 3

1 EINLEITUNG 4

2 AUFTRAG 5

2.1 Motivation des Auftraggebers 5
2.2 Verhältnis zu anderen Aufträgen 5
2.3 Methodik und Ablauf der Bearbeitungsschritte 5
2.4 Ziel der Studie 6

3 METHODIK 7

3.1 Berechnung der Windressourcen 7
3.2 Flächenanalyse 18
3.3 Abschätzung des Windenergiepotentials im Kanton Zürich 26

4 RESULTATE 29

4.1 Windressourcen 100 m über Grund 29
4.2 Windenergieanlagen im Einflussbereich des Flughafens Zürich-Kloten 32
4.3 Flächenanalyse 39
4.4 Abschätzung des theoretischen Windenergiepotentials im Kanton Zürich 43

5 PLAUSIBILISIERUNG UND UNSICHERHEITEN DER WINDRESSOURCENKARTE 44

5.1 Plausibilisierung des Berechnungsmodells 44
5.2 Unsicherheitsabschätzung 46

6 FAZIT UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN 47

6.1 Windressourcen 47
6.2 Ausschlusskriterien 47
6.3 Windenergiepotential im Kanton Zürich 48
6.4 Einordnung in weitere Potenzialabschätzungen 48

7 LITERATURVERZEICHNIS 50

8 ANHANG 51

8.1 Weiterführende Information: Vortex-Daten 51
8.2 Grenzen der Modellierungssoftware WAsP 52
8.3 Energierosen 54
8.4 Windressourcenkarte auf 100 m über Grund 55
8.5 Ausschlussgebiete für Grosswindanlagen 56
8.6 Daten-CD 57

1 Einleitung

Die Bedeutung der Windenergie im Kanton Zürich ist momentan minimal, es wurden bisher rund 7 Kleinwindanlagen aber noch keine Grosswindanlage installiert. Dies kann verschiedene Gründe haben wie z.B. unzureichende Windverhältnisse, andere Raumnutzungen die eine Windkraftnutzung verhindern, politische Fokussierung auf andere Energieträger oder das Fehlen einer systematischen Untersuchung.

Auf der nationalen Windkarte der Schweiz wird dem Kanton Zürich ein bescheidenes Windpotential attestiert. Dies ist auf besagter Karte in anderen Regionen wie bspw. Schaffhausen oder auf Hügelzügen im Aargauer Mittelland ebenso der Fall. Windmessungen und detaillierte Modellierungen in diesen Regionen zeigen aber, dass sehr wohl ein nennenswertes Windpotential vorhanden ist. Daneben sind moderne, grössere Anlagen in der Lage mit geringeren Windgeschwindigkeiten dieselben Gestehungskosten zu erreichen, die vor ein paar Jahren die (kleineren) Anlagen an besseren Standorten aufwiesen. Weil der Kanton Zürich zu grossen Teilen dicht besiedelt ist und eine Vielzahl von Infrastrukturnutzungen (u.a. Flughafen) vorhanden sind, wurde das Windkraftpotenzial nie detailliert und systematisch untersucht. Aus den genannten Gründen wurde bis vor Kurzem abgeleitet, dass kein nennenswertes Windenergiepotential für Grosswindanlagen im Kanton vorhanden sei. Dementsprechend sind auch keine Standorte in den Richtplanungen ausgewiesen.

Das Raumplanungsgesetz (RPG) legt in Art. 2 eine umfassende Planungspflicht für alle Behörden fest: Bund, Kantone, Regionen und Gemeinden sollen die für ihre raumwirksamen Aufgaben nötigen Planungen erarbeiten und sie aufeinander abstimmen. Die Erteilung von Konzessionen und Bewilligungen für Bauten und Anlagen, somit auch für Windenergieanlagen, gehören zu diesen raumwirksamen Aufgaben der Behörden. Die dafür nötige regionale oder kantonale Planung bzgl. Windenergie umfasst u.a. die Definition von strategischen Zielen, die Bezeichnung von Ausschluss-, Vorbehalts- und Interessengebieten, Definition von potentiellen Standorten und die Abschätzung der Windressourcen.

2 Auftrag

2.1 Motivation des Auftraggebers

Das AWEL des Kantons Zürich, Abteilung Energie, möchte die Möglichkeiten im Kantonsgebiet zur Nutzung der Windenergie prüfen. Dazu soll eine systematische Untersuchung aufzeigen, welches Potential sich für die Windenergie im Kanton Zürich ergeben könnte, dies nach der Berechnung der Windressourcen und nach Anwendung von eindeutigen Ausschlusskriterien. Zu diesem Zweck wurde die Firma New Energy Scout GmbH beauftragt eine Windpotentialstudie zu erarbeiten.

2.2 Verhältnis zu anderen Aufträgen

Der Auftragnehmer hat dem Auftraggeber vor Beginn der Arbeiten allfällige abgeschlossene und laufende Projektarbeiten im Kanton Zürich offengelegt die als Interessenskonflikt verstanden werden könnten. Weitere Mandate im Kanton wurden während der Phase, wo die Resultate nicht öffentlich waren, nicht resp. nur in Absprache mit dem Auftraggeber angenommen.

2.3 Methodik und Ablauf der Bearbeitungsschritte

Eine Windpotentialstudie ist im Allgemeinen stufenweise aufgebaut: Um allfällige Potentialgebiete für die Nutzung mit Windenergieanlagen identifizieren zu können, werden in einem ersten Schritt die Windressourcen im ganzen Kanton Zürich berechnet. Windmessungen zur Verbesserung und Verdichtung der Datenlage sind in dieser Stufe nicht vorgesehen, entsprechend sind in gewissen Teilregionen Konzessionen bezüglich der Unsicherheit der Aussagen hinzunehmen. In einem zweiten Schritt wird eine Flächenanalyse mittels Ausschlussflächen durchgeführt. Diese wird schlussendlich mit der Windressourcenkarte kombiniert (Ablauf siehe folgende Grafik).

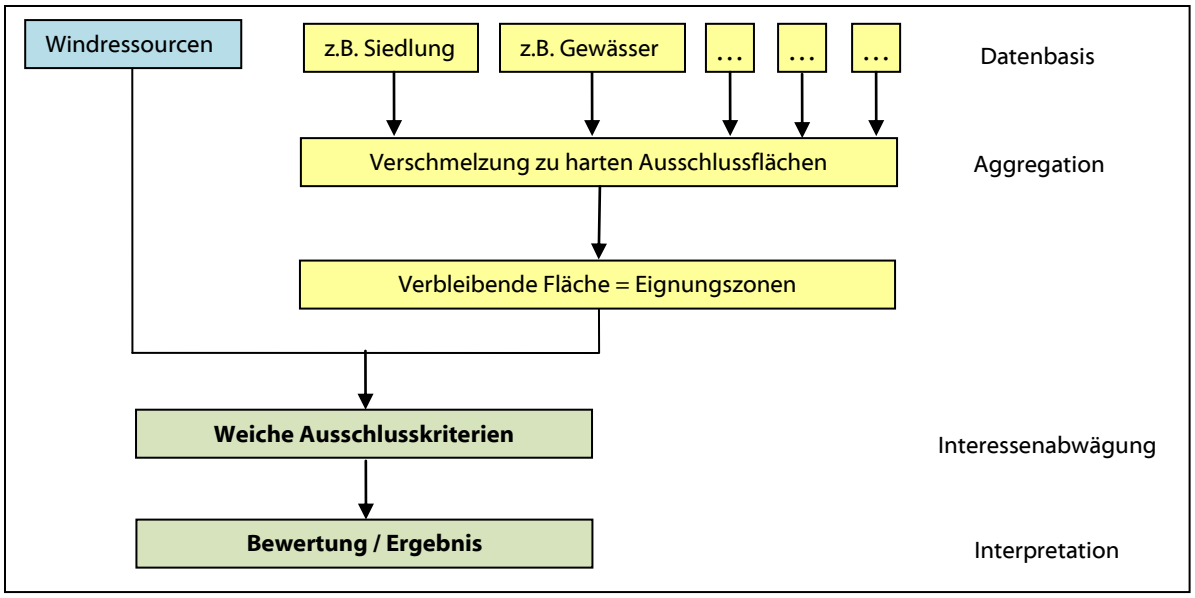

Abb. 1: Methodik der Windpotentialstudie (schematisch).

Als spezielles und wohl – neben den Siedlungsgebieten - bedeutendstes raumwirksames Ausschlusskriterium im Kanton Zürich ist der Flughafen Zürich-Kloten zu betrachten. Aus diesem Grund wird der mögliche Einfluss des Flughafens Zürich-Kloten auf die Windenergienutzung im Kanton Zürich ausführlicher beleuchtet.

2.4 Ziel der Studie

Es soll festgestellt werden:

- Wie das Windpotential auf 100 m über Grund im Kanton Zürich räumlich verteilt ist
- Welche Restriktionen sich für die gewählten Ausschlusskriterien ergeben
- Welche Restriktionen sich für die Windenergienutzung durch den Flughafen Zürich-Kloten ergeben
- Wie gross das Windenergiepotential auf den resultierenden Eignungszonen ausgedrückt in GW resp. GWh ist.

3 Methodik

3.1 Berechnung der Windressourcen

3.1.1 Datenbasis

Um die Windressourcen berechnen zu können, sind vorgängig sämtliche für die Untersuchung notwendigen Daten zusammengetragen und anschliessend für die Berechnung aufbereitet worden. Folgende Daten sind verwendet worden:

Daten	Inhalt	Räumliche Ausdehnung	Datenherkunft
Karten der Landestopografie	Rasterkarten 1:25'000 und 1:50'000	Kanton Zürich und umliegendes Gebiet bis mind. 20 km	Amt für Raumentwicklung des Kantons Zürich
Höhenkurven ZH	Höhenlinien mit Äquidistanz 10 m	Kanton Zürich	Amt für Raumentwicklung des Kantons Zürich
Höhenkurven SH, TG, SG, GL, SZ, ZG, LU, AG	Höhenlinien mit Äquidistanz 10 m	Kantone SH, TG, SG, GL, SZ, ZG, LU, AG	Bundesamt für Landestopografie (DHM25)
Höhenkurven Deutschland	Höhenlinien mit Äquidistanz 10 m	Bis mind. 20 km von der Kantonsgrenze Zürich	Remote sensing DHM und eigene Kartierung
Bodennutzung ZH	Siedlung, Wald, Gewässer, Obstanlagen etc.	Kanton Zürich	Amt für Raumentwicklung des Kantons Zürich
Bodennutzung SH, TG, SG, GL, SZ, ZG, LU, AG	Siedlung, Wald, Gewässer, Obstanlagen etc.	Kantone SH, TG, SG, GL, SZ, ZG, LU, AG	Bundesamt für Landestopografie (VECTOR25) und eigene Kartierung
Bodennutzung Deutschland	Siedlung, Wald, Gewässer, Obstanlagen etc.	Bis mind. 20 km von der Kantonsgrenze Zürich	Remote sensing DRM und eigene Kartierung
Winddaten	Windrichtung und Windgeschwindigkeit der Stationen Üetliberg, Lägern, Schaffhausen		MeteoSchweiz
	Windrichtung und Windgeschwindigkeit gemessen am Siblinger Funkturm (Kanton SH)		Eigene Messung
	Windrichtung und Windgeschwindigkeit gemessen mittels LiDAR (Light Detection And Ranging) im Ostteil des Kantons ZH		Eigene Messung
	Reanalyse-Datenpunkte		Vortex

Tabelle 1: Datengrundlage der Windressourcenberechnung.

3.1.2 Berechnungshöhe

Der Auftraggeber möchte aus folgenden Gründen das Windpotential auf 100 m ü.G. berechnet haben:

- Moderne Windenergieanlagen, konzipiert für Windverhältnisse wie sie in weiten Teilen des Kantons Zürich zu erwarten sind, haben eine Nabenhöhe von 100-150 m, in der Schweiz momentan eher noch 100 m, in Süddeutschland jedoch eher bei 130-150 m. Eine Berechnung der Windressourcen für diese Höhe ist in der weiteren Planung zu überdenken.
- Die Windkarte des Konzeptes Windenergie Schweiz aus dem Jahre 2004 wurde für die Höhen 50 m, 70 m und 100 m über Grund berechnet. Die Windkarten des Kantons Schaffhausen sowie jene von Baden-Württemberg sind u.a. auch für 100 m über Grund berechnet worden. Die Vergleichbarkeit mit diesen Karten ist somit gegeben.

3.1.3 Verwendete Hilfsmittel (Windmodell)

Eine Berechnung der Windressourcen basiert auf Daten zu den Windverhältnissen im Untersuchungsgebiet, zur Topographie, zu Hindernissen und zur Bodenbedeckung (Rauigkeit). Die Berechnung ist mit den Programmen WindPro 2.8 und WAsP 10.2 durchgeführt worden.

In WAsP werden die Einflüsse der Topographie und der Bodenbedeckung mit einem zweidimensionalen Strömungsmodell bestimmt. Dies erfordert eine detaillierte Beschreibung der Hügel und lokalen Hindernisse wie Wälder oder Siedlungen. Mit diesem Modell können laminare Windströmungen modelliert werden, so wie sie in ebenem oder leicht hügeligem Gelände vorherrschen. In komplexem Hügel- oder Berggebiet folgen die Strömungen meist einem turbulenten Muster, welche mittels WAsP nicht adäquat modelliert werden können. In solchen Gebieten würden sich CFD-Modellierungen (CFD=Computational Fluid Dynamics) anbieten. Auf Wunsch des Auftraggebers ist dennoch eine Modellierung mittels WAsP durchgeführt worden.

3.1.4 Erstellung des digitalen Höhenmodells

Für die Erstellung des Höhenmodells sind die folgenden Schritte erforderlich:

1) Konvertierung der Höhenkurven in geeignetes Format für die Berechnungssoftware
2) Reduktion der Datenmenge der verschiedenen (Teil-)Höhenmodelle (Generalisierung mit Abweichung max. 1 m, Verbindung von Linien)
3) Bereinigung der Grenz- bzw. Überlappungsbereiche sowie von doppelten Höhenkurven (letzteres nur beim DHM25 von Swisstopo)
4) Erweiterung der Höhenmodelle in einem Bereich von mind. 20 km um den Kanton Zürich.

3.1.5 Erstellung der digitalen Rauhigkeitskarte

Für die Erstellung der Rauhigkeitskarte sind die folgenden Schritte erforderlich:

1) Konvertierung der Bodenbedeckungs-Polygone in geeignetes Format für die Berechnungssoftware
2) Definition der Rauhigkeitsklassen *
3) Generalisierung der Rauhigkeitspolygone
4) Bereinigung der Grenz- bzw. Überlappungsbereiche
5) Erweiterung der Rauhigkeitskarte in einem Bereich von mind. 20 km um das Untersuchungsgebiet.

* Die Rauhigkeitslänge z_0 entspricht der Höhe über Boden, in der das logarithmische Höhenprofil der Windgeschwindigkeit den Wert Null ausgibt. Die für Berechnungen verwendete Abstufung der Rauhigkeitsklassen richtet sich nach der folgenden international anerkannten Definition:

Rauhigkeits-klasse	Rauhigkeits-länge, z_0 in m	Energie Index (%)	Landschaft
0	0.0002	100	Wasserflächen
0.5	0.0024	73	Offenes Gelände, glatte Oberflächen z.B. Landebahnen
1	0.03	52	Landschaft ohne Zäune u. Hecken, einzelne Häuser
1.5	0.055	45	Landschaft mit einigen Häusern u. Hecken. Freiflächen min. 1250m.
2	0.1	39	Landschaft mit einigen Häusern u. Hecken. Freiflächen min. 500m.
2.5	0.2	31	Landschaft mit einigen Häusern u. Hecken, Büschen und Bäumen. Freiflächen min. 250m.
3	0.4	24	Dörfer, kleine Städte, Wälder. Unebenes Gelände.
3.5	0.8	18	Größere Städte, hohe Gebäude
4	1.6	13	Großstadte mit sehr hohen Gebäuden.

Tabelle 2: Definition der Rauhigkeitsklassen (gemäss Europäischem Windatlas); Quelle: [1].

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht verschiedene typische Windprofile in ebenem Gelände in Abhängigkeit der Bodenrauhigkeit. Auf Hügeln in komplexem Gelände kann sich ein Windprofil im Extremfall umkehren, d.h. in Bodennähe herrschen höhere Windgeschwindigkeiten als in grösseren Höhen, man spricht vom sog. Speed-Up-Effekt.

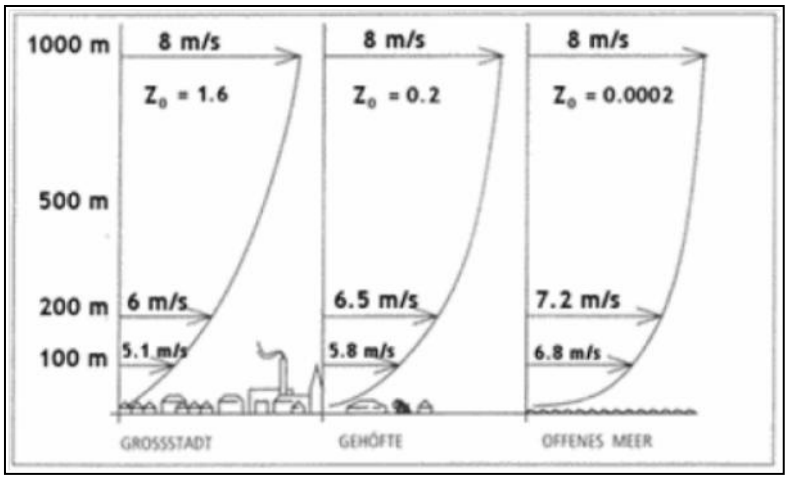

Abb. 2: Windgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Oberflächenrauhigkeiten im ebenen Gelände; Quelle: [1].

3.1.6 Verwendete Winddaten

Es wurden sowohl Winddaten verschiedener Meteoschweiz-Stationen im und um den Kanton (Üetliberg, Lägern und Schaffhausen) verwendet, als auch eigene Messungen einbezogen (Messung am Siblinger Funkturm (SH) und eine LiDAR-Messung südlich von Winterthur). Darüber hinaus wurden zwei sogenannte Reanalysepunkte (Informationen dazu im Anhang 8.1) berücksichtigt, einer im südlichen Grenzgebiet und ein weiterer am Standort der LiDAR-Messung zu Korrelationszwecken (darauf wird in Kapitel 3.1.7 weiter eingegangen)

Bei der Wahl der Messstandorte wurde auf eine möglichst homogene Abdeckung des Kantonsgebiets abgezielt. Wobei auch den untersch. geografischen und windtechnisch zusammengehörenden Gebieten wo immer möglich Beachtung geschenkt wurde. Es ist ersichtlich, dass der zentrale und nördliche Teil des Kantons Zürich mit diesen 3 Stationen und den 2 zusätzlichen Messstandorten relativ gut abgedeckt ist, der südliche Teil jedoch weniger (vgl. auch Abb. 6). Aus diesem Grund ist zusammen mit dem Auftraggeber entschieden worden, sich mit einem sog. Reanalyse-Datenpunkt zu behelfen. Die Qualität dieser Daten hinsichtlich der absoluten Werte ist geringer als bei Messungen vor Ort. Idealerweise dienen solche Reanalysedaten als Korrelationsbasis für Messungen vor Ort, um deren Langjahresbezug herzustellen. Zur qualitativen Aufwertung wäre beispielsweise eine LiDAR-Messung im südlichen Kantonsteil optimal. Folgende Abbildung verdeutlicht die Verteilung der Messstandorte.

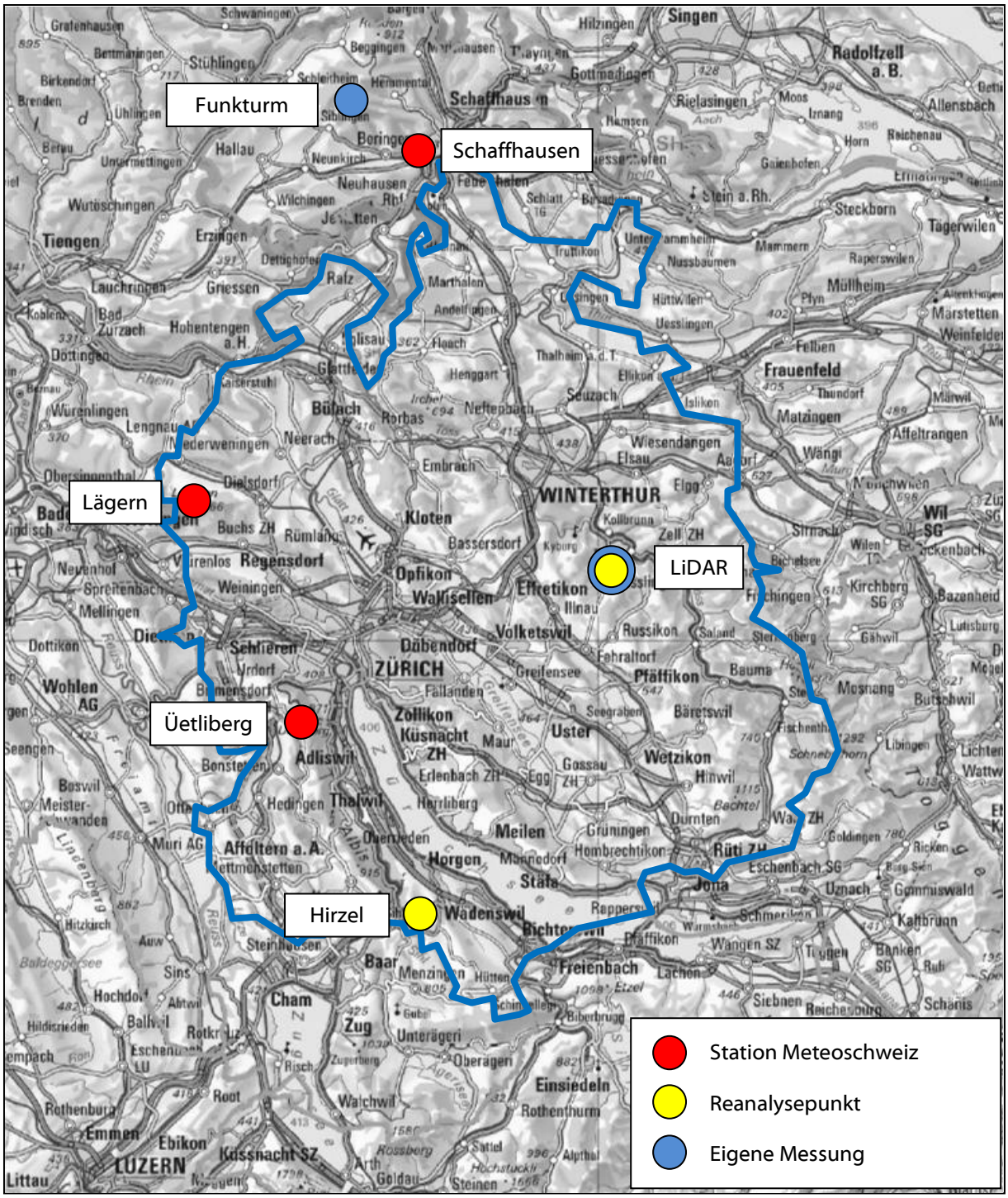

Abb. 3: Verwendete Datenpunkte.

Alle gewählten Messstationen von Meteoschweiz haben den Vorteil, dass sie an Sendemasten montiert sind und sich deshalb in verhältnismässig grosser Höhe über Boden befinden. Mit zunehmender Messhöhe über Boden nehmen allgemein die Einflüsse der umliegenden Topografie auf die Messung ab, was geringere Wahrscheinlichkeiten systematischer Verfälschungen der Messung bedeutet. Zudem liegen sie auf exponierten Hügeln und sind daher von allen Seiten (ausgenommen die Abschattung durch Sendemasten) frei anströmbar.

Die folgende Tabelle zeigt die Merkmale der berücksichtigten Messstationen bzw. Messdaten:

Station	Koordinaten [LV03]	Stationshöhe [m ü. M.]	Messhöhe [m ü. G.]	Messperiode	Zeitliche Auflösung
Üetliberg (Meteoschweiz)	679'450/245'050	854	189	02.1992-06.2011	10 min
Lägern (Meteoschweiz)	672'250/259'460	845	26	01.1990-12.2012	1 h
Schaffhausen (Meteoschweiz)*	688'171/283'072	523.5	53	03.2008-12.2012	10 min
Messung Siblinger Funkturm*	682'542/287'236	840	65	08.2010-01.2013	10 min
Messung LiDAR*	Genauer Standort vertraulich	695	100	01.2010-02.2010 und 10.2011-12.2011	10 min (1 h nach langjähriger Korrelation)

* die Messreihe wurde langjährig korreliert und dadurch die Messperiode erweitert

Tabelle 3: Verwendete Windmessstationen und eigene Messungen.

Es wurden weitere Meteoschweiz-Stationen auf ihre Eignung für Ressourcenberechnungen geprüft. Besonders die **Station Hörnli** im südöstlichen Kantonsgebiet wäre wegen seiner Lage im Kanon sehr günstig, jedoch zeigten Zwischenergebnisse, dass die relativ hohe Geländekomplexität in der Umgebung der Station und die geringere Höhe ab Boden sowie umliegende Hindernisse (Bäume) grössere Auswirkungen auf die Anströmung und Vergleichbarkeit der Daten zeigt. Dies führte zu überdurchschnittlichen Modellierungsabweichungen. Aus diesem Grund wurde sie für die Ressourcenberechnung nicht berücksichtigt (s. Anhang 8.2). Mangels anderer Messdaten ist damit leider der südöstliche Kantonsteil mit dem Zürcher Oberland entsprechend mangelhaft abgedeckt. Zusammen mit der gebirgigen Topografie resultieren daraus die allergrössten Unsicherheiten in den Modellierungsresultaten.

In folgender Tabelle sind Details zu den verwendeten Reanalysedaten gegeben, die von Vortex [2] bezogen wurden. Weiterführende Details sind im Anhang 8.1 dargestellt.

Um die generelle Eignung der Reanalysedaten zu prüfen, wurde für den Standort Üetliberg eine 6-monatige Test-Datenreihe bezogen und mit der Datenreihe der Messstation Üetliberg korreliert. Dies wurde für alle drei verfügbaren Reanalysemodelle durchgeführt (s. Anhang 8.1), wobei die beste Korrelation (Korrelationskoeffizient $r_h = 0.77$) mit Daten des ERA-Interim-Modells erreicht wurde. Die Korrelation war als relativ gut zu bewerten, was die allgemeine Eignung der Reanalysedaten für die Ressourcenberechnung bestätigt.

Standort	Koordinaten [LV03]	Standorthöhe [m ü. M.]	Modellierungshöhe [m ü. Grund]	Zeitliche Auflösung
Hirzel	688'136/230'204	765	100	1 h
LiDAR-Standort	Genauer Standort vertraulich	695	100	1 h

Tabelle 4: Verwendete Reanalysepunkte.

3.1.7 Langjährige Korrelationen

Die Winddaten der Meteoschweiz-Stationen Üetliberg und Lägern haben im Gegensatz zu denjenigen der Station Schaffhausen langjährigen Status (d.h. Datenzeitreihe >10 Jahre). Die Daten von Schaffhausen, der Messung am Siblinger Funkturm und besonders jene der LiDAR-Messung lagen als Kurzzeitdaten vor. Sie wurden daher mit Langzeitreihen korreliert und so auf ein langjähriges Niveau hochgerechnet. Durchgeführt wurden die Korrelationen mit der sog. MCP-Methode (Measure-Correlate-Predict, Software WindPro 2.8), die sich wiederum einer linearen Regression bedient. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengefasst und nachfolgend erläutert.

Station	Korreliert mit Station	Korrelations-koeffizient r_h (Basis Stundenmittel / Tagesmittel) [-]	Mittel der gemessenen horizontalen Windgeschwindigkeit auf Messhöhe vor / nach der Korrelation [m/s]
Schaffhausen (Meteoschweiz) 53 m ü. Boden	Üetliberg (Meteoschweiz) 189 m ü. Boden	0.53 / 0.70	3.3 / 3.5
Messung Siblinger Funkturm 65 m ü. Boden	Üetliberg (Meteoschweiz) 189 m ü. Boden	0.61 / 0.76	4.9 / 4.9
Messung LiDAR 100 m ü. Boden	Vortex (gleicher Standort wie Messung) 100 m ü. Boden	0.67 / 0.85	4.1 / 4.8

Tabelle 5: Ergebnisse der langjährigen Korrelationen.

3.1.7.1 Langjährige Korrelation der Meteoschweiz-Station Schaffhausen

Die Daten der Station Schaffhausen wurden mit den Langzeitdaten der Station Üetliberg korreliert und somit auf dessen Messperiode erweitert.

Es wurde ebenfalls die Korrelation mit der Station Lägern geprüft, die eine geringere räumliche Distanz zur Station Schaffhausen aufweist. Mit der Station Üetliberg wurde jedoch ein höherer

Korrelationsparameter r - ein Mass für die Güte der Korrelation – erzielt. Das bedeutet, die gemessenen Windverhältnisse am Üetliberg sind repräsentativer für den Standort Schaffhausen, als jene der Station Lägern.

Ein weiterer Vorteil der Korrelation mit Üetliberg war die höhere zeitliche Auflösung. Denn die Korrelation konnte auf 10min-Basis durchgeführt und dadurch zusätzliche Unschärfe durch zeitliche Mittelung vermieden werden.

Insgesamt ist der Koeffizient als befriedigend zu bewerten.

3.1.7.2 Langjährige Korrelation der Messung am Siblinger Funkturm

Die Daten der Messung am Siblinger Funkturm wurden ebenfalls mit den Langzeitdaten der Station Üetliberg korreliert. Von der räumlich näher gelegenen Station Schaffhausen waren keine Langzeitdaten vorhanden, wie in Kapitel 3.1.7.1 erläutert.

Der gerundete Mittelwert der gemessenen horizontalen Windgeschwindigkeit änderte sich nicht durch die langjährige Korrelation.

Die Korrelationskoeffizienten sind als gut zu bezeichnen. Sie liegen deutlich über jenen der Station Schaffhausen, trotz des geringen Abstands der beiden Messpunkte Schaffhausen und Siblinger Funkturm. Dies ist auf das höhere mittlere Windgeschwindigkeitsniveau der Messung am Siblinger Funkturm zurückzuführen (u.a. wegen höherem Messniveau über Boden, s. hierzu auch Kapitel 3.1.8).

3.1.7.3 Langjährige Korrelation der LiDAR-Messung

Zwei LiDAR-Messkampagnen zu je 1-2 Monaten wurden innerhalb eines Zeitraumes von 22 Monate durchgeführt. Eine im Jahr 2010 und eine im Jahr 2011. Für die Korrelation wurden langjährige Reanalysedaten vom Standort der Messung bezogen. Weiterführende Details zu Vortex-Reanalysedaten und den zugrundeliegenden Modellen sind im Anhang 8.1 gegeben.

Die Korrelation der LiDAR-Messung führte zu einer Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeit um 0.7 m/s. Dies ist plausibel, da einerseits die Messung während relativ windschwacher Wintermonate stattfand, andererseits die Messdauer (und damit der Überlappungsphase der beiden Messreihen) gering war. Der Korrelationskoeffizient ist als befriedigend bis gut zu bewerten.

3.1.8 Windstatistiken

Aus den langjährigen Windmessdaten wurden anschliessend regionale Windstatistiken berechnet (mittels Höhenmodell, Rauhigkeitskarte und lokalen Hindernissen wie z.B. Häuser, Sendemast).

In folgender Abbildung sind die modellierten Windenergierosen an den Standorten der Datenpunkte ersichtlich.

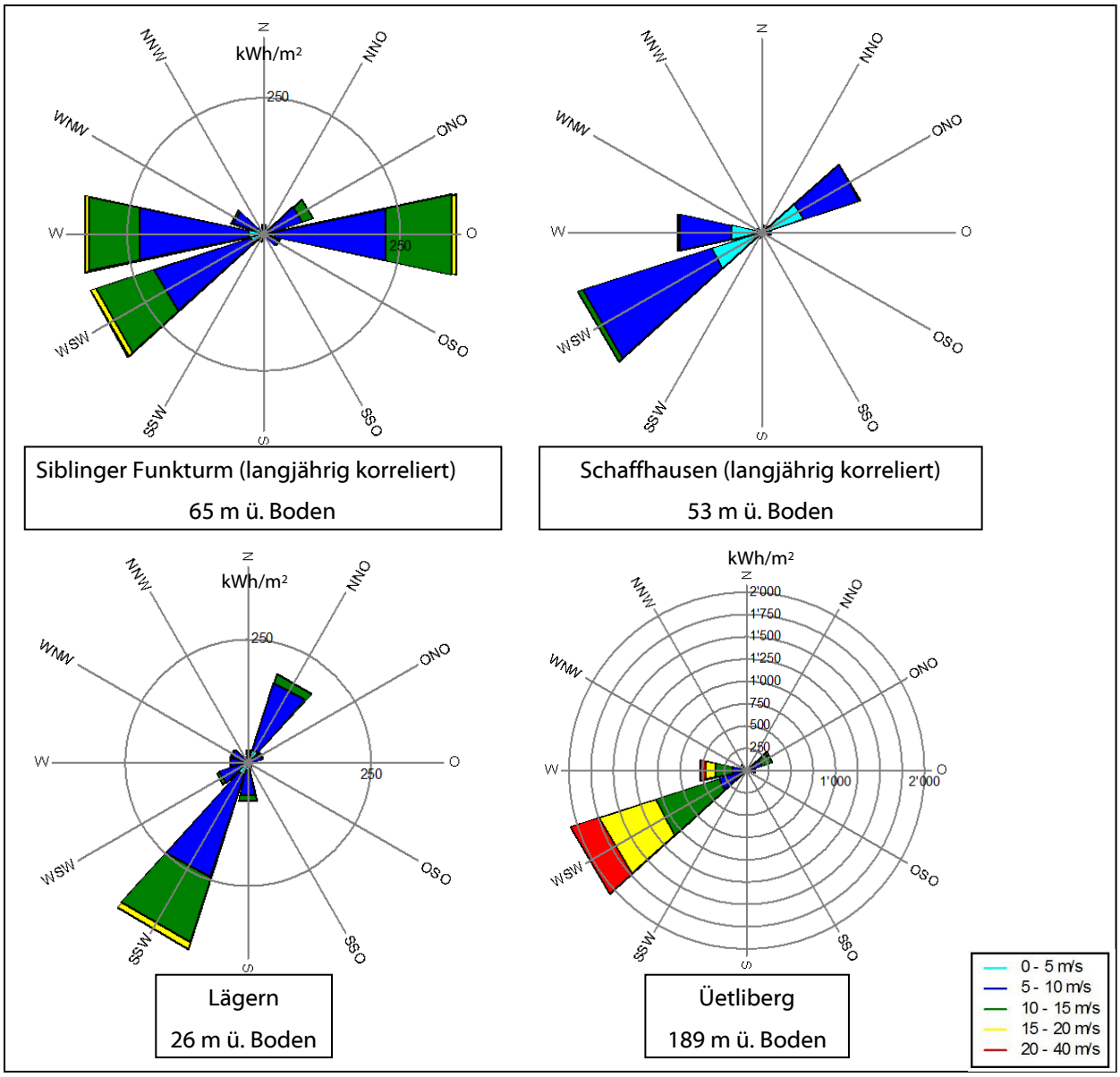

Abb. 4: Berechnete Windenergierosen auf Basis von Stationsmessungen.

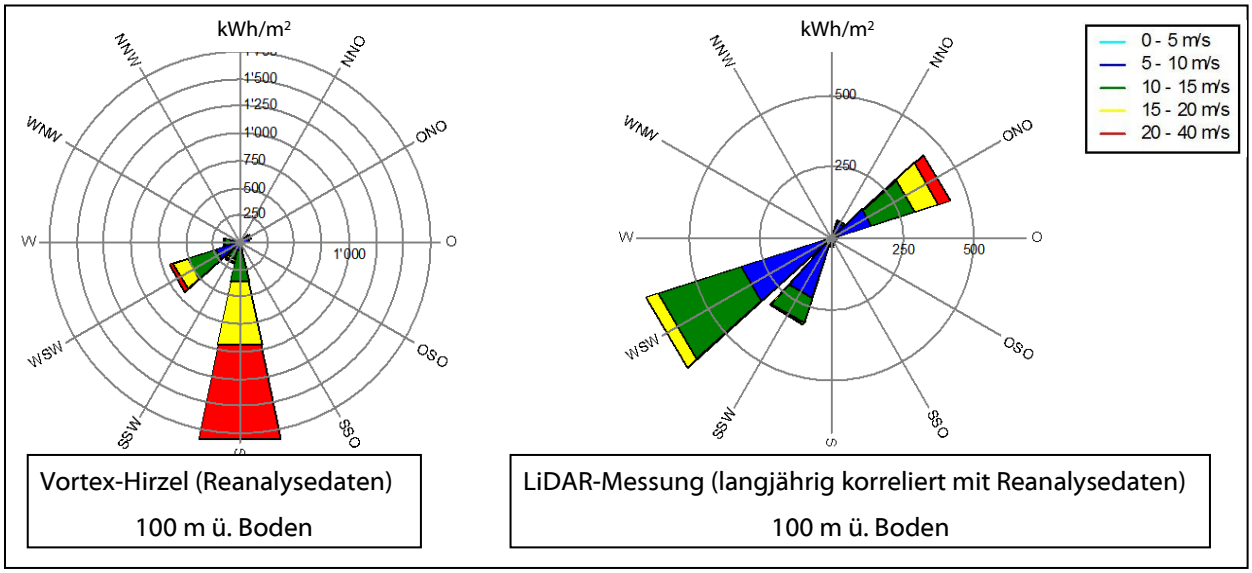

Abb. 5: Berechnete Windenergierosen auf Basis von Reanalysedaten und LiDAR-Messung.

Kommentar: Windenergierosen setzen sich aus der sektorbezogenen Häufigkeitsverteilung (umgangssprachlich „Windrosen“) und der sektorbezogenen Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeit zusammen. Sie geben an, aus welchen Sektoren die „Energie“ kommt. Dies ist im Anhang 8.3 genauer beschrieben.

Es wird Folgendes ersichtlich:

- Bei Schaffhausen, Lägern, Üetliberg und der LiDAR-Messung dominieren die südwestlichen Komponenten, wobei sich teilweise auch nordöstliche Sektoren als energiereich darstellen.
- Die Energierose des Siblinger Funkturms zeigt eine starke West- und Ost-Komponente. Diese sind mit hoher Wahrscheinlichkeit durch lokale orografische Gegebenheiten erzeugt (südlich und westlich steil abfallendes Gelände).
- Die Windenergierose am Hirzel zeigt als Einzige eine extrem dominante Südkomponente. Dies ist darauf zurückzuführen, dass aus diesem Bereich die höchsten Geschwindigkeiten erzeugt wurden. Hinsichtlich der Häufigkeit dominiert deutlich der Wind aus dem südwestlichen Sektor (s. hierzu Anhang 8.3).

3.1.9 Räumliche Aufteilung der Windressourcenberechnung

Zur Berechnung der Windressourcenkarte wurde die Kantonsfläche in drei Teilflächen unterteilt (ZH-Nord, ZH-Südwest und ZH-Ost). Die Aufteilung wurde so gewählt, dass die Teilflächen hinsichtlich der Topographie und somit auch der Modellierungsgenauigkeit möglichst homogen sind. Jede Teilfläche wurde in Rasterelemente (50 x 50 m) zergliedert und für jedes Rasterelement die mittlere Windgeschwindigkeit für eine Höhe von 100 m über Boden berechnet. Als Datenbasis wurden die für die jeweilige Teilfläche repräsentativsten Stationen, bzw. Datenpunkte gewählt. Die Gewichtung der Datenpunkte ergab sich aus deren Abstand zum Mittelpunkt der jeweiligen Teilfläche. Im Gegensatz zu einer globalen Berechnung der Kantonsfläche (in einer einzigen Karte) hat das hier gewählte Vorgehen den Vorteil, dass die Modellierungsunschärfe für jede Teilfläche reduziert wird. Dies ist gerade in Gebieten mit komplexer Topographie empfehlenswert. Allerdings entstehen dadurch teilweise nicht eindeutige Ergebnisse in den Überlappungsbereichen, die nachbearbeitet wurden.

Folgende Abbildung zeigt die Unterteilung des Kantonsgebiets.

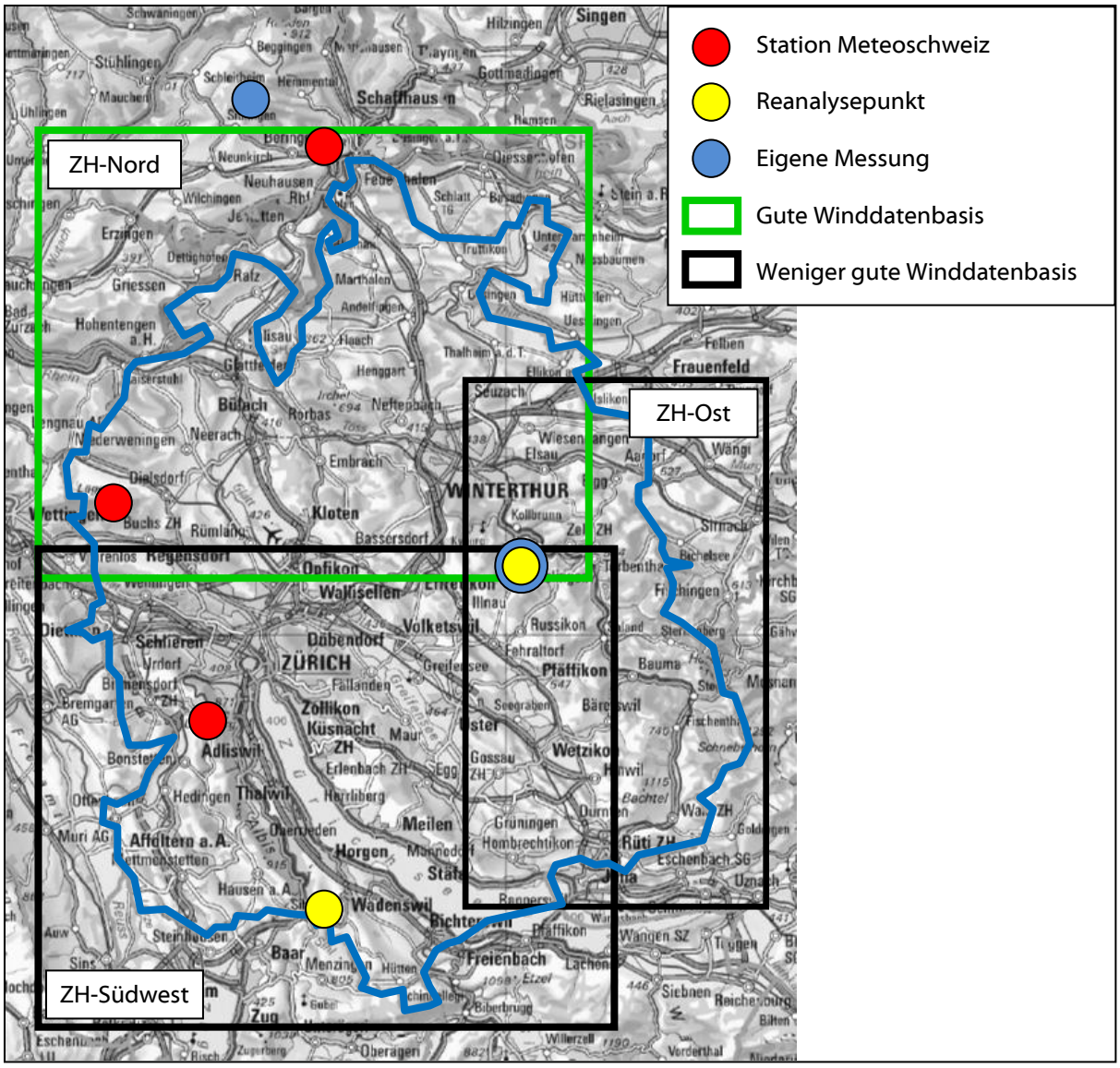

Abb. 6: Unterteilung der Kantonsfläche in Teilflächen ZH-Nord, ZH-Südwest und ZH-Ost.

Die folgende Tabelle zeigt die Gewichtung der einzelnen Windstatistiken:

Windstatistik	**Teilberechnung ZH-Nord [%]**	**Teilberechnung ZH-Südwest [%]**	**Teilberechnung ZH-Ost [%]**
Üetliberg	15	33	19
Lägern	20	13	-
Schaffhausen	27	-	-
Messung Siblinger Funkturm	20	-	-
Messung LiDAR	18	18	61
Vortex-Hirzel	-	36	20

Tabelle 6: Gewichtung der Windstatistiken.

3.1.10 Fazit

Die Winddatenbasis im und um den Kanton Zürich ist im Grossen und Ganzen als befriedigend zu beurteilen. Der Nordteil ist mit vorhandenen Windmessungen in grosser Höhe einigermassen gut abgedeckt, der Süd- und Ostteil dagegen eher weniger. Diese Lücke ist mit Reanalysedaten geschlossen worden, welche allerdings mit grösseren Unsicherheiten behaftet sind.

Eine Berechnung der Windressourcen mittels WAsP ist für einen Grossteil des Zürcher Kantonsgebiets eine gute Methode. In komplexem Gelände wie bspw. dem Zürcher Oberland stösst die Software jedoch an ihre Grenzen. Eine Alternative wäre eine CFD-Modellierung gewesen, welche jedoch in gemeinsamer Absprache mit dem Auftraggeber aus Kostengründen und Gründen der Verhältnismässigkeit nicht gewählt wurde. Ein solches Modell für sich alleine hätte zudem nicht automatisch zu einem präzisen Resultat geführt. Denn für eine gute Schlussaussage ist eine gute Qualität der Eingangsdaten nötig, idealerweise mittels mehrerer Messpunkte in der jeweiligen Teilfläche. In Bezug auf die Messgüte (Instrumente), Messdauer und Messhöhe ab Boden sind da die Voraussetzungen v.a. für den Bereich des Oberlandes noch nicht ideal. Geplante Windmessungen in konkreten Projekten, seitens der Fachhochschulen oder Dritten könnten in Zukunft eine Grundlage schaffen für eine Neuberechnung mit geringeren Unsicherheiten im Resultat.

Eine detaillierte Beurteilung des Berechnungsmodells inkl. Unsicherheitsbetrachtung wird im Kapitel 5 dieser Studie gegeben. Die Windressourcenkarte wird in Kapitel 4.1 erläutert.

3.2 Flächenanalyse

3.2.1 Definition

Bei der hier angewendeten Flächenanalyse wird mittels eines GIS-Programmes (Geografisches Informationssystem) die Gesamtfläche des definierten Perimeters durch Ausschlussflächen eingegrenzt. Ausschlussflächen sind diejenigen Flächen, in denen per Definition keine Windenergienutzung stattfinden soll. Bei einzelnen Ausschlussflächen können zusätzlich bestimmte Pufferzonen definiert werden. Die Kriterien und die verwendeten Pufferdistanzen wurden zusammen mit dem Auftraggeber festgelegt.

3.2.2 Vorgehen

Bei der Flächenanalyse werden die folgenden Schritte durchgeführt:

Schritt 1: Reduktion der gesamten untersuchten Flächen durch harte Ausschlusskriterien („Killerkriterien“), die in naher Zukunft nicht verändert werden (können) (vgl. auch Kapitel 3.2.4):

- Zonen mit Lärmempfindlichkeitsstufe I oder II gemäss Zonenplan plus Pufferdistanz
- Bewohnte Gebäude in Zonen mit Lärmempfindlichkeitsstufe III plus Pufferdistanz

- Strassen (Hochleistungsstrassen Bund und Kanton, kantonale Hauptverkehrsstrassen, kantonale regionale Verbindungsstrassen) plus Pufferdistanz
- Bahnlinien plus Pufferdistanz
- Hindernisbegrenzungsflächen Flugplätze
- Wetterradar plus Pufferdistanz
- Stehende Gewässer und Flüsse
- Grundwasserschutzzone S1
- Gewisse eidgenössische Inventare

Schritt 2: Anwendung und kartografische Darstellung von weichen Ausschlusskriterien, deren Ausschlusswirkung in einer Interessensabwägung oder durch gewollte politische Stossrichtungen in Zukunft durchaus verändert werden können (vgl. auch Kapitel 3.2.5):

- BLN-Gebiete
- Kantonale Schutzverordnungen (SVO-Objekte und Zonen inkl. altrechtliche Schutzverordnungen)
- Natur-/Landschaftsschutzinventar 1980

3.2.3 Überlegungen zur weiteren Eingrenzung

Weitere Kriterien wurden vom Auftraggeber in dieser Stufe bewusst noch nicht mit einbezogen. Deren Behandlung soll erst basierend auf den Resultaten der genannten zwei Schritte oder in der Einzelfallabwägung erfolgen.

Es wurden folgende Überlegungen der Eingrenzung zu Grunde gelegt:

- Laufende Entwicklungen auf Ebene Bund wie z.B. das neu vorgesehene „nationale Interesse“ für Windkraftanlagen sowie die Bestrebungen zur Energiewende werden zu Verschiebungen in den Interessens-Abwägungsprozessen führen. Speziell bei Interessenskonflikten mit der Luftfahrt, mit Kommunikationsstrecken, mit dem Militär und mit Landschaftsschutzgebieten ist die bisherige Entscheidungshistorie wahrscheinlich keine exakte Leitlinie mehr, die in Zukunft gleich gehandhabt wird. Diesbezügliche Handlungsempfehlungen oder allgemeingültige Festlegungen, die als harte Ausschlusskriterien dienen könnten, sind erst im Laufe der Zeit anhand der Praxis möglich.
- Gleiches gilt für die Thematik Windenergienutzung im Wald
- Auf Ebene Kanton können und sollen nicht alle für ein Projekt entscheidenden Parameter erfasst und einbezogen werden. Die auf dem Kantonsgebiet aktiven Promotoren werden als genügend erfahren eingeschätzt, um einen Standort bezüglich der meisten Kriterien seriös einzuschätzen zu können. Die Wahrscheinlichkeit, dass unrentable oder illusorische Projektideen weiterverfolgt werden, wird als gering betrachtet.

- Verschiedene Kriterien weisen keine homogene, über die Kantonsfläche verfügbare Datenbasis auf, um Standorte bezüglich einem Einschluss / Ausschluss nach gleichen Massstäben zu beurteilen (z.B. Fledermaus/Vogelzug)
- Auf Stufe Projekt müssen weitere standortabhängige Abklärungen getroffen werden wie z.B. zu Eiswurf, Netzanschluss, Fledermaus, Vögel, Landschaftsbild, Wirtschaftlichkeit, allfällige weiter gefasste Pufferdistanzen etc.

Aus diesen Gründen wurde vom Auftraggeber beschlossen, die Kriterien auf ein Minimum zu beschränken und viele Abklärungen auf die Stufe Projekt zu verlagern. Damit werden a priori natürlich weit umfangreichere Eignungsflächen resultieren, allerdings im klaren Bewusstsein, dass sowohl in weiteren Entscheidungsstufen als auch aufgrund von internen Überlegungen von potenziellen Promotoren auf Stufe Projekt viele dieser Standorte nicht zur Realisierung kommen werden.

3.2.4 Bemerkungen zu den harten Ausschlusskriterien

<u>Generell</u>

Eine allfällige Pufferdistanz zwischen einer Windenergieanlage und der jeweiligen Ausschlussfläche ist definiert als die Distanz zwischen dem Fundamentrand der Windenergieanlage und dem Umriss des Ausschlusskriteriums (Bemerkung: bei modernen grossen Windenergieanlagen beträgt der Fundamentdurchmesser zwischen 16 m und 25 m, abhängig vom Untergrund und von der Grösse der Anlage).

<u>Zonen mit Lärmempfindlichkeitsstufe I, II resp. III gemäss Zonenplan</u>

In der eidgenössischen Lärmschutzverordnung LSV wird u.a. festgelegt, welche Planungswerte in Bezug auf den Lärmschutz für verschiedene Lärmempfindlichkeitsstufen eingehalten werden müssen. Basierend darauf teilen die Gemeinden ihr Gemeindegebiet den Empfindlichkeitsstufen zu, in der Regel wird jeder Zone des Zonenplans eine spezifische Lärmempfindlichkeitsstufe (ES) I bis IV zugewiesen:

- ES I: Zonen mit einem erhöhten Lärmschutzbedürfnis
- ES II: Reine Wohnzonen und Zonen, in denen keine störenden Betriebe zugelassen sind
- ES III: Zonen, in denen mässig störende Betriebe zugelassen sind / Landwirtschaftszone
- ES IV: Industrie- und Gewerbezonen, in denen stark störende Betriebe zugelassen sind.

Zusammen mit dem Auftraggeber ist beschlossen worden, dass zur kartografischen Analyse im Rahmen dieser Studie die Pufferdistanzen zwischen Windenergieanlagen und den Zonen mit Empfindlichkeitsstufe ES I mit 700m angesetzt werden. Zu Zonen mit ES II ein Abstand von mind. 500 m und zu bewohnten Gebäuden in Zonen mit ES III ein solcher von 300 m. Die exakten Abstände eines konkreten Projektes sind allenfalls grösser, müssen dann aber auf Stufe der Projekt-UVB mittels eines Lärmgutachtens ermittelt werden. Dies unter Berücksichtigung der

Anzahl der Windkraftanlagen, des Anlagentyps und vieler weiterer standortspezifischen Charakteristika. Die genannten Werte dienen dazu Gebiete auszuschliessen die von vornherein nicht in Frage kommen.

Die bewohnten Gebäude sind dem eidg. Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) entnommen worden, Stand Juli 2013 (Gebäudekategorien GKAT 1021, 1025, 1030, 1040):

- GKAT 1021: Einfamilienhaus, ohne Nebennutzung
- GKAT 1025: Mehrfamilienhaus, ohne Nebennutzung
- GKAT 1030: Wohngebäude mit Nebennutzung
- GKAT 1040: Gebäude mit teilweiser Wohnnutzung

Strassen und Bahnlinien

Zu Hochleistungsstrassen von Bund und Kanton, kantonalen Hauptverkehrsstrassen sowie kantonalen regionalen Verbindungsstrassen wie auch zu Bahnlinien (SBB, ZVV, Privatbahnen, Stadtbahn bestehend/geplant) sollte ein Sicherheitsabstand eingehalten werden, sofern sie sich nicht in einem Tunnel befinden, um den Verkehr z.B. vor Eiswurf zu bewahren. Dieser Abstand ist auf 50 m festgesetzt worden. Je nach Lage der Windenergieanlage, der Rotorblattlänge in Bezug auf den Verkehrsträger kann dieser Abstand auch grösser sein (muss auf Ebene Nutzungsplanung vertieft abgeklärt werden).

Flughafen Zürich-Kloten

Hindernisbegrenzungsflächen gemäss Sicherheitszonenplan (Entwurf 2013): Die Hindernisbegrenzungsflächen im gültigen Sicherheitszonenplan stimmen im nahen An- und Abflugbereich mit den Flugrouten überein. In diesen Zonen gelten die in den Plänen angegebenen Höhenbeschränkungen für Bauten und Anlagen.

Hindernisbegrenzungsflächen gemäss PANS-OPS OIS (PANS-OPS: Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations; OIS: Obstacle Identification Surface): PANS-OPS OIS sind weitere für die Flugsicherheit relevante Flächen mit Höhenbegrenzungen von weniger als 200 m. Diese Flächen sind nicht im Sicherheitszonenplan enthalten. Ihre Verletzung würde aber im Rahmen des Bewilligungsverfahrens für Luftfahrthindernisse grösser 25/60 m ü. G. zu einer ablehnenden Stellungnahme seitens der Flugsicherungsbehörden führen.

Weitere Flugplätze/-felder

Die folgenden Flugplätze oder Flugfelder im oder im Einflussbereich des Kantons Zürich sind gemäss Sachplan Infrastruktur der Luftfahrt (SIL), Stand Januar 2013 mit Hindernisbegrenzungsflächen versehen:

- Flugplatz Dübendorf (Zivil mitbenützter Militärflugplatz)
- Flugfeld Speck-Fehraltorf
- Flugfeld Hasenstrick

- Flugfeld Hausen am Albis
- Segelflugfeld Winterthur

Der Flugplatz Dübendorf wird nicht mehr als Militärflugplatz benützt. Seine zukünftige Nutzung steht noch nicht fest, weshalb seine Hindernisbegrenzungsflächen nicht als Ausschluss für Windenergieanlagen gelten, sondern lediglich informativen Charakter haben.

Das Segelflugfeld Winterthur ist von zwei unterschiedlichen Hindernisbegrenzungsflächen umgeben: eine in Richtung der An- und Abflugschneisen und eine Horizontalebene mit einem Radius von 5 km um das Zentrum des Flugfeldes. Erstere ist als Ausschlussfläche definiert worden, letztere als zusätzliche Information.

Wetterradar

Standorte von Wetterradarstationen im Kanton Zürich und seinem Umfeld gemäss Sachplan Infrastruktur der Luftfahrt (SIL):

- Albis (vgl. Abb. 7)

Abstände von Windenergieanlagen zu Wetterradarstationen gemäss internationalen Empfehlungen der WMO - World Meteorological Organization: „Commission for Instruments an Methods of Observation, 15th session; WMO-No. 1064“:

- Bis 5 km Distanz sollten keine Windenergieanlagen errichtet werden
- 5-20 km: Beeinträchtigungen sind je nach Topografie möglich. Genauere Abklärungen werden empfohlen und eine Beeinträchtigung kann ev. durch Verschiebung der Anlagen minimiert oder beseitigt werden.
- Ab 20 km ist die Beeinträchtigung des Wetterradars gering

Der Deutsche Wetterdienst DWD hat, gestützt auf oben genanntes Dokument, eine eigene Abstandsforderung von Windenergieanlagen zu seinen Messsystemen publiziert (DWD: Information zur Errichtung von Windenergieanlagen im Nahbereich der Messsysteme des Deutschen Wetterdienstes, Abstandsanforderungen und Höhenbeschränkungen; Revision 1.4 – 25.01.2013). Darin wird die Ausschlussdistanz von 5 km übernommen, die Schwelle wo genauere Abklärungen unternommen werden müssen resp. wo Höhenbeschränkungen gelten, jedoch von 20 km auf 15 km herabgesetzt.

Für die Schweiz gibt es keine eigenen Regelungen. Eine Anlehnung an die Empfehlungen der WMO dürfte deshalb wahrscheinlich sein. Ein Ausschluss von Windenergieanlagen bis zu einer Distanz von 5 km ist sehr wahrscheinlich und wird somit in dieser Studie angewendet. Die Radien 15 km und 20 km sind in der Resultatkarte informativ eingezeichnet.

Bei Überlappungsbereichen von verschiedenen Wetterradaren kann es sein, dass der bezüglich von einem Radar durch Windkraftanlagen abgeschattete Bereich von anderen Radarstationen eingesehen werden kann. Diese Option ist stark abhängig von der Anordnung der Stationen in

Bezug auf das Projektgebiet, der Topografie und muss in jedem Fall im Einzelfall geprüft werden. In der folgenden Abbildung noch nicht eingezeichnet sind die Abdeckungsbereiche der neuen Radarstationen auf der Plaine Morte (VS) und auf dem Weissfluhgipfel ob Davos.

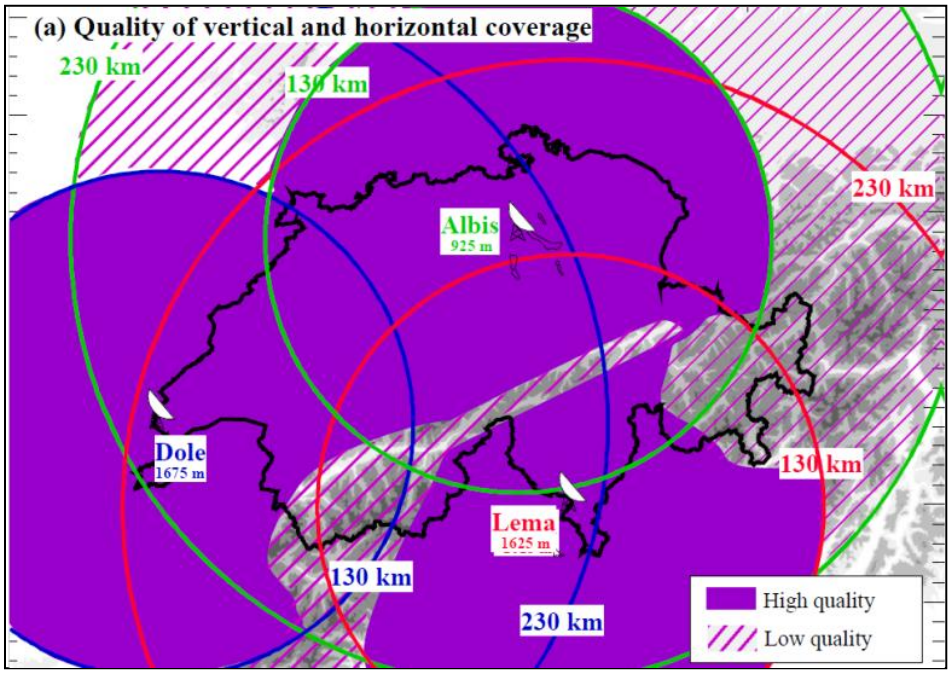

Abb. 7: Abdeckungsbereiche der Wetterradarstationen von MeteoSchweiz (Quelle: http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/messsysteme/atmosphaere/radar/projekt_rad4alp.html).

Stehende Gewässer und Flüsse

Zu stehenden Gewässern und Flüssen gemäss Datensatz VECTOR25 von Swisstopo soll in dieser Studie kein Mindestabstand berücksichtigt werden. Bei einem konkreten Windenergieprojekt müssen aber sowohl die eidg. Gewässerschutzverordnung (GSchV) als auch kantonale Gesetze und Verordnungen mitsamt ihren Mindestabständen eingehalten werden.

Grundwasserschutzzone S1

Grundwasserschutzzonen S1 werden gemäss kantonaler Gewässerschutzkarte (Stand 22.10.2010) ausgeschlossen. Zonen der Kategorie S2 sind bewusst nicht ausgeschlossen worden, die Errichtung von Windenergieanlagen ist dort jedoch mit erhöhten Auflagen verbunden.

Eidgenössische Inventare

Die in der folgenden Tabelle aufgeführten eidgenössischen Schutzgebiete sind als Ausschlusskriterium definiert worden:

Eidgenössische Inventare	Quelle
Hochmoore	Bundesamt für Umwelt; Stand 2008
Flachmoore	Bundesamt für Umwelt; Stand 2007
Moorlandschaften	Bundesamt für Umwelt; Stand 2007
Kernzone Nationalpark	Bundesamt für Umwelt; Stand 2010
Naturerlebnispark	Bundesamt für Umwelt; Stand 2013

Tabelle 7: Ausschluss eidgenössischer Inventare.

Zusammenfassung der harten Ausschlusskriterien

Folgende Tabelle fasst die angewendeten Ausschlusskriterien inkl. allfälliger Mindestabstände zusammen (Abstand 0 m bedeutet Ausschluss der Fläche ohne zusätzlichen Abstand):

Harte Ausschlussflächen	Mindest-Abstand
Bewohnte Gebäude gemäss GWR: GKAT 1021, 1025, 1030, 1040 Empfindlichkeitsstufen (ES) gemäss Zonenplan	ES I: 700 m ES II: 500 m ES III: 300 m
Strassen (Hochleistungsstrassen Bund und Kanton, Hauptverkehrstrassen kantonal, Regionale Verbindungsstrassen kantonal)	50 m
Bahnlinien (SBB, ZVV, Privatbahnen, Stadtbahn bestehend/geplant)	50 m
Flughafen Zürich-Kloten: - Hindernisbegrenzungsflächen gemäss Sicherheitszonenplan - Hindernisbegrenzungsflächen gemäss PANS-OPS OIS	0 m
Weitere Flugplätze/-felder (ohne Flugplatz Dübendorf): Hindernisbegrenzungsflächen	0 m
Wetterradar	5‘000 m
Stehende Gewässer und Flüsse	0 m
Grundwasserschutzzonen S1	0 m
Eidgenössische Inventare (Moorlandschaften, Hoch-/Flachmoore, Kernzone Nationalpark, Naturerlebnispark)	0 m

Tabelle 8: Ausschlusskriterien für grosse Windenergieanlagen für die Windpotentialstudie.

3.2.5 Bemerkungen zu den weichen Ausschlusskriterien

Generell

In Zonen, welche als weiches Ausschlusskriterium definiert sind, inkl. allfälliger Mindestabstände, können Windenergieanlagen grundsätzlich errichtet werden. Dazu sind vom Projektplaner aber sicher weitere spezifische Abklärungen nötig und die Bewilligungsbehörden müssen die Nutzungs- resp. Schutzinteressen gegeneinander abwägen und der Windkraft den Vorzug geben.

Ein nationales Interesse für gewisse Windenergieprojekte soll laut der Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 vom 4. Sept. 2013 des Bundesrates vorgesehen werden. Diese Entwicklung kann dazu führen, dass an gewissen Standorten die Interessenabwägung zu Gunsten der Windkraft ausfallen kann. Auch wenn in der Vergangenheit eine Berücksichtigung resp. eine Planung in den folgenden Schutzgebieten in den meisten Kantonen ausgeschlossen wurde, wurde hier vom Auftraggeber bewusst im Hinblick auf oben genannte Entwicklung die Ausschlusswirkung nicht als absolut angenommen, um auch die Potenziale innerhalb von diesen Gebieten auszuleuchten.

BLN-Gebiete

In BLN-Gebieten (gemäss Bundesamt für Umwelt BAFU, Stand Oktober 2012) ist grundsätzlich eine Interessenabwägung möglich, sofern gleichwertige nationale Interessen gegenüber gestellt werden. Der Kanton Schaffhausen zum Beispiel, der auf dem gesamten Kantonsgebiet fast keine geeigneten Standorte ausserhalb von BLN Gebieten hat, nahm bereits im Jahre 2010 Standorte innerhalb dieser Schutzgebiete als Vororientierung mit Eintrag in die Richtplan-Vorlage für den Kantonsrat auf.

Kantonale Schutzverordnungen (SVO-Objekte und Zonen)

Schutzzonen zu den überkommunalen Schutzverordnungen über die überkommunal bedeutenden Natur- und Landschaftsschutzgebiete auf der Grundlage des kantonalen Planungs- und Baugesetzes PBG (Quelle: Amt für Landschaft und Natur). Zonen, welche gemäss altrechtlicher Schutzverordnungen unter Schutz stehen, gehören ebenfalls in diese Kategorie.

Natur-/Landschaftsschutzinventar 1980

Das Amt für Raumplanung hat als kantonale Behörde ein Inventar der Natur- und Landschaftsschutzobjekte von überkommunaler (regionaler/kantonaler) Bedeutung" erstellt, welches 1980 vom Regierungsrat festgesetzt wurde. Der Begriff Naturschutz-Objekte umfasst dabei Feuchtwiesen, Trockenwiesen und Kiesgruben, während unter dem Begriff Landschaftsschutz-Objekte geologisch-geomorphologische Objekte, Findlinge, heckenreiche Hänge und lineare Gehölze (Hecken, Feldgehölze und Bachbestockungen) zusammengefasst werden. (Quelle: Amt für Landschaft und Natur)

3.3 Abschätzung des Windenergiepotentials im Kanton Zürich

3.3.1 Windenergiepotenzial bei verschiedenen Szenarien

Ausgehend von der Windressourcenkarte und der Flächenanalyse kann in den verbleibenden, potentiell geeigneten Gebieten das Windenergiepotential abgeschätzt werden. Dazu sind zusammen mit dem Auftraggeber die in der folgenden Tabelle ersichtlichen Szenarien ausgearbeitet worden.

Szenario	Ausschlusskriterien		Wind auf 100 m ü.G.	
	hart	weich	≥4 m/s	≥4.5 m/s
Szenario 1				X
Szenario 2a	X			X
Szenario 2b	X		X	
Szenario 3a	X	X		X
Szenario 3b	X	X	X	

Tabelle 9: Übersicht der Szenarien.

Szenario 1 stellt ein rein theoretisch wirtschaftlich mögliches Windenergiepotential dar ohne Berücksichtigung von raumplanerischen, politischen, gesellschaftlichen oder technischen Einschränkungen. **Die weiteren Szenarien** sind eine Kombination von unterschiedlich starken raumplanerischen Einschränkungen (harte und weiche Ausschlusskriterien) und unterschiedlicher Untergrenze der Wirtschaftlichkeit (4 m/s oder 4.5 m/s).

3.3.2 Bemerkung zu den gewählten Windgeschwindigkeiten

Bei 4 m/s (auf 100 m ü. G.) kann eine Windenergieanlage nicht wirtschaftlich betrieben werden. Moderne Binnenlandanlagen ernten den Wind jedoch meist in grosser Höhe, d.h. Nabenhöhen von 130-140 m sind normal. Auf dieser Höhe sind in vergleichbaren Regionen um ca. 0.5 m/s höhere Windgeschwindigkeiten als auf 100 m Höhe gemessen worden. Wird zusätzlich die Modellierungsungenauigkeit der Windressourcenkarte von mind. 15-20% in Betracht gezogen, so relativiert sich die Untergrenze von 4 m/s weiter. Setzt man die Untergrenze tiefer an, schliesst man nicht aus Versehen Gebiete aus, die dann bei Messungen auf Platz sich als besser herausstellen. Das Risiko, dass dadurch Projekte realisiert werden, die zu wenig Windpotential aufweisen, erachten wir als gering. Denn als einer der ersten und fundamentalen Schritte wird jeder seriöse Projektierer eines Windkraftprojektes ausreichende Windmessungen auf Platz ausführen, schon alleine um seine grossen benötigten Vorleistungen bis zur Bewilligung abzusichern. Zudem können in weiteren Beurteilungsschritten oder selbst auf Stufe Richtplan noch Standorte mit Vorbehalten (z.B. ausreichendes Windpotential) ausgewiesen werden.

3.3.3 Windenergieanlagentyp

Der Kanton Zürich ist im Allgemeinen als Region mit schwachen Winden zu charakterisieren. Für einige Stellen wie z.B. exponierte Kuppen oder Hügelzüge wie der Üetliberg, der Höhronen

oder Teile des Zürcher Oberlandes sind dagegen eher bessere Windpotentiale zu erwarten. Entsprechend diesen unterschiedlichen Windbedingungen unterscheidet sich auch die für die jeweilige Region am besten geeignete Windenergieanlage im Typ oder/und in der Nabenhöhe.

Für diese Abschätzung des Windenergiepotentials ist über das gesamte Kantonsgebiet im Sinne einer einheitlichen Herangehensweise nur ein Anlagentyp verwendet worden: Eine Anlage vom Typ ENERCON E-115 2.5 MW mit einer Nabenhöhe von 92 m in komplexem Gelände (z.B. oben erwähnte Hügelzüge) resp. 135.4 m in einfachem Gelände.

In den einzelnen Projektstandorten sind aus unterschiedlichsten Gründen (z.B. Zugänglichkeit) ev. andere Windkraftanlagentypen nötig oder möglich. Der Windkraftanlagenmarkt entwickelt sich schnell, so dass bis in ein paar Jahren ev. auch weitere Produkte zur Auswahl stehen werden. Schon jetzt ist absehbar, dass dank längeren Rotoren weitere Reduktionen der Gestehungskosten möglich sein werden. Dennoch kann mit dem gewählten Typ eine gute Basis für eine Aussage geschaffen werden.

3.3.4 Platzierung der Windenergieanlagen innerhalb einer Eignungszone

In einem ersten Schritt sind die windreichsten Standorte innerhalb einer Eignungszone als Standort einer Windenergieanlage ausgewählt worden. Diese wurden zuerst mit potenziellen Anlagen bestückt. Anschliessend sind die weiteren Anlagen unter Berücksichtigung von planerischen Mindestabstandskriterien (Abstand zwischen den Anlagen: 5mal Rotordurchmesser in angenommener Hauptwindrichtung, 3.5mal Rotordurchmesser in Nebenwindrichtung) um die besten Anlagenstandorte herum platziert worden (siehe folgende Abbildung).

Bei der Platzierung erfolgte keine Berücksichtigung von möglichen Zufahrtswegen, Netzanbindung oder von zusätzlichen Ausschlusskriterien wie z.B. Hochspannungsleitungen oder Sendeantennen und auch keine explizite Berücksichtigung der Geländebeschaffenheit. Die Berücksichtigung dieser Kriterien sowie weiteren Rahmenbedingungen bezüglich sozialer Akzeptanz, politischer und planerischer Vorgaben auf kommunaler Ebene, konnten im Rahmen dieser gesamtkantonalen Studie nicht erfolgen. Sie muss in nachgelagerten standortspezifischen Untersuchungen erfolgen und würde den Rahmen dieser Studie sprengen. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die gefundene Anzahl Anlagenstandorte einem technisch-planerischen Maximalpotenzial auf der übergeordneten Ebene entspricht. Das umsetzbare Potenzial ist erfahrungsgemäss erheblich geringer.

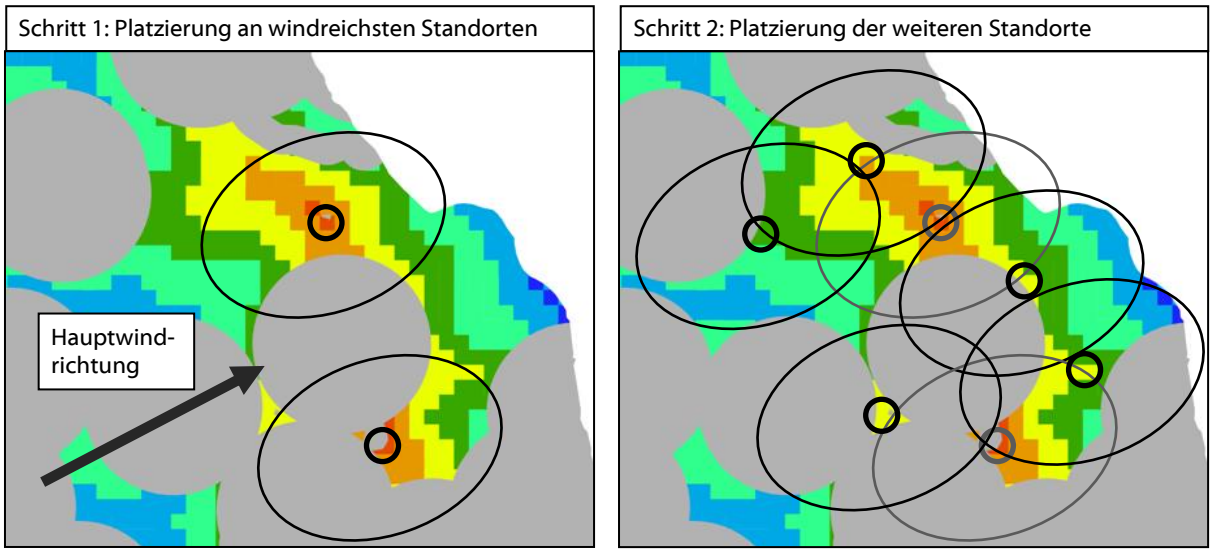

Abb. 8: Beispielhafte Platzierung der Windenergieanlagen (Grau: Ausschlussflächen; Farbliche Codierung: zunehmende Windgeschwindigkeit von blauen zu roten Flächen).

3.3.5 Berechnung des Energieertrags

Auf Basis der Windressourcenkarte, des digitalen Geländemodells, den platzierten Windenergieanlagen sowie der berechneten Leistungskennlinie der Windenergieanlagen ist mit der Software WindPRO 2.9 der Energieertrag für sämtliche Szenarien berechnet worden. Aufgrund der verschiedenen Unsicherheiten in der Berechnung der Windressourcenkarte wie auch in der Energieberechnung, wird das Energiepotential als Wertebereich angegeben.

4 Resultate

4.1 Windressourcen 100 m über Grund

4.1.1 Erläuterungen zur Karte

Auf den folgenden Seiten sind die Ergebnisse der Windressourcenberechnungen kartographisch dargestellt. Die einzelnen Teilflächen wurden hierfür zu einer globalen Karte zusammengesetzt. Diese ist ebenfalls im Anhang in einer besseren Auflösung abgedruckt. Wie bereits beschrieben, wurde die räumliche Auflösung auf 50 m festgelegt. Auf allen Karten sind die Windressourcen für eine Berechnungshöhe von 100 m über Boden klassiert. Gebiete mit den höchsten zu erwartenden Windgeschwindigkeiten sind gelb-rot-braun eingefärbt, solche mit tiefen Windgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Blau-/Violett-/ Lilatönen.

Bemerkung zu den berechneten Windgeschwindigkeiten:

Das berechnete Windpotential hat vor allem indikativen Charakter. Lokale Geländemerkmale wie Sattellagen, Abschattungen durch nahe Berge oder enge Täler können den Wind mithin stark beeinflussen, was Abweichungen der Modellierungsergebnisse bedeuten kann. Dies wird im Kapitel 5 genauer beschrieben. Eine Modellierung von weiteren Höhen über Boden könnte sich anbieten, wurde aber im Rahmen dieser Studie nicht vorgesehen.

4.1.2 Teilfläche ZH-Nord

Im nördlichen Bereich ist das Windpotential geringer, lediglich im nordöstlichen Grenzgebiet auf dem Stammerberg und im nördlichen Grenzgebiet entlang des Cholfirst wurden moderat erhöhte Potentiale ermittelt. Im zentralen und südlichen Bereich weisen einerseits die Erhebungen um Rorbas (v. a. Irchel, Rhinsberg, Blauen), andererseits die Erhebungen westlich von Steinmauer (Lägern, In der Platten) sowie der Stadlerberg erhöhte Windgeschwindigkeiten auf. Leicht erhöhte Potentiale wurden darüber hinaus auf den Erhebungen um Winterthur (Dättnau und Kyburg und Elgg) errechnet.

4.1.3 Teilfläche ZH-Südwest

Im südwestlichen Bereich heben sich zwei Bereiche besonders heraus. Einerseits die Albiskette vom Üetliberg bis zum Ober Albis südwestlich des Sihltals, bzw. der Zimmerberg und der Hirzel nordöstlich des Sihltals. Andererseits die Erhebungen südlich und südöstlich von Egg (Pfannenstiel, Stollen). Darüber hinaus weist der entlang der südlichen Kantonsgrenze verlaufende Höhronen günstige Windverhältnisse auf. Speziell der südliche Teil ist durch die Nähe zu den Voralpen und das Fehlen von genügend aussagekräftigen Messdaten in dieser Region mit Vorsicht zu betrachten.

4.1.4 Teilfläche ZH-Ost

Die östliche Teilfläche des Kantons weist eine deutlich höhere Geländekomplexität auf als der nördliche und südwestliche Kantonsteil. Wie in Kapitel 3.1.6 beschrieben, können bei Geländesteigungen ab ca. 30% grobe Modellierungsfehler entstehen. Der südöstliche Kantonsteil unterliegt daher stark erhöhten Unsicherheiten. Dies ist im Anhang 8.2 genauer dargestellt. Dieses Gebiet ist in der folgenden Karte mit einer roten Linie markiert.

Erhöhte Windpotentiale im östlichen Bereich wurden vor allem für die Erhebungen nordöstlich bis südöstlich von Turbenthal berechnet. Im noch stärker zerklüfteten südlichen Bereich ergeben alle Erhebungen östlich von Bauma (Sternenberg, Hörnli, Hulftegg) und jene um Fischenthal/Gibswil (Allmen, Bachtel, Hüttchopf, Schnebelhorn) sehr hohe modellierte Windpotentiale. Ein Vergleich mit Daten der Meteostation Hörnli zeigt jedoch, dass das Windpotential auf den Hügeln in diesem Bereich mit hoher Wahrscheinlichkeit vom Modell überschätzt wurde (s. Anhang 8.2). Je nach Ausrichtung und Topografie wird die Abweichung in unterschiedlichem Masse sein, bei konkreten Standorten für Windkraftprojekte sind deshalb Windmessungen auf Platz noch dringender zu empfehlen als in den anderen Regionen. Die Modellierungsresultate können hier nur einen indikativen Charakter geniessen.

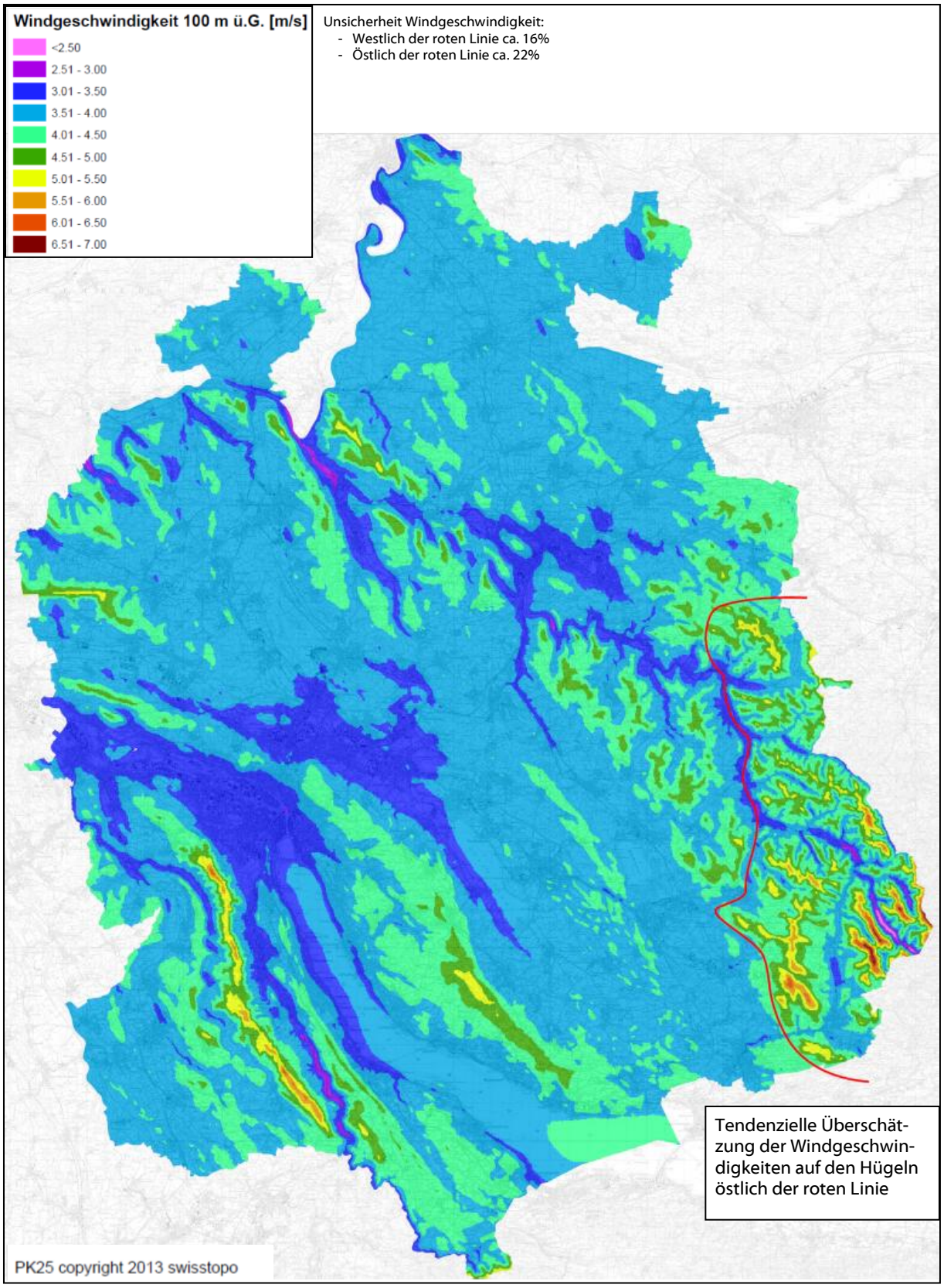

Abb. 9: Windressourcen 100 m ü. Grund (Unsicherheit Windgeschwindigkeit ±16% westlich der roten Linie und ca. 22% östlich der roten Linie).

4.2 Windenergieanlagen im Einflussbereich des Flughafens Zürich-Kloten

4.2.1 Übersicht

Der Flughafen Zürich-Kloten mit jährlich 279'000 Flugbewegungen und einer Fläche von 880 ha ist ein wesentlicher Faktor, den man bei der kantonalen Planung von Windenergieanlagen berücksichtigen muss. Allein das Areal des Flughafens erstreckt sich bereits über 5 Gemeinden (Kloten, Opfikon, Rümlang, Oberglatt, Winkel), das Einzugsgebiet der An- und Abflugschneisen ist jedoch noch viel grösser, wie die roten Flächen auf folgender Darstellung zeigen.

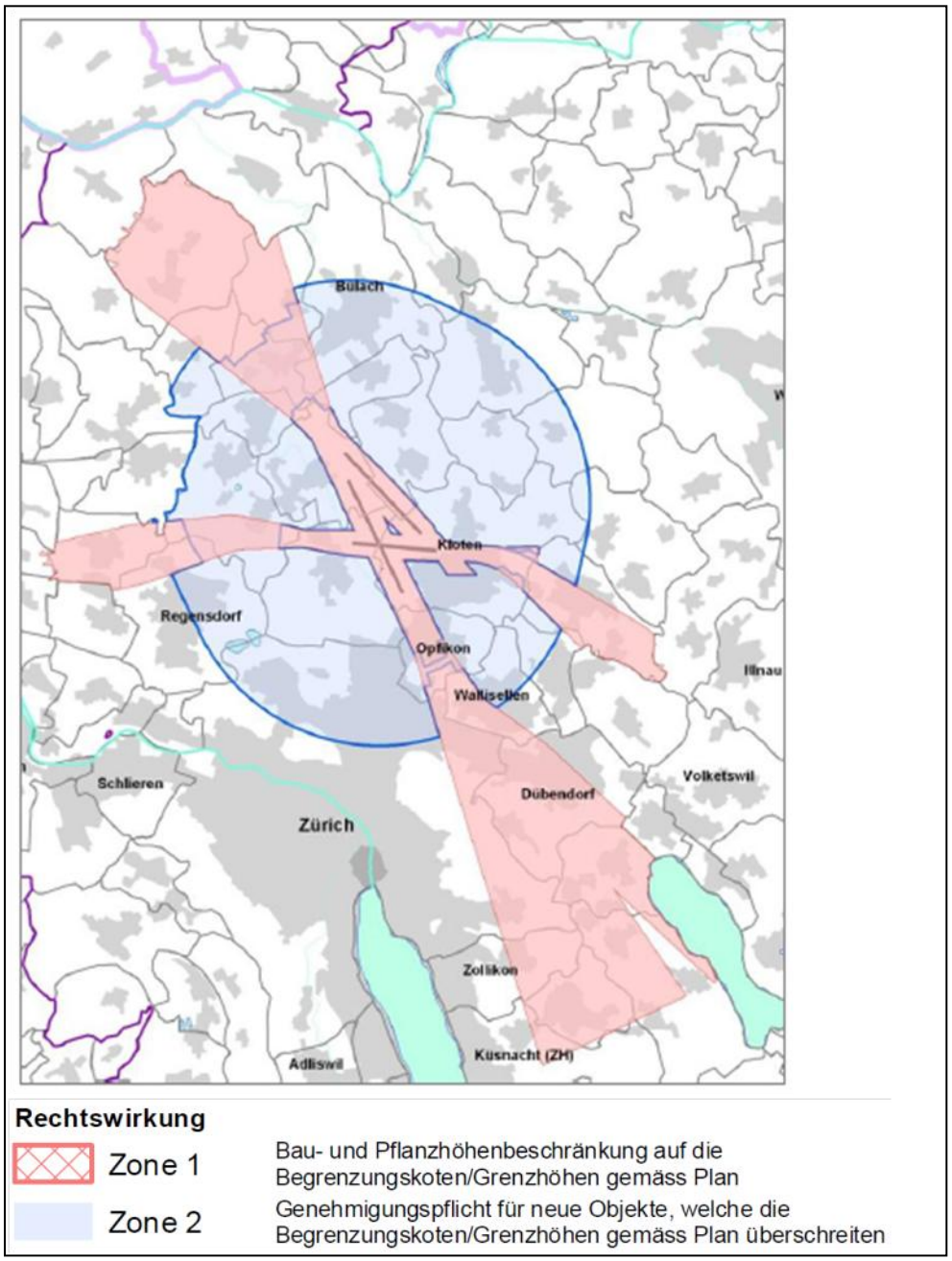

Abb. 10: Hindernis-Begrenzungsflächen Flughafen Zürich-Kloten.

4.2.2 Gesetzliche Grundlagen

In Art. 42 des Bundesgesetzes über die Luftfahrt kann der Bundesrat durch Verordnung vorschreiben, dass Bauten und andere Hindernisse in einem bestimmten Umkreis von öffentlichen Flugplätzen, Flugsicherungsanlagen oder in einem bestimmten Abstand von Flugwegen nur errichtet werden dürfen, wenn sie die Sicherheit der Luftfahrt nicht beeinträchtigen. Aus diesem Grund wird in der Verordnung über die Infrastruktur der Luftfahrt festgesetzt, dass für jeden Flughafen eine Sicherheitszone zu bestimmen und in einem Zonenplan abzubilden ist. Der Sicherheitszonenplan ist ein raumplanerisches Instrument, um die Entstehung neuer Luftfahrthindernisse zu vermeiden und die Höhe von Bauten zu beschränken. Daraus sind auch Eigentumsbeschränkungen nach Fläche und Höhe zugunsten des Flughafens ersichtlich. Die Sicherheitszonenpläne werden durch die Flughafenhalter öffentlich aufgelegt und erlangen dadurch unmittelbar Gültigkeit; das UVEK entscheidet über allfällige Einsprachen. Massgebend dafür sind die Hindernisbegrenzungsflächen-Kataster. Der Hindernisbegrenzungskataster ist der Plan der Hindernisbegrenzungsflächen für einen Flugplatz, eine Flugsicherungsanlage oder einen Flugweg.

Zudem gilt in der ganzen Schweiz eine Bewilligungspflicht für Luftfahrthindernisse, wenn sie in einer dichtbesiedelten Zone eine Höhe von 60 Metern und mehr oder in einem anderen Gebiet eine Höhe von 25 Metern und mehr aufweisen. Grosswindanlagen sind gemessen bis zur Flügelspitze üblicherweise über 60 Meter hoch und stellen daher grundsätzlich ein bewilligungspflichtiges Flughindernis dar.

4.2.3 Hindernisbegrenzungsflächen und Sicherheitszonenplan

Auch der Flughafen Zürich ist umgeben von Gebieten mit Hindernisbegrenzung. Diese Zonen ausserhalb des Flugplatzareals, in welchen internationale Standards in Form von Hindernisbegrenzungsflächen den für die Flugsicherheit erforderlichen Luftraum nach unten abgrenzen, befinden sich innerhalb der blauen und roten Flächen in der folgenden Abbildung. Die Hindernisbegrenzungsflächen im gültigen Sicherheitszonenplan stimmen im nahen An- und Abflugbereich mit den Flugrouten überein. In diesen Zonen gelten die in den Plänen angegebenen Höhenbeschränkungen für Bauten und Anlagen. Durchstösst eine mögliche Anlage eine Fläche des Sicherheitszonenplanes, wird keine Baubewilligung erteilt. Die folgende Abbildung zeigt den Sicherheitszonenplan in einer Gesamtübersicht. Massgebend sind die Zonenpläne der einzelnen Gemeinden, die auf der Gemeinde eingesehen werden können.

Für eine erste Prüfung der Bewilligungsfähigkeit eines möglichen Standorts im Kanton Zürich steht die kantonale Meldestelle Zonenschutz der Flughafen Zürich AG zur Verfügung. Die Kantonale Meldestelle entscheidet in Zusammenarbeit mit dem BAZL, ob und unter welchen Bedingungen und mit welchen Auflagen das Hindernis errichtet werden darf.

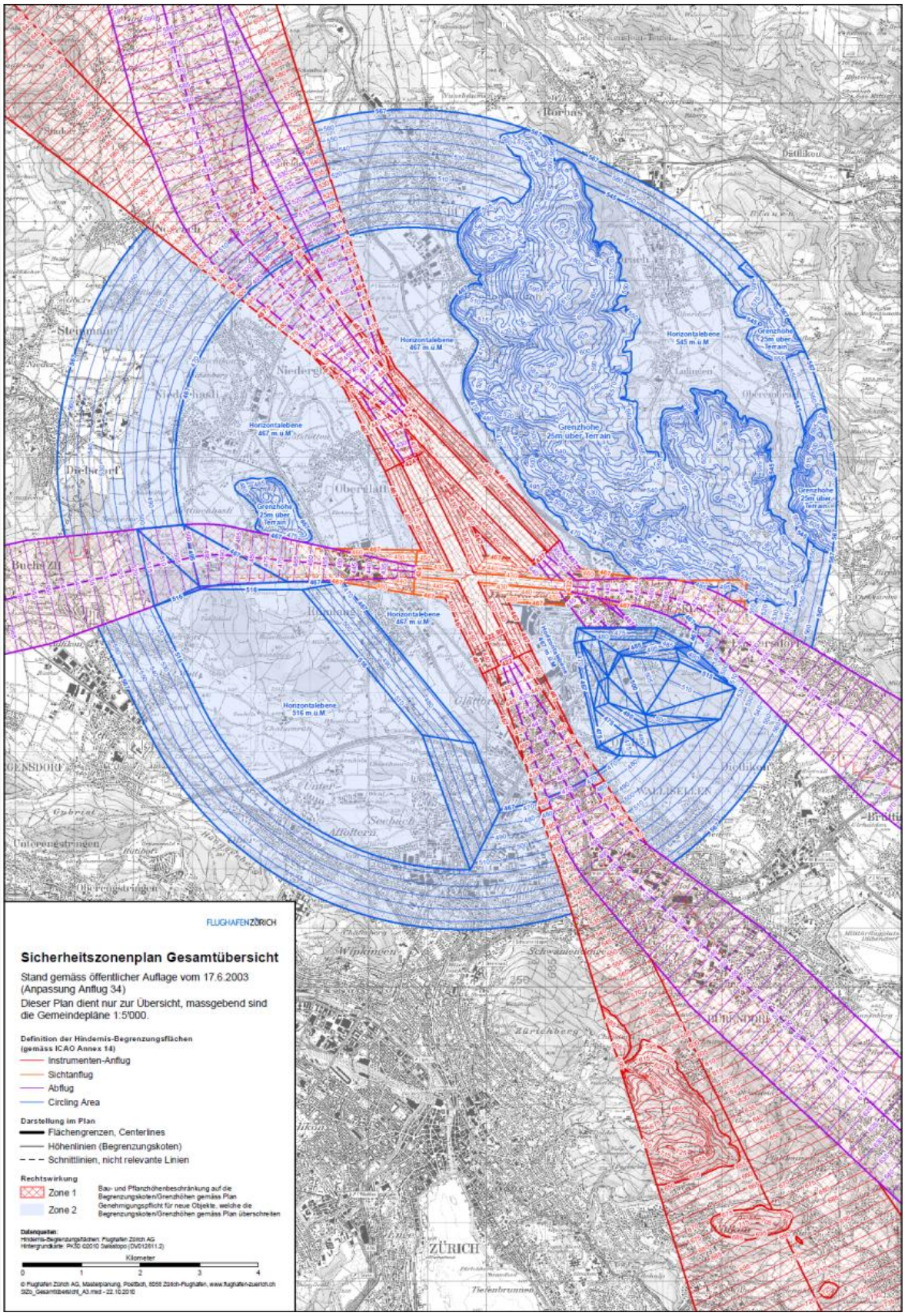

Abb. 11: Sicherheitszonenplan Gesamtübersicht des Flughafens Zürich-Kloten.

4.2.4 Abstände zwischen Windenergieanlagen und Flughäfen im Ausland

Aus Deutschland liegen Abstandsempfehlungen für die Planung von Windenergiegebieten vor (Landesplanerische Abstandsempfehlungen für die Regionalplanung zur Ausweisung von Windenergiegebieten, Stand Januar 2012). Für den Abstand zu Flugplätzen gibt es eine Spannweite von 500m – 2100m, wobei immer der Einzelfall zu prüfen ist.

Für den Flughafen Leipzig/Halle und Frankfurt am Main erarbeitet die Gesellschaft für Luftverkehrsforschung (GfL) zurzeit umfangreiche Untersuchungen zur Verträglichkeit von Windenergieanlagen mit Belangen der Luftverkehrsüberwachung und Flugführung. Die Untersuchung ist jedoch noch nicht abgeschlossen und die Berichte sind noch nicht öffentlich.

Dass sich Windkraft und Flughafenbetrieb nicht a priori weiträumig ausschliessen, zeigt das in der folgenden Abbildung dargestellte Beispiel aus den USA vom Flughafen Atlantic City in New Jersey. Dort stehen Windturbinen relativ nahe beim Flughafen. Sie wären kaum bewilligt worden wenn sie die Flugsicherheit gefährden würden. Die fünf 1.5 MW Turbinen mit einer Höhe von 120 m stehen seit 2005 nur 2.5 km vom Atlantic City Municipal Airport entfernt auf dem Gelände der Abwasserreinigungsanlage. Die Turbinen stehen in der Verlängerung der Piste, wie auf dem Bild unten schön zu sehen ist. Es sind hierzu auch andere Beispiele aus Deutschland, Spanien und anderen Ländern bekannt.

Abb. 12: GoogleEarth-Ausschnitt von Atlantic City Municipal Airport und Standort der 5 Windenergieanlagen.

4.2.5 Beeinflussung von Flugsicherungsanlagen durch Windenergieanlagen

Neben den Ausschlussflächen die aufgrund der Sicherheitszonenplanung nicht für Windenergie nutzbar sind, ist auch der Anlagenschutzbereich der Flugsicherungsanlagen bei der Planung zu beachten. Im Zusammenhang mit Instrumentenflugbetrieb gilt der Anlagenschutzbereich als Raum, innerhalb dessen Bauwerke die Abstrahlung der Flugsicherungsanlagen in inakzeptabler Weise stören können. Für alle Flugsicherungsanlagen gelten Schutzbereiche, die sich nicht auf die eigentlichen Grenzen des Anlagenstandorts beschränken, sondern weit darüber hinausgehen. Da sich die Bewegung der Rotorblätter negativ auf die Verfügbarkeit oder Qualität von Funk-, Navigations- und Radarsignalen auswirken kann, muss eine Bewilligung zum Bau von Windkraftanlagen auch vom Bundesamt für Zivilluftfahrt / Skyguide eingeholt werden, welche die gesamten Flugsicherungsanlagen betreibt.

Eine Aussage zu einer verbindlichen pauschalen Distanz zwischen Flugsicherungs- und Windenergieanlage kann Skyguide nicht geben, da es sehr auf die topographischen Gegebenheiten ankommt und auch wieviele Windenergieanlagen bereits vorhanden sind, wieviele geplant sind und in welchem Winkel sie zu den Flugsicherungsanlagen stehen. Skyguide wäre bereit für den Kanton Zürich eine kantonsweite Analyse über alle Anlagenschutzbereiche zu erstellen, in denen der Bau von Windenergieanlagen ausgeschlossen werden kann. Dafür müsste ihr aber seitens des Kantons ein Auftrag erteilt werden.

Flugsicherungsanlagen wie auch Windenergieanlagen werden laufend weiter entwickelt, so dass auch der Konfliktbereich zwischen diesen beiden Techniken stetig minimiert werden kann (z.B. Software-seitige Lösungen bei Radaranlagen, optimierte Materialoberflächen bei Windenergieanlagen etc.).

In folgender Abbildung ist ersichtlich, dass es über den gesamten Kanton Zürich verteilt mehrere Flugsicherungsanlagen gibt. Diese Tatsache ist bei einem konkreten Standort auf alle Fälle in die Planung frühzeitig mit einzubeziehen, da dies u. U. erhebliche Abstandsvorschriften mit sich bringen kann.

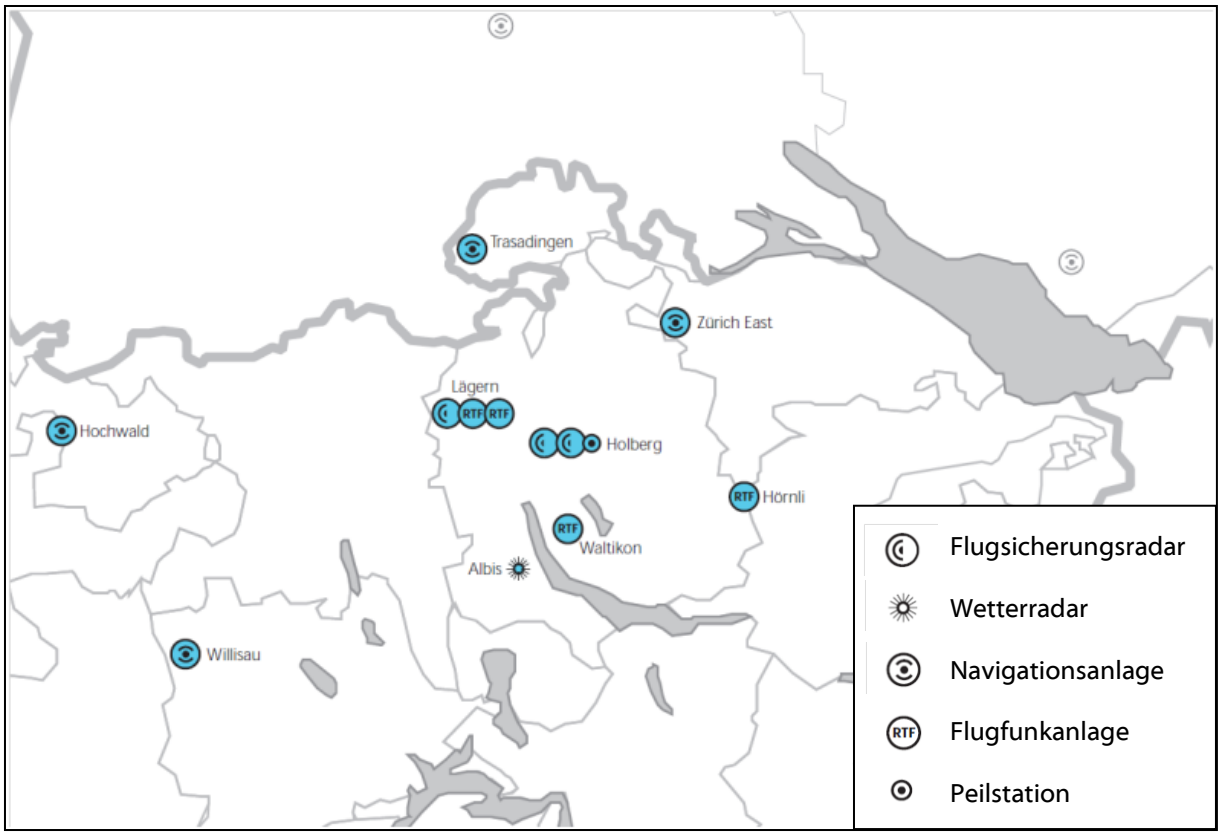

Abb. 13: Ausschnitt aus dem Sachplan Infrastruktur der Luftfahrt: Flugsicherungsanlagen, Stand 18.10.2000.

Zur Prüfung der Auswirkung von Bauten auf Flugsicherungsanlagen gibt es einen internationalen Standard von 2009, der auch in der Schweiz angewendet wird: Europäisches Anleitungsmaterial zum Umgang mit Anlagenschutzbereichen (Genaueres dazu in den folgenden Abschnitten).

<u>Drehfunkfeuer (Engl. Very High Frequency Omnidirectional Radio Range - VOR)</u>

Standorte von Drehfunkfeuern im Kanton Zürich und seinem Umfeld gemäss Sachplan Infrastruktur der Luftfahrt SIL (vgl. auch Abb. 13):

- Trasadingen
- Zürich-Kloten
- Zürich-East (Trüttlikon)

Abstände von Windenergieanlagen zu Drehfunkfeuer gemäss internationalen Richtlinien „European guidance material on managing building restricted areas; ICAO EUR DOC 015“, Stand: September 2009:

- Ab 5 km Distanz werden einzelne Windenergieanlagen meist akzeptiert
- Ab 10 km Distanz werden Windparks von weniger als 6 Anlagen meist akzeptiert
- Ab 15 km Distanz werden Windparks egal welcher Grösse akzeptiert

Im Einzelfall sollten bis zu einer Distanz von 15 km genauere Abklärungen zur Beeinflussung der Drehfunkfeuer durch Windenergieanlagen durchgeführt werden. Anlagenstandorte näher als 5 km sind grundsätzlich ebenfalls denkbar wenn auch mit der geringsten Wahrscheinlichkeit, weshalb es auf dieser Planungsstufe wenig Sinn macht eine pauschale Ausschlussdistanz zu definieren. Die Distanzen werden informativ in den Ergebniskarten dieser Studie eingezeichnet.

Peilstationen (Engl. Direction Finder - DF)

Standorte von Peilsendern im Kanton Zürich und seinem Umfeld gemäss Sachplan Infrastruktur der Luftfahrt SIL (vgl. auch Abb. 13):

- Holberg

Abstände von Windenergieanlagen zu Peilstationen gemäss internationalen Richtlinien „European guidance material on managing building restricted areas; ICAO EUR DOC 015“, Stand: September 2009:

- Ab 3 km Distanz werden einzelne Windenergieanlagen meist akzeptiert
- Ab 6 km Distanz werden Windparks von weniger als 6 Anlagen meist akzeptiert
- Ab 10 km Distanz werden Windparks egal welcher Grösse akzeptiert

Im Einzelfall sollten bis zu einer Distanz von 10 km genauere Abklärungen zur Beeinflussung der Peilstationen durch Windenergieanlagen durchgeführt werden. Anlagenstandorte näher als 3 km sind grundsätzlich ebenfalls denkbar, weshalb es auf dieser Planungsstufe wenig Sinn macht eine pauschale Ausschlussdistanz zu definieren. Die Distanzen werden informativ in den Ergebniskarten dieser Studie eingezeichnet.

Instrumentenlandesystem (ILS)

Welche Auswirkungen geplante Bauwerke auf den Sicht- und Instrumenten-Flugbetrieb und das ILS (Instrumentenlandesystem) haben, wird in der internationalen Richtlinie nicht erwähnt. Es kann dort –wie z.B. im Bereich des Flughafens Genf- jedoch auch zu Beeinträchtigungen ausserhalb der 15 km kommen, abhängig von den Anflugrouten, der Topografie und der verwendeten Technologie. Grundsätzlich gilt aber für alle Systeme, dass topographische Hindernisse (Hügel, Berge, Wald) zwischen Sicherungsanlage und Windturbine für die Machbarkeit eines Windkraftprojektes von Vorteil sind, da dann keine direkte Sichtverbindung besteht (mit direkter Sichtverbindung ist der Blickkontakt von der Gondel der Windenergieanlage auf die Flugsicherungsanlage gemeint).

4.3 Flächenanalyse

Auf den folgenden Seiten sind die Ergebnisse der Flächenanalyse kartographisch dargestellt. Die Karte aus Abb. 14 ist im Anhang in einer besseren Auflösung und in Grossformat abgedruckt. Abb. 15 ist dieselbe Darstellung wie Abb. 14, nur sind die Windressourcen kleiner als 4 m/s nicht dargestellt.

4.3.1 Gebiete mit harten Ausschlusskriterien

Sämtliche harten Ausschlussgebiete sind zusammengefasst und in der folgenden Karte dunkelgrau eingefärbt worden. Gleichzeitig ist die Windressourcenkarte hinterlegt worden, d.h. in Gebieten, welche von den Ausschlusskriterien nicht tangiert werden, erscheinen die Windressourcen in den verschiedenen Farbtönen.

Es ist ersichtlich, dass die Siedlungsgebiete mit ES-II sowie die bewohnten Einzelgebäude in Zonen mit ES-III grossflächige Ausschlussgebiete bilden. Die Hindernisbegrenzungsflächen, hauptsächlich herrührend vom Flughafen Zürich-Kloten, sind ebenfalls von entscheidender Bedeutung, v.a. für den zentralen und nordwestlichen Kantonsteil. Die Gebiete mit relativ hohen Windgeschwindigkeiten auf der Albiskette werden aus technischer Sicht v.a. mit dem Wetterradar Albis konfrontiert. Die übrigen Ausschlusskriterien sind eher punktuell von Bedeutung.

Es fällt auf, dass im nördlichen Kantonsteil einige ausgedehnte Potentialgebiete (= freie Gebiete nach Anwendung der harten Ausschlusskriterien) existieren, welche jedoch grösstenteils Windgeschwindigkeiten von unter 4.0 m/s aufweisen. Potentialgebiete mit Windgeschwindigkeiten von 4.5 m/s oder mehr kommen v.a. im Zürcher Oberland vor, aber auch auf dem Pfannenstiel, der Albiskette, dem Höhronen, dem Stammerberg, dem Cholfirst sowie dem Irchel.

4.3.2 Gebiete mit weichen Ausschlusskriterien

Zusätzlich zu den harten Ausschlussgebieten sind in der gleichen Karte noch die Gebiete mit weichen Ausschlusskriterien eingezeichnet worden (auf der Karte schwarz und violett schraffiert).

Sollte der Kanton oder die Regionen dort Windkraftstandorte vorsehen, sind wichtige Interessenabwägungen in den folgenden Gebieten durchzuführen:

- Windenergie vs. BLN-Gebiete: Betrifft v.a. die Gebiete Stammerberg, Irchel, Laubberg, Üetliberg, Ober Albis, Zimmerberg, Murimoos, Höhronen, Hügel im Zürcher Oberland östlich der Töss
- Windenergie vs. SVO-Objekte und Zonen: Gebiet zwischen Bachtel und Allmen (Bachtelschutzzone), sonst bezüglich Ausmass von untergeordneter Bedeutung und eher punktuell, da grossflächige SVO-Objekte, mit erwähnter Ausnahme der Bachtelschutzzone, wenig Wind aufweisen und windreiche Gebiete nur kleinräumige SVO-Objekte tangieren

- Windenergie vs. Natur-/Landschaftsschutzinventar 1980: Betrifft v.a. die Gebiete Altberg, Zimmerberg, Murimoos, Höhronen, Teile des Pfannenstiels, Batzberg, wenige Hügel im Zürcher Oberland westlich der Töss, Scheidegg, Dürrspitz, Tössstock, Schnebelhorn, Region Bichelsee-Turbenthal, Schauenberg, Luegeten bei Wildberg

4.3.3 Zusatzinformationen zur Flugsicherheit

Die internationalen Abstandsempfehlungen der ICAO zu den einzelnen Flugsicherungsanlagen (Drehfunkfeuer, Peilstation) sowie die Empfehlungen der WMO zum Wetterradar Albis sind in der Karte ebenfalls eingezeichnet. Sie gelten weder als hartes noch als weiches Ausschlusskriterium, müssen jedoch bei der konkreten Planung eines Windenergieprojektes standortspezifisch im Detail abgeklärt werden.

Vor allem die Drehfunkfeuer Zürich-East und Zürich-Kloten sowie der Wetterradar Albis können einen erheblichen Einfluss auf die gefundenen Windpotentialgebiete ausüben. Dies betrifft v.a. den nordöstlichen und nordwestlichen Kantonsteil sowie die Gebiete auf der Albiskette und dem Pfannenstiel.

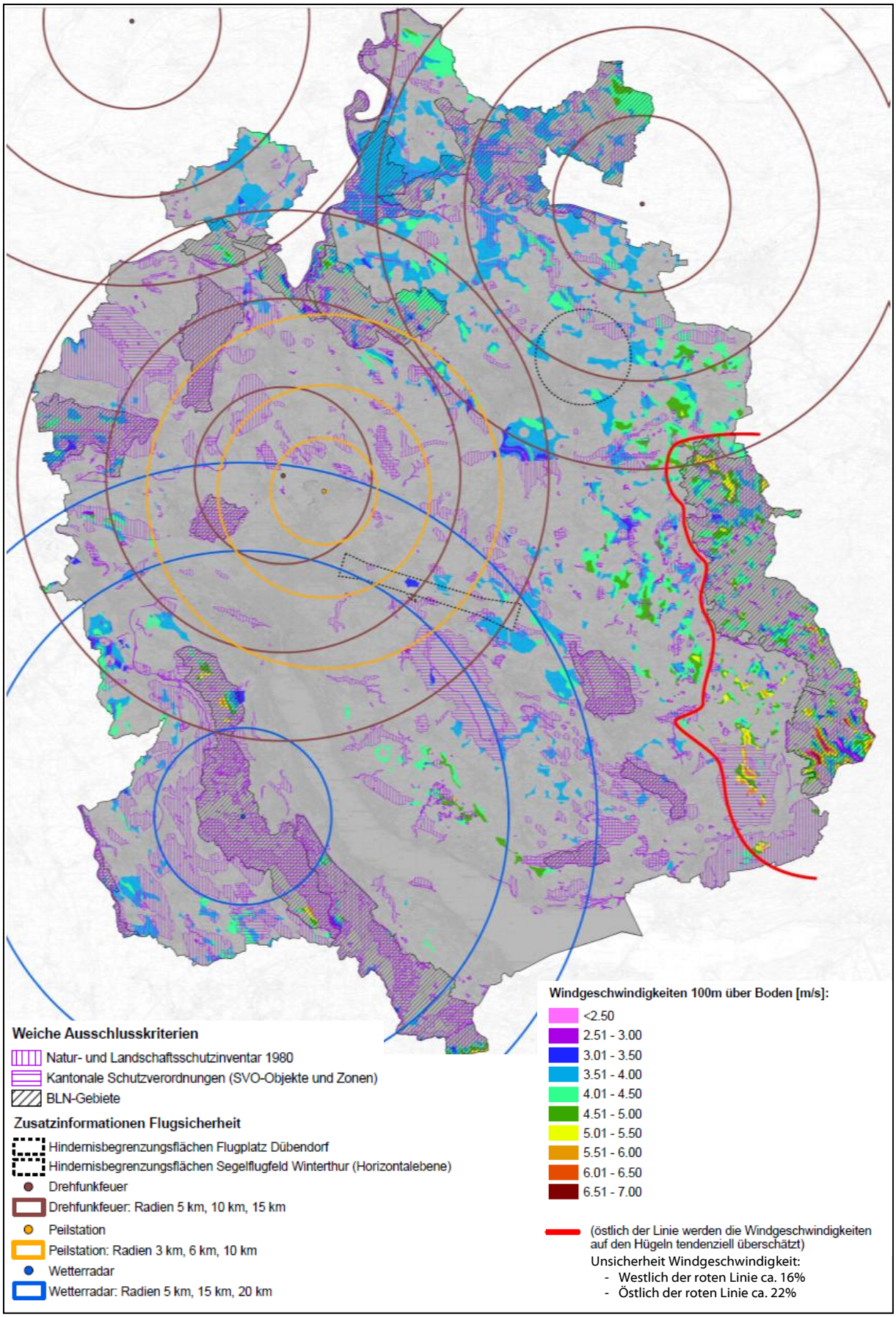

Abb. 14: Gebiete mit harten Ausschlusskriterien (grau), Gebiete mit weichen Ausschlusskriterien und Windressourcen 100 m ü. Grund.

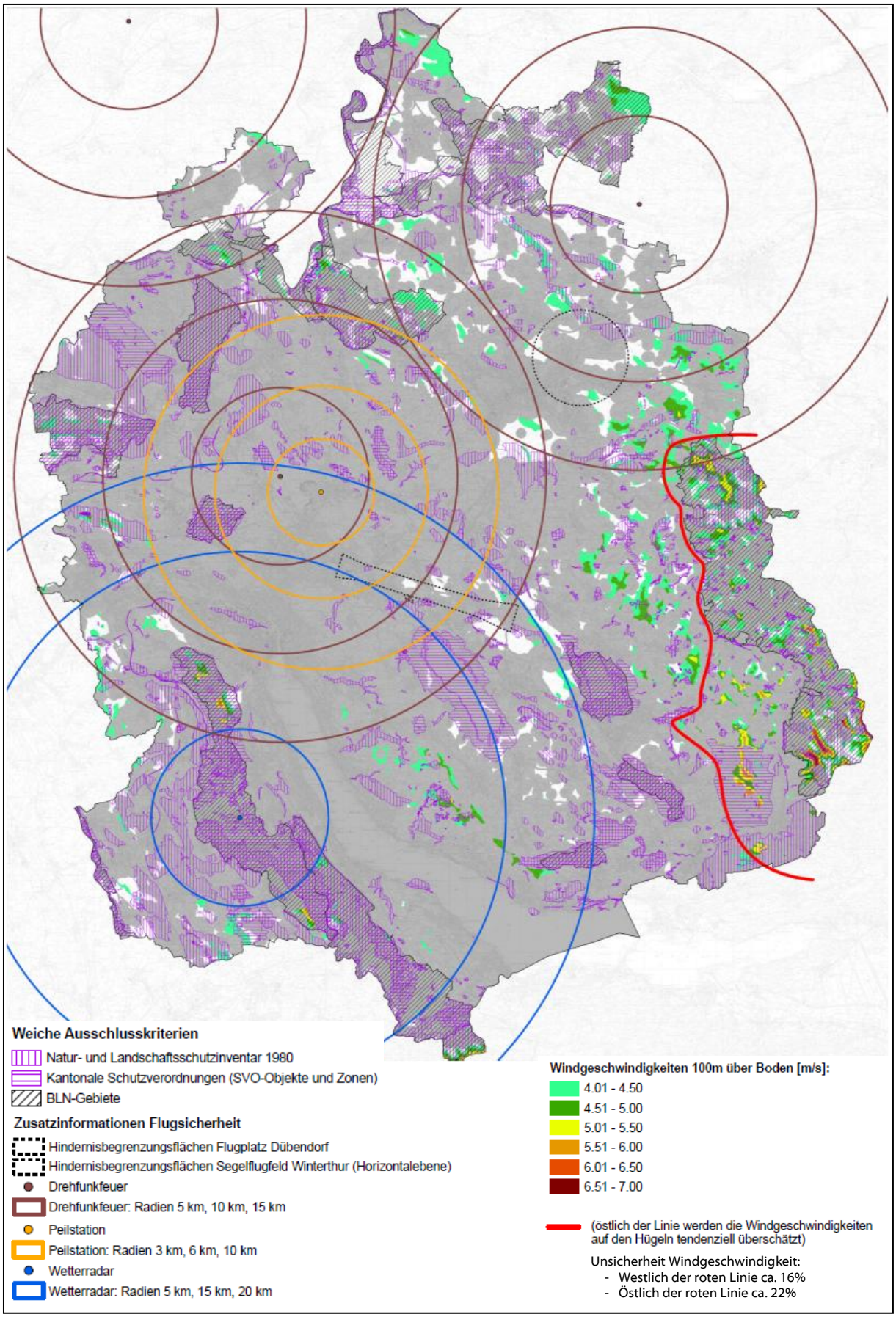

Abb. 15: Gebiete mit harten Ausschlusskriterien (grau), Gebiete mit weichen Ausschlusskriterien und Windressourcen >4 m/s auf 100 m ü. Grund.

4.4 Abschätzung des theoretischen Windenergiepotentials im Kanton Zürich

In der folgenden Tabelle ist der für jedes Szenario abgeschätzte Energieertrag ersichtlich:

Szenario	Kriterien (gemäss Tabelle 9)	Anzahl WEA	Installierte Leistung	Geschätzter Brutto-energieertrag *
		[-]	[GW]	[GWh]
Szenario 1	≥4.5 m/s	750-800	~2.0	2'700-3'500
Szenario 2a	Hart/≥4.5 m/s	300-350	~0.8	1'200-1'700
Szenario 2b	Hart/≥4 m/s	800-850	~2.1	2'400-3'300
Szenario 3a	Hart/weich/≥4.5 m/s	130-180	~0.4	450-750
Szenario 3b	Hart/weich/≥4 m/s	430-480	~1.2	1'250-1'750

Sämtliche Zahlen in dieser Tabelle noch ohne Berücksichtigung von:

- **technischen Einschränkungen wie z.B. Abstände zu Leitungen, Abschaltungen wegen Schattenwurf, Fledermäusen etc.**
- **politischen und raumplanerischen Einschränkungen wie z.B. gewollte Freihaltung von Regionen, bewusste Konzentration**
- **landschaftsästhetischen und touristischen Einschränkungen wie z.B. gewollte Freihaltung von Regionen, bewusste Konzentration**
- **Einschränkungen auf Grund der gesellschaftlichen Akzeptanz**

Die technischen Einschränkungen und Akzeptanzfragen sind erst auf Stufe Projekt optimal quantifizierbar. Die anderen Einschränkungen sind im weiteren Verlauf der kantonalen Planung (Richtplan), respektive im Rahmen der kantonalen Energiepolitik weiter einzugrenzen.

**unter Berücksichtigung der Abschattung der Windenergieanlagen untereinander, jedoch ohne weiterer Abschläge*

Tabelle 10: Geschätztes Windenergiepotential nach Szenarien.

Das rein theoretische Windenergiepotential im Kanton Zürich beträgt nach dieser Abschätzung zwischen 2'700 GWh und 3'500 GWh, was ungefähr einer installierten Leistung von 2 GW entspricht. Diese Leistung könnte mit 750-800 Windenergieanlagen des Typs Enercon E-115 erreicht werden.

In den Szenarien 3a und 3b, welche die grössten raumplanerischen Restriktionen beinhalten, ist immer noch ein Potential von 450-1'750 GWh oder 130-480 Windenergieanlagen vorhanden.

5 Plausibilisierung und Unsicherheiten der Windressourcenkarte

5.1 Plausibilisierung des Berechnungsmodells

Das Berechnungsmodell wurde durch folgende Arbeitsschritte plausibilisiert:

- Vergleich der gemessenen Winddaten mit am gleichen Standort modellierten Werten, die auf Windstatistiken anderer Meteostationen und den Inputparametern (Rauhigkeitskarte, Hindernisse und Höhenmodell) basieren. Damit wird kontrolliert ob das Modell die Situation an anderen Standorten gut abbildet.
- Vergleich der modellierten Ergebnisse (der Ressourcenkarte) mit den aus den Winddaten berechneten Windstatistiken an den Standorten der verwendeten Stationen, bzw. Datenpunkte. Dadurch wird gezeigt, in wie fern die flächige Berechnung mit einer bestimmten Gewichtung der Stationen diese Punkte adäquat wiedergibt.

5.1.1 Nachrechnung der gemessenen Winddaten

Die folgende Tabelle veranschaulicht die Plausibilisierung des verwendeten Modells. Dabei wurden die Windverhältnisse an den Messstationen bzw. Datenpunkten mit Windstatistiken nachgerechnet, die an anderen Stationspunkten aus den dort gemessenen Daten berechnet wurden. Es wurden jeweils die kürzeste und die weiteste Entfernung zwischen Messstation und Windstatistik gewählt. Ein Vergleich der gemessenen Windgeschwindigkeiten (Gesamtmittelwerte) mit den nachgerechneten Werten gibt Rückschluss auf die Güte des Modells.

Standort	Gemessene Windgeschwindigkeit (Meteo-Schweiz)	Berechnete Windgeschwindigkeit	Für die Berechnung verwendete Windstatistik	Entfernung zwischen den Stationen
Üetliberg	5.7 m/s	6.2 m/s	Lägern	16 km
Üetliberg	5.7 m/s	6.0 m/s	Schaffhausen*	39 km
Lägern	4.2 m/s	4.4 m/s	Üetliberg	16 km
Lägern	4.2 m/s	6.3 m/s	Hirzel (Vortex)	33 km
Schaffhausen*	3.4 m/s	3.6 m/s	Lägern	29 km
Schaffhausen*	3.4 m/s	3.9 m/s	Hirzel (Vortex)	53 km
Siblinger Funkturm*	4.9 m/s	4.2 *m/s*	Schaffhausen*	7 km
Siblinger Funkturm*	4.9 m/s	4.6 m/s	Hirzel (Vortex)	57 km
Messung LiDAR*	4.8 m/s	4.2 m/s	Üetliberg	24 km
Messung LiDAR*	4.8 m/s	4.7 m/s	Siblinger Funkturm*	38 km
Hirzel (Vortex)	5.1 m/s	4.6 m/s	Üetliberg	17 km
Hirzel (Vortex)	5.1 m/s	4.8 m/s	Siblinger Funkturm*	53 km

* Langjährig korreliert

Tabelle 11: Kontrollberechnung des verwendeten Modells – Nachrechnung der gemessenen Winddaten.

Aus der Tabelle geht hervor:

- Bei den jeweils kürzeren Distanzen konnten die Stationen Üetliberg, Lägern, Schaffhausen, Messung LiDAR und Hirzel (Vortex) relativ genau nachgerechnet werden (Abweichungen von 0.2 – 0.6 m/s). Etwas grössere Abweichungen ergaben sich beim Siblinger Funkturm (0.7 m/s). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Westkomponente in der Statistik von Schaffhausen weniger dominant ist als die vom Standort Siblinger Funkturm. Geschwindigkeitserhöhungen in diesem Sektor auf Grund der grossen Steigungen werden dann in dem Plausibilisierungsschritt nicht erfasst.
- Auch bei den jeweils grössten Distanzen konnten die Stationen Üetliberg, Schaffhausen, Siblinger Funkturm, Messung LiDAR und Hirzel (Vortex) adäquat nachmodelliert werden (Abweichungen von 0.1 – 0.5 m/s). Lediglich bei Lägern ergab sich eine grosse Abweichung von 2.1 m/s. Dies lag mit hoher Wahrscheinlichkeit daran, dass die Energierose von Hirzel (Vortex) eine weit ausgeprägtere Südkomponente beinhaltete als jene vom Standort Lägern. Da dort der Südsektor wiederum sehr steil ist, werden höhere Geschwindigkeiten modelliert.

5.1.2 Vergleich der Modellierungsergebnisse mit Windstatistiken

Die modellierten Ergebnisse (wie sie in der Ressourcenkarte erscheinen) sind in folgender Tabelle den Windstatistiken (aus den Winddaten berechnet) gegenübergestellt.

Standort	Windstatistik 100m über Boden [m/s]	Ergebnisse der Ressourcenberechnung 100m über Boden [m/s]
Üetliberg	6.0 m/s	6.1 m/s
Lägern	4.7 m/s	5.1 m/s
Schaffhausen *	3.9 m/s-	4.1 m/s
Messung Siblinger Funkturm*	5.3 m/s	Nicht berechnet
Messung LiDAR*	5.0 m/s	4.6 m/s
Vortex-Hirzel	5.2 m/s	5.0 m/s

*Langjährig korreliert; ** Quelle: [3]

Tabelle 12: Kontrollberechnung des verwendeten Modells –Ergebnisvergleich.

5.1.3 Beurteilung der Plausibilisierung

Insgesamt ist das berechnete Modell als plausibel zu beurteilen. Die Nachrechnung gemessener Winddaten ergab befriedigende Ergebnisse, Abweichungen konnten plausibel begründet werden. Wie in Kapitel 3.1.9 erläutert, wurden für jede Teilfläche die nächstliegenden Statistiken verwendet und abstandsgewichtet, um solche Abweichungen zu minimieren.

Bei der Interpretation der Windressourcenkarte muss jedoch berücksichtigt werden, dass der östliche Randbereich des Kantonsgebietes um das Hörnli (hier genannt: Zürcher Oberland) in der Windressourcenberechnung nicht adäquat wiedergegeben wurde. Die Berechnungsmethode WAsP produziert bei stark zerklüftetem Gelände, wie es dort vorliegt, verfälschte Werte (s. Anhang 8.2). Die berechneten Windressourcen im Zürcher Oberland dürfen somit nicht als Referenz benutzt werden. Mittels einer für komplexes Terrain geeigneten CFD Simulation (Computational Fluid Dynamics) könnte diese Lücke geschlossen werden. Dies ist aus Kostengründen bewusst nicht durchgeführt worden. Zudem benötigen auch diese Modelle eine hochqualitative Datenbasis in Form von Messungen genügend weit ab Boden um genaue Resultate zu liefern. Entsprechende Daten konnten aber nicht eruiert werden. Weitere Details hierfür sind im Anhang gegeben.

5.2 Unsicherheitsabschätzung

Folgende Unsicherheiten lassen sich in der Windressourcenberechnung eruieren:

Quelle	Unsicherheit
Datenbasis - Windmessdaten der Meteoschweiz - Vortex-Reanalysedaten - LiDAR-Messung und Siblinger Funkturm - Verwendung des Vortex-Reanalysepunktes als Absolutwert	**9 %** 3 % 5 % 5 % 5 %
Langjährige Korrelationen - Berechnungsimmanente Unsicherheiten - Langzeitschwankung des Windes (Unsicherheit, dass der 10, bzw. 20-Jahres-Zeitraum ungenügend ist, um die Daten als Langzeitdaten zu betrachten)	**8 %** 1 % 8 %
Modellierung/Windressourcenberechnung - Berechnung der Windstatistiken - Terrainbeschreibung, u.a. Rauigkeiten, Topographie, Hindernisse - Horizontale Extrapolation mit fester Abstandgewichtung der Statistiken je Teilfläche - Vertikale Extrapolation auf 100m über Grund	**11 %** 3 % 3 % 10 % 3 %
Zusätzliche Unsicherheiten im Züricher Oberland auf Grund von Modellierungs-abweichungen wegen komplexer Topografie.	Ca. 15%
Unsicherheit mittlere Windgeschwindigkeit Hügelgebiet	**16 %**
Unsicherheit mittlere Windgeschwindigkeit im Züricher Oberland	**Ca. 22 %**

Tabelle 13: Unsicherheitsabschätzung der berechneten mittleren Windgeschwindigkeiten.

Voneinander unabhängige Unsicherheiten wurden dabei zur Gesamtunsicherheit aggregiert.

6 Fazit und Handlungsempfehlungen

6.1 Windressourcen

Aufgrund der modellierten Windressourcen ist Potential vorhanden. Mit modernen marktüblichen Windenergieanlagen sind heute bereits Windgeschwindigkeiten ab ca. 4.8 m/s wirtschaftlich nutzbar (was jedoch abhängig ist von diversen standortspezifischen Faktoren wie Bau der Zuwegung, Netzanschluss, Windpark oder Einzelanlage, Finanzierung etc.). Auf einigen Hügeln im Kanton Zürich ist mit Windgeschwindigkeiten > 5 m/s zu rechnen. Diese befinden sich hauptsächlich im östlichen Kantonsteil (Zürcher Oberland), aber auch auf der Albiskette, dem Pfannenstil, der Lägern oder dem Irchel. Sollte es sich in Zukunft ergeben, dass im Kanton Zürich oder in unmittelbarer Umgebung weitere Windmessungen in grösseren Höhen (50-100 m ü.G.) durchgeführt werden, könnten diese Daten in Form eines Updates der vorliegenden Studie mit einbezogen werden. Ähnlich wurde im Kanton Schaffhausen vorgegangen, wo die kantonale Verwaltung aktiv Windmessungen unterstützt hat, um die ursprünglich berechnete Windressourcenkarte weiter zu verbessern.

6.2 Ausschlusskriterien

Bedeutendstes Ausschlusskriterium für Windenergieanlagen sind die bewohnten Gebäude, sowohl innerhalb als auch ausserhalb von Bauzonen.

Der Flughafen Zürich-Kloten wirkt sich v.a. im nordwestlichen und zentralen Kantonsgebiet sehr limitierend auf die möglichen Zonen für die Nutzung der Windenergie aus. Zum Einen spielen die An- und Abflugschneisen resp. die Hindernisbegrenzungsflächen eine Rolle, zum Anderen dürfen Windenergieanlagen nicht zu nah oder in deren wichtigen Sicherungssektoren gebaut werden. Vor allem die Restriktionen durch die Flugsicherungsanlagen sind schwierig zu quantifizieren, da die Topographie und damit die Sichtbarkeit der Windenergieanlagen von der Flugsicherungsanlage aus eine zentrale Rolle spielt. Eine umfassende Abklärung durch Skyguide könnte die Aussagekraft stark erhöhen. Für einige Flugsicherungsanlagen wie z.B. Bodenradar könnte eine einfache Sichtbarkeitsberechnung bereits weitere Anhaltspunkte liefern um potentielle Standorte für Windenergieanlagen zu evaluieren.

Eine Interessenabwägung mit der Nutzung der Windenergie sollte v.a. in Bezug auf BLN-Gebiete und Gebiete des Natur-/Landschaftsschutzinventars 1980 durchgeführt werden, untergeordnet auch mit der Bachtelschutzzone (SVO-Zone). Dies bei Festlegungen in Richtplänen, nachgelagert natürlich auch bei konkreten Projekten im Rahmen der Planungsverfahren.

Windpotentialgebiete, welche bezüglich den in dieser Studie angewendeten Ausschlusskriterien unproblematisch sind, finden sich:

- auf dem Cholfirst
- auf den Hügeln um Madestwil, Gündisau, Hittnau und Bäretswil
- auf den Hügelzügen im Zürcher Oberland westlich der Flüsse Töss resp. Jona (Allmen bis Bauma)

Bei gewissen Windpotentialgebieten in der Nähe zu andern Kantonen oder Deutschland wie bspw. dem Cholfirst sollte eine grenzübergreifende Koordination der Planungen stattfinden.

6.3 Windenergiepotential im Kanton Zürich

Theoretisch ist ein ansprechendes Windenergiepotential im Kanton Zürich vorhanden: 450-1'750 GWh oder 130-480 Windenergieanlagen in den Szenarien mit den grössten Einschränkungen. Zum Vergleich: der Stromverbrauch des Kantons Zürich betrug im Jahre 2010 rund 9'000 GWh (Quelle: www.awel.zh.ch). Mit der Nutzung der Windenergie könnten also in der Jahresbilanz theoretisch rund 5-20% des Strombedarfs im Kanton Zürich gedeckt werden.

Diese Angaben beziffern nicht das tatsächlich heute realistische Windenergiepotential. Werden gesellschaftliche Aspekte (Schattenwurf, Akzeptanz, grössere Abstände wegen grösseren Geräuschemissionen bei mehr als einer Windkraftanlage, Landschaftsbild etc.) ebenfalls berücksichtigt, reduziert sich das Potential stark. Ebenso bei weiteren raumplanerischen Gestaltungsvorgaben und technisch-wirtschaftlichen Einschränkungen (Logistik, Infrastruktur, tiefere Einspeisevergütungen etc.).

Zukünftige Änderungen im Bereich der bewohnten Gebiete/Gebäude (Zunahme oder Abnahme) können ebenfalls einen starken Einfluss auf den Umfang der möglichen Eignungsgebiete haben.

Aufbauend auf die vorliegende Studie könnte der Einbezug von weiteren Kriterien, einer verbesserten Windressourcenkarte oder einer detaillierteren Untersuchung einzelner Standortregionen analysiert werden um das damit verbundene reduzierte Potenzial einzugrenzen. Dafür geeignet wäre die Betrachtung der Resultate anhand verschiedener gewählter Szenarien, welche die zukünftige Entwicklung resp. politischen Richtungsentscheide zu Grunde legen.

6.4 Einordnung in weitere Potenzialabschätzungen

Das technisch-wirtschaftliche Potential der Windenergienutzung beträgt gemäss einer Studie des Bundes [4]mit den heute gültigen Förderbeiträgen der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) in der Schweiz rund 20'000 GWh/a. Das Potential halbiert sich, wenn Natur- und Landschaftschutzgebiete von nationaler Bedeutung und kulturhistorische Inventare ausgeschlossen werden. Der Bundesrat strebt im Rahmen seiner Energiestrategie 2050 eine Nutzung von 4'000 GWh/a an, was einem Fünftel des geschätzten technisch-wirtschaftlichen Potentials entspricht. Welchen Stellenwert der Kanton Zürich in Sachen Windenergie bis anhin inne hat,

zeigt die Tatsache, dass sich im Gegensatz zum Jura und zu den Alpen im Konzept Windenergie Schweiz von 2004 keine prioritären Standorte für Windenergienutzung im Kanton Zürich befanden [5]. Der Kanton Zürich rechnet dann auch nur mit etwa 20 GWh/a bis ins Jahr 2050, was mit etwa 4 bis 6 Anlagen erreicht werden kann [6]. Bisher wurde noch keine grosse Windenergieanlage im Kanton erstellt.

Trotzdem kann festgehalten werden, dass es im Kanton Zürich beim derzeitigen Kenntnisstand einige vielversprechende Standorte für grosse Windenergieanlagen gibt und eine Vielzahl von Standortmöglichkeiten vorhanden ist, die aber in den Interessensabwägungen auf Ebene Kanton, Region und Gemeinden einen soliden planerischen und politischen Rückenwind bedingen.

7 Literaturverzeichnis

[1] EMD International A/s, WindPRO 2.8 User Guide, Denmark, 2012.

[2] Vortex, «www.Vortex.es,» [Online]. [Zugriff am 01 2013].

[3] Wind-data, «www.wind-data.ch,» [Online]. [Zugriff am 02 2013].

[4] BAFU, «Energiestrategie 2050 - Berechnung der Energiepotenziale für Wind- und Sonnenenergie,» 2012.

[5] «Konzept Windenergie Schweiz - Grundlagen für die Standortwahl von Windparks,» 2004.

[6] Baudirektion Kanton Zürich, «Energieerzeugung im Kanton Zürich,» 2012.

8 Anhang

8.1 Weiterführende Information: Vortex-Daten

Bei Vortex-Daten handelt es sich um modellierte, sog. Reanalysesdaten. Sie basieren also nicht auf Windmessungen, sondern werden mittels numerischer Modelle berechnet. Es kann dabei auf drei verschiedene Modelle zurückgegriffen werden, nämlich CFSR (betrieben vom National Centres for Environmental Prediction NCEP), MERRA (betrieben von der National Aeronautics and Space Administration NASA) und ERA-Interim (betrieben vom European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ECMWF).

Die modellierten Daten liegen als Stundenmittelwerte vor, die eine Periode von 10 Jahren abbilden. Die räumliche Auflösung des Berechnungsmodells beträgt 3 km, was im Vergleich zu anderweitigen Reanalysemodellen auf dem Markt als relativ hochaufgelöst zu beurteilen ist.

Für weiterführende Informationen wird auf [2] verweisen.

8.2 Grenzen der Modellierungssoftware WAsP

Die Anwendbarkeit der Modellierungssoftware WAsP (Version 10.2) hängt unter anderem von der topografischen Komplexität des Berechnungsstandortes ab. Ausschlaggebendes Kriterium hierfür ist die Steilheit des Geländes, also die Steigungen in den einzelnen Richtungssektoren. Man geht davon aus, dass Steigungen bis ca. 30 % (17.6°) kaum merklichen Einfluss auf die Berechnung mit WAsP haben, da dabei die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von turbulenten Strömungsablösungen relativ gering ist. Im Falle zunehmender Steigungen erhöht sich diese Wahrscheinlichkeit, so dass für detaillierte Aussagen CFD-Detailsimulationen durchgeführt werden sollten.

Besonders problematisch stellt sich das südöstliche Kantonsgebiet des Zürcher Oberlandes dar. In folgender Abbildung ist exemplarisch der orografische Verlauf um die Meteostation Hörnli aus Hauptwindrichtung (WSW-ONO-Streichrichtung) abgebildet. Es ist erkennbar, dass Bereiche des relativ stark zerklüfteten Gebietes Steigungen > 30% aufweisen.

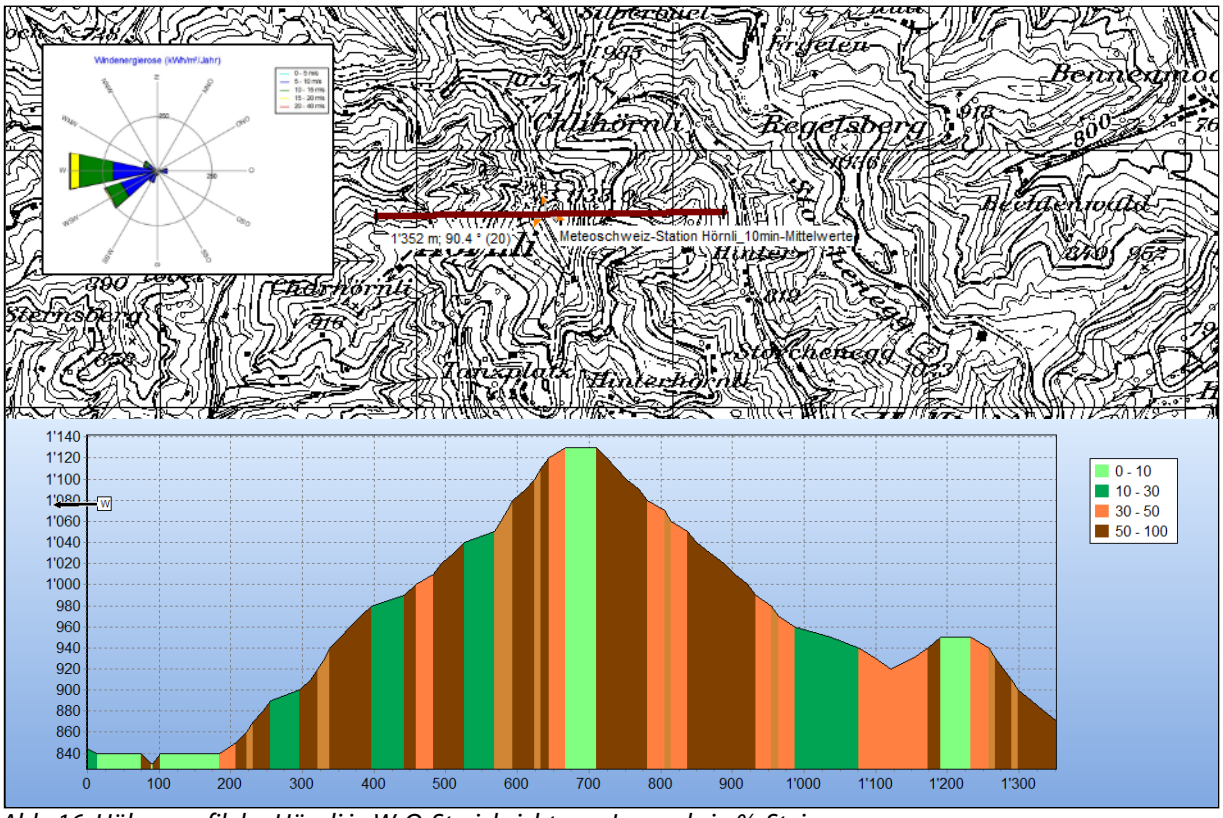

Abb. 16: Höhenprofil des Hörnli in W-O-Streichrichtung; Legende in %-Steigung

Auf dem Hörnli befindet sich eine Meteoschweiz-Station. Die Windgeschwindigkeit wird dabei über ein 15 m über Boden am Funkturm montiertes Anemometer gemessen. Messdaten über 4.4 Jahre (07.2008- 12.2012) ergaben ein mittleres Windgeschwindigkeitsniveau von 3.6 m/s. Wird zu Plausibilisierungszwecken das Windpotential an diesem Punkt mit Hilfe anderer Windstatistiken nachgerechnet, entstehen dabei Abweichungen ≥ 3 m/s. Dabei gilt es jedoch zu erwähnen, dass auch bei den Messdaten systematische Abweichungen (z.B. Mastabschattung

und Vereisung) zu Unterschätzung des Potentials während der Messung geführt haben können. Aus diesen Gründen wurde die Station Hörnli nicht für die Ressourcenberechnung einbezogen.

8.3 Energierosen

Energierosen werden aus den sektorbezogenen Verteilungen der mittleren Windgeschwindigkeit und der Häufigkeit berechnet. Sie geben an, welches die energiereichen Sektoren sind.

Am Beispiel des Vortexpunktes am Hirzel ergeben sich folgende zwei Verteilungen:

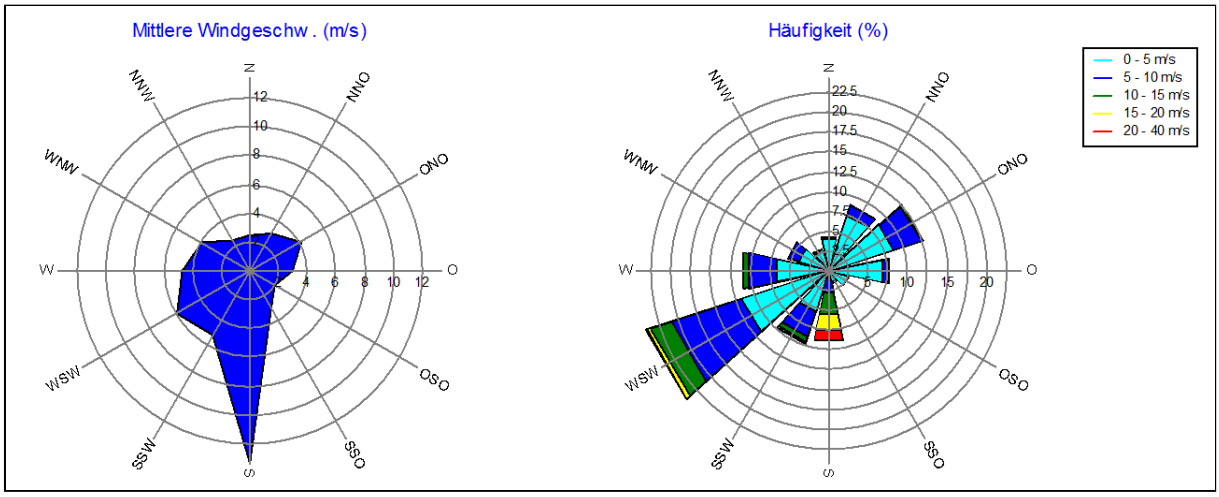

Abb. 17: Sektorbezogene Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeit (links) und Häufigkeit (rechts) für den Vortexpunkt am Hirzel.

Zwar kommen Winde insgesamt am häufigsten aus dem Sektor WSW, jedoch sind diese meist viel schwächer als jene aus dem südlichen Sektor. So ergibt sich die in Kapitel 3.1.8 dargestellte Windenergierose.

8.4 Windressourcenkarte auf 100 m über Grund

8.5 Ausschlussgebiete für Grosswindanlagen

8.6 Daten-CD

Inhalt:

- Bericht im Format pdf
- Anhang 8.4 und 8.5 als separate Datei im Format pdf
- Datenlayer im Format Shapefile