

**Schlussbericht** November 2001

# V<sup>3</sup>-Toolbox

Leitfaden zur Vorhersage der Windenergieproduktion im Gebirge

Teil 1

ausgearbeitet durch  
Stefan Kunz, Beat Schaffner, Johannes Sander, Matteo Buzzi,  
METEOTEST  
Fabrikstrasse 14, 3012 Bern

## Zusammenfassung

In wenig komplexem Gelände sind verschiedene Methoden bekannt, mit denen zuverlässig das Windpotenzial für Windkraftprojekte bestimmt werden können. Diese Methoden basieren in der Regel auf der Modellierung des Projektgebiets mit Computermodellen.

Im Flachland bewährte Computermodelle sind für komplexes, gebirgiges Gelände oft ungeeignet, weil die im flachen Gelände erlaubten physikalischen Vereinfachungen im komplexen Gelände nicht zulässig sind. Im Gebirge sind deshalb alternative Methoden erforderlich um zuverlässige Windgutachten für Windkraftanlagen zu erstellen.

Die V<sup>3</sup>-Toolbox erläutert das allgemeine Vorgehen zur Erstellung von Windgutachten. In einem Flussdiagramm werden die Entscheidungen, die für ein Windgutachten zu fällen sind, und die Teilschritte, die zu bearbeiten sind, dargestellt. Entscheidungsgrundlagen und Tools werden detailliert erläutert. Insbesondere wird die breite Auswahl der heute erhältlichen Computermodellen für Windgutachten präsentiert.

Die V<sup>3</sup>-Toolbox soll Ingenieur- und Planungsbüros als Leitfaden zur Ermittlung des Windpotenzials bei der Planung von Windkraftanlagen dienen. Sie ist universell einsetzbar – sowohl im Gebirge als auch im flachen Gelände, und ist eine Ergänzung zu den bereits beim Bundesamt für Energie erschienenen Leitfäden "Meteonorm Wind" und "Planung von Windenergieanlagen".

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

## Abstract

Several reliable procedures are known that allow determining wind potential for wind power plants in non complex terrain. These procedures are usually based on modeling the wind energy project area using computer models.

Computer models that are reliable in flat areas are often unsuitable for complex, mountainous terrain because the physical simplifications which are valid in flat terrain are not permissible in mountains. Therefore, alternate procedures are required in order to determine the wind potential in mountainous terrain.

The V<sup>3</sup>-Toolbox presents the general approach to compiling a wind expertise. In a flow chart, the required decisions and steps are depicted. The basis for making these decisions and the necessary tools are discussed in detail. In particular, the modeling tools available today are investigated.

These guidelines are meant to aid wind power engineers and planners. The guidelines are valid for complex as well as flat terrain. They are a supplement to the guidelines "Meteonorm Wind" and "Planung von Windenergieanlagen" which were published earlier by the Swiss Federal Office of Energy.

## Résumé

Dans le terrain peu complexe, plusieurs méthodes sont connues pour estimer le potentiel énergétique d'une installation éolienne. Normalement, ces procédés sont basés sur la modélisation du terrain au site à l'aide de modèles numériques.

Les modèles numériques utilisés pour le pays plat ne sont souvent pas valables en montagne, parce que certaines simplifications physiques, possibles en plaine, ne sont plus permises dans du terrain complexe. Il existe donc un besoin de méthodes alternatives pour évaluer le potentiel éolien en montagne.

La V<sup>3</sup>-Toolbox présente la méthode pour établir des expertises éoliennes en général. Dans un schéma opérationnel, les décisions à prendre et les pas à suivre sont nommés. Les bases de décisions et les outils nécessaires sont décrits en détail. Notamment on y trouve un grand choix des modèles numériques disponibles aujourd'hui.

La V<sup>3</sup>-Toolbox est un guide pour les ingénieurs et les planificateurs lors de l'évaluation du potentiel d'un projet éolien. Elle peut être utilisée dans du terrain plat et dans du terrain complexe. Elle présente un complément des manuels déjà parus auprès de l'Office fédéral de l'énergie, "Météonorm Vent" et "Manuel de l'utilisation de l'énergie éolienne en Suisse".

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>2</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>4</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>7</b>
1.1. Ausgangslage .....	7
1.2. Inhalt .....	7
<b>2. Die Tools für Windgutachten .....</b>	<b>8</b>
2.1. Übersicht .....	8
2.2. Regionale Windstatistik .....	10
2.2.1. Anforderungen .....	10
2.2.2. Tools .....	10
2.2.3. Kosten .....	10
2.3. Lokale Windstatistik .....	11
2.3.1. Anforderungen .....	11
2.3.2. Tools .....	11
2.3.3. Kosten .....	11
2.4. Micrositing mit Modellen im einfachen Gelände .....	12
2.4.1. Anforderungen .....	12
2.4.2. Tools .....	13
2.4.3. Kosten .....	13
2.5. Micrositing mit Modellen im komplexen Gelände .....	14
2.5.1. Anforderungen .....	14
2.5.2. Tools .....	14
2.5.3. Kosten .....	14
2.6. Micrositing mit Zusatzmessungen im komplexen Gelände .....	15
2.6.1. Anforderungen .....	15
2.6.2. Tools .....	15
2.6.3. Kosten .....	15
<b>3. Verlässlichkeit von Windgutachten .....</b>	<b>16</b>

---

<b>4. Modellbeschreibungen im Detail.....</b>	<b>18</b>
4.1. Modelle für regionale Windstatistiken und Windpotenzialkarten .....	18
4.1.1. MINERVA.....	19
4.1.2. MesoMap .....	20
4.1.3. METEOWIND Climate.....	21
4.2. Modelle für Micrositing.....	22
4.2.1. WAsP .....	23
4.2.2. WindPro .....	24
4.2.3. WindFarmer .....	25
4.2.4. WindMap.....	26
4.2.5. WindSim.....	27
4.2.6. METEOWIND Complex.....	28
<b>Glossar .....</b>	<b>29</b>
<b>5. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>30</b>

## 1. Einleitung

### 1.1. Ausgangslage

In wenig komplexem Gelände sind verschiedene Methoden bekannt, mit denen zuverlässig das Windpotenzial für Windkraftprojekte bestimmt werden können. Diese Methoden beinhalten in der Regel die Modellierung des Projektgebiets mit Computermodellen, die auf der Basis von temporären Windmessungen im Projektgebiet oder von Windstatistiken einer permanenten Meteostation in der Nähe des Windfelds im Projektgebiet und den Ertrag der einzelnen Windkraftanlagen (WKA) berechnen.

Diese Computermodelle sind für flache Küstengebiete entwickelt worden und basieren auf stark vereinfachten physikalischen Grundlagen. Die in der Schweiz für die Nutzung der Windenergie geeigneten Gebiete hingegen befinden sich meist in gebirgigem Gelände. Hier sind diese Modelle oft nicht brauchbar, weil die physikalischen Vereinfachungen im komplexen Gelände nicht zulässig sind.

Im Rahmen eines Auftrages des Bundesamtes für Energie (BFE) untersuchte *METEOTEST* die Stärken und Schwächen verschiedener Verfahren und Modelle für den Einsatz im Gebirge. Die Details dieser Forschung sind im Bericht V<sup>3</sup>-Toolbox Teil 2 enthalten. Ein Hauptresultat ist, dass die Bestimmung des Windpotenzials im Gebirge mit Modellen möglich, aber sehr aufwändig ist. Die Alternative, umfangreiche Messungen, ist aber nicht unbedingt kostengünstiger.

### 1.2. Inhalt

Die vorliegende V<sup>3</sup>-Toolbox soll Ingenieur- und Planungsbüros als Leitfaden zur Ermittlung des Windpotenzials bei der Planung von Windkraftanlagen dienen. Sie basiert auf den Resultaten des oben erwähnten BFE-Forschungsprojekts sowie auf den umfangreichen Erfahrungen aus der normalen Geschäftstätigkeit der Firma *METEOTEST* als Anbieter von Windgutachten.

Wir stellen die allgemeine Vorgehensweise zur Ermittlung des Windpotenzials und die für die einzelnen Schritte benötigten Tools vor – daher wurde die Bezeichnung "V<sup>3</sup>-Toolbox" gewählt: Die Formel  $V^3$  weist auf die Tatsache hin, dass die Windleistung mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit wächst.

Die V<sup>3</sup>-Toolbox ist universell einsetzbar – sowohl im Gebirge als auch im flachen Gelände, und ist eine Ergänzung zu den bereits erschienenen Leitfäden "Meteonorm Wind" (BFE, 1990) und "Planung von Windenergieanlagen" (BFE, 1999).

## 2. Die Tools für Windgutachten

### 2.1. Übersicht

Die sicherste Methode, das langjährige Windpotenzial an einem Standort zu bestimmen, wäre eine langjährige Messung an diesem Standort. Eine solche Messkampagne ist aus zeitlichen bzw. wirtschaftlichen Gründen nicht möglich. Für Windgutachten werden daher kurze Messreihen (ein Jahr) im Projektgebiet mit langjährigen Windstatistiken (10 Jahre) der Region kombiniert. Man kann so eine langjährige Windstatistik am Messstandort im Projektgebiet modellieren.

Um die genauen Windverhältnisse an einem beliebigem Standort im Projektgebiet zu ermitteln, wird ein sogenanntes Micrositing durchgeführt. Verschiedene Micrositing-Verfahren sind verfügbar:

- Die modellierten langjährigen Windstatistiken werden direkt benutzt, um den Energieertrag einer WKA in unmittelbarer Nähe des Messstandortes zu berechnen.
- Kurzfristige Zusatzmessungen (wenige Monate) an den geplanten WKA-Standorten liefern Daten, mit denen die Statistiken auf die geplanten Standorte extrapoliert werden.
- Die Statistiken dienen als Initialisierungsdaten für ein Computermodell, das die Windverteilung im ganzen Projektgebiet berechnet.

Welches der Micrositing-Verfahren zur Abschätzung des Ertrags geplanter WKA am besten geeignet ist, hängt von verschiedenen Kriterien ab:

- bereits bestehende meteorologischen Grundlagen im Projektgebiet (Windmessungen)
- Topografie des Projektgebiets
- Projektumfang (Anzahl WKA)
- Genauigkeitsanspruch
- zur Verfügung stehende finanzielle Mittel

Abbildung 2 bildet den Kern der V<sup>3</sup>-Toolbox: Sie illustriert in einem Flussdiagramm die Entscheidungen, die für ein Windgutachten zu fällen sind, und die Teilschritte, die zu bearbeiten sind. Alle im Flussdiagramm enthaltenen Entscheidungen, Tasks und Tools werden in den darauf folgenden Abschnitten im Einzelnen erläutert.

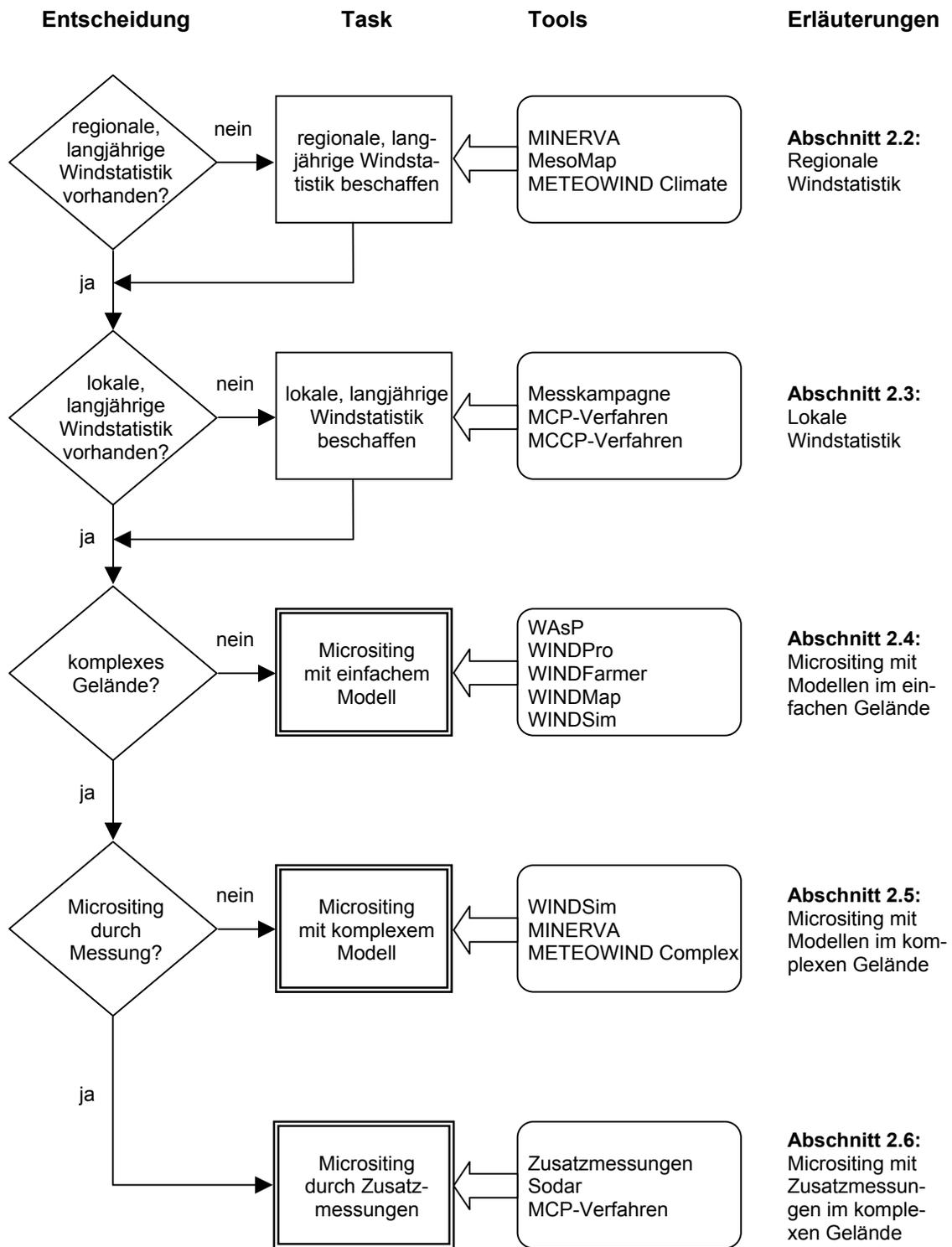


Abb. 1: Übersicht über den Ablauf eines Windgutachtens im Gebirge und Hinweise zu den einzusetzenden Werkzeugen und Verfahren (Tools)

## 2.2. Regionale Windstatistik

### 2.2.1. Anforderungen

Die langjährige regionale Windstatistik dient dazu, die kurze Messreihe im Projektgebiet in einen langjährigen Zusammenhang zu bringen. In der Schweiz gibt es oft geeignete permanente Messstationen in der Nähe von Projektgebieten. Eine Übersicht über bestehende Messreihen in der Schweiz findet sich im Service-Teil der Homepage von Suisse-Éole ([www.suisse-eole.ch](http://www.suisse-eole.ch)).

Langjährige Statistiken können benutzt werden, falls sie folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Die permanente Messstation liegt bezüglich Geländeform ähnlich wie das Projektgebiet. Massgebend ist die Korrelation der Daten der permanenten Messstation mit im Projektgebiet erhobenen Daten: das Bestimmtheitsmass der Korrelation sollte mindestens über 0.6 liegen. Weitere Angaben zum Korrelationsverfahren finden sich zum Beispiel im Leitfaden über Windenergienutzung (BFE, 1999).
- Die Daten sollten mindestens 10 Jahre abdecken.
- Die Daten sind parallel zu Messungen im Projektgebiet verfügbar.

### 2.2.2. Tools

Falls keine geeignete langjährige regionale Windstatistik vorliegt, können Windstatistiken über ein numerisches Wettermodell, wie es für Wetterprognosen eingesetzt wird, berechnet werden. Grundsätzlich lassen sich mit diesem Verfahren für jede Region auf der Welt Windstatistiken und Windkarten ermitteln. Das Verfahren gibt mit relativ guter Genauigkeit die Windverhältnisse über dem Projektgebiet wieder – ohne den Einbezug von lokalen Effekten.

Diese Verfahren werden (noch nicht) als fertige Produkte verkauft. Sie stecken zum Teil noch in der Entwicklung und die Verifikation ist noch nicht abgeschlossen.

Modellierungen mit den Verfahren **MesoMap** und **METEOWIND Climate** werden als Dienstleistungen angeboten. Diese Liste ist nicht abschliessend; das Angebot wächst kontinuierlich. Weitere Angaben zu den angegebenen Modellen werden in Kapitel 3 gemacht.

### 2.2.3. Kosten

Die Kosten für eine regionale Modellierung liegen im Bereich von CHF 100'000 bis 200'000. Es ist zu erwarten, dass diese Kosten in naher Zukunft abnehmen.

## 2.3. Lokale Windstatistik

### 2.3.1. Anforderungen

Lokale Messungen dienen dazu, die spezifischen Windverhältnisse im Gelände zu bestimmen. Sie werden mit den langjährigen, regionalen Windstatistik verknüpft, um die langjährigen, lokalen Windverhältnisse zu bestimmen. Lokale Windmessungen sollten folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Die Messperiode sollte mindestens ein Jahr umfassen.
- 10-Minuten-Werte sind der Standard bei Windpotenzialabschätzungen. Die hohe Auflösung erlaubt detaillierte Aussagen, zum Beispiel bezüglich Turbulenz.
- Eine möglichst lückenlose Messreihe ist entscheidend. Die Datenverfügbarkeit sollte mindestens 80% betragen.
- Von Vorteil sind Messungen auf verschiedenen Höhen über Grund. Sie erlauben, eine Abschätzung des vertikalen Windprofils und damit die Berechnung der Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe der geplanten WKA. Zudem gilt: Je näher an der Nabenhöhe der geplanten WKA gemessen wird, um so besser.

### 2.3.2. Tools

**Messkampagnen** an temporären Stationen gehören zu Standardprozeduren für Windgutachten und werden in der Schweiz von verschiedenen Firmen angeboten. Informationen erteilt der Windkraft-Fachverband Suisse-Éole ([www.suisse-eole.ch](http://www.suisse-eole.ch)).

Mit dem **Measure Correlate Predict Verfahren (MCP)** werden die Resultate der kurzen Messreihe mittels Korrelation mit den langjährigen Messstatistik in der Region auf langjährige Werte umgerechnet. Das Verfahren wird im Leitfaden "Planung von Windenergieanlagen" (BFE, 1999) genauer erläutert.

Mit dem **Measure Compute Correlate Predict Verfahren (MCCP)**, ein angepasstes MCP-Verfahren, werden die Resultate der kurzen Messreihe mittels Korrelation mit modellierten Windstatistiken auf langjährige Werte umgerechnet.

### 2.3.3. Kosten

Unsere Erfahrungen zeigen, dass der Aufwand für Messungen im Gebirge ungefähr doppelt so hoch ist wie im Flachland. Um lange Datenlücken zu vermeiden sind oft teure, beheizte Sensoren notwendig. Hohe Wartungsaufwände sowie eine schlechte Zugänglichkeit im Winter erhöhen die Kosten zusätzlich. Für eine einjährige Messkampagne mit einem 30-m-Mast und beheizten Sensoren inklusive Auswertung ist mit Kosten von CHF 50'000 bis 100'000 zu rechnen.

## 2.4. Micrositing mit Modellen im einfachen Gelände

### 2.4.1. Anforderungen

Die Wahl des Modelltyps ergibt sich aus der Komplexität des Geländes. Diese wird durch die Ruggedness (Rauheit) der Topographie charakterisiert. Der Ruggedness Index (RIX) ist ein Mass für die Ruggedness. Die RIX-Zahl und die  $\Delta$ RIX-Zahl entscheiden, welche Modelle eingesetzt werden können:

- Die RIX-Zahl "ruggedness index" gibt den Anteil in Prozent des Gebietes an, der steiler als ein bestimmte Neigung ist. In der Regel berechnet sich die RIX-Zahl als Anteil der Fläche eines Gebietes innerhalb eines Radius von 3500 m, der eine Neigung von 18° übersteigt.
- Die  $\Delta$ RIX-Zahl beschreibt den Unterschied in der RIX-Zahl zwischen WKA-Standort und Messstandort der Windstatistik.

Mit dem Programm rix.exe kann die RIX-Zahl für einen beliebigen Punkt in einer digitalen Höhenmodell berechnet werden. Das Programm kann unter <http://www.wasp.dk> heruntergeladen werden. In Abbildung 2 ist die räumliche Verteilung der RIX-Zahl in der Schweiz dargestellt.

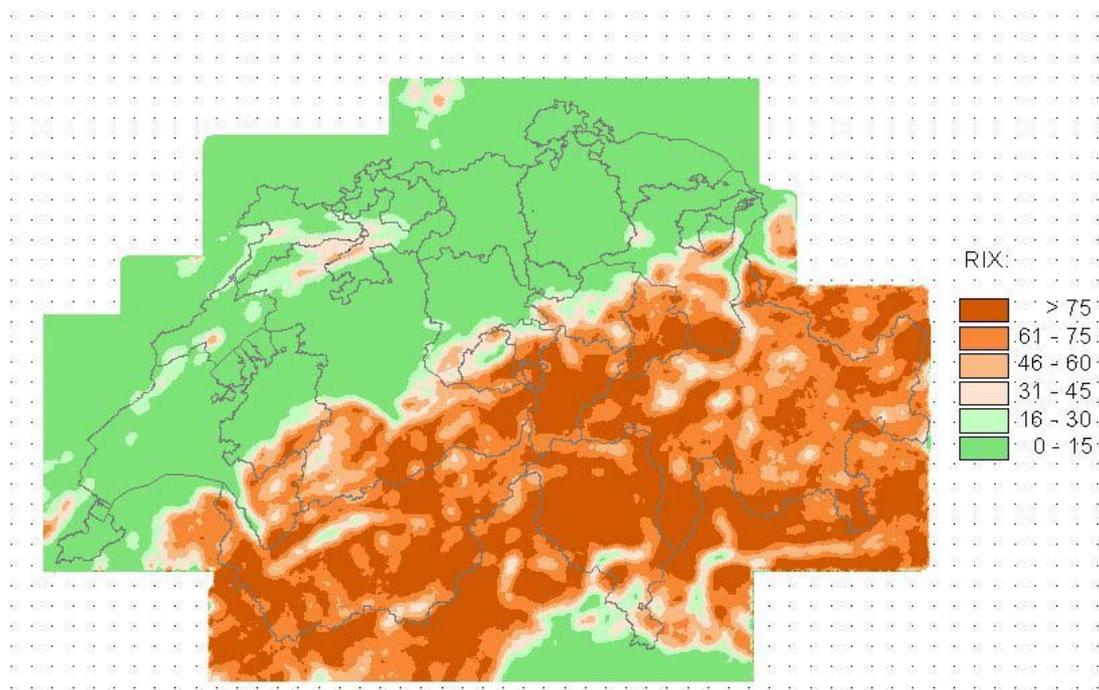


Abb. 2: Verteilung der RIX-Zahl in der Schweiz: Durch die relative grobe Auflösung des digitalen Höhenmodells (250 m) werden hier die RIX-Zahlen eher unterschätzt.

Projektgebiete mit einer RIX-Zahl von unter 30% und einem  $\Delta$ RIX von unter 8% gelten als flaches Gelände. Hier sind Modelle mit vereinfachter Physik für das Micrositing geeignet. Gebiete mit einer RIX-Zahl von über 30% oder einem  $\Delta$ RIX von über 8% gelten als komplexes Gelände. Vereinfachungen der physikalischen Modellgrundlagen sind dann nicht mehr zulässig.

#### 2.4.2. Tools

Die Modelle **WAsP**, **WINDPro**, **WINDFarmer**, **WINDMap** und **WINDSim** sind für das Micrositing in flachem Gelände geeignet. Diese Modelle werden in Kapitel drei näher beschrieben. Die Liste ist nicht abschliessend.

Mit Ausnahme von WindSim können diese Modelle gekauft werden. Sie sind relativ einfach zu bedienen. Es gibt einige gemeinsame Fehlerquellen:

- Zu wenig genaue Topografie führt zu grossen Fehlern. Hindernisse (Häuser, grosse Felsbrocken etc.) müssen in der Modell-Topografie berücksichtigt werden.
- Die Input-Winddaten müssen zuverlässig sein und einen genügend langen Zeitraum abdecken.

In der Schweiz bieten mehrere Firmen solche Modellierungen an. Auskunft erteilt der Windenergie-Dachverband Suisse-Éole ([www.suisse-eole.ch](http://www.suisse-eole.ch)).

#### 2.4.3. Kosten

Ein Micrositing durch Modellierung in flachem Gelände kostet CHF 5'000 bis 20'000.

## 2.5. Micrositing mit Modellen im komplexen Gelände

### 2.5.1. Anforderungen

Wie erwähnt, gelten Gebiete mit einer RIX-Zahl von über 30% oder einem  $\Delta RIX$  von über 8% als komplexes Gelände. Die physikalischen Vereinfachungen der einfachen Modelle sind nicht zulässig. Im komplexen Gelände bestehen zwei Möglichkeiten, ein Micrositing durchzuführen. Einerseits können die Windverhältnisse mit einem komplexen Modell simuliert werden. Andererseits kann die Bestimmung der Windverhältnisse allein über Messungen und statistische Verfahren wie MCP erfolgen (siehe 2.6).

Eine Modellierung ist aufwändig. Sie erweist sich eher für grössere Windparkprojekte als sinnvoll. Für kleinere Projekte ist die Option mit Messungen günstiger.

### 2.5.2. Tools

Die Modelle **WINDSim**, **MINERVA** und **METEOWIND Complex** sind für das Micrositing in komplexem Gelände geeignet. Diese Modelle werden in Kapitel drei näher beschrieben.

Auch hier gilt es anzumerken, dass diese Liste nicht abschliessend ist und dass das Angebot kontinuierlich wächst. Weitere Angaben zu den angegebenen Modellen werden wiederum in Kapitel 3 gemacht.

Diese Modelle können nicht gekauft werden. Sie sind so komplex, dass sie nur durch Experten bedient werden können. Sie stecken zum Teil noch in der Entwicklung und die Verifikation in komplexem Gelände ist noch nicht abgeschlossen. Trotzdem können brauchbare Resultate erwartet werden.

### 2.5.3. Kosten

Ein Micrositing durch Modellierung in komplexem Gelände kostet CHF 20'000 bis 100'000.

## 2.6. Micrositing mit Zusatzmessungen im komplexen Gelände

### 2.6.1. Anforderungen

Gebiete mit einer RIX-Zahl von über 30% oder einem  $\Delta$ RIX von über 8% gelten als komplexes Gelände. Hier sind die physikalische Vereinfachungen der einfachen Modelle nicht mehr zulässig. Neben der Möglichkeit, mit komplexen Modellen Simulationen durchzuführen, kann die Bestimmung der Windverhältnisse auch über Zusatzmessungen im Projektgebiet und statistischen Verfahren wie MCP erfolgen. Für kleinere Projekte mit wenigen WKA ist die Option mit Messungen günstiger.

### 2.6.2. Tools

**Zusatzmessungen** erlauben die Extrapolation der lokalen Windstatistik vom Messstandort auf andere Standorte im Projektgebiet. Die Zusatzmessungen (wenige Monate) müssen parallel zur Messkampagne der kurzen Messreihe (ein Jahr) im Projektgebiet geführt werden, um eine Korrelation zu ermöglichen.

Als Alternative zu den üblicherweise eingesetzten Messmasten kann ein **Sodar** eingesetzt werden (wenige Monate). Sodar ist ein Messverfahren, bei welchem vom Boden aus Schallimpulse vertikal gegen oben ausgesandt werden. Aus dem reflektierten Signal (Echo) kann die Windgeschwindigkeit und Windrichtung in bis zu 200 m Höhe über Grund bestimmt werden. So werden die Windgeschwindigkeiten über den ganzen Rotor der WKA gemessen, was die heikle Extrapolation auf Nabenhöhe eliminiert.

Mit einem **MCP-Verfahren** wird die modellierte langjährige Windstatistik vom Standort der Messkampagne auf die Standorte der Zusatzmessungen übertragen. Das Verfahren wird im Leitfaden "Planung von Windenergieanlagen" (BFE, 1999) erläutert.

Falls die einjährige Messreihe im Projektgebiet unmittelbar am Standort der geplanten WKA stattfand, entfallen natürlich die Zusatzmessungen an weiteren Standorten. Die lokale Windstatistik kann direkt für die Energieprognose der WKA verwendet werden. Allerdings bedarf das spezielle vertikale Windprofil in komplexer Topographie vertiefter Analyse. Falls die Messungen weit unterhalb der Nabenhöhe der geplanten WKA stattfanden, ist der Einsatz eines Sodars während einigen Monaten zur Bestimmung des vertikalen Windprofils empfehlenswert.

Windmessungen und -gutachten werden in der Schweiz von verschiedenen Firmen angeboten. Auskunft erteilt der Dachverband Suisse-Éole ([www.suisse-eole.ch](http://www.suisse-eole.ch)).

### 2.6.3. Kosten

Zusatzmessungen mit Messmasten kosten pro Standort zwischen CHF 5'000 und 25'000 inklusive Auswertung. Eine vergleichbare Messkampagne mit einem Sodar kostet CHF 20'000 bis 50'000.

### 3. Verlässlichkeit von Windgutachten

Für Investoren und Planer ist die Genauigkeit der Ertragsabschätzung entscheidend, denn der Ertrag einer WKA entscheidet über die Profitabilität.

**Im flachen Gelände** beträgt die Unsicherheit in der Abschätzung der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe einer WKA typischerweise um die 10%, wenn nach der anerkannten, in diesem Leitfaden beschriebenen Methodik vorgegangen wird. Diese Unsicherheit verdreifacht sich für die Windleistung und näherungsweise auch für den für WKA berechneten Energieertrag zu ca. 30% (BFE, 1999).

Diese Unsicherheit hat mehrere Ursachen:

1. Die Messungengenauigkeit beträgt typischerweise 1% bis 2%.
2. Die Unsicherheit in der langjährigen Abschätzung durch das MCP-Verfahren beträgt typischerweise 5% bis 10%.
3. Die Hochrechnung auf Nabenhöhe ergibt 1 bis 5% Unsicherheit.
4. Die Micrositing-Modelle verursachen eine weitere Unsicherheit von bis zu 10%.

**Im komplexen Gelände** sind die Unsicherheiten von Windgutachten noch wenig erforscht. Folgende Aussagen können heute zu den oben genannten Ursachen der Unsicherheit gemacht werden:

1. Die Messgenauigkeit nimmt im Gebirge ab: Störungen und Unterbrüche in der Messreihe durch Vereisung verschlechtern die Datenqualität. Zudem lassen verstärkte Turbulenzen Messstörungen wie Overspeeding verstärkt auftreten (Literatur).
2. Die Unsicherheit ergibt sich aus der Güte der Korrelation. Sie ist insofern abhängig von der Topografie, als es in komplexem Gelände schwieriger wird, gut korrelierende Messreihen, d.h. solche von ähnlich gelegenen Standorten, zu finden. Falls statt des herkömmlichen MCP-Verfahren das M CCP-Verfahren mit modellierten langjährigen Windstatistiken eingesetzt wird, ist aufgrund der zu erwartenden guten Korrelation sowie der Konsistenz des modellierten Datensatzes jedoch eine höhere Genauigkeit als beim MCP-Verfahren im einfachen Gelände zu erwarten.
3. Die Hochrechnung auf Nabenhöhe ist im Gebirge heikler als im Flachland. Messungen möglichst nahe an der Nabenhöhe sind wichtig, aber wegen der zusätzlichen Belastung von Messmasten durch Turbulenzen, Eis und Schnee schwieriger zu realisieren. Sodar könnte hier entscheidende Verbesserungen bringen und hat das Potenzial, sich als ergänzende Messung in allen Geländetypen zu etablieren.

4. Die Modelle im Bereich Micrositing im komplexen Gelände sind immer noch wenig zahlreich und schlecht validiert. Es liegt an den nationalen und internationalen Förderprogrammen, diese Lücke zu schliessen. Ringversuche mit verschiedenen Computermodellen in verschiedenen Geländetypen wären dazu ein probates Mittel.

Für komplexes Gelände sind bei sauberer Anwendung der Tools Unsicherheiten zu erwarten, die in der selben Grössenordnung wie im flachen Gelände liegen. Werden für flaches Gelände konzipierte Tools unbesehen für komplexes Gelände übernommen, sind enorme Unsicherheiten zu erwarten. Von den neueren Tools wie MCCP und Sodar-Messungen sind entscheidende Verbesserungen für alle Geländetypen zu erwarten.

Es liegt an jedem einzelnen Projektträger zu entscheiden, welche Genauigkeit benötigt wird. Geringe Kosten bedeuten gerade im Gebirge meist auch geringe Genauigkeit bzw. hohe Unsicherheit. Folgendes Beispiel soll diesen Sachverhalt illustrieren.

Ein einfaches Gutachten mittels einjähriger Messung an einem 10-m-Mast und Standardauswertung kostet zwischen CHF 5'000 und 10'000. Ein Gutachten mit komplexer Modellierung, Messung an hohen Masten und ergänzenden Messverfahren mittels Sodar mag zwischen CHF 100'000 und 200'000 kosten. Das zweite Verfahren wird die Unsicherheit der Ertragsschätzung für eine Windkraftanlage mit Nabenhöhe auf 60 m über Grund um schätzungsweise einen Faktor 2 bis 3 gegenüber dem ersten Verfahren verringern. Dies könnte bedeuten, dass die Ertragsschätzung einen Fehler von  $\pm 20\%$  statt  $\pm 60\%$  aufweist.

## 4. Modellbeschreibungen im Detail

### 4.1. Modelle für regionale Windstatistiken und Windpotenzialkarten

Die folgende Tabelle ist eine Zusammenstellung der bekannten Planungstools für die Modellierung von regionalen Windstatistiken und Windpotenzialkarten. In den Unterkapiteln werden die Modelle einzeln charakterisiert.

Modell	Vorteile	Nachteile	Preis
MINERVA <a href="http://www.truewind.com">http://www.truewind.com</a>	im Gebirge einsetzbar	aufwändig und kostenintensiv	Dienstleistung keine Preisangaben
MesoMap <a href="http://www.emd.dk">http://www.emd.dk</a>	weltweiter Einsatz	fehlende Dokumentation	Dienstleistung keine Preisangaben
METEOWIND Climate <a href="http://www.meteotest.ch">http://www.meteotest.ch</a>	weltweiter Einsatz, bewährtes Modell als Grundlage	Genauigkeit hängt vom benutzten Raster ab	Dienstleistung CHF 100'000 pro Auftrag

Tab. 1: Übersicht der Modelle zur Berechnung von regionalen Windstatistiken und Windpotenzialkarten.

#### 4.1.1. MINERVA

<i>Inernetadresse</i>	<a href="http://www.aria.fr">http://www.aria.fr</a>
<i>Kurzbeschreibung</i>	MINERVA berechnet Windfelder über eine grosse Region oder für Micrositing. Aus dem Windfeld kann die Energieproduktion einer oder mehrerer Windturbinen berechnet werden. Ausserdem können Aussagen zur Turbulenz gemacht werden.
<i>Modellphysik</i>	MINERVA basiert auf den vollen Navier-Stokes Gleichungen, mit vollständigen physikalischen Grundlagen.
<i>Vorteile</i>	MINERVA ist auch in alpinem Gelände einsetzbar.
<i>Nachteile</i>	Die Berechnungen können sehr aufwändig und kostenintensiv werden.
<i>Einsatzgebiet</i>	jedes Gelände
<i>Details</i>	keine Details bekannt
<i>Kaufpreis</i>	keine Angaben

#### 4.1.2. MesoMap

<i>Internetadresse</i>	<a href="http://www.truewind.com">http://www.truewind.com</a>
<i>Kurzbeschreibung</i>	MesoMap berechnet Windkarten und Windrosen für beliebige Gebiete der Welt. Micrositing ist mit MesoMap nicht möglich.
<i>Modellphysik</i>	MesoMap basiert auf dem Modell MASS, das von AWS-Scientific entwickelt wurde. Details des Modells werden nicht bekannt gegeben. Das Modell ist in der wissenschaftlichen Literatur nicht beschrieben. Als Datenbasis werden NCAR Reanalysis Daten des globalen Wetters genutzt.
<i>Vorteile</i>	Berechnet Windkarten weltweit. Nach Angaben der Firma sind die Fehler in den Windgeschwindigkeiten kleiner als 7%.
<i>Nachteile</i>	Eine wissenschaftliche Beschreibung oder Dokumentation des Modells steht nicht zur Verfügung. Nach Herstellerangaben hängt die Genauigkeit der Windkarten von der Qualität der benutzten digitalen Karten der Topografie und Bodennutzung ab.
<i>Einsatzgebiet</i>	weltweit
<i>Details</i>	Details sind nicht in ausreichendem Masse bekannt. Nach Angaben der Herstellung basiert MesoMap auf einem Modell, das auch zur Vorhersage von Wetter eingesetzt wird.
<i>Kaufpreis</i>	Nur als Dienstleistung erhältlich.

#### 4.1.3. METEOWIND Climate

<i>Internetadresse</i>	<a href="http://www.meteotest.ch">http://www.meteotest.ch</a>
<i>Kurzbeschreibung</i>	METEOWIND Climate berechnet Windkarten und Windrosen sowie Windpotenzial, Böenhäufigkeit, Turbulenzindex, Temperatur in Nabenhöhe für beliebige Gebiete der Welt. Die Windrosen können direkt in anderen Tools für Micrositing eingesetzt werden.
<i>Modellphysik</i>	METEOWIND Climate basiert auf dem Wettervorhersagemodell ETA, um die Winde der letzten 10 oder mehr Jahre zu berechnen. Als Datenbasis werden NCAR Reanalysis Daten des globalen Wetters genutzt.
<i>Vorteile</i>	Das benutzte Wettervorhersagemodell ist wissenschaftlich dokumentiert und wird von vielen Universitäten und privaten Institutionen als Wettervorhersagemodell genutzt. Die Windkarten sind innerhalb von 3 Monaten erhältlich.
<i>Nachteile</i>	Die Genauigkeit der Windkarten hängt vom benutzten Raster, sowie von der Qualität der benutzten digitalen Karten der Topografie und Bodennutzung ab.
<i>Einsatzgebiet</i>	weltweit
<i>Details</i>	Es werden Windkarten und Windstatistiken berechnet, die ein Raster von 10 x 10 km bis zu 1 x 1 km überdecken aufweisen. Je feiner das Raster, desto genauer werden die Windkarten.
<i>Kaufpreis</i>	Nur als Dienstleistung erhältlich. CHF 100'000 pro Auftrag

#### 4.2. Modelle für Micrositing

Tabelle 2 ist eine Zusammenstellung der bekannten Planungstools für Micrositing. In den Unterkapiteln werden die Modelle einzeln charakterisiert.

Modell	Vorteile	Nachteile	Kaufpreis
WasP <a href="http://www.wasp.dk">http://www.wasp.dk</a>	Berechnung von Windkarten sowie Leistungsberechnung von Windparks	Nur für flaches Gelände geeignet	CHF 3'900
WindPro <a href="http://www.emd.dk">http://www.emd.dk</a>	Planungstool in mehreren Modulen: Lärm, Schattenwurf, Fotomontage etc.	Nur für flaches Gelände geeignet	alle Module CHF 21'000
WindFarmer <a href="http://www.ripesoftware.com">http://www.ripesoftware.com</a>	Planungstool für: Lärm, Schattenwurf, Fotomontage etc.	Nur für flaches Gelände geeignet	keine Preisangaben
WindMap <a href="http://www.browerco.com">http://www.browerco.com</a>	Windberechnung	Nur für flaches Gelände geeignet	CHF 1'700
WindSim <a href="http://www.windsim.com">http://www.windsim.com</a>	Windberechnung in wenig steilem Gelände	Für sehr steiles Gelände nicht geeignet. Vorteile gegenüber WASP sind noch unklar.	Dienstleistung CHF 8'000 bis 13'000 pro Auftrag
METEOWIND Complex <a href="http://www.meteotest.ch">http://www.meteotest.ch</a>	Windberechnung für jedes Gelände	Aufwändiges Verfahren	Dienstleistung CHF 16'000 bis 160'000 pro Auftrag
MINERVA <a href="http://www.aria.fr">http://www.aria.fr</a>	Windberechnung für jedes Gelände	Aufwändiges Verfahren	Dienstleistung keine Preisangaben

Tab. 2: Übersicht der Modelle für Micrositing.

#### 4.2.1. WAsP

<i>Internetadresse</i>	<a href="http://www.wasp.dk">http://www.wasp.dk</a>
<i>Kurzbeschreibung</i>	WAsP ist ein Computermodell, mit dem aus einer vorhandenen Messung das gesamte Windfeld über einem Projektgebiet berechnet werden kann. Aus dem Windfeld kann die Energieproduktion einer WKA berechnet werden. Das Modell ist der Industriestandard der Neunziger Jahre.
<i>Modellphysik</i>	WAsP basiert auf stark vereinfachten physikalischen Grundlagen, die sich in vielen Fällen bewährt haben.
<i>Vorteile</i>	WAsP ist einfach zu bedienen und kann in der Regel ohne Vorkenntnisse genutzt werden. Um WAsP optimal einsetzen zu können, sind sehr gute Vorkenntnisse aus der Grenzschichtmeteorologie erforderlich.
<i>Nachteile</i>	Bei mangelhaften Eingabedaten (ungenau Topografie, zu kurze Messperiode der Windmessung) sind die Berechnungen des Windes mit zum Teil grossen, aber nicht offensichtlichen Fehlern versehen.
<i>Einsatzgebiet</i>	Flaches bis leicht gewelltes Gelände. Windmessungen (mindestens 1 Jahr) sollten an mindestens einem Standort vorhanden sein.
<i>Details</i>	<p>Nach Mortensen und Petersen (1997) sind die Fehler der von WAsP berechneten Windgeschwindigkeiten kleiner als 10%, wenn:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. <math>RIX &lt; 30\%</math></li><li>2. <math>\Delta RIX &lt; 8\%</math></li><li>3. Eine detaillierte Kartengrundlage vorhanden ist: Die Äquidistanz zwischen zwei Höhenkurven sollte höchstens 20 m sein und die horizontale Distanz zwischen zwei Höhenlinien sollte höchstens 100 m betragen.</li></ol>
<i>Kaufpreis</i>	CHF 3'900

#### 4.2.2. WindPro

<i>Internetadresse</i>	<a href="http://www.emd.dk">http://www.emd.dk</a>
<i>Kurzbeschreibung</i>	Planungstool, das aus mehreren Modulen besteht: Windberechnung, Windparkoptimierung, Geräuschbelastung, Schattenwurf, Sichtbarkeit, Fotomontage, finanzielle Planung, automatische Berichterstellung. Das zugrunde liegende Modell für die Windberechnungen ist WAsP.
<i>Modellphysik</i>	siehe WAsP
<i>Vorteile</i>	Programm für den professionellen Planer
<i>Nachteile</i>	siehe WAsP
<i>Einsatzgebiet</i>	Flaches bis leicht gewelltes Gelände. Windmessungen (mindestens 1 Jahr) sollten an mindestens einem Standort vorhanden sein.
<i>Details</i>	siehe WasP
<i>Kaufpreis</i>	alle Module CHF 21'000

#### 4.2.3. WindFarmer

<i>Internetadresse</i>	<a href="http://www.ripesoftware.com">http://www.ripesoftware.com</a>
<i>Kurzbeschreibung</i>	Planungstool, das aus mehreren Modulen besteht: Windberechnung, Windparkoptimierung, Geräuschbelastung, Schattenwurf, Sichtweite der WKA, Fotomontage, finanzielle Planung, automatische Berichterstellung. Das zugrunde liegende Modell für die Windberechnungen ist WAsP.
<i>Modellphysik</i>	siehe WAsP
<i>Vorteile</i>	Programm für den professionellen Planer
<i>Nachteile</i>	siehe WAsP
<i>Einsatzgebiete</i>	Flaches bis leicht gewelltes Gelände. Windmessungen (mindestens 1 Jahr) sollten an mindestens einem Standort vorhanden sein.
<i>Details</i>	siehe WAsP
<i>Kaufpreis</i>	keine Angaben

#### 4.2.4. WindMap

<i>Internetadresse</i>	<a href="http://www.browerco.com">http://www.browerco.com</a>
<i>Kurzbeschreibung</i>	WindMap ist ein Computermodell für Windberechnungen in gross- und kleinräumigen Gebieten, in denen bereits Windmessungen vorhanden sind.
<i>Modellphysik</i>	WindMap basiert auf statistischen Methoden, die sich in vielen Fällen bewährt haben. Es kann für grosse Gebiete und für Micrositing eingesetzt werden. Je mehr Messstandorte vorhanden sind, desto besser können die Winde berechnet werden.
<i>Vorteile</i>	WindMap ist sehr einfach zu bedienen. Vorkenntnisse sind nicht erforderlich. Von Vorteil sind meteorologische Grundkenntnisse.
<i>Nachteile</i>	Die eingesetzte Statistik kann nicht optimal auf lokale Gegebenheiten angepasst werden, ein "tuning" des Modells ist nicht möglich.
<i>Einsatzgebiete</i>	Flaches bis leicht gewelltes Gelände, Windmessungen (mindestens 1 Jahr) sollten an mehreren Standorten vorhanden sein. Es können bis zu 75 Messstationen eingegeben werden.
<i>Details</i>	Es werden statistische Annahmen getroffen, wie der Wind sich in unterschiedlichen Geländeformen ändert. Je nach topografischen Gegebenheiten können daher Fehler in den Windberechnungen bereits in einfachem Gelände gross werden. Abweichungen bis zu 1 m/s sind möglich.
<i>Kaufpreis</i>	CHF 1'700

#### 4.2.5. WindSim

<i>Internetadresse</i>	<a href="http://www.windsim.com">http://www.windsim.com</a>
<i>Kurzbeschreibung</i>	WindSim ist ein Computermodell, mit dem aus einer oder mehreren Windrosen das gesamte Windfeld über einem Gebiet berechnet werden kann. Aus dem Windfeld kann die Energieproduktion einer oder mehrerer Windturbinen berechnet werden. Ausserdem können Aussagen zur Turbulenz gemacht werden.
<i>Modellphysik</i>	WindSim basiert auf den vollen Navier-Stokes Gleichungen, mit vollständigen, physikalischen Grundlagen. Es kann in grossen Gebieten oder für Micrositing eingesetzt werden, je nach dem wie viele Messstationen (Windrosen) im Projektgebiet zur Verfügung stehen.
<i>Vorteile</i>	Das zugrunde liegende physikalische Modell ist besser als die Modell von WAsP oder WindMap.
<i>Nachteile</i>	Die aktuell angewandte Methode von WindSim lässt keine verbesserte Anwendbarkeit in komplexem Gelände erwarten. Der Unterschied zu WAsP oder WindMap ist daher eher gering.
<i>Einsatzgebiete</i>	Einfaches, leicht gewelltes Gelände. Windmessungen (mindestens 1 Jahr) sollten an mindestens einem Standort vorhanden sein.
<i>Details</i>	WindSim berechnet den Speed-Up, der sich durch topografische Hindernisse oder Änderungen der Rauigkeitslängen ergibt, pro Windrichtung aufgrund eines einzigen Windprofiles. Für andere Windgeschwindigkeiten wird eine lineare Interpolation durchgeführt. Damit bleibt der Unterschied zu WAsP oder WindMap gering.  Ähnlich wie WAsP oder WindMap werden thermische Effekte (z.B. Hangwinde) nicht berücksichtigt. Es wird eine neutral geschichtete Atmosphäre angenommen.
<i>Kaufpreis</i>	Dienstleistung, pro Auftrag CHF 8'000 bis 13'000

#### 4.2.6. METEOWIND Complex

<i>Internetadresse</i>	<a href="http://www.meteotest.ch">http://www.meteotest.ch</a> Koordination, Gesamtprojekt <a href="http://www.cscs.ch">http://www.cscs.ch</a> Kompetenzzentrum Modellierung <a href="http://www.software.aeat.com">http://www.software.aeat.com</a> Basis-Software
<i>Kurzbeschreibung</i>	<p>METEOWIND Complex entstand aus einer Zusammenarbeit zwischen <i>METEOTEST</i> und dem dem Swiss Center for Scientific Computing (CSCS, ETH Zürich). Mit METEOWIND Complex werden Windfelder mit dem CFD-Code CFX-4 der AEA Technologies UK berechnet. Am CSCS wurden entsprechende Zusatzmodule für die Anwendung von CFX in der freien, bodennahen Atmosphäre entwickelt. Das Modell berechnet die Strömungen über einem grossen Gebiet oder für Micrositing. Aus dem Windfeld kann die Energieproduktion einer oder mehrerer Windturbinen berechnet werden. Ausserdem können Aussagen zur Turbulenz gemacht werden.</p>
<i>Modellphysik</i>	<p>METEOWIND Complex basiert auf den vollen Navier-Stokes Gleichungen, mit vollständigen, physikalischen Grundlagen. Es kann in grossen Gebieten oder für micrositing eingesetzt werden.</p>
<i>Vorteile</i>	<p>METEOWIND Complex ist für auch in alpinem Gelände einsetzbar.</p>
<i>Nachteile</i>	<p>Die Berechnungen können sehr aufwändig und kostenintensiv werden. Validierungen liegen noch kaum vor. Das Tool steht erst als Prototyp zur Verfügung.</p>
<i>Einsatzgebiete</i>	<p>Jedes Gelände</p>
<i>Details</i>	<p>METEOWIND Complex berechnet für jeden Windrichtungssektor eine Windstatistik. Es werden keine thermischen Effekte berücksichtigt. Es wird eine neutral geschichtete Atmosphäre angenommen.</p>
<i>Kaufpreis</i>	<p>als Dienstleistung nach Aufwand CHF 16'000 bis 160'000</p>

## Glossar

- MCP** Das Measure-Correlate-Predict Verfahren setzt eine lineare Korrelation aus den Messungen am Standort mit anderen langjährigen Messungen einer Messstation voraus. Falls eine ausreichend gute Korrelation vorhanden ist, kann das langjährige Windpotenzial am Standort der WKA ermittelt werden.
- MCCP** Measure-Compute-Correlate-Predict wird eingesetzt, wenn keine langjährigen Windmessungen in der Umgebung der Windkraftanlage vorhanden sind. Anstelle von Messdaten werden Windstatistiken verwendet, die mit Wettermodellen berechnet werden und langjährige Monatsmittelwerte auf einem Geländeaster enthalten (z.B. 2 x 2 km). Die Statistik sollten mindestens 10 Jahre abdecken, und auf einer vollständigen Rekonstruktion bzw. Reanalysis des Wetters basieren. Für eine kurzfristige Messperiode am Standort müssen die Messdaten und die Winddaten der Reanalysis parallel vorliegen. Sind die Winddaten dieser Periode linear korreliert, kann das langjährige Windpotenzial am Standort der WKA ermittelt werden.
- Micrositing** Beim Micrositing wird aus vorhandenen Windrosen, die aus der unmittelbaren Nähe der geplanten Windkraftanlage stammen, der Wind in Nabenhöhe bestimmt. Dazu wird eine sehr genaue topografische Karte benötigt (Massstab mindestens 1:25'000, Äquidistanz höchstens 20 m).
- RIX-Zahl** Die RIX-Zahl (Ruggedness Index) gibt den Anteil in Prozent des Gebietes an, der steiler als eine bestimmte Neigung ist. In der Regel berechnet sich die RIX-Zahl als Anteil der Fläche eines kreisförmigen Gebietes mit Radius von 3500 m, der eine Neigung von 18° übersteigt. Mit dem Programm rix.exe kann die RIX-Zahl für einen beliebigen Punkt in einem digitalen Geländemodell berechnet werden. Das Programm kann unter <http://www.wasp.dk>, (Download Page) heruntergeladen werden.
- ΔRIX** Mit ΔRIX bezeichnet man den Unterschied der RIX-Zahl zwischen dem Standort der Windkraftanlage und dem Standort, an dem die Messungen ausgeführt wurden.
- Sodar** Sodar ist ein Messverfahren, bei welchem vom Boden aus Schallimpulse vertikal gegen oben ausgesandt werden. Aus dem reflektierten Signal (Echo) kann die Windgeschwindigkeit und Windrichtung im einem Vertikalprofil kontinuierlich bestimmt werden. Für Windstudien werden Systeme eingesetzt, welche typischerweise im Bereich 20 bis 200 m über Grund messen, mit einer vertikalen Auflösung von 5 m.

## 5. Literaturverzeichnis

Bundesamt für Energiewirtschaft (BFE), 1990: Meteonorm Wind. Leitfaden für den Windenergieplaner. Bezug bei Infosolar, Postfach 311, 5200 Brugg, Schweiz.

Bundesamt für Energiewirtschaft (BFE), 1999: Planung von Windenergieanlagen. Leitfaden für die Schweiz. Bezug bei Suisse Eole Infostelle, [www.suisse-eole.ch](http://www.suisse-eole.ch).

N. G. Mortensen und E. L. Petersen, 1997: Influence of Topographical Input Data on the Accuracy of Wind Flow Modelling in Complex Terrain. European Wind Energy Conference & Exhibition 1997, Dublin, Ireland.