



Universität für Bodenkultur Wien

KINETISCHE ENERGIE UND EROSIVITÄT VON NIEDERSCHLÄGEN

Masterarbeit

eingereicht von

MARKUS WINKELHOFER

0940564

Universität für Bodenkultur Wien

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)

Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft (IHLW)

Betreuer: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. ANDREAS KLIK

Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. PETER STRAUSS

Wien, November 2016

Für meine Eltern

Herta

(1952 – 2016)

und

Alois

(*1950)

Anschrift des Verfassers:

Markus Winkelhofer

Poigen 13

3580 Horn

markus.winkelhofer@gmx.at

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Rahmen meines Studiums „Kulturtechnik und Wasserwirtschaft“ an der Universität für Bodenkultur in Wien.

Da ich im landwirtschaftlichen Betrieb meiner Eltern aufgewachsen und mittlerweile selbst Betriebsführer bin, liegt mir das Thema Bodenschutz sehr am Herzen. Im internationalen Jahr des Bodens 2015 (UN, 2013) bekam ich am Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft die Möglichkeit, mich im Zuge meiner Masterarbeit mit dem Thema Bodenerosion auseinanderzusetzen.

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei meinem Betreuer Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Andreas Klik für die richtungsweisenden Anregungen und fachliche Unterstützung bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinem Mitbetreuer Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Peter Strauß, der unter anderem das Datenmaterial für diese Arbeit zur Verfügung stellte und bei allen anderen, die bewusst oder auch unbewusst zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt allen, die mir während meiner Studienzeit immer wieder mit aufmunternden Worten zur Seite gestanden sind.

Poigen, 8. November 2016

Markus Winkelhofer

Kurzfassung

Die Erosivität, also die Erosionskraft eines Niederschlagsereignisses hängt grundsätzlich von zwei Faktoren ab, von der Regenenergie und der Niederschlagsmenge (Wischmeier & Smith, 1978).

In den Jahren 2010 und 2011 wurden am Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen Niederschlagsereignisse mittels Distrometer aufgezeichnet. Dieses auf Lasertechnik basierende Messgerät ermittelt unter anderem die Anzahl der gefallenen Niederschlagspartikel, sowie deren Größe und Fallgeschwindigkeit. In dieser Arbeit wurden ausschließlich flüssige Niederschlagspartikel in die Auswertung miteinbezogen, da feste Partikel wie zum Beispiel Schnee oder Hagel anderen physikalischen Gesetzmäßigkeiten folgen und außerdem nur eine untergeordnete Rolle hinsichtlich Erosivität spielen.

Ein Teil meiner Arbeit bestand darin, die Aufzeichnungen mit Hilfe der Statistik- und Programmiersoftware R (R Development Core Team, 2008) auszuwerten. Da es für diesen speziellen Fall keinen fertigen R-Programmiercode gab, war es notwendig, einen zu schreiben. Damit konnte aus den einzelnen detektierten Regentropfen die Niederschlagsmenge, Niederschlagsintensität und über die ebenfalls gemessene Fallgeschwindigkeit die kinetische Energie berechnet werden.

Der Zusammenhang zwischen kinetischer Energie und Niederschlagsintensität wurde durch eine nichtlineare Regressionsgleichung ausgedrückt. Somit ist es für zukünftige Regenereignisse in diesem Gebiet möglich, die kinetische Energie aus der Niederschlagsintensität – die ja leicht messbar ist – abzuleiten und so die Erosivität mit nur einer Messgröße zu berechnen.

Die Erosivität der aufgezeichneten Niederschlagsereignisse wurde anhand der kinetischen Energie und der maximalen 30-Minuten-Intensität berechnet und grafisch dargestellt.

Um das Distrometer hinsichtlich des gefallenen Niederschlages zu kontrollieren, wurde als Vergleichsmessung ein wägbares Niederschlagsmessgerät in unmittelbarer Nähe installiert und die aufgezeichneten Daten miteinander verglichen.

Des Weiteren wurde der Einfluss des Windes auf die Niederschlagsaufzeichnungen untersucht.

Abstract

The erosivity of a precipitation event depends basically on two factors, the precipitation energy and the amount of rainfall (Wischmeier & Smith, 1978).

In the years 2010 and 2011 precipitation events were recorded by distrometer measurements at the Institute for Land and Water Management Research in Petzenkirchen. This measuring instrument – based on laser technology – determined amongst others the number of fallen precipitation particles as well as the particle size and velocity. In this thesis only liquid precipitation particles were considered because solid precipitation like snow or hail follows other physical principles and plays only a minor role concerning erosivity.

A part of my work consisted in evaluating these recordings with the software R. R is a language and an environment for statistical computing and graphics (R Development Core Team, 2008). It was necessary to program a code in R, because there was no such special code for this project available. Thus it was possible to compute the amount of rainfall and the intensity, and with the recorded velocity of each drop the kinetic energy could be calculated.

The connection between kinetic energy and precipitation intensity was expressed by a non-linear regression equation. With this equation it is feasible to derive the kinetic energy from the rainfall intensity. Therefore the erosivity of future precipitation events in this region can be calculated with only one easy to measure variable.

The erosivity of the recorded precipitation events was calculated by means of kinetic energy and the maximum rainfall intensity during a period of thirty minutes. The results are shown graphically.

In the immediate vicinity of the distrometer a ponderable precipitation gauge was installed for event rainfall depth control measured by the distrometer. The logged data were compared with each other.

Furthermore the influence of the wind on the recordings of the distrometer was analysed.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Kurzfassung	II
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
1. Einleitung.....	7
2. Grundlagen und Begriffsbestimmungen.....	8
2.1. Niederschlag, Regen	8
2.2. Intensität des Niederschlages	8
2.3. Tropfenwachstum und Niederschlag	8
2.4. Endfallgeschwindigkeit und Form eines Regentropfens	10
2.5. Volumen eines Regentropfens.....	13
2.6. Masse eines Regentropfens	14
2.7. Kinetische Energie.....	14
2.8. Definition Bodenerosion.....	15
2.9. Bodenerosion durch Wasser.....	15
2.9.1. Die Erosionsmechanik der Wassererosion	16
2.10. Universal Soil Loss Equation (USLE) und Erosivität.....	18
2.11. R-Faktor bzw. Regen-Erosions-Index.....	19
2.11.1. Definition des R-Faktors.....	19
2.11.2. Erosiver Niederschlag (N_e).....	19
2.11.3. Kinetische Energiedichte eines Teilabschnittes (E_i).....	20
2.11.4. Kinetische Energiedichte eines Einzelregens (E_e).....	20
2.11.5. Maximale 30-Minuten-Intensität (I_{30}).....	20
2.11.6. R-Faktor eines Einzelregens (R_e).....	21
2.11.7. R-Faktor pro Jahr (R_j).....	21
2.11.8. R-Faktor für die ABAG	21
2.12. Toleranzgrenze des Bodenabtrags.....	22
3. Messgeräte, Standort und Datenmaterial.....	23
3.1. Distrometer – Parsivel	23

3.2.	Niederschlagsmesser nach dem Wageprinzip – Pluvio.....	28
3.3.	Standort der Messungen	29
3.4.	Datenmaterial	31
3.4.1.	Datenprotokolle des Parsivel-Distrometers	31
3.4.2.	Datenprotokoll des wägbaren Niederschlagsmessers – Pluvio	33
3.4.3.	Datenmaterial des Anemometers (Windmessers).....	33
3.5.	Datenauswahl.....	34
4.	Methodik der Datenauswertung	35
4.1.	Auswertung der Einzeldateien des Parsivel und Erstellung einer Regressionsgleichung	35
4.1.1.	Bereinigung der Rohdatenmatrix	35
4.1.2.	Berechnung des mittleren Tropfendurchmessers aus den Rohdaten..	36
4.1.3.	Berechnung der kinetischen Energie aus den Rohdaten	37
4.1.4.	Berechnung der Niederschlagshöhe aus den Rohdaten	38
4.1.5.	Berechnung der Niederschlagsintensität aus den Rohdaten.....	38
4.1.6.	Zusammenhang kinetische Energie – Niederschlagsintensität	38
4.1.7.	Messfehler des Parsivel.....	41
4.1.8.	Auswahl der Messdaten und Berechnung der Regressionsgleichung.	42
4.2.	Ermittlung der zeitbezogenen kinetischen Energie anhand der Intensität über die Regressionsgleichung.....	46
4.3.	Ermittlung der maximalen 30-Minuten-Intensität	47
4.4.	Mittlere Fallgeschwindigkeit der Regentropfen.....	48
4.5.	Vergleich der Niederschlagsmessungen Parsivel – Pluvio	49
4.6.	Einfluss des Windes auf die Messungen des Parsivel	50
4.6.1.	Allgemeines zur Windmessung.....	50
4.6.2.	Windeinfluss auf die Distrometeraufzeichnungen	50
4.6.3.	Windeinfluss auf die Niederschlagsabweichung des Parsivel	50
5.	Ergebnisse	51
5.1.	Ergebnisse der Auswertung der Distrometerdaten.....	51
5.1.1.	Tropfenanzahl und Niederschlagshöhe des Parsivel-Distrometers	51

5.1.2.	Einfluss des Windes auf die Tropfenanzahl des Distrometers.....	54
5.1.3.	Zusammenhang Endfallgeschwindigkeit und Tropfendurchmesser....	56
5.1.4.	Windeinfluss auf die Endfallgeschwindigkeit der Tropfen.....	59
5.2.	Regressionsmodell zu volumenbezogener kinetischer Energie und Niederschlagsintensität.....	64
5.3.	Niederschlagsintensität, Tropfendurchmesser und Tropfenanzahl.....	65
5.4.	Zusammenhang zeitbezogene kinetische Energie und Niederschlagsintensität.....	67
5.5.	Kinetische Energie der Einzelregen	69
5.6.	Regen-Erosions-Index bzw. R-Faktor	72
5.7.	Vergleich der Niederschlagsmessungen Parsivel – Pluvio.....	75
5.7.1.	Ereignisbezogene Niederschlagshöhe und Abweichung.....	75
5.7.2.	Stündliche Niederschlagshöhe und Abweichung	77
5.7.3.	Fünfminütige Niederschlagshöhe und Abweichung.....	79
5.7.4.	Einfluss des Windes auf die Abweichung der stündlichen Niederschlagshöhe	80
6.	Schlussfolgerung	82
7.	Literaturverzeichnis.....	84
8.	Abbildungsverzeichnis	86
9.	Tabellenverzeichnis	88
10.	Anhang.....	89
10.1.	Grafische Darstellung der kinetischen Energie und Intensität.....	89
10.2.	Grafische Darstellung der Tropfenanzahl	101
10.3.	Übersichtstabelle der ausgewerteten Niederschlagsereignisse	113

1. Einleitung

Böden bilden die dünne und verletzbare Haut unserer Erde, die besonderer Aufmerksamkeit bedarf. Boden ist Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen, ist Produktionsgrundlage für Nahrungs- und Futtermittel sowie für nachwachsende Rohstoffe, ist Bestandteil des Naturhaushalts mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen, ist Archiv für Natur- und Kulturgeschichte einer Landschaft, ist Rohstofflagerstätte und Infrastrukturträger. Boden ist ein nicht vermehrbares Gut und gehört – neben Wasser und Luft – aufgrund der genannten Lebensraum-, Regelungs- und Nutzungsfunktionen zu den kostbarsten und damit schützenswürdigsten Gütern der Menschheit (Blume et al., 2010).

Grundsätzlich stehen Boden-Neubildung infolge Verwitterung und Bodenabtrag in einem natürlichen und dynamischen Gleichgewicht. Die schützende Vegetationsdecke wirkt der Erosion des Bodens durch Wasser oder Wind entgegen. Jeder Eingriff in dieses natürliche System bewirkt eine Verschiebung des Gleichgewichts. So brachte die Zunahme der intensiven und einseitigen Landnutzung bereits Anfang des 20. Jahrhunderts in den USA enorme Schäden durch Bodenerosion mit sich. Dies führte schließlich im Jahre 1935 zur Gründung des Soil Conservation Service (SCS) im US-Department of Agriculture (USDA) und war Grundlage für die systematische Erforschung der Bodenerosion und entsprechenden Gegenmaßnahmen (Brebuda & Richter, 1998).

Standen zu Beginn der Erosionsforschung die Erscheinungsformen und das Ausmaß der Schäden im Vordergrund, so entwickelte sich die Forschung im Laufe der Jahrzehnte in Richtung der ablaufenden Prozesse, der Quantifizierung und der Modellbildung (Richter, 1998).

Auch in Österreich geht wertvoller Boden durch Erosion verloren. So sind 13% der landwirtschaftlichen Böden durch Wassererosion gefährdet (Umweltbundesamt, 2007).

Die Quantifizierung des Bodenabtrags lässt sich entweder direkt messen, oder über Erosionsmodelle abschätzen. Direkte Messungen des Abtrags sind sehr aufwendig und dienen daher grundsätzlich der Modellbildung. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem Teilbereich solcher Modelle – als direkte Voraussetzung für Erosion soll die Erosivität von Niederschlägen analysiert werden.

2. Grundlagen und Begriffsbestimmungen

2.1. Niederschlag, Regen

Laut ÖN B2400 ist Niederschlag die Sammelbezeichnung für flüssige oder feste Kondensationsprodukte aus der Atmosphäre, welche auf die Erdoberfläche gelangen. Dazu zählen: Regen, Schnee, Hagel, Graupel, Tau, Reif, Raureif, nässender Nebel.

Produkte aus Wasserdampf in flüssiger oder fester Form, die sich in der Atmosphäre befinden, werden in der Meteorologie auch als Hydrometeore bezeichnet (Spektrum Akademischer Verlag, 2000).

Diese Arbeit beschäftigt sich nur mit dem Niederschlag in Form von Regen. Daher wird im Weiteren der Begriff Niederschlag als Synonym für Regen verwendet.

2.2. Intensität des Niederschlages

Unter Niederschlagsintensität versteht man die gefallene Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit, angegeben in mm pro Minute oder mm pro Stunde.

Die Niederschlagsintensität kann mit Niederschlagsmessgeräten durch entsprechende zeitliche Auflösung ermittelt werden.

2.3. Tropfenwachstum und Niederschlag

Die Voraussetzungen damit Wolken entstehen können sind das Vorhandensein von Wasserdampf und Kondensationskernen, wie z.B. Staubpartikel oder Salzteilchen aus dem Meer, sowie eine Abkühlung der Luft. Durch Kondensation des Wasserdampfs infolge Temperaturverminderung entstehen Wolkentropfen bis ca. 0,2 mm Durchmesser an diesen Kernen, die durch Aufwind in der Schwebelage gehalten werden. Erst wenn der Tropfendurchmesser größer ist, fallen sie. Man spricht dann von Niederschlagstropfen (Malberg, 2007); (Warnecke, 1997). Die Entstehung solcher Niederschlagstropfen lässt sich durch zwei Prozesse erklären, die **Langmuir-Theorie** und den **Bergeron-Findeisen-Prozess** (Warnecke, 1997).

In der Langmuir-Theorie wird das Tropfenwachstum durch Kollisionen unterschiedlich schnell fallender Tropfen sowie auch durch elektrische Anziehung der geladenen

Tropfen hervorgerufen. Diese Prozesse kommen vor allem bei konvektiven, d.h. mit starken Vertikalbewegungen verbundenen Niederschlägen vor, wie es bei Starkregenereignissen der Fall ist (Warnecke, 1997).

Befinden sich in einer Wolke sowohl Wassertropfen als auch Eiskristalle, spricht man von einer Mischwolke. Wassertropfen gefrieren aber nicht schlagartig bei Temperaturen unter 0 °C. Im Temperaturbereich zwischen 0 °C und -12 °C überwiegen unterkühlte Wassertropfen, von -13 °C bis -20 °C kommen Wassertropfen und Eiskristalle gleich häufig vor, ab -20 °C überwiegen Eiskristalle und ab -40 °C treten nur mehr Eiskristalle auf. Der Prozess nach Bergeron und Findeisen basiert auf der Tatsache, dass bei gleicher Temperatur der Sättigungsdampfdruck über Eis niedriger ist als über unterkühltem Wasser. Anders ausgedrückt können bei einer bestimmten Temperatur aus dem Wasser mehr Moleküle verdunsten als aus dem Eis, was sich durch die zwischenmolekularen Anziehungskräfte begründen lässt. Die Wassertropfen verdunsten also bei Eissättigung, da die Luft über Wasser ja noch ungesättigt ist. Die durch die Verdunstung entstandenen Wasserdampfmoleküle lagern sich dann durch Resublimation an den Eiskristallen an. Die Kristalle wachsen somit auf Kosten der Tropfen und fallen aus der Wolke aus (Malberg, 2007); (Warnecke, 1997).

Eine weitere Möglichkeit der Vergrößerung der Eiskristalle besteht, wenn unterkühlte Wassertropfen auf diesen anfrieren. Ab einer bestimmten Größe beginnen die Eiskristalle zu fallen, weil sie vom Aufwind nicht mehr in der Schwebelage gehalten werden können. In Temperaturbereichen über 0 °C schmelzen die Eiskristalle – es entsteht der großtropfige Regen (Malberg, 2007). Der Bergeron-Findeisen-Prozess ist in den mittleren und hohen Breiten der bedeutsamere – also auch bei uns in Österreich (Warnecke, 1997).

Die unterschiedlichen Formen des flüssigen Niederschlages und deren Fallgeschwindigkeit sind in Tabelle 1 aufgelistet. Kleine Regentropfen mit einem Durchmesser von 1 mm haben demnach eine Fallgeschwindigkeit von $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 5 mm große Tropfen fallen mit $8,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tabelle 1: Fallgeschwindigkeit von Tropfen in ruhender Luft (nach Pettersen 1969) (Warnecke, 1997)

Tropfendurchmesser [μm]	Fallgeschwindigkeit [m/s]	Übliche Bezeichnung
5 000	8,9	gr. Regentropfen (Durchm. 5 mm)
1 000	4,0	kleine Regentropfen
500	2,8	feiner Regen, gr. Nieseltröpfchen
200	1,5	Nieseln
100	0,3	große Wolkentropfen
50	0,076	gewöhnliche Wolkentropfen
10	0,003	kleine Wolkentropfen
2	0,00012	entstehende Tropfen und gr. Kerne
1	0,00004	entstehende Tropfen und gr. Kerne

2.4. Endfallgeschwindigkeit und Form eines Regentropfens

Beim Erreichen der Endfallgeschwindigkeit eines Regentropfens steht die Gewichtskraft mit der Reibungskraft im Gleichgewicht.

Die theoretische Fallgeschwindigkeit v_t eines Regentropfens mit dem Durchmesser D_0 lässt sich nach Atlas et al. (1973) als analytische Anpassung an die Daten von Gunn und Kinzer (1949) für ruhende Umgebungsluft wie folgt berechnen:

$$v_t(D_0) = 9,65 - 10,3 \cdot \exp(-0,6 \cdot D_0) \quad (1)$$

in der Einheit $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ und D_0 in mm mit dem Gültigkeitsbereich $0,6 \text{ mm} \leq D_0 \leq 5,8 \text{ mm}$ (Chowdhury et al., 2015).

Größere Tropfen werden durch aerodynamische Kräfte deformiert und sind deshalb nicht mehr kugelförmig, somit ist D_0 der volumenäquivalente Kugeldurchmesser. Dieser entspricht dem Durchmesser einer volumengleichen Kugel (Abbildung 2, rechts).

Gunn und Kinzer (1949) ermittelten die Daten unter standardisierten Bedingungen, mit destilliertem Wasser, einem Luftdruck von 1013 hPa, einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50%. Der volumenäquivalente Durchmesser wurde aus der Masse und der Anzahl der Tropfen berechnet. Der maximale äquivalente Tropfendurchmesser betrug 5,76 mm bei einer Endfallgeschwindigkeit von 9,17 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Abbildung 1) (Gunn & Kinzer, 1949).

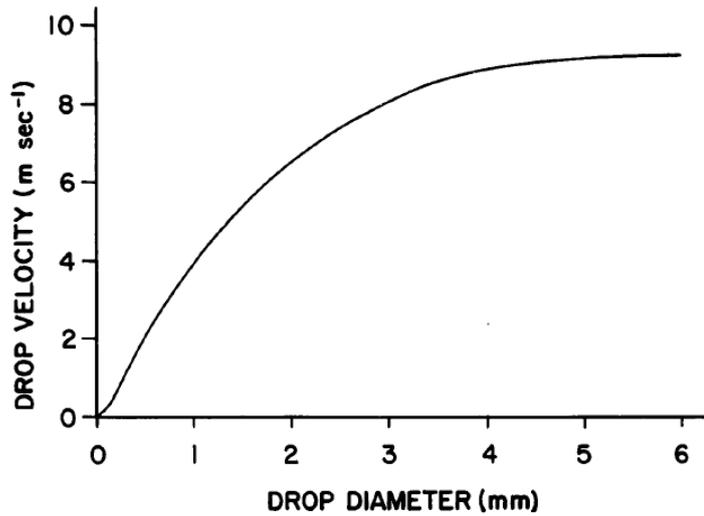


Abbildung 1: Endfallgeschwindigkeit von Regentropfen mit Daten von Gunn und Kinzer (1949) (Hardy, 1962)

Die Abbildung 2 zeigt auf der linken Seite typische Formen von Regentropfen mit unterschiedlichen Durchmessern bei Endfallgeschwindigkeit: oben links: $d=6.5$ mm, $v=8.9$ m·s⁻¹; oben rechts: $d=6.0$ mm, $v=8.8$ m·s⁻¹; unten links: $d=4.8$ mm, $v=8.3$ m·s⁻¹; unten rechts: $d=2.8$ mm, $v=6.8$ m·s⁻¹; (Magono, 1954)

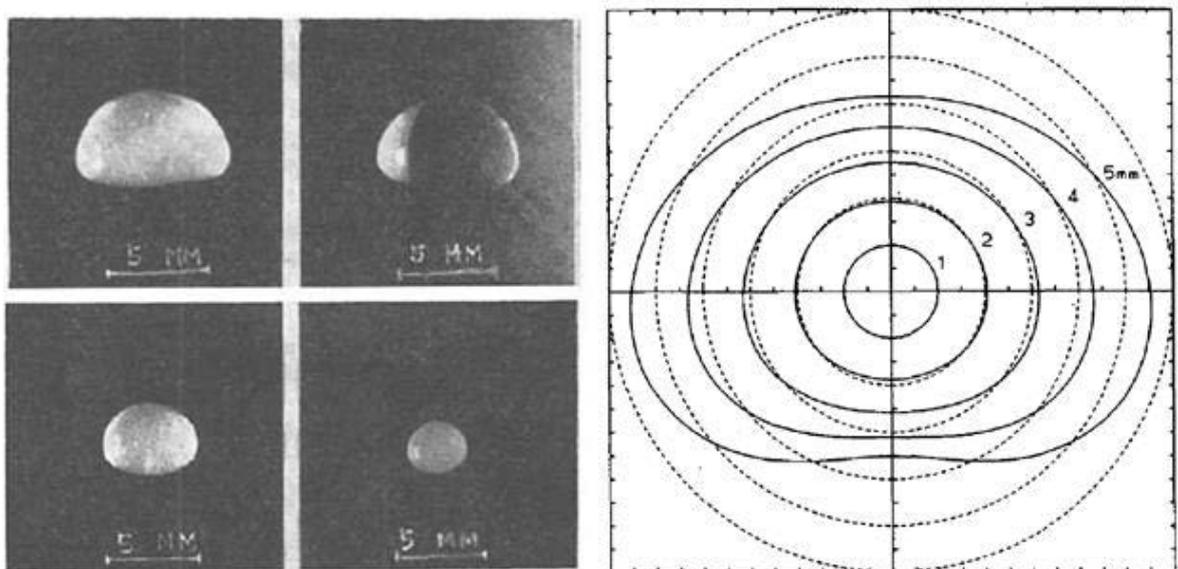


Abbildung 2: Typische Formen von Regentropfen, links (Magono, 1954), rechts (Beard et al., 1989)

Die Abbildung 2 rechts zeigt modellierte Formen von Regentropfen für äquivalente Tropfendurchmesser von 1 bis 5 mm bei 1013 hPa und 20 °C (Beard et al., 1989).

In Abbildung 2 rechts ist zu erkennen, dass die Annahme der Kugelform für Regentropfen bis ca. 1 mm Durchmesser gut erfüllt ist, was auf die Oberflächenspannung des Tropfens zurückzuführen ist. Wird der Durchmesser größer, so tritt der Luftwiderstand immer mehr in den Vordergrund, bis dieser schlussendlich zum Zerplatzen des Tropfens führt (Abbildung 3).

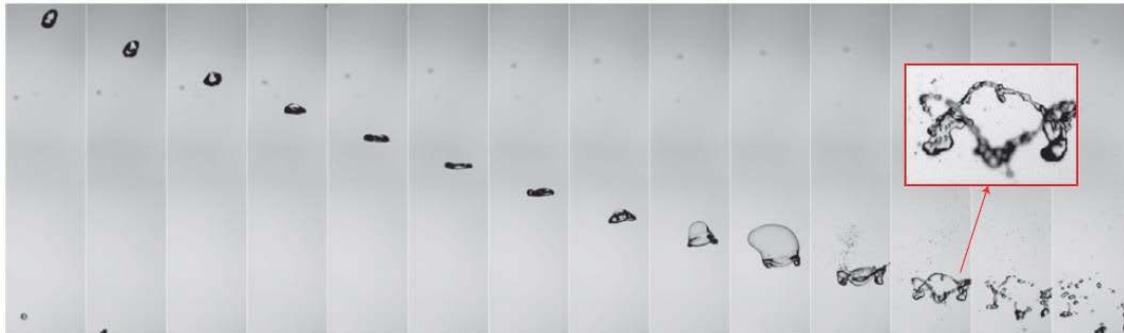


Abbildung 3: Fallender Regentropfen mit $D_0 = 6$ mm, Zeitintervall $\Delta t = 4,7$ ms (Villermaux & Bossa, 2009)

Die Abbildung 3 veranschaulicht die Deformation und das Zerplatzen eines 6 mm großen Regentropfens im Laborversuch (Villermaux & Bossa, 2009).

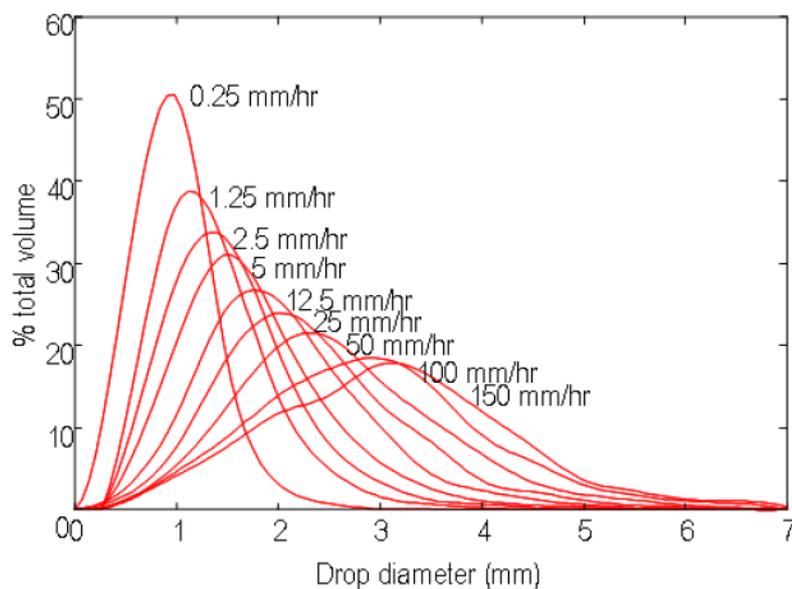


Abbildung 4: Tropfengrößenverteilung bei Niederschlägen unterschiedlicher Regenintensität (Laws & Parsons, 1943)

Die Tropfengrößenverteilung von Niederschlägen anhand der Daten von Laws und Parsons (1943) wird in Abbildung 4 gezeigt. Es ist sehr gut zu erkennen, dass die

mittleren Tropfendurchmesser mit zunehmender Niederschlagsintensität größer werden.

Die maximale Größe eines Regentropfens hängt von den Einflüssen der Atmosphäre ab. So sind Tropfendurchmesser über 6 mm schon ziemlich selten (Hardy, 1962).

Tropfengrößenverteilungen können mit verschiedenen Messtechniken aufgezeichnet werden. Laws and Parsons (1943) verwendeten die „Flour Pellet Method“ („Mehlkügelchen-Methode“), bei der Regentropfen in einem mit Mehl gefüllten Behälter aufgefangen werden. Die Mehlkügelchen werden anschließend im Ofen getrocknet, danach gesiebt und gewogen. Eine der ersten Methoden war die „Stain Method“, die erstmals im Jahre 1892 beschrieben wurde und bis heute in Verwendung ist. Dabei werden die Regentropfen mit speziell beschichtetem Papier aufgezeichnet. Jüngere Methoden sind Messungen mit akustischen und optischen Messgeräten, auch Distrometer genannt (Kathiravelu et al., 2016).

2.5. Volumen eines Regentropfens

Das Volumen einer Kugel V_K (m^3) wird mit dem Radius r (m) wie folgt berechnet:

$$V_K = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (2)$$

Dementsprechend wird für die Berechnung des Tropfenvolumens der halbe volumenäquivalente Tropfendurchmesser als Radius verwendet. Das berechnete Volumen entspricht somit dem Volumen des Tropfens.

In diese Berechnung geht der halbe Tropfendurchmesser, sprich Radius, mit der dritten Potenz ein. Das bedeutet eine progressive Zunahme des Volumens mit steigendem Tropfendurchmesser (Abbildung 5).

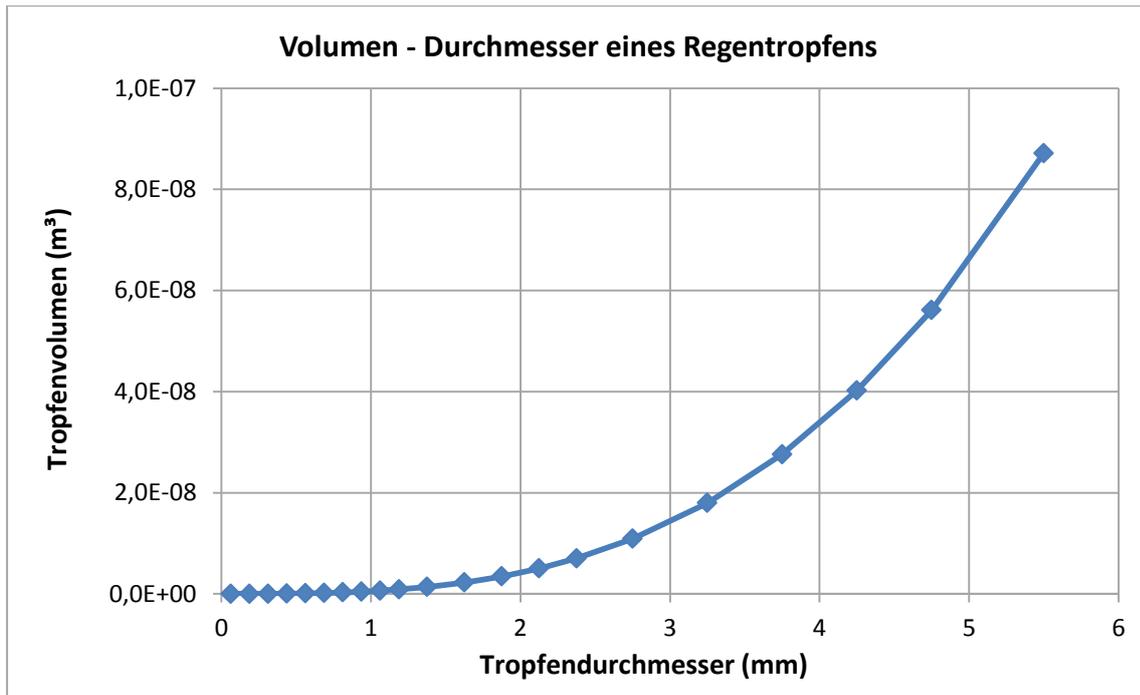


Abbildung 5: Durchmesser und Volumen eines Regentropfens

2.6. Masse eines Regentropfens

Das Tropfenvolumen V multipliziert mit der Dichte von Wasser ρ_{Wasser} ergibt die Masse eines Tropfens m .

$$m = V \cdot \rho_{Wasser} \quad (3)$$

in der Einheit kg, V in m^3 , ρ in $kg \cdot m^{-3}$.

So hat ein Tropfen mit 3,25 mm Durchmesser eine Masse von zirka 0,018 Gramm.

2.7. Kinetische Energie

Die kinetische Energie E_{kin} eines Regentropfens lässt sich aus der Masse m und der Fallgeschwindigkeit v nach folgender Gleichung berechnen:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (4)$$

in der Einheit J, m in kg und v in $m \cdot s^{-1}$.

2.8. Definition Bodenerosion

Die Ablösung und der Transport von Bodenteilchen (Primärteilchen oder Aggregate) entlang der Bodenoberfläche werden als Bodenerosion bezeichnet. Je nach Transportmedium unterscheidet man zwischen Wassererosion und Winderosion. Der Vollständigkeit halber sollen hier auch noch Sonderformen wie Schneeschurf, Massenversatz (z.B. Erdbeben) und die Umlagerung von Böden durch den Menschen infolge Bodenbearbeitung angeführt werden (Blume et al., 2010).

2.9. Bodenerosion durch Wasser

Der Bodenabtrag durch Wasser lässt sich im Wesentlichen in drei Teilprozesse untergliedern: Ablöse, Transport und Ablagerung von Bodenteilchen. Im ersten Teilprozess bewirkt der Aufprall der Regentropfen einerseits die Loslösung von Bodenteilchen und andererseits eine Zerkleinerung derselben, welche auch zusätzlich durch die Strömungskraft des Oberflächenabflusses auftritt. Im zweiten Teilprozess kommt es zum Sedimenttransport mit dem abfließenden Wasser sowie durch Spritzwasserversatz beim Aufprall der Regentropfen. Sobald nicht mehr genügend Energie für den Transport vorhanden ist, wird das Material abgelagert (Abbildung 6).

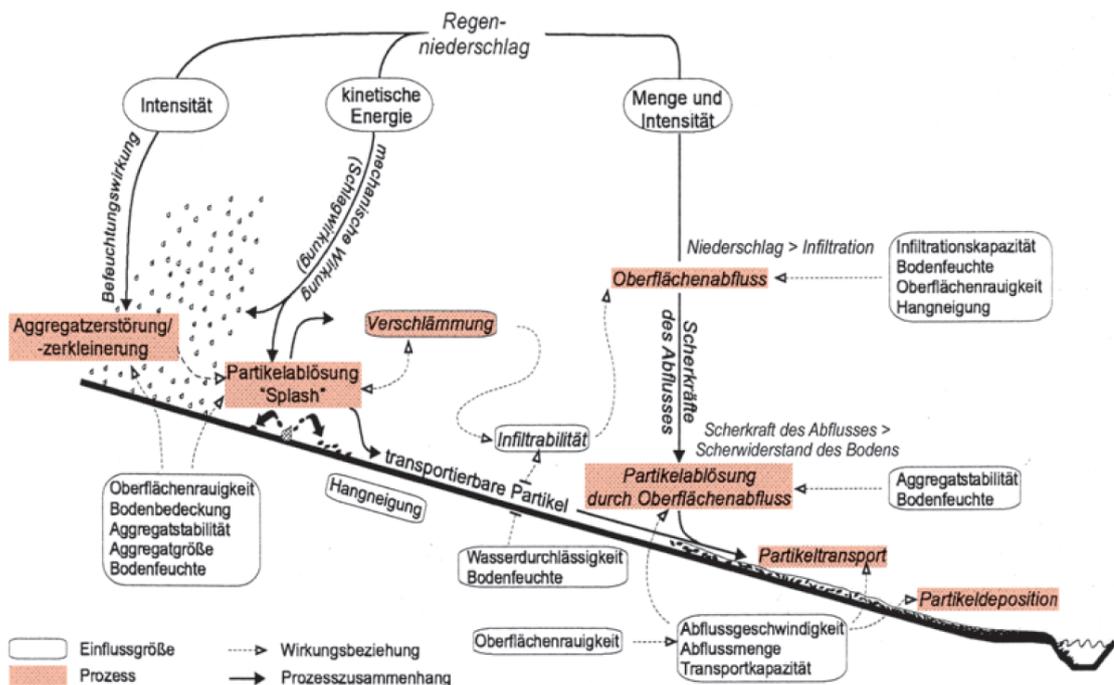


Abbildung 6: Der Bodenerosionsprozess – Einflussgrößen und Teilprozesse (Duttmann, 2001)

Wie Abbildung 6 zeigt, ist der durch Wasser bedingte Bodenerosionsprozess von einer Vielzahl an Einflussgrößen abhängig. Dazu zählen die Eigenschaften des Niederschlages, des Bodens und der Vegetation, zusätzlich einerseits geländebedingte Faktoren: u.a. Hangneigung, Hanglänge und Hangform und andererseits bewirtschaftungsbedingte Faktoren: u.a. die Art der Bodennutzung und Bodenbearbeitung (Auerswald, 1998).

2.9.1. Die Erosionsmechanik der Wassererosion

Was passiert eigentlich in den ersten Minuten eines Regenereignisses? Die Beantwortung dieser Frage trägt sehr zum grundsätzlichen Verständnis des Erosionsprozesses bei und soll daher im Folgenden detailliert beantwortet werden.

Durch die rasche Befeuchtung des Bodens wird zu Beginn eines Regenereignisses Luft in den Bodenaggregaten eingeschlossen und durch das eindringende Wasser komprimiert. So können Drücke im Aggregatinneren bis zu 10^6 Pa (= 100 m Wassersäule) entstehen und Aggregate in 0,2 – 1 mm kleine Mikroaggregate aufgesprengt werden. Dieser Vorgang wird **Luftsprengung** genannt. Je trockener die Bodenoberfläche zu Beginn ist, desto höhere Drücke sind möglich. Die so entstandenen Mikroaggregate können somit durch den Oberflächenabfluss transportiert werden. Durch die auf den Boden auftreffenden Regentropfen, die je nach Größe Fallgeschwindigkeiten bis zu $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ erreichen können, werden die Aggregate weiter zerteilt. Die kinetische Energie eines Tropfens steigt mit der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit (Auerswald, 1998). Durch den Aufprall der Tropfen können Drücke bis zu 10^6 Pa auf den Boden gebracht werden (Ghadiri & Payne, 1977). Da die Regentropfen mit dieser hohen Fallgeschwindigkeit nicht in den Boden infiltrieren können, muss das Wasser der Tropfen radial nach außen ausweichen und kann dabei das Doppelte der Fallgeschwindigkeit erreichen. Die dadurch auftretenden hohen Scherspannungen an der Bodenoberfläche überschreiten die Scherfestigkeit des Bodens und reißen Teilchen aus ihrem Aggregatverband. Der Wasserfilm an der Bodenoberfläche behindert das nach außen strebende Tropfwasser, welches auch nicht in den Boden eindringen kann. Infolgedessen spritzt es nach oben. Bei diesem Vorgang können die abgelösten Bodenteilchen gemeinsam mit den Spritztröpfchen bis zu 1,5 m hoch und ebenso weit geschleudert werden. Es findet ein Transport der gelösten Bodenteilchen über kurze Distanzen statt. Diesen in Abbildung 7 dargestellten Prozess nennt man **Plansch oder Splash** (Auerswald, 1998).

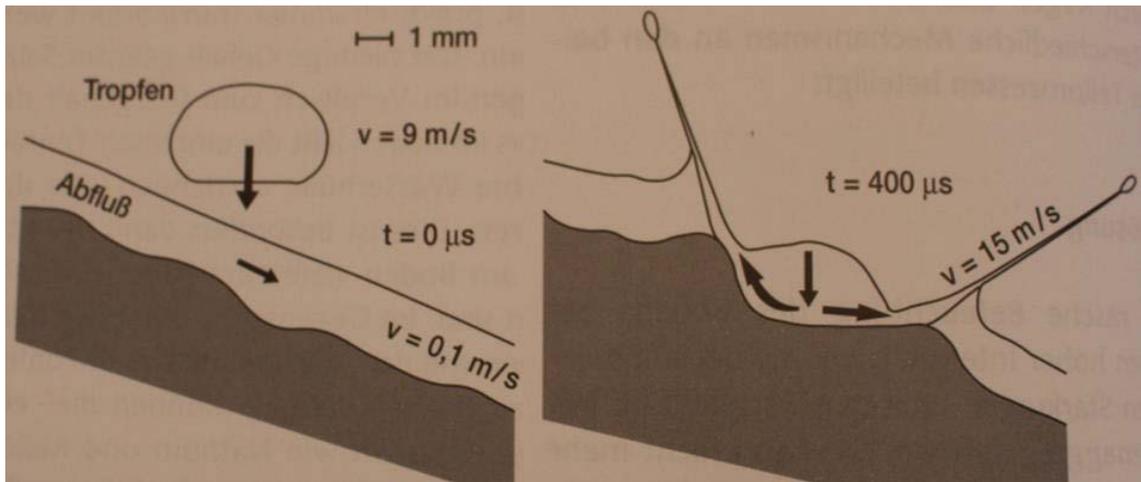


Abbildung 7: Planschwirkung von Regentropfen (Auerswald, 1998)

Die Wirkung des Splash ist am größten, wenn auf der Bodenoberfläche ein nur dünner Wasserfilm – bis ca. 1 mm steht. So können die Kräfte des Splash sehr gut übertragen werden (Auerswald, 1998).

Da zu Beginn eines Regenereignisses die Transportkapazität für den Oberflächenabfluss noch nicht ausreicht, lagert sich das durch die Planschwirkung entstandene Feinmaterial an der Bodenoberfläche ab und wird mit dem infiltrierenden Wasser in größere und auch kleinere Poren geschwemmt. Dadurch kann es zu einer Verschlammung kommen und die Infiltrationsrate wird verringert. Dies hat wiederum zur Folge, dass der Anteil des abfließenden Wassers steigt. Beträgt die Abflusshöhe mehr als drei Tropfendurchmesser, wirkt die gesamte Energie der fallenden Tropfen nur mehr auf das Wasser und es wird kaum noch Material abgelöst. Auf geneigten Flächen ist dann die Fließgeschwindigkeit bereits hoch genug, um weiter Bodenpartikel abzulösen (Auerswald, 1998).

Wird der Boden durch Luftsprennung und Splasherosion gleichmäßig abgelöst, findet der Transport zunächst flächenhaft statt. Diese Form der Erosion wird **Flächenerosion** oder auch Schichterosion genannt. Die Erosionskraft des Abflusses wirkt hingegen lokal. Somit entstehen lineare, bis ca. 10 cm tiefe Rillen in denen sich der Abfluss konzentriert – man spricht von **Rillenerosion**. Der Bodenabtrag zwischen den Rillen findet weiterhin statt und trägt dabei noch wesentlich zum gesamten Abtrag bei (Blume et al., 2010).

Mit zunehmender Konzentration des Abflusses steigen die Abflusshöhe und daher auch die Fließgeschwindigkeit in den Rillen an. Dies bewirkt eine Zunahme der Transportkräfte und eine Erhöhung der Erosion. Es kommt zur Bildung von Rinnen, die

bis zu 30 cm tief sind. Die Flächenerosion verliert dagegen an Bedeutung. Sind die Erosionsspuren tiefer als 30 cm, so können diese durch eine Bodenbearbeitung nicht mehr beseitigt werden. Die **Rinnenerosion** geht in eine **Grabenerosion**, auch Gullyerosion genannt, über (Auerswald, 1998).

2.10. Universal Soil Loss Equation (USLE) und Erosivität

Zur Abschätzung der Bodenerosion an einem bestimmten Standort entwickelten Wischmeier und Smith eine Bodenabtragungsgleichung, die in den USA **Universal Soil Loss Equation (USLE)** genannt wird (Wischmeier & Smith, 1978).

In mehr als 20 Jahren haben Wischmeier und Smith auf standardisierten Parzellen an zahlreichen Orten der USA den langjährigen Bodenabtrag gemessen. Sie fanden anhand statistischer Auswertungen heraus, dass 6 Parameter den gemessenen Bodenabtrag hinreichend genau erklären und fassten dies in einer Gleichung zusammen. Die USLE wurde den europäischen Verhältnissen angepasst und **Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG)** genannt (Schwertmann et al., 1990).

Die Gleichung lautet wie folgt:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (5)$$

mit: A ... langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag in $\frac{t}{ha \cdot a}$

R ... Regen- und Oberflächenabflussfaktor

K ... Bodenerodierbarkeitsfaktor

L ... Hanglängenfaktor

S ... Hangneigungsfaktor

C ... Bodenbedeckungs- und Bearbeitungsfaktor

P ... Erosionsschutzfaktor

Die **gebietsspezifische Erosionskraft (Erosivität) der Niederschläge** wird durch den Regen- und Oberflächenabflussfaktor, auch **R-Faktor** genannt, ausgedrückt. Er wird aus der kinetischen Energie und der Niederschlagsintensität berechnet (Wischmeier, 1959).

Diese Arbeit befasst sich also mit dem auslösenden Faktor der Bodenerosion und soll, als ein wichtiger Teilbereich, zur Vorhersage des Bodenabtrags beitragen.

2.11. R-Faktor bzw. Regen-Erosions-Index

Durch Wasser bedingte Erosion wird stets durch Regen ausgelöst. Wie bereits erwähnt wurde, werden Bodenaggregate durch die auf den Boden auftreffenden Regentropfen zerstört und deren Bruchstücke verspritzt. Der anschließend auftretende Oberflächenabfluss bewirkt sowohl den Transport der losgelösten Bodenteilchen hangabwärts als auch ein Abscheren von weiterem Bodenmaterial.

2.11.1. Definition des R-Faktors

Um einen Abtrag zu bewirken, muss ein Regen bestimmte Eigenschaften haben. Nach Wischmeier (1959) haben sowohl die Regenenergie als auch die Niederschlagsmenge eine quantitative Beziehung zum Bodenabtrag. Durch Analyse von Forschungsdaten fand er heraus, dass das Produkt der aufsummierten Flächendichte der kinetischen Energie eines erosiven Niederschlags E und seiner maximalen 30-Minuten-Intensität I_{30} direkt proportional zum Bodenabtrag ist. Der **Regen-Erosions-Index** bzw. der **R-Faktor** der USLE war somit hergeleitet. Die Beziehung des Abtrags zum R-Faktor ist linear und die $E \cdot I_{30}$ -Werte der einzelnen Regenereignisse direkt additiv (Wischmeier, 1959).

2.11.2. Erosiver Niederschlag (N_e)

Nach Wischmeier und Smith (1978) ist ein Niederschlag als erosiv einzustufen, wenn dessen Höhe mindestens 12,7 mm (0,5 inch) beträgt oder die Intensität größer ist als 6,35 mm (0,25 inch) pro 15 Minuten. Diese Grenzen wurden auf Grundlage der Feldversuche festgelegt. Die $E \cdot I_{30}$ -Werte unter diesen Grenzwerten beeinflussen den Jahres-R-Wert nur unwesentlich und würden daher den Arbeitsaufwand nicht rechtfertigen (Wischmeier & Smith, 1978).

An bayerische Verhältnisse angepasst haben Schwertmann et al. (1990) die Werte auf 10 mm Niederschlagshöhe und eine I_{30} -Intensität von mehr als $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ festgelegt. Regen, die weniger als 6 Stunden voneinander getrennt sind, werden als ein Regen gezählt (Schwertmann et al., 1990).

2.11.3. Kinetische Energiedichte eines Teilabschnittes (E_i)

Die aufsummierte kinetische Energiedichte E_e ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$) eines Regens kann für jeden Einzelregen aus Niederschlagsaufzeichnungen ermittelt werden. Voraussetzung für die Berechnung der kinetischen Energiedichte eines Teilabschnittes E_i ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$) ist das Vorhandensein und die Aufzeichnung einer annähernd gleichen Intensität I_i ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) und die daraus ermittelte Niederschlagsmenge N_i (mm) des entsprechenden Teilabschnittes (Schwertmann et al., 1990).

$$E_i = (11,89 + 8,73 \log I_i) \cdot N_i \cdot 10^{-3} \quad \text{für } 0,05 < I_i < 76,2 \quad (6)$$

$$E_i = 0 \quad \text{für } I_i < 0,050 \quad (7)$$

$$E_i = 28,33 \cdot N_i \cdot 10^{-3} \quad \text{für } I_i > 76,2 \quad (8)$$

2.11.4. Kinetische Energiedichte eines Einzelregens (E_e)

Die Energiedichten der einzelnen Teilabschnitte E_i ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$) werden zur Energiedichte des gesamten Regens E_e ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$) aufsummiert. Die Anzahl der Teilabschnitte wird mit dem Buchstaben n bezeichnet.

$$E_e = \sum_{i=1}^n E_i \quad (9)$$

2.11.5. Maximale 30-Minuten-Intensität (I_{30})

Aus den Niederschlagsaufzeichnungen eines erosiven Einzelregens wird die maximale Regenmenge (mm), die innerhalb von 30 Minuten fällt, ausgelesen. Um diesen Wert auf eine Stunde zu beziehen, wird dieser verdoppelt. Falls ein erosiver Regen weniger als eine Stunde dauert, so ist I_{30} ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) die gesamte Regenmenge, ebenfalls auf eine Stunde bezogen.

2.11.6. R-Faktor eines Einzelregens (R_e)

Der R-Faktor eines Einzelregens R_e ist das Produkt aus der Energiedichte des Einzelregens E_e ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$) und seiner maximalen 30-Minuten-Intensität I_{30} ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$).

$$R_e = E_e \cdot I_{30} \quad (10)$$

in der Einheit $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ oder $\frac{\text{N}}{\text{h}}$.

2.11.7. R-Faktor pro Jahr (R_j)

Der R-Faktor pro Jahr R_j für einen bestimmten Ort errechnet sich aus der Summe der R-Faktoren der Einzelregen.

$$R_j = \sum_{i=1}^m R_{e_i} \quad (11)$$

in der Einheit $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ oder $\frac{\text{N}}{\text{h}}$.

R_j ... Jahres-R-Wert

R_{e_i} ... Erosivität des jeweiligen Einzelniederschlages

m ... Anzahl der erosiven Einzelniederschlagsereignisse

2.11.8. R-Faktor für die ABAG

Da der R-Faktor von Jahr zu Jahr sehr viel stärker variiert als der Gesamtniederschlag, muss für die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) ein Mittelwert des R-Faktors über einen längeren Zeitraum berechnet werden (Schwertmann et al., 1990).

2.12. Toleranzgrenze des Bodenabtrags

Die Toleranzgrenze des Bodenabtrags wurde so festgelegt, dass das natürliche Ertragspotential des Bodens im Zeitraum von 300 bis 500 Jahren nicht entscheidend geschwächt wird. Der grundsätzliche Ansatz, dass nicht mehr Boden abgetragen werden darf als sich neu bildet, ist in der Praxis zurzeit noch nicht realistisch, weil so die Toleranzgrenze auf fast 0 herabgesetzt werden würde. Dies wäre jedoch im Hinblick auf die Gewässerqualität ein langfristig anzustrebendes Ziel. Die Toleranzgrenzen sind bodenspezifisch und von der Gründigkeit bzw. Mächtigkeit des jeweiligen Bodens anhängig. In Tabelle 2 sind die Toleranzgrenzen des Bodenabtrags nach Schwertmann et al. (1990) ersichtlich. Werden diese Werte überschritten, sind Schutzmaßnahmen erforderlich (Schwertmann et al., 1990).

Tabelle 2: Toleranzgrenzen des Bodenabtrags (Schwertmann et al., 1990)

Gründigkeit	Mächtigkeit	tolerierbarer Bodenabtrag ($t/ha \cdot a$)
flach	< 30 cm	1
mittel	30 – 60 cm	3
tief	60 – 100 cm	7
sehr tief	> 100 cm	10

Ein Bodenabtrag von 10 Tonnen pro Hektar und Jahr entspricht dabei einem Bodenverlust von nur 0,6 mm. Die Bodenneubildungsrate hingegen beträgt meist weniger als 0,1 mm pro Jahr. Diese Größenordnungen sind mit dem freien Auge nicht erkennbar. Somit besteht die Gefahr, dass der Erosionsprozess zu spät erkannt wird und irreversible Schäden die Folge sind (Auerswald, 1998).

Aus diesem Grund ist es notwendig den Bodenabtrag über Modelle abzuschätzen, um gegebenenfalls rechtzeitig Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

3. Messgeräte, Standort und Datenmaterial

Dieses Kapitel beschreibt die eingesetzten Messgeräte zur Niederschlagsmessung, sowie den Standort und das mir zur Verfügung gestellte Datenmaterial.

3.1. Distrometer – Parsivel

Zur Untersuchung von Niederschlagspartikel hinsichtlich Größe und Fallgeschwindigkeit werden Distrometer eingesetzt. Das Wort Distrometer ist mit dem lateinischen Wort „distribuere“ verknüpft, dieses bedeutet verteilen bzw. einteilen.

Das Datenmaterial für die vorliegende Arbeit stammt von einem Parsivel-Distrometer der ersten Generation (Abbildung 8) der Firma Ott Hydromet GmbH. Das Wort „Parsivel“ steht für „**P**ARTicle **S**ize and **V**ELocity“.



Abbildung 8: Parsivel mit Elektronikeinheit (Quelle: Strauß P.)

Das Distrometer und die zugehörige Elektronikeinheit sind in Abbildung 8 zu sehen. Die Aufstellhöhe beträgt 2 m, gemessen in Höhe des Laserstrahls. Die Sensorköpfe sind mit einer automatischen Heizung ausgestattet um eine Eisbildung bei niedrigen Temperaturen zu verhindern. Auf jedem Sensorkopf befindet sich ein Spritzschutz der auftreffende Tropfen zerteilt und bewirkt, dass im Laserstrahl keine Sekundärspektren durch Spritzer erfasst werden.

Der Niederschlag wird über einen laser-optischen Sensor erfasst (Abbildung 9). Flüssige Niederschlagspartikel können in der Größe von 0,2 bis 5 mm gemessen werden, feste in der Größe von 0,2 bis 25 mm. Der Fallgeschwindigkeitsbereich dieser Partikel reicht von 0,2 bis 20 m·s⁻¹. Die Niederschlagspartikel werden in Niesel, Niesel mit Regen, Regen, Regen bzw. Niesel mit Schnee, Schnee, Schneegriesel, Graupel und Hagel differenziert.

Die Sendeeinheit erzeugt ein Lichtband mit 18 cm Länge und 3 cm Breite. Dies ergibt eine Messfläche von 54 cm². Der 1 mm hohe Laserstrahl wird von der Empfängereinheit in ein elektrisches Signal umgewandelt. Passiert ein Niederschlagspartikel das Laserband, führt dies zu einem Spannungsabfall am Empfänger, wodurch die Partikelgröße bestimmt wird. Die Fallgeschwindigkeit wird aus der Signaldauer abgeleitet.

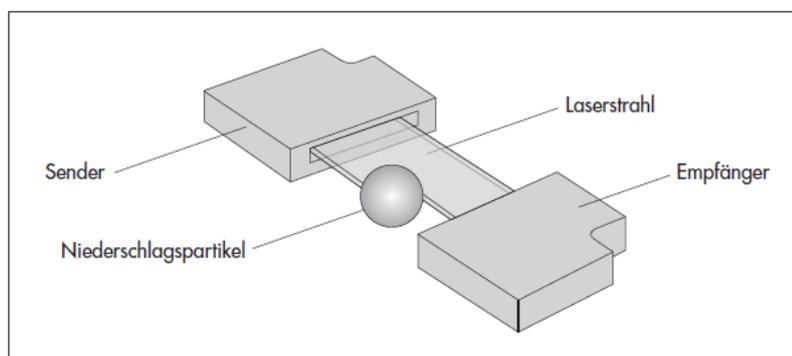


Abbildung 9: Funktionsprinzip OTT Parsivel (Ott, Benutzerhandbuch S. 8)

Parsivel erfasst sowohl den volumenäquivalenten Durchmesser (D) (Tabelle 3) als auch die Fallgeschwindigkeit (V) (Tabelle 4) der einzelnen Hydrometeore und teilt diese in Klassen ein. Die Auflösung dieser Einteilung ist bei kleinen und langsamen Partikeln höher als bei großen und schnellen.

Die gemessenen Partikel werden in ein zweidimensionales Feld aus D- und V-Klassen eingeteilt, wobei jeweils 32 D- und V-Klassen unterschieden werden, sodass insgesamt 32 x 32 Klassen zur Verfügung stehen.

Tabelle 3: Durchmesserklassen des Parsivel (Ott, Benutzerhandbuch S. 43)

Einteilung nach dem volumenäquivalenten Durchmesser		
Klassennummer	Klassenmitte in mm	Klassenbreite in mm
1	0,062	0,125
2	0,187	0,125
3	0,312	0,125
4	0,437	0,125
5	0,562	0,125
6	0,687	0,125
7	0,812	0,125
8	0,937	0,125
9	1,062	0,125
10	1,187	0,125
11	1,375	0,250
12	1,625	0,250
13	1,875	0,250
14	2,125	0,250
15	2,375	0,250
16	2,750	0,500
17	3,250	0,500
18	3,750	0,500
19	4,250	0,500
20	4,750	0,500
21	5,500	1,000
22	6,500	1,000
23	7,500	1,000
24	8,500	1,000
25	9,500	1,000
26	11,000	2,000
27	13,000	2,000
28	15,000	2,000
29	17,000	2,000
30	19,000	2,000
31	21,500	3,000
32	24,500	3,000

Hinweis:
 Klasse 1 und Klasse 2 sind Grenzbereiche und werden bei Messungen mit Parsivel zur Zeit nicht ausgewertet, weil sie außerhalb des Messbereiches des Gerätes liegen.

Tabelle 4: Fallgeschwindigkeitsklassen des Parsivel (Ott, Benutzerhandbuch S. 44)

Einteilung nach der Fallgeschwindigkeit		
Klassennummer	Klassenmitte in m/s	Klassenbreite in m/s
1	0,050	0,100
2	0,150	0,100
3	0,250	0,100
4	0,350	0,100
5	0,450	0,100
6	0,550	0,100
7	0,650	0,100
8	0,750	0,100
9	0,850	0,100
10	0,950	0,100
11	1,100	0,200
12	1,300	0,200
13	1,500	0,200
14	1,700	0,200
15	1,900	0,200
16	2,200	0,400
17	2,600	0,400
18	3,000	0,400
19	3,400	0,400
20	3,800	0,400
21	4,400	0,800
22	5,200	0,800
23	6,000	0,800
24	6,800	0,800
25	7,600	0,800
26	8,800	1,600
27	10,400	1,600
28	12,000	1,600
29	13,600	1,600
30	15,200	1,600
31	17,600	3,200
32	20,800	3,200

Die detektierten Niederschlagspartikel werden somit als Rohdatenmatrix mit 1024 Klassen abgespeichert. Aus diesen Rohdaten berechnet ein schneller Signalprozessor unter anderem die folgenden Parameter:

- Art des Niederschlages
- Niederschlagsintensität ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)
- akkumulierter Niederschlag (mm)
- Anzahl der detektierten Partikel
- mittlere Fallgeschwindigkeit je Größenklasse ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- Sichtweite
- Radarreflektivität

Parsivel speichert die Rohdaten und die daraus berechneten Daten je nach eingestelltem Intervall als Datentelegramm ab. Das Intervall wurde mit einer Dauer von 60 Sekunden gewählt.

Die technischen Spezifikationen des Parsivel können der Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 5: Technische Daten des Parsivel-Distrometers (Ott, Benutzerhandbuch S. 39)

Wellenlänge der Laserdiode:	650 nm
Ausgangsleistung:	3 mW
Laser Klasse:	1
Strahlgröße (B x T):	180 x 30 mm
Messfläche:	54 cm ² , Erkennung von Randereignissen
Messbereich	
Partikel flüssiger Niederschläge:	0,2 ... 5 mm
Partikel fester Niederschläge:	0,2 ... 25 mm
Partikelgeschwindigkeit:	0,2 ... 20 m/s
Ausführung:	Niederschlag 32 Größenklassen 32 Geschwindigkeitsklassen
Regenrate	
Minimale Intensität:	0,001 mm/h Nieselregen
Maximale Regenrate:	1200 mm/h
	Genauigkeit: ± 5% (flüssig) / ± 20% (fest) unter Laborbedingungen
Vereisungsschutz:	Mikroprozessor gesteuerte Heizung

3.2. Niederschlagsmesser nach dem Wägeprinzip – Pluvio

Als Vergleichsmessung wurde in unmittelbarer Nähe des Parsivel ein wägbarer Niederschlagsmesser (Pluvio) der Firma OTT Hydromet GmbH installiert (Abbildung 10). Der Pluvio besitzt eine Messfläche von 400 cm² und hat eine Aufzeichnungskapazität von 750 mm.



Abbildung 10: OTT Pluvio 400 (Ott Hydromet GmbH)

Der Niederschlagssensor misst sowohl die Menge als auch die Intensität flüssiger, fester und gemischter Niederschläge über eine hochpräzise, langzeitstabile Edelstahl-Wägezelle. Die Wägezelle ist von Umwelteinflüssen hermetisch abgeschirmt und misst das auf ihr lastende Gesamtgewicht. Die Elektronik kompensiert störende Einflussfaktoren wie Wind und Temperatur und ermittelt so bereinigte Niederschlagsdaten. Die Ansprechschwelle des Pluvio liegt bei 0,1 mm Niederschlag pro Minute.

3.3. Standort der Messungen

Die Niederschlags- und Windmessungen wurden am Standort des Instituts für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Pollnbergstraße 1 in 3252 Petzenkirchen durchgeführt. Petzenkirchen liegt in Niederösterreich nahe der Westautobahn (A1) zwischen Wien und Linz (Abbildung 11).

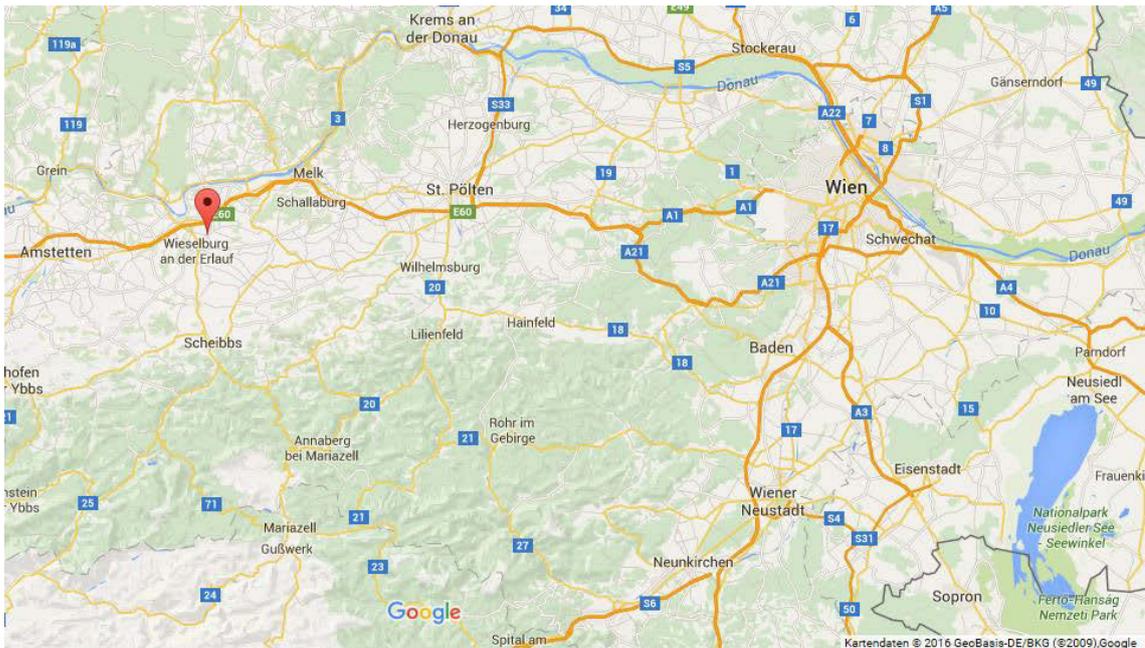


Abbildung 11: Übersichtskarte (Google & GeoBasis-DE/BKG, 2009)



Abbildung 12: Übersicht Standort (Google & DigitalGlobe, 2015)

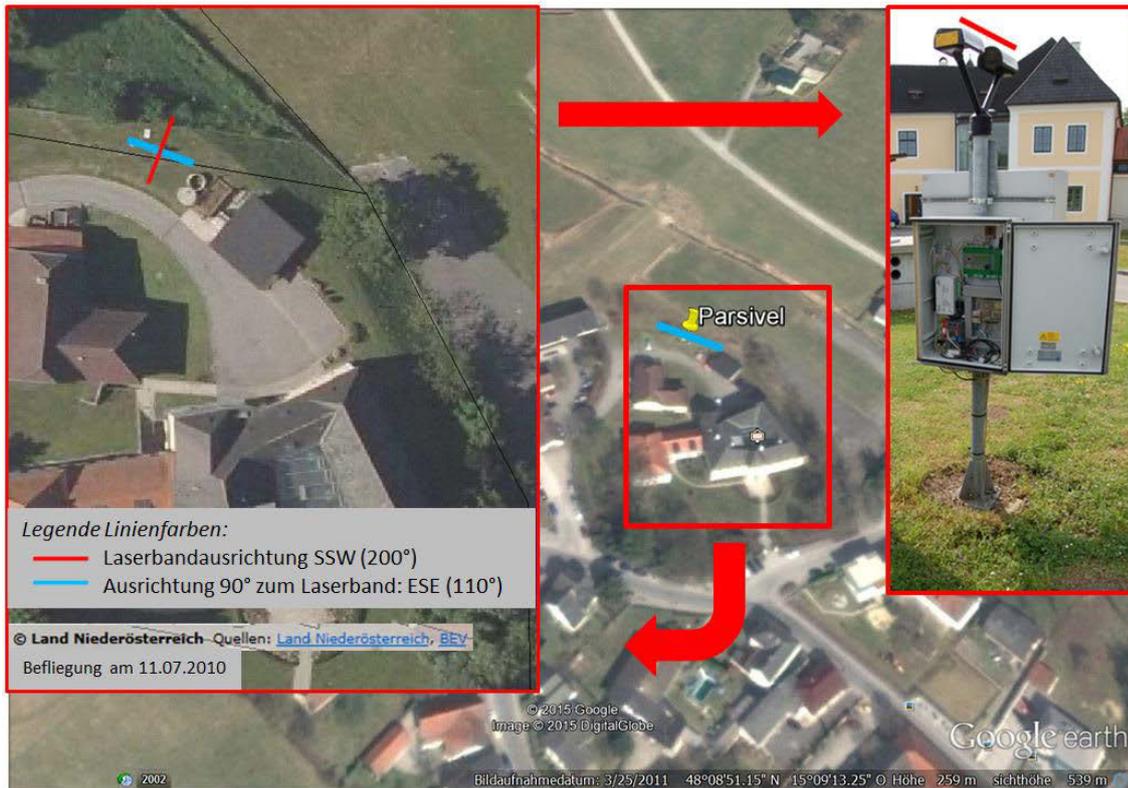


Abbildung 13: Standort und Ausrichtung des Distrometers (Land Niederösterreich, BEV, 2010; Google & DigitalGlobe, 2015; Foto Parsivel: Strauß P.)

Der genaue Aufstellungsort sowie die Ausrichtung des Distrometers sind in Abbildung 12 und Abbildung 13 zu sehen. Die Ausrichtung des Laserstrahles sollte quer zur Hauptwindrichtung (Idealrichtung) erfolgen, er wurde von 20° nach 200° ausgerichtet (Abbildung 14).

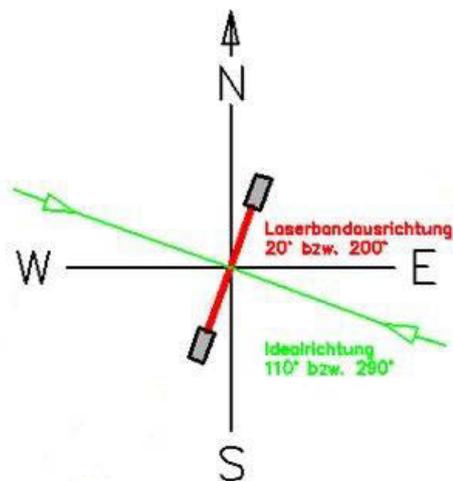


Abbildung 14: Laserbandausrichtung (eigene Skizze)

3.4. Datenmaterial

3.4.1. Datenprotokolle des Parsivel-Distrometers

Die mir zur Verfügung gestellten Aufzeichnungen des Parsivel stammen aus den Jahren 2010 und 2011, wobei im Jahr 2010 von 17. Mai bis 27. Dezember und im Jahr 2011 von 2. Jänner bis 6. Juli Niederschläge aufgezeichnet wurden. Die Datenprotokolle wurden durch das Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt bearbeitet – die niederschlagsfreien Zeiten wurden in beiden Dateien entfernt.

Somit erhielt ich folgende zwei Datendateien mit minutenweisen Aufzeichnungen in Form von Textdateien:

- psv2010.txt, von 17.05.2010 bis 27.12.2010
- psv2011.txt, von 02.01.2011 bis 06.07.2011

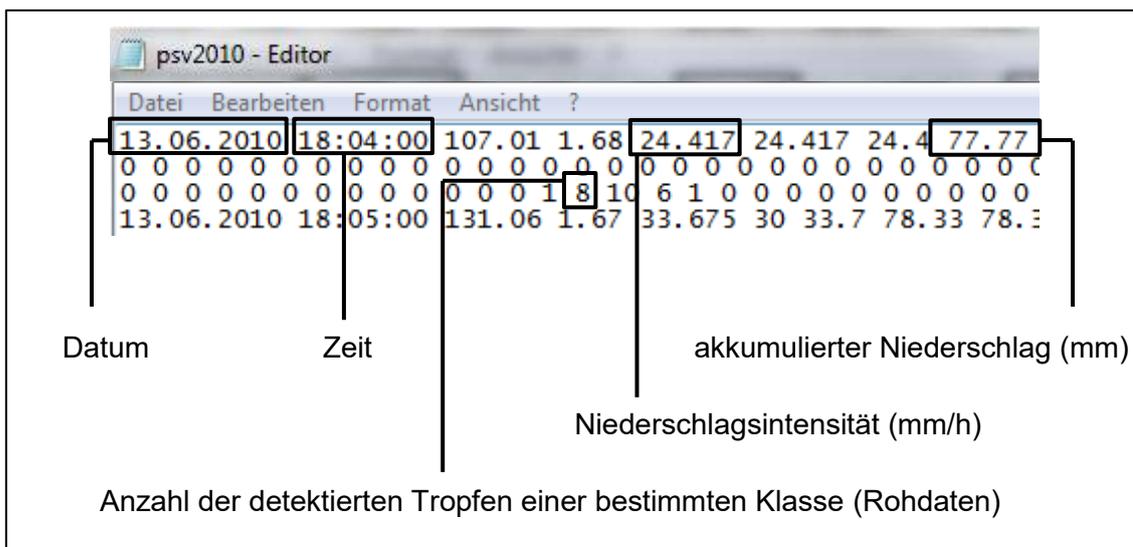


Abbildung 15: Ausschnitt eines Parsivel-Datenfiles (Screenshot)

Folgender Inhalt der Datenprotokolle ist für diese Arbeit von Bedeutung:

Datum und Zeit

Das Speicherintervall der Datenprotokolle beträgt eine Minute.

Art des Niederschlages

Nur flüssiger Niederschlag geht in die Auswertung ein.

Anzahl, Größe und Fallgeschwindigkeit der Niederschlagspartikel der Rohdaten

Jeder Tropfen der das Lichtband passiert wird einer der 32 Größenklassen (mm) und einer der 32 Geschwindigkeitsklassen ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) zugeordnet (Abbildung 16).

Niederschlagsintensität pro Intervall

Die Niederschlagsintensität ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) wird vom Signalprozessor des Distrometers für 60 Sekunden aus den korrigierten Rohdaten berechnet und abgespeichert.

Anzahl der Niederschlagspartikel pro Intervall

Die Tropfenanzahl der Rohdatenmatrix wird aufgrund verschiedener Einflüsse, die später noch genauer erklärt werden, korrigiert. Somit ergibt sich eine Differenz zwischen der Rohdatenmatrix und der von Parsivel minütlich abgespeicherten Tropfensumme.

Regenmenge akkumuliert

Die gefallene Niederschlagshöhe (mm) wird aus der Niederschlagsintensität berechnet, fortlaufend addiert und die Summe intervallweise abgespeichert.

mittlere Fallgeschwindigkeit je Größenklasse

Parsivel errechnet aus den gefallen Tropfen je Größenklasse – unter Berücksichtigung von Korrekturrechnungen – die mittlere Fallgeschwindigkeit in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Geschwindigkeitsklasse V1
Größenklassen N1 bis N32

Nummer der Spalte

Datum	Zeit	1 2 3 4				31 32 33 34 35					1022 1023 1024			
		N1V1	N2V1	N3V1	N4V1	N31V1	N32V1	N1V2	N2V2	N3V2	N30V32	N31V32	N32V32	
13.06.2010	17:57:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.06.2010	17:58:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.06.2010	17:59:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.06.2010	18:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.06.2010	18:01:00	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 16: Parsivel Rohdatenmatrix (als Excel-Datei gespeichert)

detektierte Tropfen der Geschwindigkeitsklasse V32 und Größenklasse N30 zum Zeitpunkt 18:01 Uhr

3.4.2. Datenprotokoll des wägbaren Niederschlagsmessers – Pluvio

Die Aufzeichnungen der Niederschlagsintensität des Pluvio starteten am 1. Jänner 2010 und endeten am 3. Mai 2011 und wurden mir ebenfalls als Textdatei ausgehändigt. Die Intensität wurde, so wie bei Parsivel, minutenweise abgespeichert und die niederschlagsfreien Zeiten ebenfalls entfernt. In dieser Datei ist der gefallene Niederschlag in mm pro Minute des Pluvio mit dem des Parsivel gegenübergestellt (Abbildung 17).

Datum	Zeit	Riplu	Ripar
20100613	18:01:00	-9999	0.19
20100613	18:02:00	0.1	0.2482
20100613	18:03:00	-9999	0.30
20100613	18:04:00	0.2	0.4069
20100613	18:05:00	0.2	0.5612
20100613	18:06:00	0.3	0.6702
20100613	18:07:00	0.4	0.7147
20100613	18:08:00	0.5	0.5134
20100613	18:09:00	0.6	0.2066
20100613	18:10:00	0.7	0.5198
20100613	18:11:00	0.8	0.3367
20100613	18:12:00	0.8	0.5525
20100613	18:13:00	0.7	0.2241
20100613	18:14:00	0.6	0.2617

Abbildung 17: Vergleich Pluvio und Parsivel

Da die vorliegende Aufzeichnung in Minutenschritten gemacht wurde, entspricht die aufgezeichnete Niederschlagsmenge der Intensität in $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Die Intensitätsschwelle beim Pluvio beträgt $0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ – dies entspricht einer Intensität von $6 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Wird diese Intensität nicht erreicht, wird der Wert „-9999“ aufgezeichnet und die gefallene Menge dem nächsten Intervall zugeordnet.

3.4.3. Datenmaterial des Anemometers (Windmessers)

Die Daten zur Windsituation stammen ebenfalls vom Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt. Aufgezeichnet wurden Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) und Windrichtung ($^\circ$). Somit war es möglich, den Einfluss des Windes auf ausgewählte Stunden zu untersuchen. Die Daten wurden mir im Microsoft-Excel-Format zur Verfügung gestellt.

3.5. Datenauswahl

Die grundlegende Entscheidung war, das gesamte Datenmaterial des Distrometers nach Niederschlagsereignissen zu durchsuchen, um so die Einzelereignisse analysieren zu können.

Zu Beginn der Arbeit wurde das Datenmaterial manuell analysiert. Das heißt, jedes Niederschlagsereignis welches bestimmte Kriterien erfüllte, wurde händisch als Einzeldatei abgespeichert. So entstanden 24 Einzeldateien, 14 Dateien im Jahr 2010 und 10 Dateien im Jahr 2011.

Die Auswahlkriterien wurden wie folgt festgelegt:

- Erfassung nur flüssiger Niederschläge
- Niederschlagshöhe: ≥ 6 mm
- Niederschlagsfreie Zeit von 6 Stunden beendet Ereignis

Das bedeutet, dass nur jene Ereignisse ausgewählt wurden die mindestens 6 mm Niederschlag aufweisen konnten und Regen, die weniger als 6 Stunden auseinander lagen, wurden als ein Regen gezählt.

Die 6 Stunden beruhen auf Schwertmann et al. (1990), die die Zeitspanne zwischen den Niederschlagsereignissen mit 6 Stunden definierten.

Wie bereits erwähnt, wurden nach Schwertmann et al. (1990) Niederschläge als erosiv eingestuft, wenn diese mindestens 10 mm Niederschlagshöhe erreichen.

Die Mindestniederschlagshöhe wurde in dieser Arbeit mit 6 mm definiert, weil auch Ereignisse mit weniger als 10 mm hinsichtlich der kinetischen Energie analysiert werden sollten.

4. Methodik der Datenauswertung

In diesem Kapitel werden die Datenauswertung und die wesentlichen Inhalte des R-Programmiercodes vorgestellt.

Zur Bewältigung der enormen Datenmengen wurde die Auswertung der Datenprotokolle mit Hilfe der **Statistik- und Programmiersoftware R** durchgeführt. Zur Nachbearbeitung der Daten wurde die **Tabellenkalkulationssoftware MS Excel** verwendet.

4.1. Auswertung der Einzeldateien des Parsivel und Erstellung einer Regressionsgleichung

4.1.1. Bereinigung der Rohdatenmatrix

Laut Betriebsanleitung werden von Parsivel flüssige Niederschlagspartikel bis zu einem Durchmesser von 5 mm erfasst. Da jedoch vereinzelt auch größere Partikel in der Rohdatenmatrix zu finden waren, wurden Tropfen größer als 5,5 mm Durchmesser zu Beginn der Auswertung mit Hilfe der Software R eliminiert. Somit wurde sichergestellt, dass nur Regentropfen in die Analyse eingehen und Fremdkörper, welcher Art auch immer, ausgeschlossen wurden.

Entsprechend der Analyse von Gunn und Kinzer (1949) haben Regentropfen mit einem Durchmesser von 5,76 mm eine maximale Fallgeschwindigkeit von $9,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Um dies in der Rohdatenmatrix zu berücksichtigen, wurden Partikel mit einer Fallgeschwindigkeit $> 10,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ebenfalls entfernt.

Einen Überblick über die Tropfenanzahl vor der Bereinigung der Rohdatenmatrix (Spalte „TrAnz-Rohd_orig“) und nach der Bereinigung (Spalte „TrAnz-Rohdaten“) gibt Tabelle 6. So wurde bei zwei Ereignissen eine maximale bereinigte Tropfenanzahl von 18 Tropfen festgestellt, bei 14 Ereignissen wurden keine Tropfen bereinigt.

Für die nun folgenden Auswertungen wurden die bereinigten Rohdatenmatrizen der Ereignisse herangezogen.

Tabelle 6: Übersicht bereinigte Tropfen

Ereignis-Datum	TrAnz-Rohd_orig	TrAnz-Rohdaten	TrAnz-Differenz
13.06.2010	65488	65470	18
15.06.2010	243162	243162	0
19.06.2010	363219	363219	0
17.07.2010	129154	129152	2
23.07.2010	201988	201981	7
29.07.2010	222146	222138	8
02.08.2010	131397	131379	18
06.08.2010	394692	394691	1
13.08.2010	39785	39785	0
30.08.2010	149862	149862	0
25.09.2010	279111	279111	0
17.10.2010	143471	143471	0
24.10.2010	147409	147409	0
12.11.2010	98219	98219	0
12.01.2011	359515	359515	0
17.03.2011	311874	311874	0
27.04.2011	59400	59400	0
12.05.2011	45297	45294	3
14.05.2011	112446	112446	0
27.05.2011	388567	388559	8
08.06.2011	100066	100066	0
18.06.2011	124912	124911	1
23.06.2011	117561	117558	3
05.07.2011	138358	138358	0

4.1.2. Berechnung des mittleren Tropfendurchmessers aus den Rohdaten

Die Berechnung des mittleren Tropfendurchmessers wurde in R über die Rohdatenmatrix, welche aus 1024 Klassen besteht, durchgeführt. Der mittlere Tropfendurchmesser $mTrD$ wurde über die Tropfenanzahl TrA gewichtet. Die Berechnung je Zeitschritt i (eine Minute) wurde wie folgt durchgeführt:

$$mTrD_i = \left[\sum_{k=1}^{1024} TrA_k \cdot TrD_k \right] / \left[\sum_{k=1}^{1024} TrA_k \right] \quad (12)$$

$mTrD_i$... mittlerer Tropfendurchmesser je Zeitschritt i

TrA_k ... Tropfenanzahl der Klasse k

TrD_k ... Tropfendurchmesser der Klasse k

4.1.3. Berechnung der kinetischen Energie aus den Rohdaten

Die kinetische Energie wurde in R für jeden detektierten Regentropfen (Rohdatenmatrix) anhand des äquivalenten Durchmessers und der entsprechenden Fallgeschwindigkeit berechnet und pro Messintervall, sprich 60 Sekunden, summiert. Die Dichte von Wasser wurde vereinfacht mit $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ angenommen.

Die Formel für die kinetische Energie E_{kin} eines Tropfens lautet:

$$E_{kin} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{Wasser} \cdot 0,5 \cdot v^2 \quad (13)$$

E_{kin} ... kinetische Energie eines Tropfens (J)

r ... Radius des Tropfens (m)

ρ_{Wasser} ... Dichte von Wasser ($1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

v ... Fallgeschwindigkeit des Tropfens ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Da sich die berechnete kinetische Energie in einer Minute ($\text{J}\cdot\text{min}^{-1}$) auf die durch das Laserband gefallenen Tropfen – also auf die Messfläche von 54 cm^2 – bezieht, wurde diese für die Auswertung auf einen Quadratmeter umgerechnet. Die minutenweise berechneten Ergebnisse haben somit die Einheit $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$. Man spricht von **zeitbezogener kinetischer Energie** $E_{kin\ zeit}$ (Salles et al., 2002).

Für die Berechnung der Regressionsfunktion (Zusammenhang kinetische Energie und Niederschlagsintensität) musste die bereits minutenweise berechnete kinetische Energie $E_{kin\ zeit}$ auf einen Millimeter Niederschlag bezogen und deshalb umgerechnet werden. Die kinetische Energie ist somit auf eine Fläche und eine Niederschlagshöhe von einem Millimeter bezogen und hat die Einheit $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$. Man spricht hierbei von **volumenbezogener kinetischer Energie** $E_{kin\ mm}$ (Salles et al., 2002).

4.1.4. Berechnung der Niederschlagshöhe aus den Rohdaten

Die klassenweise detektierte Tropfenanzahl (Rohdatenmatrix mit 1024 Klassen) wurde mit der jeweiligen Masse der Regentropfen multipliziert und die Einzelergebnisse der 1024 Klassen minutenweise summiert. Das Ergebnis ist die Gesamtmasse in Kilogramm der in einer Minute gefallen Regentropfen bezogen auf die Messfläche (54 cm²). Es wurde vereinfacht angenommen, dass ein Liter Wasser eine Masse von einem Kilogramm besitzt.

Um die Niederschlagsmenge in l·m⁻² zu erhalten, musste die Gesamtmasse durch die Größe der Messfläche dividiert werden. Das Ergebnis liegt somit in kg·m⁻² bzw. l·m⁻² vor. Die Niederschlagshöhe in mm entspricht der Niederschlagsmenge in l·m⁻².

4.1.5. Berechnung der Niederschlagsintensität aus den Rohdaten

Die Niederschlagsintensität (*I*) wird grundsätzlich in mm·h⁻¹ angegeben. Da die Aufzeichnungen des Parsivel minutenweise gemacht wurden, liegt somit auch bereits eine Intensitätsaufzeichnung vor. Die berechnete Niederschlagshöhe (mm) pro Minute wurde mit 60 multipliziert um die Intensität pro Stunde (mm·h⁻¹) zu erhalten.

4.1.6. Zusammenhang kinetische Energie – Niederschlagsintensität

Die grundsätzliche Überlegung besteht darin, einen Zusammenhang zwischen der Regenintensität und der Regenenergie zu finden und diesen durch eine mathematische Funktion zu beschreiben. Die Regenintensität (mm·h⁻¹) ist grundsätzlich leicht messbar, die kinetische Energie hingegen nicht. Mit einer Gleichung ist es somit möglich, die Regenenergie direkt aus der Regenintensität zu berechnen.

Wischmeier und Smith haben bereits im Jahre 1959 einen solchen Zusammenhang gefunden und mit einer logarithmischen Gleichung beschrieben (Tabelle 7).

Tabelle 7: Gleichungen kinetische Energie – Regenintensität (Lobo & Bonilla, 2015)

Equation	Author	Abbreviation
$e = \begin{cases} 0.119 + 0.0873 \log(i) & i \leq 76 \\ 0.283 & i > 76 \end{cases}$	Wischmeier and Smith (1959)	WS
$e = \begin{cases} 0 & i \leq 4 \\ 0.2986(1 - 4.29i^{-1}) & i > 4 \end{cases}$	Hudson (1965)	HU
$e = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.05i)]$	Brown and Foster (1987)	BF
$e = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.082i)]$	Mc Gregor et al. (1995)	MG
$e = 0.283[1 - 0.52 \exp(-0.042i)]$	van Dijk et al. (2002)	VD

Eine Gleichung in logarithmischer Form impliziert, dass es keine obere Grenze für die kinetische Energie e gibt (siehe Abbildung 18). Wissenschaftliche Studien haben jedoch gezeigt, dass es sehr wohl eine Grenze nach oben gibt. Deshalb haben Wischmeier und Smith die Gültigkeit ihrer Gleichung mit einem oberen Limit begrenzt. Die maximale kinetische Energie e von $28,3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ wird bei einer Intensität $i > 76 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ erreicht. Andere Autoren sind der Meinung, dass eine Exponentialgleichung diese Beziehung besser beschreibt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Art der Gleichung einen Parameter mehr als eine logarithmische Gleichung hat und somit mehr Flexibilität bei der Beschreibung von Messdaten besitzt (Dijk et al., 2002).

Die Konstanten der Gleichungen stehen in Beziehung zum Regentyp, zum Standort und zur Messtechnik (Salles et al., 2002).

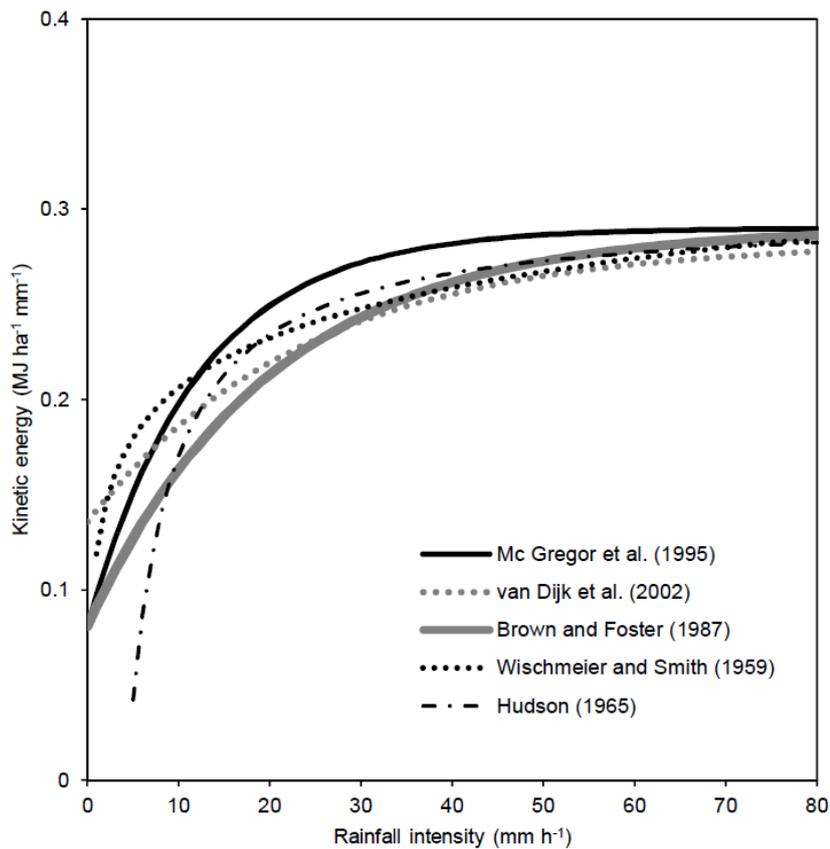


Abbildung 18: Grafische Darstellung kinetische Energie – Regenintensität (Lobo & Bonilla, 2015)

Abbildung 18 zeigt, dass die Differenzen zwischen den Gleichungen mit steigender Intensität geringer werden. Die Differenzen im Bereich geringer Intensitäten, also $< 5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, sind hingegen sehr groß. Die Unterschiede in der kinetischen Energie sind auf die verschiedenen Tropfengrößenverteilungen an unterschiedlichen Messstandorten zurückzuführen (Lobo & Bonilla, 2015).

4.1.7. Messfehler des Parsivel

Die Tropfenanzahl der Rohdatenmatrix muss aufgrund verschiedener Fehler, die bei der Messung auftreten, korrigiert werden.

So erkennt Parsivel Tropfen, die den Randbereich des Laserbandes passieren als „Randereignisse“ (OTT Hydromet GmbH, 2004).

Diese sogenannten **Randzonenfehler** (Abbildung 19) entstehen, wenn Regentropfen (blau) in den Randbereich des Laserbandes (rot) kommen und dort als entsprechend zu klein detektiert werden. Über eine Korrekturrechnung, die aus geometrischen Betrachtungen hergeleitet wird, können diese „abgeschnittenen“ Partikel abgeschätzt werden (Mahlke, 2007).

Demzufolge wäre auch die Fallgeschwindigkeit bei diesen als zu klein detektierten Tropfen zu hoch.



Abbildung 19: Schematische Darstellung des Randzonenfehlers (eigene Skizze)

Partikel können durch das Lichtband getrennt fallen oder sich überschneiden. Tritt ein Fehler aufgrund von Überlagerungen der Tropfen auf, wird dieser als **Koinzidenzfehler** bezeichnet. Dabei werden nicht zwei bzw. mehrere Partikel detektiert, sondern ein großes, welches sich aus der Überlagerung der Flächen ergibt. Auch dieser Fehler lässt sich statistisch korrigieren (Mahlke, 2007).

Der genaue Algorithmus, den Parsivel für die Fehlerkorrektur anwendet, ist nicht öffentlich zugänglich. An dieser Stelle soll auch erwähnt werden, dass das Distrometer zwar die Tropfenanzahl und Niederschlagsintensität berechnet, dieser Wert jedoch aufgrund statistischer Korrekturen nur eine Abschätzung der Realität sein kann (Raupach & Berne, 2015).

Die Rohdaten werden somit über Korrekturrechnungen angepasst und Parsivel errechnet die nach der Korrektur detektierte Tropfenanzahl als Gesamtsumme pro Minute. Es lässt sich somit nicht nachvollziehen, welche Tropfengrößen in der Rohdatenmatrix entfernt bzw. korrigiert werden.

4.1.8. Auswahl der Messdaten und Berechnung der Regressionsgleichung

Das Auswahlkriterium für die Regressionsgleichung war eine Niederschlagshöhe von mindestens 10 mm, da nach Schwertmann et al. (1990) solche Ereignisse als erosiv gelten. Demnach wurden die entsprechenden Niederschlagsereignisse per Hand ausgewählt. Für die Analyse standen somit 15090 Messminuten zur Verfügung. Multipliziert man diese 15090 gemessenen Minuten mit den 1024 Spalten der Rohdatenmatrix, erhält man die Anzahl der Zellen dieser Matrix. Das Ergebnis beträgt 15.452.160 Zellen und soll eine Vorstellung über den Umfang des Rechenaufwandes geben. In der heutigen Zeit der computergestützten Datenanalyse sind diese Berechnungsvorgänge aber leicht zu bewältigen.

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die gesamt ausgewerteten und die für die Regression ausgewählten Niederschlagsereignisse. Die Letztgenannten sind durch ein „x“ gekennzeichnet.

Tabelle 8: Übersicht ausgewerteter und selektierter Niederschlagsereignisse

Ereignis Nr.	Datum von bis	Uhrzeit	Parsivel Regenmenge akkumuliert (mm)	NS-Höhe (mm)
x 1	13.06.2010	17:54	76,27	11,19
	14.06.2010	07:48	87,46	
x 2	15.06.2010	13:09	87,46	15,98
	16.06.2010	17:29	103,44	
x 3	19.06.2010	17:02	106,13	11,74
	21.06.2010	19:03	117,87	
x 4	17.07.2010	15:49	135,38	16,03
	18.07.2010	03:54	151,41	
x 5	23.07.2010	15:02	151,42	16,98
	25.07.2010	00:35	168,40	
x 6	29.07.2010	12:53	172,16	18,96
	30.07.2010	20:36	191,12	
x 7	02.08.2010	19:22	191,17	14,58
	03.08.2010	20:03	205,75	
x 8	06.08.2010	22:36	207,14	27,05
	08.08.2010	00:16	234,19	
9	13.08.2010	08:05	234,59	8,34
	13.08.2010	23:33	242,93	
10	30.08.2010	05:04	280,37	8,71
	31.08.2010	22:45	289,08	
x 11	25.09.2010	14:25	297.89 bis 299.99 und 0 bis 15.14	17,24
	27.09.2010	01:01		
12	17.10.2010	08:19	18,41	6,03
	18.10.2010	09:35	24,44	
13	24.10.2010	20:57	29,83	7,89
	25.10.2010	23:32	37,72	
14	12.11.2010	03:49	38,79	6,02
	12.11.2010	23:36	44,81	
x 15	12.01.2011	20:51	146,95	20,55
	14.01.2011	13:12	167,50	
x 16	17.03.2011	13:01	198,94	19,40
	18.03.2011	18:21	218,34	
17	27.04.2011	14:02	253,87	6,46
	27.04.2011	21:16	260,33	
18	12.05.2011	17:35	266,48	7,61
	12.05.2011	21:04	274,09	
19	14.05.2011	23:39	275,56	7,87
	15.05.2011	15:49	283,43	
x 20	27.05.2011	05:06	0,01	36,91
	28.05.2011	18:16	36,92	
21	08.06.2011	17:09	48,15	7,64
	09.06.2011	07:44	55,79	
22	18.06.2011	14:32	56,81	7,27
	19.06.2011	19:14	64,08	
x 23	23.06.2011	11:45	67,64	17,09
	23.06.2011	21:43	84,73	
24	05.07.2011	03:25	4,02	8,36
	05.07.2011	16:04	12,38	

Da für die Herstellung des Zusammenhangs „Intensität – kinetische Energie“ die berechnete kinetische Energie der Rohdaten verwendet wurde, war es notwendig, die in Kapitel 4.1.7 beschriebenen Korrekturrechnungen in der Regressionsgleichung zu berücksichtigen. Dies ist aufgrund der teilweise sehr hohen Differenz der Tropfenanzahl der Rohdaten und der von Parsivel über Korrekturrechnungen korrigierten Tropfenanzahl notwendig. Die Gesamttropfenanzahl der Rohdaten liegt bei einigen Ereignissen um über 50 Prozent über der korrigierten Tropfenanzahl (siehe Kapitel 5.1.1).

Da jedoch die Rohdatenmatrix nicht korrigiert werden konnte, fließen somit nur jene Messminuten in die Beziehung ein, die bestimmte Bedingungen erfüllen. Die anderen Minuten bleiben unbeachtet. Somit können zumindest teilweise die Korrekturrechnungen des Distrometers indirekt in der Auswertung berücksichtigt werden.

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Anzahl der Messminuten in denen ein bestimmtes Verhältnis zwischen der Tropfenanzahl der Rohdatenmatrix und der Anzahl der von Parsivel mittels Korrekturrechnung bereinigten Tropfen erreicht wird.

Bei 1,6% aller Messminuten beträgt die Abweichung der Tropfenanzahl zwischen den von Parsivel korrigierten Tropfen und den Rohdaten mehr als das Dreifache. In rund 12% aller Minuten wurde mehr als die doppelte Tropfenanzahl erreicht. Sollen zum Beispiel nur jene Minuten im Regressionsmodell berücksichtigt werden in denen die Tropfenanzahl der Rohdaten maximal um 25 Prozent höher liegt als die der korrigierten, so fallen rund 76 Prozent der Minuten heraus und die verbleibenden 24% bilden die Grundlage für die Erstellung der Regressionsgleichung.

Tabelle 9: Tropfenanzahlvergleich ausgewählter Ereignisse

Minuten gesamt	Faktor	Bedingung	Minuten verbleibend	Minuten entfernt	Minuten entfernt in %
15090	3	· TrAnz korr. < TrAnz Rohdaten	14854	236	1,6
15090	2	· TrAnz korr. < TrAnz Rohdaten	13271	1819	12,1
15090	1,5	· TrAnz korr. < TrAnz Rohdaten	9236	5854	38,8
15090	1,25	· TrAnz korr. < TrAnz Rohdaten	3689	11401	75,6
15090	1,2	· TrAnz korr. < TrAnz Rohdaten	2425	12665	83,9
15090	1,1	· TrAnz korr. < TrAnz Rohdaten	504	14586	96,7

Für die Erstellung des nichtlinearen Regressionsmodells verwendet R einen Gauß-Newton-Algorithmus. Dieser erfordert die Festlegung geeigneter Startwerte, welche mittels der Methode „Versuch und Irrtum“ (englisch „Trial and Error“), also durch ausprobieren, festgelegt wurden. Entsprechend der Erklärung in Kapitel 4.1.6 wurde als Gleichungstyp eine Exponentialfunktion gewählt. Die grundsätzliche Form wurde in Anlehnung an bereits bestehende Exponentialgleichungen (Tabelle 7) ermittelt und lautet wie folgt:

$$E_{kin\ mm} = a \cdot [1 - b \cdot \exp(c \cdot I)] \quad (14)$$

$E_{kin\ mm}$... volumenbezogene kinetische Energie ($J \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$)

a, b, c ... zu berechnende Parameter

I ... Niederschlagsintensität ($mm \cdot h^{-1}$)

Die Güte dieses Regressionsmodells lässt sich durch die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes R^2 angeben. In R erfolgt die Ausgabe desselben nicht automatisch, es musste programmiert werden.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\text{unerklärte Variation}}{\text{Gesamtvariation}} \quad (15)$$

R^2 ... Bestimmtheitsmaß

n ... Anzahl der Beobachtungen

e_i ... Abweichung zwischen beobachtetem und vom Modell vorhergesagtem Wert

y_i ... einzelne Beobachtung

\bar{y} ... Mittelwert der Beobachtungen

R^2 drückt dabei aus, wie gut die Regressionsfunktion den Zusammenhang zwischen der unabhängigen Variablen (Niederschlagsintensität) und der abhängigen Variablen (kinetische Energie) wiedergibt.

Die Auswahl der für die Regressionsgleichung verwendeten Daten wurde wieder mit der Methode „Trial and Error“ durchgeführt. Die Zielvorgaben waren:

- möglichst hohes Bestimmtheitsmaß R^2
- Anzahl der verbleibenden Messminuten (> 1000 Messminuten)
- möglichst gute Annäherung sowohl im unteren als auch im oberen Bereich

Die Anpassungsmöglichkeiten waren der Faktor entsprechend der Bedingung in Tabelle 9 und zusätzlich die Festlegung der Mindestniederschlagsintensität. Durch viele Versuche und optische Kontrolle der grafischen Auswertung wurde die Eliminationsbedingung der zu entfernenden Minuten mit dem ermittelten Faktor von 1,2 wie folgt festgelegt:

$$\text{Entfernung wenn } 1,2 \cdot \text{Tropfenanzahl korrigiert} < \text{Tropfenanzahl Rohdaten} \quad (16)$$

So wurden all jene Messminuten entfernt, bei denen die Tropfenanzahl der Rohdaten mehr als 20 Prozent über der korrigierten Tropfenanzahl des Parsivel lagen. Es blieben 2425 Messminuten übrig.

Als Kriterium für die Mindestniederschlagsintensität wurde $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ festgelegt, d. h. es wurden all jene Messminuten entfernt, die unter einer Intensität von 1 mm pro Stunde lagen. Dies war aufgrund der breiten Streuung der aus den Rohdaten berechneten kinetischen Energie im unteren Bereich notwendig. Es wurden weitere 1317 Minuten entfernt, und es verblieben 1108 Minuten für die Regressionsgleichung.

4.2. Ermittlung der zeitbezogenen kinetischen Energie anhand der Intensität über die Regressionsgleichung

Es soll hier nochmals angemerkt werden, dass in der zuvor beschriebenen Regressionsgleichung die kinetische Energie auf einen Millimeter Niederschlag bezogen ist ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$). Die tatsächlich in der Minute einwirkende kinetische Energie $E_{kin \text{ zeit}}$ wird über die vom Distrometer aufgezeichnete Niederschlagsmenge pro Minute NS wie folgt berechnet:

$$E_{kin \text{ zeit}} = E_{kin \text{ mm}} \cdot NS \quad (17)$$

$E_{kin \text{ zeit}}$... zeitbezogene kinetische Energie ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)

$E_{kin \text{ mm}}$... volumenbezogene kinetische Energie ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)

NS ... Niederschlagshöhe pro Minute (mm)

Die Berechnung der zeitbezogenen kinetischen Energie wurde in R für alle Niederschlagsereignisse (siehe Tabelle 8) durchgeführt. Durch Summierung der Minutenwerte ($\sum E_{kin \text{ zeit}}$) ergibt sich die gesamte kinetische Energie eines Niederschlagsereignisses.

Mit den so berechneten Daten wurde wieder eine Regressionsgleichung errechnet, die den Zusammenhang zwischen dem in der Minute gefallenen Niederschlag und der dadurch entstandenen kinetischen Energie beschreiben soll.

Für die Beschreibung dieser Beziehung wurden eine lineare Regressionsgleichung und zusätzlich ein Polynom 2. Grades verwendet. Die Güte des Zusammenhangs wurde wieder über das Bestimmtheitsmaß ausgedrückt.

4.3. Ermittlung der maximalen 30-Minuten-Intensität

Die Berechnung der maximalen 30-Minuten-Intensität (I_{30}) eines Niederschlagsereignisses wurde mit Hilfe der Tabellenkalkulationssoftware MS-Excel durchgeführt.

Wie bereits in Kapitel 2.11.5 beschrieben, werden dabei fortlaufend 30 der minutenweise aufgezeichneten Niederschlagshöhen summiert und der maximale Wert dieser 30-Minuten-Summen ermittelt. Dieser so erhaltene Maximalwert wird verdoppelt, um auf die Einheit $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ zu kommen.

4.4. Mittlere Fallgeschwindigkeit der Regentropfen

Die Grundlage der Berechnung bilden die Rohdatenaufzeichnungen des Parsivel, wobei im ersten Durchgang der Berechnung alle aufgezeichneten Minuten und im zweiten Durchgang nur die verbliebenen Minuten nach Anwendung der Eliminationsbedingung nach Formel (16) herangezogen wurden. Die grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgt bis zu einem Tropfendurchmesser von 5,5 mm.

Das Ablaufschema der Programmierung soll nun kurz erklärt werden.

Die mittlere Fallgeschwindigkeit $mVel$ wurde für jede der 32 Durchmesserklassen D aus den jeweiligen Einzelfallgeschwindigkeiten $TrVel$ der Tropfen berechnet und über die entsprechende Tropfenanzahl TrA gewichtet. Die Berechnung für eine Durchmesserklasse D je Zeitschritt i (eine Minute) wurde wie folgt durchgeführt:

$$mVel_{Di} = \left[\sum_{v=1}^{32} TrA_{Dv} \cdot TrVel_{Dv} \right] / \left[\sum_{v=1}^{32} TrA_{Dv} \right] \quad (18)$$

$mVel_{Di}$... mittlere Fallgeschwindigkeit einer Durchmesserklasse D je Zeitschritt i

TrA_{Dv} ... Tropfenanzahl in Durchmesserklasse D und Fallgeschwindigkeitsklasse v

$TrVel_{Dv}$... Einzeltropfenfallgeschwindigkeit in Durchmesserklasse D und Fallgeschwindigkeitsklasse v

Die mittlere Fallgeschwindigkeit wird grundsätzlich auch vom Distrometer selbst für jede Durchmesserklasse berechnet. Dabei werden die internen Korrekturrechnungen berücksichtigt.

4.5. Vergleich der Niederschlagsmessungen Parsivel – Pluvio

Um das Distrometer hinsichtlich der aufgezeichneten Niederschlagsmenge kontrollieren zu können, wurde eine Vergleichsmessung mit einem wägbaren Niederschlagsmessgerät (Pluvio) durchgeführt, siehe Kapitel 3.2.

Das in Kapitel 3.4.2 beschriebene Datenmaterial wurde händisch mit Hilfe der Tabellenkalkulationssoftware MS Excel ausgewertet. Dabei wurden die aufgezeichneten Minutenwerte der Niederschlagshöhe des Pluvio mit denen des Parsivel verglichen. Die Niederschlagshöhen des Parsivel sind jene Daten, die bereits durch die interne Korrekturrechnung des Distrometers angepasst wurden.

Der erste Schritt der Auswertung war die Auswahl der entsprechenden Ereignisse aus Tabelle 8 und die Gegenüberstellung der Ereignis-Summen der Niederschlagshöhen. Um auch einen Vergleich bei kürzerem Zeitintervall machen zu können, wurden einzelne Stundensummen und auch 5-Minuten-Summen der Niederschlagshöhen gebildet. Die Auswahl der einzelnen Stunden für diesen Vergleich sollte so sein, dass diese sich voneinander in der Niederschlagshöhe unterscheiden und aus verschiedenen Monaten sind. Des Weiteren fiel die Entscheidung immer volle Stunden zu nehmen, da die Windsituation anhand von Stundenmittelwerten zu jeder vollen Stunde aufgezeichnet wurde. Somit war auch eine Analyse der Auswirkung des Windes auf die stündlichen Niederschlagsmessungen möglich (Kapitel 4.6.3).

Der Zusammenhang der Aufzeichnungen beider Geräte wurde durch den Korrelationskoeffizienten ausgedrückt. Dieser beschreibt den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen 2 Variablen mit einer dimensionslosen Zahl zwischen -1 und 1. Bei einem Wert von -1 oder 1 besteht ein vollständig linearer Zusammenhang zwischen den zwei Beobachtungswerten. Beträgt der Wert 0, besteht kein linearer Zusammenhang (Tabelle 10).

Tabelle 10: Korrelationskoeffizient und Stärke des Zusammenhangs (Hagl, 2008)

Korrelationskoeffizient	Stärke des linearen Zusammenhangs
$ r \leq 0,2$	Sehr geringe Korrelation
$0,2 < r \leq 0,5$	Geringe Korrelation
$0,5 < r \leq 0,7$	Mittlere Korrelation
$0,7 < r \leq 0,9$	Hohe Korrelation
$0,9 < r \leq 1$	Sehr hohe Korrelation

In den Grafiken der Software MS Excel wird der Zusammenhang mittels des Bestimmtheitsmaßes R^2 ausgedrückt. Dieses ist der Korrelationskoeffizient zum Quadrat.

4.6. Einfluss des Windes auf die Messungen des Parsivel

4.6.1. Allgemeines zur Windmessung

Für die Auswertung der Windsituation am Messstandort standen für den Untersuchungszeitraum Stundenmittelwerte der Windrichtung und Windgeschwindigkeit zur Verfügung. Somit konnte der Windeinfluss auf ausgewählte Stunden analysiert werden.

4.6.2. Windeinfluss auf die Distrometeraufzeichnungen

Ob der Wind einen Einfluss auf die interne Korrekturrechnung der Tropfenanzahl des Parsivel hat, soll auf Basis von Stundenwerten analysiert werden. Die Auswahl der zu untersuchenden Stunden ist in Kapitel 4.5 beschrieben. Es wurden insgesamt 13 Stunden ausgewertet. Der Zusammenhang zwischen Tropfenanzahl und Windgeschwindigkeit wurde mit Hilfe des Korrelationskoeffizienten beschrieben und auch grafisch dargestellt.

Die in Kapitel 2.4 beschriebene Endfallgeschwindigkeit eines Regentropfens gilt für windstille Verhältnisse. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die von Parsivel gemessene Fallgeschwindigkeit der Regentropfen soll ebenfalls auf Grundlage dieser Stundenwerte betrachtet werden. Von diesen 13 Stunden wurden 4 Stunden mit höherer Niederschlagsintensität ausgewählt, wobei 2 mit geringerer und 2 mit höherer Windgeschwindigkeit betrachtet werden sollten. Diese Auswertungen wurden in R durchgeführt und die Ergebnisse grafisch dargestellt.

4.6.3. Windeinfluss auf die Niederschlagsabweichung des Parsivel

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen der Niederschlagsabweichung des Parsivel vom wägbaren Niederschlagsmesser Pluvio und dem Windeinfluss zu finden, wurde die Windsituation für die jeweiligen Ereignisse per Hand aus den Wind-Datenfiles ermittelt. Für die Analyse der Stundenwerte wurden die jeweils entsprechend aufgezeichneten Stundenmittelwerte der Windsituation herangezogen. Die Ergebnisse wurden grafisch dargestellt.

5. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Teilbereiche präsentiert und interpretiert. Zum besseren Verständnis wird gelegentlich auf die entsprechenden Kapitel im Abschnitt Methodik verwiesen.

5.1. Ergebnisse der Auswertung der Distrometerdaten

Wie bereits in Kapitel 3.5 erwähnt, wurden insgesamt 24 vom Distrometer aufgezeichnete Niederschlagsereignisse ausgewertet, 14 Ereignisse im Jahre 2010 und 10 Ereignisse im Jahre 2011.

5.1.1. Tropfenanzahl und Niederschlagshöhe des Parsivel-Distrometers

Tabelle 11: Übersicht der Tropfenanzahl und Niederschlagshöhe des Distrometers

Ereignis- Nummer	Beginn- Datum	Tropfen- anzahl Parsivel korrigiert	NS-Höhe Parsivel korrigiert (mm)	Tropfen- anzahl Rohdaten	Abweichung (% von Tr-Anzahl Parsivel)	NS-Höhe Rohdaten (mm)	Abweichung (% von NS-Höhe Parsivel)
1	13.06.2010	50356	11,19	65470	30,01	11,33	1,25
2	15.06.2010	189712	15,98	243162	28,17	15,76	-1,38
3	19.06.2010	230272	11,74	363219	57,73	12,38	5,45
4	17.07.2010	93802	16,03	129152	37,69	15,70	-2,06
5	23.07.2010	130641	16,98	201981	54,61	17,40	2,47
6	29.07.2010	160963	18,96	222138	38,01	19,04	0,42
7	02.08.2010	97690	14,58	131379	34,49	15,41	5,69
8	06.08.2010	264244	27,05	394691	49,37	27,80	2,77
9	13.08.2010	34329	8,34	39785	15,89	7,84	-6,00
10	30.08.2010	102009	8,69	149862	46,91	8,90	2,42
11	25.09.2010	189563	17,24	279111	47,24	19,93	15,60
12	17.10.2010	109614	6,03	143471	30,89	5,99	-0,66
13	24.10.2010	113756	7,89	147409	29,58	7,78	-1,39
14	12.11.2010	67770	6,02	98219	44,93	6,11	1,50
15	12.01.2011	271314	20,55	359515	32,51	20,23	-1,56
16	17.03.2011	200665	19,40	311874	55,42	20,27	4,48
17	27.04.2011	49410	6,46	59400	20,22	6,20	-4,02
18	12.05.2011	33374	7,61	45294	35,72	7,48	-1,71
19	14.05.2011	81427	7,87	112446	38,09	7,84	-0,38
20	27.05.2011	286440	36,91	388559	35,65	36,31	-1,63
21	08.06.2011	72129	7,64	100066	38,73	7,77	1,70
22	18.06.2011	88262	7,27	124911	41,52	7,47	2,75
23	23.06.2011	96748	17,09	117558	21,51	16,42	-3,92
24	05.07.2011	103572	8,36	138358	33,59	8,25	-1,32

Tabelle 11 beinhaltet die vom Distrometer Parsivel aufgezeichnete Tropfenanzahl der Rohdaten und die daraus berechnete Niederschlagshöhe, sowie die von Parsivel mittels interner Korrekturrechnungen korrigierte Tropfenanzahl und die daraus ermittelte korrigierte Niederschlagshöhe. Die Abweichung der Tropfenanzahl sowie die Abweichung der Niederschlagshöhe der Rohdaten von den korrigierten Daten sind ebenfalls ersichtlich.

Die größte Abweichung der Tropfenanzahl der Rohdaten gegenüber der von Parsivel korrigierten liegt bei 57,73% bei Ereignis Nummer 3. Die größte Abweichung der Niederschlagshöhe findet sich bei Ereignis Nummer 11, wobei hier die Niederschlagshöhe der Rohdaten um 15,6% über der korrigierten Niederschlagshöhe liegt, was einer Höhe von 2,69 mm Niederschlag entspricht. Die grafische Darstellung der Niederschlagshöhe und der Tropfenanzahl findet sich in Abbildung 20.

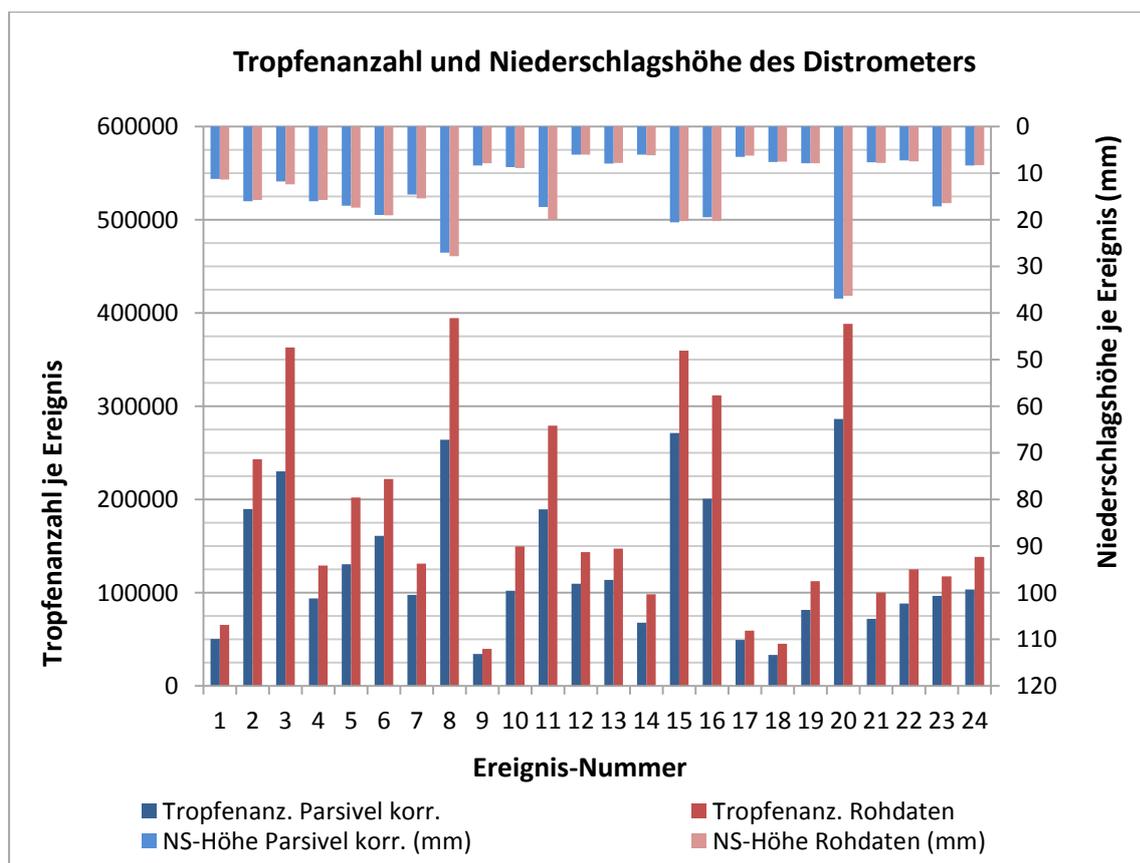


Abbildung 20: Darstellung der Tropfenanzahl und Niederschlagshöhe des Distrometers

Die Tropfenanzahl der Rohdaten liegt immer über der vom Distrometer korrigierten Tropfenanzahl. Die Niederschlagshöhe der Rohdaten hingegen ist nicht immer größer als die von Parsivel über Korrekturrechnungen angepasste, sondern in genau der Hälfte aller Fälle – bei 12 Ereignissen – geringer. Eine mögliche Erklärung dafür ist die Korrektur der Tropfengröße aufgrund von Randzonenfehlern (siehe Kapitel 4.1.7).

Aufgrund des sehr beachtlichen Unterschiedes zwischen der Tropfenanzahl der Rohdaten und der vom Distrometer korrigierten Tropfenanzahl, wurden zur Erstellung der Regressionsgleichung (Kapitel 4.1.8) nur bestimmte Messminuten ausgewählt. Somit konnten die Korrekturrechnungen des Parsivel zumindest teilweise indirekt berücksichtigt werden.

Die minütliche Darstellung der Tropfenanzahl aller 24 Niederschlagsereignisse befindet sich im Anhang.

5.1.2. Einfluss des Windes auf die Tropfenanzahl des Distrometers

Die Auswertung der ausgewählten Stunden zeigt, dass mit zunehmender Windgeschwindigkeit die Differenz zwischen der vom Distrometer korrigierten Tropfenanzahl und der Tropfenanzahl der Rohdaten zunimmt. Anders ausgedrückt bedeutet dies, je höher die Windgeschwindigkeit ist, desto mehr Tropfen werden vom Distrometer korrigiert bzw. ausgeschieden.

Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,8 und zeigt somit einen guten linearen Zusammenhang zwischen der Differenz in der Tropfenanzahl und der Windgeschwindigkeit (Abbildung 21).

Ein Zusammenhang zwischen Tropfenanzahl und Windrichtung konnte nicht festgestellt werden.

Tabelle 12 gibt einen Überblick über die für die Analyse ausgewählten Stunden und die Ergebnisse dazu.

Tabelle 12: Ausgewählte Stunden, Tropfenanzahl und Windeinfluss

Datum, Uhrzeit			Tr.-Anzahl	Tr.-Anzahl	Differenz Tr.-Anzahl	v_Wind (km/h)	Windricht. (°)	Abweichung von Idealwindr. (°)
Tag	Zeit von	bis	aus Rohdaten ermittelt	Parsivel korrigiert	Δ zu Rohdaten (%)	Std.-Mittelwerte		
20100613	18:01	19:00	15123	13280	-12,19	8,64	137	27
20100616	08:01	09:00	29660	25068	-15,48	6,12	82	28
20100616	09:01	10:00	20684	16359	-20,91	9,72	85	25
20100616	10:01	11:00	22391	17762	-20,67	17,64	73	37
20100717	21:01	22:00	24218	21609	-10,77	7,20	216	74
20100718	00:01	01:00	48110	32106	-33,27	21,60	261	29
20100723	20:01	21:00	30292	22330	-26,28	16,20	254	36
20100723	21:01	22:00	30800	20109	-34,71	18,36	260	30
20100729	13:03	14:00	24353	19159	-21,33	18,00	291	1
20100806	23:01	00:00	18835	13857	-26,43	12,60	257	33
20100807	08:01	09:00	35033	25315	-27,74	14,76	256	34
20100807	09:01	10:00	35731	26775	-25,07	14,04	235	55
20100925	18:01	19:00	24998	20357	-18,57	7,56	228	62

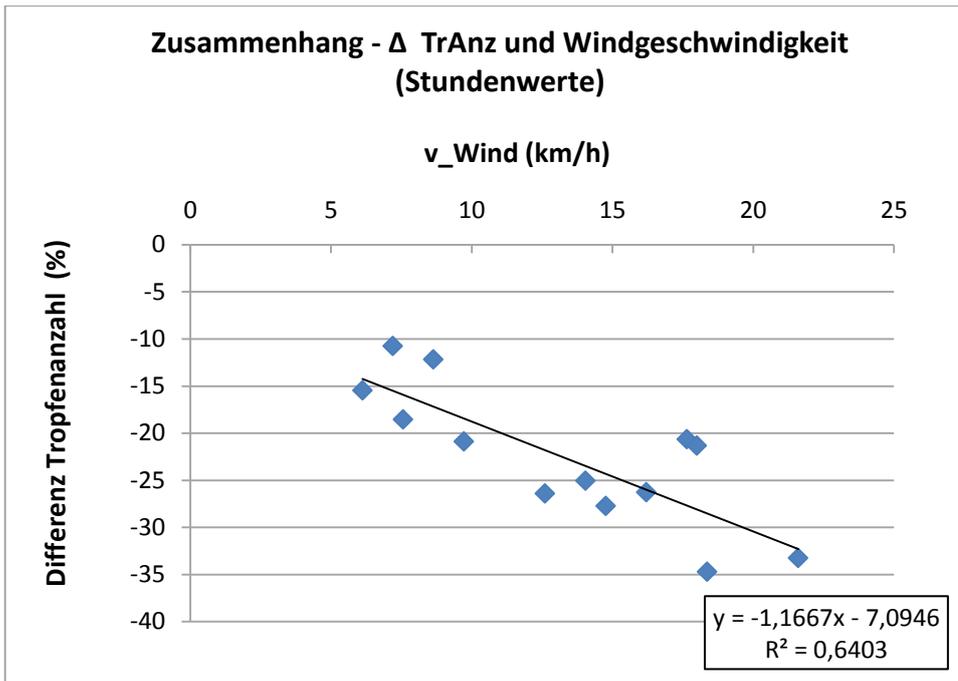


Abbildung 21: Zusammenhang Windgeschwindigkeit und Tropfenanzahldifferenz

Abbildung 22 zeigt den Einfluss der Windgeschwindigkeit und -richtung auf die Differenz der Tropfenanzahl des Parsivel. In dieser Grafik lässt sich ebenfalls der zuvor beschriebene Zusammenhang mit der Windgeschwindigkeit erkennen. Ein Zusammenhang mit der Windrichtung konnte hingegen nicht gefunden werden. Eine Skizze zur Idealwindrichtung zeigt die Abbildung 14 (Seite 30).

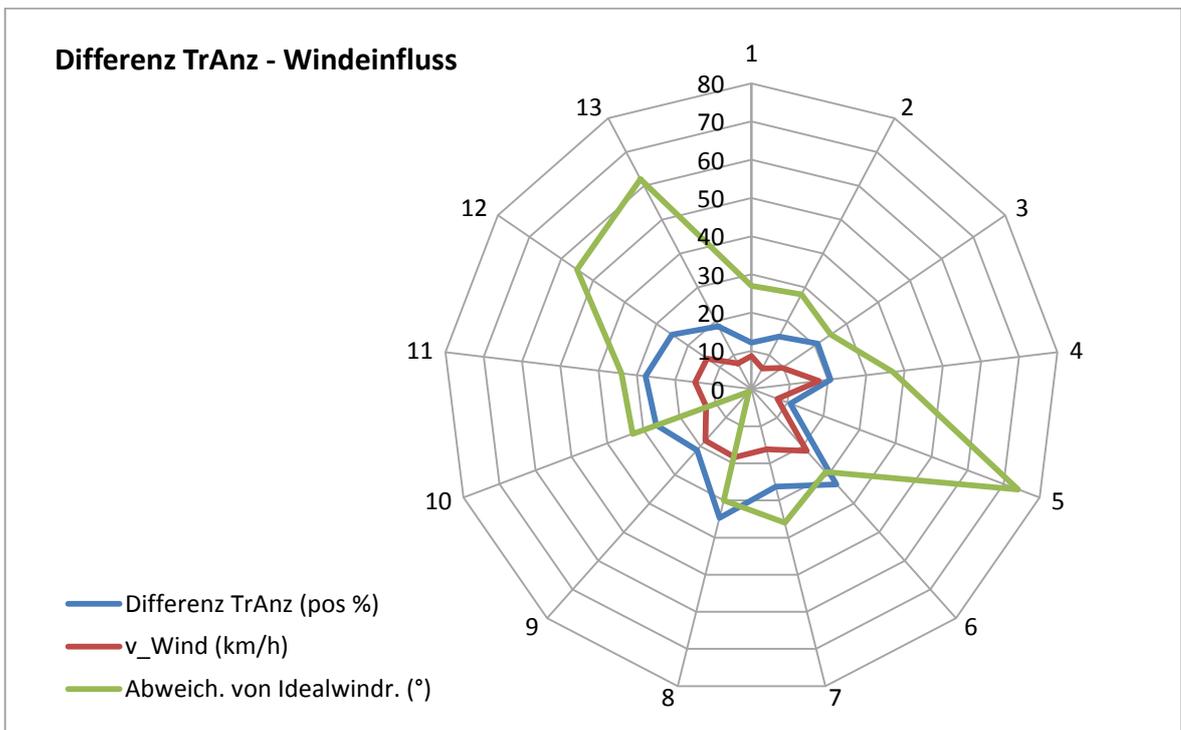


Abbildung 22: Einfluss Windgeschwindigkeit und -richtung auf die Tropfenanzahl

5.1.3. Zusammenhang Endfallgeschwindigkeit und Tropfendurchmesser

Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen den Zusammenhang zwischen der von Parsivel detektierten Größe der Regentropfen und der jeweiligen mittleren Endfallgeschwindigkeit, sowie auf der Sekundärachse die Tropfenanzahl in der jeweiligen Durchmesserklasse. Die Sekundärachse mit der Tropfenanzahl ist dabei logarithmisch skaliert. Die Methodik der Fallgeschwindigkeitsauswertung wird in Kapitel 4.4 beschrieben.

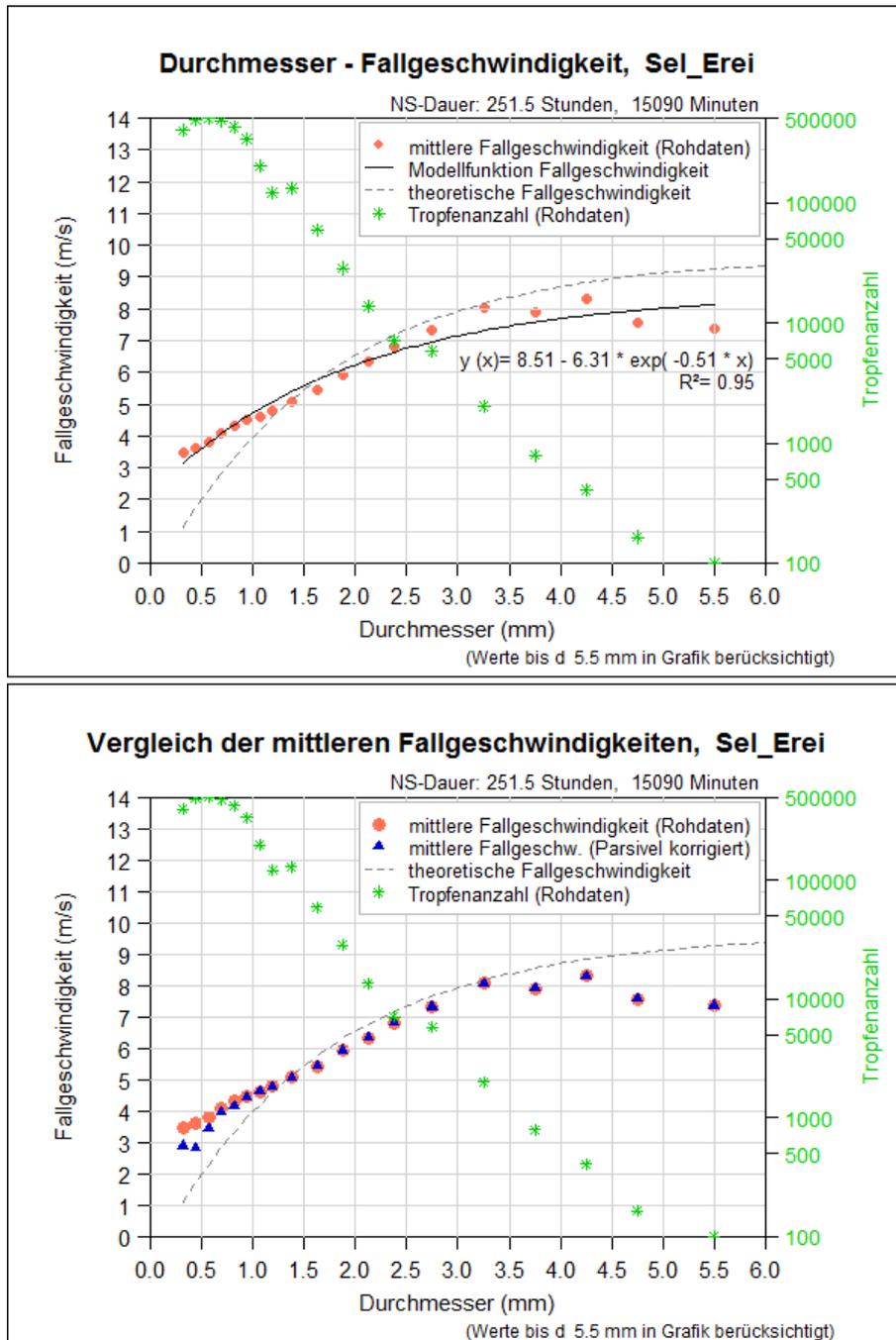


Abbildung 23: Endfallgeschwindigkeit und Tropfendurchmesser der ausgewählten Ereignisse (15090 Minuten)

In Abbildung 23 fließen die 13 für das Regressionsmodell (Kapitel 4.1) ausgewählten Niederschlagsereignisse mit insgesamt 15090 Messminuten ein. Die maximale Tropfenanzahl von 504320 Tropfen wird bei einem Tropfendurchmesser von 0,562 mm erreicht, die minimale Tropfenanzahl von 100 Tropfen bei einem Durchmesser von 5,5 mm.

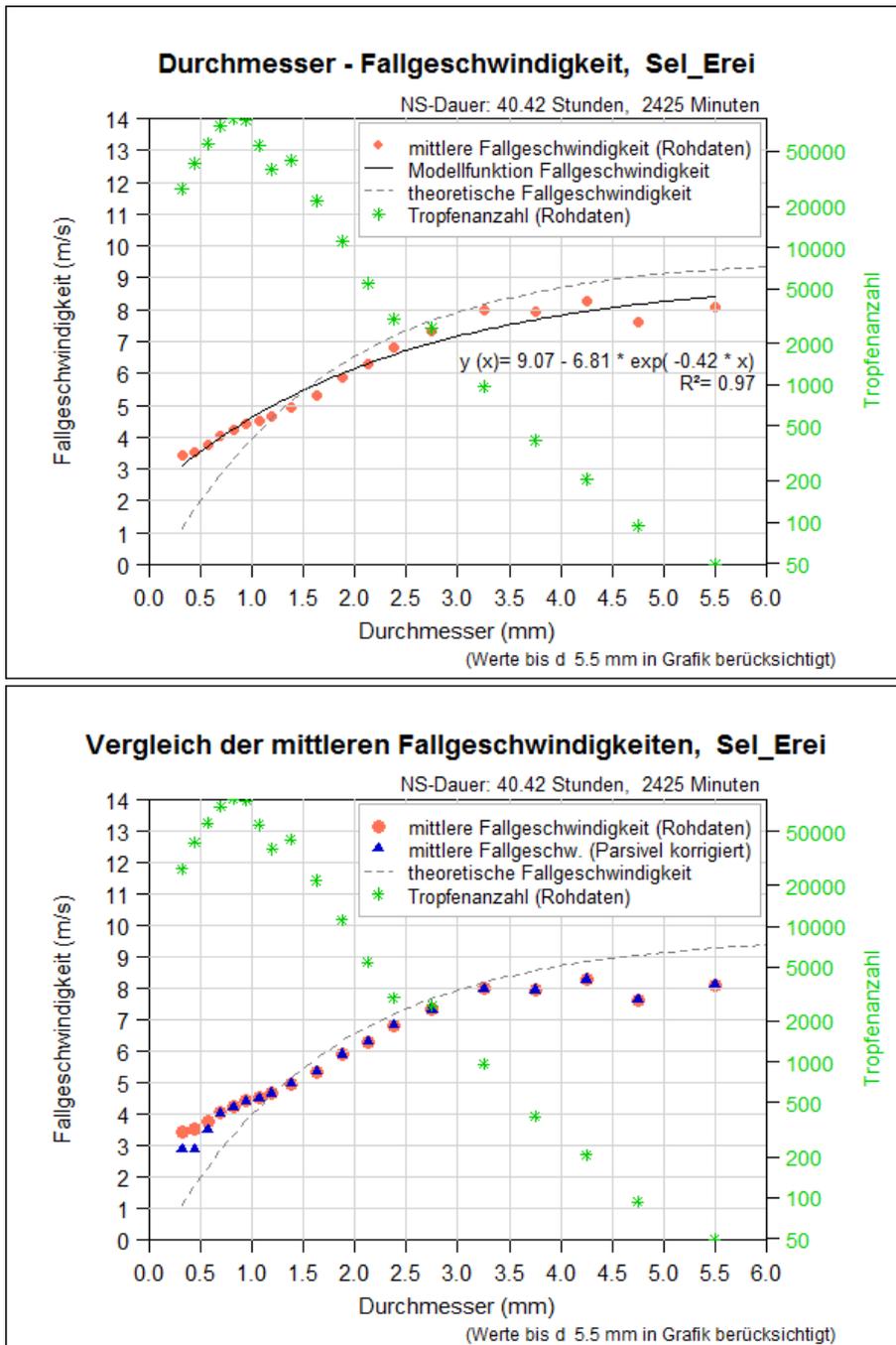


Abbildung 24: Endfallgeschwindigkeit und Tropfendurchmesser der ausgewählten Ereignisse und ausgewählten Minuten (2425 Minuten)

Datengrundlage für Abbildung 24 sind ebenfalls diese 13 Niederschlagsereignisse, wobei aber all jene Messminuten entfernt wurden, bei denen die Tropfenanzahl der Rohdaten mehr als 20 Prozent über der von Parsivel mittels Korrekturrechnungen korrigierten Tropfenanzahl lagen (Tabelle 9). Die maximale Tropfenanzahl von 86638 Tropfen liegt bei einem Tropfendurchmesser von 0,812 mm. Die minimale Tropfenanzahl von 49 Tropfen liegt bei 5,5 mm.

Die in beiden Abbildungen durch rote Punkte dargestellte mittlere Fallgeschwindigkeit wurde in R aus den Rohdaten – sprich den einzelnen Regentropfenfallgeschwindigkeiten – berechnet (Kapitel 4.4). Die vom Distrometer über interne Korrekturrechnungen (Kapitel 4.1.7) ermittelte mittlere Fallgeschwindigkeit wird mit blauen Dreiecken dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Parsivel vor allem bei den ersten drei Durchmesserklassen die Fallgeschwindigkeiten nach unten korrigiert. Eine mögliche Begründung wäre eine Korrektur aufgrund von Randzonenfehlern (Kapitel 4.1.7).

Betrachtet man Abbildung 23 so liegen die mittleren Fallgeschwindigkeiten aus den Rohdaten und den von Parsivel korrigierten Daten bei Tropfendurchmessern ab 0,937 mm übereinander. Die Grafik der für die Regressionsgleichung ausgewählten Minuten (Abbildung 24) zeigt eine Überlagerung bereits ab einem Tropfendurchmesser von 0,687 und damit eine noch bessere Übereinstimmung der mittleren Fallgeschwindigkeiten. Dies bekräftigt wiederum die Tatsache, dass nicht alle Messminuten in der Regressionsgleichung berücksichtigt wurden, sondern nur ausgewählte Minuten.

In beiden Abbildungen wird die theoretische Fallgeschwindigkeit nach Atlas et al. (1973) hellgrau strichliert dargestellt (Kapitel 2.4).

Ebenfalls dargestellt wird die aus den Rohdaten ermittelte Regressionsfunktion der Fallgeschwindigkeit – in den Abbildungen „Modellfunktion Fallgeschwindigkeit“ genannt. Der grundsätzliche Aufbau dieser nichtlinearen Regressionsgleichung wurde von Atlas et al. (1973) übernommen und die einzelnen Parameter in R berechnet. Es handelt sich hierbei um eine Potenzfunktion mit drei Variablen.

Der Vergleich zwischen theoretischer Fallgeschwindigkeit und der aus den Rohdaten ermittelten Modellfunktion zeigt deutliche Unterschiede in den unteren und auch oberen Durchmesserklassen, wobei die Abweichung im Bereich von 0,5 mm am größten ist.

5.1.4. Windeinfluss auf die Endfallgeschwindigkeit der Tropfen

Dieses Kapitel zeigt die Ergebnisse des Windeinflusses auf die mittlere Fallgeschwindigkeit der einzelnen Durchmesserklassen, wobei einzelne Stunden betrachtet werden (siehe Tabelle 12, Seite 54). Eine Erklärung zur Auswahl der einzelnen Stunden findet sich in Kapitel 4.6.2. Die Darstellung der Abbildungen erfolgt analog zu Kapitel 5.1.3. Die stündliche mittlere Windgeschwindigkeit und die Niederschlagshöhe sind jeweils unter den Abbildungen ersichtlich.

Damit auch Tropfenfallgeschwindigkeiten $> 10,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ berücksichtigt werden, wurden alle Fallgeschwindigkeitsklassen zur Auswertung herangezogen und die Rohdaten somit nicht bereinigt (vgl. Kapitel 4.1.1).

Die Abbildung 25 zeigt die stündliche Auswertung der mittleren Fallgeschwindigkeiten der einzelnen Durchmesserklassen vom 17.7.2010 von 21:01 Uhr bis 22:00 Uhr. In diese Auswertung fließen 60 Messminuten ein. Der Stundenmittelwert der Windgeschwindigkeit beträgt $7,20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ und die Niederschlagsmessung des Parsivel weist eine Höhe von $3,80 \text{ mm}$ Niederschlag auf.

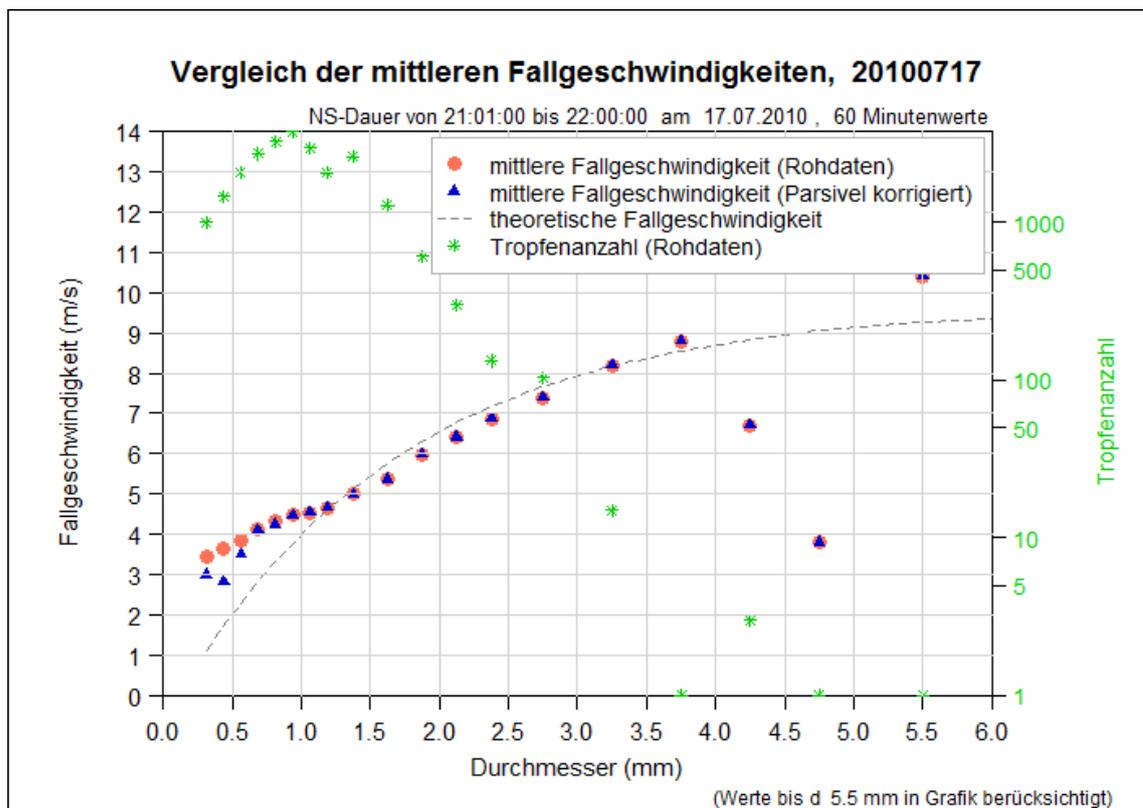


Abbildung 25: Stündliche Auswertung der mittleren Fallgeschwindigkeiten, $v_{\text{Wind}} = 7,20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, NS-Höhe = $3,80 \text{ mm}$

Die Abbildung 26 zeigt die Auswertung vom 13.6.2010 von 18:01 Uhr bis 19:00 Uhr mit ebenfalls 60 Messminuten. Der Stundenmittelwert der Windgeschwindigkeit beträgt $8,64 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ und die Niederschlagshöhe $6,96 \text{ mm}$.

Die Windgeschwindigkeit unterscheidet sich somit kaum von der in Abbildung 25 angegebenen Windgeschwindigkeit, die Niederschlagshöhe hingegen sehr wohl.

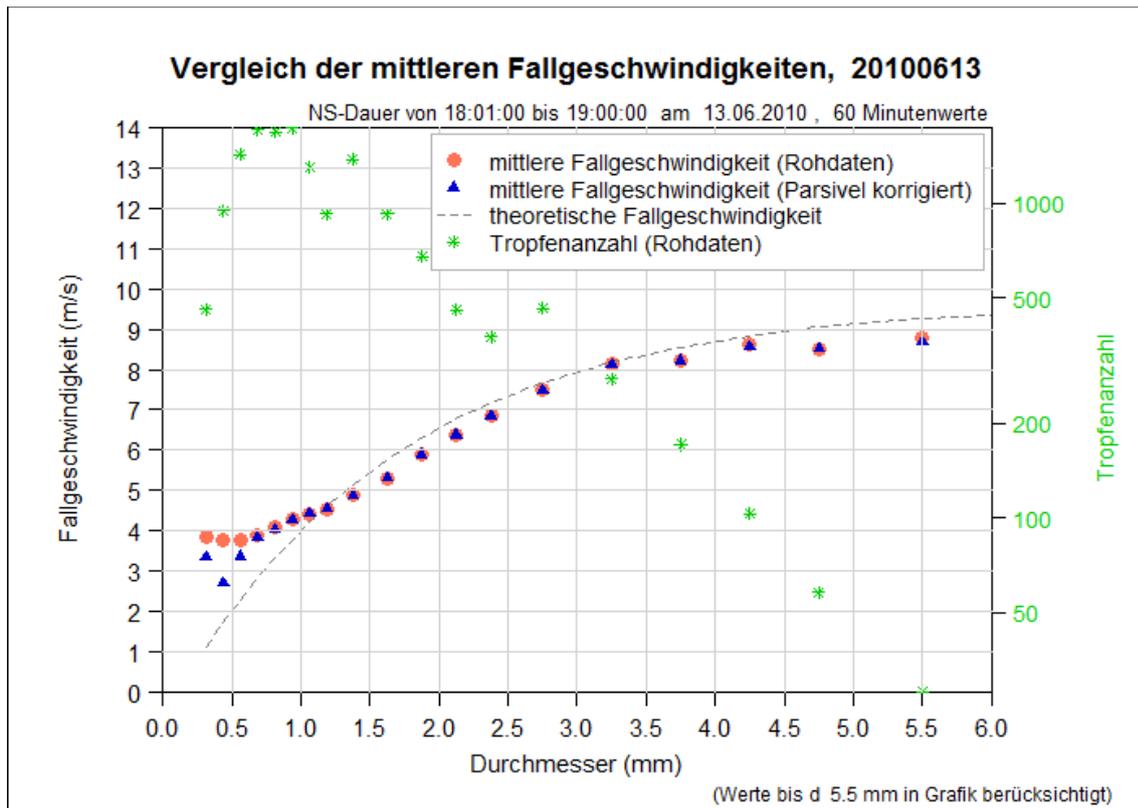


Abbildung 26: Stündliche Auswertung der mittleren Fallgeschwindigkeiten, $v_{\text{Wind}} = 8,64 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, NS-Höhe = $6,96 \text{ mm}$

Die Abbildung 27 zeigt die Auswertung vom 29.7.2010 von 13:03 Uhr bis 14:00 Uhr mit 57 Messminuten. Die ersten 3 Messminuten fehlen, weil dieses Niederschlagsereignis erst um 13:03 begann. Dieses Ereignis wurde in die Stundenanalyse miteinbezogen, weil es mit 7,49 mm die höchste Niederschlagshöhe von allen Stundenwerten aufweist. Der Stundenmittelwert der Windgeschwindigkeit beträgt $18,00 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

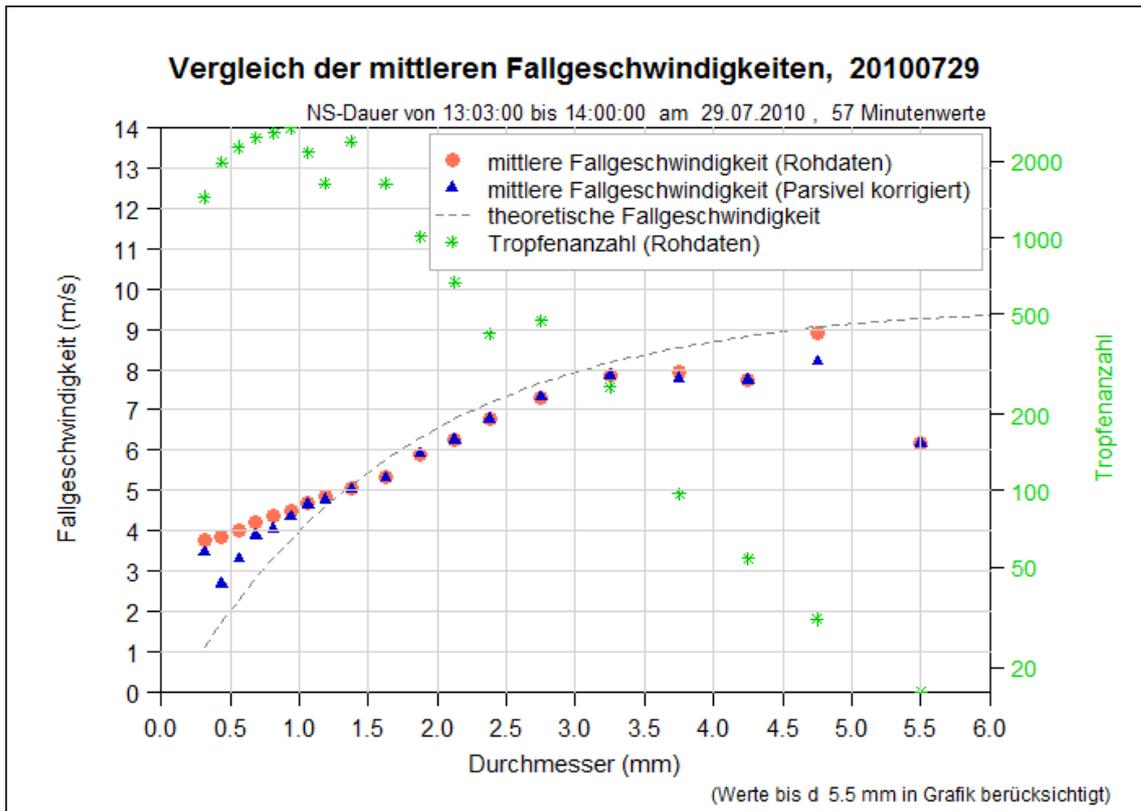


Abbildung 27: Stündliche Auswertung der mittleren Fallgeschwindigkeiten, $v_{\text{Wind}} = 18,00 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, NS-Höhe = 7,49 mm

Die Abbildung 28 zeigt die Messdatenauswertung vom 18.7.2010 von 00:01 Uhr bis 01:00 Uhr mit ebenfalls 60 Messminuten. Der Stundenmittelwert der Windgeschwindigkeit beträgt $21,60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ und ist somit der Höchstwert dieses Stundenvergleichs. Die Niederschlagsaufzeichnung des Parsivel-Distrometers beträgt $6,41 \text{ mm}$.

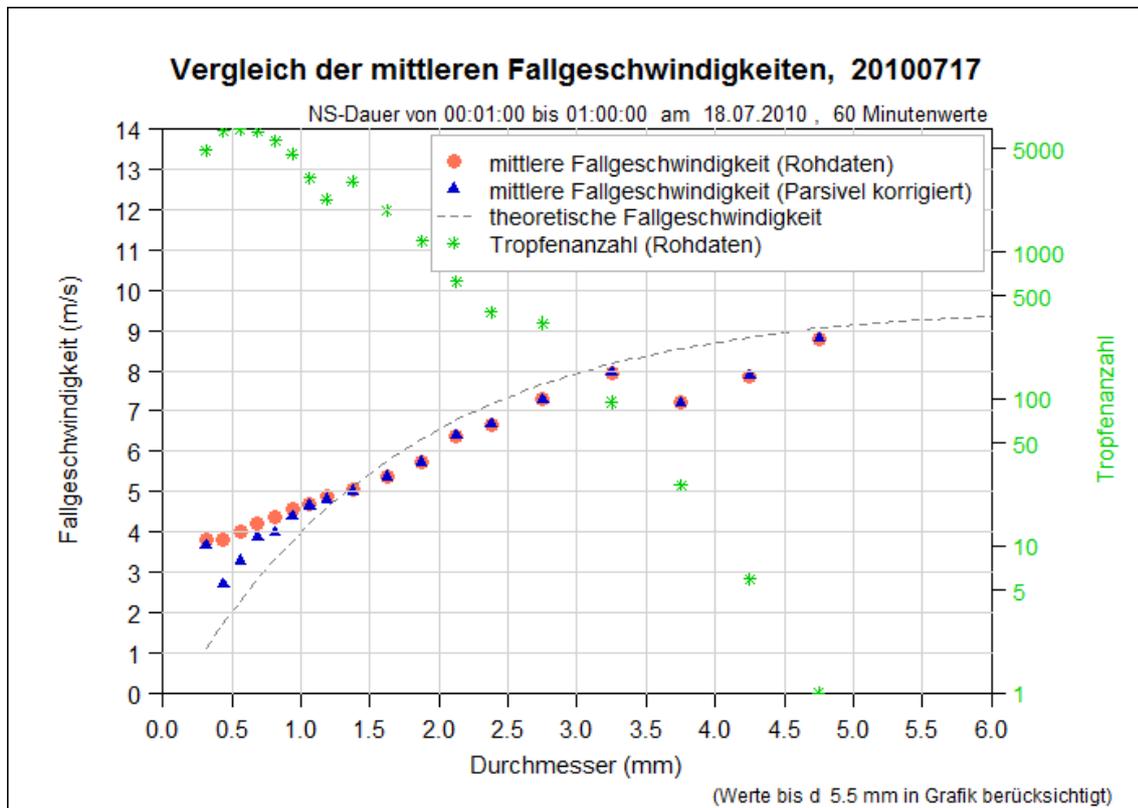


Abbildung 28: Stündliche Auswertung der mittleren Fallgeschwindigkeiten, $v_{\text{Wind}} = 21,60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, NS-Höhe = $6,41 \text{ mm}$

Vergleicht man die aus den Rohdaten ermittelte mittlere Fallgeschwindigkeit (rote Punkte) mit der vom Distrometer korrigierten mittleren Fallgeschwindigkeit der Regentropfen (blaue Dreiecke), so lassen sich deutliche Differenzen vor allem im Bereich der ersten Durchmesserklassen erkennen. Dies trifft sowohl bei geringer (Abbildung 25, Abbildung 26) als auch bei höherer Windgeschwindigkeit (Abbildung 27, Abbildung 28) zu. Bei geringer Windgeschwindigkeit werden die Fallgeschwindigkeiten der ersten drei Durchmesserklassen angepasst, bei höherer Windgeschwindigkeit die der ersten sechs.

Die Ursache für die Fallgeschwindigkeitskorrektur könnten die Randzonenfehler sein (Kapitel 4.1.7). So werden größere Partikel mit entsprechend hoher Fallgeschwindigkeit am Rand des Laserstrahls als kleinere Partikel mit höherer

Fallgeschwindigkeit detektiert. Wie bereits in Kapitel 5.1.2 beschrieben, werden mit steigender Windgeschwindigkeit auch mehr Tropfen in der Rohdatenmatrix über interne Korrekturrechnungen angepasst bzw. entfernt. Mit der Änderung der Tropfenanzahl ändert sich somit auch die entsprechende mittlere Fallgeschwindigkeit.

Betrachtet man die vom Distrometer über Korrekturrechnungen ermittelte mittlere Fallgeschwindigkeit (blaue Dreiecke), so liegt diese bis zur Durchmesserklasse 3,25 mm – unabhängig von der Windgeschwindigkeit – im Bereich der theoretischen Fallgeschwindigkeit (Kapitel 2.4). Ausgenommen davon ist die erste Durchmesserklasse. Bei höheren Windgeschwindigkeiten hingegen zeigen sich ab Durchmesserklasse 3,75 mm geringere Fallgeschwindigkeiten im Vergleich zur theoretischen Funktion, wobei hier die teilweise geringe Tropfenanzahl beachtet werden sollte.

Diese Analyse zeigt, dass eine höhere Windgeschwindigkeit nicht automatisch eine höhere Fallgeschwindigkeit der Regentropfen zur Folge hat.

Da die Windgeschwindigkeit ein Mittelwert für die jeweilige Stunde ist, lassen sich aufgrund der zeitlichen Auflösung keine genaueren Analysen durchführen und keine genaueren Aussagen zum Einfluss des Windes auf die Fallgeschwindigkeit der Regentropfen machen.

5.2. Regressionsmodell zu volumenbezogener kinetischer Energie und Niederschlagsintensität

Die Grundlage zur Erstellung des Regressionsmodells bilden die Rohdatenaufzeichnungen der 13 ausgewählten Niederschlagsereignisse mit insgesamt 15090 Messminuten (Abbildung 29, links).

Von diesen 15090 Messminuten (Abbildung 29 links) verbleiben für das Regressionsmodell 1108 Minutenwerte (Abbildung 29 rechts). Die Auswahlkriterien und die Berechnung der Regressionsgleichung werden in Kapitel 4.1.8 beschrieben.

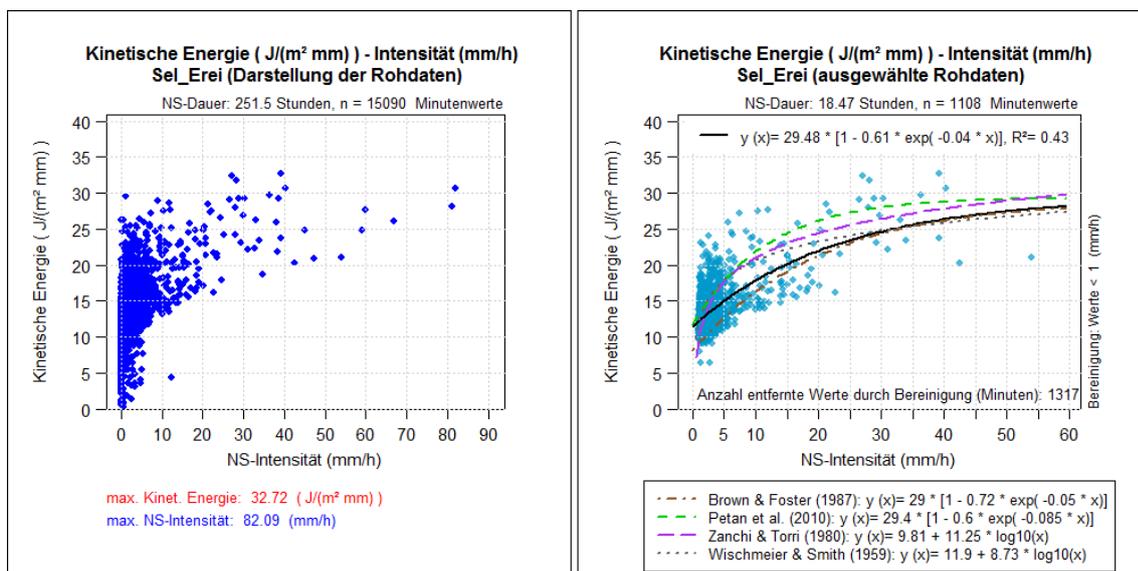


Abbildung 29: Regressionsmodell, volumenbezogene kinetische Energie ($E_{kin\ mm}$) und Niederschlagsintensität

Die ermittelte Formel zur Berechnung der kinetischen Energie je mm Niederschlag lautet wie folgt:

$$E_{kin\ mm} = 29,48 \cdot [1 - 0,61 \cdot \exp(-0,04 \cdot I)] \quad (19)$$

Mit dieser Regressionsgleichung ist es möglich, die volumenbezogene kinetische Energie $E_{kin\ mm}$ aus der Niederschlagsintensität I für den Standort Petzenkirchen in Niederösterreich zu berechnen. Die kinetische Energie ist dabei auf einen Quadratmeter und einen Millimeter Niederschlag bezogen und auf der Ordinate dargestellt. Die Niederschlagsintensität in der Einheit Millimeter pro Stunde befindet sich auf der Abszisse (Abbildung 29).

Die aus den Messdaten ermittelte Regressionsfunktion liegt dabei zwischen den von anderen Autoren ermittelten, wobei sie im oberen Bereich sehr nahe an der Funktion von Brown und Foster (1987) verläuft (Abbildung 29, rechts).

Alle Funktionen sind durch einen degressiven Verlauf gekennzeichnet. Das bedeutet, die Zunahme der kinetischen Energie wird mit steigender Niederschlagsintensität geringer.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Regressionsgleichungen sind auf unterschiedliche Tropfengrößenverteilungen in verschiedenen Messregionen zurückzuführen. So hat die Gleichung von Brown & Foster (1987) ihren Ursprung in den USA, ebenso die von Wischmeier & Smith (1959). Die Messungen von Zanchi & Torri (1980) wurden in Italien durchgeführt (Salles et al., 2002). Die Tropfengrößenverteilungen dieser Studien wurden mittels „Flour Pellet Method“ ermittelt (Dijk et al., 2002); (Salles et al., 2002).

Petan et al. (2010) beziehen die Messungen auf den südwestlichen Teil von Slowenien. Die Tropfengrößenverteilung wurde dabei mittels Distrometer aufgezeichnet.

5.3. Niederschlagsintensität, Tropfendurchmesser und Tropfenanzahl

Die Abbildung 30 links zeigt den Zusammenhang zwischen der Niederschlagsintensität und dem mittleren Tropfendurchmesser der für die Regression ausgewählten Rohdaten. In der Grafik ist zu erkennen, dass die Streuung des mittleren Tropfendurchmessers mit zunehmender Niederschlagsintensität geringer wird. Es ist auch die Tendenz erkennbar, dass der mittlere Tropfendurchmesser mit zunehmender Niederschlagsintensität steigt.

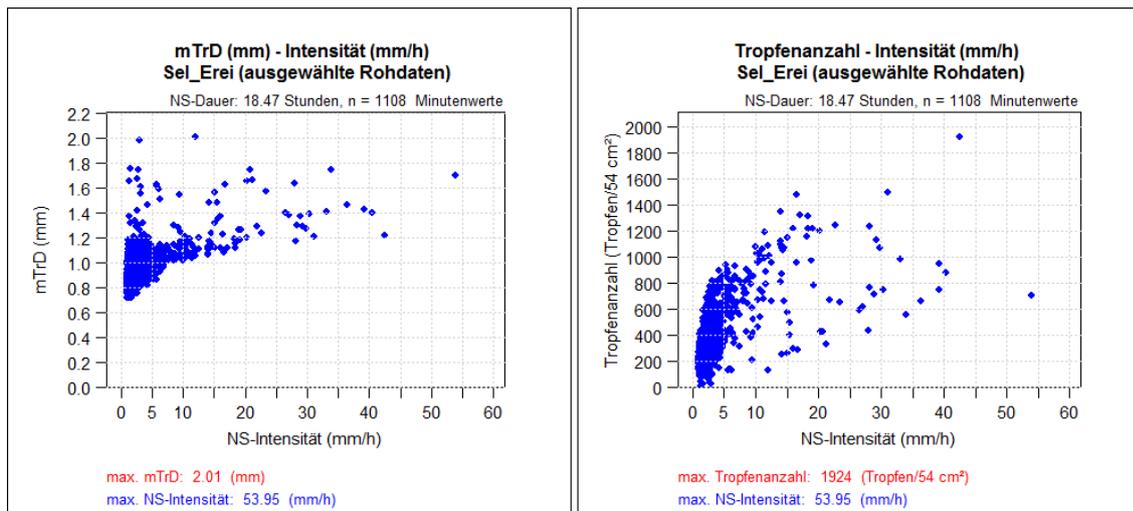


Abbildung 30: Niederschlagsintensität – mTrD bzw. Tropfenanzahl

In Abbildung 30 rechts werden die durch das Laserband gefallenen und detektierten Tropfen mit der Niederschlagsintensität in Verbindung gebracht. Auf den ersten Blick ist nur eine Punktwolke erkennbar. Betrachtet man jedoch beide Grafiken und eine Niederschlagsintensität über $30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, so lässt sich folgender Sachverhalt feststellen: Bei einer Intensität von circa $40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ passieren ungefähr 900 Tropfen mit einem mittleren Tropfendurchmesser von 1,4 mm das Laserband. Bei einer Intensität von circa $42 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ sind es 1924 Tropfen mit einem mittleren Tropfendurchmesser von rund 1,2 mm. Bei einer Intensität von gerundeten $54 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ sind es circa 700 Tropfen mit einem mittleren Durchmesser von 1,7 mm.

Die gleiche Niederschlagsintensität kann sich somit ergeben – durch eine geringere Menge größerer Tropfen oder eine höhere Anzahl kleinerer Tropfen. Wobei aber ab einer Intensität von circa $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ die Tropfen grundsätzlich größer sind und der mittlere Tropfendurchmesser über 1,1 mm liegt.

An dieser Stelle sei noch anzumerken, dass der mittlere Tropfendurchmesser einen Mittelwert aller gefallenen Tropfen in der jeweiligen Messminute darstellt (Kapitel 4.1.2).

5.4. Zusammenhang zeitbezogene kinetische Energie und Niederschlagsintensität

Die auf Grundlage der gefallenen Niederschlagsmenge pro Minute (Aufzeichnungen des Parsivel unter Berücksichtigung der Korrekturrechnungen) berechnete kinetische Energie ist in Abbildung 31 rechts dargestellt. Die Berechnung wurde, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, mittels Gleichung (17) (Seite 46) für alle 24 Niederschlagsereignisse mit insgesamt 21572 minütlichen Datentelegrammen durchgeführt.

Die Güte des Zusammenhangs zwischen zeitbezogener kinetischer Energie – also der kinetischen Energie in einer Minute – und der Niederschlagsintensität I kann über eine lineare Funktion und eine polynomische Funktion zweiten Grades ausgedrückt werden. Die Polynomfunktion besitzt ein Bestimmtheitsmaß von 0,991 und beschreibt den Zusammenhang der beiden Variablen noch etwas besser als die lineare Funktion mit 0,951.

Lineare Funktion:
$$E_{kin\ zeit} = 0,381 \cdot I - 0,125 \quad (20)$$

Polynomfunktion:
$$E_{kin\ zeit} = 0,003 \cdot I^2 + 0,277 \cdot I - 0,049 \quad (21)$$

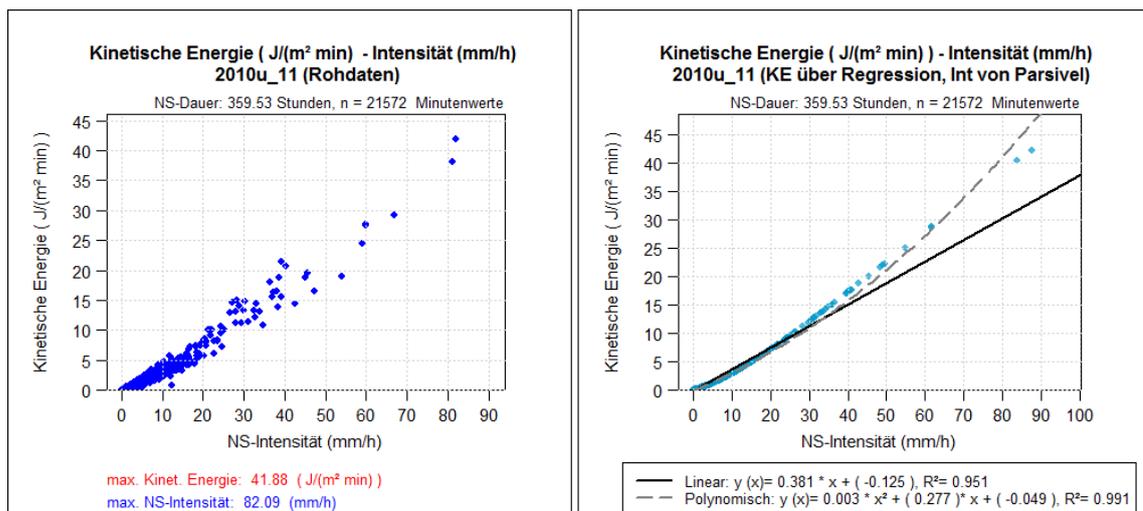


Abbildung 31: Zusammenhang zwischen zeitbezogener kinetischer Energie ($E_{kin\ zeit}$) und Niederschlagsintensität

Die Abbildung 31 links zeigt ebenfalls alle 21572 Minutenwerte, wobei aber die zeitbezogene kinetische Energie und die Niederschlagsintensität aus den Rohdaten – also den detektierten Regentropfen ohne Korrekturrechnung – berechnet wurden. Deshalb zeigt die linke Grafik auch eine etwas breitere Streuung der minütlichen kinetischen Energie als die rechte, bei welcher – wie zuvor bereits erwähnt – die kinetische Energie nach Formel (17) über die korrigierte Niederschlagsintensität des Parsivel anhand der Regressionsgleichung (Formel 19, Seite 64) berechnet wurde.

5.5. Kinetische Energie der Einzelregen

Tabelle 13: Summierte kinetische Energie der Einzelregen (E_e)

Ereignis- Nummer	Beginn- Datum	NS-Höhe Parsivel (mm)	Dauer (min)	Σ Kinetische Energie (J/m ²)				
				Rohdaten	Winkel- hofer	Brown & Foster	Petan	Zanchi & Torri
1	13.06.2010	11,19	304	253,96	209,69	197,06	244,72	226,95
2	15.06.2010	15,98	1247	180,53	203,18	157,65	226,11	175,43
3	19.06.2010	11,74	1973	128,20	140,64	103,56	149,69	80,71
4	17.07.2010	16,03	471	254,59	271,24	244,92	315,08	295,02
5	23.07.2010	16,98	920	304,65	312,95	288,06	352,39	323,28
6	29.07.2010	18,96	1544	297,94	283,14	242,37	327,32	264,02
7	02.08.2010	14,58	597	295,41	259,33	236,26	295,54	277,69
8	06.08.2010	27,05	1468	375,20	357,25	285,47	407,17	349,60
9	13.08.2010	8,34	380	154,84	154,03	142,58	174,25	155,96
10	30.08.2010	8,69	984	115,86	108,91	83,25	119,72	86,34
11	25.09.2010	17,24	1264	252,69	216,94	166,78	239,95	188,85
12	17.10.2010	6,03	1013	59,32	72,12	53,14	76,82	42,73
13	24.10.2010	7,89	1082	84,94	94,67	69,79	100,88	57,62
14	12.11.2010	6,02	552	81,33	77,22	60,28	86,24	66,24
15	12.01.2011	20,55	1867	242,74	252,82	190,68	275,04	197,80
16	17.03.2011	19,40	1482	287,63	273,94	226,43	308,68	239,92
17	27.04.2011	6,46	291	84,99	87,58	71,38	101,33	91,08
18	12.05.2011	7,61	170	140,24	114,41	99,14	136,32	129,28
19	14.05.2011	7,87	749	103,56	104,29	83,14	116,83	85,97
20	27.05.2011	36,91	1600	553,72	541,60	459,15	625,30	561,38
21	08.06.2011	7,64	367	104,35	98,82	77,71	111,35	95,62
22	18.06.2011	7,27	562	88,99	91,50	70,38	101,20	78,12
23	23.06.2011	17,09	353	260,40	295,19	272,31	355,77	333,15
24	05.07.2011	8,36	332	95,54	126,18	109,57	150,07	136,69
Summen:		325,88	21572	4801,62	4747,66	3991,06	5397,78	4539,45

Die Tabelle 13 zeigt die über die vier verschiedenen Regressionsformeln (Abbildung 29) ermittelte und minutenweise summierte kinetische Energie (E_e) aller 24 ausgewerteten Niederschlagsereignisse. Die Niederschlagsintensität beruht dabei auf den Aufzeichnungen des Parsivel, wobei hier die Korrekturrechnungen bereits berücksichtigt sind. Die mit der Formel von Petan et al. (2010) berechneten Ergebnisse liegen bei allen Ereignissen über den anderen.

Die aus den Rohdaten – also ohne Korrekturrechnungen – berechnete kinetische Energie ist ebenfalls in der Tabelle zu finden. In Abbildung 32 werden die Ergebnisse grafisch dargestellt.

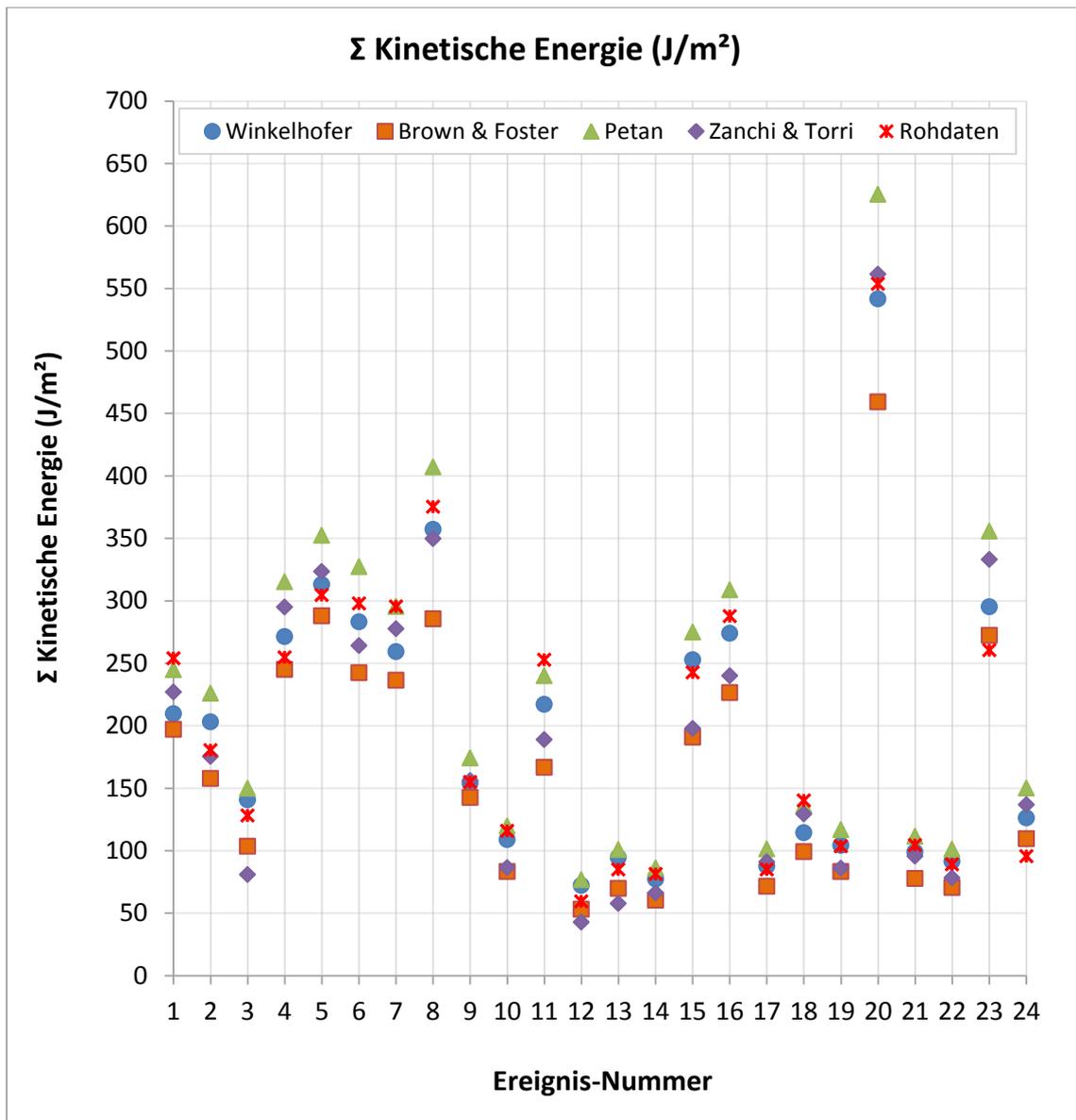


Abbildung 32: Kinetische Energie der 24 Niederschlagsereignisse

Das Niederschlagsereignis mit der Nummer 20 hat mit 36,91 mm die größte Niederschlagshöhe und auch die höchste Summe an kinetischer Energie. Die Abbildung 33 veranschaulicht den zeitlichen Verlauf der kinetischen Energie dieses Ereignisses. Bemerkenswert sind die hohe Niederschlagsintensität und somit auch die sich daraus ergebende hohe kinetische Energie gegen 17:30 Uhr.

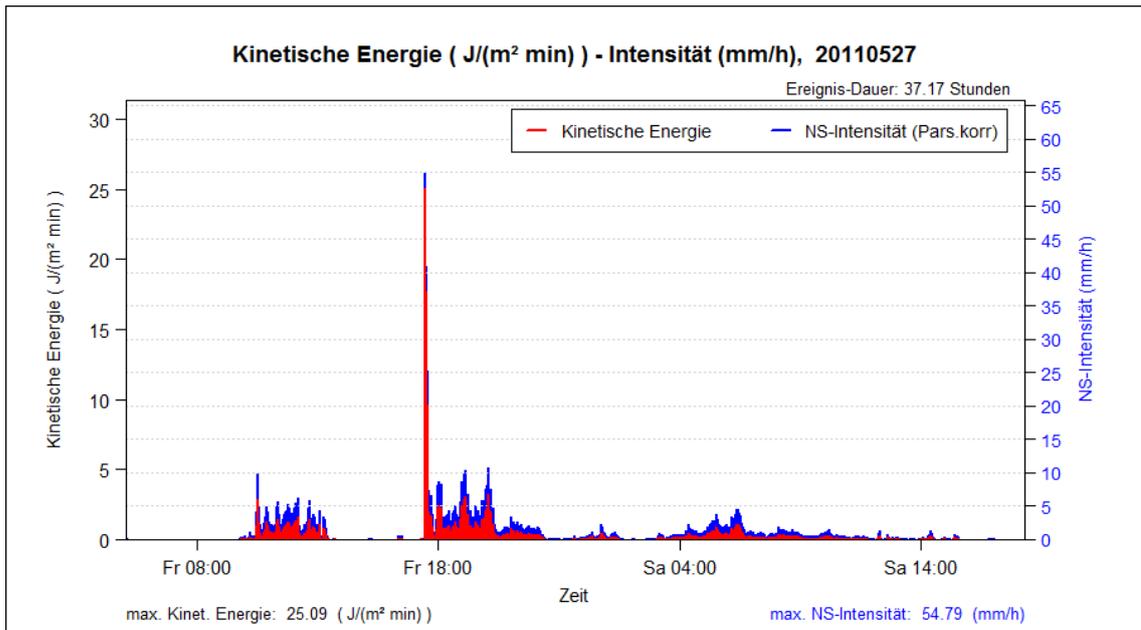


Abbildung 33: Zeitreihe der kinetischen Energie ($J \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$), Ereignis Nr. 20

Zum Vergleich zeigt Ereignis Nummer 12 (Abbildung 34) sehr geringe Intensitäten und somit auch geringe kinetische Energie im zeitlichen Verlauf. Zu beachten ist dabei die unterschiedliche, dem jeweiligen Ereignis angepasste Achsenskalierung.

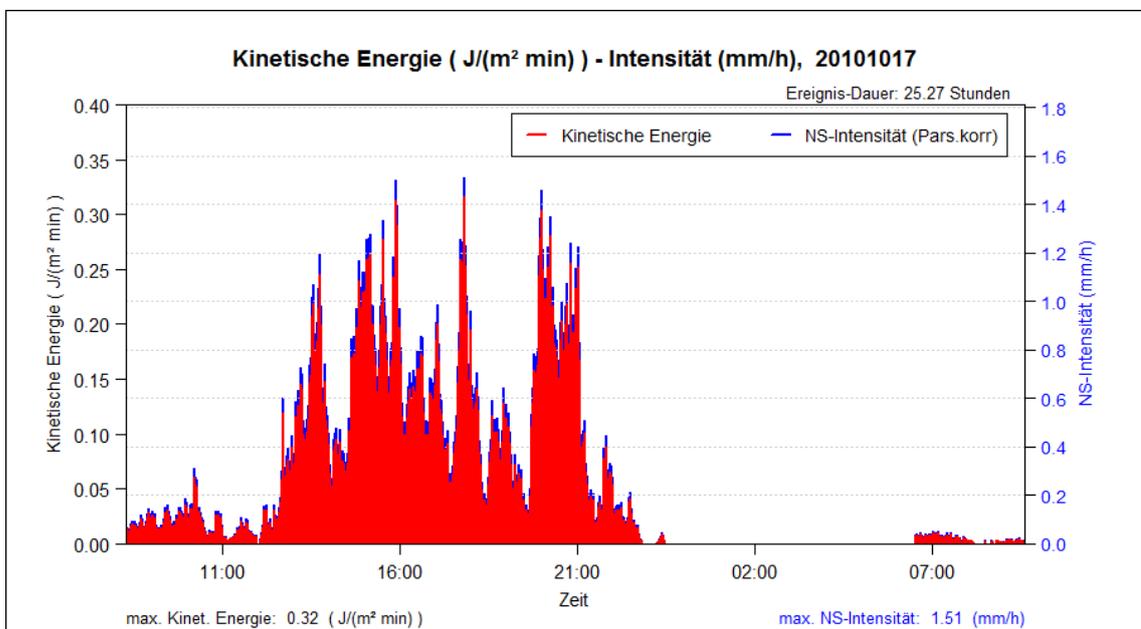


Abbildung 34: Zeitreihe der kinetischen Energie ($J \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$), Ereignis Nr. 12

Die hier nicht dargestellten Zeitreihen dieser Auswertung befinden sich im Anhang.

5.6. Regen-Erosions-Index bzw. R-Faktor

Die erosive Kraft der Einzelregen wird über den sogenannten R-Faktor ausgedrückt (Kapitel 2.11.6). In Tabelle 14 werden diese berechneten R-Faktoren – auf Basis der unterschiedlich berechneten kinetischen Energie – einander gegenübergestellt. Somit lassen sich die R-Faktoren der vier verschiedenen Autoren in Abbildung 35 grafisch miteinander vergleichen. Ebenfalls in der Abbildung dargestellt werden die I_{30} -Werte.

Die nach Petan et al. (2010) berechneten R-Faktoren liegen bei allen 24 Niederschlagsereignissen über den anderen, weil dies auch schon bei der kinetischen Energie der Fall war.

Tabelle 14: R-Faktoren der Einzelregeneignisse ($R_e = E_e \cdot I_{30}$)

Ereignis- Nummer	Beginn- Datum	NS-Höhe Parsivel (mm)	Dauer (min)	I30 (mm/h)	$E_e \cdot I_{30}$ (kJ*mm)/(m ² *h)			
					Winkelhofer	Brown & Foster	Petan	Zanchi & Torri
1	13.06.2010	11,19	304	13,42	2,81	2,64	3,28	3,05
2	15.06.2010	15,98	1247	3,97	0,81	0,63	0,90	0,70
3	19.06.2010	11,74	1973	1,06	0,15	0,11	0,16	0,09
4	17.07.2010	16,03	471	10,21	2,77	2,50	3,22	3,01
5	23.07.2010	16,98	920	14,41	4,51	4,15	5,08	4,66
6	29.07.2010	18,96	1544	13,22	3,74	3,20	4,33	3,49
7	02.08.2010	14,58	597	13,71	3,56	3,24	4,05	3,81
8	06.08.2010	27,05	1468	4,76	1,70	1,36	1,94	1,66
9	13.08.2010	8,34	380	10,55	1,63	1,50	1,84	1,65
10	30.08.2010	8,69	984	2,03	0,22	0,17	0,24	0,18
11	25.09.2010	17,24	1264	2,74	0,59	0,46	0,66	0,52
12	17.10.2010	6,03	1013	1,06	0,08	0,06	0,08	0,05
13	24.10.2010	7,89	1082	1,19	0,11	0,08	0,12	0,07
14	12.11.2010	6,02	552	2,27	0,18	0,14	0,20	0,15
15	12.01.2011	20,55	1867	1,78	0,45	0,34	0,49	0,35
16	17.03.2011	19,40	1482	9,73	2,67	2,20	3,00	2,33
17	27.04.2011	6,46	291	3,03	0,27	0,22	0,31	0,28
18	12.05.2011	7,61	170	5,32	0,61	0,53	0,73	0,69
19	14.05.2011	7,87	749	3,48	0,36	0,29	0,41	0,30
20	27.05.2011	36,91	1600	9,66	5,23	4,44	6,04	5,42
21	08.06.2011	7,64	367	2,26	0,22	0,18	0,25	0,22
22	18.06.2011	7,27	562	2,33	0,21	0,16	0,24	0,18
23	23.06.2011	17,09	353	12,05	3,56	3,28	4,29	4,01
24	05.07.2011	8,36	332	4,75	0,60	0,52	0,71	0,65
Summen:		325,88	21572		37,03	32,39	42,55	37,50

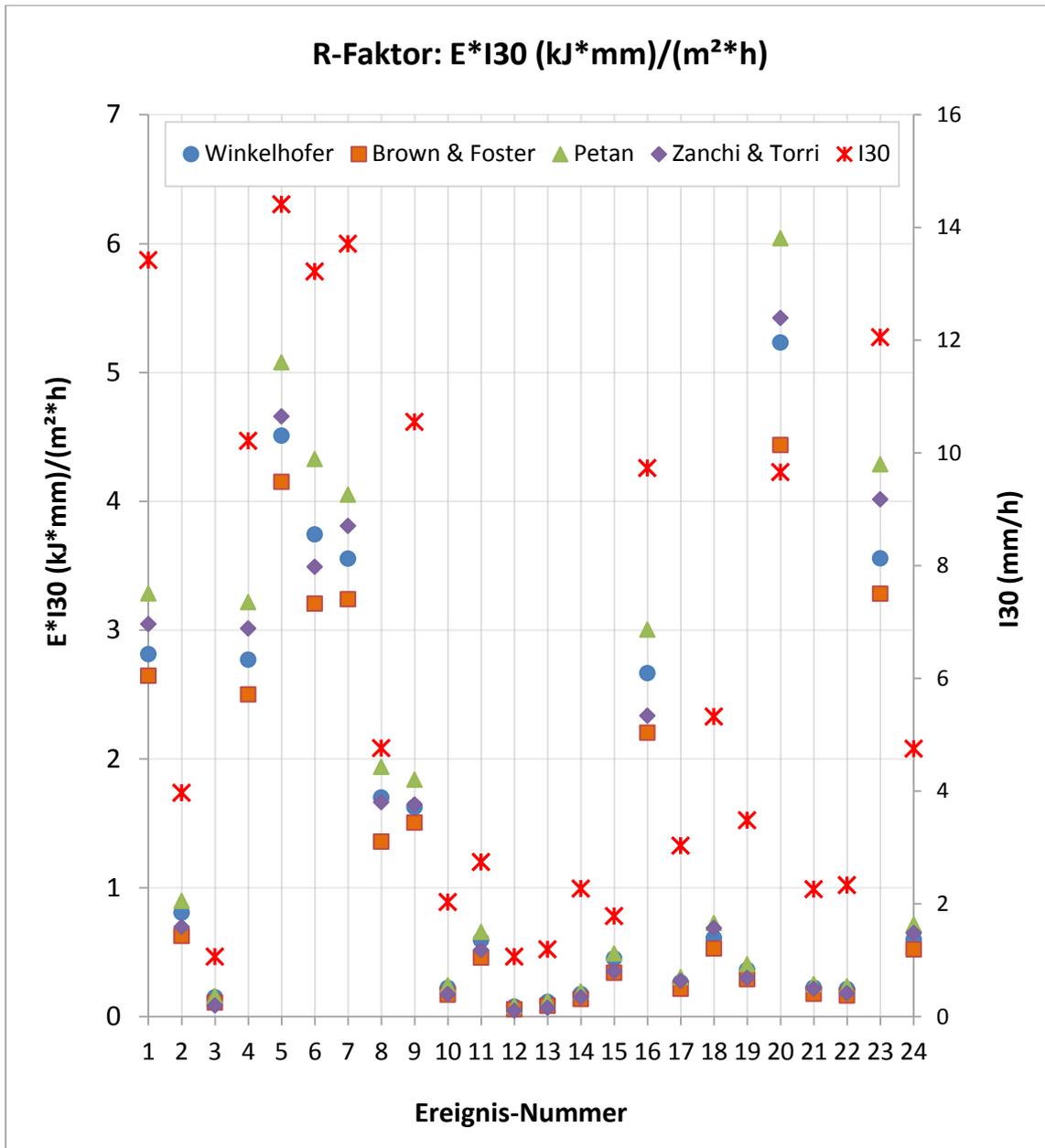


Abbildung 35: R-Faktoren der Einzelregenereignisse und I_{30}

Die höchste Erosivität hat Ereignis Nummer 20. Dieses Ereignis weist 36,91 mm Niederschlagshöhe auf, hat die größte Summe an kinetischer Energie und aufgrund einer maximalen 30-Minuten-Intensität von $9,66 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ somit auch den größten R-Faktor. Den zweitgrößten R-Faktor hat Ereignis Nummer 5, mit einer Niederschlagshöhe von 16,98 mm und der höchsten maximalen 30-Minuten-Intensität von $14,41 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

Der zeitliche Verlauf der kinetischen Energie des Ereignisses Nummer 5 wird in Abbildung 36 gezeigt. Der minütliche Spitzenwert an kinetischer Energie beträgt $40,29 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ bei einer Niederschlagsintensität von $83,8 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ bzw. $1,4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

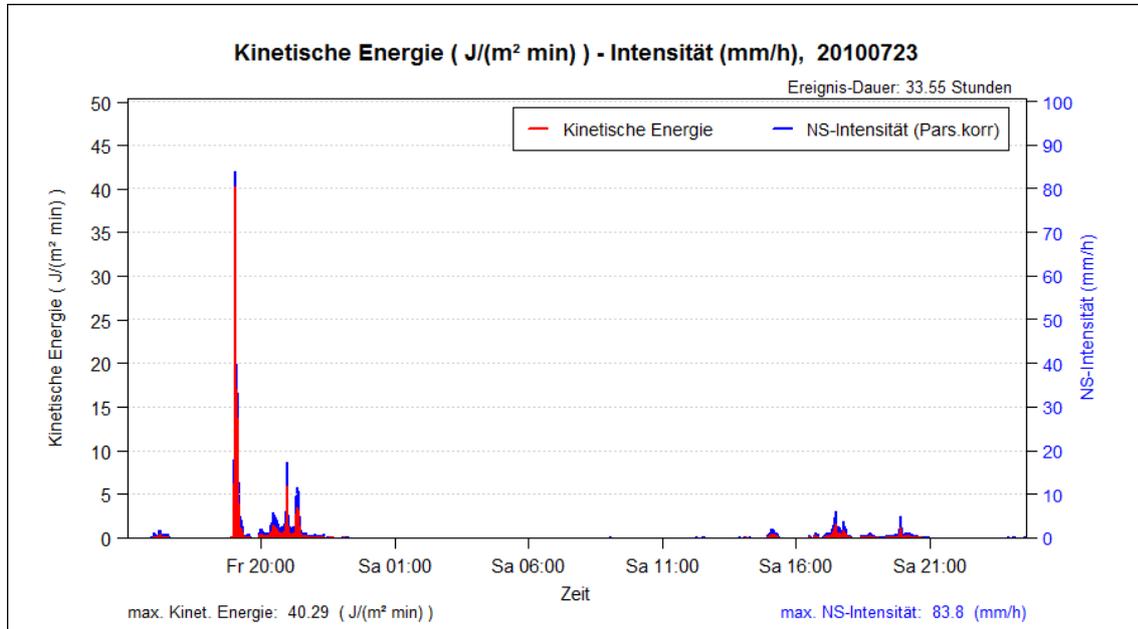


Abbildung 36: Zeitreihe der kinetischen Energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$), Ereignis Nr. 5

5.7. Vergleich der Niederschlagsmessungen Parsivel – Pluvio

5.7.1. Ereignisbezogene Niederschlagshöhe und Abweichung

Die Tabelle 15 gibt einen Überblick über die 17 Niederschlagsereignisse, die für diesen Vergleich herangezogen wurden. Gegenübergestellt werden jeweils die Niederschlagshöhen der Rohdaten, des Parsivel-Distrometers mit Berücksichtigung der Korrekturrechnungen und des wägbaren Messgerätes Pluvio.

Die letzte Spalte zeigt die deutliche Abweichung des Parsivel in Prozent von der Niederschlagshöhe des Pluvio. Der arithmetische Mittelwert der Abweichungen beträgt -32,44%, d.h. das Distrometer hat bei den ausgewerteten Ereignissen im Mittel um rund 32% weniger Niederschlag aufgezeichnet als das wägbare Niederschlagsmessgerät Pluvio.

Tabelle 15: Übersicht der Niederschlagshöhe ausgewerteter Ereignisse

Ereignis-Nr.	Beginn-Datum	NS-Höhe (mm)	NS-Höhe (mm)	NS-Höhe (mm)	Abweichung Parsivel (% von Pluvio)
		Rohdaten	Parsivel	Pluvio	
1	13.06.2010	11,33	11,19	17,3	-35,32
2	15.06.2010	15,76	15,98	26,0	-38,54
3	19.06.2010	12,38	11,74	21,3	-44,88
4	17.07.2010	15,70	16,03	24,4	-34,30
5	23.07.2010	17,40	16,98	26,5	-35,92
6	29.07.2010	19,04	18,96	27,9	-32,04
7	02.08.2010	15,41	14,58	21,8	-33,12
8	06.08.2010	27,80	27,05	39,7	-31,86
9	13.08.2010	7,84	8,34	11,0	-24,18
10	30.08.2010	8,90	8,69	11,5	-24,43
11	25.09.2010	19,93	17,24	30,4	-43,29
12	17.10.2010	5,99	6,03	8,4	-28,21
13	24.10.2010	7,78	7,89	10,6	-25,57
14	12.11.2010	6,11	6,02	8,2	-26,59
15	12.01.2011	20,23	20,55	31,5	-34,76
16	17.03.2011	20,27	19,40	28,1	-30,96
17	27.04.2011	6,20	6,46	8,9	-27,42

In Abbildung 37 werden die Ergebnisse der Niederschlagsaufzeichnungen grafisch dargestellt. Sehr gut zu erkennen ist hier der deutliche Unterschied zwischen dem Parsivel-Distrometer und dem wägbaren Niederschlagsmesser Pluvio. Die größte Abweichung von -44,88% weist Ereignis 3 auf, was einer Niederschlagshöhen­differenz von 9,56 mm entspricht.

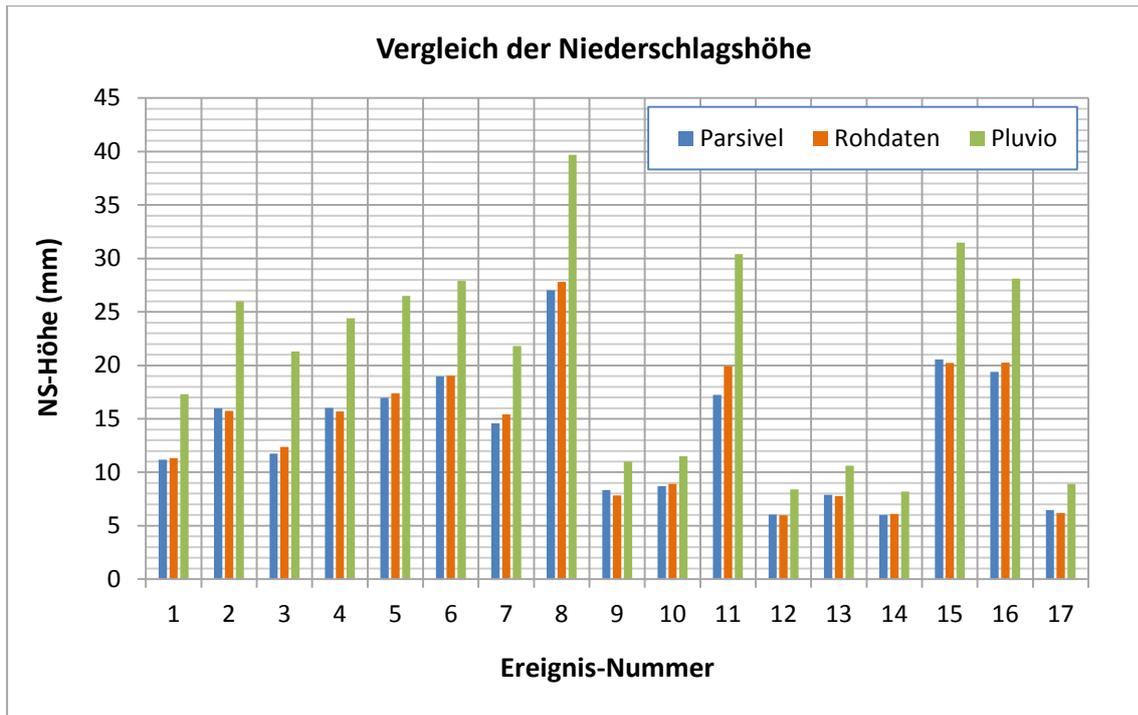


Abbildung 37: Darstellung der Niederschlagshöhen

Der Korrelationskoeffizient zwischen der Niederschlagshöhe des Parsivel und der des Pluvio beträgt 0,984 ($R^2 = 0,969$) und weist somit einen sehr guten positiven linearen Zusammenhang auf (Abbildung 38).

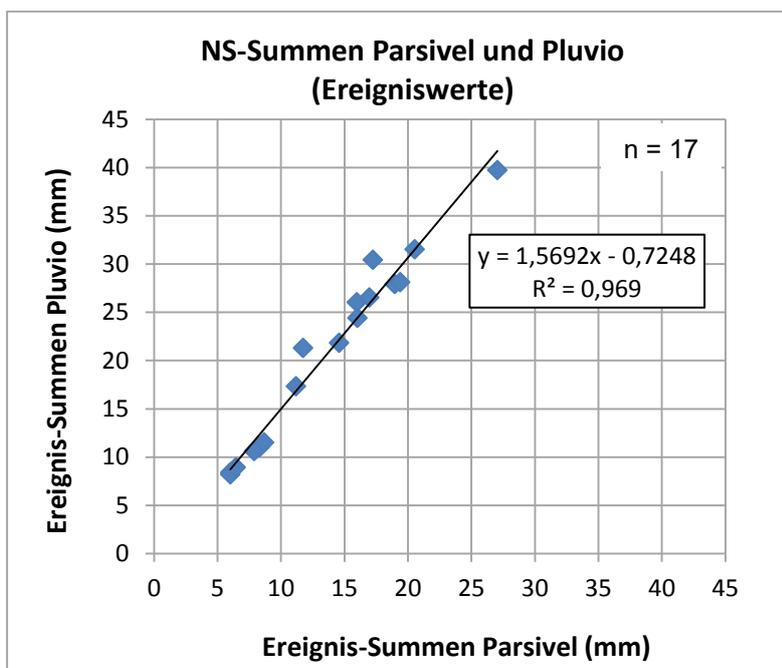


Abbildung 38: Zusammenhang der Niederschlagsmessungen (Ereigniswerte)

5.7.2. Stündliche Niederschlagshöhe und Abweichung

Die stündliche Auswertung der Niederschlagshöhe zeigt noch größere Abweichungen zwischen den beiden Messgeräten (Tabelle 16).

Die geringste Abweichung liegt bei -15,55%, die größte Abweichung bei -54,83%.

Tabelle 16: Übersicht der Niederschlagshöhe ausgewählter Stunden

Datum, Uhrzeit			NS-Höhe Pluvio	NS-Höhe Parsivel	Abweichung Parsivel
Tag	Zeit von	bis	(mm)	(mm)	(% von Plu.)
20100613	18:01	19:00	10,5	6,96	-33,71
20100616	08:01	09:00	5,7	3,30	-42,16
20100616	09:01	10:00	2,2	1,24	-43,54
20100616	10:01	11:00	2,8	1,64	-41,54
20100717	21:01	22:00	5,4	3,80	-29,69
20100718	00:01	01:00	9,5	6,41	-32,57
20100723	20:01	21:00	3,3	2,79	-15,55
20100723	21:01	22:00	5,2	2,35	-54,83
20100729	13:03	14:00	10,1	7,49	-25,89
20100806	23:01	00:00	4,3	2,67	-37,87
20100807	08:01	09:00	4,9	3,35	-31,62
20100807	09:01	10:00	5,3	3,96	-25,28
20100925	18:01	19:00	3,2	2,30	-28,12

Der arithmetische Mittelwert der Abweichungen des Parsivel-Distrometers vom wägbaren Niederschlagsmessgerät Pluvio beträgt -34,03%.

Der Korrelationskoeffizient zwischen Parsivel und Pluvio beträgt 0,972 ($R^2 = 0,945$) und zeigt somit einen sehr guten positiven linearen Zusammenhang zwischen den Niederschlagshöhen beider Messgeräte (Abbildung 39).

Eine mögliche Ursache für die doch hohe Abweichung in der Niederschlagshöhe könnte die effektive Messfläche des Distrometers sein. Raupach & Berne (2015) meinen, die effektive Größe der Messfläche sei für jede Tropfendurchmesserklasse unterschiedlich. Grundsätzlich müsste jeder abgeschnittene Tropfen mit der ganzen Tropfengröße gezählt und diese abgeschnittene Fläche zur Messfläche addiert werden. Die automatisch entfernten abgeschnittenen Randtropfen (Randzonenfehler) würden so die effektive Größe der Messfläche reduzieren.

Diese automatisch korrigierten Randereignisse könnten dazu führen, dass die berechnete Niederschlagshöhe zu gering ist.

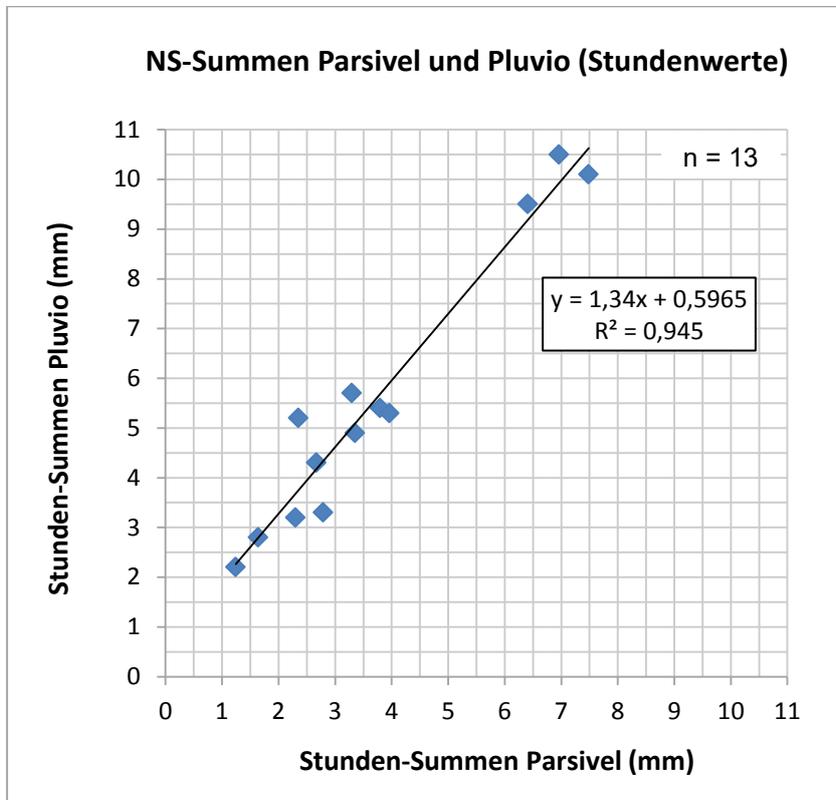


Abbildung 39: Zusammenhang der Niederschlagsmessungen (Stundenwerte)

5.7.3. Fünfminütige Niederschlagshöhe und Abweichung

Betrachtet man die fünfminütigen Niederschlagssummen der ausgewählten Stunden (Abbildung 40), so reicht die Spannweite der Niederschlagsabweichung des Parsivel-Distrometers vom wägbaren Niederschlagsmessgerät Pluvio von -91,94% bis 394,51%.

Der Korrelationskoeffizient der 5-Minuten-Summen beider Geräte beträgt 0,558 ($R^2 = 0,311$) und zeigt somit einen mittleren positiven linearen Zusammenhang zwischen Parsivel und Pluvio.

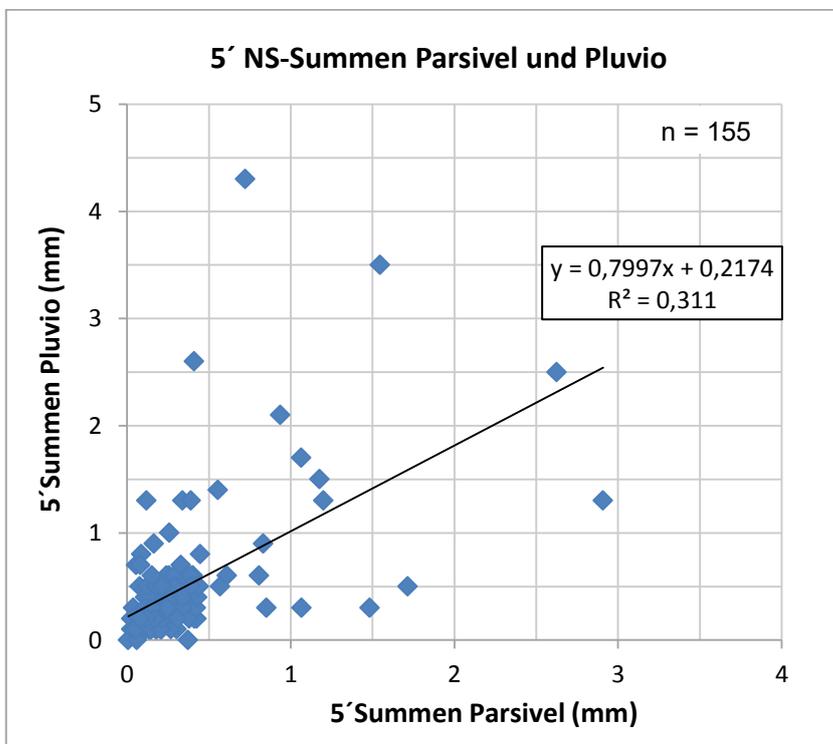


Abbildung 40: Zusammenhang der Niederschlagsmessungen (5-Minuten-Werte)

Der hier gemachte Vergleich der stündlichen und fünfminütigen Niederschlagshöhe setzt grundsätzlich voraus, dass die Zeiteinstellung beider Geräte exakt übereinstimmen muss. Ob dies bei den hier vorhandenen Messdaten der Fall ist, kann im Nachhinein nicht mehr überprüft werden.

5.7.4. Einfluss des Windes auf die Abweichung der stündlichen Niederschlagshöhe

Die Abbildung 41 veranschaulicht sowohl die 13 Niederschlagsereignisse, deren Windrichtung und Windgeschwindigkeit als auch die Abweichung des Parsivel-Distrometers vom wägbaren Niederschlagsmesser Pluvio auf der Basis von Stundenwerten. Die Breite der Pfeile beschreibt die Stärke der Abweichung – je breiter ein Pfeil ist, desto größer ist die Abweichung der Niederschlagshöhe. Die Länge der Pfeile gibt Auskunft über die Windgeschwindigkeit.

Die Ausrichtung des Laserbandes sowie die Idealwindrichtung für die Messung sind ebenfalls dargestellt.

Aufgrund der grafischen Auswertung konnte kein Zusammenhang zwischen der Niederschlagsabweichung und dem Windeinfluss gefunden werden.

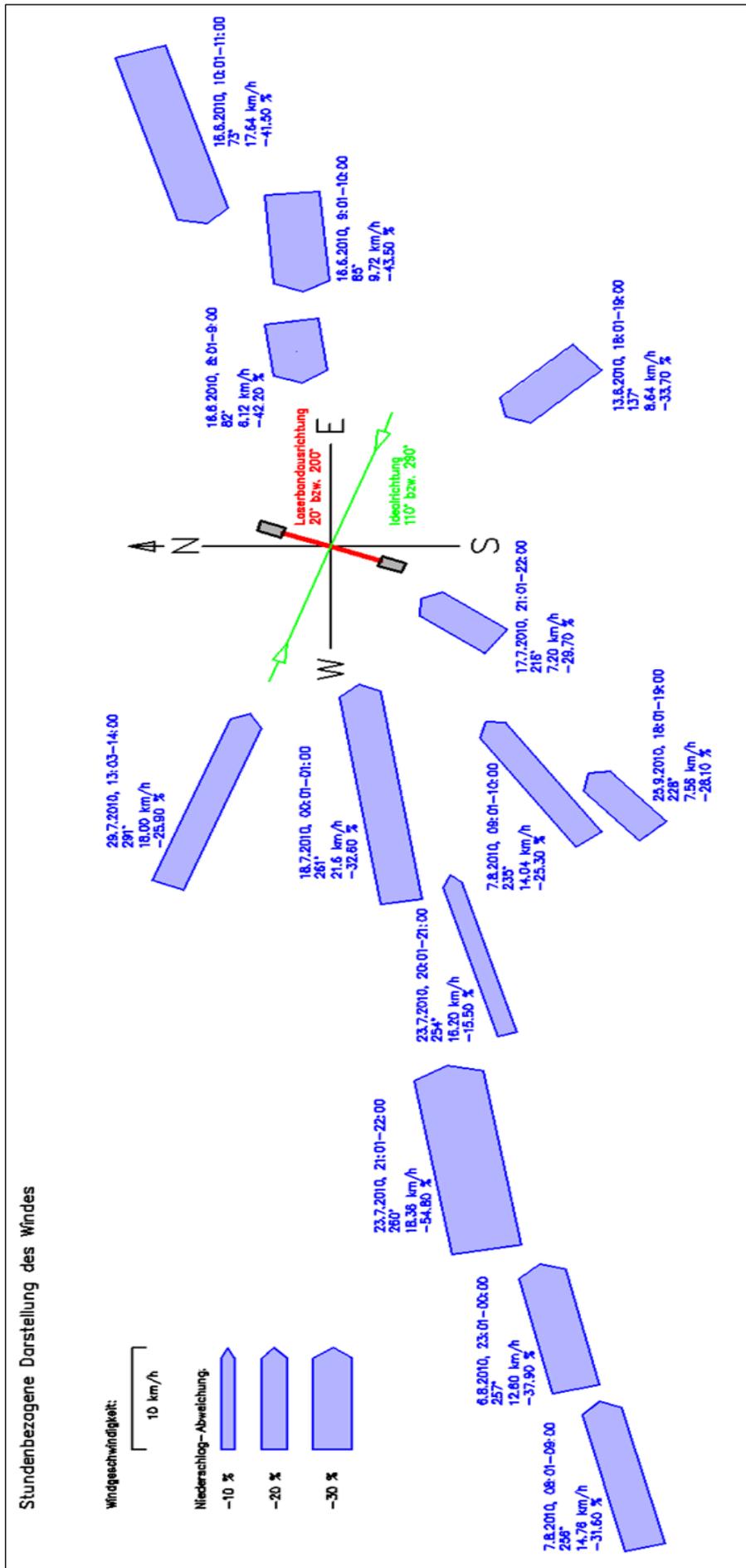


Abbildung 41: Stündliche Abweichung der Niederschlagshöhe des Parsivel-Distrometers vom wägbaren Messgerät Pluvio und Windeinfluss

6. Schlussfolgerung

In den Jahren 2010 und 2011 wurden am Standort Petzenkirchen Niederschlagsmessungen mit zwei unterschiedlichen Messgeräten durchgeführt. Eingesetzt wurde ein auf Lasertechnik basierendes Messgerät (Distrometer) und ein wägbares Niederschlagsmessgerät. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden unter anderem die Aufzeichnungen beider Geräte ausgewertet und analysiert. Zudem wird zu Beginn auf die theoretischen Hintergründe hinsichtlich Niederschlag und Bodenerosion eingegangen und diese erklärt.

Ein ereignisbezogener Vergleich der Niederschlagshöhe beider Messgeräte zeigt, dass das Distrometer im Mittel um zirka 32 Prozent weniger Niederschlag aufzeichnete. Ein stündlicher Vergleich brachte eine noch größere mittlere Abweichung des Distrometers, nämlich -34 Prozent. Ein Zusammenhang zwischen diesen Abweichungen und dem Einfluss des Windes konnte nicht festgestellt werden. Somit bleibt die tatsächliche Ursache für die Abweichung ungeklärt.

Insgesamt wurden 24 vom Distrometer aufgezeichnete Niederschlagsereignisse ausgewertet. Die Auswertungen beinhalten neben der Niederschlagshöhe und Niederschlagsintensität unter anderem die Anzahl, Größe und Fallgeschwindigkeit der Regentropfen. Da es sich beim Distrometer um ein Gerät der ersten Generation handelt, konnte die kinetische Energie nicht direkt vom Messgerät berechnet werden. Die Berechnung der kinetischen Energie wurde deshalb über die detektierten Tropfen, welche als Rohdatenmatrix vom Distrometer abgespeichert wurden, durchgeführt. In dieser Rohdatenmatrix wurden jedoch die Korrekturrechnungen des Distrometers nicht berücksichtigt. Daher wurden nur bestimmte Niederschlagsereignisse und von diesen jene Messminuten ausgewählt, bei denen wenig Fehlerkorrekturen durch das Distrometer gemacht wurden – was über die Tropfenanzahldifferenz der Rohdaten bzw. der korrigierten Daten festgestellt werden konnte.

Anhand der Rohdatenmatrix dieser ausgewählten Minuten wurde die kinetische Energie jedes einzelnen Tropfens minutenweise berechnet. Die somit berechnete kinetische Energie wurde mit der dazugehörigen Niederschlagsintensität der Rohdaten in Verbindung gebracht und daraus eine Regressionsgleichung ($E_{kin\ mm} - I$) berechnet. Mit dieser Gleichung ist es möglich, die minütliche kinetische Energie $E_{kin\ zeit}$ über die Niederschlagsintensität I zu berechnen, was auch für die 24 Ereignisse gemacht wurde.

Die grafische Darstellung der einzelnen Ereignisse ist dem Anhang zu entnehmen. Dargestellt wird der zeitliche Verlauf der vom Distrometer aufgezeichneten

Niederschlagsintensität I (Korrekturrechnungen sind dabei berücksichtigt) und der kinetischen Energie $E_{kin\ zeit}$, welche mit Hilfe der zuvor genannten Regressionsgleichung und der minütlichen Niederschlagshöhe berechnet wurde. Zusätzlich wurde auch noch mittels Regressionsgleichungen anderer Autoren die kinetische Energie der jeweiligen Einzelereignisse berechnet und grafisch dargestellt. Diese Regressionsgleichungen beruhen auf unterschiedlichen Tropfengrößenverteilungen, welche durch verschiedene Messtechniken an unterschiedlichen Messstandorten zustande gekommen sind.

Um die Erosivität der Niederschlagsereignisse vergleichen zu können, wurden anhand der kinetischen Energie und der entsprechenden maximalen 30-Minuten-Intensität die R-Faktoren der Einzelereignisse berechnet und grafisch dargestellt.

Die Abweichung der Niederschlagshöhe des Distrometers vom wägbaren Niederschlagsmesser wurde im Regressionsmodell nicht berücksichtigt.

Die Auswertung der Winddaten brachte für die ausgewerteten Stunden das Ergebnis, dass eine höhere Windgeschwindigkeit nicht automatisch eine höhere Fallgeschwindigkeit der Regentropfen zur Folge hat.

Die interne Korrekturrechnung des Distrometers wird von der Windgeschwindigkeit beeinflusst. Je höher die Windgeschwindigkeit ist, desto mehr Tropfen werden im Zuge der internen Korrekturrechnung des Distrometers korrigiert bzw. entfernt.

Abschließend soll noch erwähnt werden, dass aufgrund der doch hohen Abweichung der Niederschlagshöhe des Distrometers die im Zuge dieser Arbeit entstandene Regressionsgleichung ($E_{kin\ mm} - I$) auf ihre Gültigkeit hin überprüft werden sollte.

Zu diesem Zweck wäre eine Vergleichsmessung mit einem Distrometer der 2. Generation – welches die kinetische Energie bereits intern berechnet – und einem wägbaren Niederschlagsmessgerät anzuraten.

7. Literaturverzeichnis

- Auerswald, Karl: »Bodenerosion durch Wasser«, in: *Gerold Richter (Hrsg.): Bodenerosion: Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*. Darmstadt : Wiss. Buchges., 1998 — ISBN 3-534-12574-6, S. 33–42.
- Beard, Kenneth V./Feng, James Q./Chuang, Catherine: »A Simple Perturbation Model for the Electrostatic Shape of Falling Drops«, in: *J. Atmos. Sci.* Bd. 46 (16. Februar 1989), Nr. 15.
- Blume, Hans-Peter/Brümmer, Gerhard W./Horn, Rainer/Kandeler, Ellen/Kögel-Knabner, Ingrid/Kretschmar, Ruben/Stahr, Karl/Wilke, Berndt-Michael/Thiele-Bruhn, Sören/u. a.: *Scheffer/Schachtschabel - Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Aufl. Heidelberg, 2010.
- Breburda, Josef/Richter, Gerold: »Kurze Geschichte der Bodenerosion und ihrer Erforschung in Mitteleuropa«, in: *Gerold Richter (Hrsg.): Bodenerosion: Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*. Darmstadt : Wiss. Buchges., 1998 — ISBN 3-534-12574-6, S. 19–29.
- Chowdhury, M. Nasimul/Testik, Firat Y./Hornack, Mathew C./Khan, Abdul A.: »Free fall of water drops in laboratory rainfall simulations«, in: *Atmospheric Research* Bd. 168 (25. September 2015), S. 158–168.
- Dijk, A. I. J. M van/Bruijnzeel, L. A/Rosewell, C. J.: »Rainfall intensity–kinetic energy relationships: a critical literature appraisal«, in: *Journal of Hydrology* Bd. 261 (2002), Nr. 1–4, S. 1–23.
- Duttmann, Rainer: »Die Bodenfeuchte als Steuergröße der Bodenerosion«, in: *Geographische Rundschau*. Bd. 53, 2001, S. 24–32.
- Ghadiri, Hossein/Payne, D.: »Raindrop impact stress and the breakdown of soil crumbs«, in: *European Journal of Soil Science* 28(2) (Juni 1977), S. 247–258.
- Google/DigitalGlobe: »Google earth (©2015)«.
- Google/GeoBasis-DE/BKG: »Google Maps (©2009)«, URL <https://www.google.at/maps> (Abgerufen: 8. März 2016).
- Gunn, Ross/Kinzer, Gilbert D.: »THE TERMINAL VELOCITY OF FALL FOR WATER DROPLETS IN STAGNANT AIR«, in: *Journal of Meteorology* Bd. 6 (August 1949), Nr. 4, S. 243–248.
- Hagl, Stefan: *Schnelleinstieg Statistik*. Freiburg, 2008.
- Hardy, Kenneth R.: *A study of Raindrop-size Distributions and their Variation with Height, Scientific Report No. 1*, 1962.
- Kathiravelu, G./Lucke, T./Nichols, P.: »Rain Drop Measurement Techniques: A Review«, in *Water* 8(29): 1-20, January 2016.
- Land Niederösterreich/BEV: *NÖ-Atlas*, Befliegung am 11.7.2010.
- Laws, J. Otis/Parsons, Donald A.: »The relation of raindrop size to intensity«, in: *Transactions, American Geophysical Union* Bd. 24 (1943), Nr. 2, S. 452–460.

- Lobo, Gabriel P./Bonilla, Carlos A.: »EFFECT OF KINETIC ENERGY-INTENSITY RELATIONSHIPS AND 0.5-H MAXIMUM INTENSITY ESTIMATION METHODS ON RAINFALL EROSIVITY«, in: *36th IAHR World Congress*, The Hague, the Netherlands, 2015.
- Magono, C.: »On the shape of water drops falling in stagnant air«, in: *J. Meteor.* 11. Aufl.: Yokohama, 1954, S. 77–79.
- Mahlke, Holger: *Niederschlagsmessung mit einem neuartigen optischen Distrometer (Flying Parsivel-Sonde)*, Universität Karlsruhe (TH) / Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Diplomarbeit, 2007.
- Malberg, Horst: *Meteorologie und Klimatologie*. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg, 2007.
- OTT Hydromet GmbH: »OTT Parsivel, Present Weather Sensor« (Bedienungsanleitung). Ludwigstraße 16, 87437 Kempten, Deutschland, 2006.
- Raupach, T. H./Berne, A.: »Correction of raindrop size distributions measured by Parsivel disdrometers, using a two-dimensional video disdrometer as a reference«, in: *Atmos. Meas. Tech.* Bd. 8 (16. Januar 2015), Nr. 1, S. 343–365.
- R Development Core Team: *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, 2008.
- Richter, Gerold: *Bodenerosion: Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*, 1998.
- Salles, C./Poesen, J./Sempere-Torres, D.: »Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity«, in: *Journal of Hydrology* Bd. 257 (2002), S. 256–270.
- Schwertmann, U./Vogl, W./Kainz, M.: *Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen*. 2. Aufl. Stuttgart, 1990.
- Spektrum Akademischer Verlag: »Hydrometeore«. *Lexikon der Geowissenschaften*.
- Umweltbundesamt: *Achter Umweltkontrollbericht, Umweltsituation in Österreich*. Wien, 2007.
- UN: »Resolution of the UN General Assembly«, in: *General Assembly of the United Nations*. New York, 2013.
- Villermaux, Emmanuel/Bossa, Benjamin: »Single-drop fragmentation determines size distribution of raindrops«, in: *Nature Physics* (20. Juli 2009).
- Warnecke, Günter: *Meteorologie und Umwelt: Eine Einführung*. 2. Aufl. Heidelberg, 1997.
- Wischmeier, Walter H./Smith, Dwight David: *Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide to Conservation Planning, Agriculture Handbook*. Washington, 1978.
- Wischmeier, W. H.: »A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation.«, in: *Soil Science Society of America Proceedings*. 23. Aufl.: Soil Science Society of America, 1959, S. 246–249.

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Endfallgeschwindigkeit von Regentropfen mit Daten von Gunn und Kinzer (1949) (Hardy, 1962)	11
Abbildung 2: Typische Formen von Regentropfen, links (Magono, 1954), rechts (Beard et al., 1989)	11
Abbildung 3: Fallender Regentropfen mit $D_0 = 6$ mm, Zeitintervall $\Delta t = 4,7$ ms (Villermaux & Bossa, 2009)	12
Abbildung 4: Tropfengrößenverteilung bei Niederschlägen unterschiedlicher Regenintensität (Laws & Parsons, 1943).....	12
Abbildung 5: Durchmesser und Volumen eines Regentropfens	14
Abbildung 6: Der Bodenerosionsprozess – Einflussgrößen und Teilprozesse (Duttmann, 2001)	15
Abbildung 7: Planschwirkung von Regentropfen (Auerswald, 1998).....	17
Abbildung 8: Parsivel mit Elektronikeinheit (Quelle: Strauss P.)	23
Abbildung 9: Funktionsprinzip OTT Parsivel (Ott, Benutzerhandbuch S. 8)	24
Abbildung 10: OTT Pluvio 400 (Ott Hydromet GmbH)	28
Abbildung 11: Übersichtskarte (Google & GeoBasis-DE/BKG, 2009)	29
Abbildung 12: Übersicht Standort (Google & DigitalGlobe, 2015)	29
Abbildung 13: Standort und Ausrichtung des Distrometers (Land Niederösterreich, BEV, 2010; Google & DigitalGlobe, 2015; Foto Parsivel: Strauss P.)	30
Abbildung 14: Laserbandausrichtung (eigene Skizze)	30
Abbildung 15: Ausschnitt eines Parsivel-Datenfiles (Screenshot)	31
Abbildung 16: Parsivel Rohdatenmatrix (als Excel-Datei gespeichert).....	32
Abbildung 17: Vergleich Pluvio und Parsivel.....	33
Abbildung 18: Grafische Darstellung kinetische Energie – Regenintensität (Lobo & Bonilla, 2015)	40
Abbildung 19: Schematische Darstellung des Randzonenfehlers (eigene Skizze).....	41
Abbildung 20: Darstellung der Tropfenanzahl und Niederschlagshöhe des Distrometers	52
Abbildung 21: Zusammenhang Windgeschwindigkeit und Tropfenanzahldifferenz.....	55
Abbildung 22: Einfluss Windgeschwindigkeit und -richtung auf die Tropfenanzahl	55
Abbildung 23: Endfallgeschwindigkeit und Tropfendurchmesser der ausgewählten Ereignisse (15090 Minuten).....	56
Abbildung 24: Endfallgeschwindigkeit und Tropfendurchmesser der ausgewählten Ereignisse und ausgewählten Minuten (2425 Minuten)	57
Abbildung 25: Stündliche Auswertung der mittleren Fallgeschwindigkeiten, $v_{\text{Wind}} = 7,20$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, NS-Höhe = 3,80 mm	59

Abbildung 26: Stündliche Auswertung der mittleren Fallgeschwindigkeiten, $v_{\text{Wind}} = 8,64$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, NS-Höhe = 6,96 mm.....	60
Abbildung 27: Stündliche Auswertung der mittleren Fallgeschwindigkeiten, $v_{\text{Wind}} = 18,00$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, NS-Höhe = 7,49 mm.....	61
Abbildung 28: Stündliche Auswertung der mittleren Fallgeschwindigkeiten, $v_{\text{Wind}} = 21,60$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, NS-Höhe = 6,41 mm.....	62
Abbildung 29: Regressionsmodell, volumenbezogene kinetische Energie (<i>E_{kin mm}</i>) und Niederschlagsintensität.....	64
Abbildung 30: Niederschlagsintensität – mTrD bzw. Tropfenanzahl	66
Abbildung 31: Zusammenhang zwischen zeitbezogener kinetischer Energie (<i>E_{kin zeit}</i>) und Niederschlagsintensität	67
Abbildung 32: Kinetische Energie der 24 Niederschlagsereignisse	70
Abbildung 33: Zeitreihe der kinetischen Energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$), Ereignis Nr. 20.....	71
Abbildung 34: Zeitreihe der kinetischen Energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$), Ereignis Nr. 12.....	71
Abbildung 35: R-Faktoren der Einzelregenereignisse und I_{30}	73
Abbildung 36: Zeitreihe der kinetischen Energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$), Ereignis Nr. 5.....	74
Abbildung 37: Darstellung der Niederschlagshöhen	76
Abbildung 38: Zusammenhang der Niederschlagsmessungen (Ereigniswerte)	76
Abbildung 39: Zusammenhang der Niederschlagsmessungen (Stundenwerte).....	78
Abbildung 40: Zusammenhang der Niederschlagsmessungen (5-Minuten-Werte)	79
Abbildung 41: Stündliche Abweichung der Niederschlagshöhe des Parsivel- Distrometers vom wägbaren Messgerät Pluvio und Windeinfluss.....	81

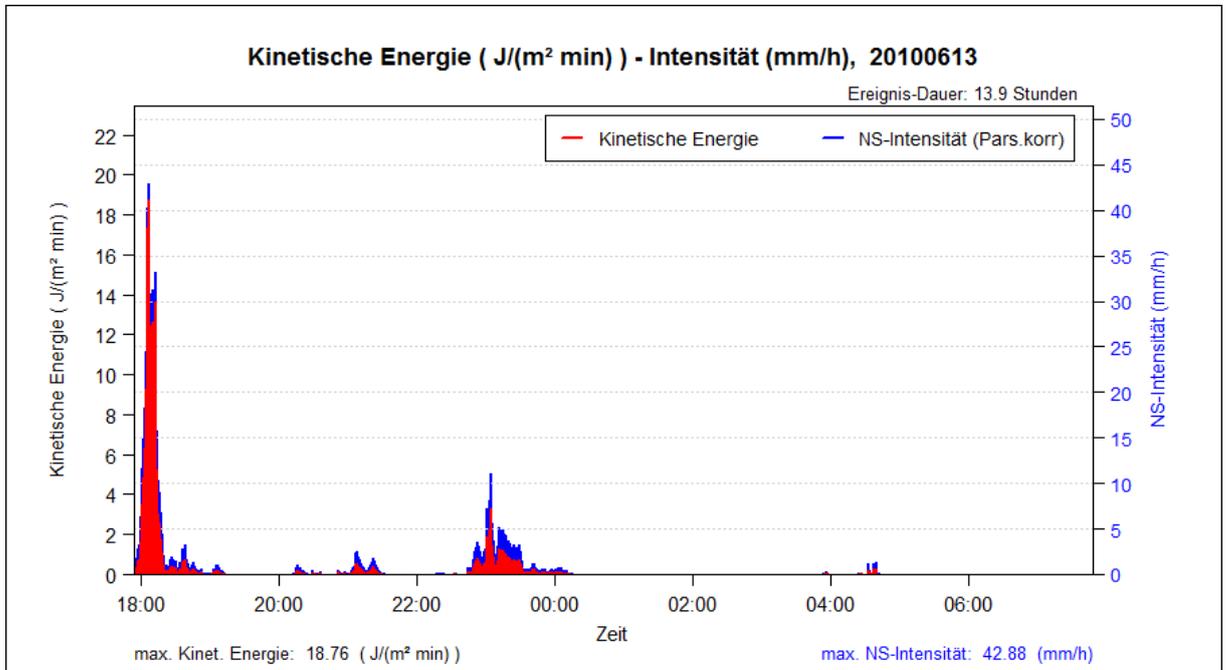
9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fallgeschwindigkeit von Tropfen in ruhender Luft (nach Petterssen 1969) (Warnecke, 1997).....	10
Tabelle 2: Toleranzgrenzen des Bodenabtrags (Schwertmann et al., 1990).....	22
Tabelle 3: Durchmesserklassen des Parsivel (Ott, Benutzerhandbuch S. 43)	25
Tabelle 4: Fallgeschwindigkeitsklassen des Parsivel (Ott, Benutzerhandbuch S. 44) .	26
Tabelle 5: Technische Daten des Parsivel-Distrometers (Ott, Benutzerhandbuch S. 39)	27
Tabelle 6: Übersicht bereinigte Tropfen.....	36
Tabelle 7: Gleichungen kinetische Energie – Regenintensität (Lobo & Bonilla, 2015)	39
Tabelle 8: Übersicht ausgewerteter und selektierter Niederschlagsereignisse.....	43
Tabelle 9: Tropfenanzahlvergleich ausgewählter Ereignisse	44
Tabelle 10: Korrelationskoeffizient und Stärke des Zusammenhangs (Hagl, 2008)	49
Tabelle 11: Übersicht der Tropfenanzahl und Niederschlagshöhe des Distrometers ..	51
Tabelle 12: Ausgewählte Stunden, Tropfenanzahl und Windeinfluss.....	54
Tabelle 13: Summierte kinetische Energie der Einzelregen (E_e).....	69
Tabelle 14: R-Faktoren der Einzelregenereignisse ($R_e = E_e \cdot I_{30}$).....	72
Tabelle 15: Übersicht der Niederschlagshöhe ausgewerteter Ereignisse	75
Tabelle 16: Übersicht der Niederschlagshöhe ausgewählter Stunden	77

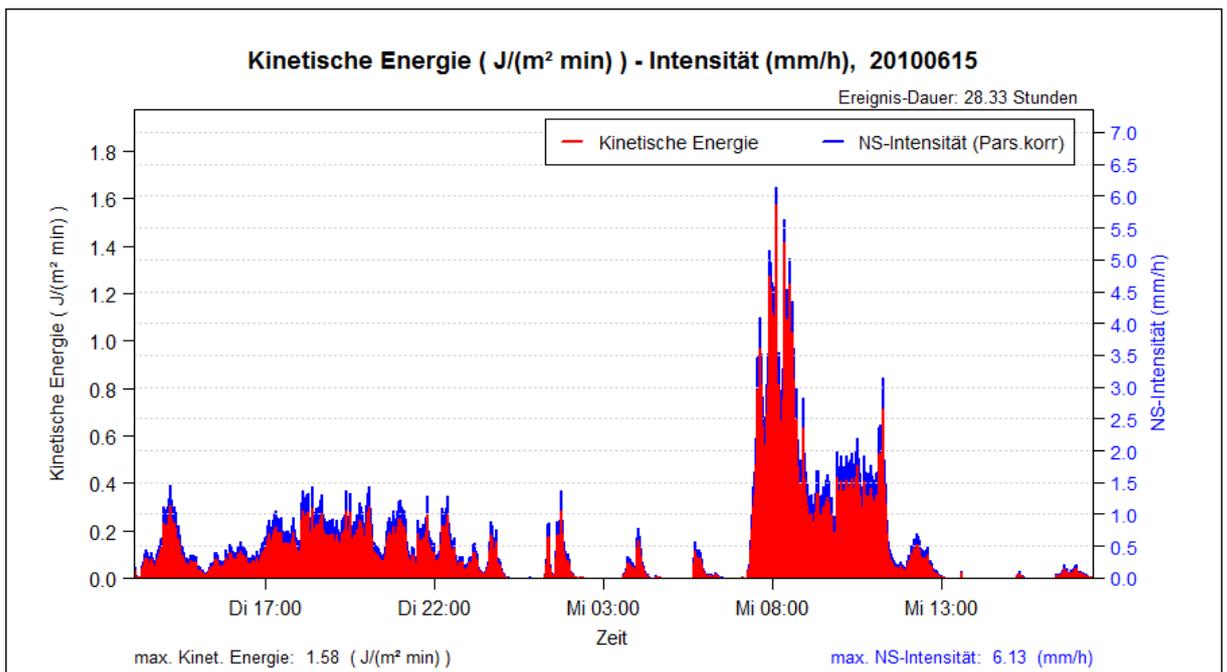
10. Anhang

10.1. Grafische Darstellung der kinetischen Energie und Intensität

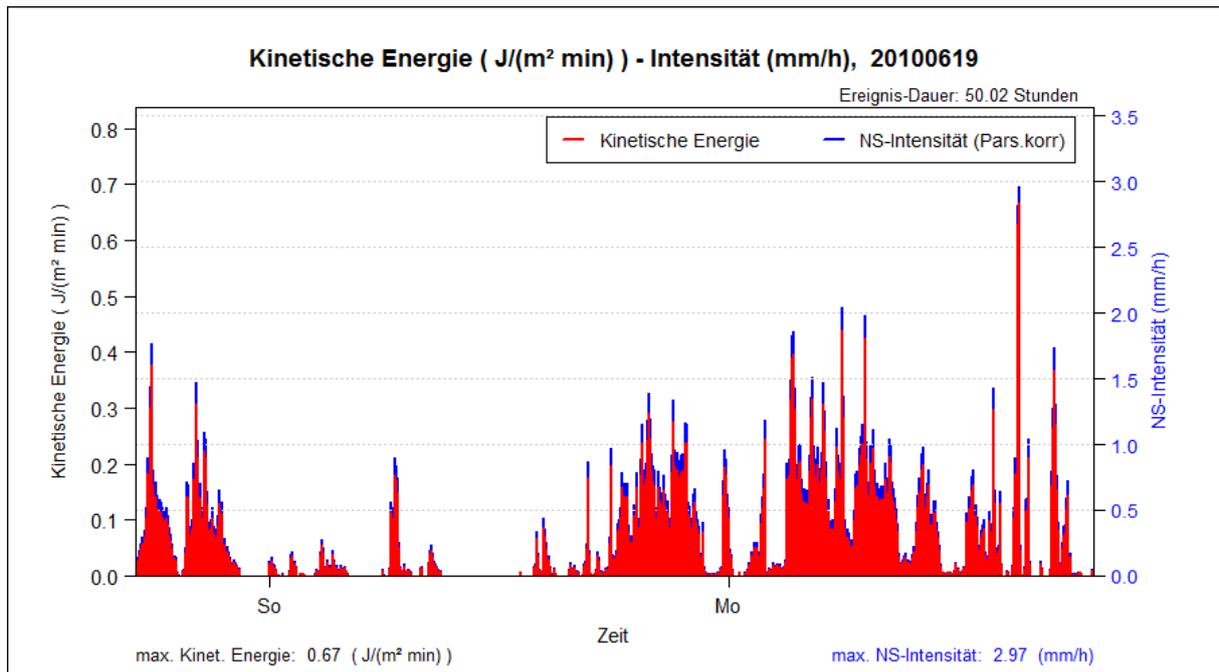
Ereignis-Nr. 1



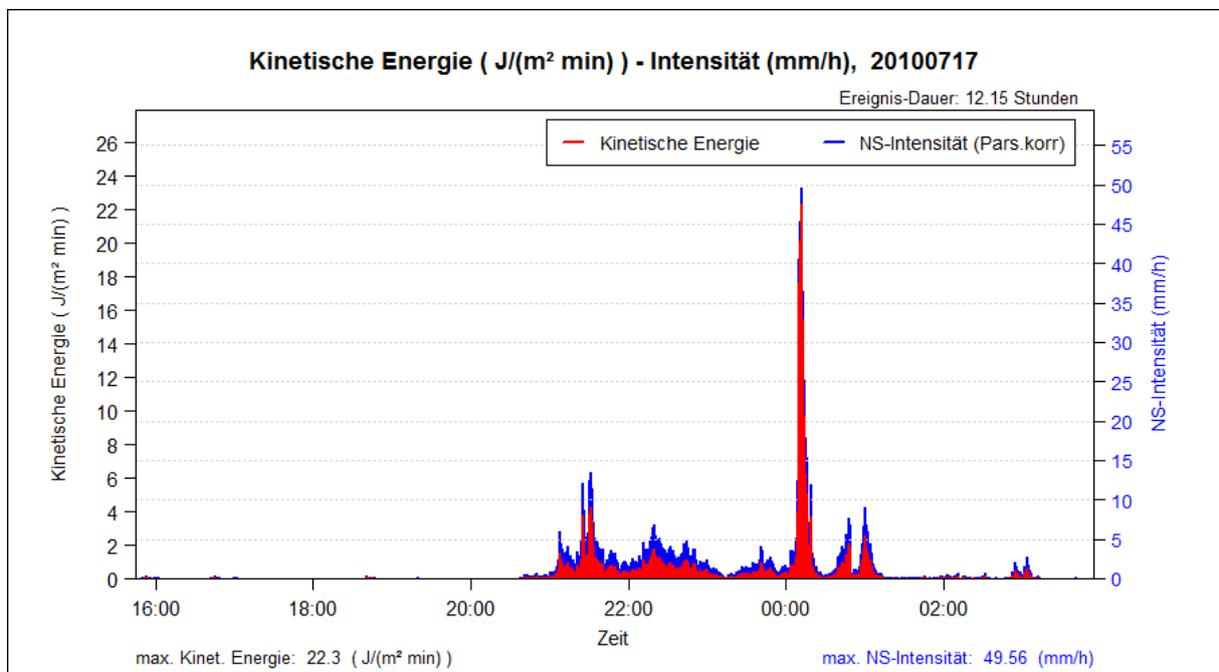
Ereignis-Nr. 2



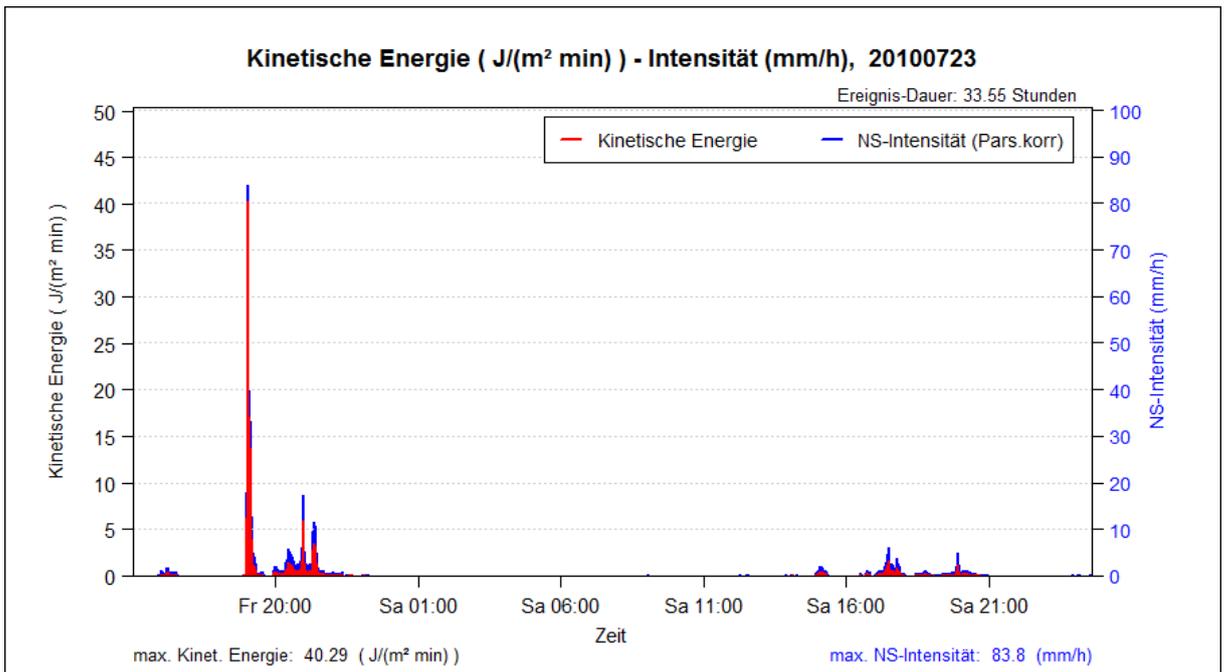
Ereignis-Nr. 3



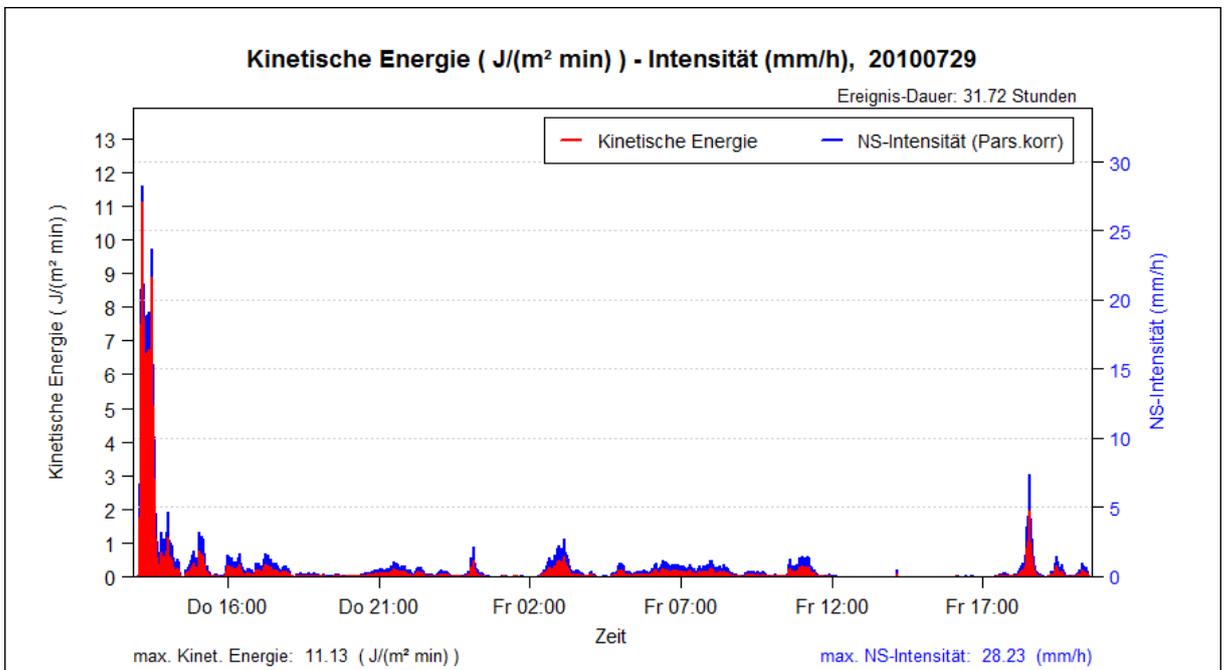
Ereignis-Nr. 4



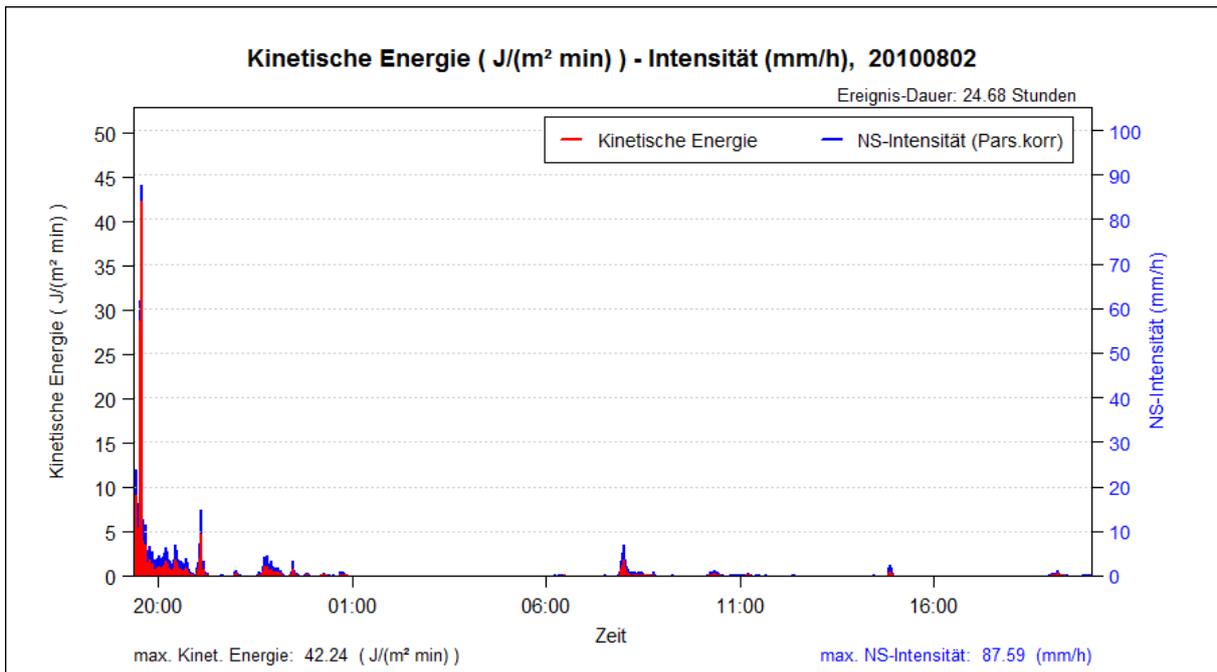
Ereignis-Nr. 5



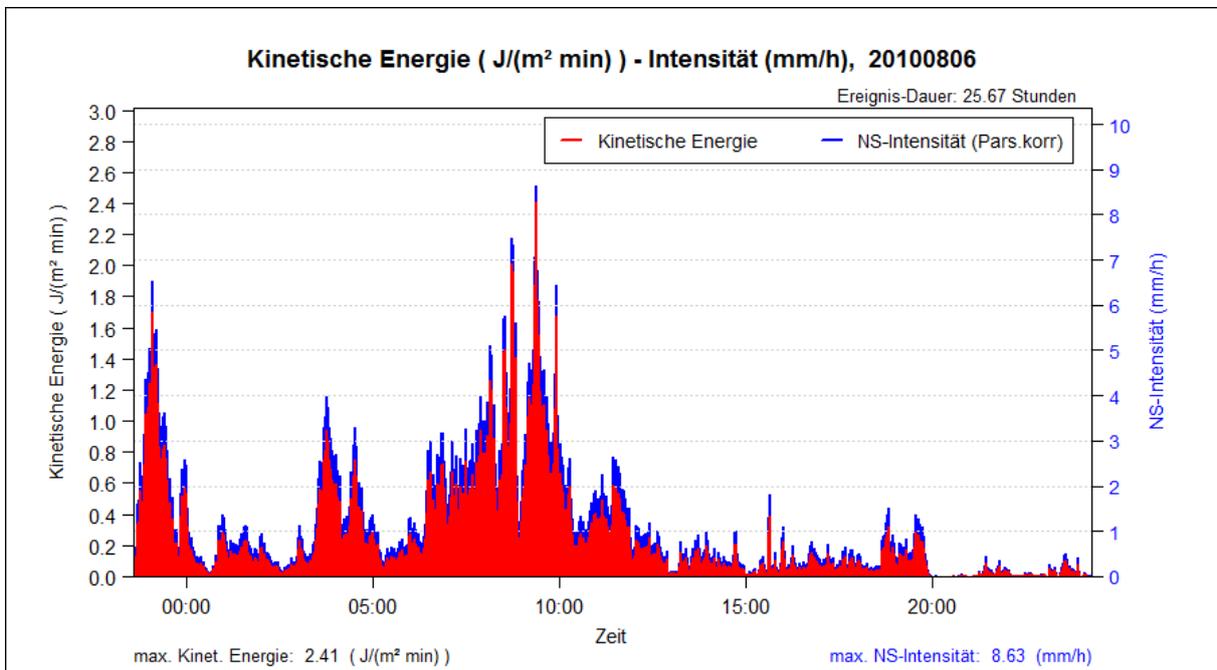
Ereignis-Nr. 6



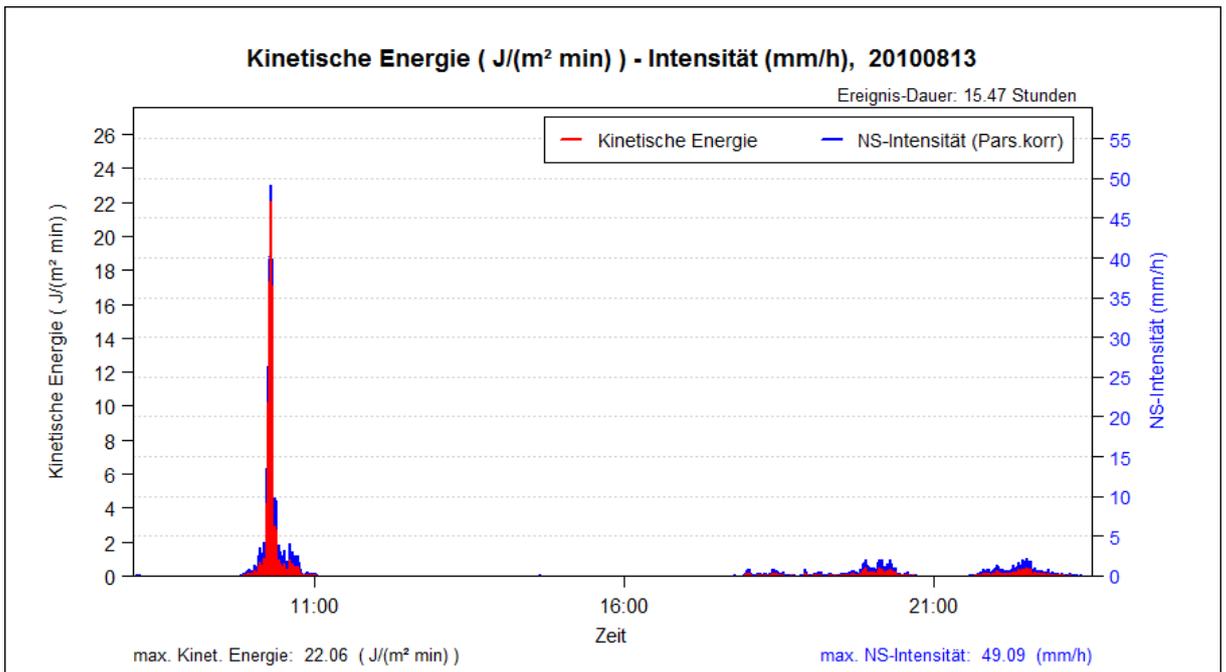
Ereignis-Nr. 7



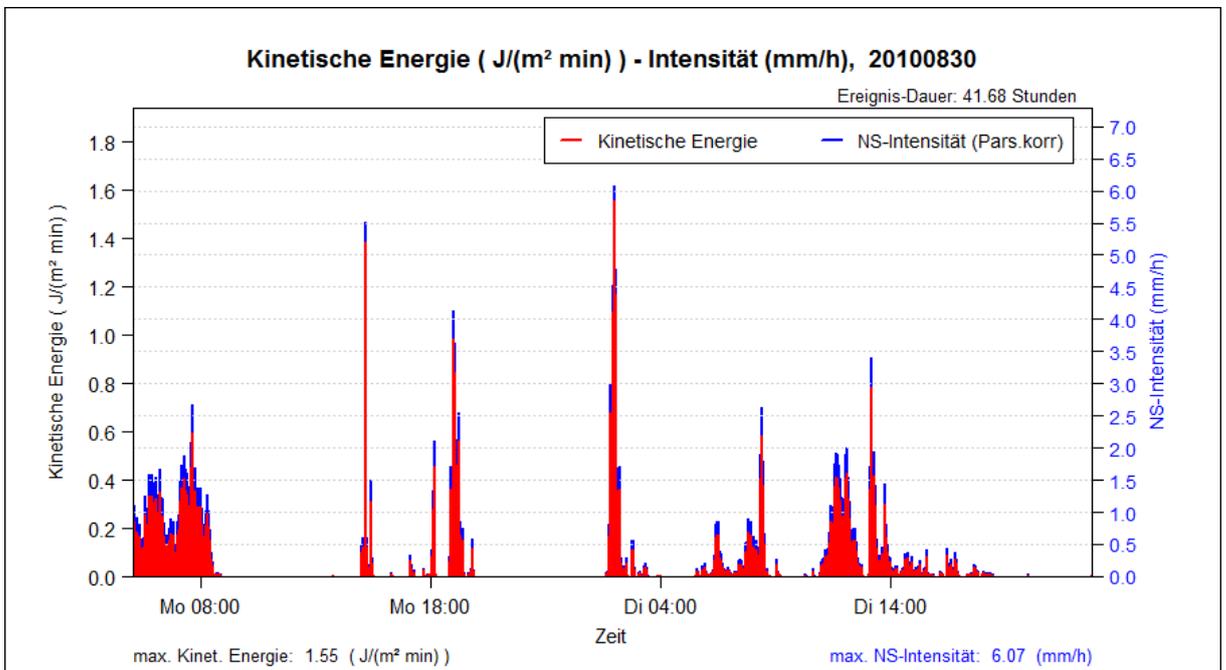
Ereignis-Nr. 8



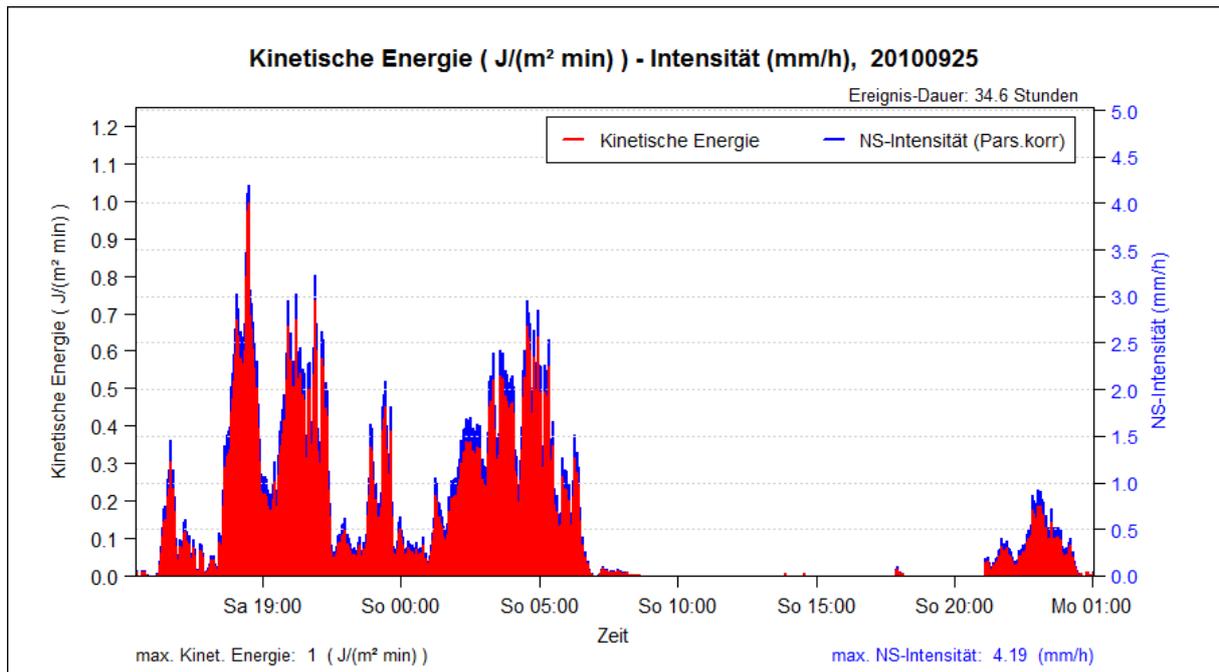
Ereignis-Nr. 9



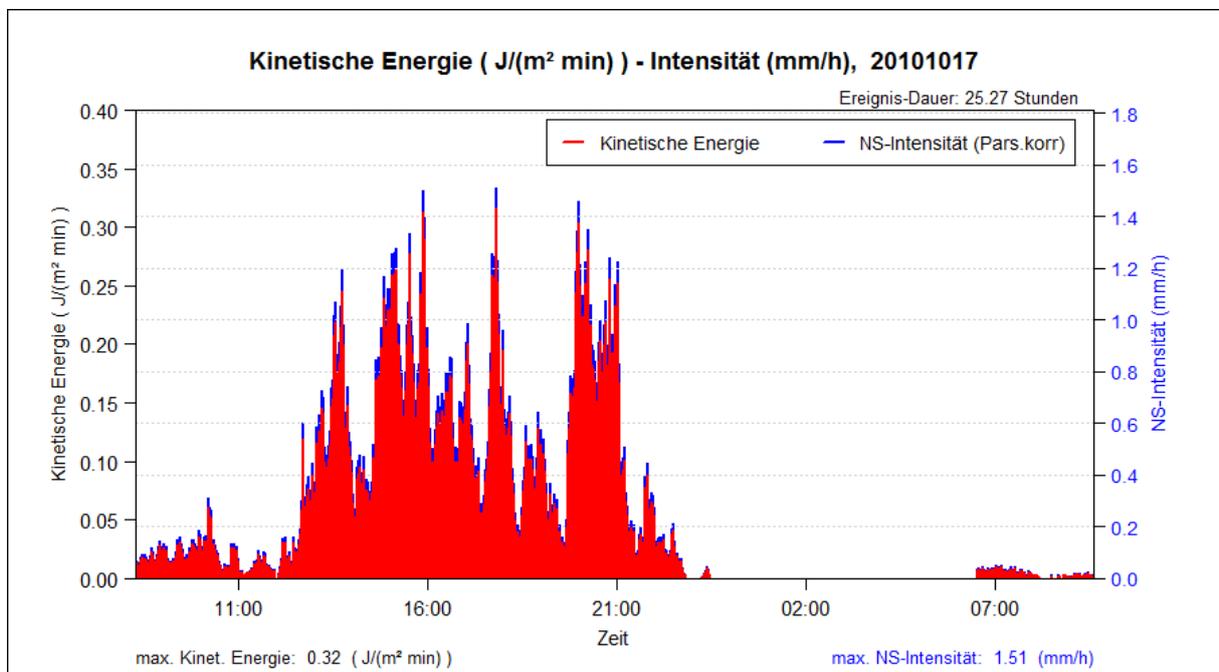
Ereignis-Nr. 10



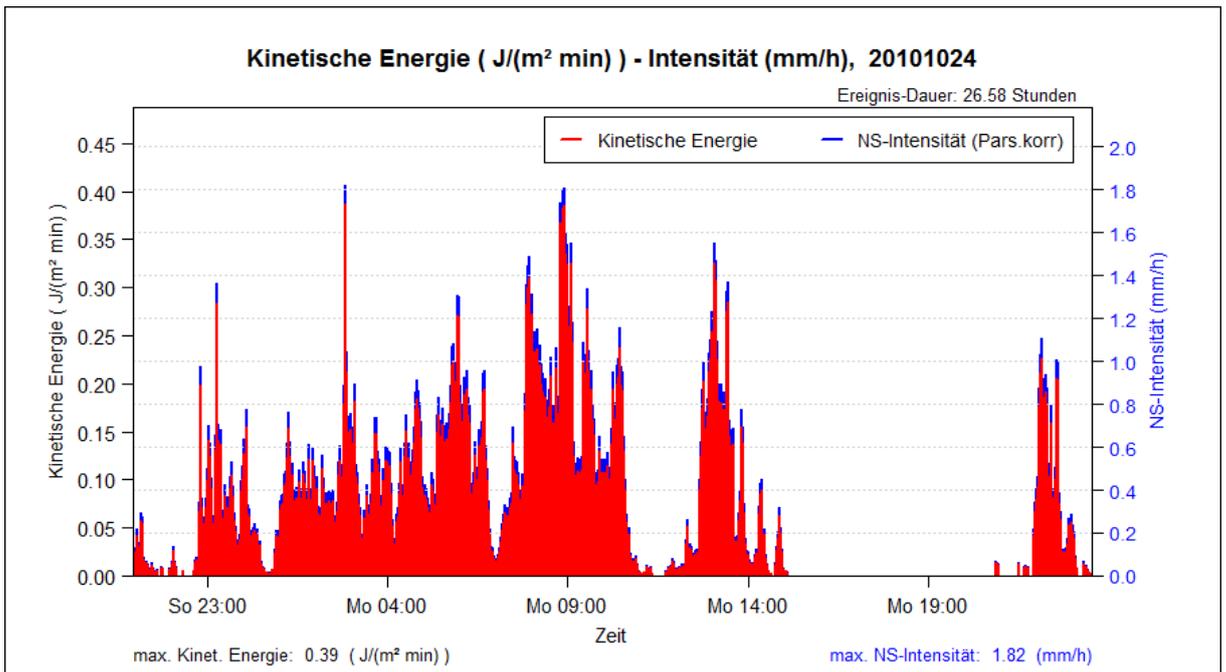
Ereignis-Nr. 11



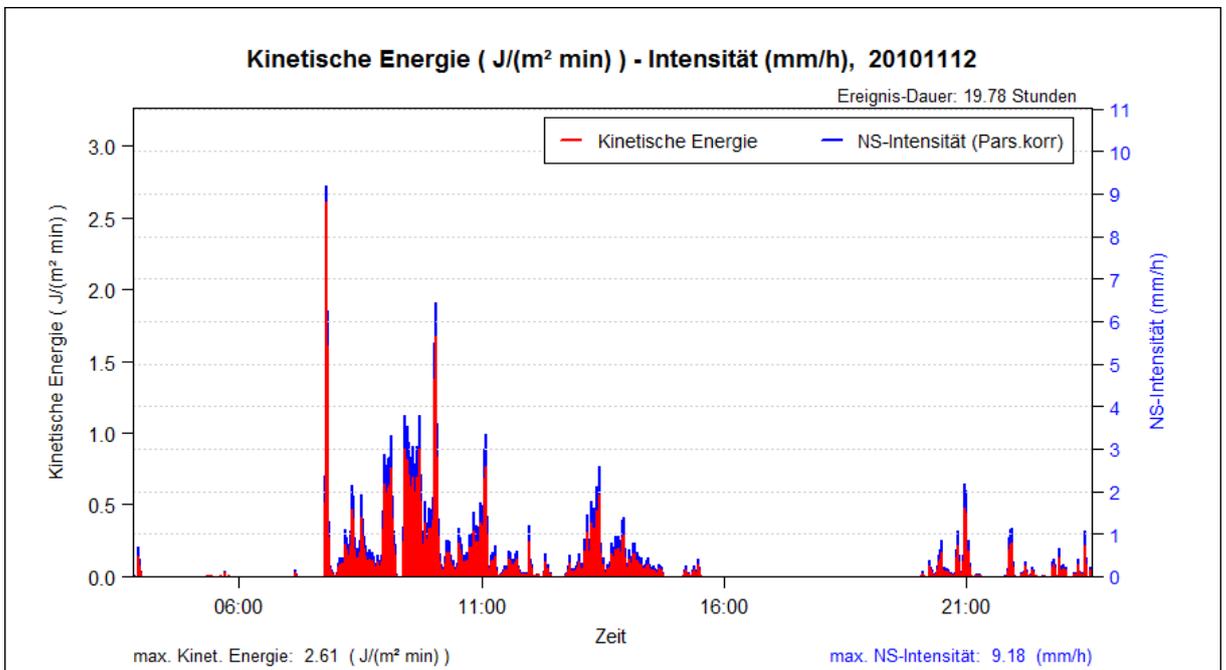
Ereignis-Nr. 12



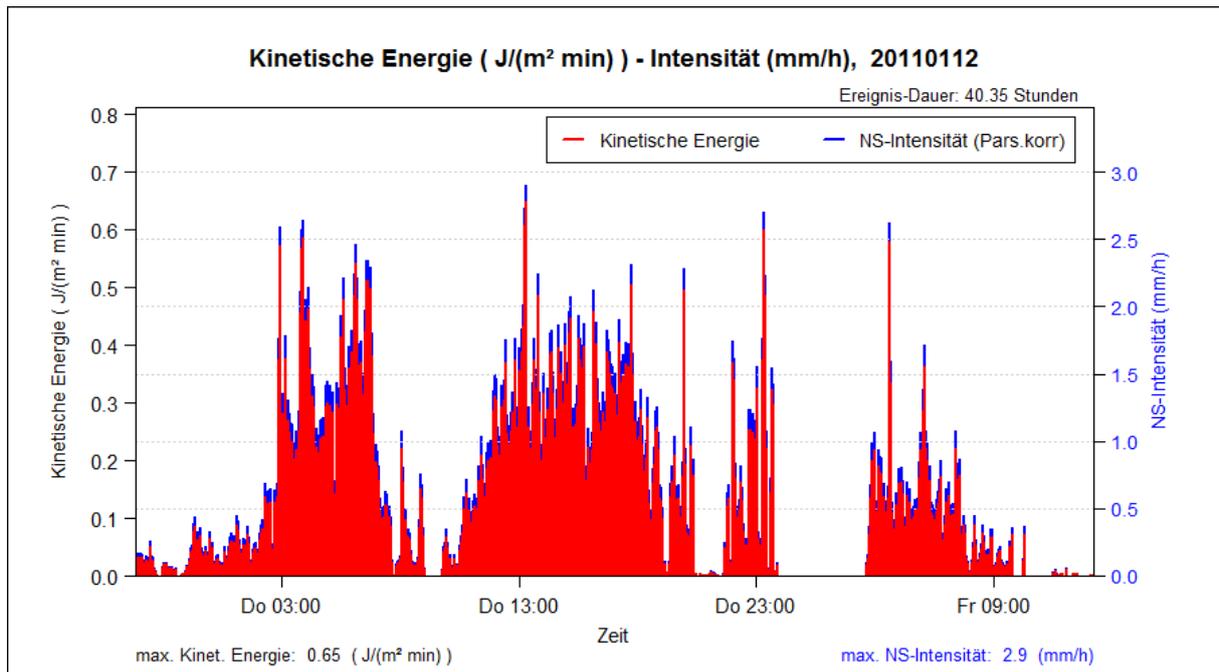
Ereignis-Nr. 13



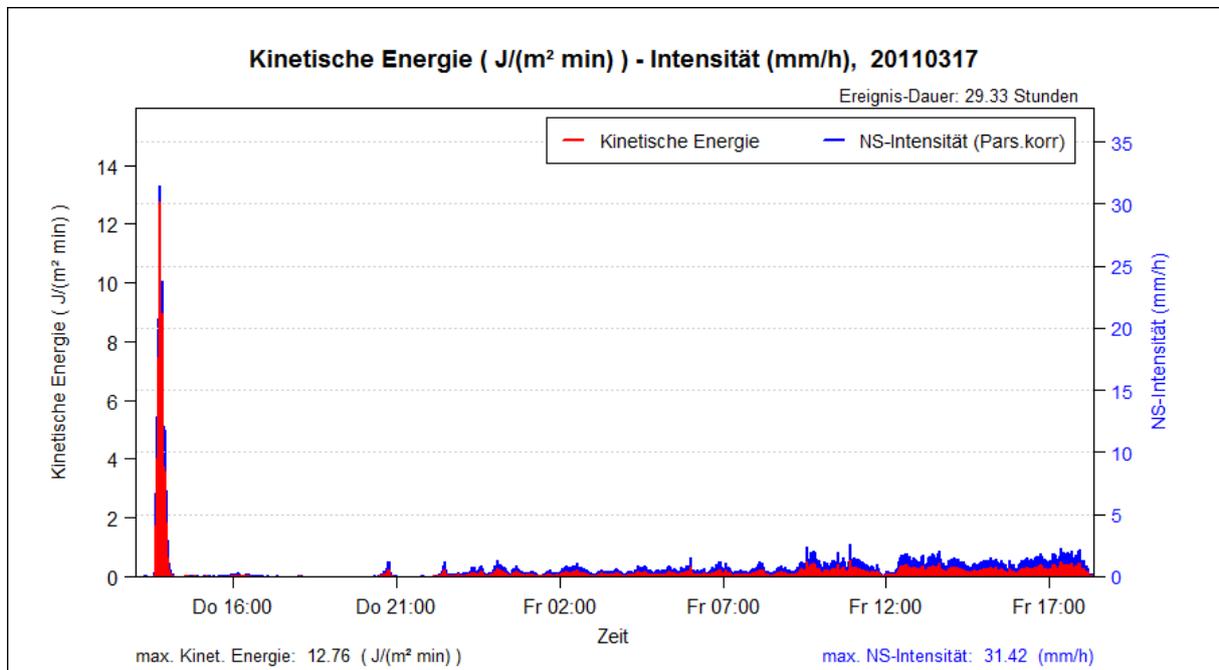
Ereignis-Nr. 14



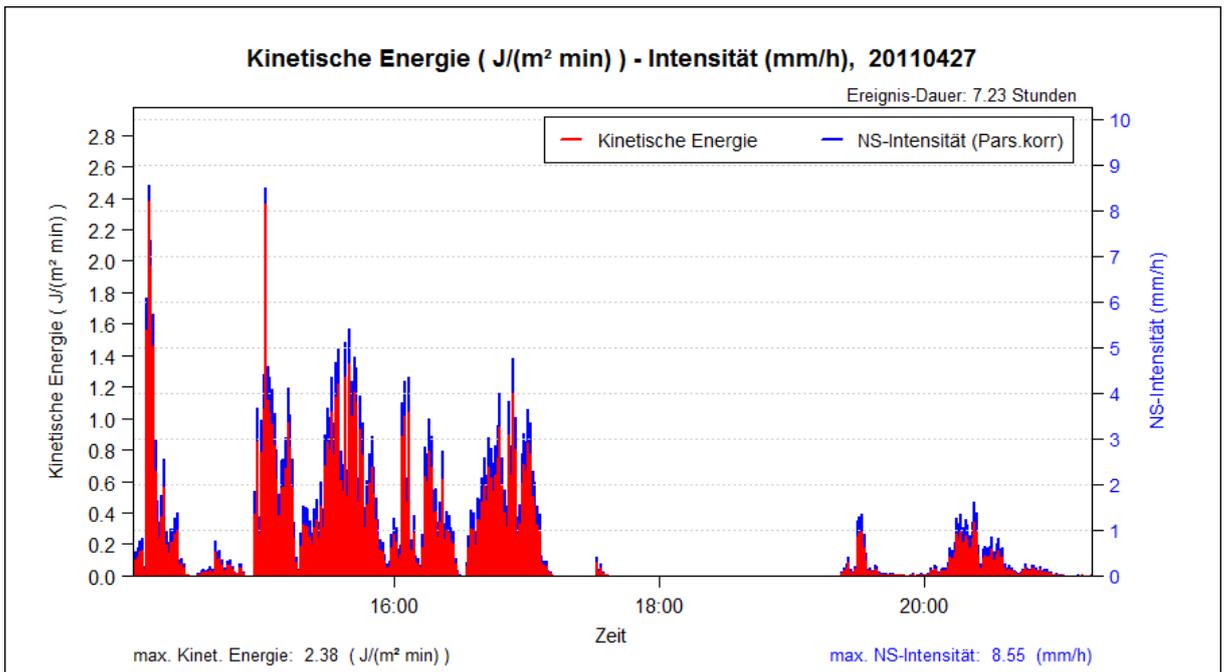
Ereignis-Nr. 15



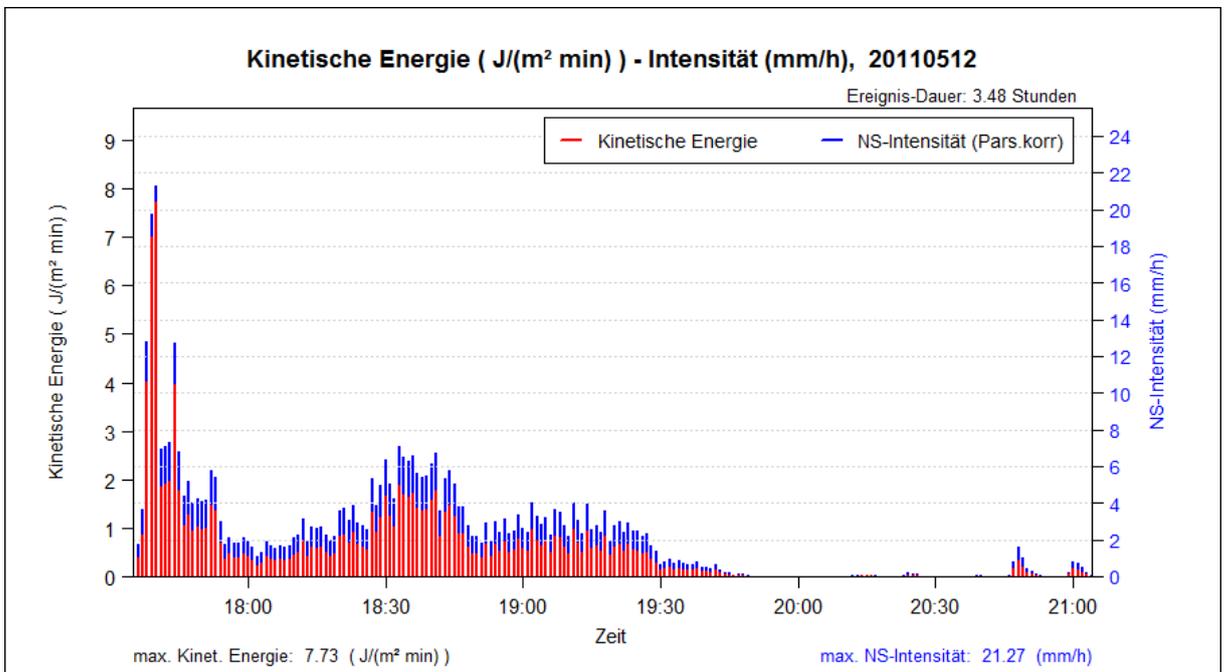
Ereignis-Nr. 16



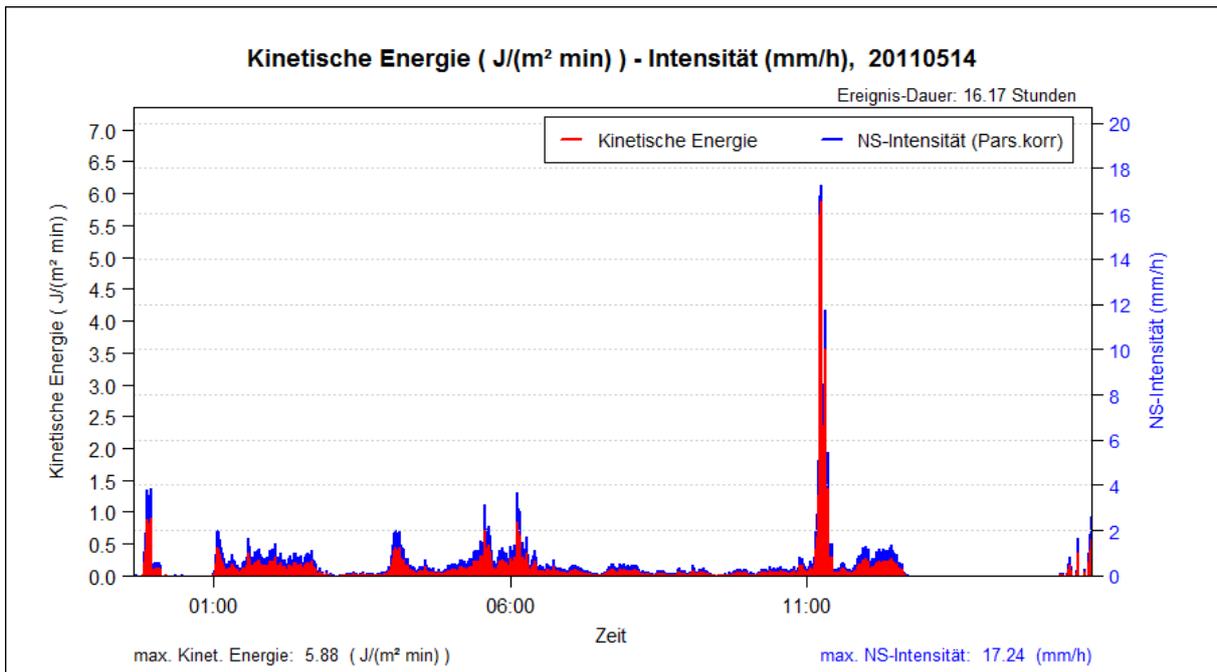
Ereignis-Nr. 17



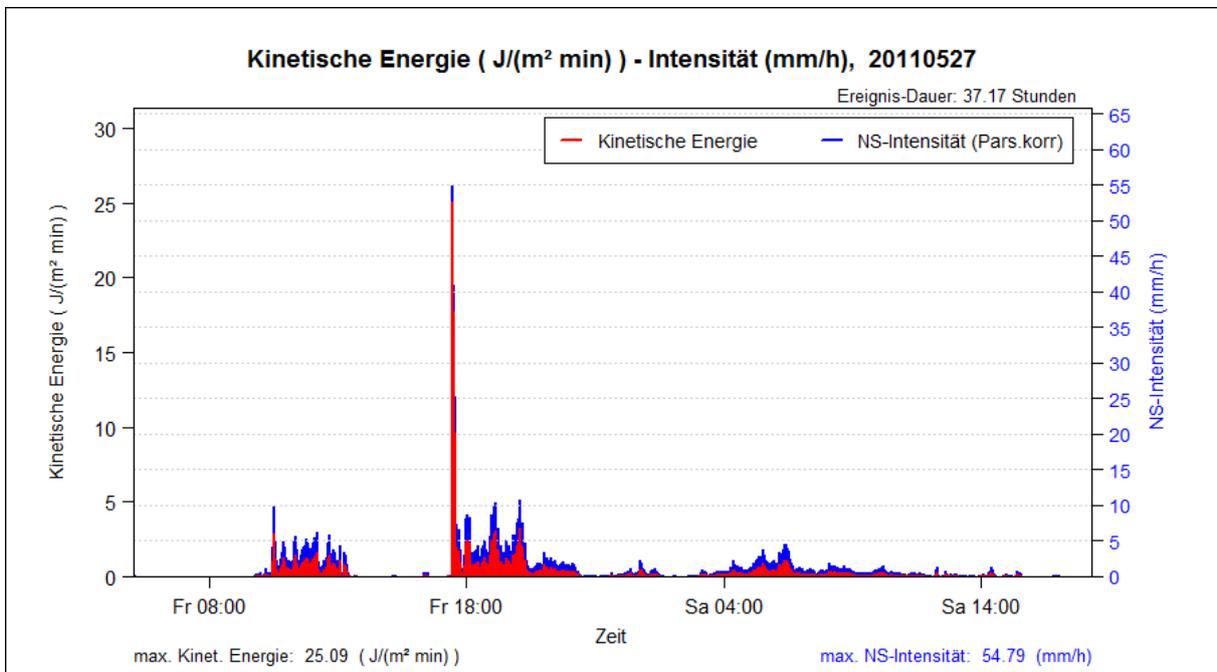
Ereignis-Nr. 18



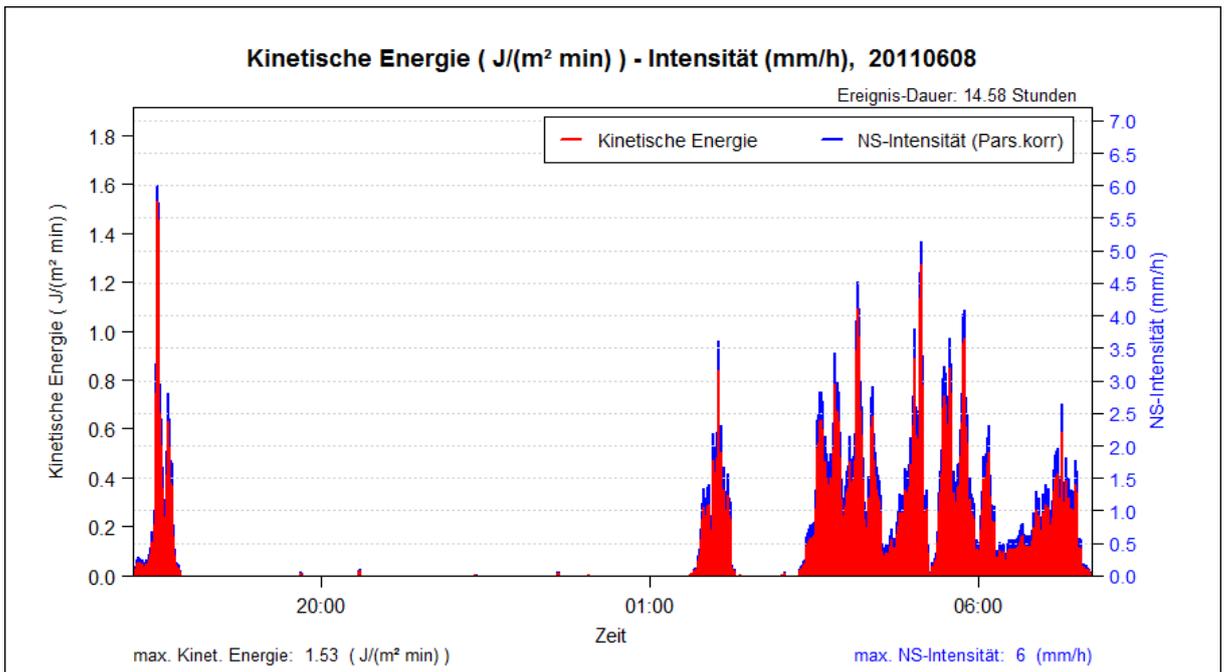
Ereignis-Nr. 19



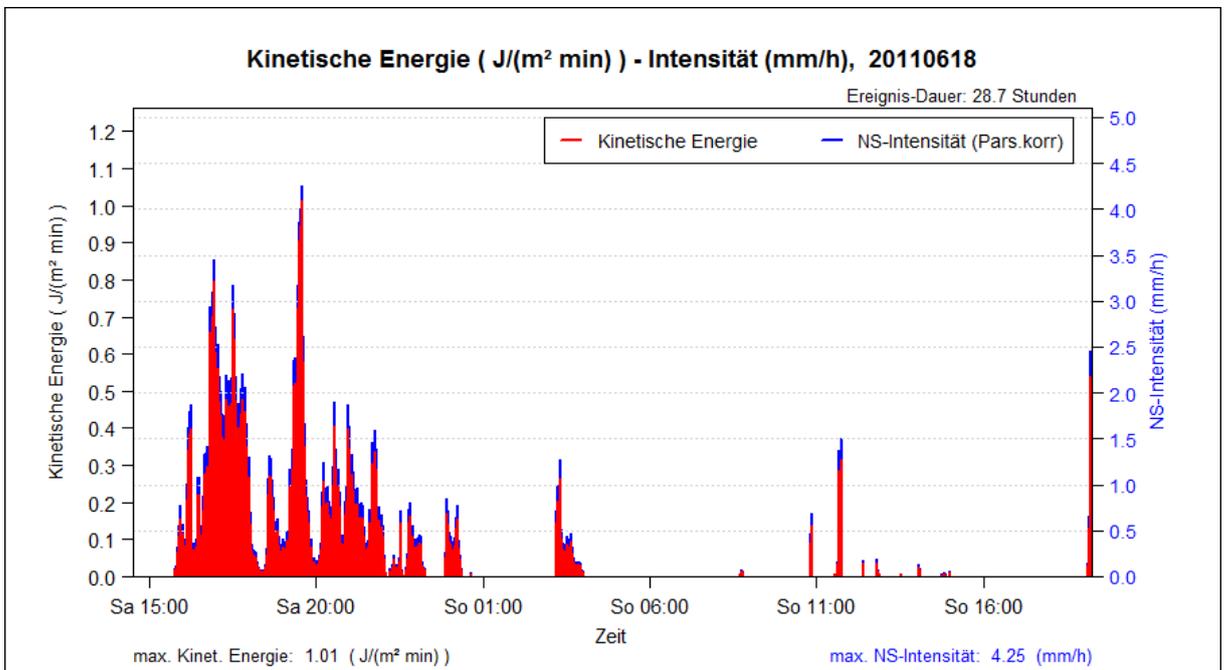
Ereignis-Nr. 20



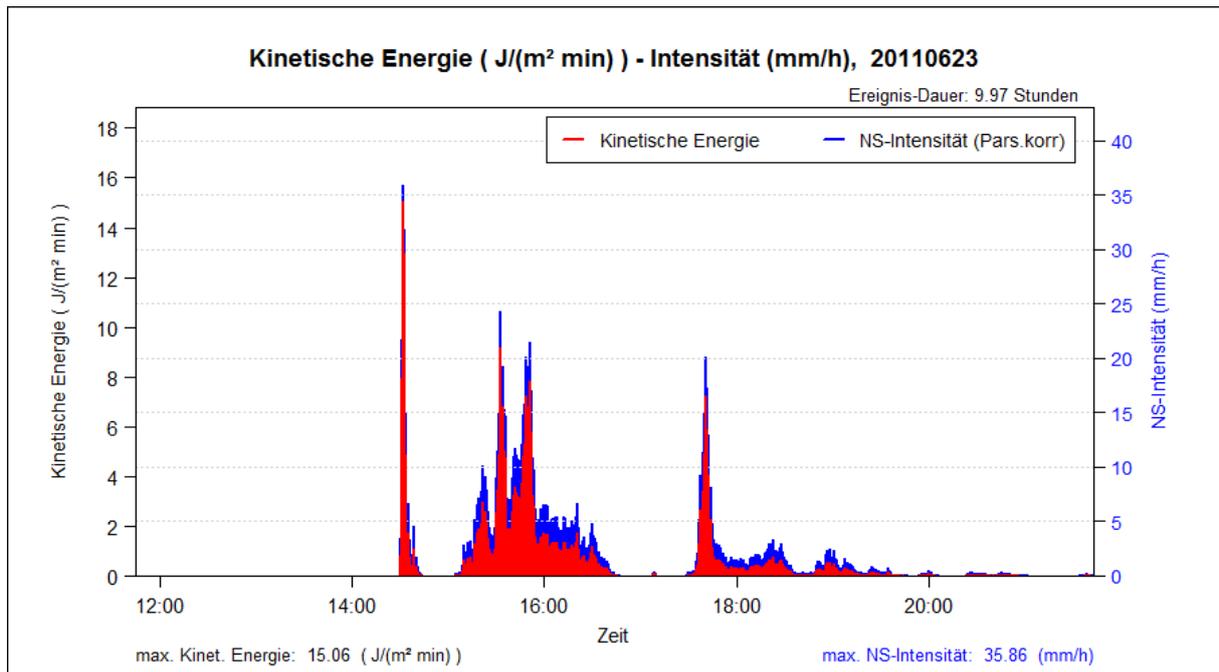
Ereignis-Nr. 21



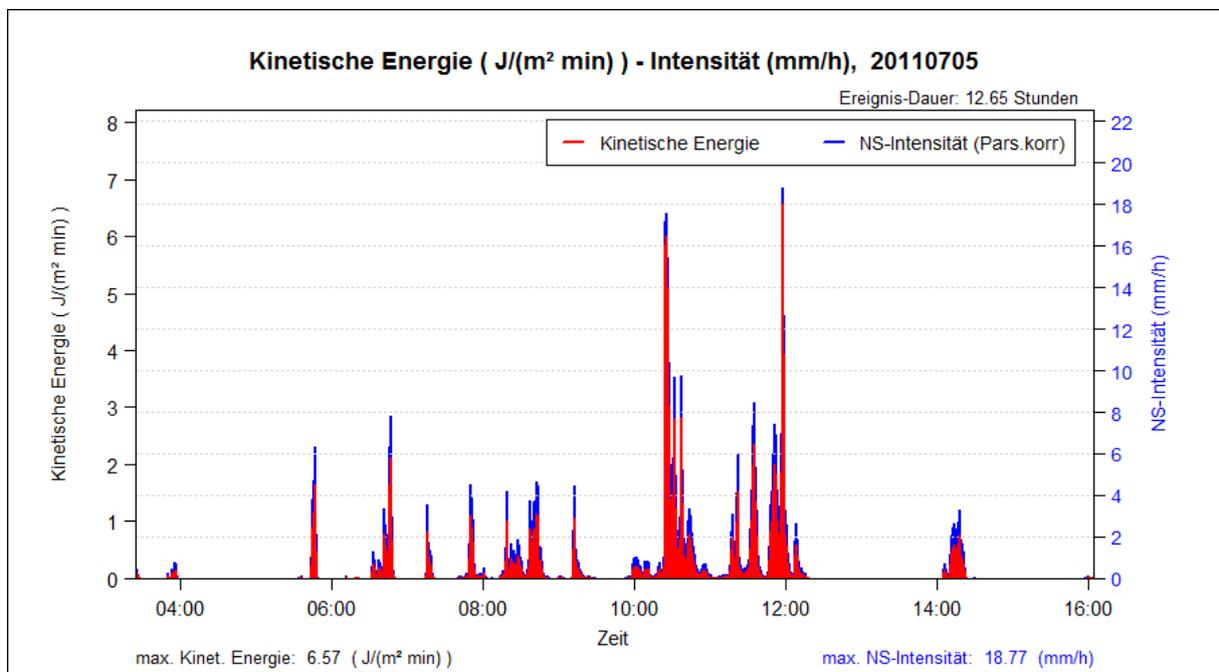
Ereignis-Nr. 22



Ereignis-Nr. 23

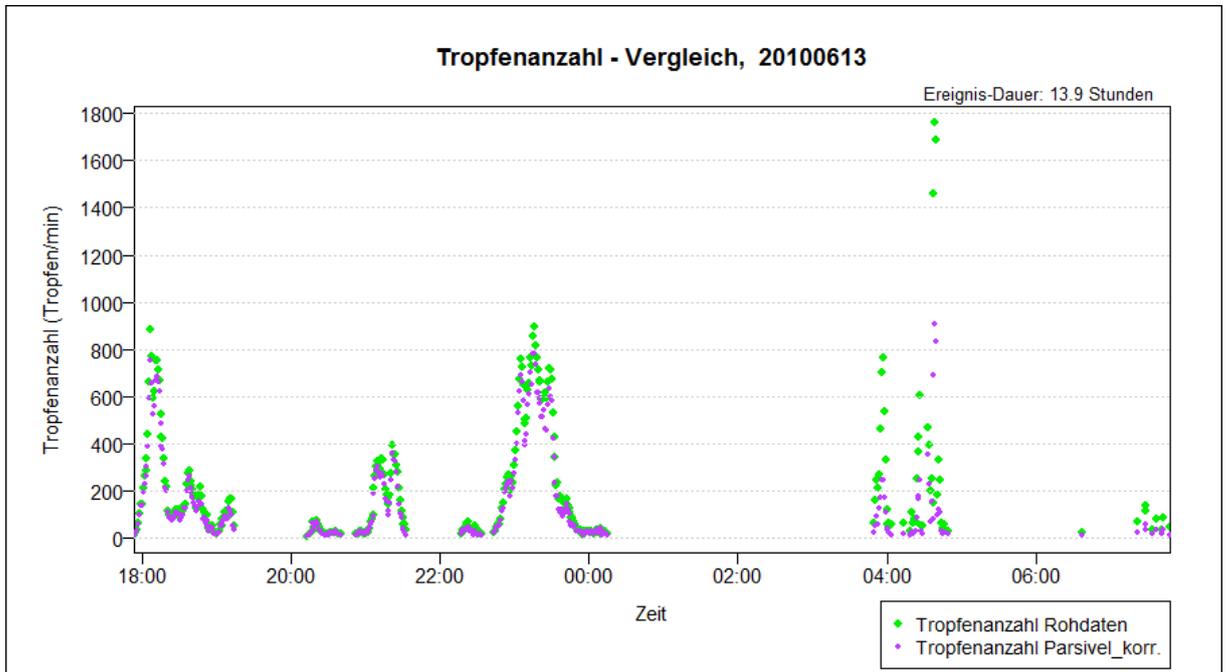


Ereignis-Nr. 24

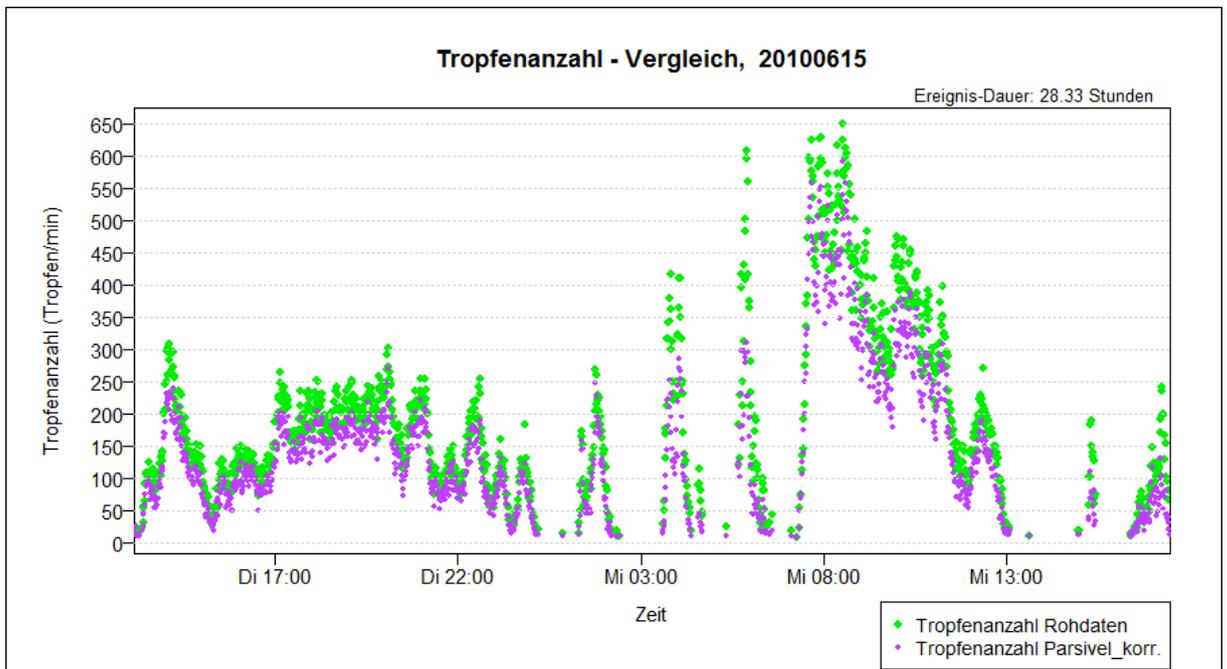


10.2. Grafische Darstellung der Tropfenanzahl

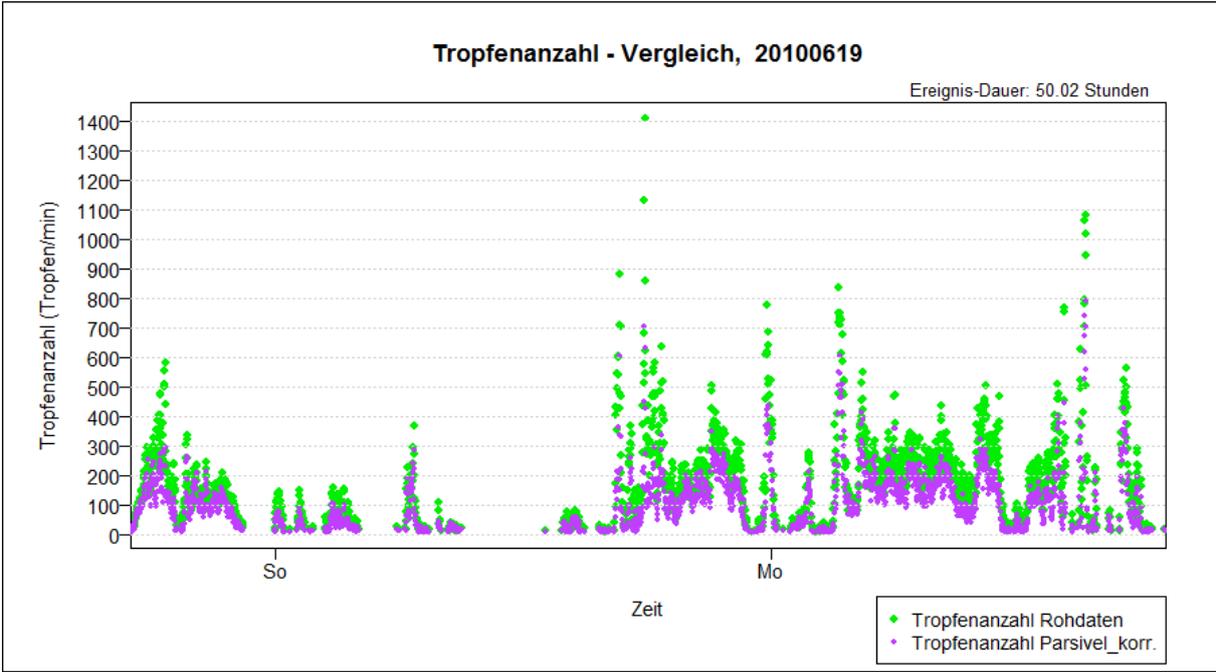
Ereignis-Nr. 1



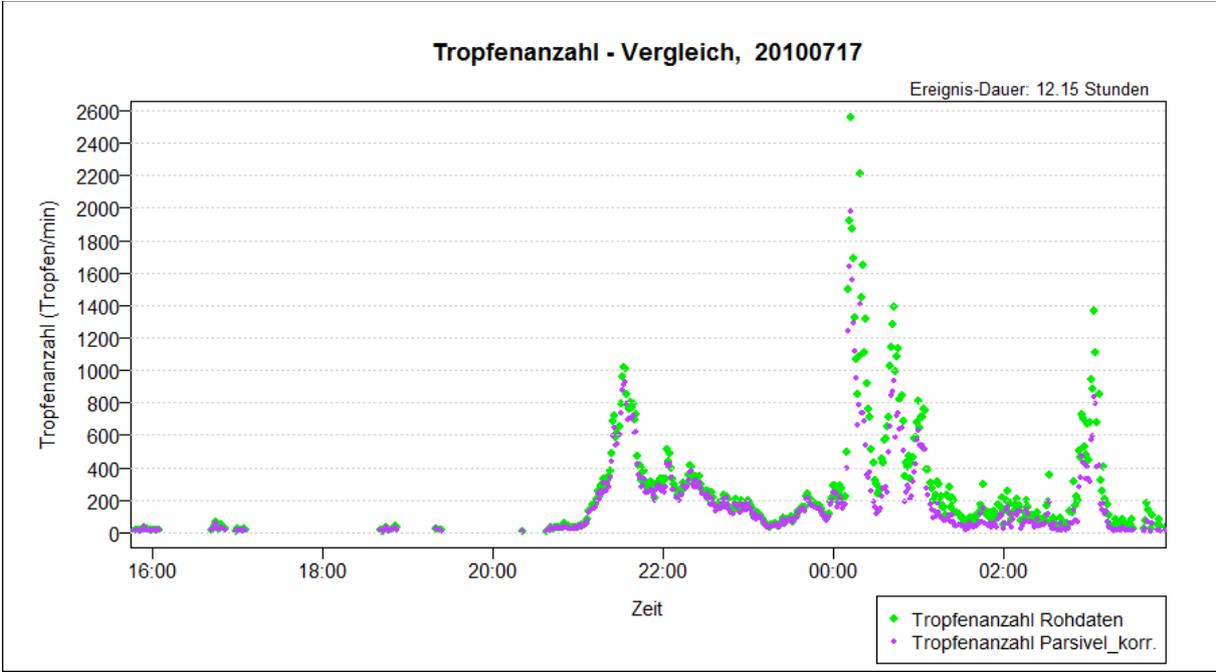
Ereignis-Nr. 2



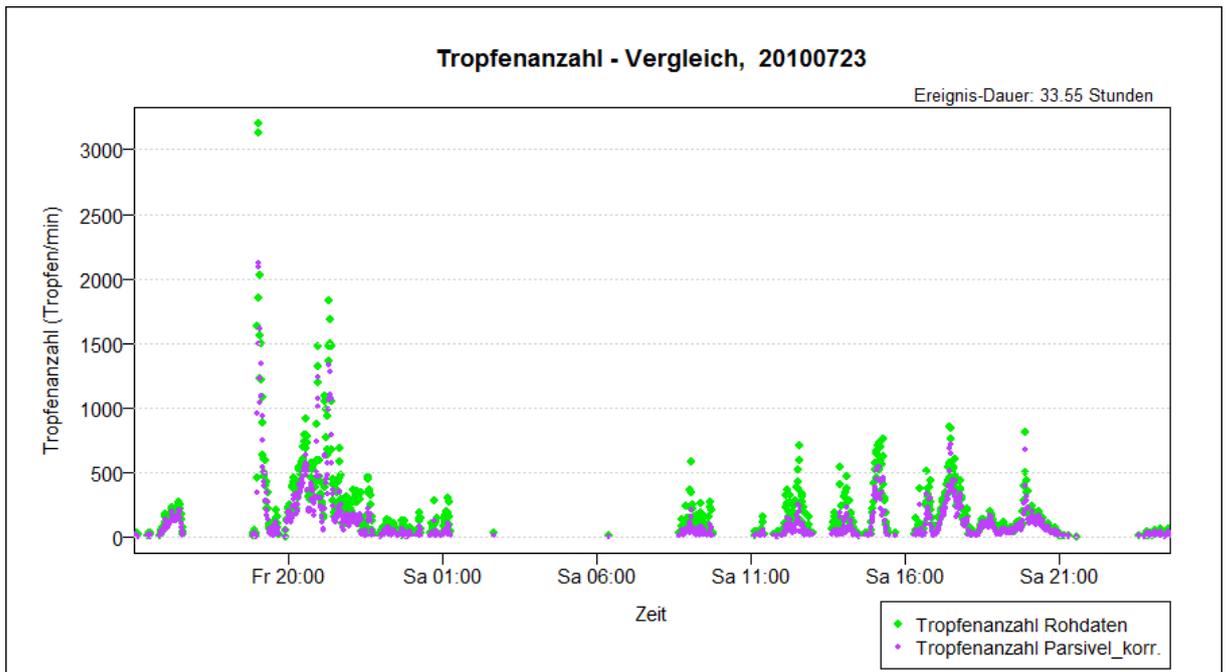
Ereignis-Nr. 3



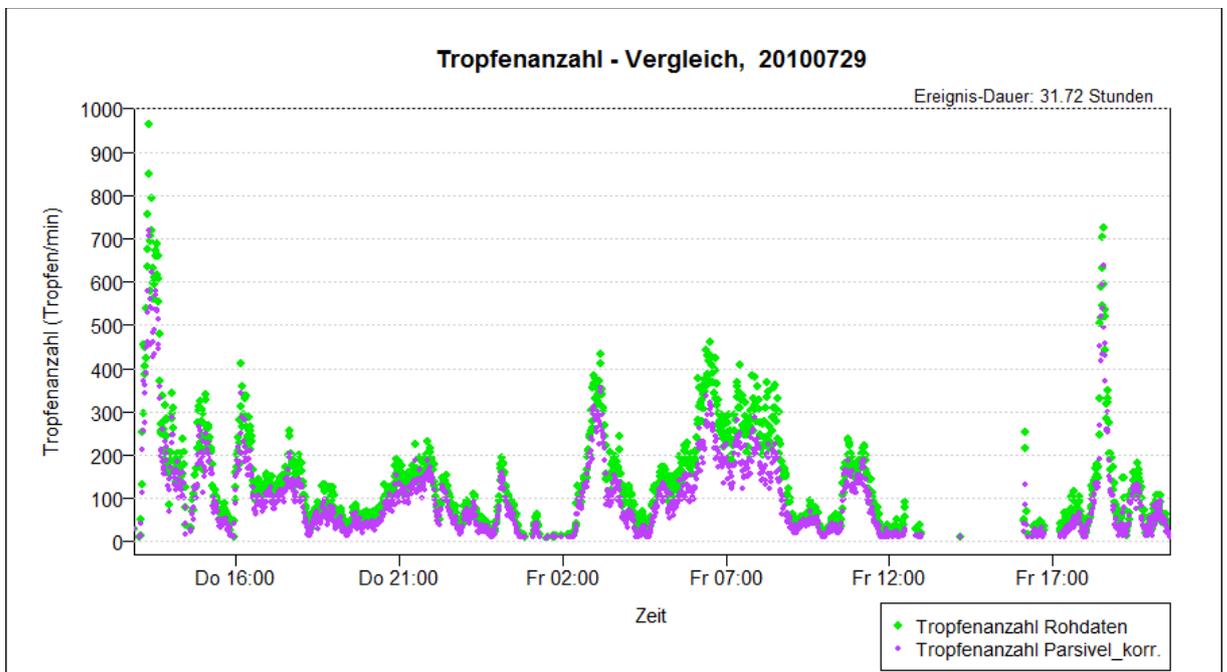
Ereignis-Nr. 4



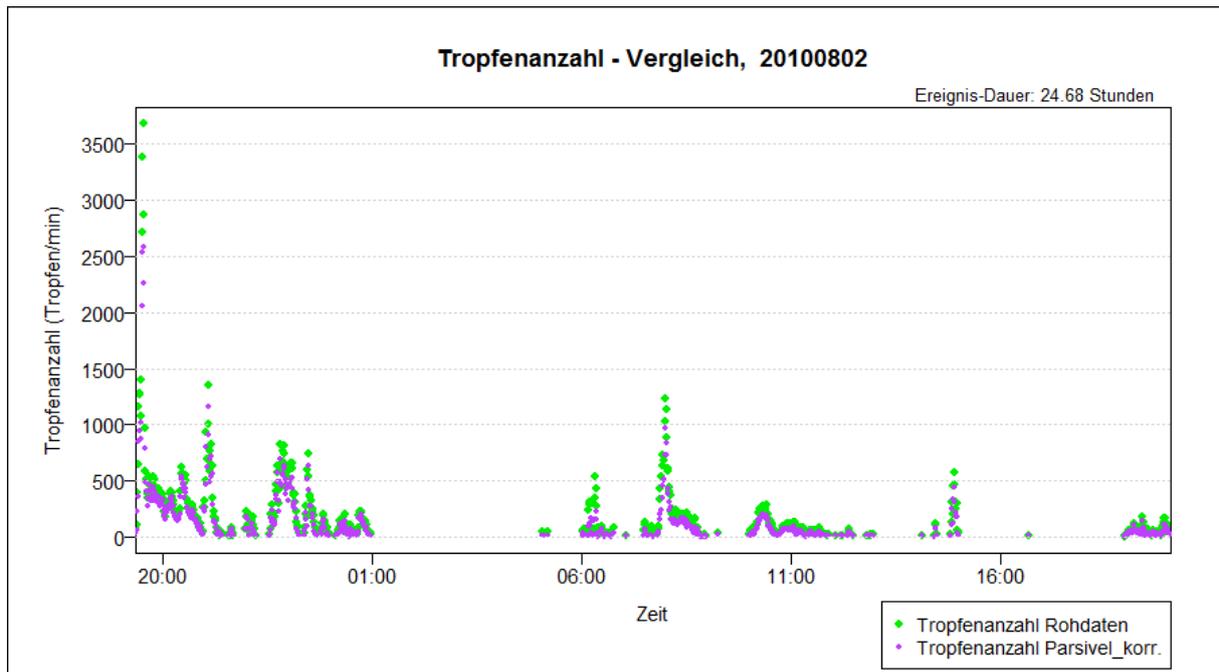
Ereignis-Nr. 5



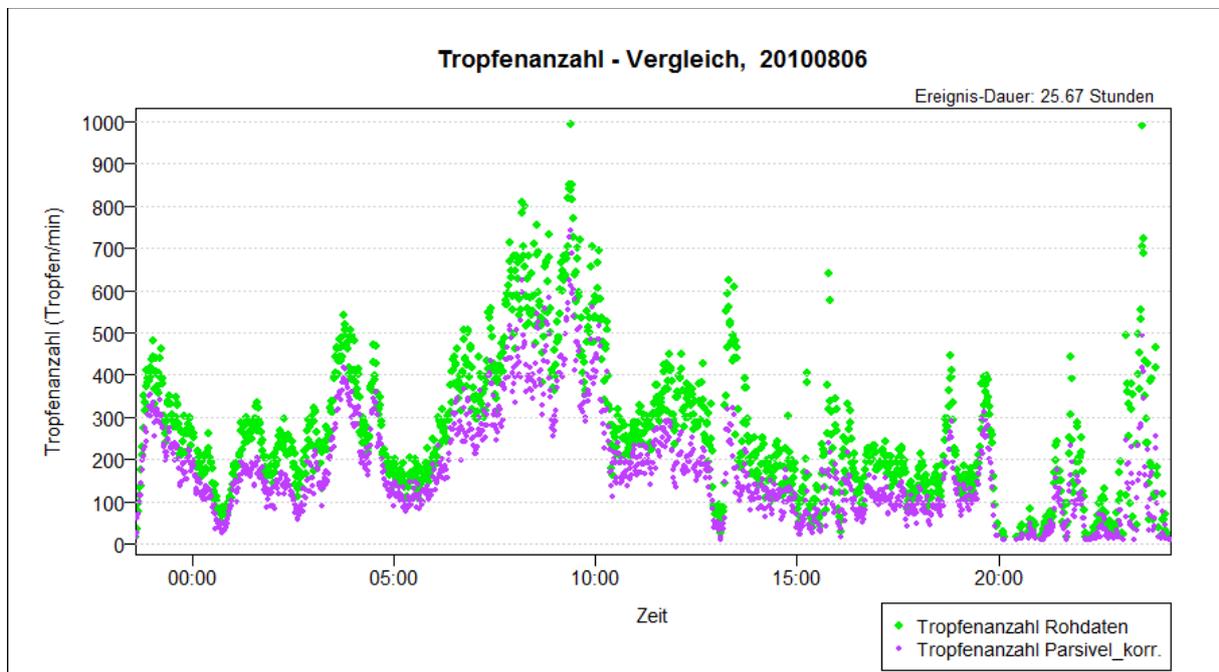
Ereignis-Nr. 6



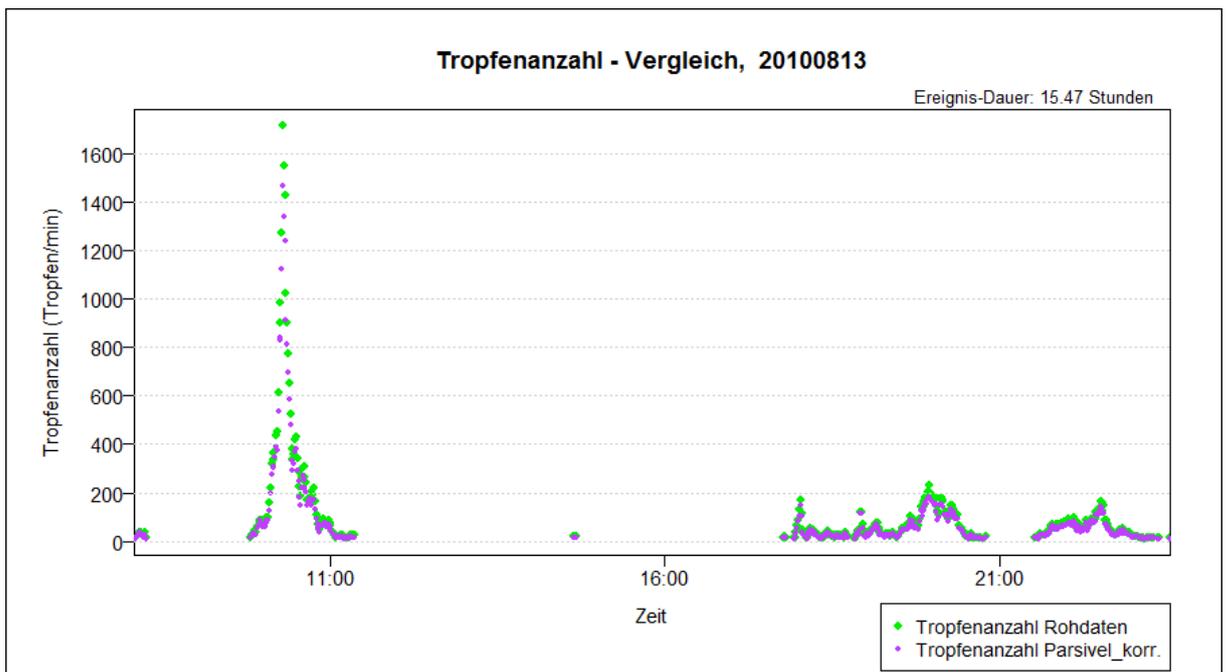
Ereignis-Nr. 7



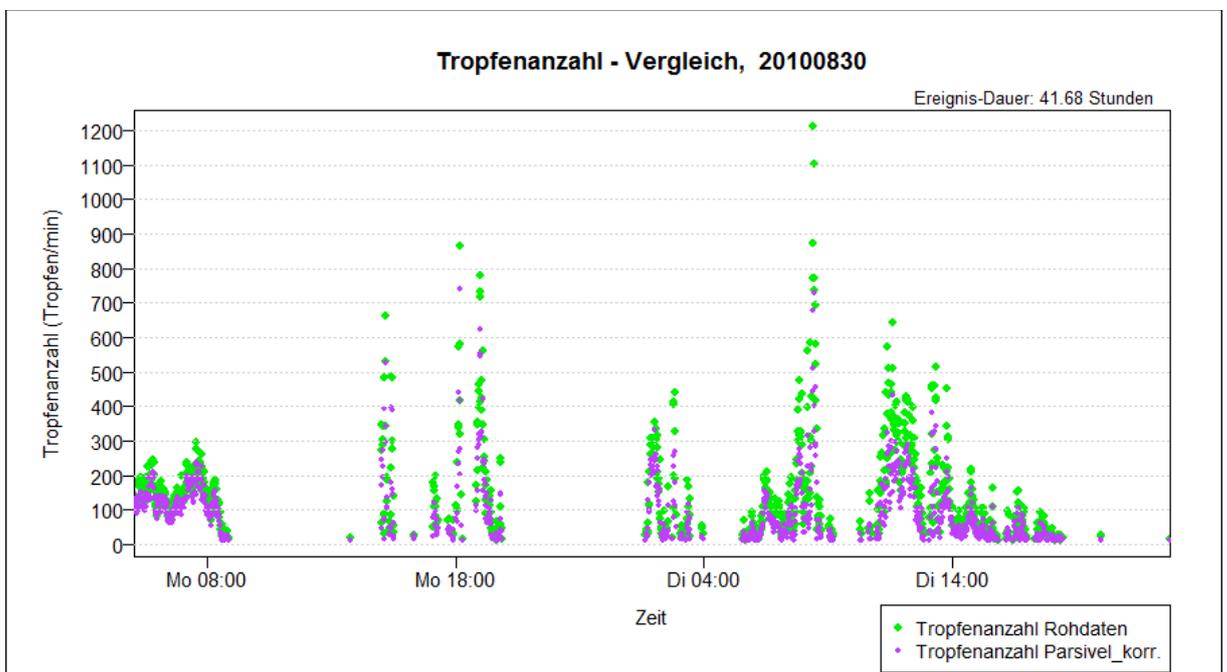
Ereignis-Nr. 8



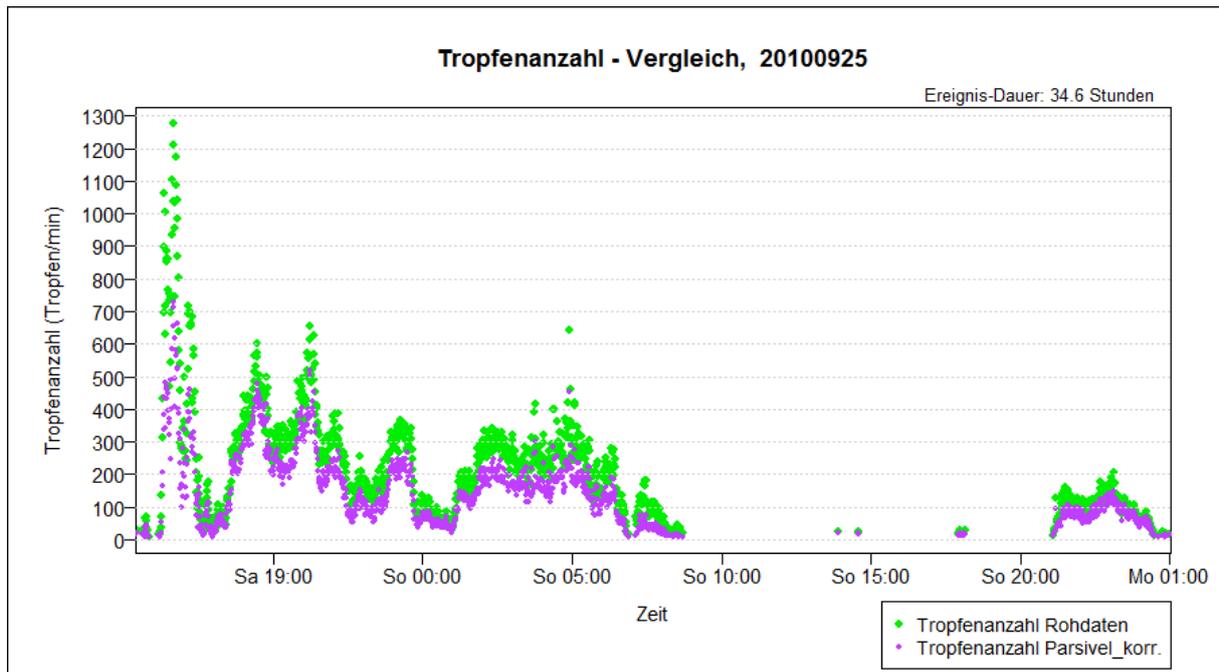
Ereignis-Nr. 9



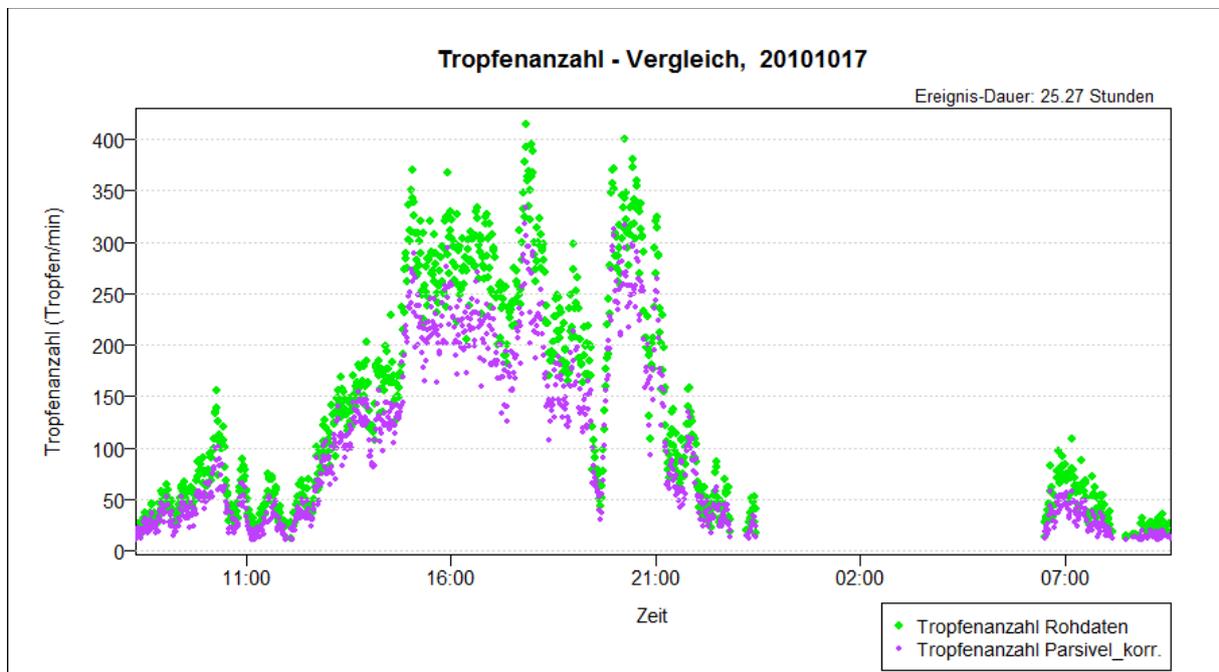
Ereignis-Nr. 10



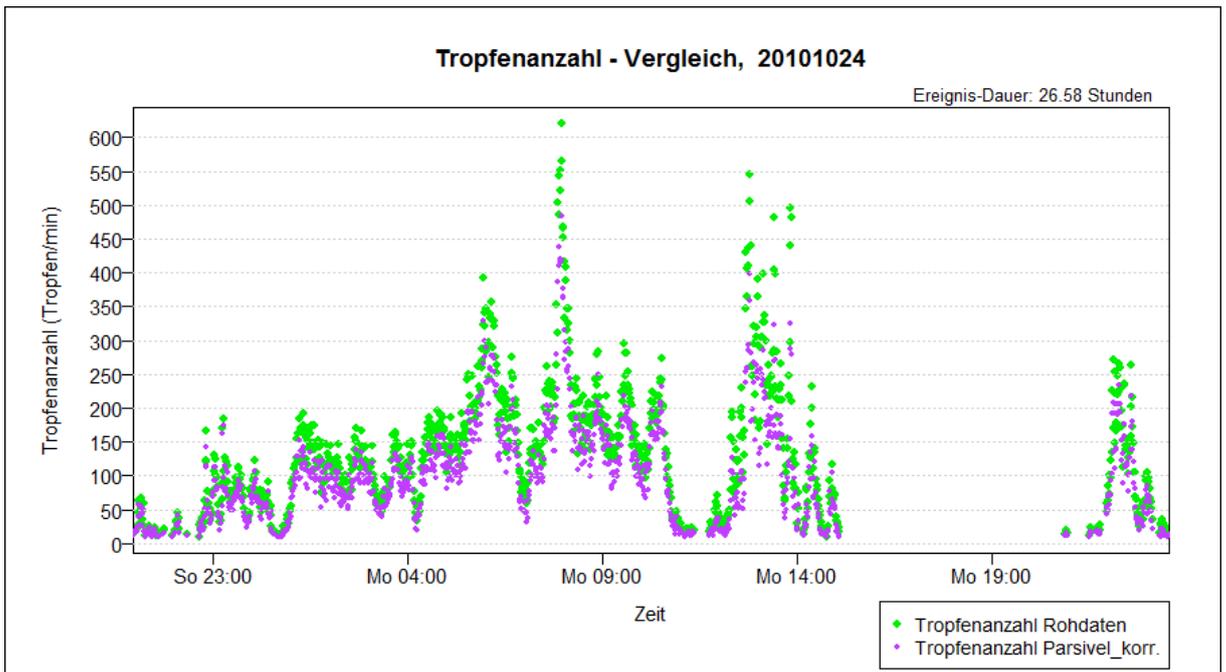
Ereignis-Nr. 11



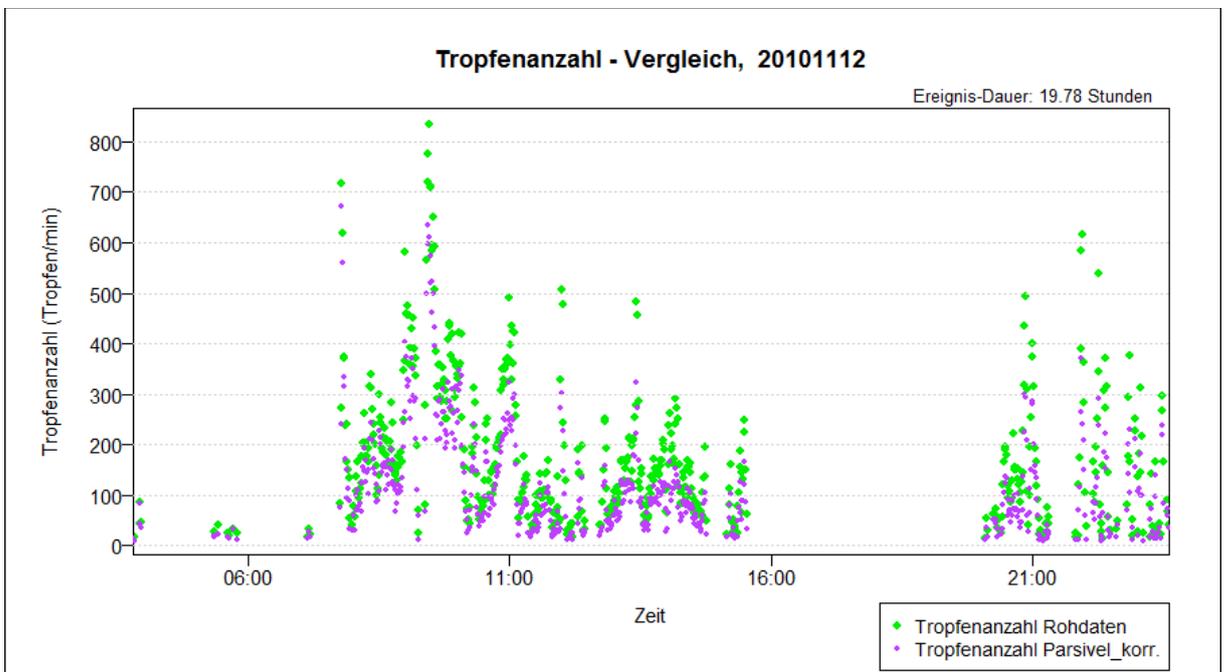
Ereignis-Nr. 12



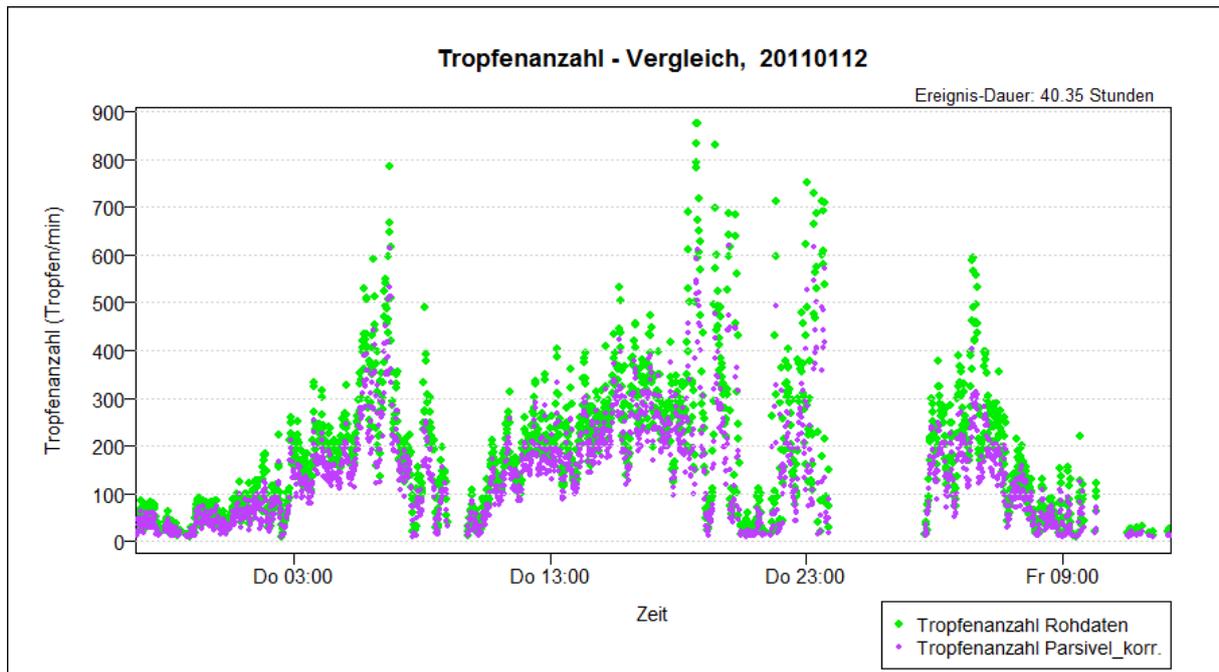
Ereignis-Nr. 13



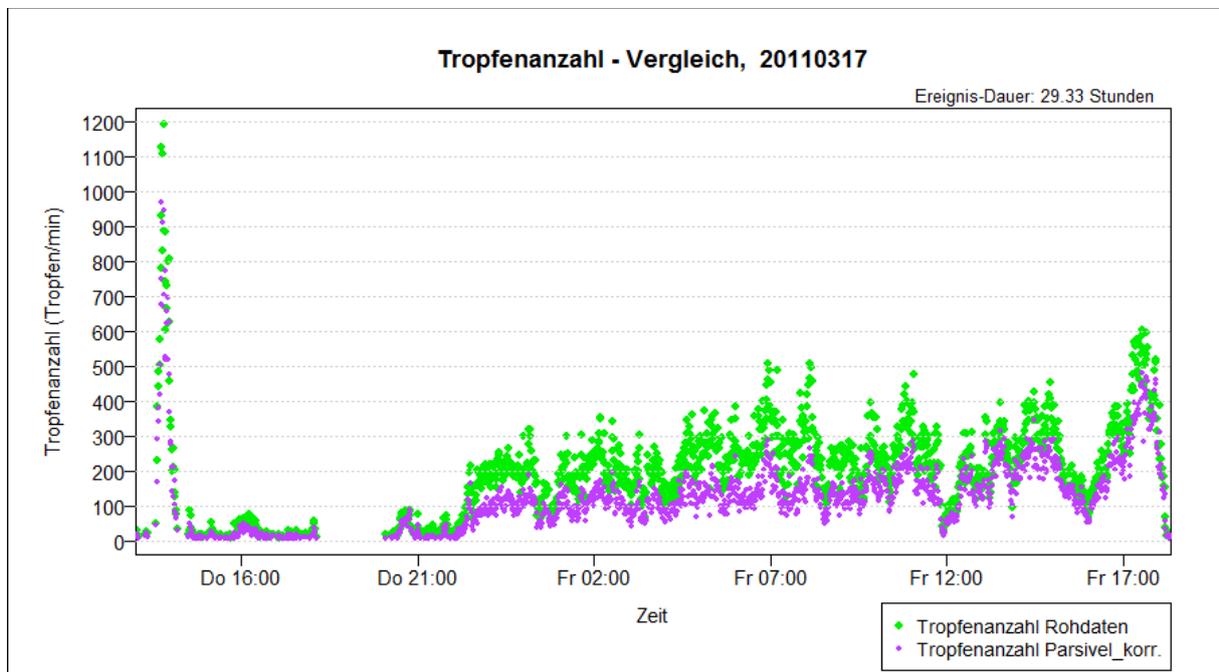
Ereignis-Nr. 14



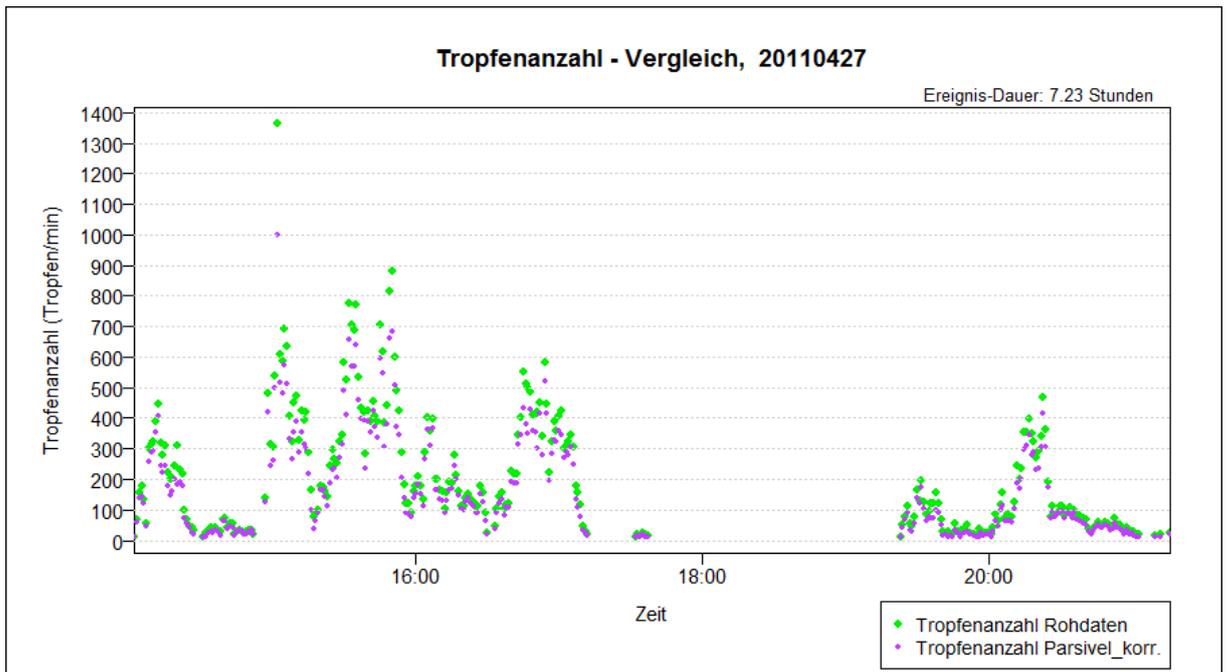
Ereignis-Nr. 15



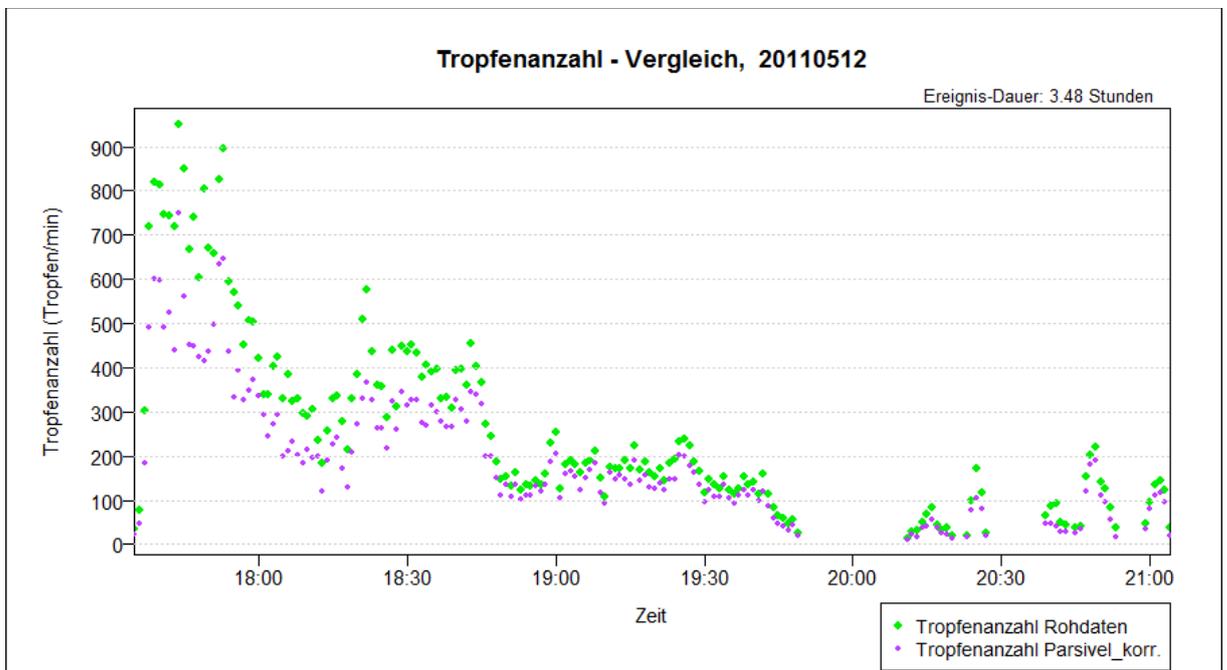
Ereignis-Nr. 16



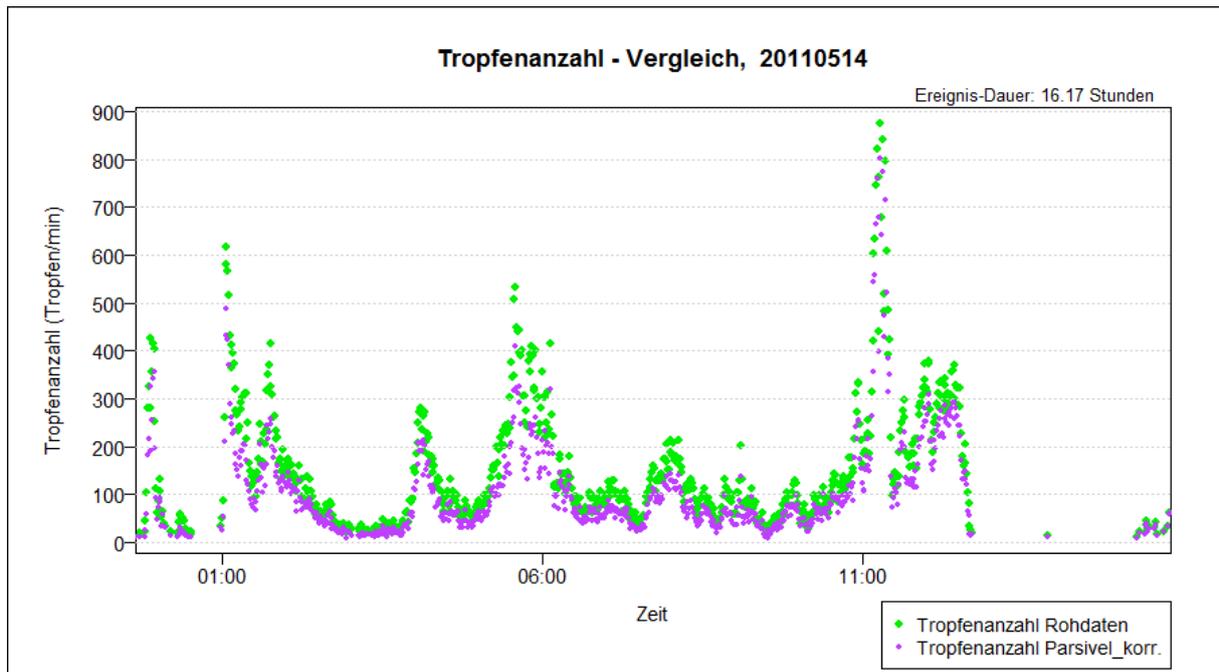
Ereignis-Nr. 17



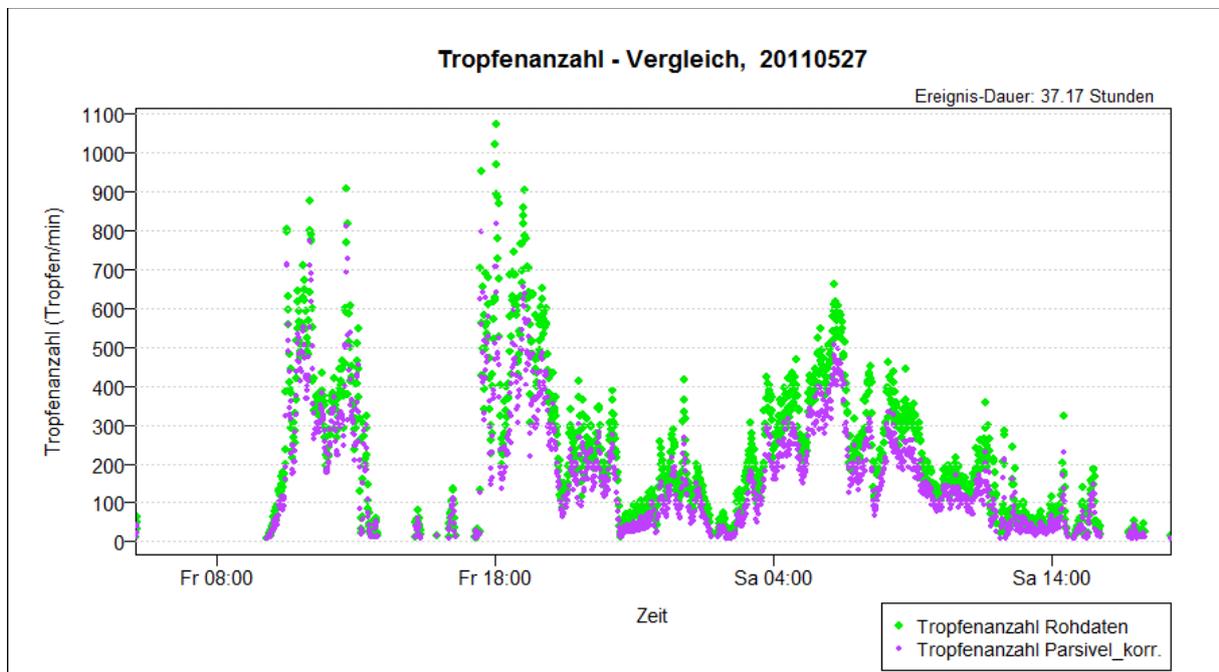
Ereignis-Nr. 18



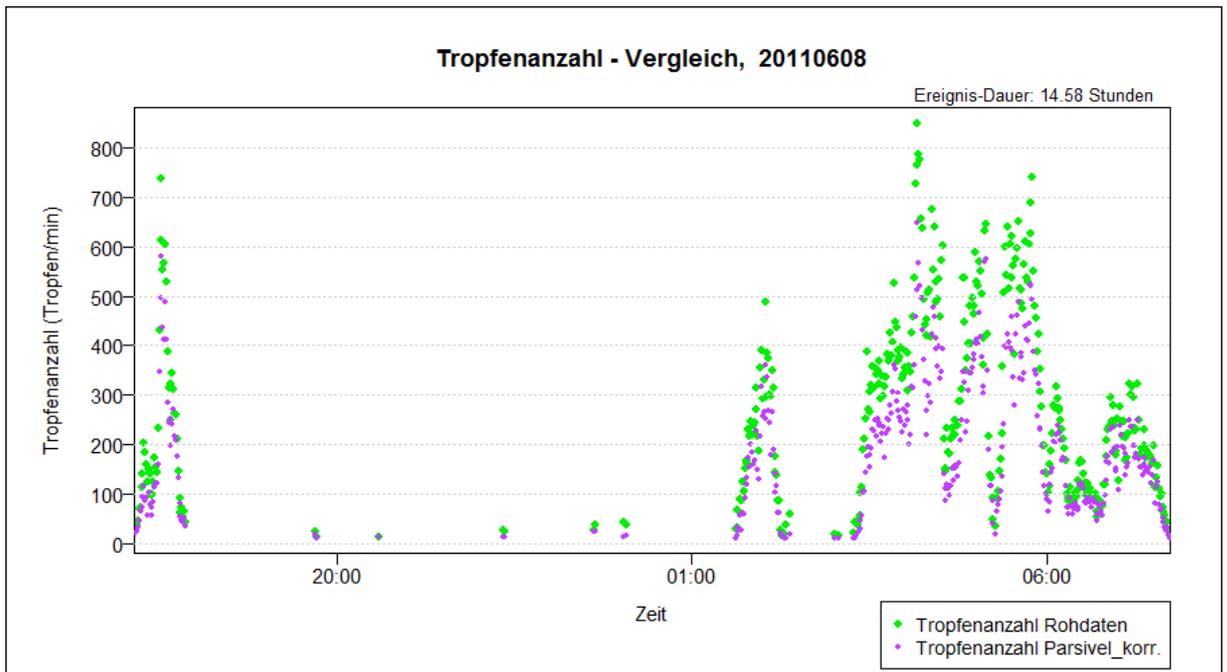
Ereignis-Nr. 19



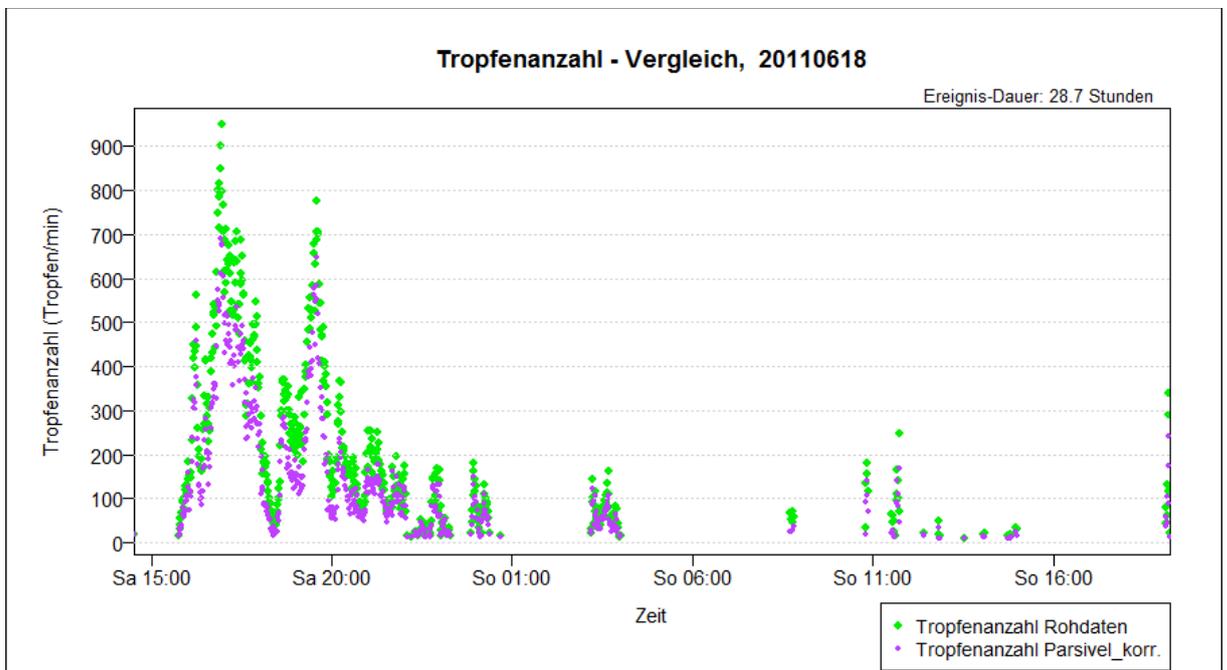
Ereignis-Nr. 20



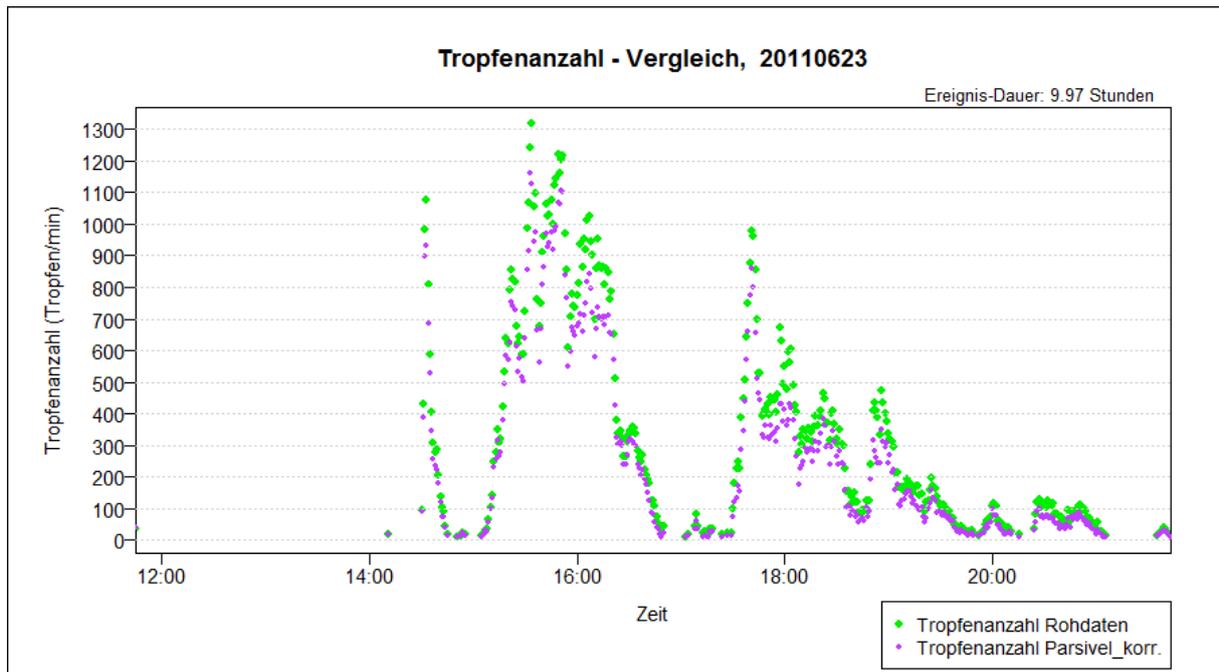
Ereignis-Nr. 21



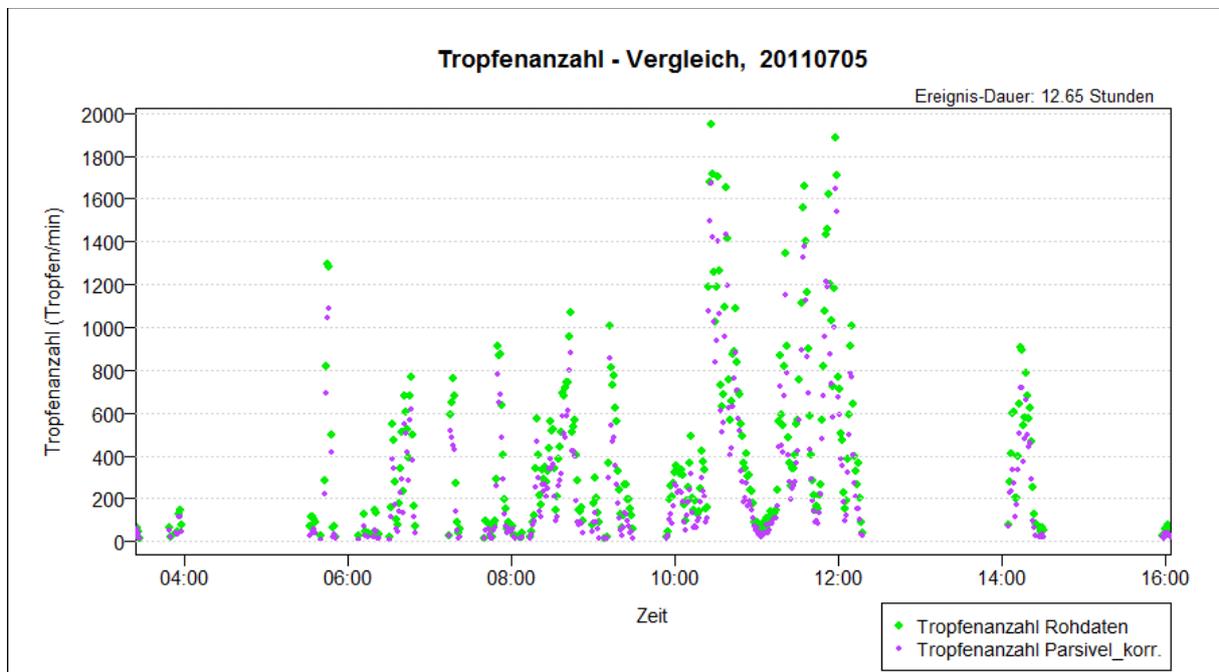
Ereignis-Nr. 22



Ereignis-Nr. 23



Ereignis-Nr. 24



10.3. Übersichtstabelle der ausgewerteten Niederschlagsereignisse

Ereignis-Datum	TrAnz-Gerät	NS_Gerät (mm)	TrAnz-Rohd_orig	TrAnz-Rohdaten	NS_Rohdaten (mm)	Dauer ges. (h)	Dauer NS (min)	E (J/m ²)	E Wink (J/m ²)	E Br&Fo (J/m ²)	E Petan (J/m ²)	E Za&To (J/m ²)
13.06.2010	50356	11,19	65488	65470	11,33	13,90	304	253,96	209,69	197,06	244,72	226,95
15.06.2010	189712	15,98	243162	243162	15,76	28,33	1247	180,53	203,18	157,65	226,11	175,43
19.06.2010	230272	11,74	363219	363219	12,38	50,02	1973	178,20	140,64	103,56	149,69	80,71
17.07.2010	93802	16,03	129154	129152	15,70	12,15	471	254,59	271,24	244,92	315,08	295,02
23.07.2010	130641	16,98	201988	201981	17,40	33,55	920	304,65	312,95	288,06	352,39	323,28
29.07.2010	160963	18,96	222146	222138	19,04	31,72	1544	297,94	283,14	242,37	327,32	264,02
02.08.2010	97690	14,58	131397	131379	15,41	24,68	597	295,41	259,33	236,26	295,54	277,69
06.08.2010	264244	27,05	394692	394691	27,80	25,67	1468	375,20	357,25	285,47	407,17	349,60
13.08.2010	34329	8,34	39785	39785	7,84	15,47	380	154,84	154,03	142,58	174,25	155,96
30.08.2010	102009	8,69	149862	149862	8,90	41,68	984	115,86	108,91	83,25	119,72	86,34
25.09.2010	189563	17,24	279111	279111	19,93	34,60	1264	252,69	216,94	166,78	239,95	188,85
17.10.2010	109614	6,03	143471	143471	5,99	25,27	1013	59,32	72,12	53,14	76,82	42,73
24.10.2010	113756	7,89	147409	147409	7,78	26,58	1082	84,94	94,67	69,79	100,88	57,62
12.11.2010	67770	6,02	98219	98219	6,11	19,78	552	81,33	77,22	60,28	86,24	66,24
12.01.2011	271314	20,55	359515	359515	20,23	40,35	1867	242,74	252,82	190,68	275,04	197,80
17.03.2011	200665	19,40	311874	311874	20,27	29,33	1482	287,63	273,94	226,43	308,68	239,92
27.04.2011	49410	6,46	59400	59400	6,20	7,23	291	84,99	87,58	71,38	101,33	91,08
12.05.2011	33374	7,61	45297	45294	7,48	3,48	170	140,24	114,41	99,14	136,32	129,28
14.05.2011	81427	7,87	112446	112446	7,84	16,17	749	103,56	104,29	83,14	116,83	85,97
27.05.2011	286440	36,91	388567	388559	36,31	37,17	1600	553,72	541,60	459,15	625,30	561,38
08.06.2011	72129	7,64	100066	100066	7,77	14,58	367	104,35	98,82	77,71	111,35	95,62
18.06.2011	88262	7,27	124912	124911	7,47	28,70	562	88,99	91,50	70,38	101,20	78,12
23.06.2011	96748	17,09	117561	117558	16,42	9,97	353	260,40	295,19	272,31	355,77	333,15
05.07.2011	103572	8,36	138358	138358	8,25	12,65	332	95,54	126,18	109,57	150,07	136,69
Summen:	3118062	325,88	4367099	4367030	329,61	583,03	21572	4801,62	4747,66	3991,06	5397,78	4539,45

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.