

Methodische Entwicklungen zur Standortbegutachtung

1 Verfahren zur Berechnung räumlicher Strukturen der Datenqualität

Das Verfahren zur Berechnung räumlicher Strukturen in der Datenqualität an komplexen Standorten wurde im Verlauf des VERTIKO-Projekts konstant weiter entwickelt und verbessert. Die zuerst entwickelte Version des Ansatzes verwendete das analytische Footprint-Modell FSAM (Flux Source Area Model), welches von Schmid (1994; 1997) entwickelt wurde. Dieses vergleichsweise einfache Verfahren ist im Detail beschrieben in Göckede et al. (2004), und wurde im Kontext des CARBOEU-ROFLUX Workpackage 7 ‚Quality check and data basing‘ angewendet auf insgesamt 18 Monitoring Stationen dieses Projekts (Rebmann et al., 2004).

Die aus dieser umfangreichen Studie gewonnenen Erfahrungen mit dem Begutachtungsverfahren wurden im Folgenden umgesetzt in eine grundlegend überarbeitete Variante, die zum Zeitpunkt des Abschlusses des VERTIKO-Projekts die Referenzversion des Programms darstellt. Diese verwendet den von Thomson (1987) vorgestellten Ansatz eines stochastischen Vorwärts-Lagrange Footprint-Modells vom Langevin-Typ (z.B. Wilson und Sawford, 1996). Die Umsetzung dieser Algorithmen einschließlich der Definition der turbulenten Flusststatistiken sowie der Beschreibung des Stabilitätseffekts auf die verwendeten Profile wurde von Rannik et al. (2003) durchgeführt. Das verwendete Modell kann eingesetzt werden in diabatischer Schichtung und berücksichtigt auch Flüsse innerhalb des Vegetationsraums. Wie alle Lagrange’schen Footprint-Modelle kann auch dieser Ansatz dreidimensionale turbulente Diffusion simulieren (z.B. Reynolds, 1998), ist allerdings als Vorwärts-Modell wie auch alle analytischen Ansätze aufgrund der Annahme der sogenannten ‚inverted plume assumption‘ (z.B. Schmid und Oke, 1988; Schmid, 2002) eingeschränkt auf horizontal homogene Strömungsbedingungen. Diese Eigenschaften ermöglichen eine deutlich verbesserte Anpassung der für das hier vorgestellte Begutachtungsverfahren benötigten Footprint-Modellierung an komplexe Standorte mit hoher Vegetation.

Eine weitere wichtige Weiterentwicklung im Vergleich zu der bei Göckede et al. (2004) vorgestellten Version des Verfahrens betrifft die Berechnung von effektiven Rauigkeitslängen z_0 als Eingabeparameter für das verwendete Footprint-Modell. Anstelle einer Footprint-basierten Berechnung von z_0 im Rahmen eines Iterationsverfahrens, welche die tatsächliche Physik grob vereinfachte, wurde in der überarbeiteten Fassung des Ansatzes das mikroskalige Flächenmittlungsmodell nach Hasager und Jensen (1999) eingesetzt. Dieses Modell berücksichtigt die Reaktion des Strömungsfeldes auf jeden Rauigkeitssprung für eine beliebige Anordnung der Oberflächenelemente. Die Grundgleichun-

gen dieses Verfahrens sind linearisierte Versionen der Navier-Stokes Gleichung, für welche letztendlich nur der advective Term sowie die vertikale Flussdivergenz berücksichtigt werden, während alle weiteren Komponenten wie zum Beispiel der Coriolis term vernachlässigt werden (Hasager et al., 2003). Gelöst werden die Algorithmen über Fast Fourier Transformationen, wodurch eine zeiteffiziente Berechnung effektiver Oberflächenparameter in Übereinstimmung mit der mittleren Reibung für festgelegte Strömungsbedingungen ermöglicht wird. Im Rahmen dieses Ansatzes wird die Rauheitslänge für jeden betrachteten Standort mit dem Modell von Hasager und Jensen (1999) vorberechnet für verschiedene Windrichtungssektoren, Stabilitätsklassen sowie Temperaturregimes. Diese in Tabellen gespeicherten Ergebnisse werden anschließend als Eingabeparameter für das Footprint-Modell zur Verfügung gestellt.

Zusätzlich wurden die Möglichkeiten von Fernerkundungsmethoden nach intensiven Studien von Reithmaier et al. (2004) in das Begutachtungsverfahren integriert. Da sowohl die Footprint-Analyse als auch das Flächenmittelungsmodell auf Landnutzungsdaten basieren, konnte durch eine Bereitstellung genauerer sowie aktuellerer Informationen die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich gesteigert werden.

Das Verfahren selbst wurde entwickelt zur Verbindung von meteorologischen Messungen mit Geländeinformationen. Dazu wurde für jede Einzelmessung eines Beobachtungszeitraums eine Footprint-Analyse durchgeführt, deren resultierendes Quellgebiet projiziert wird auf die eingesetzte Matrix mit den Landnutzungs-Informationen. Unter der vereinfachenden Annahme, dass von allen Teilflächen der Umgebung ein Fluss mit der gleichen Quellstärke emittiert wird, werden die auf diese Weise zugeordneten Gewichtungsfaktoren sortiert nach Landnutzungsklassen und anschließend aufsummiert, um den Flussbeitrag jeder Klasse zu erhalten.

Zusätzlich zur oben skizzierten Bewertung der Landnutzungsstruktur im Quellgebiet der Messungen wurden die ermittelten Gewichtungsfaktoren zusammen mit den Ergebnissen der Qualitätsanalyse der gemessenen Flüsse in einer Datenbank abgelegt. Nach Bearbeitung der gesamten Experimentperiode wurden diese Einträge statistisch ausgewertet, um für jede einzelne Zelle der Geländematrix die mittlere Datenqualität zu bestimmen. Hieraus ergab sich zum einen die räumliche Struktur der Datenqualität bestimmter Flüsse, beispielsweise des fühlbaren Wärmestroms, sowie der relative Einfluss jeder Matrixzelle zum gemessenen Gesamtfluss. Detailliertere Beschreibungen des angewendeten Verfahrens werden bei Göckede et al. (2004) gegeben.

2 Bewertung der Heterogenität an komplexen Standorten

Ein Element des hier angewendeten Begutachtungsverfahrens, eine Analyse der Heterogenität der Landnutzungsstruktur, wurde speziell für die Bewertung der VERTIKO-Ankerstationen durchgeführt und ist daher noch nicht in der ersten publizierten Beschreibung des Verfahrens (Göckede et al., 2004)

enthalten. Für meteorologische Fluss-Stationen, beispielsweise zusammengefasst in FLUXNET (Baldocchi et al., 2001), wird üblicherweise eine spezifische Landnutzungsart als Zielfläche angegeben, deren Anteil am gemessenen Fluss heran gezogen werden kann, um den Einfluss der heterogenen Landnutzungsstruktur auf die Datenqualität zu bewerten. Im Falle der VERTIKO-Ankerstationen wurde keine derartige Zielfläche definiert, so dass es keine Referenz-Landnutzungsart gibt an der sich eine Bewertung orientieren kann. Zur Evaluierung der Landnutzungsstruktur wurden stattdessen zwei allgemeinere Schemata entworfen: Zum einen eine Übersicht der auftretenden Kombinationen des Landnutzungspaares das eine spezifische Messung dominiert. Zum anderen eine Darstellung der Verteilung der Anteile am gemessenen Fluss für jede Landnutzungsart.

Für die erste der beiden Bewertungen, die Übersicht der dominierenden Landnutzungsarten, wurden für jede Einzelmessung die Flussanteile der vorhandenen Landnutzungsarten nach der Größe sortiert. Lediglich die beiden Landnutzungsarten mit dem höchsten Flussanteil wurden für die weitere Bewertung berücksichtigt und in eine quadratische Übersichtstabelle eingetragen. Diese Tabelle besteht aus Spalten beziehungsweise Zeilen, deren Anzahl der Zahl der Landnutzungsklassen entspricht. Der Eintrag für jede Einzelmessung erfolgt nun in der Zeile der dominanten Landnutzungsart, und der Spalte für den zweithöchsten Flussanteil. Für den Fall, dass die dominante Landnutzungsart einen Anteil von mehr als 90 Prozent am gemessenen Gesamtfluss hat, erfolgt der Eintrag in der Hauptdiagonale. Die daraus entstehende Übersicht lässt Rückschlüsse zu auf den Anteil der Daten mit homogenem Einzugsgebiet, beziehungsweise die vorherrschende Zusammensetzung der dominierenden Landnutzungsklassen bei gemischtem Anströmsektor.

Tabelle 1: Beispiel einer Übersichtstabelle der dominanten Kombinationspaare für vier Landnutzungsklassen. Die Zeilen stehen für die jeweils dominierende Landnutzungsklasse, während die Spalten die Klasse mit dem zweithöchsten Flussbeitrag repräsentieren. Die Zahlen geben die Häufigkeit der jeweiligen Kombination an [%].

Klasse	1	2	3	4
1				
2		25.69	58.71	2.43
3		12.31		0.86
4				

In Tabelle 1 ist ein Beispielergebnis für die Analyse der dominanten Landnutzungs paare zusammen gestellt. Von den 4 ausgewiesenen Landnutzungsklassen haben nur Klassen 2 und 3 einen Eintrag als dominante Klassen, Klasse 4 taucht in Kombination mit diesen beiden als zweitwichtigster Eintrag auf, während Klasse 1 keine Bedeutung an diesem Standort hat. Etwa 25 Prozent der berücksichtigten Fälle hatten ein homogenes Einzugsgebiet bestehend aus Klasse 2 (Anteil größer 90 Prozent), die meisten Messungen (etwa 59 Prozent) bestanden aus einer Kombination von Klasse 2 (dominant) und Klasse 3.

Die zweite hier angewendete Bewertungsmethode konzentriert sich auf die Zusammenstellung der im Verlauf des gesamten Experiments auftretenden Flussanteile für jede der vorhandenen Landnutzungsarten. Hierzu wird wiederum eine Tabelle angelegt, welche den Wertebereich der möglichen Flussanteile zwischen 0 und 100 Prozent in Klassen zu 5 Prozent einteilt. Die relative Häufigkeit jeder dieser Klassen wird graphisch dargestellt (Abbildung 1). Diese Übersicht erlaubt eine Beurteilung, welcher Bereich für den Flussanteil jeder der Klassen im Mittel zu erwarten ist, und wie sich das Einzugsgebiet der Einzelmessungen im Mittel zusammen setzt.

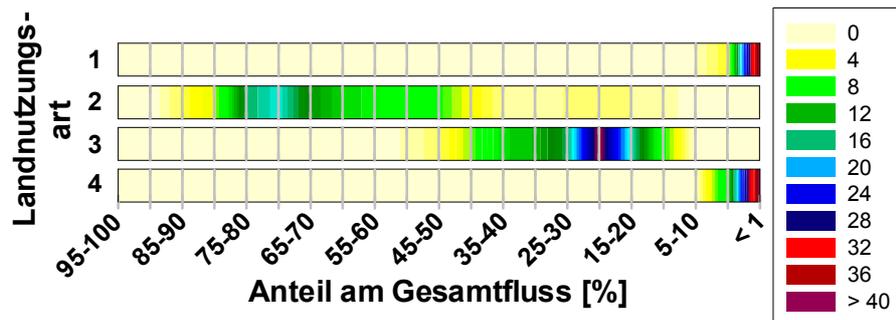


Abbildung 1: Beispiel-Darstellung der Spannweite der Flussanteile [%] für 4 Landnutzungsarten.

Aus Abbildung 1 lässt sich ablesen, dass für den Beispiel-Standort im Mittel die Landnutzung zu etwa 50 bis 80 Prozent aus Klasse 2 und zu etwa 15 bis 40 Prozent Klasse 3 besteht. Die beiden übrigen Klassen 1 und 4 haben kaum signifikante Beiträge zu den gemessenen Flüssen.

3 Ergebnisse der Station Waldstein Weidenbrunnen

Die Teststation Waldstein Weidenbrunnen (50°08'31" N, 11°52'01" E, 775 m ü.NN) wird von der Abteilung Mikrometeorologie der Universität Bayreuth betreut. Der Standort befindet sich im Fichtelgebirge etwa 4 km nördlich der Stadt Weißenstadt innerhalb eines ausgedehnten Nadelwald-Bestandes. Der Messturm gehört zum Netzwerks FLUXNET (Station DE-Wei), die Messhöhe der Eddy-Kovarianz-Instrumente beträgt 33 m über Grund. Das Gelände ist hügelig mit moderaten Steigungen, die dominierende Vegetationsart ist Fichtenwald mit einer mittleren Bestandeshöhe von etwa 19 m in der direkten Umgebung des Turms. Die wichtigsten Heterogenitäten am Standort sind eine ausgedehnte Waldlichtung etwa 250 m in westlicher Richtung, sowie der Gipfel des ‚Großer Waldstein‘ mit einer Höhe von 877 m über NN in einer Entfernung von etwa 1700 m im südwestlichen Sektor.

Der für diese Stationsanalyse verwendete Datensatz wurde im Zeitraum 21. Mai bis 31. Juli 2003 im Rahmen des Experiments WALDATEM-2003 am Standort Waldstein Weidenbrunnen erstellt. Die Aufbereitung der als 20 Hz-Rohdaten gespeicherten Messungen erfolgte nach dem in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebenen Verfahren, welches an der Universität Bayreuth entwickelt worden ist. Nach Ausschluss von Fehlwerten verblieben insgesamt

3455 Halbstundenmittel für die Stationsbewertung. Die Landnutzungskarte zur Beschreibung der Geländestruktur in der Umgebung des Turms wurde mit Hilfe einer einzelnen Satellitenaufnahme (ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance) vom April 2003 erstellt. Durch die Verwendung nur einer Satellitenszene verblieben einige Bereiche in äußeren Sektoren der Karte, die nicht bewertet werden konnten. Zudem ist die Ausweisung der Landnutzungsclassse ‚Lichtungen‘ mit Unsicherheiten behaftet, so dass unter Umständen einige der als Lichtungen ausgewiesenen Bereiche eher den Waldklassen zuzuordnen wären (Reithmaier et al., 2004). Die Dimension der Landnutzungskarte ist 473 Pixel (Ost-West) x 340 Pixel (Nord-Süd), was bei einer horizontalen Auflösung von 15 m einer Ausdehnung von 7095 m x 5100 m entspricht. Dieser Bereich, für welchen insgesamt 9 Landnutzungsclassen differenziert werden konnten, ist in Abbildung 2 dargestellt. Für die Darstellung der weiteren Ergebnisse der Standortbegutachtung wurde eine Fläche von 1485 m (Ost-West) x 1305 m (Nord-Süd) ausgewählt. Diese Fläche, welche das Areal mit signifikanten Flussbeiträgen für die Messposition markiert, wurde in Abbildung 2 mit einem weißen Rahmen gekennzeichnet. Größe und Position des Bereichs wurden so gewählt, dass er die Fläche abdeckt, aus der bei stabiler Schichtung 95 Prozent der gemessenen Flüsse emittiert wurde.

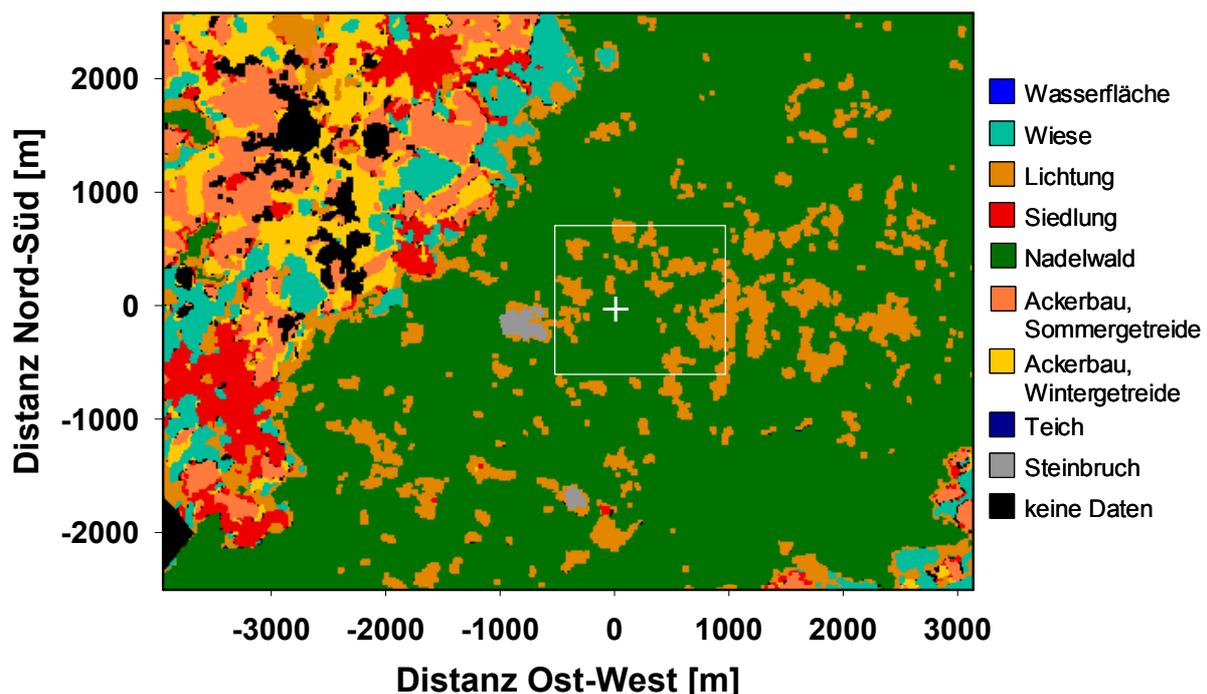


Abbildung 2: Landnutzungskarte für die Standortbewertung der Teststation Waldstein Weidenbrunnen. Die Turmposition ist mit einem weißen Kreuz gekennzeichnet. Der weiße Rahmen im Zentrum markiert den Bereich mit signifikantem Flussbeitrag zu den Messungen, auf welchen sich die folgenden Detailabbildungen konzentrieren.

Die Berechnung der akkumulierten Quellgebiete wurde für vier verschiedene atmosphärische Stabilitäten durchgeführt: labile ($z/L < -0.0625$), neutrale ($-0.0625 < z/L < 0.0625$) und stabile ($z/L > 0.0625$) Fälle, zusätzlich die Zusammenfassung aller Schichtungen. Die Ergebnisse, welche für den in Abbildung 2 mit dem weißen Rahmen gekennzeichneten Bereich dargestellt werden, sind in

Abbildung 3 zusammen gestellt. In diesen Abbildungen wird die dreidimensionale Struktur der akkumulierten Quellgebiete nachvollzogen durch die weißen Isolinien. Die Werte der Isolinien sind normiert auf den Wert der Zelle mit dem maximalen Einfluss auf den Sensor, wobei die 90er Linie beispielsweise alle Matrixzellen einschließt, welche mindestens 90 Prozent dieses Maximalwerts erreichen. Die neun durchgezogenen Linien überspannen den Wertebereich zwischen 10 Prozent und 90 Prozent, die gestrichelte Linie stellt die 5er-Isolinie dar.

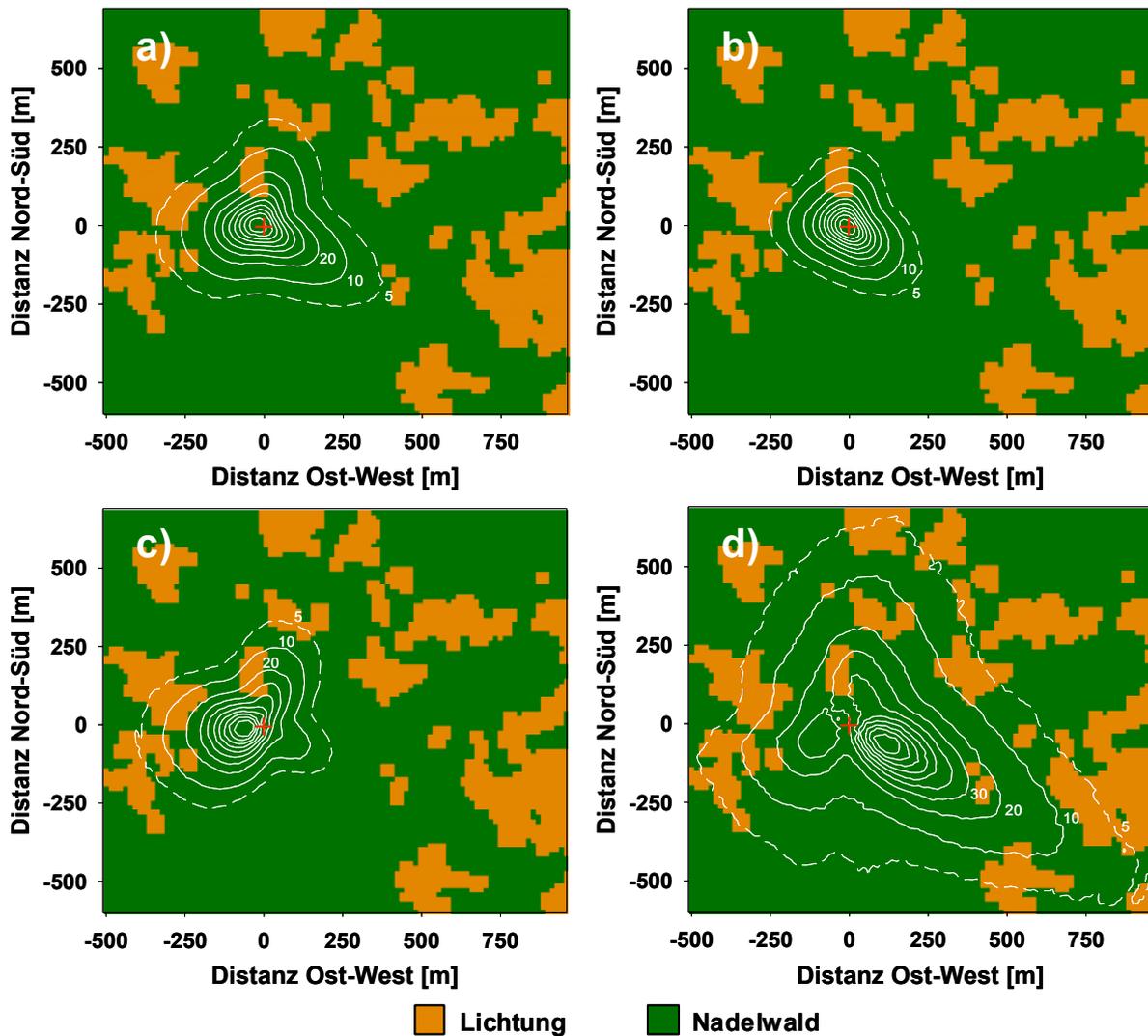


Abbildung 3: Akkumulierte Quellgebiete für die Teststation Waldstein Weidenbrunnen, aufgeteilt nach a) alle Schichtungen, b) labile Schichtungen, c) neutrale Schichtungen, und d) stabile Schichtungen. Die Turmposition ist mit dem roten Kreuz gekennzeichnet, die weißen Isolinien geben die Position des akkumulierten Quellgebietes an. Detaillierte Angaben dazu werden im Text gegeben.

In dem in Abbildung 3 dargestellten zentralen Bereich der Landnutzungskarte liegen nur noch die beiden Landnutzungsklassen Nadelwald und Lichtung vor. Demnach kann anhand des für diese Bewertung verwendeten Informationsmaterials der Geländebereich mit signifikantem Einfluss auf die Messungen aerodynamische Heterogenitäten durch die Rauigkeitsstufen an den Waldrändern enthalten. Die ungefähre Größe des signifikanten Bereichs des akkumulierten Quellgebiets schwankt zwi-

schen 500 m (E-W) x 480 m (N-S) für labile Schichtung (Abb. 3b) und 1480 m x 1220 m für stabile Schichtung (Abb. 3d), während für das Mittel aller Schichtungsfälle (Abb. 3a) ein Bereich von 720 m x 620 m ausgewiesen wurde. Das Maximum des akkumulierten Quellgebiets befindet sich für die Zusammenstellung aller verwendeten Daten sowie für labile Schichtung dicht an der Turmposition mit einer leichten Tendenz nach Westen. Für neutrale Schichtung ergibt sich ein Schwerpunkt des Geländeeinflusses im Südwesten, und für stabile Schichtung im Südosten des betrachteten Gebiets.

Die Analyse räumlicher Strukturen der Datenqualität von Austauschmessungen wurde für die Teststation Waldstein Weidenbrunnen für Impulsfluss, fühlbaren und latenten Wärmefluss sowie den CO₂-Fluss durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 visualisiert. Die Qualitätsbewertung der Flüsse erfolgte in Flags zwischen 1 (beste Qualität) und 9 (schlechteste Qualität). Detaillierte Angaben zum verwendeten Bewertungsschema werden aufgeführt in Foken and Wichura (1996) sowie Foken et al. (2004).

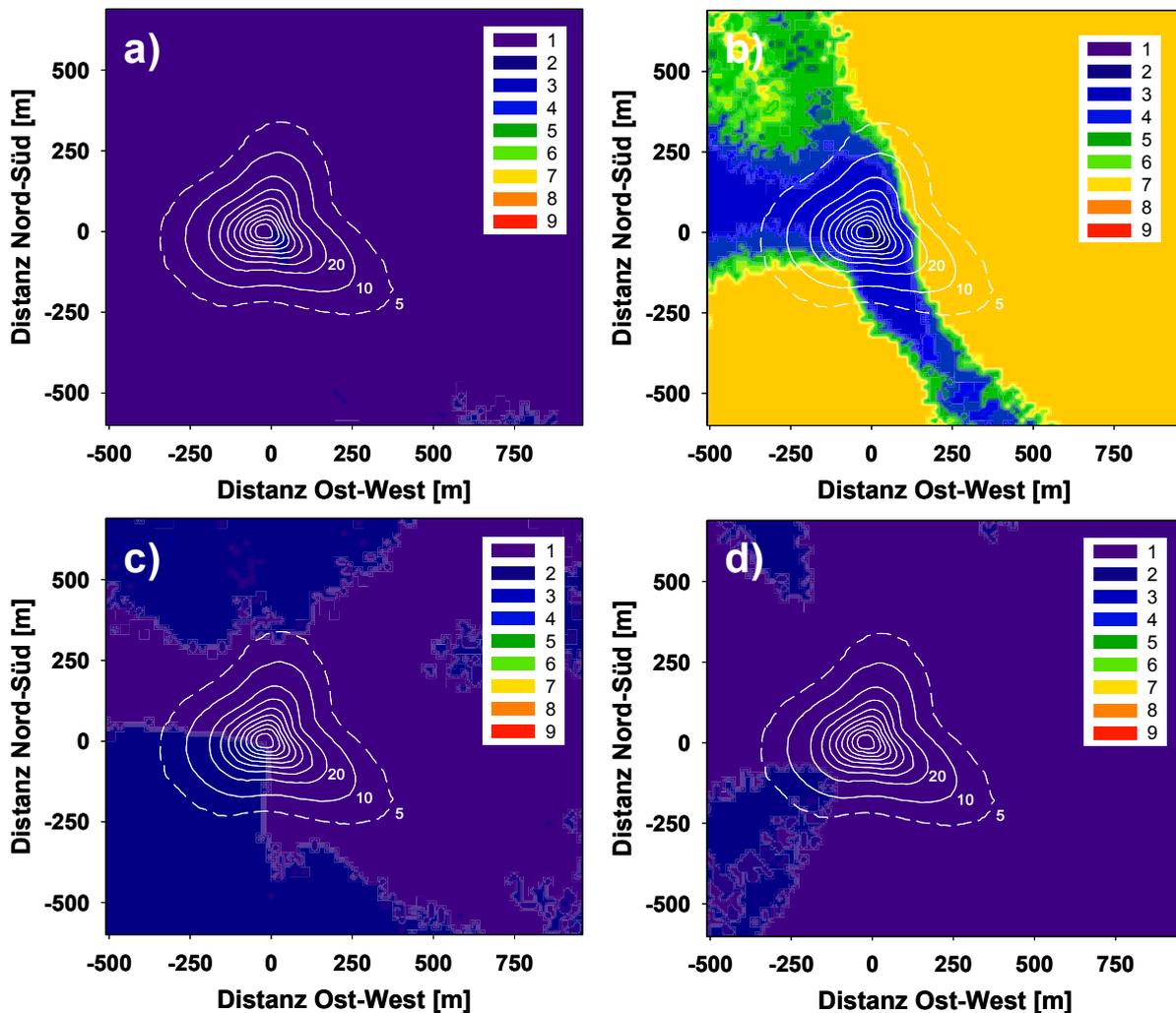


Abbildung 4: Ergebnisse der räumlichen Datenqualität für die Teststation Waldstein Weidenbrunnen. Die Bewertungen wurden durchgeführt für a) Impulsfluss, b) fühlbaren Wärmestrom, c) latenten Wärmestrom und d) CO₂-Fluss. Zur Identifikation des für die Messungen signifikanten Einflussbereichs wurde das akkumulierte Quellgebiet für alle Schichtungsfälle (weiße Isolinien) eingefügt.

Generell spiegelt die in Abbildung 4 für die Teststation Waldstein Weidenbrunnen zusammen gestellte Übersicht der räumlichen Strukturen der Datenqualität für verschiedene Austauschflüsse eine sehr hohe Datenqualität wider. Die gemittelte Datenqualität für den Impulsfluss (Abb. 4a), latenten Wärmestrom (Abb. 4c) sowie CO₂-Fluss (Abb. 4d) zeigen durchgehend in allen Sektoren die höchsten Qualitätsstufen 1 und 2. Dieses Ergebnis deutet auf quasi störungsfreie turbulente Austauschmessungen hin. Das Ergebnis für den fühlbaren Wärmestrom (Abb. 4b) dagegen weist deutliche Strukturen in der räumlichen Datenqualität auf. Sowohl in der direkten Umgebung des Turms als auch in zwei Sektoren im Südosten beziehungsweise im Westen der Messposition ist die mittlere Datenqualität hoch (Stufen 3-4), während die übrigen Matrixquadrate mit der eher niedrigen Bewertung 6-7 geflaggt sind. Dieses Ergebnis ist eine Konsequenz der für die Ausweisung der Qualitätsflags verwendeten integralen Turbulenzcharakteristika für den fühlbaren Wärmestrom. Die Parametrisierung der als Referenz heran gezogenen integralen Turbulenzcharakteristika ist nicht gültig für den neutralen Bereich, so dass hier regelmäßig große Abweichungen zwischen den gemessenen und den modellierten Werten mit dementsprechend schlechter Qualitätsbewertung auftreten (siehe auch Göckede et al., 2004). Die gute Qualitätsbewertung in der direkten Umgebung der Messposition beziehungsweise in den beiden Sektoren im Südosten und Westen kommt zustande durch die weitgehend hohe Datenqualität während labiler Schichtung, die diese Bereiche dominiert.

Die Möglichkeit, neben den oben aufgeführten Qualitätsflags auch räumliche Strukturen für kontinuierliche Parameter berechnen zu können, ist besonders gut geeignet zur Analyse der vertikalen Windkomponente an einem komplexen Standort. Die Ergebnisse dieser Bewertung ist für die Teststation Waldstein Weidenbrunnen in der folgenden Abbildung 5 dargestellt.

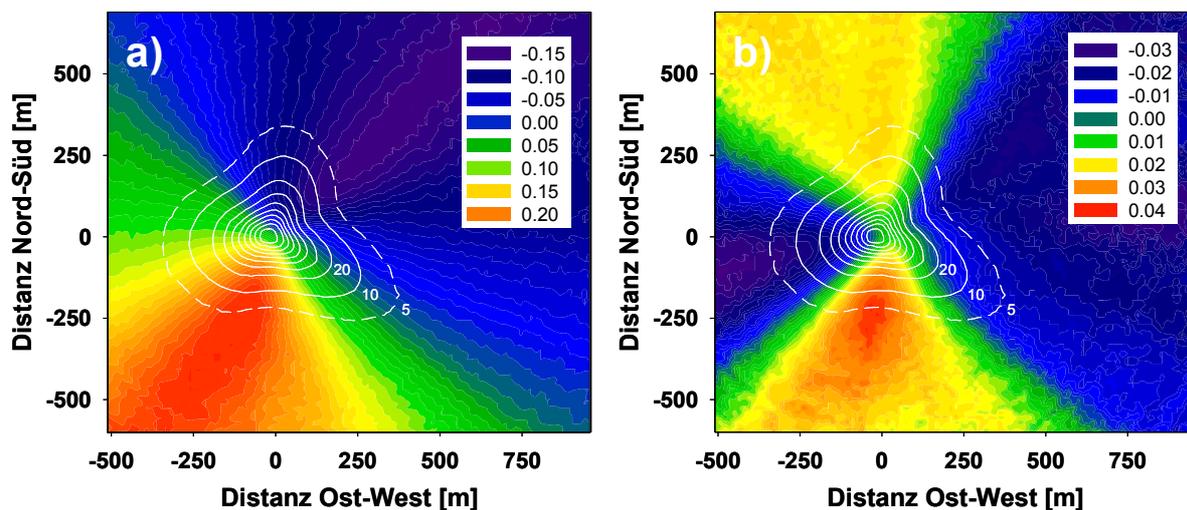


Abbildung 5: Gemittelte vertikale Windkomponente an der Teststation Waldstein Weidenbrunnen. Untersucht wurden die räumlichen Strukturen a) der unrotierten vertikalen Windkomponente und b) der vertikalen Windkomponente nach Anwendung der Planar-Fit Koordinatenrotation.

In Abbildung 5a zeigt sich der signifikante Effekt der lokalen Topographie auf das Windfeld am Standort Waldstein Weidenbrunnen. Das mittlere Windfeld ist gekippt entlang einer Achse, die etwa

von Nordwest nach Südost verläuft, mit einem Wertebereich der vertikalen Windkomponente zwischen 0.2 m s^{-1} im südwestlichen und -0.15 m s^{-1} im nordöstlichen Sektor. Um diese Neigung auszugleichen, welche eine deutliche Beeinträchtigung der Eddy-Kovarianz Methode darstellt, muss ein Koordinaten-Rotationsverfahren angewendet werden. In Abbildung 5b ist das vertikale Windfeld nach Anwendung der Planar-Fit Rotation (Wilczak et al., 2001) dargestellt, welches den im Verlauf dieser Stationsanalyse verwendeten Datensatz repräsentiert. Die gemittelten vertikalen Windkomponenten haben sich im Vergleich zu den unrotierten Daten deutlich reduziert auf maximal 0.04 m s^{-1} und üben somit keinen signifikanten Einfluss mehr auf die Berechnung der Austauschflüsse aus. Allerdings zeigen sich auch in Abbildung 5b noch deutlich voneinander abgegrenzte Windrichtungssektoren mit positiven vertikalen Windkomponenten im Süden und Norden des Sensors und negativen Werten im Westen und Osten. Diese klaren räumlichen Strukturen weisen darauf hin, dass die Neigung des Windfelds am Standort Waldstein Weidenbrunnen nicht für alle Anströmrichtungen einheitlich ist, so dass sie mit Hilfe der Planar-Fit Methodik und nur einem einzigen Satz an Rotationswinkeln nicht vollständig ausgeglichen werden kann. Eine optimale Koordinatenrotation müsste hier mehrere Windrichtungssektoren mit individuellen Neigungen des Windfeldes berücksichtigen, deren Ausdehnung mit Hilfe des hier vorgestellten Bewertungsansatzes bestimmt werden kann.

Die Bewertung der Heterogenität der Landnutzungsstruktur wurde für die Teststation Waldstein Weidenbrunnen wie in Abschnitt 2 beschrieben in zwei Schritten durchgeführt. Das erste der Ergebnisse ist die Zusammenstellung der dominanten Kombinationspaare der 9 dort vorhandenen Landnutzungsklassen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Dominante Kombinationspaare der Landnutzungsklassen im Quellgebiet für die Teststation Waldstein Weidenbrunnen. Die Zeilen stehen für die jeweils dominierende Landnutzungsklasse, während die Spalten die Klasse mit dem zweithöchsten Flussbeitrag repräsentieren. Die Zahlen geben die Häufigkeit der jeweiligen Kombination an [%]. 1: größere Wasserfläche (See); 2: Wiese; 3: Lichtung; 4: Siedlung; 5: Nadelwald; 6: Ackerbau, Sommergetreide; 7: Ackerbau, Wintergetreide; 8: kleinere Wasserfläche (Teich); 9: Steinbruch; 10: keine Daten.

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3										
4										
5		0.21	53.16		46.19	0.27	0.18			
6										
7										
8										
9										
10										

Aus Tabelle 2 geht hervor, dass am Standort Waldstein Weidenbrunnen die Landnutzungsklasse Nadelwald während des gesamten hier betrachteten Experimentzeitraums dominant war. Der Hauptan-

teil entfällt mit etwa 53 Prozent auf die Kombination von Nadelwald und Lichtungen, in etwa 46 Prozent aller Fälle war die Zusammensetzung des Quellgebiets der jeweiligen Messung quasi homogen (Anteil der dominanten Landnutzungsart > 90 Prozent). Neben diesen beiden Einträgen in Tabelle 2, welche zusammen mehr als 99 Prozent aller Messungen repräsentieren, existieren unbedeutende Einträge mit Wiese beziehungsweise Ackerflächen als zweitwichtigstem Flussbeitrag.

Der zweite Teil der Heterogenitätsbewertung der Landnutzungsstruktur konzentriert sich auf die Verteilung der Anteile am gemessenen Fluss für jede Landnutzungsart. Die Visualisierung der Ergebnisse für die Teststation Waldstein Weidenbrunnen erfolgt in Abbildung 6.

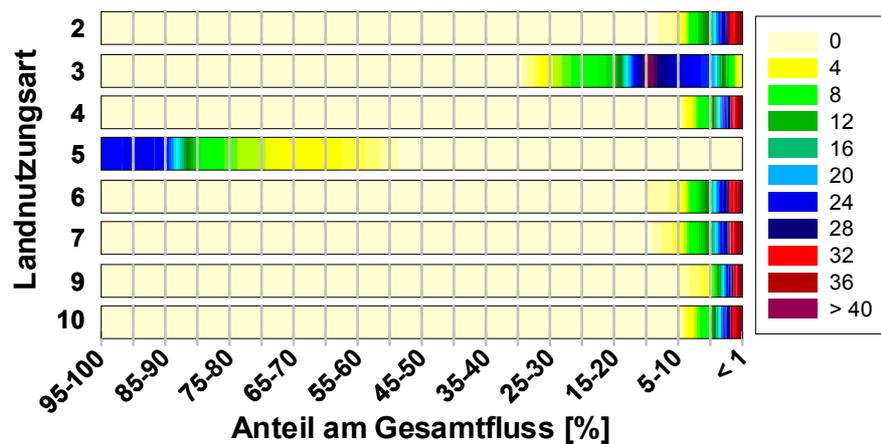


Abbildung 6: Spannweite der Flussanteile [%] für 8 der 10 Landnutzungsarten an der Teststation Waldstein Weidenbrunnen. Landnutzungsarten, bei denen für alle Einzelmessungen ein Flussanteil von < 1 Prozent des Gesamtflusses vorlag, wurden für die Darstellung nicht berücksichtigt. Eine Beschreibung der den Codes zugeordneten Landnutzungsarten wird in der Überschrift zu Tabelle 2 gegeben.

Auch die Zusammenstellung der Spektren der Flussbeiträge der einzelnen Landnutzungsklassen in Abbildung 6 verdeutlicht, dass am Standort Waldstein Weidenbrunnen letztendlich nur mit signifikanten Flussbeiträgen der Landnutzungsklassen Nadelwald (Klasse 5) und Lichtung (Klasse 3) zu rechnen ist. Die übliche Zusammensetzung liegt bei 75 bis 95 Prozent Nadelwald, und 1 bis 20 Prozent Lichtungen. Die landwirtschaftlichen Klassen Wiese (Klasse 2) und Acker (Klassen 6 und 7) erreichen Flussbeiträge von bis zu 10 Prozent für Einzelmessungen, die übrigen Klassen spielen eine untergeordnete Rolle für die Messungen.

4 Literaturverzeichnis

Baldocchi, D. D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthony, P., Bernhofer, C., Davis, K., Fuentes, J. D., Goldstein, A., Katul, G., Law, B. E., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, J. W., Oechel, W., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., und Wofsy, S. (2001). FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapour and energy flux densities, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 82, 2415-2435.

- Foken, T., und Wichura, B. (1996). Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, *Agric. For. Meteorol.*, 78, 83-105.
- Foken, T., Göckede, M., Mauder, M., Mahrt, L., Amiro, B. D., und Munger, J. W. (2004). Post-field data quality control, in X. Lee (ed.), *Handbook of Micrometeorology: A guide for Surface Flux Measurements*, Kluwer, Dordrecht, S. 81-108.
- Göckede, M., Rebmann, C., und Foken, T. (2004). A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites, *Agric. For. Meteorol.*, (accepted).
- Hasager, C. B., und Jensen, N. O. (1999). Surface-flux aggregation in heterogeneous terrain, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 125, 2075-2102.
- Hasager, C. B., Nielsen, N. W., Jensen, N. O., Boegh, E., Christensen, J. H., Dellwik, E., und Soegaard, H. (2003). Effective roughness calculated from satellite-derived land cover maps and hedge-information used in a weather forecasting model, *Boundary-Layer Meteorol.*, 109, 227-254.
- Rannik, Ü., Markkanen, T., Raittila, J., Hari, P., und Vesala, T. (2003). Turbulence statistics inside and over forest: Influence on footprint prediction, *Boundary-Layer Meteorol.*, 109, 163-189.
- Rebmann, C., Göckede, M., Foken, T., Aubinet, M., Aurela, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Carrara, A., Cescatti, A., Ceulemans, R., Clement, R., Elbers, J. A., Granier, A., Grünwald, T., Guyon, D., Havránková, K., Heinesch, B., Knohl, A., Laurila, T., Longdoz, B., Marcolla, B., Markkanen, T., Miglietta, F., Moncrieff, J. B., Montagnani, L., Moors, E., Nardino, M., Ourcival, J.-M., Rambal, S., Rannik, Ü., Rotenberg, E., Sedlak, P., Unterhuber, G., und Vesala, T. (2004). Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modelling, *Theor. Appl. Climatol.*, (accepted).
- Reithmaier, L., Göckede, M., Markkanen, T., Knohl, A., Churkina, G., Rebmann, C., Buchmann, N., und Foken, T. (2004). Remote sensing methods for the evaluation of complex micrometeorological flux measurement sites, *Theor. Appl. Climatol.*, (submitted).
- Reynolds, A. M. (1998). A two-dimensional Lagrangian stochastic dispersion model for convective boundary layers with wind shear, *Boundary-Layer Meteorol.*, 86, 345-352.
- Schmid, H. P., und Oke, T. R. (1988). Estimating the source area of a turbulent flux measurement over a patchy surface, in *8th Symposium on Turbulents and Diffusion*, Boston, MA, American Meteorological Society, 123-126.
- Schmid, H. P. (1994). Source areas for scalars and scalar fluxes, *Boundary-Layer Meteorol.*, 67, 293-318.
- Schmid, H. P. (1997). Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes, *Agric. For. Meteorol.*, 87, 179-200.
- Schmid, H. P. (2002). Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective, *Agric. For. Meteorol.*, 113, 159-183.
- Thomson, D. J. (1987). Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows, *J. Fluid Mech.*, 180, 529-556.
- Wilczak, J. M., Oncley, S. P., und Stage, S. A. (2001). Sonic anemometer tilt correction algorithms, *Boundary-Layer Meteorol.*, 99, 127-150.

Wilson, J. D., und Sawford, B. L. (1996). Review of Lagrangian stochastic models for trajectories in the turbulent atmosphere, *Boundary-Layer Meteorol.*, 78, 191-210.