

Das Energie Schließungsproblem

PHILIPP HOCHSTAFFL, CHRISTIAN LAMPRECHT,
MARTIN SCHÖLL, SIMON SIEDERSLEBEN

Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Österreich

Juni, 2014

Zusammenfassung

This report summarizes the results of the measurement campaign taken place between the 05. and 26. May 2014 at Hochäuser, Kolsass Inn valley. The campaign was held by two groups of meteorology students of the university of Innsbruck, to investigate the temporal and spatial variability of flux measurements in complex terrain and to estimate the energy closure problem over sloped areas. The flux measurements were accomplished by two mobile and one fixed tower and one scintillometer. Wind speed and direction was measured by three Campbell Scientific CSAT3 Anemometers on each tower. Air temperature, radiation, humidity, soil temperature and soil water content was recorded as well. The eddy covariance method was applied to obtain the sensible and latent heat flux. The spatial variability was taken into account by using an portable radiation sensor. Therefore horizontal and slope parallel measurements were taken on a predefined grid at the measurement site. Results of the energy balance during the campaign show a remaining residual of 100 to 300 $W m^{-2}$, which is equal to order found by Foken (2008). Especially the sensible and latent heat fluxes seem to be underestimated in an area, where turbulence and water availability was high during the campaign. Data was checked by a predefined criteria to screen bad data from quality data. The sensible heatflux measured by the Eddy Covariance method (EC) are smaller than the heat flux measured with the scintillometer. With prolonging the mean intervals of the fluxes from 5 to 15, 30, 60, 120 and 240 *min* the residual in dependence of time can be narrowed. The complex, steep and north faced slope influences the flux measurements strongly. Therefore further effort in data analysis and correction has to be accomplished to approximate the quality of the measurements. Recent attempts like Nakai und Shimoyama (2012) or Frank et al. (2013) proposed to improve EC measurements seem to be promising.

1. Einleitung

Die Energiebilanz über der Erdoberfläche setzt sich aus der Nettostrahlung R_n , dem Bodenwärmestrom G , dem Speicherterm S , dem sensiblen Wärmestrom H und latenten Wärmefluss λE zusammen. Die Nettostrahlung ist der grundlegende Antrieb der Wärmeströme. Aufgrund der Energieerhaltung sollte deswegen die Summe dieser Größen gleich null sein.

In den späten 80er Jahren hat man festgestellt, dass sich die Energiebilanz nicht mit experimentell ermittelten Daten schließen lässt (Foken und Oncley 1995). Die netto Strahlung abzüglich aller Wärmeströme ergibt

ein Residual Res :

$$Res = R_n - G - S - (\lambda E + H). \quad (1)$$

Dieses Residual hat laut Foken (2008) eine Größenordnung von 50 bis 300 W/m^2 . In der Vergangenheit wurde ein Überschätzen der Strahlung und ein Unterschätzen der turbulenten Flüsse als Ursache genannt. Die Strahlungsmessgeräte messen heutzutage (2014) sehr genau. Daher kann eine Überschätzung der Strahlung ausgeschlossen werden (Foken 2008), weshalb eine Unterschätzung der turbulenten Flüsse vermutet wird. Tatsächlich ist es so, dass sich die turbulenten Ströme für eine größere Mittelungszeit und für räumlich gemittelte Flüsse vergrößern (Finnigan et al. 2003).

Ebenso wurde in der Studie von Nakai und Shimoyama (2012) eine deutliche Unterschätzung der turbulenten Wärmeströme, von nicht orthogonalen Anemometern, festgestellt. Dort wurden mit Gull Sonic Anemometern gezeigt, dass die Windmessungen in Abhängigkeit des „angle of attack“, der Winkel des Windvektors zur Horizontalen, fehlerbehaftet sind. Die Korrektur der Messungen führt zu einer generellen Zunahme des fühlbaren und latenten Wärmeflusses.

In einer weiteren aktuellen Studie vergleicht (Frank et al. 2013) zwei nicht orthogonale Sonic Anemometer. Das Campbell Scientific CSAT3 Anemometer, das wir in unserer Messkampagne verwendet haben und das SAT/3Vx, Applied Technologies, Anemometer. Die Autoren berichten von 6-42 % geringeren Messungen der Vertikalgeschwindigkeit ω beim CSAT3. Nach Korrekturen konnte der sensible Wärmefluss H des CSAT3 im Vergleich zum SAT/3Vx um 8 bis 12 % erhöht werden.

Die Energieschließung variiert mit der Komplexität des Geländes: Je heterogener das Gelände, desto Größer ist das Residuum. Panin et al. (1998) vermutet, dass heterogenes Gelände Advektion und großskalige Turbulenz begünstigt. Advektion und großskalige Turbulenz kann mit der herkömmlichen Eddy-Kovarianz Methode nicht erfasst werden, das könnte das größere Residuum in heterogenem Gelände erklären.

In dieser Arbeit wurde die Energiebilanz, in komplexen Gelände, auf einen nach Norden exponierten Hang gemessen Abb. 1.. Das Ziel war es sowohl die zeitliche als auch die räumliche Variabilität der Energiebilanz zu erfassen. Der Versuchsaufbau wird im Kapitel Daten erklärt. Im Kapitel Methoden wird die Qualitätskontrolle der Daten vorgestellt. Dort wird auch auf den Bodenwärmestrom eingegangen.

2. Daten

Die Messungen wurden in Kolsass in Tirol, Österreich vom 5. bis zum 26. Mai durchgeführt. Allerdings hatte man aufgrund schlechten Wetters Probleme mit der Stromversorgung. Deswegen stehen qualitativ hochwertige Daten nur vom 19. Mai bis zum 26. Mai zur Verfügung. Das ist auch jene Periode auf die sich die Auswertungen konzentrieren. Zusätzlich stehen vom 20. Mai und 21. Mai Scintillometer und Ecobot Messungen zur Verfügung. Alle Sonic Anemometer haben mit einer Auflösung von 20 Hz gemessen.

Das Untersuchungsgebiet ist ein nach Norden exponierter Hang. Ein vertikaler Schnitt durch das Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 1. gezeigt. Am Fuße des Untersuchungsgebiet steht ein fest installierter Turm, im Folgenden Hauptstation genannt, an dem folgenden Messgeräte installiert sind: Ein Sonic Anemometer in drei Meter Höhe mit einem Krypton Hygrometer, Temperatursensoren in ein und drei Meter Höhe und ein Strahlungssensor. Der Strahlungssensor misst dabei hangparallel. Zusätzlich wurden noch zwei mobile Türme aufgestellt. Diese waren jeweils alle 75 m hangaufwärts installiert. An diesen mobilen Türmen wurde die Temperatur in einem und in drei Meter Höhe gemessen. Zudem war an jedem der mobilen Türme ein Sonic Anemometer installiert. Die mobilen Türme werden in Abbildung 2. als mittlere und obere Station bezeichnet. Der sensible Wärmefluss wurde zusätzlich mit einem Scintillometer gemessen, diese Messungen stehen für den 20. und 21. Mai zur Verfügung.

Mit einem mobilen Strahlungsmessgerät Wohlfahrt und Tasser (2014), im Folgendem Ecobot genannt, wurde an 12 Stationen die Nettostrahlung gemessen. Die Stationen sind in Abbildung 2. dargestellt. Die Ecobot Messungen liegen, ebenso wie die Scintillometer Messungen für den 20. und 21. Mai vor. Der Bodenwärmestrom und der Speicherterm wurde an der Hauptstation und an der mittleren Station gemessen. Neben dem Bodenwärmestrom wurde jeweils der Speicherterm berechnet.

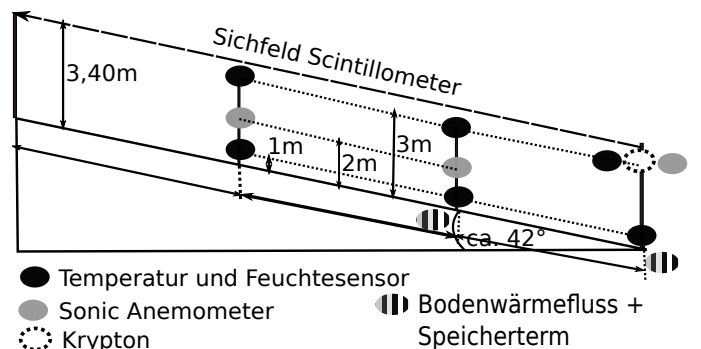


ABB. 1. Der Versuchsaufbau, mit drei Sonic Anemometer und insgesamt sechs Temperatursensoren. Zusätzlich wurde mit einem Scintillometer der räumliche gemittelte sensible Wärmefluss gemessen

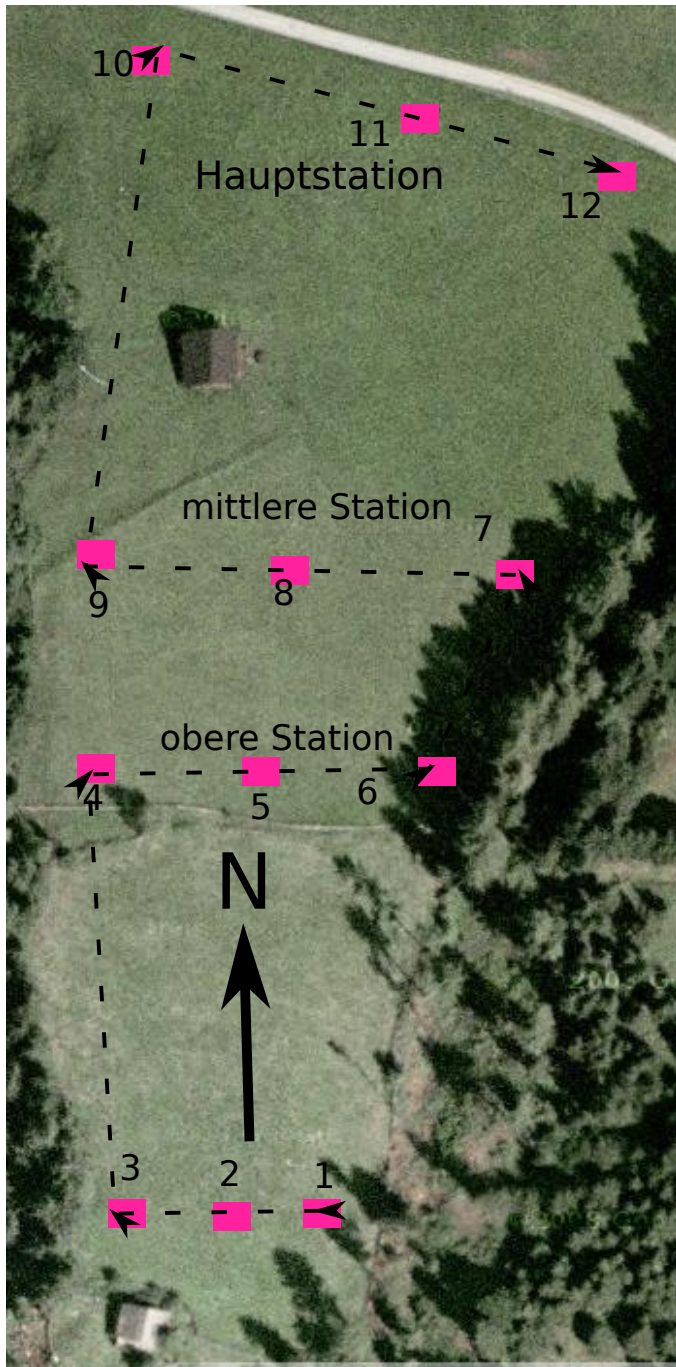


ABB. 2. Die räumliche Verteilung der Ecobotmessungen

3. Methoden

a. turbulente Flüsse

In diesem Feldversuch sollten die räumliche und zeitliche Variabilität der Energiebilanz bestimmt werden. Die räumliche Variabilität des sensible Wärmestrom wurde mit Hilfe der zwei mobilen Messtürme untersucht. Der latente Wärmefluss konnte nur am fest installierten Turm bestimmt werden, weil nur dort ein Krypton installiert war. Deswegen wurde das Residuum an den mobilen Türmen mit dem latenten Wärmefluss des fest installierten Turmes berechnet. Die Rohdaten der Sonic Anemometer wurden mit dem Programm *EdiRe* bearbeitet (*ediRe* 2014). Alle Daten wurden mit den gleichen *EdiRe-Proclists* nachbearbeitet.

Um die Berechnung der sensiblen und latenten Wärmeströme zu vereinfachen wurde eine Koordinatentransformation für jede Mittelungszeit eingeführt. Dazu wird das Koordinatensystem um die vertikale Achse und um die horizontale Achse gedreht. Durch diese zweifache Rotation des Koordinatensystems resultiert ein mittlerer vertikaler \bar{w} und horizontaler Wind in y -Richtung \bar{v} gleich null. Dieser Prozess ist bekannt unter dem Namen *double rotation*. Anschließend kann der sensible (2) und latente Wärmefluss (3) berechnet werden:

$$H = c_p \rho \overline{w'\theta'} \tag{2}$$

$$\lambda E = c_p \rho q' \overline{w'} \tag{3}$$

In beiden Gleichungen ist c_p die Wärmekapazität von Luft, ρ die Dichte von Luft und w' die Abweichung der vertikalen Geschwindigkeit vom Mittel \bar{w} . θ' ist die Fluktuation der potentiellen Temperatur und q' ist die Fluktuation der spezifischen Feuchte. Beide Flüsse haben die Einheiten $W m^{-2}$.

Bei der Berechnung der turbulenten Flüsse werden folgende Korrekturen gemacht:

frequency response, das Sonic Anemometer ist nicht in der Lage sehr hohe und sehr niedrige Frequenzen zu messen. Deswegen wird das gemessene Frequenzspektrum am linken und rechten Rand korrigiert (Moore 1986).

heat flux correction: Das Sonic Anemometer misst die Temperatur mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit. Somit ist die gemessene Temperatur abhängig von der Dichte der Luft. Aus diesem Grund fließt der partielle Wasserdampfdruck mit in die Berechnung ein (Schotanus

et al. 1983).

oxygen correction: Das Krypton Hygrometer misst die Feuchte mit Hilfe von Absorptionsspektren von Wasserdampf. Diese Absorptionsspektren werden von Sauerstoff überlagert, deswegen werden sie hier korrigiert (van Dijk et al. 2003).

Webb correction: Temperaturänderungen führen zu Volumenveränderungen. Diese Volumenveränderungen interpretiert das Sonic Anemometer als Luftbewegungen, deswegen müssen diese falsch interpretierten Bewegungen korrigiert werden (Webb et al. 1980).

time lag: Das Krypton Hygrometer misst schneller als das Sonic Anemometer. Deswegen müssen die Daten korrigiert werden, damit sie zeitlich übereinstimmen (Aubinet et al. 2000). Die Korrektur wird in EdiRe berechnet, jedoch nicht angewendet.

Die *EdiRe-Proclists* unterschieden sich lediglich in der Mittelungszeit. Die turbulenten Flüsse wurden für eine Mittelungszeit von 5, 15, 30, 60, 120 und 240 Minuten berechnet. Das Stationaritätskriterium wurde den Mittelungszeiten angepasst. Das Stationaritätskriterium ist in *EdiRe* folgendermaßen implementiert:

$$st = \frac{\overline{w'\theta'_t} - \overline{w'\theta'}_{Mittelungszeit}}{\overline{w'\theta'_t} + \overline{w'\theta'}_{Mittelungszeit}} \tag{4}$$

Der Term $\overline{w'\theta'_t}$ besteht aus zwei Mitteln: Das erste Mittel geht über ein Subintervall t , das kürzer sein muss als die Mittelungszeit. Das zweite Mittel berechnet den Durchschnitt der turbulenten Wärmeströme $\overline{w'\theta'_t}$ über die Mittelungszeit. Bei einem Mittel t von 30 min wird eine Subintervalllänge von 5 min gewählt. Deswegen ist $\overline{w'\theta'_t}$ der Durchschnitt von sechs Werten $\overline{w'\theta'_t}$. Für die sechs verschiedenen Mittelungszeiten wurden sechs verschiedene Subintervalllängen t verwendet, wie sie in der Tabelle 1 dargestellt sind.

Die nachbearbeiteten Daten wurden aufgrund ihrer Stationaritätskriterien in drei Klassen eingeteilt:

Bei der Beurteilung der Datenqualität wurde neben der Stationarität auch die Windrichtung berücksichtigt. Die Kriterien sind in Abbildung 3. dargestellt. Wind mit einem Einfallswinkel von $\pm 90^\circ$ zum Sonic Anemometer wird als günstig betrachtet, weil die Messungen des Sonic kaum durch Verwirbelungen am Sonic selbst beeinflusst werden. Diese Daten werden als Daten erster Klasse bezeichnet. Daten zweiter Klasse haben einen Einfallswinkel von $\pm 135^\circ$. Hier wird angenommen, dass die Daten teilweise von Verwirbelungen

Mittelungsent. in <i>min</i>	Subint. in <i>min t</i>
5	1
15	2
30	5
60	10
120	20
240	40

TABELLE 1. Mittelungsintervall mit Subintervalllänge t

Stationarität <i>st</i> in %	Daten Qualität
0-30	erster Güte
30-100	zweiter Güte
> 100	wird nicht verwendet

TABELLE 2. Qualitätskriterien Stationarität

beeinflusst sind. Diese können sich entweder am Arm des Sonics oder am Gerüst bilden, an dem der Arm des Sonics befestigt ist. Kommt der Wind aus 225° bis 315° relativ zum Sonic, dann werden die Daten nicht verwendet. Weitere Kriterien für die Datenkontrolle sind die Spannung am Logger und die Diagnosenummer des Sonic Anemometer. Sobald einer dieser Werte fehlerhaft ist, werden die Daten nicht verwendet.

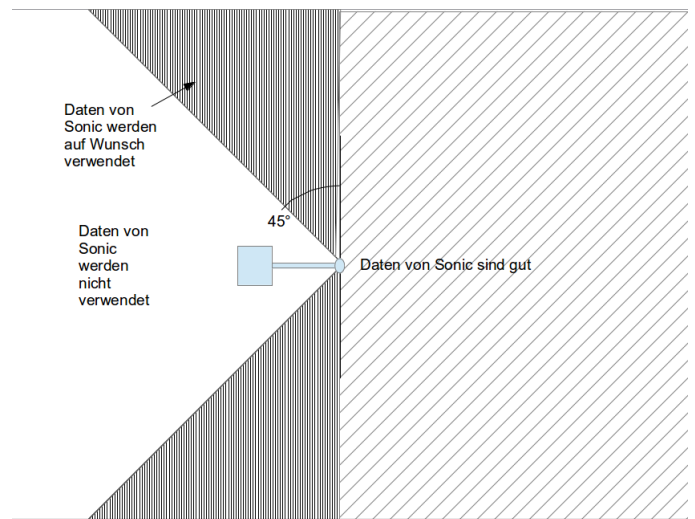


ABB. 3. Qualitätsbeurteilung der Daten nach Windrichtung

Um die Auswahl der Datenqualität zu automatisieren, wurde ein Punktesystem eingeführt: Korrekte Spannung am Logger und Diagnosenummer des Anemometer waren obligatorische Kriterien. Daten erster

Güte bezüglich des Windes, bekommen 0,5 Punkte zugeteilt und Daten zweiter Güte 0,25. Die Stationaritätskriterien werden nach dem gleichen Verfahren bewertet. Möchte man nun Daten höchster Qualität, entspricht das einer Punktezahl 1. Sollen alle Daten dem Mindestkriterium genügen, entspricht das einer Punktezahl von 0,25.

b. Ecobot

Die räumliche Variabilität der Nettostrahlung wurde mit dem Ecobot ermittelt. Pro Messdurchlauf wurden alle 12 Stationen (Abb. 2.) abgegangen. Dabei wurden jeweils drei hangparallele und drei horizontale Messungen in kurzem Abstand durchgeführt. Die Zahl der Messdurchläufe lag am ersten Tag bei drei und am zweiten Tag bei fünf. Jeder Durchgang wurde an Station 1 begonnen und bei Station 12 beendet. Um eine räumliche Variabilität der Strahlung festzustellen, wurden die Messungen des Ecobot mit den Strahlungsmessungen an der Hauptstation verglichen.

c. Bodenwärmestrom

Der Bodenwärmestrom wurde in 5 cm Tiefe mit einem Bodenwärmestromplättchen gemessen. Der Speicherterm muss deswegen für die darüberliegende Schicht ermittelt werden. Der Speicherterm ist abhängig von der Tiefe z , der Wärmekapazität c des Bodens und der zeitlichen Änderung der Temperatur $\partial T/\partial t|_z$ in der Bodenschicht über dem Bodenwärmestromplättchen. Für die Berechnung wurden finite Differenzen verwendet.

$$S = \frac{cz \Delta T}{\Delta t}. \tag{5}$$

Die Wärmekapazität c setzt sich aus der organischen Wärmekapazität c_o und der Wärmekapazität von Wasser c_w zusammen:

$$c = c_o \frac{P_b}{P_d} + c_w Rh_{soil} \tag{6}$$

mit

$$\begin{aligned} \frac{P_b}{P_d} &= \frac{0.6}{2.65} \\ c_o &= 2.3 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \\ c_w &= 4.13 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

Die organische Wärmekapazität wird mit dem Verhältnis festes Volumen durch gesamtes Volumen P_b/P_d

gewichtet und die Wärmekapazität des Wasser mit der Bodenfeuchte Rh_{soil} (Campbell 1985).

4. Ergebnisse

a. Energiebilanzen der mittleren, oberen und Hauptstation vom 21. bis 26. Mai

Abbildung 4. zeigt die 30 minütige Energiebilanz an der Hauptstation vom 21. bis 26. Mai. Für die Bilanz wurden akzeptable Daten mit einer Qualität von ≥ 0.5 verwendet. In blau ist die Nettostrahlung, in rot der sensible und in grün der latente Wärmefluss dargestellt. Die rosa Farbe markiert den Bodenwärmestrom inklusive Speicherterm. Das Residuum ist schwarz gezeichnet, die gestrichelten schwarzen Linien symbolisieren den minimalen und den maximale Fehler des Residuums. Die Abschätzung des Fehlers basiert auf dem relativen Fehlern der einzelnen Komponenten des Residuums nach Foken (2008). Für den minimalen bzw. maximalen Fehler wird ein relativer Fehler von 5% bzw. 20% für die Nettostrahlung, den sensiblen und latenten Wärmefluss angenommen. Für den Bodenwärmestrom ein relativer Fehler von 20% bzw. 50%. Ihre Größenordnung ist in Tabelle 3 dargestellt.

Energiestrom	$W m^{-2}$
Nettostrahlung	-70 – 400
sensibler Wärmestrom	-100 – 50
latenter Wärmestrom	0 – 100 (ohne Ausreißer)
Bodenwärmestrom	-80 – 0
Residuum	-20 – 300

TABELLE 3. Größenordnung der einzelnen Komponenten der Energiebilanz

Überblickend stellt man eine nicht geschlossene Energiebilanz fest, die nachts annähernd, tagsüber jedoch nicht geschlossen werden kann. Das gemittelte Residuum über den Zeitraum liegt bei $64 W m^{-2}$. Der 21. und 22.05 sind Strahlungstage mit einem ungestörten Tagesgang der Nettostrahlung. Ebenso der 24.05 mit geringen Einschränkungen, weshalb diese im Folgenden detaillierter betrachtet werden.

Die Energiebilanz am 22.05 an der Hauptstation zeigt Abbildung 10.. In der ersten und zweiten Nachthälfte kann die Bilanz gut geschlossen werden. Der Unsicherheitsbereich verlässt dabei nicht die Nulllinie. Die gesamte Abstrahlung der Oberfläche ist hierbei höher als die atmosphärische Gegenstrahlung. Diese Rest-

energie wird dem latenten Wärmestrom zur Verfügung gestellt. Der Bodenwärmestrom trägt in dieser Zeit nur einen vernachlässigbaren Anteil zur Energiebilanz bei. Unregelmäßigkeiten im sensiblen Wärmefluss drücken sich deutlich im Residuum aus, da der latente Wärmestrom konstant bleibt.

Ab 5 bis 18 UTC ist die Nettostrahlung ≥ 0 und erreicht mittags Spitzen von 400 W m^{-2} . Die Form der Kurve ist gekennzeichnet durch die Ausrichtung des Messgeländes, den Sonnenweg und den Azimuthwinkel. Der sensible Wärmestrom wechselt morgens mit einer Verzögerung von ca. 2 h das Vorzeichen, wohingegen er abends mit mehr als drei Stunden vor der Nettostrahlung wieder negativ wird. Die geringe Intensität tagsüber mit ca. 60 W m^{-2} ist auffällig, ebenso die gezackte Form der Kurve. Der sensible Wärmefluss ist während der Nacht um ca. 50 W m^{-2} größer als während des Tages. Der latente Wärmestrom ist immer positiv, somit wird ständig Wasser von der Atmosphäre aufgenommen. Er ist auch tagsüber um eine Größenordnung größer als der sensible Wärmefluss. Der gezackte Tagesgang mit beginnender Turbulenz ab 6 UTC flacht erst ab Mitternacht ab. Der Bodenwärmestrom gewinnt ab 6 bis 20 UTC an Bedeutung und leistet einen Beitrag von $\mathcal{O}(10^1) \text{ W m}^{-2}$. In der restlichen Zeit trägt er in der Bilanz nicht bei. Die Tatsache ist schlüssig, weil im Sommer die Energiebilanz des Breitengrades positiv ist.

Das Residuum bildet sich morgens sofort mit dem Eintreffen der Nettostrahlung aus und erreicht Spitzen von 200 bis 300 W m^{-2} . Es fällt mit der Nettostrahlung wieder parallel ab und kehrt sich dann im Vorzeichen um 18 UTC kurzzeitig um. Das eingeführte Qualitätskriterium hat einen geringen Einfluss auf das Residuum. In Abbildung 17. ist für das 5 min Mittel das Residuum für den 22.05 berechnet worden: Einmal mit einer Datenqualität größer 0,25 und einmal größer 0,5. Mit einer Datenqualität von 0,5 erhält man ein um ca. 1 W m^{-2} geringeres Residuum.

Die Abbildungen 11., 12. und 13. zeigen die Energiebilanzen für je 60, 120 und 240 min Mittelungsintervalle. Das 60 minütige Mittel glättet den Verlauf der Kurven, die Intensitäten der Wärmeströme bleiben dabei im Mittel konstant (Abb. 11.). Lediglich der latente Wärmestrom nimmt ca. 20 W m^{-2} zu. Das Residuum bleibt ebenso konstant, es ist jedoch deutlich glatter als das 30 minütige. Auch das Minimum um 18 UTC wurde verstärkt. Das 120 minütige Mittel in Abbil-

dung 12. glättet nochmals die Kurven, die Beträge der Ströme bleiben in etwa gleich. Das Residuum ist tagsüber nur geringfügig kleiner geworden. Das Minimum abends ist noch deutlicher ausgeprägt. Erst das 4 stündige Mittel (Abb. 13.) verkleinert das Residuum um ca. 50 W m^{-2} . Das Minimum um 18 UTC ist ebenfalls geglättet. Dafür hat sich ein neuer extremer Peak des latenten Wärmestroms mit 300 W m^{-2} um 6 UTC gebildet. Insgesamt verändern die Mittelungsintervalle die Ergebnisse bei der Nettostrahlung und dem Bodenwärmefluss kaum. Der fühlbare und vor allem der latente Wärmestrom reagieren jedoch sehr deutlich auf die unterschiedlichen Mittelungszeiten.

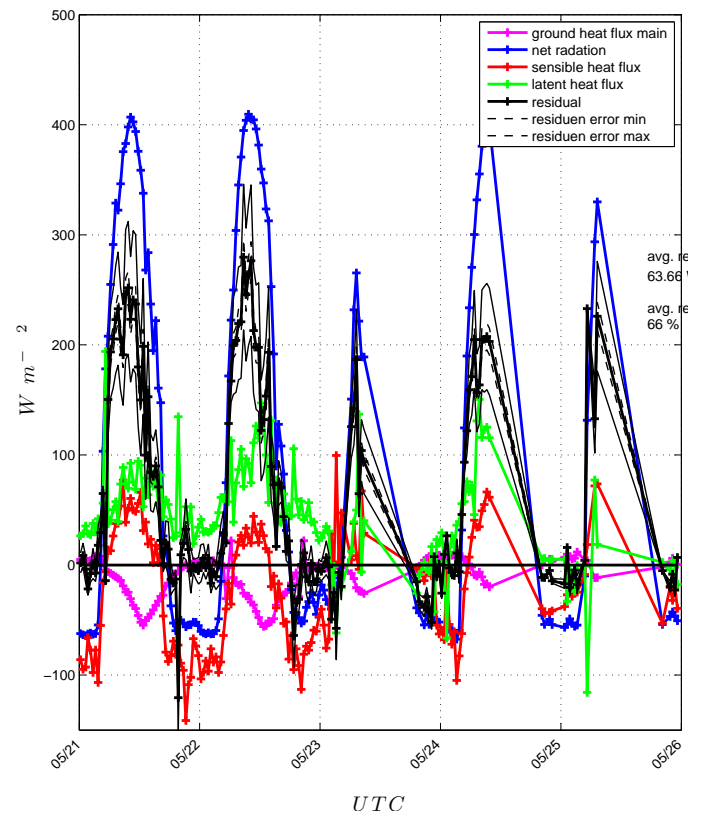


ABB. 4. 30 minütige Energiebilanz der Hauptstation (MOMMA3) vom 21. bis 26. Mai, Datenqualität ≥ 0.5

Das 30 minütige Mittel am 24.05 in Abbildung 14. dient als Referenz, um die Messungen der mittleren und oberen Station hinsichtlich des sensiblen Wärmeflusses zu vergleichen. An der mittleren Station in Abbildung 15. wurde zudem der Bodenwärmestrom gesondert gemessen. Der latente Wärmestrom ist bei allen Stationen von der Hauptstation abgeleitet. Im Vergleich der mittleren (Abb. 15.) und oberen Sta-

tion (Abb. 16.) mit der Hauptstation zeigen sich keine deutlichen Unterschiede. Der sensible Wärmestrom ist tagsüber in etwa gleich, nur nachts ist er an der Hauptstation am geringsten (-100 W m^{-2}). Deswegen ist das Residuum an der mittleren und oberen Station negativ im Vergleich zur Hauptstation. Der Bodenwärmestrom zeigt an der mittleren Station nur eine geringfügig andere Form als an der Hauptstation. Die Datenqualität der mittleren und oberen Station ist schlechter mit ≥ 0.25 . Grundlegende Änderungen in der Energiebilanz können nicht festgestellt werden. Das Residuum ist mit 58 an der Hauptstation, mit 60 an der mittleren und mit 57 W m^{-2} an der oberen Station ungefähr gleich.

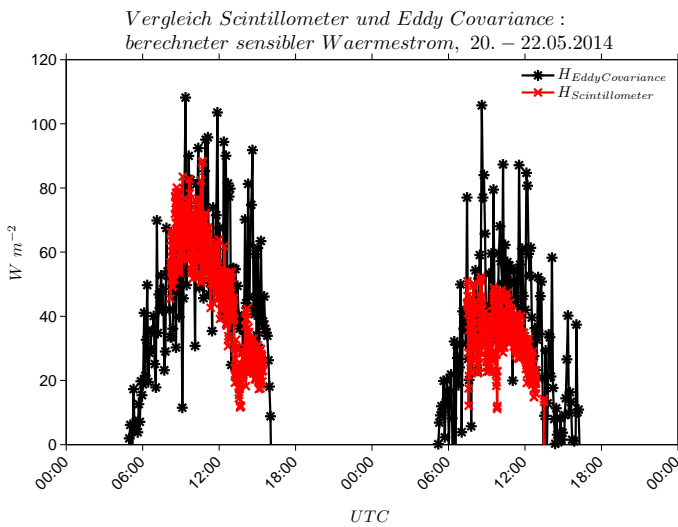


ABB. 5. Vergleich des sensiblen Wärmestromes aus Scintillometer und Eddy Covariance Messungen an der Hauptstation (keine Qualitätsanalyse)

Messungen des sensiblen Wärmeflusses mit einem Scintillometer ergeben normalerweise einen betragsmäßig größeren Fluss als Eddy Covariance Messungen (Foken 2008). Unsere Messungen zeigen den umgekehrten Fall, wie in Abbildung 5. ersichtlich. Während der ersten Tageshälfte ist der Verlauf der Scintillometer Messungen (rot) kurzzeitig gleich mit den EC Messungen (schwarz). Ab Mittag fallen die Scintillometer Messungen deutlich ab, die EC Messungen liegen dann im Schnitt um 20 W m^{-2} höher.

Nach Foken (2008) Verkleinern größere Mittelungszeiten das Residuum, was wir auch durch unsere Beobachtungen bestätigen können (Abb. 6.). Man muss auf einen geringen Zeitverzug bei den Vergleichen der

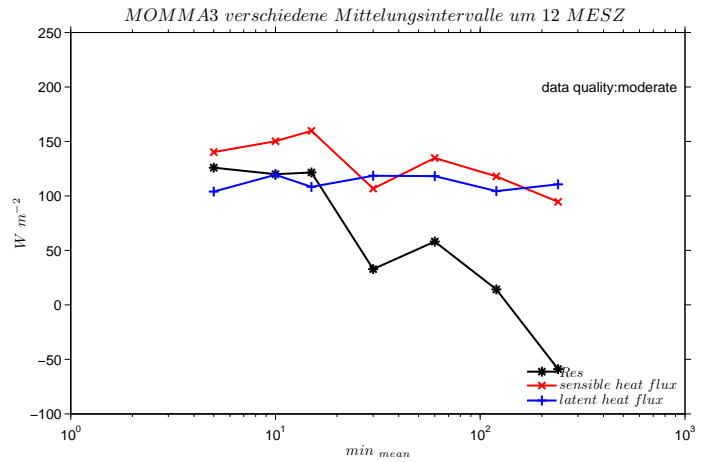


ABB. 6. Residuum, fühlbarer und latenter Wärmestrom der Hauptstation in Abhängigkeit des Mittelungsintervalles, zentrierter Mittelpunkt 12 Uhr

Mittelungsintervalle hinweisen, da nicht alle Daten den gleichen Zeitstempel, z.B. zu jeder vollen Stunde tragen. Das Residuum (schwarz) wird sukzessiv kleiner, je länger das Mittelungsintervall wird. Bei 240 min wird das Residuum negativ.

b. Ecobot

Mit dem Ecobot wurde versucht der räumlichen Variabilität der Nettostrahlung Rechnung zu tragen. Dabei wird jedoch die zeitliche Auflösung deutlich eingeschränkt. In Abbildung 7. zeigen deshalb die roten Ecobot Messungen eine deutliche Streuung im Betrag der Strahlung.

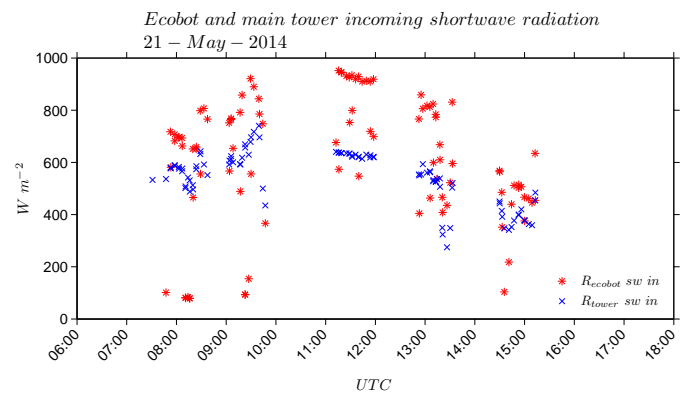


ABB. 7. Vergleich der kurzwelligigen einfallenden Strahlung von Ecobot und Hauptstation Messungen

Der Ecobot misst im Mittel ein 150 bis zu 200 W m^{-2}

höhere kurzwellige Strahlung als die Hauptstation. Einzelne Messungen stimmen überein, der größte Teil der Messungen ist jedoch um 100 W m^{-2} größer, Ausreißer sogar um 200 bis 400 W m^{-2} größer oder kleiner. Die Messstreuung ist vor allem in den Morgenstunden deutlich. Ab Mittag wird der Unterschied zwischen Ecobot und Hauptstation kleiner, da die Ecobot Messungen nicht mehr allzu tiefe Minima aufweisen.

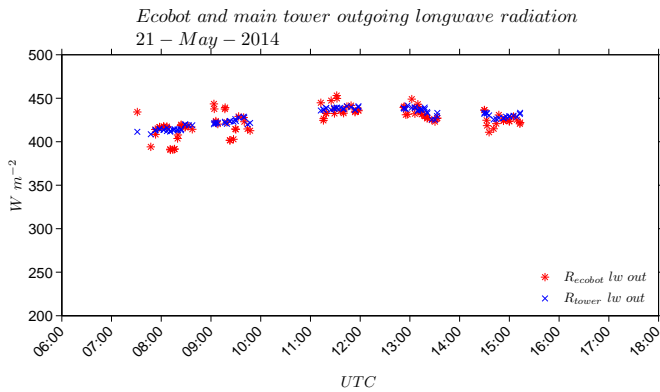


ABB. 8. Vergleich der langwelligen Abstrahlung von Ecobot und den Messungen an der Hauptstation

Bei der langwelligen Abstrahlung zeigt sich im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung zwischen den Ecobot- und Hauptstationmessungen (Abb. 8.). Trotz der räumlichen Variabilität verfolgen beide Kurven den gleichen Tagesgang. Ihre Beträge unterscheiden sich nur vormittags leicht um $\pm 20 \text{ W m}^{-2}$. Ab Mittag sind sie ungefähr gleich.

Die räumliche Variabilität wird sehr deutlich in Abbildung 9. gezeigt, wo die kurzwellige Strahlung in Abhängigkeit der verschiedenen Messpunkte (1 bis 12, siehe Abb. 2.) aufgetragen sind. Die Verteilungen je Messpunkt bestehen aus 5 Messungen pro Messpunkt (Plot) und 5 Messdurchläufe am 22.05. Die Messungen wurden von 09 bis 15 MESZ durchgeführt. Wandern der Sonnenstand und Abschattung am nordseitigen Hang sind bei der Betrachtung der Abbildung 9. zu beachten. 75 % der Daten liegen dabei im Mittel bei 580 W m^{-2} , was in etwa auch den Messungen der Hauptstation (Abb. 7.) entspricht. Die Streubreite bzw. der Interquartilabstand des 25 und 75 % Quartil beträgt ca. 150 bis 200 W m^{-2} . Die Messpunkte 6 und 7 streuen vor allem nach unten noch stärker mit 500 bzw. 400 W m^{-2} . Messpunkt 9 zeigt eine erhöhte Einstrahlung mit 680 W m^{-2} als Median. Kurzwel-

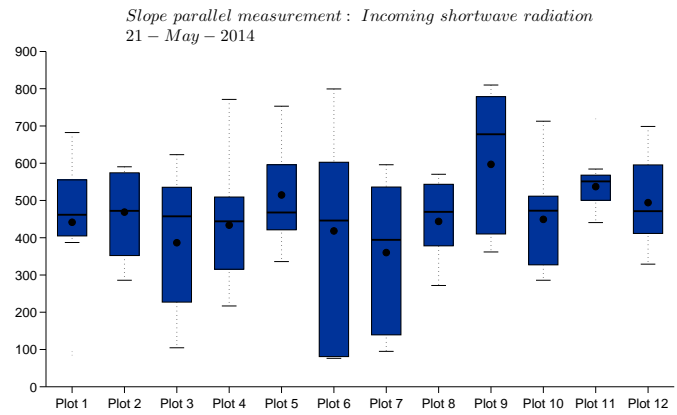


ABB. 9. Räumliche Variabilität der kurzwelligen Strahlung von Ecobot Messungen

lige Strahlungsmessungen sind im Gegensatz zu den langwelligen insgesamt deutlich variabler.

Der Footprint wurde mit dem Modell von Wohlfahrt (2014), für den 20.05 berechnet. In Abbildung 19. ist die Entfernung gezeigt, von welcher 90% des Signals des Footprints kommen. Dabei werden maximale Werte von 1400 m erreicht.

5. Diskussion

Die präsentierten Ergebnisse zeigen an allen Strahlungstagen und bei allen Stationen tagsüber ein deutliches Residuum von 100 bis 300 W m^{-2} . Auffällig sind dabei der latente und fühlbare Wärmestrom, da sie in ihrem Betrag gering ausfallen. Für einen nach Norden exponierten Hang, einen feuchten Boden und eine relativ turbulente Föhn Wetterlage würde man sich einen höheren sensiblen und latenten Fluss erwarten. Auffallend ist der geringe sensible Wärmestrom am 22.05 mit maximalen Werten von unter 50 W m^{-2} an einem Strahlungstag. Höhere Werte konnte man dagegen am 24.05 messen, obwohl an diesem Tag einige Quellwolken zu beobachten waren. Trotz der Bewölkung ergab sich in Summe eine höhere Nettostrahlung. Die erhöhte Strahlung kann man sich durch Mehrfachreflektion an Wolken erklären. Man kann also vermuten dass Quellbewölkung den sensiblen Wärmestrom an einem nach Norden exponierten Hang verstärken kann. Wie sich

der Effekt von Quellwolken auf die räumliche Strahlungsbilanz auswirkt, konnte nicht untersucht werden, weil Ecobotmessungen nur für den 21.05 und 22.05 vorliegen.

Mit dem Unsicherheitsbereich des Residuums kann nachts die Energiebilanz an der Hauptstation größtenteils geschlossen werden. Tagsüber wird das Residuum deutlich positiv. Die gemessene Nettostrahlung erscheint im zeitlichen Verlauf und in der Intensität plausibel. Der Bodenwärmestrom macht nur maximal ca. 10% der Nettostrahlung aus. Daher resultiert das Residuum größtenteils aus den turbulenten Flüsse. Das Residuum der Hauptstation unterscheidet sich nicht grundlegend von dem der mittleren und oberen Station. Im Vergleich zu den anderen Stationen gibt es geringe Unterschiede des Boden- und des sensiblen Wärmeflusses.

Ein größeres Mittelungsintervall verkleinert das Residuum schrittweise. Bei unseren Messungen ist aufgefallen, dass es negativ werden kann, je größer die Mittelungszeit ist. In unseren Messungen verkleinert sich das Residuum nicht wegen einer Vergrößerung des latenten oder fühlbaren Wärmestroms. Vielmehr verkleinert sich durch die großen Mittelungszeiten die Nettostrahlung. Daraus resultiert ein kleineres Residuum. Mit größeren Mittelungszeiten konnte deswegen keine großskalige Turbulenz erkannt werden. Daher hat sich auch nicht wie bei Foken (2008) der sensible Wärmestrom vergrößert. Ein Grund hierfür könnte stationäre Turbulenz gewesen sein, die mit dem Scintillometer erfasst werden sollte. Gegen die Erwartungen hat man mit dem Scintillometer am 21.05 und am 22.05 einen geringeren sensiblen Wärmestrom gemessen als mit dem der Eddy-Covariance Methode. Laut Brogli et al. (2014) könnte Sahara-Staub die Messungen des Scintillometer beeinflusst haben. Der Sahara Staub wurde während des 21. und 22. Mai durch die anhaltende Südwestströmung advehiert.

Die Mittelungszeiten hatten vor allem einen Einfluss auf den latenten Wärmefluss, wie in Abbildung 13. gezeigt wurde. Wie der extreme Anstieg zu interpretieren ist, ist unklar.

Der Einfluss des komplexen Geländes macht sich ebenfalls deutlich bemerkbar in der kurzwelligen Strahlung. Die Ecobot Messungen ergaben markante Unterschiede im Vergleich mit der Hauptstation. Die kurzwellige Strahlung streut in Abhängigkeit des Ortes stärker als der Einfluss der Messmethodik (hangparallel oder ho-

rizontal). Auch wenn die zeitliche Auflösung qualitativ deutlich schlechter ist und mitunter auch deshalb die Ergebnisse stark streuen, ist eine deutliche Variabilität der kurzwelligen einfallenden Strahlung zu beobachten. Erklärungen dafür hängen vor allem mit dem im Osten und Westen umliegenden Wald, der scharfen Grenze zur flachen und steilen Wiese und dem Ort der Hauptstation zusammen. Die Hauptstation steht am Ende des Hanges exponierter als die anderen Stationen und die Messpunkte des Ecobots. Abschattung, Hangneigung und bei den Ecobot Messungen vor allem die temporären Wolken ergeben unterschiedliche Messergebnisse der einzelnen Instrumente. Erstaunlich ist die Tatsache, dass die langwellige Abstrahlung räumlich nahezu konstant ist, obwohl man vermuten würde, dass der Wald die langwellige Strahlung beeinflussen würde. Ein Zusammenhang zwischen der räumlichen Variabilität der Strahlung und dem sensiblen Wärmefluss der einzelnen Stationen hat sich jedoch nur nachmittags feststellen lassen. Der sensible Wärmefluss ist, verglichen mit der oberen Station, an der Hauptstation über eine Zeitraum von ca. 1h länger im positiven Bereich. Das würde auch mit dem Ergebnis von Abbildung 9. übereinstimmen. Nimmt man an, dass Messpunkt 11 repräsentativ für die Hauptstation und Messpunkt 5 für die obere Station ist, sieht man, dass der Median des Messpunkts 5 ca. 80 W m^{-2} tiefer als der des Messpunkts 11 ist.

a. Schlussfolgerung

Die Energiebilanzschließung ist nach wie vor eines der großen ungelösten Probleme der Grenzschichtmeteorologie. In dieser Arbeit wurden im komplexen Gelände Residuen von $100\text{-}300 \text{ W m}^{-2}$ gemessen. Das entspricht tagsüber maximal ca. 60% der Nettostrahlung, obwohl die gewöhnlichen Methoden der heutigen Wissenschaft angewendet wurden. Es ist naheliegend, dass die turbulenten Flüsse unterschätzt wurden, wie auch Foken (2008) berichtet. Ähnlich zu unserem Versuchsgelände berichtet Klaassen et al. (2002) von einem größeren sensiblen Wärmefluss an zwei Grenzflächen wie Wald und Wiese. An solchen Grenzen ist ein größerer sensibler Wärmefluss aufgrund eines abrupten Wechsels der Rauheitslänge zu erwarten. Deswegen wäre es in einem weiteren Feldversuch interessant einen mobilen Turm in der Nähe der Waldgrenze zu setzen. Die Messungenauigkeiten der nicht orthogonalen Sonic

Anemometer sind heute noch nicht genau erforscht. Korrekturen des CSAT3 Anemometers von Frank et al. (2013) lassen einen Anstieg des sensiblen Wärmefluss von ungefähr 8 % zu erwarten. Die Vermutung ist, dass das hochfrequente Spektrum der Turbulenz herausgefiltert wird und damit Energie für die turbulenten Flüsse fehlt. In Summe ergibt sich eine Unterschätzung der Wärmeflüsse durch ein zu geringes ω . Eine *frequency response* Korrektur wurde in EdiRe implementiert, diese Methode ist von 1986.

Die These, dass räumlich integrierte Scintillometer Messungen einen höheren sensiblen Wärmefluss als den der Eddy-Covariance Methode ergeben, konnte in diesem Feldversuch nicht bestätigt werden.

Literatur

- Aubinet, M., et al., 2000: Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the euroflux methodology. *Advances in ecological research*, **30**, 113–175.
- Brogli, R., L. Zweifel, M. Bramberger, und T. Portele, 2014: Spatially integrated flux measurements and temperature variability.
- Campbell, G. S., 1985: *Soil physics with BASIC: Developments in Soil Science*, Vol. 14. Elsevier.
- ediRe, 2014: <http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/>.
- Finnigan, J. J., R. Clement, Y. Malhi, R. Leuning, und H. A. Cleugh, 2003: A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. part 1: averaging and coordinate rotation. *Boundary-Layer Meteorology*, **107**, 1–48.
- Foken, T., 2008: THE ENERGY BALANCE CLOSURE PROBLEM: AN OVERVIEW. *Ecological Applications*, **18**, 1351–1367.
- Foken, T. und S. P. Oncley, 1995: Results of the workshop “instrumental and methodical problems of land surface flux measurements“. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **76**, 1191–1193.
- Frank, J. M., W. J. Massman, und B. E. Ewers, 2013: Underestimates of sensible heat flux due to vertical velocity measurement errors in non-orthogonal sonic anemometers. *Agricultural and Forest Meteorology*, **171–172 (0)**, 72 – 81, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.005>.
- Klaassen, W., P. Van Breugel, E. Moors, und J. Nieveen, 2002: Increased heat fluxes near a forest edge. *Theoretical and Applied Climatology*, **72 (3-4)**, 231–243.
- Moore, C., 1986: Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorology*, **37 (1-2)**, 17–35.
- Nakai, T. und K. Shimoyama, 2012: Ultrasonic anemometer angle of attack errors under turbulent conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, **162-163**, 14–26.
- Panin, G. N., G. Tetzlaff, und A. Raabe, 1998: Inhomogeneity of the land surface and problems in the parameterization of surface fluxes in natural conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, **60**, 163–178.
- Schotanus, P., F. Nieuwstadt, und H. De Bruin, 1983: Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, **26 (1)**, 81–93.
- van Dijk, A., W. Kohsiek, und H. A. R. DeBruin, 2003: Oxygen sensitivity of krypton and lyman-alpha hygrometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **20**, 143–151.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, und R. Leuning, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **106 (447)**, 85–100.
- Wohlfahrt, G., 2014: Footprint model after Hsieh et al. (2000): Adv. water res. 23, 765-772. *Universität Innsbruck*.
- Wohlfahrt, G. und E. Tasser, 2014: A mobile system for quantifying the spatial variability of the surface energy balance: design and application. *International Journal of Biometeorology*, 1–11.

APPENDIX

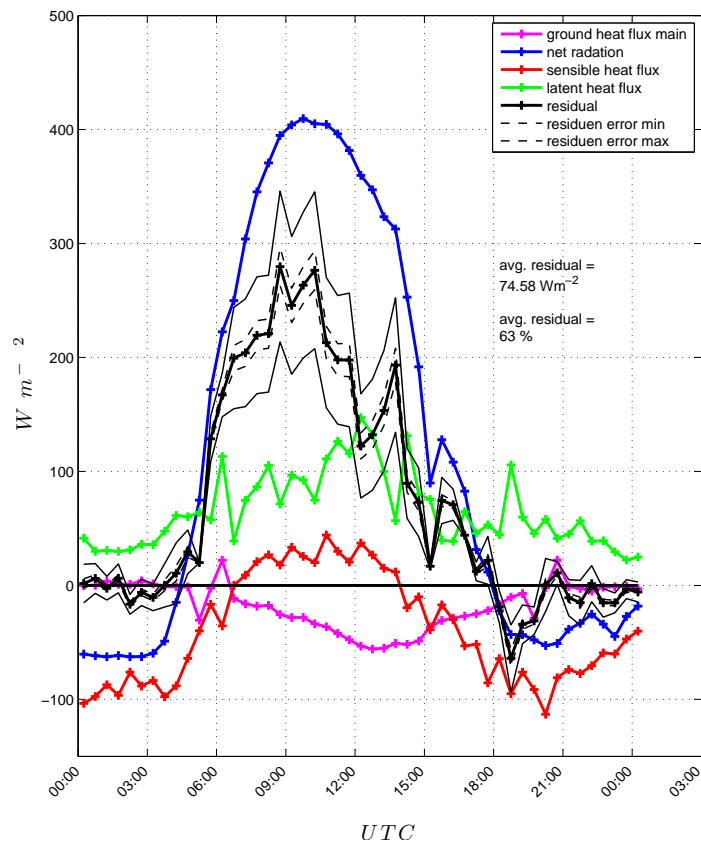


ABB. 10. 30 minütig gemittelte Energiebilanz der Hauptstation (MOMMA3) am 22.05, Datenqualität ≥ 0.5

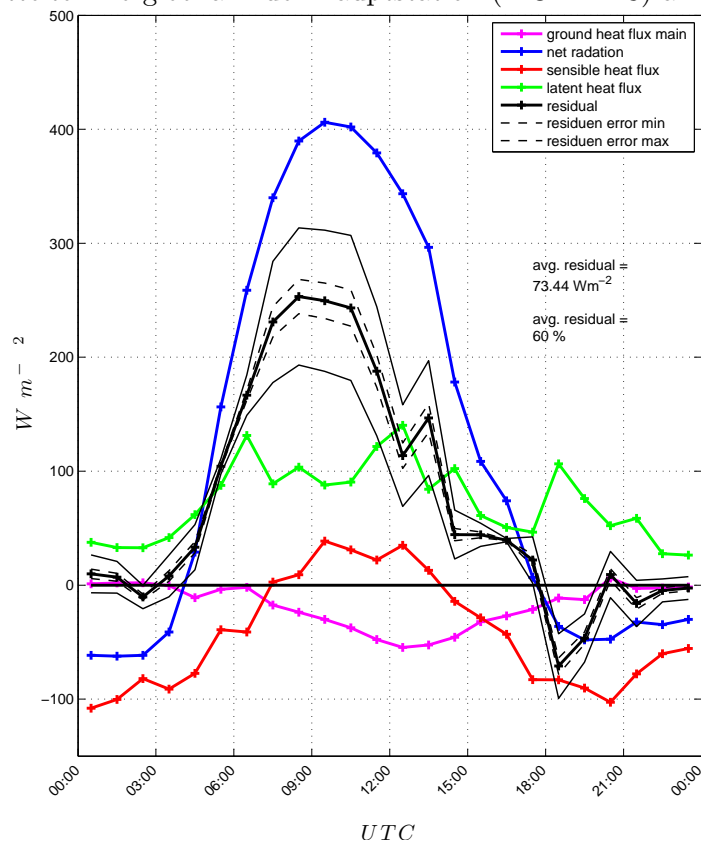


ABB. 11. 60 minütig gemittelte Energiebilanz der Hauptstation (MOMMA3) am 22.05, Datenqualität ≥ 0.5

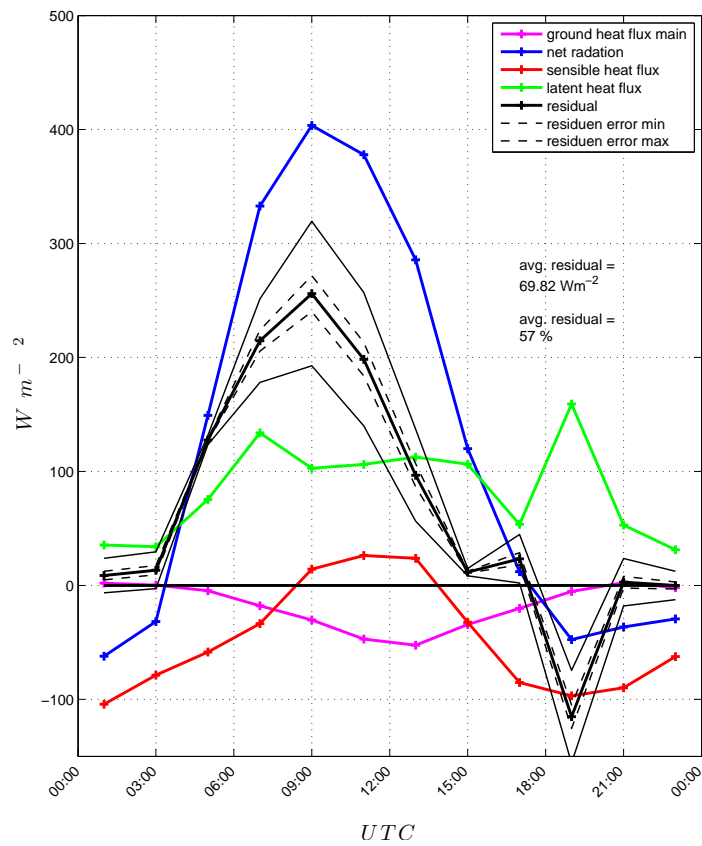


ABB. 12. 120 minütig gemittelte Energiebilanz der Hauptstation (MOMMA3) am 22.05, Datenqualität ≥ 0.5

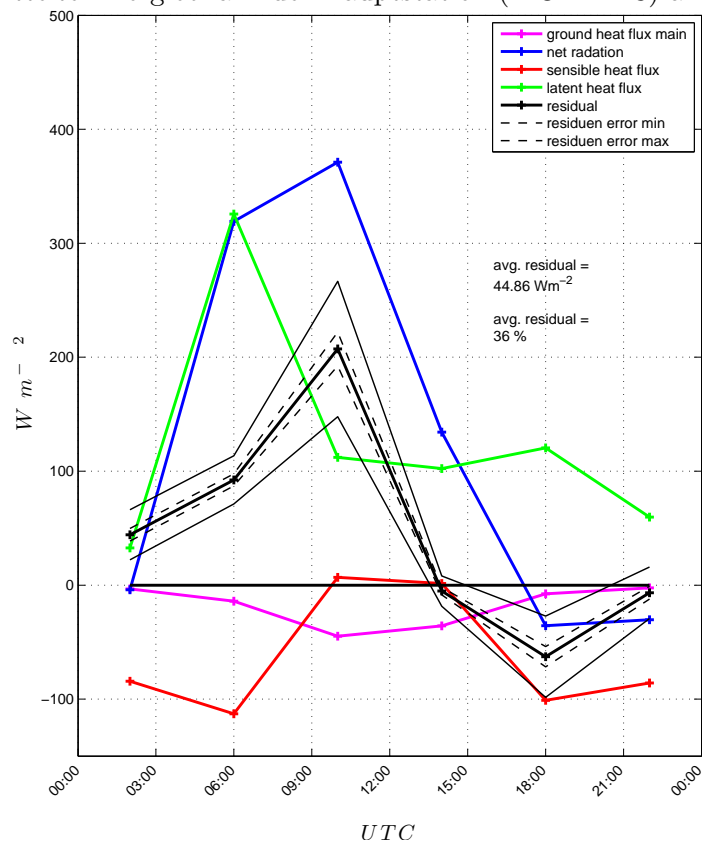


ABB. 13. 240 minütig gemittelte Energiebilanz der Hauptstation (MOMMA3) am 22.05, Datenqualität ≥ 0.5

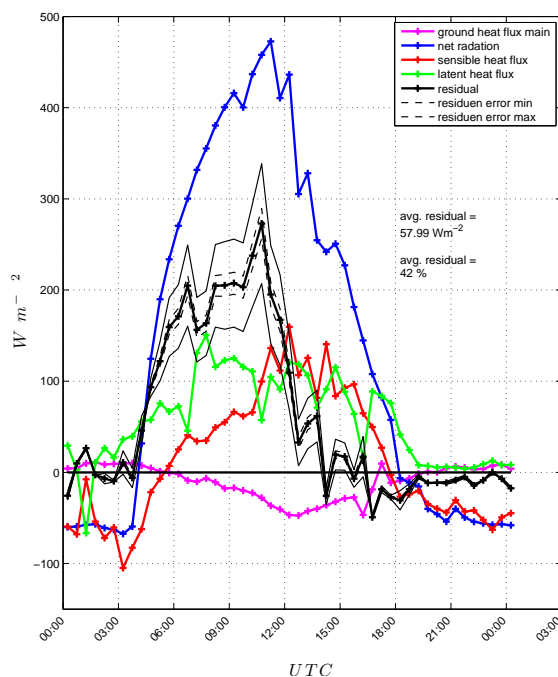


ABB. 14. Hauptstation: 30 minütig gemittelte Energiebilanz (MOMMA3) am 24.05, Datenqualität ≥ 0.25

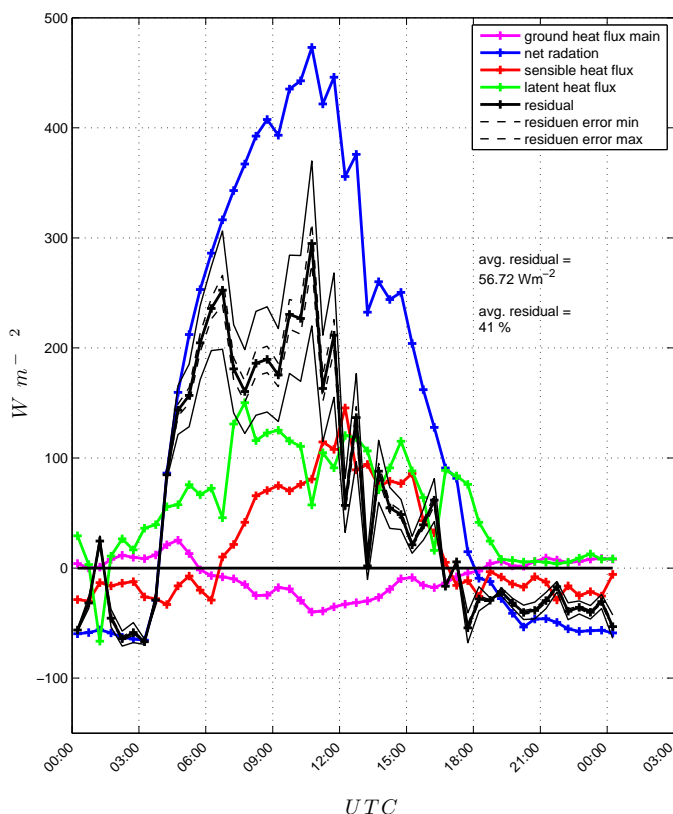


ABB. 16. obere Station: 30 minütig gemittelte Energiebilanz (MOMMA9) am 24.05, Datenqualität ≥ 0.25

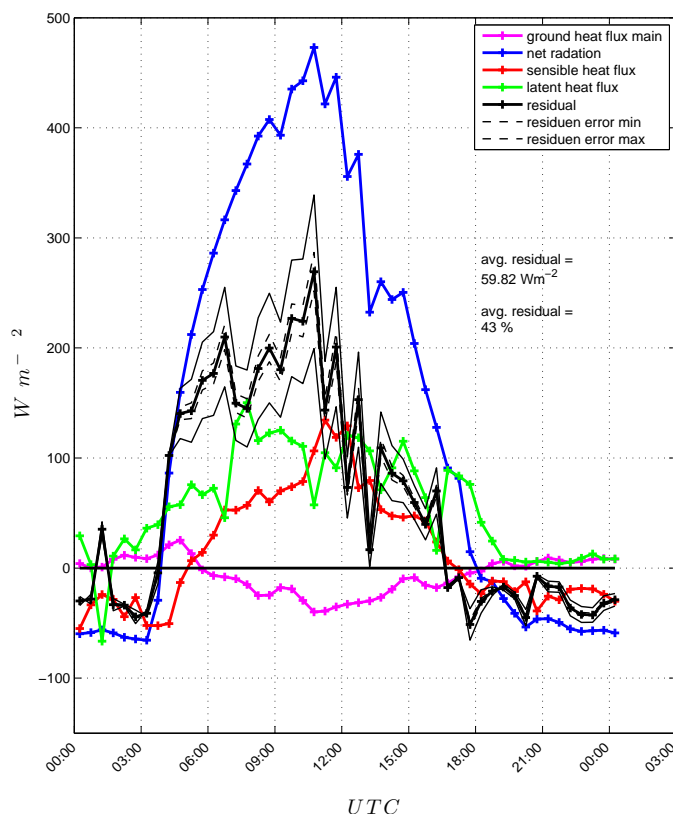


ABB. 15. mittlere Station: 30 minütig gemittelte Energiebilanz (MOMMA5) am 24.05, Datenqualität ≥ 0.25

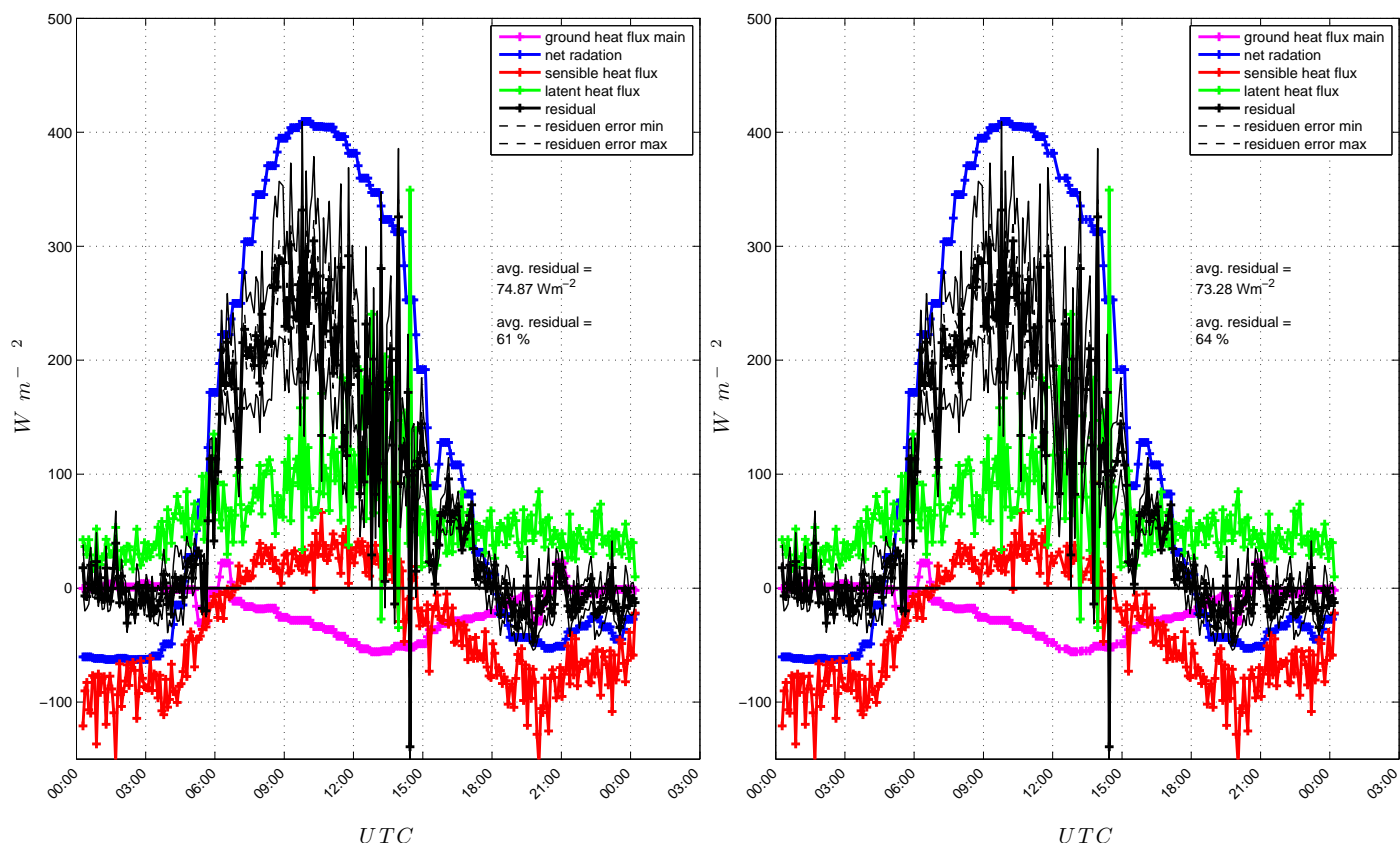


ABB. 17. Einfluss des Qualitätskriteriums: Hauptstation am 22.5 links mit einer Datenqualität von ≥ 0.25 ; rechts mit ≥ 0.5

21 – May – 2014

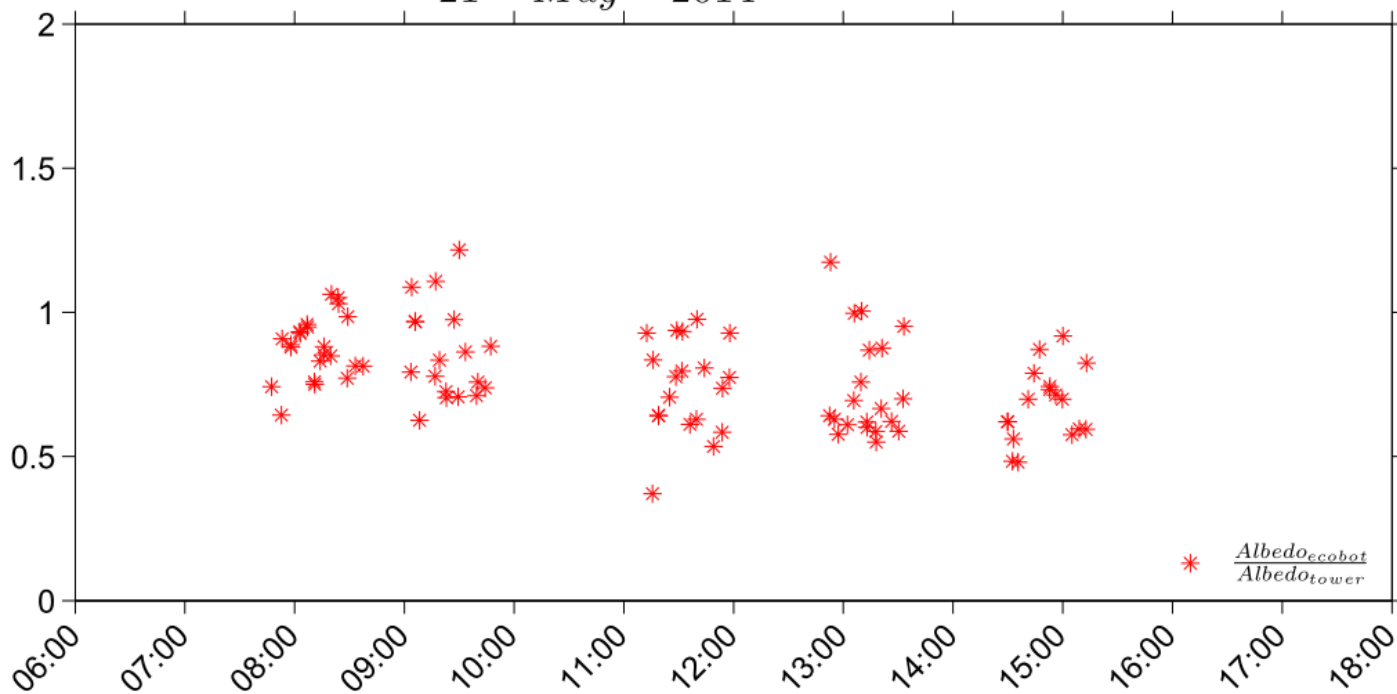


ABB. 18. Vergleich der gemessenen Albedo des Ecobots zur Hauptstation am 21.5

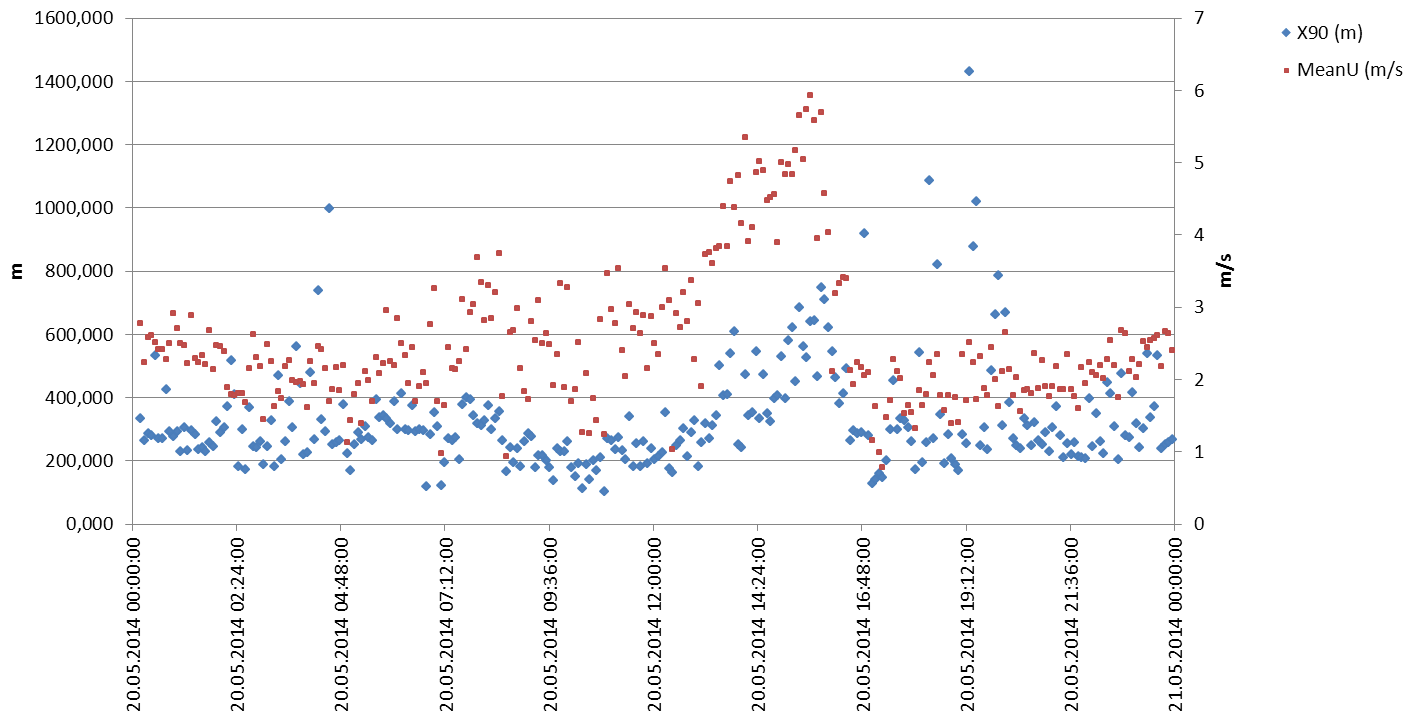


ABB. 19. Entfernung von der 90% des Footprints kommen in Abhängigkeit der Zeit (linke Ordinate, blau) und mittlerer Wind am 20.05 (rechte Ordinate, rot)nach Wohlfahrt (2014)