Universität für Bodenkultur Wien
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt

Universität für Bodenkultur Wien

University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt

Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft

# Masterarbeit

## Datenauswertung und Messdatenanalyse des Distrometers PWS100 zur Ermittlung der kinetischen Energie von Niederschlägen

Verfasser:

Hannes Wild, BSc

angestrebter Akademischer Grad:

Diplom-Ingenieur

Betreuer:

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Klik, Andreas

Wien, September 2017

# Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer Dr. Andreas Klik herzlich bedanken, der mir bei der Themenfindung meiner Diplomarbeit behilflich war und die hier vorliegende Arbeit ermöglicht hat. Während der Durchführungsphase der Diplomarbeit hat er mich stets unterstützt und so schnell wie möglich Zeit für meine Anliegen gefunden, mich aber ebenso dazu angehalten meine eigenen Vorstellungen für diese Arbeit zu entwickeln und umzusetzen.

Auch an Ing. Wolfgang Sokol möchte ich ein herzliches Dankeschön richten, der in Sachen Datenmanagement immer ein offenes Ohr für mich hatte.

Weiters gilt ein Dank dem Institut für Hydraulik und Landeskulturelle Wasserwirtschaft für die Zurverfügungstellung des Regensimulators, der mir zeitweise sogar ein wenig ans Herz gewachsen ist. An dieser Stelle sind ebenfalls die Mitarbeiter des Instituts für die Hilfe bei der Wiederinstandsetzung des jahrelang stillgelegten Regensimulators zu erwähnen.

Bedanken möchte ich mich ebenso bei Studienkollegen und Freunden, die die gesamte Studienzeit an der Uni mit mir verbracht haben oder auch nur kurze Teilstücke des Studiums mitgegangen sind. Ein Dank gilt ebenso Freunden und Bekannten abseits der Uni für die vielen positiven und motivierenden Worte.

Und zu guter Letzt gilt der größte Dank meiner Familie. Speziell bei meinen Eltern möchte ich mich bedanken, die mir sowohl finanziell als auch mit gutem Zuspruch stets zur Seite standen und immer an mich geglaubt haben.

# Abstract

Precipitation is a key element of the water circle and therefore constitutes a fundamental part of life on earth. Rainfall possesses a lot of positive effects on the landscape and is essential for all plants and animals. On the one hand rain serves as natural irrigation of agricultural crops and ensures the drinking water supply for people by filling up groundwater and raising the water levels of rivers. On the other hand heavy rainfall can also cause water erosion by soil detachment, which leads to soil degradation of the affected soil. By calculating the kinetic energy of raindrops, the erosive potential of rain events can be quantified. To determine the required precipitation parameters for calculating the kinetic energy, measuring devices are needed. Due to the individuality of the hydrometric parameters during rain events and storms, it is of great importance to use precise precipitation measurements. With modern laser-based sensors like the distrometer PWS100, a non-intrusive device, it is possible to capture the required accuracy of precipitation parameters, like drop size and terminal velocity of drops and droplets, to get a more detailed knowledge of rain events.

In this work a detailed analysis of the data output of the distrometer PWS100 was investigated. The overall aims are the check of the output data on their internal coincidence as well as the structure of the data for further calculations and precipitation analysis. In order to determine the reliability of the distrometer PWS100, the measuring instrument was applied to laboratory and field measurements in a series of experiments. The laboratory measurements, using a rainfall simulator, provided initial insights into the measurement properties of the distrometer. To verify the laboratory measurements and to determine precipitation data with natural rain, the PWS100 was installed outdoors for field measurements. The gathered information about the detected rain events was used to create drop size distributions and to calculate the kinetic energy. The results obtained are visualized in different types of charts and are compared with data from the literature research.

The main outcome of this work is a recommendation for the use and handling of the output data obtained by the distrometer PWS100 as well as a suggestion for the most appropriate output parameters for calculating the kinetic energy of rain events.

# Inhaltsverzeichnis


**1. Einleitung und Aufgabenstellung ..... 1**

**2. Material und Methoden ..... 2**

**2.1. Eigenschaften von Regentropfen ..... 2**

2.1.1. Tropfengröße und Tropfenform ..... 2

2.1.2. Fallgeschwindigkeit ..... 5

2.1.2.1. Versuche zur Ermittlung der Fallgeschwindigkeiten ..... 6

2.1.2.2. Formeln zur Berechnung der Fallgeschwindigkeit ..... 7

2.1.3. Umgebungsbedingungen ..... 7

2.1.4. Strömungsverhalten ..... 7

2.1.5. Tropfengleichgewicht ..... 9

2.1.6. Oszillation und Rotation ..... 9

2.1.7. Weitere Eigenschaften ..... 10

2.1.7.1. Interne Zirkulation ..... 10

2.1.7.2. Verdunstung von Tropfen ..... 10

2.1.7.3. Elektrische Ladung ..... 10

2.1.8. Zusammenfassung ..... 11

**2.2. Distrometer PWS100 (Present Weather Sensor) ..... 12**

2.2.1. Beschreibung des Messgeräts ..... 12

2.2.2. Niederschlagserfassung ..... 13

2.2.2.1. Flüssige Partikel ..... 13

2.2.2.2. Feste Partikel ..... 14

2.2.3. Datenverarbeitung, Fuzzy-Logik ..... 15

2.2.4. Datenausgabe ..... 15

2.2.4.1. Textfile ..... 16

2.2.4.2. Ausgabeparameter ..... 16

2.2.4.3. Gerätspezifische Ausgabewerte ..... 17

2.2.4.4. Meteorologische Zusatzinformationen ..... 17

2.2.4.5. Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe ..... 17

2.2.4.6. Tropfengrößenverteilung (TGV) 0,0 mm bis 30,0 mm ..... 18

2.2.4.7. Mittlere Geschwindigkeit und Mittlere Größe ..... 19

2.2.4.8. Art der Niederschlagklassifizierung ..... 19

2.2.4.8.1. Unknown-Partikel ... 20
2.2.4.8.2. Error-Partikel ... 20
2.2.4.9. Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix ... 21
2.2.4.10. Histogramm peak-to-pedestal-ratio ... 23
2.2.4.11. Datum und Uhrzeit ... 24
2.2.4.12. ASCII Prüfsumme ... 24
2.2.5. Datenaufbereitung ... 24
**2.3. Regensimulator ... 25**
2.3.1. Funktionsweise ... 25
2.3.2. Einstellungen ... 26
2.3.3. Ermittlung der Intensitätsverteilung ... 27
**2.4. Distrometermessungen ... 30**
2.4.1. Laborversuche ... 30
2.4.1.1. Distrometeraufstellung ... 30
2.4.1.2. Versuchsdurchführung ... 31
2.4.1.3. Messung mit nur einer Schale ... 31
2.4.1.4. Abbruch der Labormessungen ... 33
2.4.2. Feldversuche ... 33
2.4.2.1. Versuchsaufstellung im Feld ... 33
2.4.2.2. Versuchsdurchführung ... 35
**3. Ergebnisse und Diskussion ... 36**
**3.1. Prüfung der Ausgabewerte ... 36**
3.1.1. Interner Vergleich der Niederschlagsintensität, der akkumulierten Niederschlagshöhe und des Tropfendurchmessers ... 36
3.1.1.1. Berechnung mit Niederschlagsintensität und akkumulierter Niederschlagshöhe ... 37
3.1.1.2. Berechnung mit Tropfengrößenverteilung (TGV) 0,0 – 30,0 mm ... 37
3.1.1.3. Berechnung mit Mittlerer Geschwindigkeit und Mittlerer Größe ... 38
3.1.1.4. Berechnung mit Campbell Scientific 34 x 34-Datenmatrix ... 39
3.1.1.5. Gegenüberstellung der Ergebnisse ... 39
3.1.2. Interner Vergleich der Partikelanzahl ... 42
3.1.3. Prüfung Art der Niederschlagsklassifizierung ... 43
3.1.4. Niederschlagsklassifizierung Regenereignisse ... 46
**3.2. Interpretation der Labormessungen ... 47**

**3.3. Tropfengrößenverteilungen der Feldversuche ..... 50**

3.3.1. Tropfengrößenverteilung allgemein ..... 50

3.3.2. Tropfengrößenverteilung Monatsverteilung ..... 51

3.3.3. Tropfengrößenverteilung Regenereignisse ..... 52

3.3.4. Tropfengrößenverteilung Messintervalle ..... 53

**3.4. Erosivität von Niederschlägen ..... 55**

3.4.1. Begriffsdefinition ..... 55

3.4.2. Berechnung der Kinetischen Energie ..... 57

3.4.2.1. Berechnungsvariante 1: Tropfengrößen und Fallgeschwindigkeiten laut Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix ..... 58

3.4.2.2. Berechnungsvariante 2: Tropfengrößen angepasst, Fallgeschwindigkeiten aus Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix ..... 59

3.4.2.3. Berechnungsvariante 3: Tropfengrößen aus TGV, Fallgeschwindigkeiten berechnet ..... 61

3.4.3. Ergebnisse Kinetische Energie ..... 62

3.4.3.1. 60-Sekunden-Messintervalle ..... 62

3.4.3.2. Regenereignisse ..... 63

3.4.4. Prüfung der Ergebnisse ..... 65

3.4.5. Zusammenhang Niederschlagsintensität – Kinetische Energie ..... 66

3.4.6. $KE_{mm}$-I Hysterese ..... 69

3.4.7. Zeitlicher Verlauf des Zusammenhangs N-Intensität-kinetische Energie ..... 70

3.4.8. Kinetische Energie der Labormessungen ..... 72

**4. Schlussfolgerung ..... 73**

**5. Literaturverzeichnis ..... 76**

**6. Abbildungsverzeichnis ..... 80**

**7. Tabellenverzeichnis ..... 83**

**8. Anhang ..... 84**

# 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Große Teile der Erdoberfläche sind von unterschiedlichen Formen der Bodendegradation, wie Bodenerosion, Rückgang organischer Substanz, Bodenversiegelung und vielen weiteren Faktoren, betroffen. Erosionsprozesse durch Wasser stellen eine große Gefährdung von fruchtbaren Ackerflächen dar und können zu ingenieurtechnischen Problemen an Bauwerken führen. Durch die Forschung auf dem Gebiet der Bodenerosion durch Wasser zur Vorhersage und Einschätzung von Erosionsprozessen, soll das erosive Potential ermittelt und Maßnahmen zur Verminderung von negativen Auswirkungen der Erosion durch Wasser getroffen werden.

Der Prozess der Erosion durch Wasser beginnt bereits mit dem Niederschlag. Stürme und Regenereignisse mit Starkregen, wie sie in Österreich in den Sommermonaten häufig auftreten, beinhalten hohes erosives Potential. Grund dafür ist die kinetische Energie, die beim Aufprall der Regentropfen auf die Bodenoberfläche einwirkt. Um die Parameter zur Ermittlung der Erosivität von Niederschlägen ermitteln zu können, bedarf es entsprechender Messgeräte. Einfache Niederschlagsmessgeräte wie Ombrometer oder Totalisatoren, sind lediglich in der Lage die Niederschlagshöhe von Regenereignissen zu ermitteln. Moderne Niederschlagssensoren wie das Distrometer PWS100, besitzen hingegen die Fähigkeit, Eigenschaften wie Tropfengröße und Fallgeschwindigkeit jedes einzelnen Tropfens eines Regenereignisses zu detektieren und durch digitale Speicherung für weitere Auswertungen und Berechnungen zur Verfügung zu stellen. Da Regentropfen sehr individuell ausgeprägt sind, ist es nur mit Echtzeit-Messgeräten möglich die tatsächlichen Niederschlagsparameter zu jedem Zeitpunkt des Regenereignisses zu bestimmen. Mit den Daten langjähriger Distrometer-Aufzeichnungen kann das tatsächliche erosive Potential von Niederschlägen eines Standorts bestimmt werden. Das Distrometer PWS100 liefert durch die große Anzahl an unterschiedlichen Ausgabeparametern sehr viel Information. Anhand von Versuchsdurchführungen wird in dieser Arbeit eine Messdatenanalyse der Ausgabedaten des Niederschlagsmessgeräts PWS100 durchgeführt und das Datenmaterial auf Vertrauenswürdigkeit geprüft. Aus den strukturierten Ausgabedaten werden die Parameter vorgestellt, die sich am besten zur Berechnung der kinetischen Energie eignen.

Die spezielle Charakteristik von Regentropfen in der Fallphase ist sehr komplex und von vielen unterschiedlichen Parametern abhängig. Um zu veranschaulichen, wie Regentropfen von einem Distrometer gemessen werden und wie sich Regentropfen im Fallvorgang verhalten, ist es von großer Bedeutung einige Zusammenhänge der Tropfengrößen-Fallgeschwindigkeitsbeziehung zu betrachten. Im folgenden Kapitel sollen die wichtigsten Parameter erläutert werden, die bei der Fallphase von Wassertropfen auftreten.

# 2. Material und Methoden

## 2.1. Eigenschaften von Regentropfen

### 2.1.1. Tropfengröße und Tropfenform

Die Tropfengröße und Tropfenform, eines sich in der Luft bewegenden Wassertropfens, sind sehr eng miteinander verbunden. Die Tropfengröße ist der entscheidende Faktor für die Formgebung des Tropfens. Die Tropfenform wiederum bestimmt die hydrodynamische Stabilität des Tropfens im Fallvorgang und damit die Fallgeschwindigkeit (Pruppacher und Pitter, 1971).

Wassertropfen existieren als mechanisch stabile Systeme, weil die Oberflächenkräfte versuchen den Grenzflächenbereich zwischen Luft und Wasser zu minimieren. Um das minimale Verhältnis von Oberfläche zu Volumen zu bekommen, formt sich der Tropfen zu einer Kugel (McDonald, 1954). Der Tropfen würde ohne Bewegung relativ zu seiner Umgebung aufgrund der Oberflächenspannung eine Kugelform einnehmen. Der vorhandene Druck des Tropfens ist zufolge der Oberflächenspannung um den Wert

$$p = \frac{2T}{r}$$

höher als der Atmosphärendruck, wobei T die Oberflächenspannung bezeichnet und r der Radius des Tropfens ist (Spilhaus, 1948).

Ab einer gewissen Tropfengröße verformt sich der Tropfen in der Fallbewegung durch die aerodynamischen Kräfte, in Kombination mit der Oberflächenspannung zu einer ellipsenähnlichen Form. Durch den Fallvorgang entstehen Druckdefizite an der Oberseite und an den Außenseiten des Tropfens. An der Unterseite, entsteht infolge des Gewichtes des Tropfens ein Drucküberschuss. Je höher die Fallgeschwindigkeit ist, desto größer ist das Druckdefizit an den Seiten des Tropfens. Um den Innendruck durch Oberflächenspannung aufrechtzuerhalten, wird der Tropfen in besagte abgeplattete Form verzerrt. (Spilhaus, 1948).

Weiters kommt in der Fallphase der hydrostatische Druckgradient hinzu, der eine wichtige Rolle für die Tropfenform spielt (McDonald, 1954). Der deformierte Tropfen besitzt keine symmetrische Form um seine Horizontalachse, sondern weist an der Unterseite eine Abflachung auf, an der Oberseite behält der Tropfen eine Kugelform (Magono, 1954; Pruppacher und Pitter, 1971; Green, 1975).

Sehr anschauliche Bilder von herabfallenden Regentropfen wurden durch Hochgeschwindigkeitsfotografie festgehalten, wie sie beispielsweise von König (1965) oder Magono (1953) durchgeführt wurden (Abb. 1 und Abb. 2). Auf diesen Bildern ist gut ersichtlich, wie stark sich Regentropfen während des Fallvorgangs verformen.

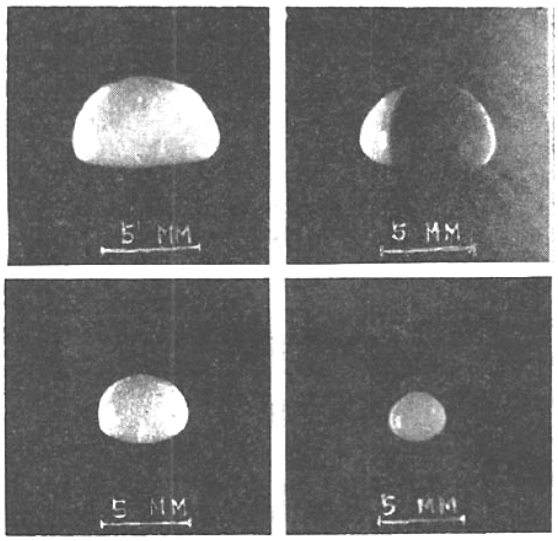



Abb. 1: Wassertropfen in der Fallphase aus Magono (1953)

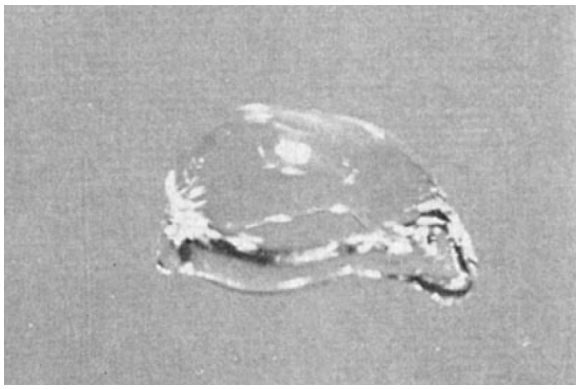


Abb. 2: Sehr großer Wassertropfen mit Einbuchtung an der Unterseite aus König (1965)

Natürlich entstandene Regentropfen die aus Wolken ausfallen, besitzen unterschiedliche Durchmesser, wobei sich große Tropfen mit höherer Geschwindigkeit fortbewegen als kleine Tröpfchen. Kleinere Tropfen werden von größeren Tropfen eingeholt und wachsen durch Koaleszenz und Kollision zu größeren Tropfen an (Langmuir, 1948). In Labors künstlich hergestellte Tropfen können in ruhigen stabilen Luftbedingungen Tropfengrößen von bis zu 7,0 mm, in Einzelfällen auch darüber hinaus, erreichen (Magono, 1954). Experimente von Pruppacher und Pitter (1971) oder Beard (1976) zeigten, dass die maximale Größe eines natürlichen Tropfens, ohne zu zerplatzen, ca. 4,5 mm beträgt (Kapitel 2.1.5 Tropfengleichgewicht). Ein Modell zur Vorhersage konnte jedoch nicht erstellt werden (Pruppacher und Pitter, 1971). Durch die in der Natur herrschenden unruhigen Luftbedingungen ist laut Jones (1959) ein Oszillieren der Tropfen zu beobachten, welches die Tropfen destabilisiert und bei weitem kleinere Tropfengrößen als im Labor unter stabilen Bedingungen vorkommen lässt (Kapitel 2.1.6 Oszillation und Rotation).

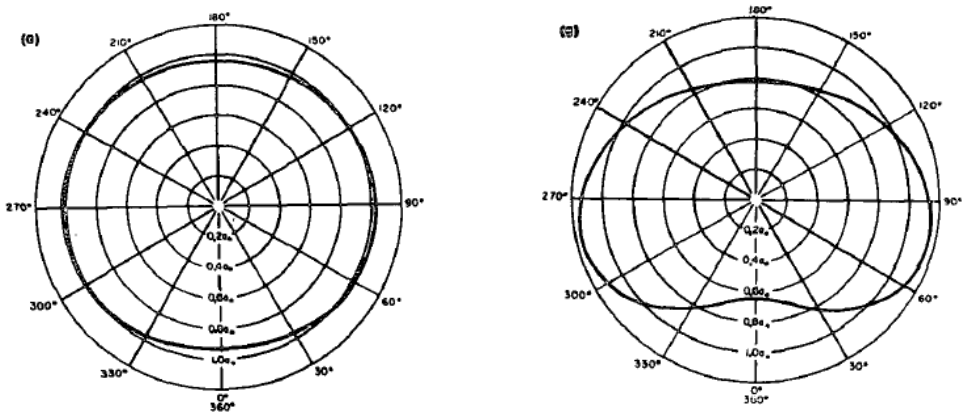



Abb. 3: Berechnungsmodelle für Tropfenformen verschiedener Größen, links: Durchmesser 1,1 mm, rechts: Durchmesser 4,0 mm aus Pruppacher und Pitter (1971)

Bei der Tropfenform herabfallender Wasserstropfen, muss immer auch die Tropfengröße miteinbezogen werden. Der Tropfendurchmesser bezieht sich auf den äquivalenten Tropfendurchmesser einer Kugel, nicht auf den maximalen Durchmesser der bei abgeplatteten Tropfen entsteht. Laut Jones (1959) beginnen die Tropfen ab etwa 1,00 mm Durchmesser an der Unterseite abzuflachen. Bei kleineren Durchmessern ist von einer annähernden Kugelform auszugehen (Abb. 3). Die Versuche von Pruppacher und Pitter (1971) bestätigten dies dank der Analyse der Achsenverhältnisse von Tropfen. Wie in Abb. 4 zu sehen ist, bezeichnet b die vertikale Achse und a die horizontale Achse des Tropfens. Bei Tropfendurchmessern von 0,30 mm liegt das Verhältnis von b/a bei ca. 1,00 bei Durchmessern von 1,00 mm immer noch bei 0,97. Bei Tropfendurchmessern größer als 1,00 mm bewegt sich das Achsenverhältnis zunehmend von 1,00 weg, wodurch sich der Tropfen von der Kugelform entfernt.

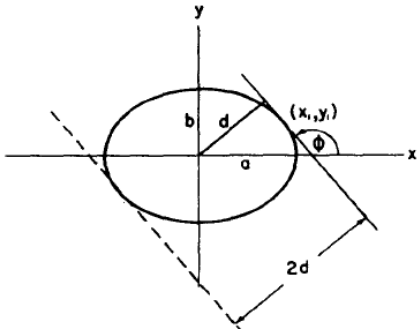



Abb. 4: Achsenbezeichnungen eines abgeplatteten Regentropfens aus Jones (1959)

Auch die Untersuchungen von LeClair, Hamielec, Pruppacher und Hall (1972) zeigten, dass sich die hydraulischen und dynamischen Druckterme von kleinen Tropfen nur unwesentlich von jenen einer Kugel unterscheiden. Für Tropfen mit Durchmessern kleiner als 1,0 mm ist die Kugelform passend und die Verzerrung durch die aerodynamischen Kräfte kein entscheidender Faktor für die Ermittlung der Tropfenform.

Jones (1959) erstellte in seinen Fotografien dreidimensionale Betrachtungen von natürlichen Regentropfen und klassifizierte die Tropfenform auf Basis der Achsenlängenverhältnisse. Diese Informationen erlaubten es, die Regentropfen in vier Formtypen zu unterteilen: kugelförmig, vertikal elliptisch, horizontal elliptisch und irregulär. Es wurden dabei nur relativ große Tropfen mit Durchmessern größer als 1,9 mm aufgezeichnet. Erstaunlicherweise traten unter sämtlichen aufgezeichneten Tropfen 32 % runde Formen, 28 % horizontal elliptische, 19 % vertikal elliptische und 22 % irreguläre Formen auf. Mit den Formen vertikal elliptisch und irregulär, traten zwei weitere Formen neben der bereits angesprochenen Kugelform und abgeplatteten Form auf. Bei den Versuchen von Jones (1959) zeigte sich, dass das Achsenverhältnis b/a bei horizontal elliptischen Tropfen mit steigendem Durchmesser abnimmt. Die Tropfen werden mit steigendem äquivalentem Durchmesser immer flacher. Bei den vertikal elliptischen Formen war kein Zusammenhang zwischen Durchmesser und Achsenverhältnis b/a zu erkennen, was zu dem Schluss führte, dass diese Tropfenform willkürlich auftritt. Die Erkenntnisse aus den Aufzeichnungen von Jones (1959) waren, dass es keine statische Form für große natürliche Regentropfen gibt, da die Zustände von Regentropfen sehr schnell wechseln (Jones, 1959; Green, 1975).

### 2.1.2. Fallgeschwindigkeit

Die ersten wissenschaftlichen Berechnungen und empirischen Experimente zum Thema Tropfengrößen und Fallgeschwindigkeiten wurden bereits Anfang des 20. Jahrhunderts unternommen. Best (1950a, 1950b) erwähnt zum Beispiel die Arbeiten von Bentley (1904), Lenard (1904), Defant (1905) und Schmidt (1909), die mit einfachen Methoden erste Richtwerte für die Größe und Fallgeschwindigkeit von Regentropfen ermittelten. Nach Laws (1941) in Gunn und Kinzer (1949), erreichen auch die größten möglichen Wassertropfen ihre Endfallgeschwindigkeit nach spätestens 12 m Falldistanz.

Die Basis für die Berechnung der Fallgeschwindigkeit eines Regentropfens wird durch die Navier-Stokes Gleichungen gegeben. Angesichts der Veränderung der Tropfenform mit der Tropfengröße gibt es allerdings verschiedene Ansätze um die Fallgeschwindigkeiten des gesamten Tropfenspektrums zu berechnen. Weiters müssen bei der Berechnung auch der Grad der Vereinfachung und die Anzahl der betrachteten Variablen beachtet werden (Beard, 1976).

Eine Möglichkeit die Fallgeschwindigkeit zu berechnen ist der Ansatz über den Widerstandskoeffizienten (Foote und du Toit, 1969). Die Bewegungsgleichung ergibt:

$$\mathrm{mg} = \frac{1}{2}\,\rho\,\mathrm{V}^2\,\mathrm{C_D}\,\pi\,\mathrm{r}^2$$

Wobei m die Masse des Tropfens ist, g die Erdbeschleunigung, ρ die Luftdichte, V die Fallgeschwindigkeit des Tropfens, $C_D$ der Widerstandskoeffizient und r der Tropfenradius.

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 Tropfengröße und Tropfenform erläutert wurde, behalten kleine Tropfen mit Durchmessern bis ca. 1,0 mm laut Forschungserkenntnissen in der Fallphase eine Kugelform. Die Ermittlung des Widerstandskoeffizienten einer Kugel ist durch die Reynoldszahl gegeben. Für flüssige Tropfen mit Durchmessern größer als 1,0 mm, ist die Ermittlung des Widerstandkoeffizienten und damit der Fallgeschwindigkeit wesentlich komplexer, da sich der Tropfen mit zunehmender Größe von der Kugelform entfernt. Mit der Formänderung verändern sich auch die Gleichgewichtsbedingungen und die aerodynamische Umströmung der Tropfenoberfläche. Diese Tatsache macht es schwierig, passende Reynoldszahlen um Oberflächen willkürlicher Formen zu finden (Kapitel 2.1.4 Strömungsverhalten). Empirische Messungen bieten daher den geeignetsten Ansatz um die Fallgeschwindigkeiten ermitteln zu können (Foote und du Toit, 1969).

#### 2.1.2.1. Versuche zur Ermittlung der Fallgeschwindigkeiten

Eine der bedeutendsten Arbeiten wurde von Gunn und Kinzer (1949) erstellt, in der die Fallgeschwindigkeiten von Wassertropfen mittels elektrischer Aufladung der Tropfen berührungsfrei ermittelt wurden. Die Versuche wurden in ruhigen, ungestörten Luftverhältnissen bei einem Druck von 1013,25 hPa, einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % durchgeführt (Abb. 5). Die beiden Forscher stellten den Anspruch, dass ihre Arbeit als einfaches Mittel zur genauen Bestimmung der Fallgeschwindigkeiten von natürlichen Regentropfen dienen sollte. An den ermittelten Fallgeschwindigkeiten von Tropfen kleiner als 0,1 mm bis hin zu 5,8 mm großen Tropfen, orientierte sich in weiterer Folge eine große Anzahl von Forschungen, um Modelle und Formeln an die Ergebnisse von Gunn und Kinzer anzupassen (Gunn und Kinzer, 1949).

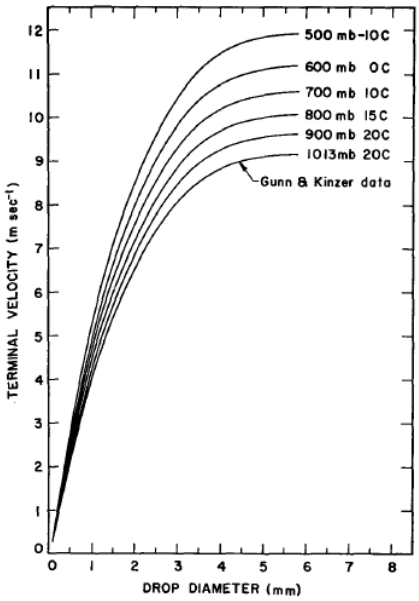



Abb. 5: Tropfengrößen-Fallgeschwindigkeitsbeziehung bei verschiedenen Druck- und Temperaturbedingungen aus Foote und du Toit (1969)

#### 2.1.2.2. Formeln zur Berechnung der Fallgeschwindigkeit

Foote und du Toit (1969) passten Polynome 3., 5. und sogar 9. Grades an die Ergebnisse von Gunn und Kinzer (1949) an und erreichten damit Genauigkeiten bis zu 1,1 %. Durch Aufteilung in unterschiedliche Größenklassen, konnte die Abweichung der Anpassungsformeln sogar unter 1 % gehalten werden (Wobus, Murray und König, 1971). Dingle (1972) kam trotz erheblicher Vereinfachungen der Polynome auf ähnlich geringe Abweichungen in seinen Fallgeschwindigkeitsberechnungen.

Semi-empirische Formeln zur Fallgeschwindigkeitsberechnung von Regentropfen haben eine große Bedeutung für die Doppler-Radar Methode, wie sie im Distrometer PWS100 verwendet wird (Foote and du Toit, 1969). In Kapitel 2.2.2 Niederschlagserfassung wird erläutert, wie diese Formeln verwendet werden, um aus gemessenen Fallgeschwindigkeiten die Durchmesser der Regentropfen bestimmen zu können.

### 2.1.3. Umgebungsbedingungen

Best (1950b) zeigte anhand der unveröffentlichten Fallgeschwindigkeitsermittlungen von Davies (1942), die von Sutton (1942) zitiert wurden, dass eine große Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen, speziell vom Luftdruck ausgeht. Best (1950b) entwickelte empirische Formeln und Faktoren für unterschiedliche Tropfengrößen, um die Fallgeschwindigkeiten der Tropfen an die speziellen atmosphärischen Bedingungen in unterschiedlichen Höhenlagen anzupassen.

Die Fallgeschwindigkeiten ändern sich in Abhängigkeit von der Luftdichte und der dynamischen Viskosität, welche von Luftdruck, Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängen (Abb. 5). Da sich die Ergebnisse der Versuche von Gunn und Kinzer (1949), wie bereits erwähnt auf die Bedingungen auf Meeresniveau beziehen, wurden mehrfach Korrekturwerte erstellt, um die Ergebnisse auf andere Umgebungsbedingungen anzupassen (Foote und du Toit, 1969; Wobus et al., 1971).

### 2.1.4. Strömungsverhalten

Tropfenformen sind mit Modellen gut beschreibbar, dennoch ist es aufgrund des willkürlichen aerodynamischen Fließens um die Oberfläche der deformierten Tropfen, schwierig das Gleichgewicht der Tropfen vorauszusagen (Foote du Toit, 1969). Um das Strömungsverhalten der Luft um den Tropfen beschreiben zu können, unterteilte Beard (1976) die Tropfen in drei Größenklassen, denen er unterschiedliche Reynoldszahlen zuwies.

Die erste Klasse betrifft sehr kleine Tropfengrößen von 0,001 mm bis circa 0,02 mm. In dieser Größenklasse herrscht laminare Strömung mit achsensymmetrischem Fluss. Die Reynoldszahl ist vernachlässigbar klein (Beard, 1976). Diese Erkenntnis bestätigten auch die Ergebnisse von Gunn und Kinzer (1949) die herausfanden, dass kleine Tropfen mit Durchmessern von kleiner als etwa 0,08 mm dem Gesetz von Stokes gehorchen.

Die zweite Klasse betrifft Tropfen mit Durchmessern zwischen 0,02 mm und 1,07 mm (Beard, 1976). Diese Größengrenzen wurden gewählt, da der Tropfen bis zu dieser Maximalgröße von circa 1,0 mm eine Kugelform behält. Für eine feste Kugel ist die Ermittlung des Widerstandskoeffizienten eine Funktion der Reynoldszahl, in die wiederum die kinematische Viskosität ν, die Strömungsgeschwindigkeit V und der Radius r der Kugel eingehen (Foote und du Toit, 1969):

$$\mathrm{Re} = \frac{2\,\mathrm{r}\,\mathrm{V}}{\nu}$$

In den Versuchen von LeClair et al. (1972) wurde festgestellt, dass sehr geringe Unterschiede zwischen den Reynoldszahlen eines kleinen zirkulierenden Wassertropfens und einer festen Kugel bestehen. Tatsächlich wurden bei flüssigen Tropfen sogar kleinere Widerstandskoeffizienten festgestellt als bei festen Kugeln gleichen Durchmessers, was auf das Vorhandensein interner Zirkulation im Wassertropfen hinweist (Kapitel 2.1.7.1 Interne Zirkulation). Für kleine Tropfen ergeben sich damit kleine bis mittlere Reynoldszahlen im Bereich von 0,01 bis 300. Die Tropfenverformungen sind noch vernachlässigbar gering und der Tropfen kann mit einer festen Kugel verglichen werden. Für große Tropfen werden die Formen sehr komplex, was es schwierig macht den Tropfen zu berechnen (Beard, 1976).

Die dritte Klasse behandelt Tropfengrößen von 1,07 mm bis 7,0 mm für nicht zirkulierende Tropfen in der Gleichgewichtsform. Die Reynoldszahlen befinden sich hier im Bereich von 300 bis 4000 (Beard, 1976).

Während Tropfen bis zu 1,0 mm Durchmesser eine annähernde Kugelform besitzen, werden große Tropfen mit äquivalenten Durchmessern größer als 1,0 mm, zunehmend stark flach gedrückt. Der Widerstandskoeffizient bekommt damit immer mehr Variable die mit der Tropfenform-Problematik zu tun haben (Foote und du Toit, 1969). Einige dieser dimensionslosen Faktoren sind das Viskositätsverhältnis, die Bond-Zahl, die Strouhal-Zahl und wie bereits erwähnt die Reynoldszahl. Um die Tropfenform-Problematik lösen zu können müssen die Berechnungen vereinfacht werden, was wiederum zu Abweichungen zwischen den berechneten Modellen und den realen Verhältnissen führt (Beard, 1976).

### 2.1.5. Tropfengleichgewicht

Wenn der Tropfen seine endgültige Fallgeschwindigkeit erreicht hat, steht sein Gewicht mit dem Luftwiderstand im Gleichgewicht (Spilhaus, 1948). Allerdings ist es für große Tropfen schwierig stabile Bedingungen zu schaffen. Große Tropfen werden im Laufe der Fallphase instabil und zerplatzen (Abb. 7) (König, 1965).

Pruppacher und Pitter (1971) schreiben, dass vorangegangene Erkenntnisse über Tropfenformen sehr stark infolge verschiedener experimenteller Probleme streuten. In natürlichen Regenereignissen, ist es im Vergleich zu Laborversuchen noch unwahrscheinlicher, von stabilem Tropfengleichgewicht auszugehen, da die Böigkeit des Windes in Stürmen noch zur Schwierigkeit beiträgt ein stabiles Tropfengleichgewicht herzustellen (Jones, 1959). Die gegenseitige Beeinflussung von Regentropfen durch Kollision und der turbulenten Strömung ihres Sogs an der Rückseite des Tropfens (Abb. 6 und Abb. 7), tragen ebenfalls zu instabilen Verhältnissen bei (Beard, 1976; König, 1965).

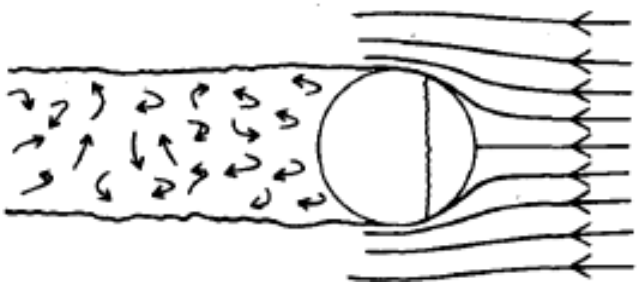


Abb. 6: Turbulente Strömung im Sog eines großen Tropfens aus Beard (1976)

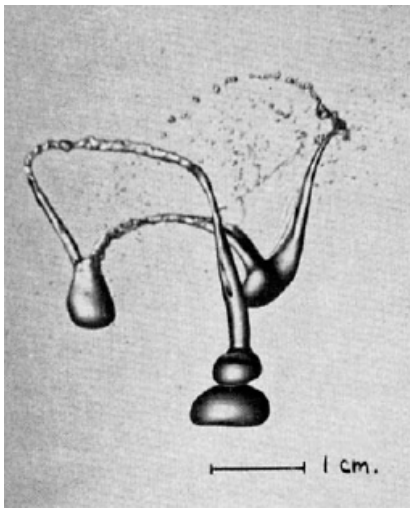



Abb. 7: Zerplatzen eines Tropfens aus König (1965)

### 2.1.6. Oszillation und Rotation

Laut Jones (1959) befinden sich alle größeren Tropfen in einem oszillierenden Zustand. Er stützt seine Aussage auf Beobachtungen von Blanchard (1950), der sogar bei ruhigen Experimentbedingungen ein Oszillieren der Tropfen, aufgrund der Turbulenzen in der Umgebungsluft feststellen konnte. Dadurch sollen Tropfen größer als 5,5 mm in der Natur kaum beobachtet werden können. Im Zustand der Vibration genügt ein leichter Schock durch Geschwindigkeitsänderungen in der Atmosphäre, um die Tropfen zerschmettern zu lassen (Blanchard, 1950 in Jones, 1959). In Labors sind Rotationen von Tropfen leicht herzustellen, wie die Laborversuche von Magono (1954) zeigten. Bei einigen Tropfen wurde beobachtet, dass sie auf Basis einer induzierten Drehung beim Abtropfen von der Glasspitze vertikal elliptisch gelängt waren. Vertikale Rotationen waren auch die Erklärung für die

aufgetretenen vertikal elliptischen Tropfenformen der in situ Aufnahmen von Jones (1959) (Kapitel 2.1.1 Tropfengröße und Tropfenform).

## 2.1.7. Weitere Eigenschaften

### 2.1.7.1. Interne Zirkulation

Laut McDonald (1954) sind interne Zirkulationen in Tropfen, die infolge von Scherkräften an den Tropfenrändern auftreten, unverzichtbar für die Stabilitätsberechnung von Regentropfen. Beard und Pruppacher (1969) belegten das Modell der internen Zirkulationen von McDonald (1954) mit Hilfe der Tracertechnik. Es wurde dabei herausgefunden, dass die Strömungsmuster der Luft mit den Strömungsmustern innerhalb des Tropfens zusammenpassen, die Auswirkungen auf die Tropfenstabilität konnte allerdings nicht bewiesen werden. Für kleine runde Tropfen konnte die interne Zirkulation gut nachgewiesen und Modelle angepasst werden, für Tropfen größer als 0,5 mm war dies nicht der Fall. Vor allem bei Tropfen über 1,0 mm Durchmesser ist es schwierig Zirkulationen zu beschreiben, da sich die Tropfen mit steigenden Verformungen immer mehr von der Kugelform entfernen. Weiters wurde festgestellt, dass das Oszillieren der Tropfen die internen Zirkulationen stören kann. LeClair et al. (1972) kommen ebenfalls zu dem Entschluss, dass interne Zirkulationen für die Tropfenform eine vernachlässigbare Rolle spielen**.**

### 2.1.7.2. Verdunstung von Tropfen

Ein weiterer zu beachtender Faktor ist die Verdunstung der Regentropfen. In den Abhandlungen von Beard und Pruppacher (1969) bzw. Woo und Hamielec (1971) ist die Rede von Verdunstungsvorgängen während der Fallphase, die das Tropfengleichgewicht ebenfalls stören können.

### 2.1.7.3. Elektrische Ladung

McDonald (1954) schreibt, dass alle Hydrometeore eine elektrische Ladung im Fallvorgang erhalten. Tropfen können in Gewittern derart aufgeladen sein, dass extrem große Tropfen gebildet werden können (McDonald, 1954). Beard und Chuang (1987) erwähnen ebenfalls in ihrer Arbeit, dass electric stress, elektrische Spannung, ein zusätzlicher Faktor für die Tropfenform sein könnte.

### 2.1.8. Zusammenfassung

Viele Erkenntnisse über die Prozesse im Fallvorgang von Wassertropfen wurden in stabilen ruhigen Luftbedingungen, wie sie in Windkanälen herrschen, durchgeführt. Die Ergebnisse geben Auskunft über das Verhalten der Tropfen bei Normbedingungen wie sie in Labors leicht herstellbar sind. Einige Zusammenhänge aus Laborversuchen können Auskunft über Prozesse in natürlichen Regenereignissen geben. Destilliertes Wasser von Tropfen aus Laborversuchen beispielsweise, besitzt laut Gunn und Kinzer (1949) eine ähnlich hohe Oberflächenspannung wie Wasser in natürlichen Tropfen. Andererseits streuen laut Pruppacher und Pitter (1971) die Ergebnisse aus Laborversuchen unterschiedlicher Forscher aufgrund von experimentellen Problemen.

Sollen zudem die Ergebnisse aus Laborversuchen mit natürlichen Regenereignissen verglichen werden, kommen einige zu berücksichtigende Faktoren hinzu, die das Tropfengleichgewicht und damit die Form und Fallgeschwindigkeit der natürlichen Tropfen immens beeinflussen. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Faktoren kaum voraussagbar sind und individuell für jedes Regenereignis auftreten. Einige wichtige Faktoren die zu nennen wären, sind die Böigkeit des Windes, die gegenseitige Beeinflussung der Tropfen durch Strömungsverwirbelungen, Kollisionen und Verschmelzungen von Tropfen, sowie die Änderung der Umgebungsbedingungen während eines Regenereignisses. All diese Faktoren beeinflussen die Tropfenform und die Fallgeschwindigkeit, wodurch das Gleichgewicht, welches der Tropfen in der Fallphase eingenommen hat, gestört wird und infolge der Instabilität zum Zerplatzen des Tropfens führen kann (Jones, 1959; Green, 1975).

Trotz all der Probleme und experimentellen Schwierigkeiten haben die zahlreichen Forschungen über die Zusammenhänge der Eigenschaften von Regentropfen dazu geführt, dass Messinstrumente wie das Distrometer entwickelt werden konnten. Speziell in diesem Niederschlagsmessgerät kommen die Erkenntnisse der Tropfengrößen-Fallgeschwindigkeitsbeziehung besonders zur Geltung. Mit Distrometern ist es möglich die Tropfengröße und Fallgeschwindigkeit einzelner Regentropfen zu detektieren und für weitere Berechnungen zur Verfügung zu stellen.

Im folgenden Kapitel wird die Funktionsweise, Datenverarbeitung und Datenausgabe des Distrometers PWS100 beschrieben.

## 2.2. Distrometer PWS100 (Present Weather Sensor)

### 2.2.1. Beschreibung des Messgeräts

Das Messprinzip des Distrometers PWS100 beruht auf der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA). Es handelt sich dabei um eine berührungslose Methode zur Messung der Geschwindigkeit von Partikel beim Durchtritt durch mehrere Lichtplättchen. Das ausgesandte Lichtsignal besteht aus vier Lichtbögen mit einer Dicke von 0,4 mm, die im Abstand von 0,4 mm parallel horizontal übereinander angeordnet sind. Beim Durchtritt des Partikels durch die 40 cm² große Messfläche, passiert das zu messende Partikel nacheinander die vier übereinander liegenden Lichtbögen. Die ausgesandten Lichtsignale werden von den zu messenden Partikeln gebrochen bzw. gestreut und von den Empfängern detektiert. Um Mehrdeutigkeiten in den empfangenen Signalen zu vermeiden, werden als Empfänger zwei unabhängige Einheiten eingesetzt (Abb. 8 und Abb. 9). Diese Anordnung wird als Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) bezeichnet (Ellis, Sandford, Jones, Richards, Petzing und Coupland, 2006).

Die zu messenden Partikel befinden sich in einem Größenbereich von 0,1 mm bis 30,0 mm. Die Fallgeschwindigkeiten können zwischen 0,16 m/s und 30,0 m/s aufgezeichnet werden. Der Bereich der Niederschlagsintensitätsmessung liegt zwischen 0,0 mm/h und 400,0 mm/h. Die Messgenauigkeit für Tropfendurchmesser und Fallgeschwindigkeiten wird mit ± 5 % angegeben (Campbell Scientific, Inc., 2006).

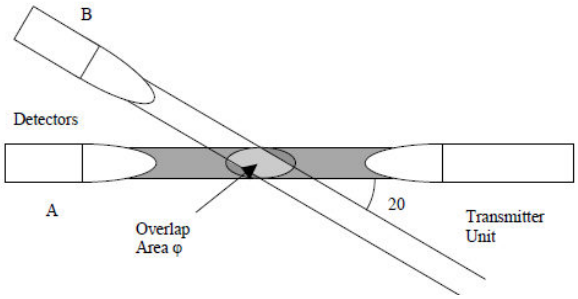



Abb. 8: Distrometer PWS100 Draufsicht aus Ellis et al. (2006)

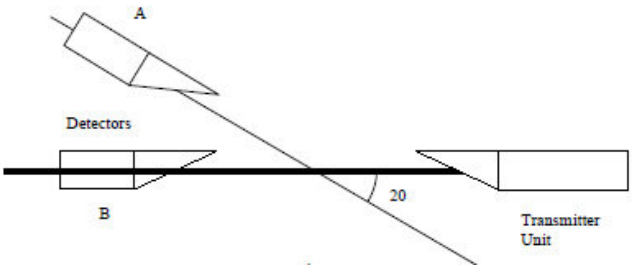



Abb. 9: Distrometer PWS 100 Seitenansicht aus Ellis et al. (2006)

## 2.2.2. Niederschlagserfassung

### 2.2.2.1. Flüssige Partikel

Das Messprinzip von flüssigen Partikeln wie Regen und Nieselregen, unterscheidet sich von jenem für feste Niederschlagsarten wie Hagel und Graupel. Bei transparenten flüssigen Partikeln ist die dominierende Form der Lichtablenkung die Brechung. Bei festen Niederschlägen wird die Lichtstreuung genutzt, um die Eigenschaften der Partikel zu erfassen (Ellis et al., 2006).

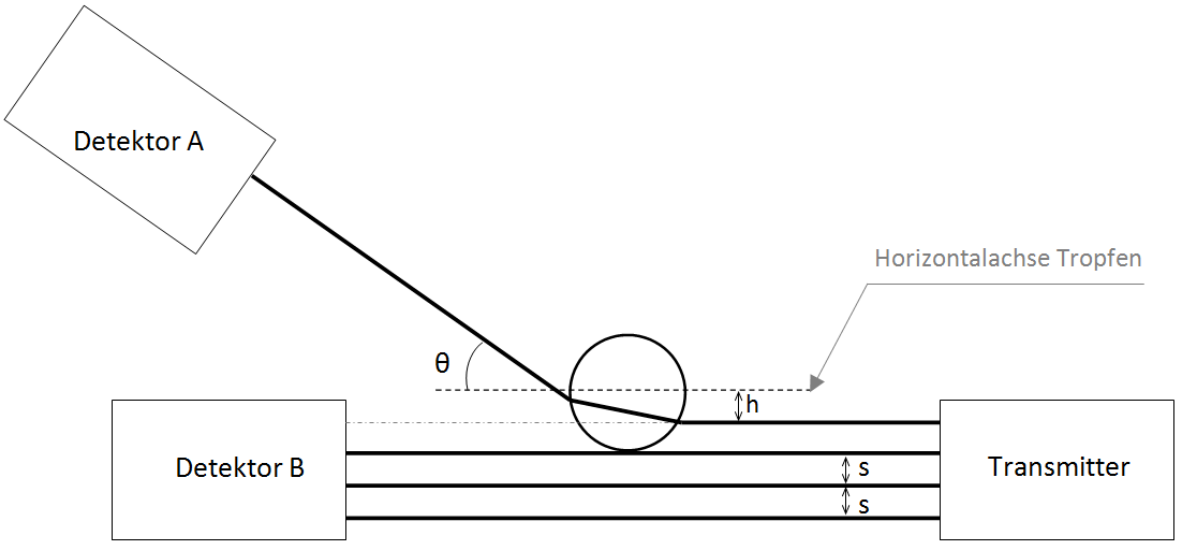



Abb. 10: Prinzipskizze der Messung von flüssigem Niederschlag (Ellis et al., 2006)

Abb. 10 zeigt eine Prinzipskizze der Messung eines Regenpartikels. Der von rechts einfallende erste Lichtbogen aus der Transmittereinheit, weist beim Eintritt in den Tropfen einen Abstand h zur Nullachse des Tropfens auf. Aufgrund dieses Abstandes h wird der Strahl beim Austritt aus dem kugelförmigen Tropfen mit einem definierten Brechungswinkel θ gebrochen. Um die gebrochenen Lichtstrahlen zu erfassen wurde Detektor A ca. 20° zur Hauptachse geneigt angeordnet. Wenn der Tropfen in den ersten Lichtbogen eintritt wird das Signal infolge der Brechung zuerst in den Detektor A abgelenkt. Bewegt sich der Tropfen weiter entlang seiner Falllinie, erreicht er die Position in der der Lichtstrahl durch seine Nullachse verläuft, wodurch das Signal beim Austritt nicht gebrochen wird und in den Detektor B einfällt. Der Tropfen durchläuft der Reihe nach alle vier Lichtplättchen. Für jeden Tropfen erhalten die Detektoren A und B somit vier Lichtsignale mit entsprechender Zeitverzögerung zwischen den Eingangssignalen. Aus dem zeitlichen Abstand der ankommenden Signale der vier Plättchen jedes Tropfens, kann die Fallgeschwindigkeit ermittelt werden. Durch Kreuzkorrelation wird in weiterer Folge die zeitliche Verzögerung zwischen den Signalen von Detektoren A und Detektor B berechnet (Ellis et al., 2006).

Mit der Formel:

$$\Delta t_{AB} = \frac{h}{v}$$

wird deutlich, dass die zeitliche Verzögerung $\Delta t_{AB}$ zwischen den Detektoren von der Fallgeschwindigkeit v und dem Abstand h abhängt. Der Abstand h ist wiederum eine Funktion des Tropfendurchmessers r und des Brechungsindex n (Ellis et al., 2006):

$$h = \frac{r\, n \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\sqrt{1+n^2-2n\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}}$$

Durch die Ermittlung der Fallgeschwindigkeit eines Tropfens und der zeitlichen Verzögerung des Signals zwischen Detektor A und Detektor B, kann weiters auf den Tropfendurchmesser geschlossen werden. In Ellis et al. (2006) wurde angemerkt, dass die vom Distrometer PWS100 verwendeten Formeln für die Tropfengrößen-Fallgeschwindigkeitsbeziehung auf die mathematischen Modelle von Best (1950b) zurückgehen. Die Ergebnisse stimmen mit den Experimenten von Gunn und Kinzer (1949) mit 4 % Genauigkeit überein. Wie in Kapitel 2.2.2 Formeln zur Berechnung der Fallgeschwindigkeit gezeigt wurde, gibt es von Wobus et al. (1971), Foote und du Toit (1969) oder Dingle (1972) bessere Näherungen mit 1 % an die experimentellen Versuche von Gunn und Kinzer (1949). Allerdings beziehen sich die Formeln von Best (1950b) auf die Versuche von Davies (1942) und weisen in Bezug auf die Korrekturen für die Umgebungsbedingungen eine gute Näherung zu Gunn und Kinzer (1949) auf.

Die oben dargestellten Brechungsanalysen gelten streng genommen nur für kugelförmige Tropfen. Mit zunehmender Größe entfernt sich der Tropfen allerdings von der idealen Kugelform (Kapitel 2.1.1 Tropfengröße und Tropfenform). Laut Ellis et al. (2006), wird mit zunehmender elliptischer Form des Tropfens die optische Leistung der Oberflächen des Tropfens größer, aber gleichzeitig nimmt ihre Trennung zu, wodurch die Leistung der Linse abnimmt. Für kleine Tropfen halten sich diese beiden Effekte die Waage und der Austrittswinkel ist in etwa derselbe. Es wird empfohlen den gemessenen Tropfendurchmesser als äquivalenten Durchmesser einer Kugel zu interpretieren (Ellis et al., 2006).

#### 2.2.2.2. Feste Partikel

Feste Niederschläge wie Graupel oder Schnee sind kaum lichtdurchlässig und weisen meist stark strukturierte Oberflächen auf. Die vier Lichtbögen werden daher, nicht wie bei Regen im Partikel gebrochen, sondern bereits an der Partikeloberfläche gestreut und reflektiert. Die Detektoren empfangen nacheinander für alle vier Lichtplättchen Streumuster eines Partikels und können somit die Fallgeschwindigkeiten ähnlich wie bei flüssigen Tropfen ermitteln (Abb. 11). Die danach verwendete Kreuzkorrelation zur Ermittlung der Zeitdifferenz zwischen Detektor A und Detektor B würde negative Zeitdifferenzen ergeben, wodurch ein Partikel eine negative Größe erhielte. Da dies nicht möglich ist kann das

gemessene Teilchen eindeutig als fester Niederschlag kategorisiert werden. Die Größe von festen Niederschlagspartikeln wird mittels Durchlaufzeitmessung abgeschätzt und weist Ungenauigkeiten von ± 0,5 mm auf (Ellis et al., 2006).

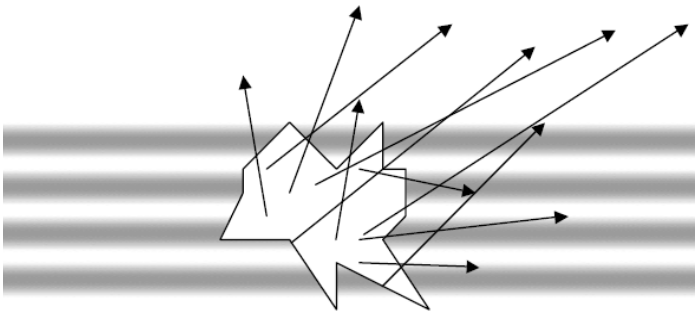


Abb. 11: Lichtstreuung an einem kristallinen Teilchen aus Ellis et al. (2006)

### 2.2.3. Datenverarbeitung, Fuzzy-Logik

Nachdem die Partikel detektiert wurden, werden sie auf Basis ihrer zugehörigen Parameter mehreren Prüfungsabfragen einer Fuzzy-Logik-Tabelle unterzogen. Das bedeutet, die Eigenschaften eines Partikels werden miteinander verglichen und müssen einige Kriterien und Schwellenwerte erfüllen, um z.B. als Regen oder Schnee eingestuft zu werden. Dabei spielen einige Vergleiche und Verknüpfungen von Größe, Fallgeschwindigkeit, Sockel-zu-Spitzen-Signal-Verhältnis eine Rolle. Nützlich sind dabei Daten wie Temperatur, relative Feuchtigkeit, Feuchtkugeltemperatur, die durch eine zusätzlich anzuschließende CS215-PWS-Einheit gewonnen werden. Mithilfe der Zusatzinformationen stehen mehr Parameter für vergleichende Abfragen zur Verfügung, womit z.B. Schnee und Schneekörner bei zu hohen Temperaturen ausgeschlossen werden können. Das in dieser Arbeit verwendete Distrometer PWS100 war mit einer CS215-PWS-Einheit ausgestattet und lieferte dementsprechend Datenfiles mit Zusatzinformationen, wie sie in Kapitel 2.2.4.2 Ausgabeparameter dargelegt werden (Campbell Scientific, Inc., 2006).

### 2.2.4. Datenausgabe

Die Datenausgabe erfolgt mit Textfiles in 60-Sekunden-Messintervallen. Die gemessenen und berechneten Parameter beziehen sich jeweils auf eine Messdauer von 60 Sekunden. Die einzelnen Felder der Ausgabeparameter können teilweise benutzerspezifisch eingerichtet werden. Im nachfolgenden Kapitel 2.2.4.1 Textfile, ist das Ausgabeschema anhand eines 60-Sekunden-Messintervalls einer Feldmessung vom 27.07.2016 dargelegt, wie es bei allen Messungen für diese Arbeit zur Anwendung kam.

#### 2.2.4.1. Textfile

Datenausgabe eines 60-Sekunden-Messintervalls der Feldmessung von 27.07.2016, 19:00 Uhr:

```
0 0 346.1 63 +RA R+ 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```
→ Ausgabeposition 1 bis 23

```
19.03 97.27 18.76 19.04 19.01
```
→ Ausgabeposition 24 bis 28

```
153.5187 2.5586
```
→ Ausgabeposition 29 bis 30

```
0 2 16 30 36 57 91 122 89 119 122 97 92 107 93
```
→ Ausgabeposition 31 bis 330

```
5.292 1.579
```
→ Ausgabeposition 331 bis 332

```
84 0 1904 0 0 0 16 1 0 138 363
```
→ Ausgabeposition 333 bis 343

```
 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 15 104 140 8 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```
→ Ausgabeposition 344 bis 1499

```
2 2 3 6 8 5 6 7 9 6 11 12 12 13 16 18 26 31 37 49
```
→ Ausgabeposition 1500 bis 1549

```
2016 07 27 19 00 00 0AB3
```
→ Ausgabeposition 1550 bis 1556

In Tab. 1 sind alle Ausgabeparameter mit den Ausgabepositionen im Datenfile angeführt. In den Kapiteln 2.2.4.3 bis 2.2.4.12 werden die wichtigsten Ausgabeparameter im Detail laut Campbell Scientific, Inc. (2006) und Ellis et al. (2006) beschrieben.

#### 2.2.4.2. Ausgabeparameter

Tab. 1: Ausgabeparameter aus Campbell Scientific, Inc. (2006)

| Ausgabeposition Nr. | Ausgabeparameter |
|---|---|
| 1 | Benutzermeldung |
| 2 | Benutzermeldung |
| 3 | durchschnittliche Sichtbarkeit (m) |
| 4 | WMO Wettercode |
| 5 | METAR Wettercode |
| 6 | NWS Wettercode |
| 7-22 | diverse Alarmmeldungen |
| 23 | Statusmeldung PWS 100 |
| 24 | mittlere Lufttemperatur (°C) |
| 25 | relative Luftfeuchtigkeit (%) |
| 26 | Feuchtkugeltemperatur (°C) |
| 27 | maximale Lufttemperatur (°C) |
| 28 | minimale Lufttemperatur (°C) |
| 29 | Niederschlagsintensität (mm/h) |

| | |
|---|---|
| 30 | Akkumulierte Niederschlagshöhe (mm) |
| 31-330 | Tropfengrößenverteilung (0,0 mm-30,0 mm) |
| 331 | Mittlere Geschwindigkeit (m/s) |
| 332 | Mittlere Größe (mm) |
| 333-343 | Art der Niederschlagsklassifizierung (Nieselregen, gefrierender Nieselregen, Regen, gefrierender Regen, Schneekörner, Schneeflocken, Eispellets, Hagel, Graupel, Error, Unbekannt) |
| 344-1499 | Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix |
| 1500-1549 | Histogramm mit 50 Werten (Peak-Pedestal-Ratio) |
| 1550-1552 | Datum (Jahr, Monat, Tag) |
| 1553-1555 | Uhrzeit (Stunden, Minuten, Sekunden) |
| 1556 | Prüfsumme (4 ASCII-Zeichen) |

#### 2.2.4.3. Gerätspezifische Ausgabewerte

Die ersten 23 Ausgabewerte sind für die Konfiguration des Messgerätes bzw. für die Ausgabe der Daten zuständig. Sie geben Benutzermeldungen, durchschnittliche Sichtbarkeit, meteorologische Wettercodes, Alarms, sowie die Statusmeldung des PWS 100 aus.

#### 2.2.4.4. Meteorologische Zusatzinformationen

Mit den Ausgabewerten 24 bis 28 werden meteorologische Zusatzinformationen über Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit ausgegeben.

#### 2.2.4.5. Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe

Die Ausgabewerte 29 und 30 geben die Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe aus (Tab. 2). Die zu messenden Regentropfen werden auf einer 40 cm² großen Messfläche in 60-Sekunden-Messintenvallen detektiert. Die Aufsummierung aller Partikel innerhalb eines 60-Sekunden-Messintenvalls ergibt die Niederschlagshöhe in Millimeter. Die Umrechnung der Niederschlagshöhe auf eine Regendauer von einer Stunde ergibt die Niederschlagsintensität mit der Einheit mm/h. Ein Beispiel einer solchen Messung wäre eine akkumulierte Niederschlagshöhe von 1,00 mm und die dazugehörige Niederschlagsintensität von 60,00 mm/h.

Das Distrometer errechnet diese beiden Werte intern aus den detektierten Partikeln und gibt sie direkt im Ausgabefile auf vier Nachkommastellen genau aus. Hierbei ist zu beachten, dass das Gerät nur 90 % des Messintervalls misst und die restlichen 10 % entsprechend der gemessenen Werte berechnet.

Tab. 2: Ausgabeparameter Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe für ein 60-Sekunden-Messintervall im Juli 2016

| 153,5187 | 2,5586 |
|---|---|
| Intensität (mm/h) | Akk. Niederschlagshöhe (mm) |

### 2.2.4.6. Tropfengrößenverteilung (TGV) 0,0 mm bis 30,0 mm

Mit den Ausgabepositionen 31 bis 330 im Ausgabefile folgt direkt im Anschluss an die akkumulierte Niederschlagshöhe die Ausgabe der Tropfengrößenverteilung (TGV). Für diesen Ausgabeparameter ordnet das Distrometer die detektierten Partikel entsprechend ihres Durchmessers einer von 300 Größenklassen zu. Die Größenklassen weisen Klassenbreiten von 0,1 mm auf und erstrecken sich von 0,0 mm bis 30,0 mm Durchmesser. Ausgegeben wird die Anzahl der detektierten Partikel entsprechend ihrer Größenklasse innerhalb eines 60-Sekunden-Messintervalls.

Tab. 3: Ausschnitt der Ausgabeparameter Tropfengrößenverteilung (TGV) von 0,0 mm bis 1,0 mm Durchmesser für ein 60-Sekunden-Messintervall im Juli 2016

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 2 | 16 | 30 | 36 | 57 | 91 | 122 | 89 | 119 | | → Tropfenanzahl |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | → Klassen |
| 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | → Klassengrenzen |

In Tab. 3 sind die ersten 10 Klassen der Tropfengrößenverteilung (TGV) bis zu einem Durchmesser von 1,0 mm, dargestellt. In der ersten Klasse von 0,0 mm bis 0,1 mm wurden keine Tropfen detektiert, in der zweiten Klasse zwei Tropfen, in der dritten 16 Tropfen, usw. In Abb. 12 ist die gesamte Tropfengrößenverteilung (TGV) für ein 60-Sekunden-Messintervall in Form eines Histogramms dargestellt.

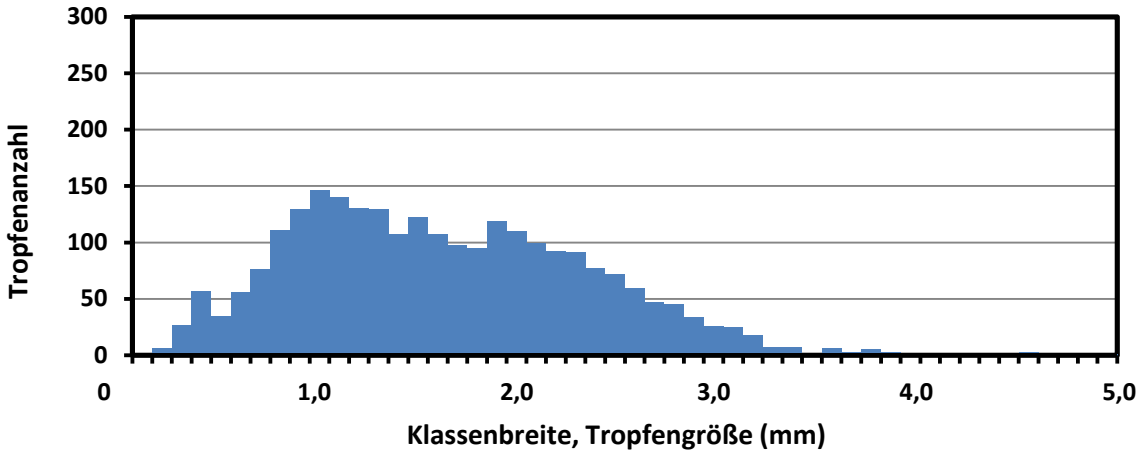



Abb. 12: Tropfengrößenverteilung (TGV) eines 60-Sekunden-Messintervalls im Juli 2016 mit einer Niederschlagsintensität von 162 mm/h

#### 2.2.4.7. Mittlere Geschwindigkeit und Mittlere Größe

Im Anschluss an die Tropfengrößenverteilung folgt mit den Ausgabewerten 331 und 332 die Ausgabe der Mittleren Geschwindigkeit und der Mittleren Größe aller detektierten Tropfen innerhalb eines 60-Sekunden-Messintervalls (Tab. 4).

Tab. 4: Ausgabeparameter Mittlere Geschwindigkeit und Mittlere Größe für ein 60-Sekunden-Messintervall im Juli 2016

| 5,2920 | 1,5790 |
|---|---|
| Mittlere Geschwindigkeit (m/s) | Mittlere Größe (mm) |

Die Ausgabewerte der Mittleren Geschwindigkeit und Mittleren Größe können durch Mittelwertbildung der Tropfengrößenverteilung (TGV) ebenfalls gut genähert durch manuelle Berechnung ermittelt werden.

#### 2.2.4.8. Art der Niederschlagklassifizierung

Mit den Ausgabewerten 333 bis 343 wird die Anzahl der detektierten Partikel pro Niederschlagskategorie ausgegeben. Jedes detektierte Partikel wird auf Basis seiner Eigenschaften wie zum Beispiel seiner Größe, Fallgeschwindigkeit und weiterer Parameter der Fuzzy-Logik-Tabelle (Kapitel 2.2.3 Datenverarbeitung, Fuzzy-Logik), einer der 11 möglichen Niederschlagskategorien zugeordnet. Ausgegeben werden die Kategorien in folgender Reihenfolge:

Nieselregen, gefrierender Nieselregen, Regen, gefrierender Regen, Schneekörner, Schneeflocken, Eispellets, Hagel, Graupel, Error, Unknown.

Tab. 5: Ausgabeparameter Art der Niederschlagsklassifizierung für ein 60-Sekunden-Messintervall im Juli 2016

| 84 | 0 | 1904 | 0 | 0 | 0 | 16 | 1 | 0 | 138 | 363 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Niederschlagsart | | | | | | | | | | |

Die Kategorien eins bis neun beschreiben natürliche Niederschlagstypen, die letzten beiden Ausgabewerte, Error und Unknown, werden für Partikel ausgegeben die die Fuzzy-Logik-Abfragen nicht korrekt beantworteten (Kapitel 2.2.4.8.1 Unknown-Partikel und 2.2.4.8.2 Error-Partikel). In Tab. 5 wurden 84 Nieseltropfen, 1904 Regentropfen, 16 Eispellets, ein Hagelkorn, 138 Error-Partikel und 363 Unknown-Partikel aufgezeichnet.

#### *2.2.4.8.1. Unknown-Partikel*

Es kann mehrere Gründe geben, weshalb ein detektiertes Partikel in der Kategorie „Unknown“ eingeordnet wird. Zum einen betrifft diese Zuordnung Teilchen welche die Fuzzy-Logik-Abfragen nicht eindeutig erfüllen. Die Abfragen für jede Kategorie werden miteinander verglichen, der höchste Wert beschreibt am wahrscheinlichsten die korrekte Niederschlagsart des Partikels. Weisen zwei Kategorien denselben kalkulierten Wert auf, kann das Partikel nicht eindeutig z.B. als Regen oder Nieselregen klassifiziert werden und muss daher als unbekannt eingestuft werden. Ein weiterer Grund für die Zuordnung in diese Klasse ist, wenn ein Partikel Werte für Parameter einnimmt die rein logisch außerhalb des wahrscheinlichen Bereiches liegen. Eine weitere Möglichkeit um Teilchen als unbekannt zu klassifizieren ist die Überlappung zweier Partikel im optischen Pfad.

Unbedingt zu erwähnen ist, dass für Partikel die nicht eindeutig kategorisiert werden konnten und in der Unknown-Kategorie ausgegeben werden, die aber zumindest als vorhanden erkannt wurden, anhand der korrekt gemessenen Partikel zu diesem Zeitpunkt ein Extrapartikel hinzugefügt wird. Für die genaue Ausgabe in der Tropfengrößenverteilung (TGV) und der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix stehen derartige Teilchen nicht zur Verfügung. Der entstehende Fehler durch die Nichtaufzeichnung kann nur durch Beifügung der Extrapartikel für die Ausgabeparameter Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe minimiert werden.

#### *2.2.4.8.2. Error-Partikel*

Im Gegensatz zu Unknown-Partikeln sind Teilchen die als Error eingestuft wurden, dank mehrerer Abfragen als eindeutig fehlerhaft einzustufen. Für Partikel in dieser Kategorie wurden Parameter aufgezeichnet die für Niederschlag rein logisch auszuschließen sind. Ein mögliches Beispiel hierfür wäre die Bewegung von Tropfen vertikal nach oben. Diese Form des Fehlers könnte entstehen, wenn Regentropfen auf eine Fläche des Distrometers treffen, dadurch in beliebige Richtungen abprallen und von unten in die Messfläche eintreten. Eine weitere Möglichkeit der Error-Klassifizierung entsteht, wenn Partikel die Messkante des Lichtbands des Messbereichs schneiden. Das Partikel kann dadurch nicht vollständig detektiert werden und muss als Error eingestuft werden.

Partikel der Error-Klasse werden in keiner Statistik (wie z. B.: Tropfengrößenverteilung (TGV), Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix) berücksichtigt und im Gegensatz zur Unknown-Kategorie wird keine Korrektur für die Ausgabeparameter Niederschlagsintensität oder akkumulierte Niederschlagshöhe vorgenommen.

#### 2.2.4.9. Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix

Im Anschluss an die Niederschlagsklassifizierung folgt mit den Ausgabewerten 344 bis 1499 die Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix. Diese Matrix besteht aus 34 Größenklassen und 34 Geschwindigkeitsklassen. Durch die Kombination der beiden Klassen ergeben sich 1156 unterschiedliche Matrixfelder. Ein detektiertes Partikel, wird je nach gemessener Größe und Geschwindigkeit zum Messzeitpunkt in die jeweils passenden Klassen für Größe und Geschwindigkeit eingeordnet, indem es in eines der 1156 möglichen Matrixfelder geschrieben wird. Ausgegeben wird die Anzahl der detektierten Partikel pro Matrixfeld. Die Reihenfolge für die Ausgabe der Matrixfelder, ist wie folgt:

s[1]v[1]_s[1]v[2]_...._s[1]v[34]; s[2]v[1]_s[2]v[2]_...._s[2]v[34]; …._s[34]v[1]_.... _s[34]v[34];

Das Matrixfeld 1 beginnt bei Größenklasse s[1] und Fallgeschwindigkeitsklasse v[1]. Matrixfeld 2 setzt sich aus Größenklasse s[1] und Fallgeschwindigkeitsklasse v[2] zusammen. Es werden der Reihe nach alle Geschwindigkeitsklassen von v[1] bis v[34] innerhalb der ersten Größenklasse s[1] ausgegeben. Danach folgt die Ausgabe der Fallgeschwindigkeitsklassen v[1] bis v[34] innerhalb der Größenklasse s[2]. Dies wird so lange fortgeführt bis das letzte Matrixfeld der Größenklasse s[34] und der Fallgeschwindigkeitsklasse v[34] erreicht wurde.

Im Unterschied zur Tropfengrößenverteilung (TGV) enthält die Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix nicht durchgehend gleich große Klassenbreiten. Die Klassenbreite steigt mit zunehmender Partikelgröße an. Bis zu einem Durchmesser von 1,0 mm beträgt die Klassenbreite analog zur Tropfengrößenverteilung (TGV) 0,1 mm. Danach verdoppeln sich die Klassenbreiten in regelmäßigen Abständen. Das bedeutet von 1,0 mm bis 2,0 mm beträgt die Klassenbreite 0,2 mm. Von 2,0 mm bis 4,0 mm beträgt die Klassenbreite 0,4 mm. Dies setzt sich bis Klasse 33 fort. Klasse 34 ist die letzte Klasse und weist eine nach oben hin offene Klassengrenze auf. Die Klassengrenzen sind für Größenklassen und Geschwindigkeitsklassen identisch. Eine detaillierte Tabelle mit der Auflistung aller Klassengrenzen laut Campbell Scientific, Inc. (2006) ist dem Anhang A1 beigefügt.

In Tab. 6 sind 34 Matrixfelder der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix einer Regenmessung im Juli 2016 aufgelistet. Die Werte stellen die 34 Fallgeschwindigkeitsklassen v[1] bis v[34] innerhalb der Größenklasse s[16] dar. Der Großteil der Tropfen (104 bzw. 140 Stück) befindet sich in den Fallgeschwindigkeitsklassen v[24] bzw. v[25]. Mit anderen Worten geht aus diesen Daten hervor, dass Tropfen mit Durchmessern von 2,0 mm bis 2,4 mm, Fallgeschwindigkeiten von 7,2 m/s bis 9,6 m/s aufweisen. Die gesamten 1156 Matrixfelder der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für dieses 60-Sekunden-Messintervall sind in Abb. 13 in EXCEL-Form dargestellt.

Tab. 6: Ausgabeparameter Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für 2,0 mm bis 2,4 mm eines 60-Sekunden-Messintervall im Juli 2016

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 104 | 140 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

v[1]…. ….v[34]

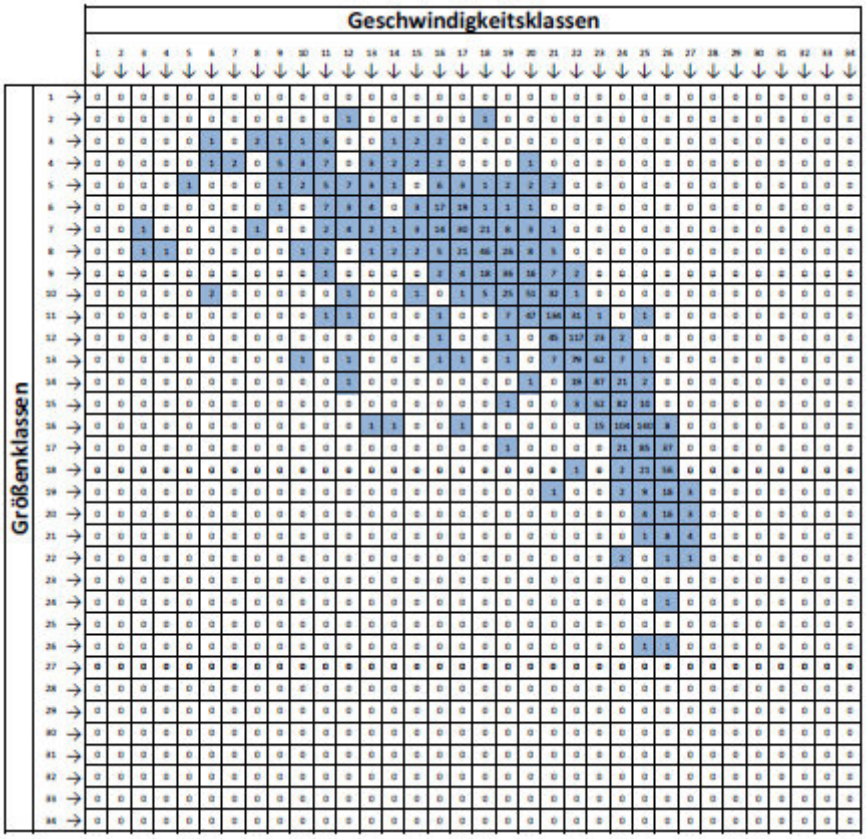



Abb. 13: Zweidimensionale Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix bei der Datenauswertung in EXCEL

Um die Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix verständlicher darzustellen und die Ergebnisse besser veranschaulichen zu können, wurde die Matrix gedreht, Achsen eingefügt und die korrekten Klassenbreiten aufgetragen. Weiters wurde die Tropfenanzahl pro Klasse im Verhältnis zu den Gesamttropfen farblich herausgehoben. Durch Einfügen der Kurven für die Partikelgrößen-Partikelgeschwindigkeitsbeziehung für die gängigsten Niederschlagsarten laut Berechnungsmodellen, kann das Ergebnis sehr anschaulich abgelesen werden (Abb. 14).

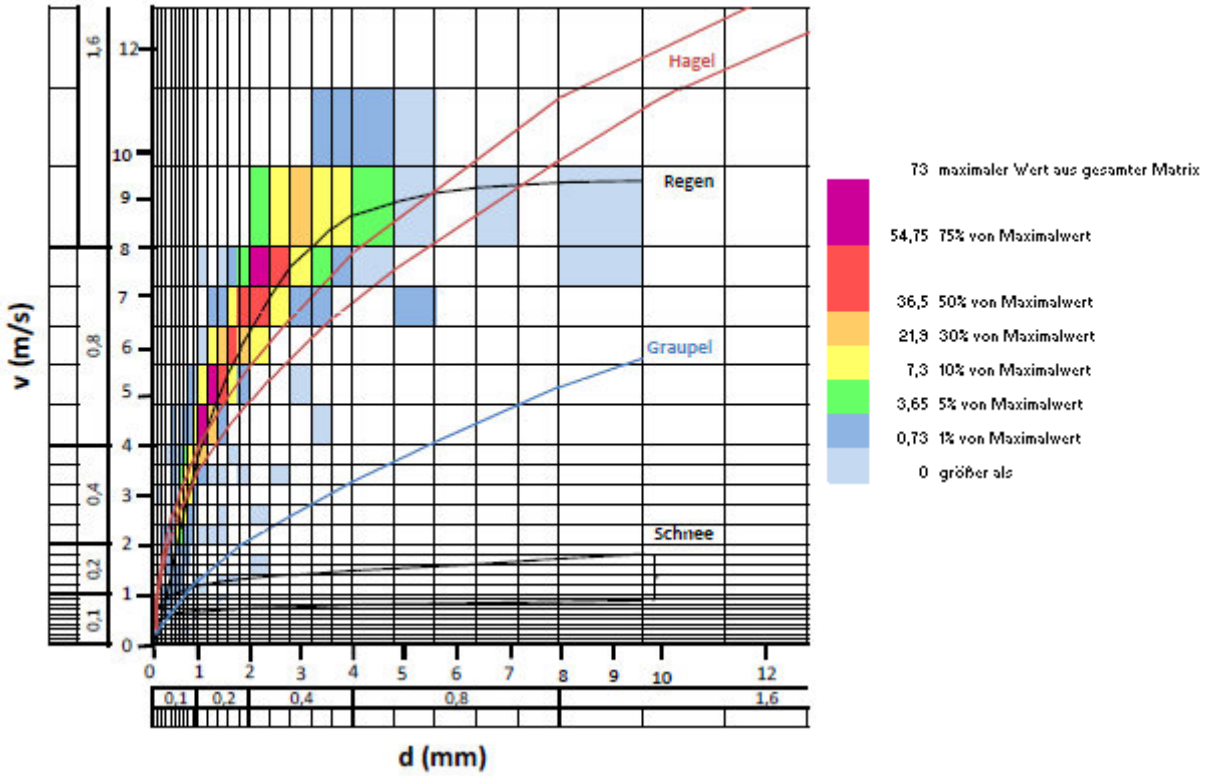



Abb. 14: Umgestaltete Datenmatrix für ein 60-Sekunden-Messintervall der Feldmessung mit einer Niederschlagsintensität von 153 mm/h

Bei dem in Abb. 14 dargestellten 60-Sekunden-Messintervall beträgt die maximale Anzahl der detektierten Tropfen pro Matrixfeld 73 Tropfen. Mit der Farbenskala wird ausgedrückt, wie das Verhältnis der anderen Felder zu diesem Maximalwert ausfällt. In den violett dargestellten Feldern befinden sich zwischen 75 % und 100 % des Feldes mit den meisten Partikeln, was 55 bis 73 Tropfen entspricht, in den roten Feldern wurden bis zu 50 % der Gesamttropfen detektiert und damit zwischen 36 bis 55 Tropfen. In der Legende in Abb. 14 sind die weiteren Farbzuweisungen aufgelistet.

Die Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix bietet durch Ausgabe der Partikelgrößen mit ihren zugehörigen Fallgeschwindigkeiten, den optimalen Ausgangspunkt für die Berechnung der kinetischen Energie von Niederschlägen (Kapitel 3.4 Erosivität von Niederschlägen).

#### 2.2.4.10. Histogramm peak-to-pedestal-ratio

Die Ausgabewerte 1500 bis 1549 geben das sogenannte peak-to-pedestal-ratio Histogramm aus. Das pedestal signal oder Sockel-Signal, wird durch Ablösung der Spitzen-Signale vom Gesamtsignal erhalten. Das Verhältnis zwischen Sockel-Signal und Spitzen-Signal ergibt das peak-to-pestal-ratio. Dieser Wert gibt an wie groß das Verhältnis zwischen den Rausch- bzw. Streusignalen und dem Spitzensignal ausfällt. Bei kristallinen Partikeln ist das Sockel-Signal aufgrund der stärker reflektierenden Streuflächen stärker ausgeprägt als bei flüssigen Tropfen. Flüssige Teilchen weisen hinsichtlich der geringen Streuung des Lichtes, sehr geringe Sockel-Signale auf. Das Histogramm dieser Ausgabefunktion gibt ähnlich wie die

Tropfengrößenverteilung (TGV), ebenfalls die Anzahl der Partikel pro Größenklassen aus. Das peak-to-pedestal-ratio Histogramm ist allerdings mit Unsicherheiten behaftet, da Partikel kleiner als 0,5 mm nicht akkurat aufgezeichnet werden können. Die in diesem Kapitel beschriebene Ausgabeform ist für die Auswertung kristalliner Niederschläge wie Hagel, Graupel und Schnee geeignet und hat für die Erosivität von Niederschlägen eine untergeordnete Bedeutung.

#### 2.2.4.11. Datum und Uhrzeit

Um die einzelnen 60-Sekunden-Messintervalle zeitlich zuordnen zu können, werden mit den Ausgabewerten von 1550 bis 1552 das Jahr, der Monat und der Tag, sowie mit den Ausgabewerten von 1553 bis 1555 Stunden, Minuten und Sekunden zum Aufzeichnungszeitpunkt ausgegeben.

#### 2.2.4.12. ASCII Prüfsumme

Am Ende des Ausgabeintervalls folgt mit dem letzten Ausgabewert 1556 die Zwei-Byte-Prüfsumme im Hex-Format (vier ASCII-Zeichen).

### 2.2.5. Datenaufbereitung

Die Daten werden in 60-Sekunden-Messintervallen aufgezeichnet und auf ein Speichermedium geschrieben. Für die Datenausgabe ist es unerheblich ob zum Messzeitpunkt Niederschlag fällt oder nicht. In einem Jahr ergibt dies 525.600 60-Sekunden-Messintervalle wovon nur ein geringer Anteil auch tatsächlich Niederschlagsdaten enthält. Die restlichen Daten können somit bereits vor der Auswertung aussortiert und gelöscht werden, da sie unerheblich sind. In dieser Arbeit wurde die Entfernung der Files ohne Niederschlagsaufzeichnung, angesichts des überschaubaren Datenumfangs der Feldmessungen, mit EXCEL durchgeführt. Anhand des Ausgabeparameters akkumulierte Niederschlagshöhe wird am besten Aufschluss über den Inhalt der Datensätze gegeben. Die Niederschlagsfiles der Labormessungen wurden ohnehin zu gewählten Zeitpunkten gestartet und beendet und konnten daher einfach aus den Rohdaten herausgesucht werden. Für längere Messperioden mit größeren Datenumfängen, ist es zu empfehlen Softwarelösungen für die automatische Aussortierung von unbrauchbaren Datenfiles zu verwenden.

## 2.3. Regensimulator

Der Regensimulator ist ein technisches Versuchsgerät der BOKU Wien und befindet sich im technischen Labor des Standorts Muthgasse. Mit dem Regensimulator werden Regentropfen, die dem natürlichen Regen nachempfunden sind, künstlich erzeugt. Über Beregnungsdüsen können Versuchsobjekte oder –flächen mit unterschiedlichen Regenintensitäten beregnet werden. Die wichtigsten Bestandteile des Regensimulators sind Wasserdüsen, Kreiselpumpen, Verrohrungen, ein Wasserbehälter und Bedienelemente.

In dieser Arbeit wurde der Regensimulator verwendet um das Distrometer PWS100 in kontrollierten Laborbedingungen zu beregnen und die digitalen Ausgabewerte mit manuellen Vergleichswerten zu überprüfen.

### 2.3.1. Funktionsweise

Wasser wird mittels Kreiselpumpen aus einem Behälter zu den sechs vorhanden Beregnungsdüsen hochgepumpt. Die Beregnungsdüsen befinden sich an einem Gestänge, welches auf die gewünschte Höhe einzustellen ist. Das Hochpumpen verläuft über zwei separate Schlauchlinien und führt jeweils zu Verrohrungen, die das Wasser zu den Beregnungsdüsen weiterbefördern. An jeder der beiden Verrohrungen befinden sich drei Beregnungsdüsen, aus welchen das Wasser ausregnet (Abb. 15). Um den geeigneten Wasserdruck für die Beregnungsdüsen einstellen zu können, verlaufen die Schlauchlinien durch eine Steuerplatte. Der eingestellte Druck ist auf Druckmanometern ablesbar, die auf den beiden Verrohrungen montiert sind. Am hinteren Ende der Verrohrungen befinden sind Gleichstrommotoren, welche die Düsen mit bestimmter Geschwindigkeit nach links und rechts schwenken. Im Leerlauf des Regensimulators sind die Motoren inaktiv, die Beregnungsdüsen geben daher kein Wasser auf die Versuchsfläche ab, sondern sprühen in Abflussrohre. Das Wasser der Abflussrohre fließt zum Ausgleichsbehälter zurück und wird mithilfe der Pumpen wieder zu den Düsen hochgepumpt.

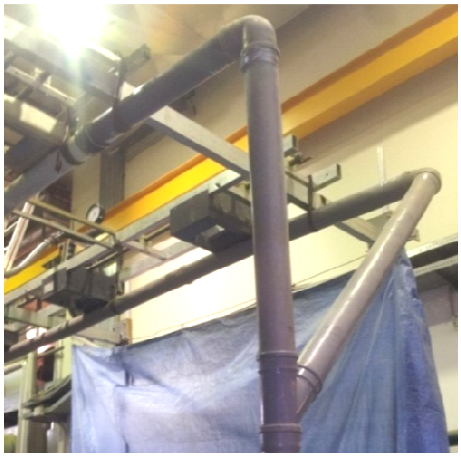


Abb. 15: Regensimulator

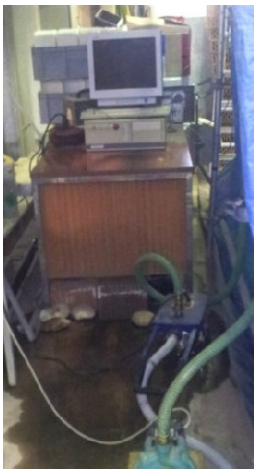


Abb. 16: Steuerungseinheit des Regensimulators

Die Taktung der Schwenkbewegung für die Motoren wird von einer Blackbox vorgegeben. Über ein Computer-Interface (Abb. 16), können folgende Parameter benutzerspezifisch für die Beregnungsvorgänge eingestellt werden:

duration… Dauer der Beregnung (min)

sweeps/min… Anzahl der Schwenkbewegungen der Düsen pro Minute

lag … Zeitverzögerung der Schwenkvorgänge zwischen den linken und den rechten Beregnungsdüsen (s)

Je mehr sweeps/min eingestellt werden, desto mehr Schwenkbewegungen absolvieren die Beregnungsdüsen und dementsprechend steigt die Regenintensität. Um gegenseitige Behinderungen oder Zusammenstöße der Tropfen der linken und der rechten Düsenseite zu vermeiden, wird eine Zeitverzögerung (lag) zwischen den Schwenkbewegungen der linken und der rechten Düsenseite eingestellt. Der einzustellende lag ist von den sweeps/min abhängig und wird folgendermaßen berechnet:

$$lag = \frac{60\ s}{sweeps\ /\ \min\ \ .\ 2}$$

Für die Einstellung von 100 sweeps/min müsste somit eine Zeitverzögerung von 0,3 s eingestellt werden.

### 2.3.2. Einstellungen

Vor Beginn der Laborversuche, musste der Regensimulator zuerst technisch aufbereitet werden, da er seit längerer Zeit unbenutzt geblieben war. Nachdem die Vorbereitungsarbeiten wie, Reinigung der Versuchsfläche, Montieren der Steuerelemente, Füllen der Pumpen, Montage der Rohre für den Leerlauf, Austausch defekter Schlauchklemmen, usw. abgeschlossen waren, wurde das Gerät für die anstehenden Versuche eingestellt.

Bei den Beregnungsversuchen für diese Arbeit, waren vier der sechs Beregnungsdüsen aktiv, die anderen beiden Düsen wurden wasserdicht verschlossen. Die Druckeinstellung wurde auf 0,42 bar für beide Schlauchlinien eingestellt und musste zwischen den Messungen mehrmals auf der Steuerplatte nachgeregelt werden. Die Beregnungsdüsen wurden auf eine Höhe von 3,4 m von der Versuchsfläche angehoben. Die Versuchsfläche wurde mit Regenschutzplanen eingefasst, um Bereiche außerhalb der Versuchsfläche vor Nässe zu schützen.

### 2.3.3. Ermittlung der Intensitätsverteilung

Um Vergleichswerte der Regenintensität für die nachfolgende Distrometermessung zu bekommen, wurde die Versuchsfläche unter dem Regensimulator mit Auffangschalen ausgelegt und beregnet. Mit Hilfe eines Lots wurde zuvor der Mittelpunkt zwischen den vier Düsen ausgelotet und eine 4,1 m² große Versuchsfläche am Boden markiert. Innerhalb der Versuchsfläche wurden 112 rechteckige Auffangschalen mit den Abmessungen L= 28,8 cm und B= 14,1 cm aufgestellt. Die Auffangschalen wurden wie in Abb. 17 dargestellt, unter den Beregnungsdüsen positioniert. Nach dem Beregnungsvorgang erfolgte die Wägung der einzelnen Auffangschalen. Das Gewicht der mit Wasser gefüllten Auffangschalen wurde notiert.

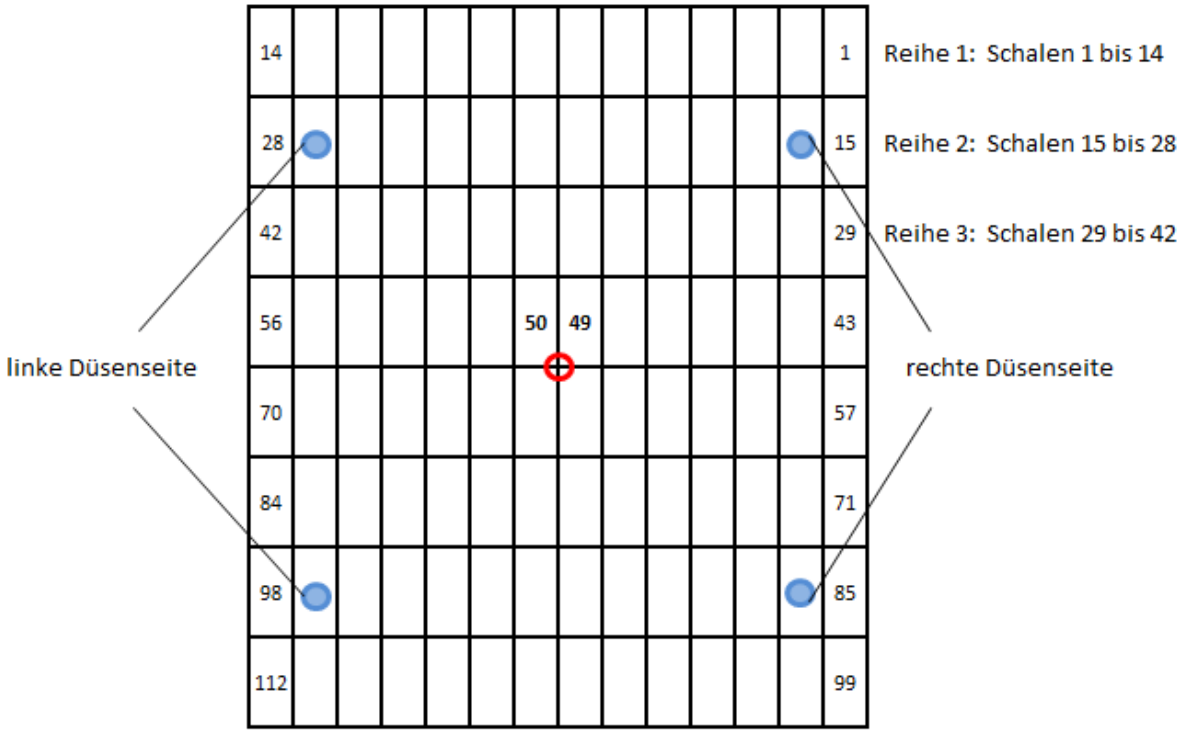



Abb. 17: Anordnung der Auffangschalen unter dem Regensimulator

Das Ziel war, die Regenintensität aus der Masse der beregneten Schalen zu ermitteln. Dazu musste zuerst das Eigengewicht der leeren Schalen vom gewogenen Gesamtgewicht der beregneten Schalen subtrahiert werden. Die somit erhaltene Wassermasse des Beregnungsvorgangs wurde durch die Dichte ρ von Wasser dividiert, womit das Volumen des Schaleninhaltes erhalten wurde. Das Volumen dividiert durch die Schalenfläche ergab weiter die Niederschlagshöhe in den einzelnen Schalengefäßen. Durch Umrechnung der Niederschlagshöhe pro Beregnungsdauer auf die Beregnungsdauer von einer Stunde wurde schließlich die Regenintensität für jede einzelne Auffangschale ermittelt. Die Beregnung der Auffangschalen wurde mit 20, 60, 100 und 120 sweeps/min durchgeführt. In Abb. 18 und Abb. 19 ist der lineare Zusammenhang dargestellt, der zwischen sweeps/min und der Regenintensität besteht. Abb. 18 bezieht auf die gesamte Fläche aller Versuchsschalen, in

Abb. 19 wurden lediglich die in der Mitte der Versuchsfläche befindlichen Schalen Nr. 49 und Nr. 50 betrachtet.

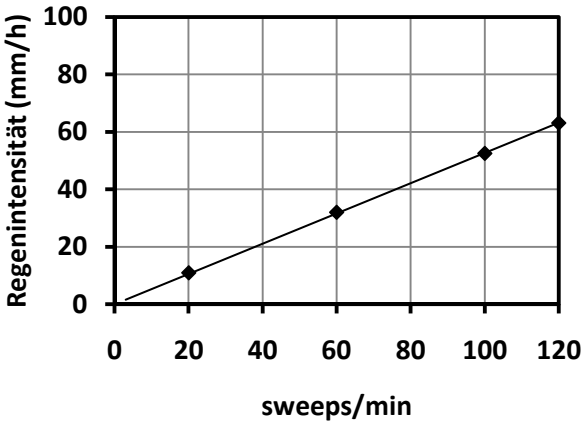



Abb. 18: Beziehung zwischen sweeps/min und Regenintensität für alle 112 Auffangschalen

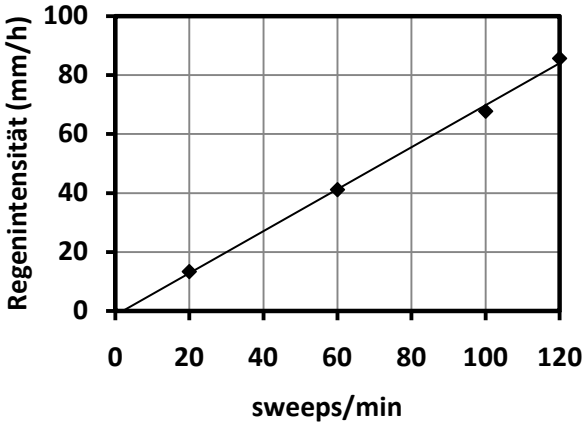



Abb. 19: Beziehung zwischen sweeps/min und Regenintensität für die Auffangschalen 49 und 50

Im aktiven Beregnungszustand bilden die Beregnungsdüsen Sprühkegel mit unterschiedlichen Durchmessern, die einander auf der Bodenfläche überlappen. Die unterschiedlich großen Sprühkegel haben zur Folge, dass die Auffangschalen der Versuchsfläche (Abb. 21), nicht gleichmäßig stark beregnet werden. In Abb. 20 ist zu sehen, wie unterschiedlich hoch die Regenintensitäten für die einzelnen Schalen ausfielen. Durch die Auswertung der Beregnungsvorgänge unter Zuhilfenahme der Auffangschalen, konnten Positionen auf der Versuchsfläche festgestellt werden, die einerseits durchwegs hohe Regenintensitäten aufwiesen und andererseits Stellen die im Vergleich dazu nur schwach beregnet wurden. Die Schalenberegnung bildete damit den Ausgangspunkt für das Auffinden des geeignetsten Aufstellungsstandorts des Distrometers auf der Versuchsfläche (Abb. 20). Die detaillierte Auswertung zur Ermittlung der Intensitätsverteilung des Regensimulators ist im Anhang A2 beigefügt.

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40 | 46 | 52 | 56 | 57 | 56 | 55 | 51 | 49 | 47 | 46 | 44 | 42 | 39 |
| 54 | 61 | 67 | 72 | 75 | 73 | 69 | 66 | 66 | 66 | 65 | 61 | 57 | 52 |
| 57 | 66 | 72 | 78 | 85 | 83 | 79 | 75 | 76 | 76 | 73 | 69 | 64 | 57 |
| 63 | 69 | 76 | 83 | 90 | 90 | 87 | 85 | 86 | 84 | 79 | 73 | 67 | 62 |
| 57 | 63 | 67 | 74 | 78 | 79 | 76 | 76 | 75 | 73 | 65 | 60 | 55 | 64 |
| 48 | 54 | 61 | 66 | 69 | 69 | 65 | 63 | 63 | 62 | 60 | 58 | 55 | 50 |
| 48 | 56 | 63 | 66 | 70 | 70 | 67 | 62 | 61 | 59 | 57 | 59 | 55 | 51 |
| 41 | 47 | 52 | 55 | 56 | 55 | 56 | 57 | 57 | 54 | 52 | 50 | 49 | 46 |

Abb. 20: Intensitätsverteilung der gewogenen Auffangschalen bei 120 sweeps /min

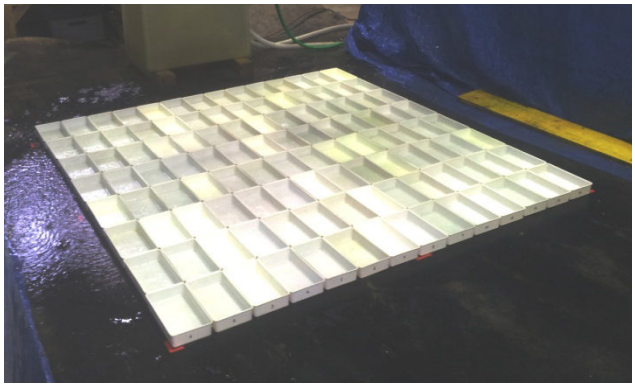


Abb. 21: Auffangschalenschalen zur Ermittlung der Intensitätsverteilung unter dem Regensimulator

## 2.4. Distrometermessungen

### 2.4.1. Laborversuche

#### 2.4.1.1. Distrometeraufstellung

Auf Basis der Ergebnisse der Schalenberegnung wurde der Aufstellungsort für das Distrometer auf die Position der Schalen mit den Nummern 49 und 50 festgelegt. Es handelt sich dabei um die Mitte der Reihe 4 der Schalenaufstellung. Diese Position wurde gewählt, da hier die mitunter höchsten Regenintensitäten von 85 mm/h durch den Regensimulator zustande kamen und damit bei den Beregnungsvorgängen die höchste Spannweite getestet werden konnte. Weiters befanden sich diese Schalen exakt in der Mitte der Versuchsfläche, wodurch das Distrometer am exaktesten positioniert werden konnte. Die Aufstellungshöhe des Distromters bzw. die Entfernung des Messbereichs von der Bodenoberfläche betrug 0,5 m.

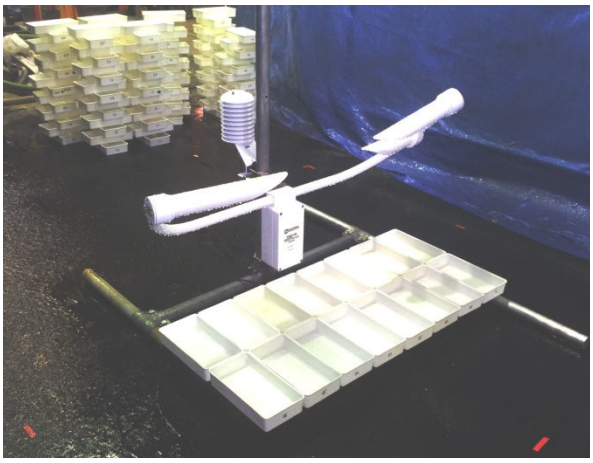


Abb. 22: Distrometer mit Auffangschalen im Labor

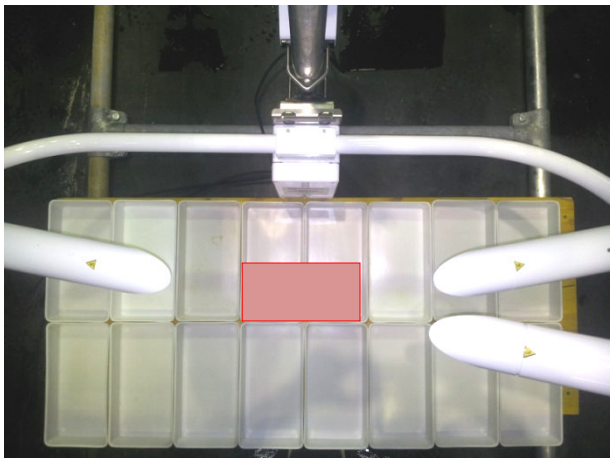


Abb. 23: Draufsicht Distrometer mit skizziertem Messbereich (rotes Rechteck)

Unter dem Distrometer wurden 16 Stück der Auffangschalen aus der Schalenberegnung auf einer Holzplatte platziert (Abb. 22). Die Schalen wurden, wie bei der Ermittlung der Intensitätsverteilung, nach den Beregnungsvorgängen gewogen. Mit Hilfe der Wassermasse wurde die Regenintensität berechnet und als Vergleichswert zur Distromterausgabe verwendet. Die akkuratesten Vergleichswerte wurden von den Schalen Nr. 49 und 50 geliefert, da sich diese beiden Schalen direkt unter dem unsichtbaren Messbereich des Distromters befanden (Abb. 23). Die anderen Schalen wiesen, wie in Kapitel 2.3.3 Ermittlung der Intensitätsverteilung gezeigt wurde, bereits zum Teil große Unterschiede infolge der individuellen Intensitätsverteilung des Regensimulators auf.

#### 2.4.1.2. Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden an vier Mess-Tagen im Mai 2016 durchgeführt. Es wurden jeweils zwei Messungen mit den Einstellungen 20, 60, 100 und 120 sweeps/min bei unterschiedlich langen Beregnungsdauern ausgeführt. Für 20 sweeps/min wurden längere Regendauern von bis zu 40 min gewählt, um angesichts der geringen Regenintensität aussagekräftige Wassermengen zu erzeugen. Für hohe Regenintensitäten bei 120 sweeps/min konnte maximal 10 min beregnet werden, da bei längeren Regendauern die Schalen übergelaufen wären.

In Abb. 24 sind die Ergebnisse der Versuchsreihe dargestellt. Die Schalenauswertung der beiden Auffangschalen unter der Messfläche des Distrometers, zeigt analog zur Intensitätsverteilung der Schalenberegnung einen linearen Anstieg. Die Ausgabefunktion Niederschlagsintensität des Distrometers und die Auswertung der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix stimmen bei geringen Regenintensitäten mit der Schalenauswertung annähernd gut überein. Bei 120 sweeps/min bzw. 80 mm/h Regenintensität entfernen sich die Ergebnisse der unterschiedlichen Auswertungsmethoden zunehmend voneinander.

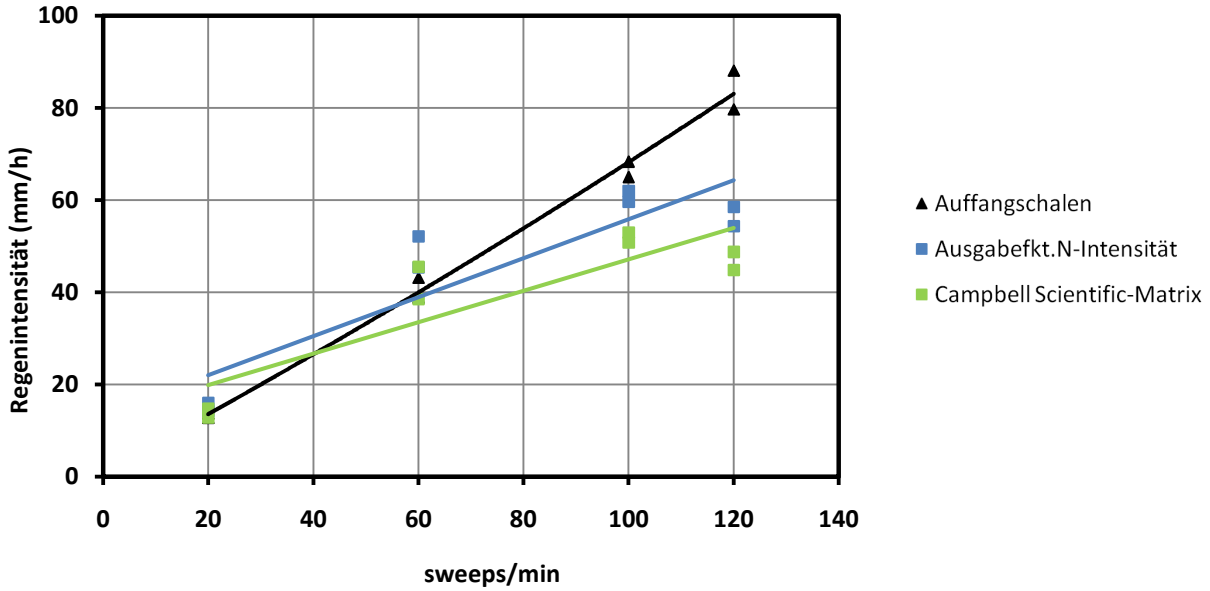



Abb. 24: Beziehung zwischen sweeps/min und der Niederschlagsintensität des Regensimulators

#### 2.4.1.3. Messung mit nur einer Schale

Um das Resultat aus den ersten Distrometermessungen zu überprüfen wurde die Versuchsanordnung etwas verändert. Das Ziel der Veränderung war es, mehr Messungen in kürzerer Zeit ausführen zu können. Hierfür wurden die 16 Auffangschalen, von denen ohnehin nur die beiden Schalen 49 und 50 repräsentative Werte lieferten, auf lediglich eine Schale reduziert (Abb. 25). Danach konnten weitere Messungen mit 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 60, 70, 80, 90 und 120 sweeps/min durchgeführt werden. Die Auswertungen der Distrometerversuche im Labor sind dem Anhang unter A3 hinzugefügt.

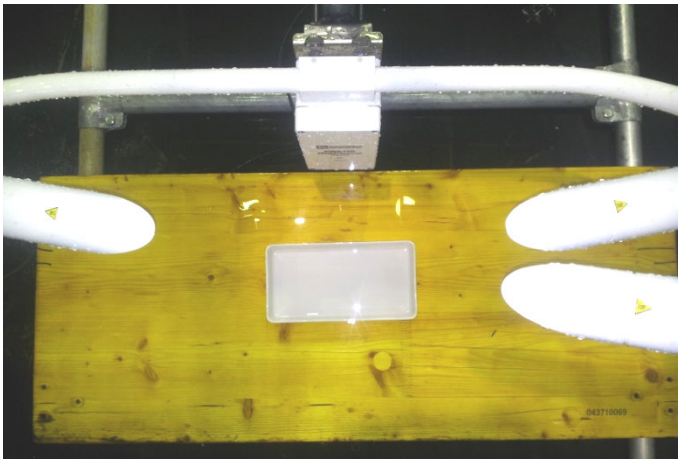


Abb. 25: Neue Versuchsanordnung mit nur einer Auffangschale

Aus der feineren Auflösung der Ergebnisse in Abb. 26 ist erkennbar, dass bis < 60 sweeps/min die drei Kurven eine gute Übereinstimmung aufweisen. Ab 60 sweeps/min stellt sich für alle höheren Schwenkbewegungen des Regensimulators mit 70, 80, 90 und 120 sweeps/min ein Maximalwert von 60 mm/h für die Distrometerausgabe ein. Die Auswertung der Auffangschalen zeigt allerdings deutlich höhere Regenintensitäten. Beim Vergleich des Kurvenverlaufes der Schalenauswertung mit dem Verlauf der Messung aus Kapitel 2.3.3 Ermittlung der Intensitätsverteilung wird ersichtlich, dass die Schalenauswertung einen korrekten Bezugswert darstellt und keine Beeinflussung der Schaleninhalte durch Abschottung oder Abtropfen von den Detektorarmen eintritt. Der Grund für die unbefriedigenden Messergebnisse bei hohen Regenintensitäten der Labormessungen wird in Kapitel 3.2 Interpretation der Labormessungen erläutert.

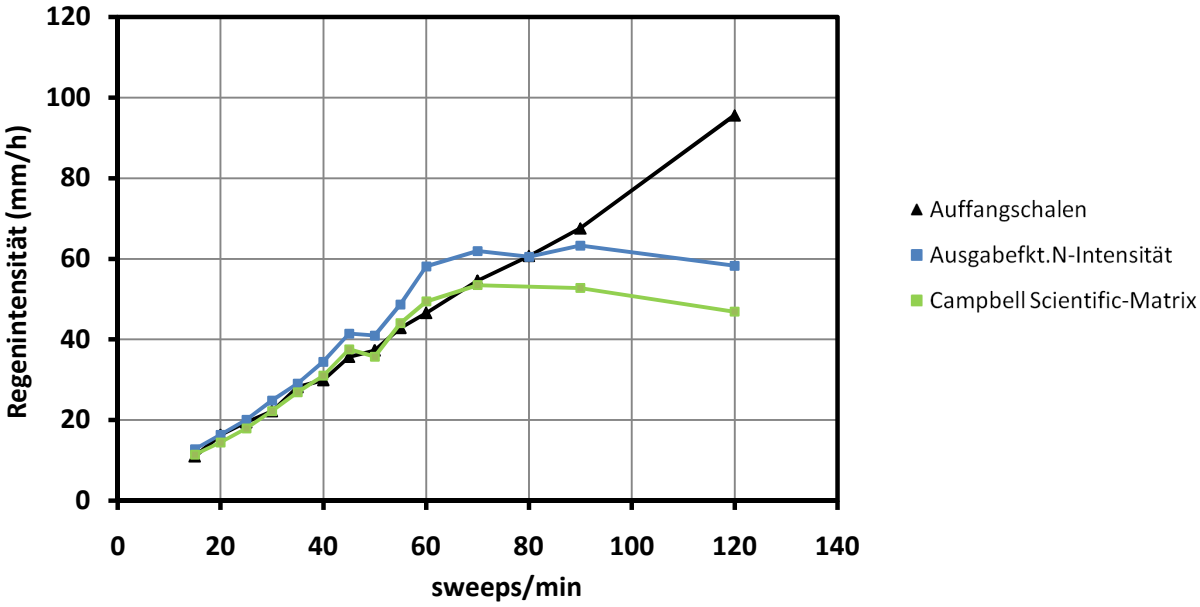



Abb. 26: Beziehung zwischen sweeps/min und der Niederschlagsintensität bei veränderter Versuchsanordnung

#### 2.4.1.4. Abbruch der Labormessungen

Zur Überprüfung und Erweiterung der Messversuche mit dem Regensimulator, hätten noch weitere Versuche im Labor folgen sollen. Infolge eines schwerwiegenden technischen Defekts des Regensimulators, mussten die Laborversuche an dieser Stelle jedoch abgebrochen werden und die bis dahin ausgeführten Messversuche als Datengrundlage für die Auswertungen dienen.

### 2.4.2. Feldversuche

#### 2.4.2.1. Versuchsaufstellung im Feld

Anlässlich des Abbruchs der Laborversuche wurden am 13.06.2016 die Feldversuche in Mistelbach mit natürlichem Regen gestartet. Das PWS100 wurde im Labor demontiert und nach Mistelbach in Niederösterreich gebracht (Abb. 27).

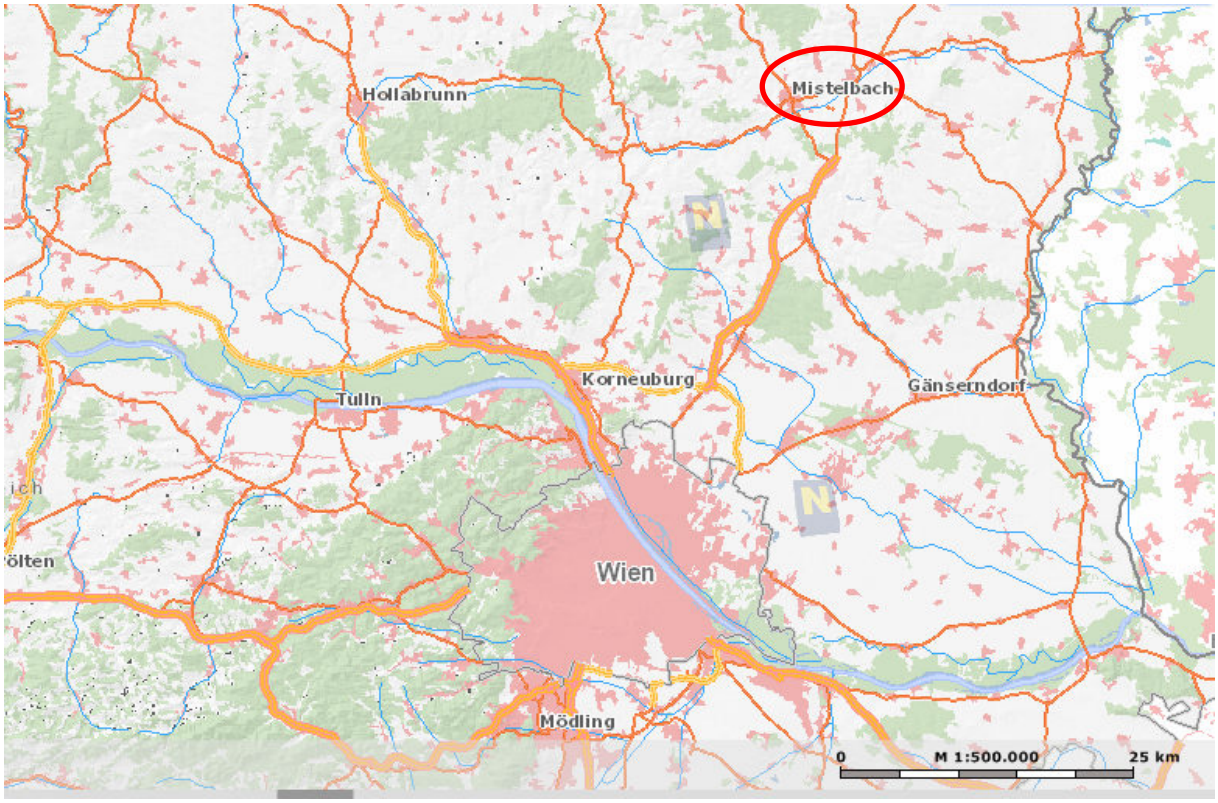



Abb. 27: Kartenausschnitt mit dem Aufstellungsort des Distrometers in Niederösterreich (NÖ Atlas, 2017)

Als Aufstellungsort für das Distrometer wurde ein Versuchsfeld der BOKU gewählt. Die Montage des PWS100 und des Zusatztools CS215-PWS erfolgte auf einem Stahlrohr, das mit Hilfe eines Erdbohrers vertikal in den Untergrund eingebracht wurde (Abb. 28). Die Aufstellungshöhe betrug 1,0 m. Die Stromversorgung des Distrometers wurde mittels Solarpaneelen zur Energiegewinnung und einer Batterie zur Zwischenspeicherung der elektrischen Energie sichergestellt (Abb. 29). Die gesamte Versuchsanordnung ist in Abb. 30 dargestellt.

Abb. 28: Aufstellung des Distrometers für die Messungen im Feld

Abb. 29: Batterie zur Sicherstellung der Energieversorgung des PWS100

Abb. 30: Fertige Versuchsanordnung mit Distrometer, Solarpaneelen, Verkabelung und in der Hütte untergebrachter Batterie.

#### 2.4.2.2. Versuchsdurchführung

Nachdem das Messgerät ordnungsgemäß aufgestellt wurde, zeichnete es durchgehend in 60-Sekunden-Messintervallen die Niederschlagsverhältnisse auf. Die Datenaufzeichnungsdauer umfasste die Sommermonate des Jahres 2016, beginnend mit dem Aufstellungstag am 13.06.2016 bis Ende September 2016.

Bei der Auswertung der Daten musste allerdings festgestellt werden, dass einige Monate nicht korrekt aufgezeichnet wurden und die Datenausgabefiles fehlerhaft waren. Da lediglich die Daten des Monats Juli fehlerfrei aufgezeichnet wurden, verblieben die Daten des Zeitraums von 05.07.2016 bis 01.08.2016 als Auswertungsgrundlage für die Feldmessungen.

In diesem Zeitraum traten 5 Regenereignisse auf, die über die Messeigenschaften des Distrometers PWS100 weiteren Aufschluss gaben (Kapitel 3 Ergebnisse und Diskussion). Weiters konnten mit den Ergebnissen der Feldmessungen die Tropfengrößenverteilungen (Kapitel 3.3 Tropfengrößenverteilungen der Feldversuche) des Messzeitraums ermittelt und die Ausgabedaten zur weiteren Berechnung der kinetischen Energie von Regenereignissen genutzt werden (Kapitel 3.4 Erosivität von Niederschlägen). Die Ausgabefiles des Distrometers aus den Feldversuchen, sind auf einer CD abgespeichert und im Anhang unter A5 beigelegt.

# 3. Ergebnisse und Diskussion

## 3.1. Prüfung der Ausgabewerte

### 3.1.1. Interner Vergleich der Niederschlagsintensität, der akkumulierten Niederschlagshöhe und des Tropfendurchmessers

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ausgabeparameter des Distrometers PWS100 miteinander verglichen und auf ihre interne Übereinstimmung überprüft. Folgende vier Ausgabefunktionen können betrachtet und ihre Ausgabewerte miteinander verglichen werden (Kapitel 2.2.4 Datenausgabe):

1. Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe (Ausgabeposition 29-30)
2. Tropfengrößenverteilung (TGV) 0,0 mm – 30,0 mm (Ausgabeposition 31-330)
3. Mittlere Größe und Mittlere Geschwindigkeit (Ausgabeposition 331-332)
4. Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix (Ausgabeposition 344-1499)

Als Beispielrechnung wird das 60-Sekunden-Messintervall mit der größten gemessenen Regenintensität der Feldversuche, mit **161,9384 mm/h** herangezogen. Ausgehend von den Informationen der vier unterschiedlichen Ausgabefunktionen, werden zur Kontrolle der internen Übereinstimmung drei hydrometrische Größen berechnet und die Ergebnisse der Berechnungsvarianten miteinander verglichen.

Folgende hydrometrische Größen dienen als Vergleichsgrößen:

Niederschlagsintensität (mm/h)
Akkumulierte Niederschlagshöhe (mm)
Durchschnittlicher Tropfendurchmesser (mm)

Folgende Rechenparameter bleiben für alle Berechnungen innerhalb des 60-Sekunden-Messintervalls gleich:

| | |
|---|---|
| Messfläche des Distrometers: | 4000 mm² |
| Anzahl der detektierten Tropfen: | 2529 Stück |

#### 3.1.1.1. Berechnung mit Niederschlagsintensität und akkumulierter Niederschlagshöhe

Den Ausgangspunkt für die Berechnung bilden die Ausgabefunktionen akkumulierte Niederschlagshöhe N mit 2,69 mm und die Niederschlagsintensität I mit 161,94mm/h. Durch Multiplikation der Niederschlagshöhe N mit der Messfläche (4000 mm²) erhält man das detektierte Gesamtvolumen $V_{Ges}$ aller im Messbereich detektierten Tropfen. Durch Division des Gesamtvolumens $V_{Ges}$ durch die detektierte Gesamttropfenanzahl (2529 Tropfen) erhält man das durchschnittliche Volumen eines einzelnen Tropfens $V_{Tropfen}$. Durch Umformung der Volumenberechnung einer Kugel, kann auf den durchschnittlichen Tropfendurchmesser d geschlossen werden.

Gegeben durch Ausgabefunktion:

| | | |
|---|---|---|
| Niederschlagshöhe **N**: | **2,69** | **mm** |
| Niederschlagsintensität **I**: | **161,94** | **mm/h** |

Berechnete Werte:

$$V_{Ges} = 2{,}69\ \text{mm} \times 4000\ \text{mm}^2 = 10796\ \text{mm}^3$$

$$V_{Tropfen} = 10796\ \text{mm}^3 \div 2529\ \text{Tropfen} = 4{,}27\ \text{mm}^3$$

$$\mathbf{d} = \sqrt[3]{\frac{6 \times 4{,}27}{\pi}} = \mathbf{2{,}01\ mm}$$

#### 3.1.1.2. Berechnung mit Tropfengrößenverteilung (TGV) 0,0 mm – 30,0 mm

Wie bereits in Kapitel 2.2.4.6 Tropfengrößenverteilung (TGV) 0,0 mm bis 30,0 mm beschrieben wurde, wird durch die Ausgabefunktion Tropfengrößenverteilung (TGV) die Anzahl der Tropfen innerhalb der 300 möglichen Größenklassen ausgegeben. Da die Klassenbreiten auf 0,1 mm festgelegt sind, schwankt die tatsächliche Größe eines detektierten Tropfens innerhalb dieser Klassenbreite. Um Ungenauigkeiten zu vermindern wurde für die Berechnung der Tropfenvolumina die Klassenmitte der Tropfengrößenverteilung (TGV) herangezogen.

Unter Zuhilfenahme der Ausgabefunktion Tropfengrößenverteilung (TGV) als Ausgangsparameter für die Berechnung, musste ein anderer Berechnungsvorgang als unter 3.1.1.1 gewählt werden, da von dieser Ausgabefunktion andere Informationen geliefert werden. Zuerst wurde das Tropfenvolumen $V_{Tropfen}$ jeder Größenklasse berechnet und mit der Anzahl der Tropfen pro Klasse multipliziert (Tab. 7). Die daraus gebildete Summe aller Größenklassen ergab das Gesamtvolumen aller Tropfen $V_{Ges}$ des 60-Sekunden-Messintervalls. Aus dem Gesamtvolumen $V_{Ges}$ konnten wiederum der durchschnittliche Tropfendurchmesser d, die Niederschlagshöhe N und die Niederschlagsintensität I ermittelt werden.

Gegeben durch Ausgabefunktion:

Tab. 7: Ausgangswert für die Berechnung mittels Tropfengrößenverteilung (TGV)

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6 | 27 | 57 | 35 | 56 | 76 | 111 | 129 | 146 | → Tropfenanzahl |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | → Klassen |

0,0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 → Klassenobergrenzen

0,05 0,15 0,25 0,35 0,45 0,55 0,65 0,78 0,85 0,95 → Klassenmitte

Berechnete Werte:

$V_{Ges}$ = 9236,20 mm³

$$V_{Tropfen} = 9236{,}20\ \text{mm}^3 \div 2529\ \text{Tropfen} = 3{,}65\ \text{mm}^3$$

$$\mathbf{d} = \sqrt[3]{\frac{6 \times 3{,}65}{\pi}} = \mathbf{1{,}91\ mm}$$

$$\mathbf{N} = 9236{,}2\ \text{mm}^3 \div 4000\ \text{mm}^2 = \mathbf{2{,}31\ mm}$$

$$\mathbf{I} = 2{,}31\ \text{mm} \times 60\ \text{min} = \mathbf{138{,}54\ mm/h}$$

#### 3.1.1.3. Berechnung mit Mittlerer Größe und Mittlerer Geschwindigkeit

Eine weitere Ausgabefunktion des PWS100 ist die automatische Berechnung und Ausgabe des Mittleren Tropfendurchmessers und der Mittleren Fallgeschwindigkeit der Tropfen im 60-Sekunden-Messintervall. Bei dieser Berechnungsvariante wird vom mittleren Tropfendurchmesser aus auf die weiteren hydrometrischen Größen zurückgerechnet.

Gegeben durch Ausgabefunktion:

Mittlerer Durchmesser **d**: **1,58 mm**

Berechnete Werte:

$$V_{Tropfen} = \frac{1}{6} \times \pi \times 1{,}58^3 = 2{,}06\ \text{mm}^3$$

$$V_{Gesamt} = 2{,}06 \times 2529 = 5209{,}74\ \text{mm}^3$$

$$\mathbf{N} = 5209{,}74\ \text{mm}^3 \div 4000\ \text{mm}^3 = \mathbf{1{,}30\ mm}$$

$$\mathbf{I} = 1{,}30\ \text{mm} \times 60\ \text{min} = \mathbf{78{,}00\ mm/h}$$

#### 3.1.1.4. Berechnung mit Campbell Scientific 34 x 34-Datenmatrix

Die Berechnung anhand der Ausgabewerte der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix ist der Berechnung mittels Tropfengrößenverteilung (TGV) sehr ähnlich. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix unterschiedliche Klassenbreiten aufweist und durch Verwendung der Klassenmitten für die Berechnung die Ungenauigkeiten zur tatsächlichen Tropfengröße ansteigen. Aufgrund der großen Klassenbreiten wurden die Berechnungen mit Klassenuntergrenze, Klassenmitte und Klassenobergrenze durchgeführt.

Da der Berechnungsvorgang analog zur TGV erfolgte werden nur die Ergebnisse dargestellt:

Klassenuntergrenze:

| | | |
|---|---|---|
| Mittlerer Durchmesser **d**: | **1,78** | **mm** |
| Niederschlagshöhe **N**: | **1,86** | **mm** |
| Niederschlagsintensität **I**: | **111,86** | **mm/h** |

Klassenmitte:

| | | |
|---|---|---|
| Mittlerer Durchmesser **d**: | **1,92** | **mm** |
| Niederschlagshöhe **N**: | **2,33** | **mm** |
| Niederschlagsintensität **I**: | **140,23** | **mm/h** |

Klassenobergrenze:

| | | |
|---|---|---|
| Mittlerer Durchmesser **d**: | **2,06** | **mm** |
| Niederschlagshöhe **N**: | **2,89** | **mm** |
| Niederschlagsintensität **I**: | **173,78** | **mm/h** |

#### 3.1.1.5. Gegenüberstellung der Ergebnisse

Beim Vergleich der Ergebnisse in Tab. 8 ist ersichtlich, dass große Unterschiede zwischen den berechneten hydrometrischen Größen auftreten. Während die Ausgabefunktionen Tropfengrößenverteilung (TGV) und Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix auf Basis ihrer Klassenmitten sehr ähnliche Ergebnisse aufweisen, ergibt die Berechnung über die Mittlere Größe völlig andere Werte. Der Grund hierfür ist, dass die Berechnung des Tropfenvolumens über die Kugelform erfolgte, in der der Tropfendurchmesser mit 3. Potenz in die Rechnung eingeht. Durch Verwendung des durchschnittlichen Tropfendurchmessers gehen große Tropfendurchmesser verloren, wodurch ein geringeres Gesamtvolumen zustande kommt als bei der Verwendung der tatsächlichen Tropfengrößen. Die Berechnung mit dem Ausgangsparameter Mittlere Größe lieferte daher keine brauchbaren Vergleichswerte. Die Mittlere Größe sollte deshalb allerdings nicht als fehlerhalt erachtet werden. Er deckt sich sehr exakt mit den mittleren Durchmessern, die manuell aus der Campbell Scientific 34x34-

Datenmatrix oder der Tropfengrößenverteilung (TGV) gebildet wurden. Für interne Vergleiche der Ausgabeparameter, unter Zuhilfenahme der Volumenberechnung der Regentropfen, ist er allerdings ungeeignet.

Tab. 8: Gegenüberstellung der gemessenen bzw. berechneten hydrometrischen Vergleichsgrößen

| | 1. | 2. | 3. | 4. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ausgabe-funktion | N-Intensität Akk. N | TGV Mitte | Mittlere Größe | Matrix Unten | Matrix Mitte | Matrix Oben |
| I (mm/h) | 161,94 | 138,54 | 78,00 | 111,86 | 140,23 | 173,78 |
| N (mm) | 2,69 | 2,31 | 1,30 | 1,86 | 2,33 | 2,89 |
| d (mm) | 2,02 | 1,91 | 1,58 | 1,78 | 1,92 | 2,06 |

Die Ausgabefunktionen Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe zeigen bei sämtlichen Berechnungsgrößen in Tab. 8, mit Ausnahme der von vorn herein überschätzten Klassenobergrenze der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix, die höchsten Ergebnisse. In Abb. 31 ist der Verlauf der Niederschlagsintensitäten der unterschiedlichen Ausgabefunktionen für verschiedene 60-Sekunden-Messintervalle dargestellt. Die Rote Linie stellt die gemessene Ausgabefunktion Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe dar und dient als Bezugswert für die Berechnungen der anderen Ausgabefunktionen. Der violette Verlauf stellt die Klassenobergrenzen der Tropfengrößen der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix dar und verläuft stets oberhalb aller anderen Kurven, da er die tatsächliche Tropfengröße und damit die Niederschlagsintensität überschätzt. Der dunkelblaue Verlauf zeigt die Klassenuntergrenzen der Tropfengrößen der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix und unterschätzt die tatsächliche Niederschlagsintensität. Die Klassenmitten der Ausgabefunktionen Tropfengrößenverteilung (TGV) und Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix liegen allerdings permanent unterhalb der Ausgabefunktionen Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe.

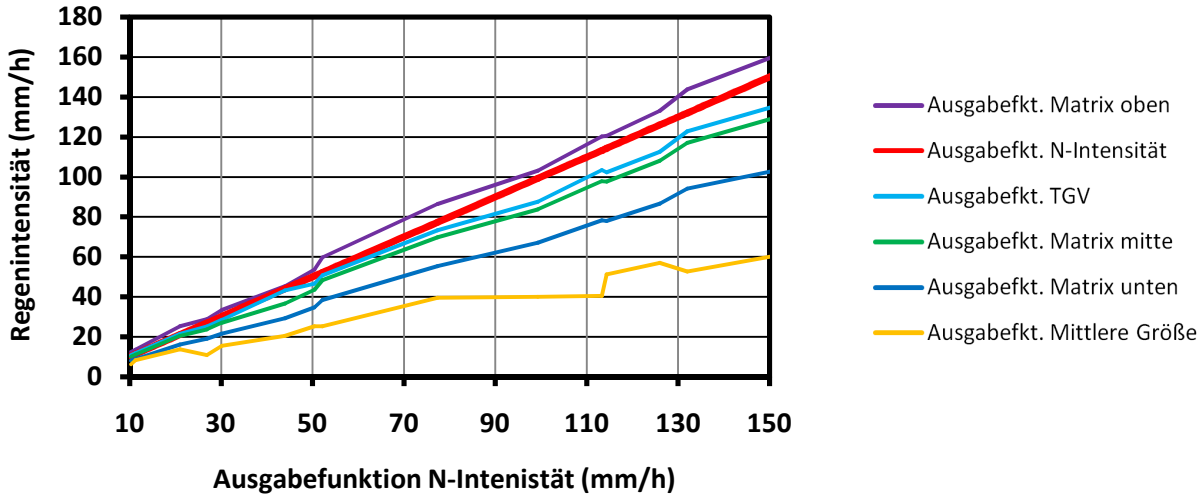



Abb. 31: Vergleich der berechneten Regenintensitäten der verschiedenen Ausgabefunktionen mit dem Bezugswert der Ausgabefunktion Niederschlagsintensität

Wie in Kapitel 2.2.4.5 Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe beschrieben wurde, werden nur in dieser Ausgabefunktion Partikel, die als unbekannt bzw. „Unknown“ detektiert wurden, korrigierend hinzugefügt. In allen weiteren Ausgabeparametern wie Tropfengrößenverteilung (TGV), Mittlerere Größe und Mittlere Geschwindigkeit und Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix wird diese Korrektur nicht vorgenommen. In dem hier zur Beispielrechnung verwendeten 60-Sekunden-Messintervall wurden 391 Unknown-Partikel aufgezeichnet. Durch diese 391 korrigierend hinzugefügten Partikel ist es zu erklären, dass die Ausgabefunktionen Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe größere Werte ausgibt, als die Klassenmitten der Ausgabefunktionen Tropfengrößenverteilung (TGV) und Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix.
Es kann nicht ermittelt werden, welcher Größenklasse die 391 korrigierend hinzugefügten Unknown-Partikel vom Distrometer intern zuzuordnen sind. Als beste Näherung an die tatsächliche Zuordnung wurden die 391 Korrekturpartikel prozentuell nach Vorbild der 2529 korrekt detektierten Regen- und Nieselregen-Partikel laut Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix aufgeteilt. Die Berechnung der Niederschlagshöhe ergibt hierfür 0,35 mm. Subtrahiert man diese 0,35 mm von der akkumulierten Niederschlagshöhe, erhält man bessere Übereinstimmungen der Berechnungswerte (Tab. 9).

Tab. 9: Vergleichswerte ohne interne Korrektur des Distrometers für Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe

| | N-Intensität Akk. N | TGV Mitte | Matrix Mitte | Mittlere Größe |
|---|---|---|---|---|
| I (mm/h) | **141,1** | 138,5 | 140,2 | 78,0 |
| N (mm) | **2,35** | 2,31 | 2,33 | 1,30 |

Nach Abzug der korrigierend hinzugefügten Unknown-Partikel, nähern sich die Ergebnisse der Ausgabefunktionen Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe den Werten aus Tropfengrößenverteilung (TGV) und Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix sehr gut an. Es kann somit festgehalten werden, dass die höheren Werte der Ausgabefunktionen Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe im Vergleich zur Tropfengrößenverteilung (TGV) und Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix durch die interne Korrektur der Unknown-Partikel zustande kommen. Da laut Campbell Scientific, Inc. (2006) die korrigierten Werte eher den tatsächlichen Niederschlagsverhältnissen entsprechen, müssten die Tropfenanzahlen der Tropfengrößenverteilung (TGV) und der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix entsprechend der Unknown-Partikel erhöht werden, um die Niederschlagsverhältnisse korrekt wiederzugeben.

Die Tropfengrößenverteilung (TGV) bietet hinsichtlich der schmalen Klassengrenzen von 0,1 mm das beste Ergebnis um die äquivalenten Topfendurchmesser auszugeben, obwohl in dieser Statistik zufolge der Unknown-Partikel einige Tropfen verloren gehen. Die Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix ist entsprechend der immer größer werdenden Klassenbreiten

etwas schlechter geeignet um die Tropfengrößen exakt wiederzugeben, allerdings aufgrund der Geschwindigkeitsmessung der Partikel unerlässlich für die Ermittlung der kinetischen Energie der Niederschläge. Die Ausgabefunktionen Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe geben durch die interne Korrektur die tatsächlichsten Werte für die Niederschlagsintensität und die Niederschlagsmenge aus. Es zeigt sich somit, dass je nach Verwendungszweck und benötigter Genauigkeit eine andere Ausgabefunktion herangezogen werden sollte um als Datengrundlage zu dienen.

### 3.1.2. Interner Vergleich der Partikelanzahl

Ein weiterer zu überprüfender Faktor ist die Menge an detektierten Regentropfen. Anhand der fünf Regenereignisse der Feldmessungen wurde überprüft, ob Unterschiede in den Tropfensummen zwischen den Ausgabefunktionen auftreten. Folgende drei Ausgabefunktionen können dieser Prüfung unterzogen werden:

1. Tropfengrößenverteilung (TGV) 0,0 mm – 30,0 mm (Ausgabeposition 31-330)
2. Campbell Scientific 34 x 34-Datenmatrix (Ausgabeposition 344-1499)
3. Art der Niederschlagsklassifizierung

Tab. 10 zeigt die absoluten Tropfenanzahlen der einzelnen Regenereignisse für jede Ausgabefunktion sowie die prozentuelle Übereinstimmung der Tropfenanzahlen zwischen den Ausgabefunktionen. Die Übereinstimmung der Tropfenanzahlen ergab für jedes Regenereignis mindestens 99,78 %. Die Übereinstimmung aller detektierten Regentropfen der Feldversuche liegt sogar bei 99,95 %. Die Unterschiede der Tropfenanzahlen der Ausgabefunktionen sind vernachlässigbar klein. Durch die geringen Unterschiede der Tropfenanzahlen kann allerdings darauf geschlossen werden, dass die Tropfenanzahl für jede Ausgabefunktion separat berechnet wird.

Tab. 10: Übereinstimmung der ausgegebenen Tropfenanzahl der unterschiedlichen Ausgabefunktionen

| Regenereignis | TGV (Anz.) | Matrix (Anz.) | Niederschlagsart (Anz.) | Übereinstimmung (%) |
|---|---|---|---|---|
| 12.07.2016 | 27683 | 27667 | 27654 | 0,9993 |
| 21.07.2016 | 4902 | 4894 | 4886 | 0,9978 |
| 24.07. 2016 | 48615 | 48593 | 48579 | 0,9995 |
| 27.07. 2016 | 42321 | 42269 | 42308 | 0,9992 |
| 31.07. 2016 | 38771 | 38752 | 38769 | 0,9997 |
| Total | 162292 | 162175 | 162196 | 0,9995 |

### 3.1.3. Prüfung Art der Niederschlagsklassifizierung

Die Art der Niederschlagsklassifizierung stellt eine weitere zu überprüfende Ausgabefunktion dar. In den Abb. 32 bis Abb. 36 sind die Auswertungen der einzelnen Niederschlagskategorien dargestellt. Die Diagramme zeigen die Anzahl der detektierten Partikel pro Niederschlagskategorie in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität. Jeder Datenpunkt bezeichnet ein 60-Sekunden-Messintervall. In den Abbildungen sind alle 60-Sekunden-Messintervalle aus Labor- und Feldmessungen dargestellt, die für diese Arbeit zur Verfügung standen.

Mit steigender Niederschlagsintensität steigt die Anzahl der detektierten Partikel in den einzelnen Niederschlagskategorien an. Während dies bei Regen und Nieselregen gewünscht und gerechtfertigt ist, weist der Anstieg der Unknown-, Error- und Eispellets-Kategorie mit zunehmender Niederschlagsintensität auf Messfehler und Ungenauigkeiten hin. Die Kategorien Nieselregen und Regen zeigen sehr ähnliche Datenverläufe. In beiden Diagrammen verläuft die Datenreihe des Regensimulators erheblich steiler als die Datenreihe der Feldmessungen (Abb. 32 und Abb. 33). Es wird somit ersichtlich, dass bei gleicher Niederschlagsintensität, in den Labormessungen mithilfe des Regensimulators, deutlich mehr Tropfen detektiert wurden als in natürlichen Regenereignissen. Weiters endet die Datenreihe der Laborversuche im Vergleich zu den Feldversuchen erheblich früher. In den Laborversuchen konnten nicht derart hohe Niederschlagsintensitäten wie in den Feldversuchen aufgezeichnet werden.

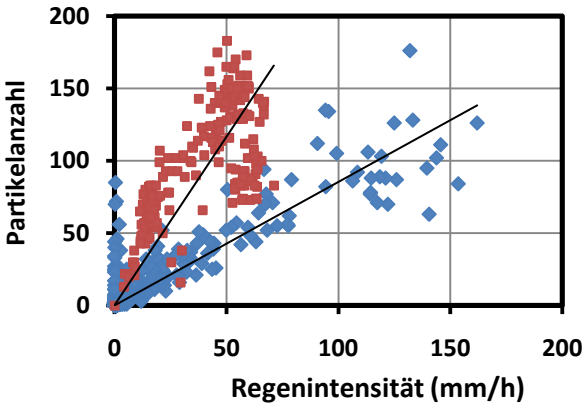



Abb. 32: Aufgezeichnete Nieselregenpartikel

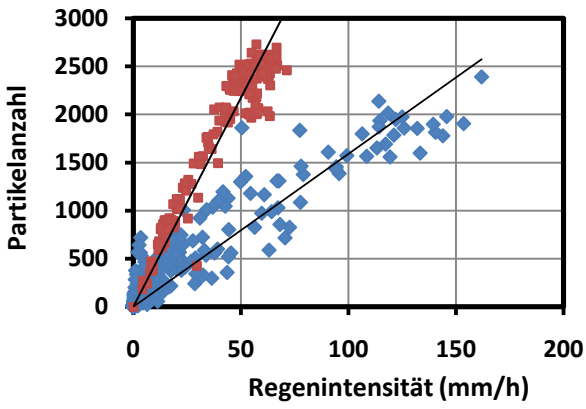
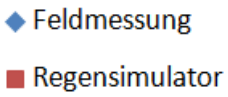



Abb. 33: Aufgezeichnete Regenpartikel



Die Aufzeichnung von Eispellets in den Laborversuchen mit bis zu 13 Stück weist auf Messfehler hin. In den Feldversuchen wurden ebenfalls Eispellets bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten aufgezeichnet, die angesichts der Labormessungen ebenfalls als Messfehler eingestuft werden können. Man kann somit nicht davon ausgehen, dass es sich nicht um tatsächlichen Niederschlag von Eispellets handelte. Die Menge der Eispellets befindet sich allerdings mit maximal 19 Stück pro 60-Sekunden-Messintervall in vernachlässigbarem Ausmaß (Abb. 36).

Die Abb. 34 und Abb. 35 zeigen die Anstiege der Error- und Unknown-Partikel mit steigender Niederschlagsintensität. Der Grund für den Anstieg von fehlerhaft gemessenen Partikel ist, wie in Kapitel 2.2.4.8.1 Unknown-Partikel und Kapitel 2.2.4.8.2 Error-Partikel beschrieben wurde, auf die hohe Anzahl an detektierten und sich gegenseitig beeinträchtigenden Tropfen zurückzuführen. Hohe Niederschlagsintensität führt zwangsläufig zur Häufung von Error- und Unknown-Partikel, wodurch Ungenauigkeiten zwischen den Messergebnissen und den tatsächlich vorherrschenden Regenbedingungen entstehen.

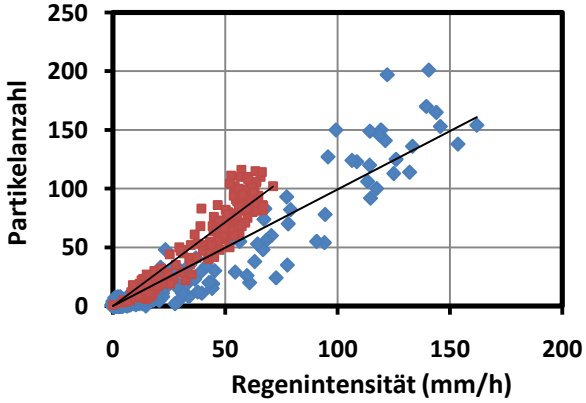



Abb. 34: Aufgezeichnete Error-Partikel

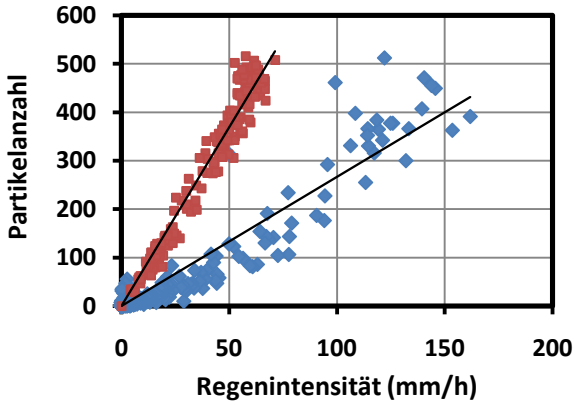
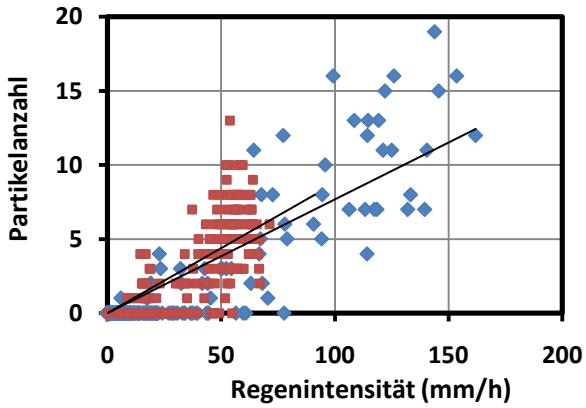



Abb. 35: Aufgezeichnete Unknown-Partikel



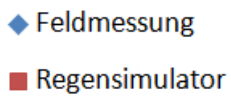




Abb. 36: Aufgezeichnete Eispartikel

Abb. 37 zeigt die Gesamtverteilung der Ausgabefunktion Art der Niederschlagsklassifizierung für alle 60-Sekunden-Messintervalle der Feldversuche. Den größten Anteil nehmen die detektierten Regentropfen ein, gefolgt von der Kategorie Unknown-Partikel. Danach folgen mit etwa gleich großen Anteilen die Kategorien Nieselregen und Error-Partikel. Weitere mögliche Niederschlagskategorien wie gefrierender Nieselregen, gefrierender Regen, Schneeflocken, Schneekörner und Graupel konnten nicht in den Graphiken abgebildet werden, da in diesen Kategorien keine Partikel detektiert wurden. Die Kategorie Hagelniederschlag wurde zwar mit einem Anteil von 0,020 % an den Gesamtpartikeln aufgezeichnet, allerdings wurde hinsichtlich der geringen Menge auf eine Darstellung verzichtet. Im folgenden Kapitel 3.1.4 Niederschlagsklassifizierung Regenereignisse, wird dargelegt wie die prozentuelle Aufteilung der Niederschlagskategorien innerhalb einzelner Regenereignisse ausfällt.

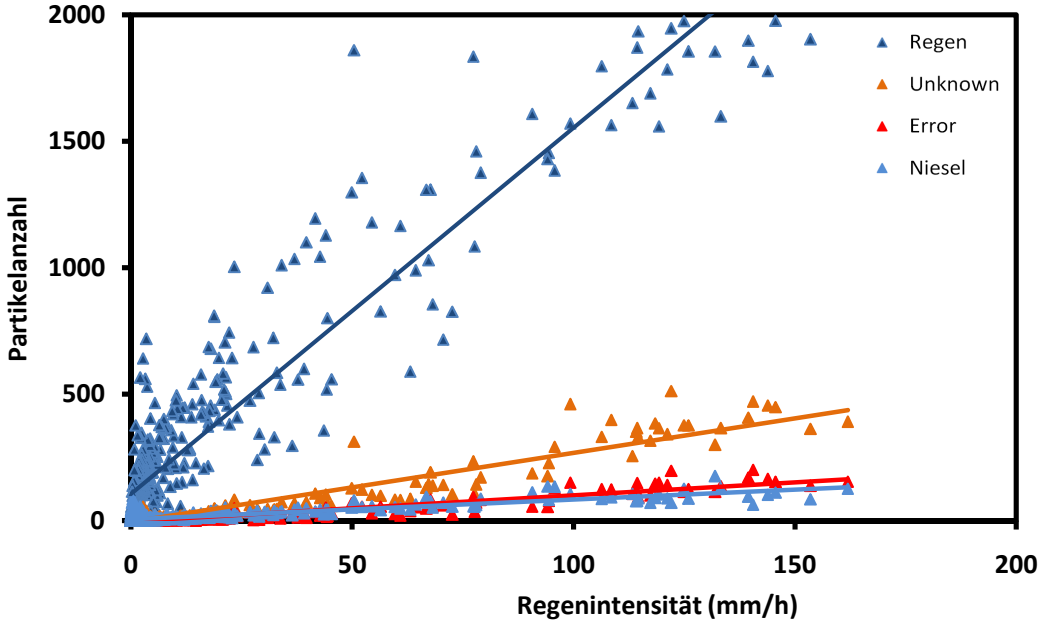



Abb. 37: . Gesamtverteilung der Art der Niederschlagsklassifizierung

### 3.1.4. Niederschlagsklassifizierung Regenereignisse

Mit Tab. 11 soll veranschaulicht werden, aus welchen Niederschlagskategorien sich einzelne Regenereignisse anteilsmäßig zusammensetzen. Ausgewertet wurden alle fünf zur Verfügung stehenden Regenereignisse von Juli 2016, in denen signifikante Werte der Niederschlagskategorien aufgezeichnet wurden. Dargestellt werden die Prozentanteile der einzelnen Niederschlagskategorien an den gesamt detektierten Partikeln pro Regenereignis.

Der Anteil der Nieseltropfen an der Gesamttropfenanzahl kann bei ca. 4,0 % bis 5,0 % pro Regenereignis festgemacht werden. Der Anteil der Regentropfen in einem Regenereignis befindet sich bei ca. 84,0 %. Der Anteil der Eispellets ist sehr gering mit einem Median von 0,2 % und den Quartilen bei 0,1 bzw. 0,3 %. Der Anteil der Error-Partikel befindet sich bei ca. 3,0 %, wobei ein Ausreißer mit 5,5 % auftrat. Der Anteil der Unknown-Partikel konnte bei ca. 8,5 % der Gesamtpartikel pro Regenereignis ermittelt werden. Ebenso wie die Auswertung der Error-Partikel wies die Auswertung der Unknown-Partikel einen größeren Ausreißer mit 14,1 % auf.

Tab. 11: Prozentanteile der Niederschlagsarten an der Gesamttropfenanzahl für einzelne Niederschlagsereignisse

| Niederschlagsart | Median $Q_{0,50}$ (%) | Unteres Quartil $Q_{0,25}$ (%) | Oberes Quartil $Q_{0,75}$ (%) | Ausreißer (%) |
|---|---|---|---|---|
| Nieselregen | 4,2 | 4,1 | 5,5 | - |
| Regen | 84,0 | 82,0 | 87,0 | - |
| Eispellets | 0,2 | 0,1 | 0,3 | - |
| Error | 3,3 | 2,2 | 3,3 | 5,5 |
| Unknown | 8,5 | 5,9 | 8,4 | 14,1 |

Um diese Auswertungen zu untermauern und aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten, müsste der Datenumfang erheblich vergrößert werden bzw. eine größere Anzahl an auszuwertenden Regenereignissen zur Verfügung stehen. Die Boxplots zur Auswertung der Tab. 11 sind dem Anhang unter A4 beigefügt.

## 3.2. Interpretation der Labormessungen

Beim Vergleich der Tropfengrößenverteilungen (TGV) aus Regensimulator-Messungen und Feldmessungen wird deutlich, was der Grund für die vermuteten Messfehler des Distrometers in den Laborversuchen sein könnte (2.4 Distrometermessungen).

Die Tropfengrößenverteilung (TGV) des Regensimulators weist eine ausgeprägte Spitze mit beinahe 400 Tropfen innerhalb einer Größenklasse auf. Das bedeutet, es befindet sich eine sehr große Anzahl von Tropfen in einem sehr engen Größenbereich. Die Tropfengrößenverteilung (TGV) der Feldmessung ist hingegen flacher und gleichmäßiger ausgeprägt. Der Regensimulator produziert im Vergleich zu natürlichem Regen mehr als doppelt so viele Tropfen innerhalb eines 60-Sekunden-Messintervalls. Das Tropfenspektrum des Regensimulators ist natürlichem Regen zwar ähnlich, allerdings unterscheiden sich die Tropfenanzahlen pro Klasse beträchtlich voneinander (Abb. 38 und Abb. 39).

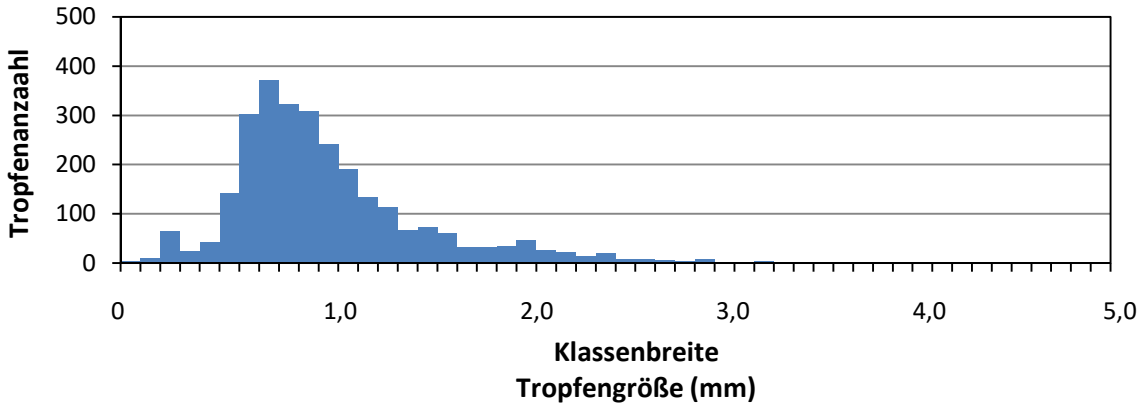



Abb. 38: Tropfengrößenverteilung (TGV) eines 60-Sekunden-Messintervalls des Regensimulators mit 60 mm/h Regenintensität

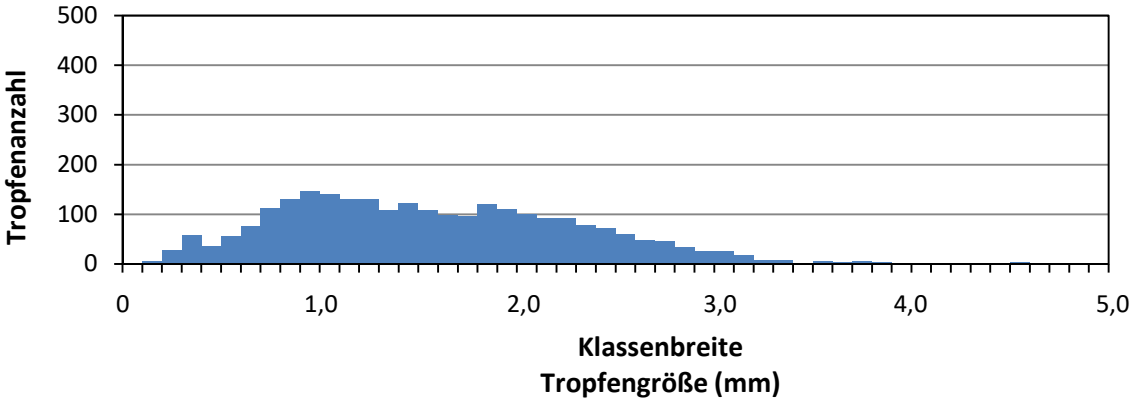



Abb. 39: Tropfengrößenverteilung (TGV) eines 60-Sekunden-Messintervalls der Feldmessung mit 162 mm/h Regenintensität

Bei Betrachtung der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für 60-Sekunden-Messintervalle mit jeweils 16 mm/h Niederschlagsintensität und 20 min Regendauer für Regensimulator und Feldmessung ist ablesbar, dass sich große Unterschiede zeigen. Der Großteil der Tropfen der Regensimulator-Messung liegt in lediglich einem violett eingefärbten Matrixfeld mit einer Größe von 1,0 bis 1,2 mm (Abb. 40). Mit 2109 Tropfen pro Klasse, ist die Anzahl der Tropfen um ein vielfaches höher als bei natürlichem Regen in Feldmessungen mit 550 Tropfen pro Matrixfeld. Aus Abb. 41 geht hervor, dass die maximalen Tropfenanzahlen bei der Feldmessung nicht wie in den Labormessungen nur in einem Matrixfeld konzentriert sind, sondern mehrere Matrixfelder violett eingefärbt sind.

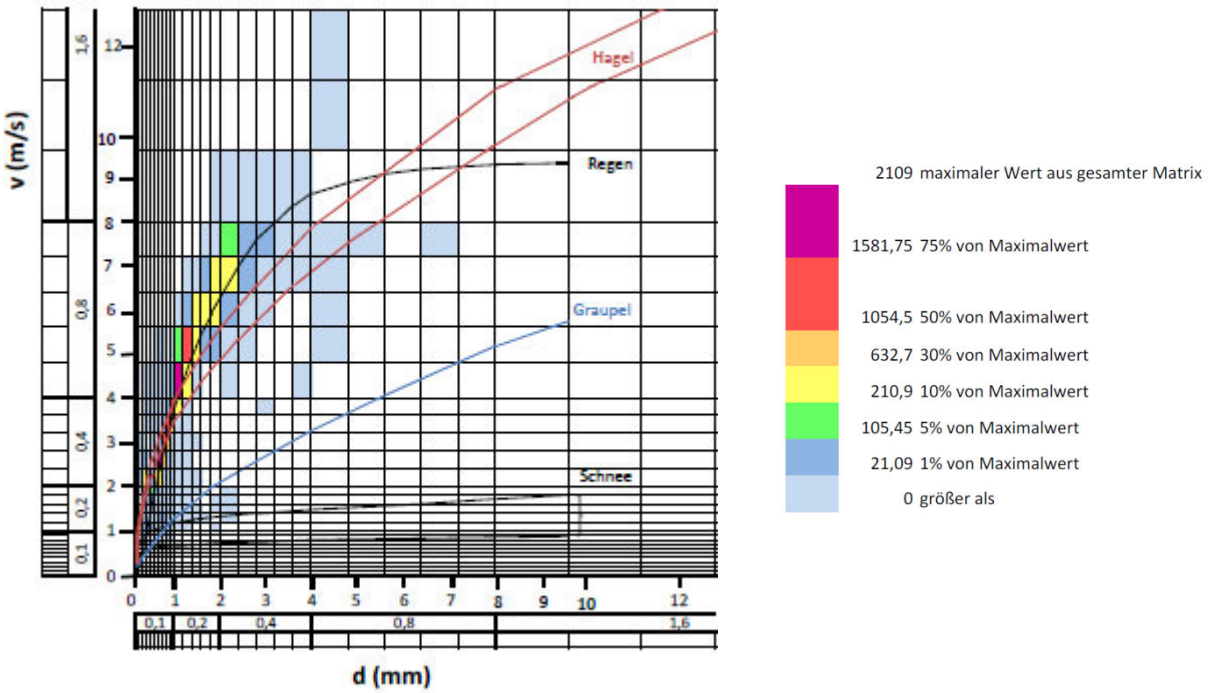



Abb. 40: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für eine Regensimulator-Messung mit 16,1 mm/h Regenintensität, 20 min Regendauer, 2071 Unknown-Partikel

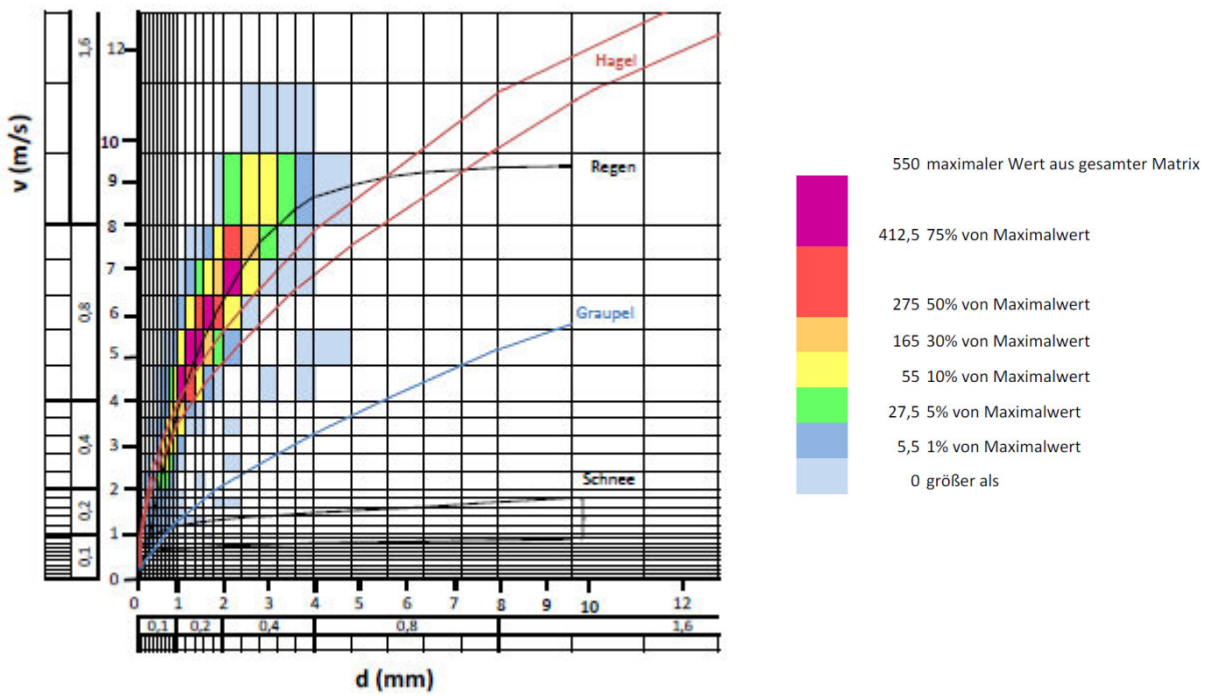



Abb. 41: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für eine Feldmessung mit 16,1 mm/h Regenintensität, 20 min Regendauer, 418 Unknown-Partikel

Die große Anzahl an Gesamttropfen und die Tropfenkonzentration in einer Größenklasse sind der zu vermutende Grund für die aufgetretenen Messprobleme der Laborversuche. Wie in Kapitel 2.2.4.8.1 Unknown-Partikel und 2.2.4.8.2 Error-Partikel beschrieben wurde, wird die korrekte Messung der Lichtsignale bei zu vielen Tropfen im selben Lichtpfad erheblich gestört. Die steigende Zahl der Unknown-Partikel verfälscht in weiterer Folge das Messergebnis. In den Laborversuchen traten bis zu Niederschlagsintensitäten von 60 mm/h moderate Tropfenanzahlen auf, sodass die Distrometer-Messungen korrekt durchgeführt werden konnten. Bei hohen Niederschlagsintensitäten jenseits der 60 mm/h, konnte das PWS100 die enorme Anzahl an Partikeln nicht mehr detektieren. In Feldversuchen mit natürlichem Regen kamen Tropfenverteilungen, wie sie vom Regensimulator erzeugt werden, selbst bei sehr hohen Regenintensitäten nicht vor. Die Aufzeichnungsfehler aus den Labormessungen können für die Feldmessungen zumindest bis zu Niederschlagsintensitäten von 162 mm/h ausgeschlossen werden. Für höhere Niederschlagsintensitäten und dementsprechend steigenden Partikelanzahlen, liegen für die Feldmessungen keine Messergebnisse vor.

# 3.3. Tropfengrößenverteilungen der Feldversuche

## 3.3.1. Tropfengrößenverteilung allgemein

Die ersten Messmethoden zur Ermittlung der Tropfengrößenverteilung wurden auf Filterpapier durchgeführt, neuere Messmethoden nutzten die Radartechnik. Die Analyse der Ausgabewerte erfolgte in Histogrammen über die Anzahl der Tropfen N(D) pro Kubikmeter und pro Durchmesser-Intervall ($m^{-3}$ $cm^{-1}$) (Waldvogel, 1974).

Im Allgemeinen kann ausgesagt werden, dass Tropfengrößenverteilungen eingipflig sind (Abb. 42 und Abb. 43). Doch in Form und Ausprägung der Tropfengrößenverteilungen treten bei sämtlichen Messmethoden wie Kameras, Distrometer, usw. sehr große Unterschiede auf. Sogar innerhalb des Zeitverlaufes eines einzelnen Regenereignisses können sich die Parameter sehr schnell ändern (Van Dijk, Bruijnzeel und Rosewell, 2002).

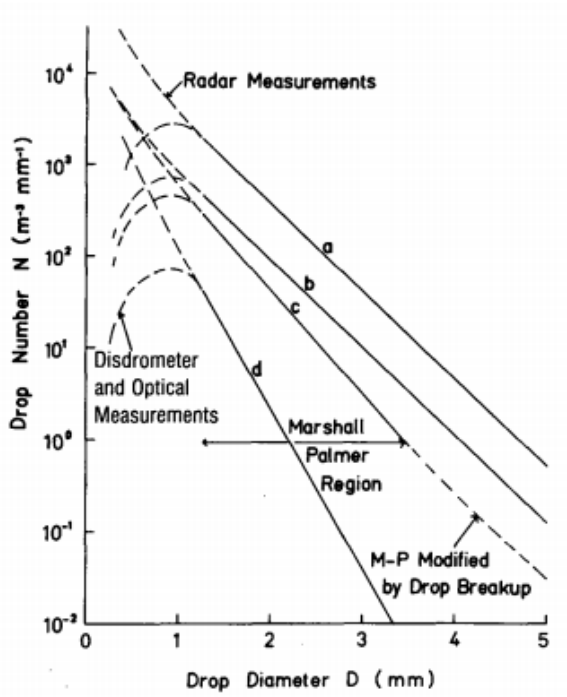



Abb. 42: Tropfengrößenverteilungen aus Hodson (1986)

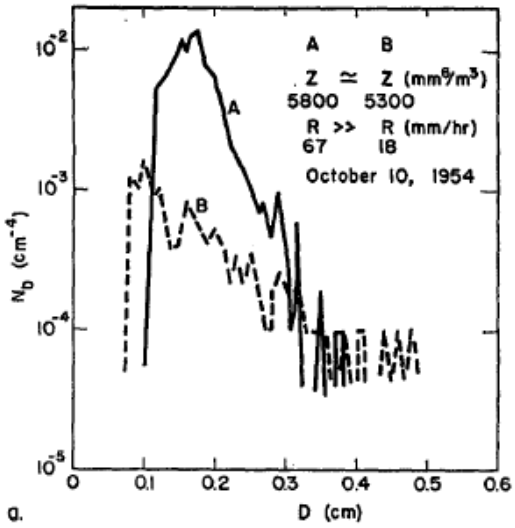



Abb. 43: Tropfengrößenverteilung aus Fujiwara (1965)

Die ersten mathematischen Näherungsfunktionen für Tropfengrößenverteilungen wurden in Form der Exponentialfunktion von Marshall und Palmer (1948) an die ermittelten Verteilungen angepasst:

$$N(D) = N_0 \,.\, e^{(-\Lambda D)}$$

$N_0$ ($cm^{-4}$) stellt eine Konstante dar, D (mm) ist der Tropfendurchmesser und Λ ($cm^{-1}$) beschreibt einen Parameter, der von der Regenintensität R (mm/h) abhängt. Ulbrich und Atlas (1984) in Ulbrich (1983) entwickelten die Exponentialverteilung weiter zu einer Gammaverteilung mit der Form:

$$N(D) = N_0 D^{\mu} \, . \, e^{(-\Lambda D)}$$

Der dimensionslose Faktor μ bewegt sich abhängig vom Verhältnis $D_{max}$ / $D_0$ im Bereich von -2 bis 3.

Waldvogel (1974) konnte in seinen Versuchen mittels elektromechanischen Spektrometers feststellen, dass $N_0$ keine konstante ist, sondern sich mit zeitlichem Verlauf des Regenereignisses in einem Bereich von $10^3$ bis $10^5$ ändert.

### 3.3.2. Tropfengrößenverteilung Monatsverteilung

In Abb. 44 ist die Tropfengrößenverteilung aller Werte dargestellt, die mit dem Distrometer PWS100 im Monat Juli in Feldversuchen aufgezeichnet wurden. An die gemessenen Werte wurde die Gamma-Verteilung von Ulbrich und Atlas (1984) angepasst. Dabei ergaben sich folgende Werte für die Parameter der Funktion:

$N_0$= 1,3 x $10^5$ $m^{-3}mm^{-1}$ … für weitgestreute Tropfendurchmesser

Λ= 2,36 $mm^{-1}$ … in Abhängigkeit von R

R= 13,8 mm/h … als durchschnittliche Regenintensität aller 60-Sekunden-Messintervalle

μ= 2,1… als Schiefe der Verteilung

Um die Ergebnisse mit den Werten von Waldvogel (1974) oder Ulbrich (1983) vergleichen zu können, mussten einige Anpassungen vorgenommen werden. Der ursprüngliche Messbereich von einem Kubikmeter musste auf die Messfläche des Distrometers mit 40 $cm^2$ angepasst werden. Desweiteren treten große Veränderungen der Berechnungsparameter innerhalb des langen Messzeitraums von einem Monat, mit Niederschlagsintensitäten von 0,1 mm/h bis 161,9 mm/h auf. Die Berechnungsparameter für jedes 60-Sekunden-Messintervall der Messung schwanken innerhalb dieses Bereiches sehr stark. Trotz dieser Probleme konnte die Gamma-Verteilung den Messdaten sehr gut angepasst werden (Abb. 44).

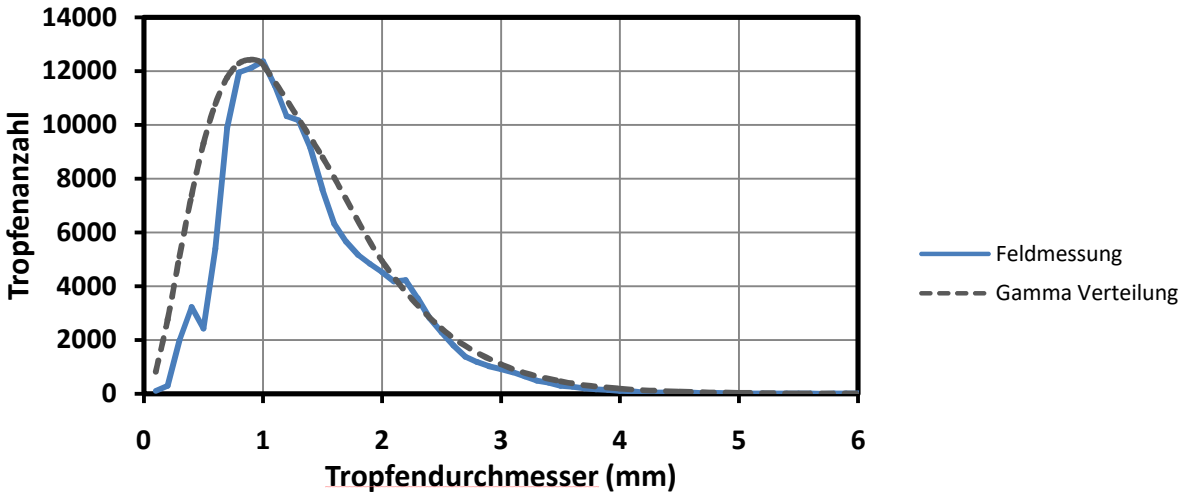



Abb. 44: Tropfengrößenverteilung für den gesamten Messzeitraum der Feldmessungen

### 3.3.3. Tropfengrößenverteilung Regenereignisse

Betrachtet man die Tropfengrößenverteilungen für die einzelnen Regenereignisse (Abb. 45), lässt sich die Gamma-Verteilung ebenfalls gut an die gemessenen Werte anpassen. Einige Regenereignisse weisen sehr ähnliche Verläufe zueinander auf, wie z.B. die Regenereignisse vom 12.07.2016 und 27.07.2016. Das Regenereignis vom 27.07.2016 hatte mit einer durchschnittlichen Regenintensität von 49 mm/h mit Abstand die höchste Regenintensität.

Bei Betrachtung aller detektierten Regenereignisse zeigt sich in unterschiedlich starker Ausprägung immer derselbe Kurvenverlauf. Bei sämtlichen Regenereignissen wird der Scheitel bei einer Tropfengröße von ca. 1,0 mm erreicht. Danach fällt die Kurve mit etwa derselben Steigung ab, wie sie angestiegen ist. Am abfallenden Schenkel beult die Kurve bei ca. 2,2 mm noch einmal aus und schmiegt sich danach an die Gammaverteilung an bis die x-Achse geschnitten wird.

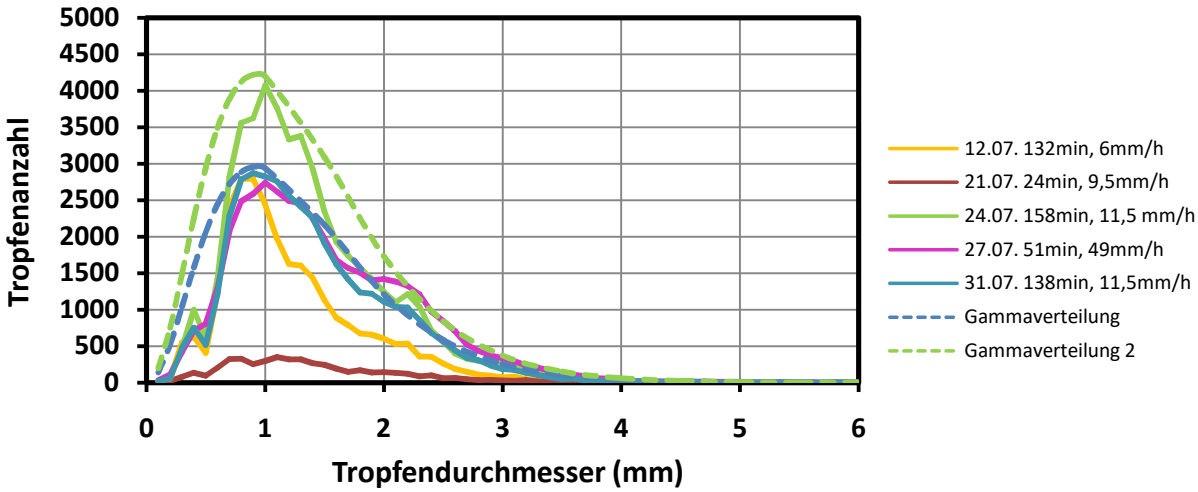



Abb. 45: Tropfengrößenverteilungen der einzelnen Regenereignisse

Beim Vergleich von Abb. 45 mit Abb. 46 zeigt sich, dass in Regenereignisse mit ähnlichen Tropfengrößenverteilungen auch ähnliche Verläufe der Regenintensität entlang der Zeit auftreten. Die Regenereignisse vom 27.07.2016 und 31.07.2016 weisen beinahe exakt gleiche Tropfengrößenverteilungen auf. Der zeitliche Verlauf veranschaulicht für beide Regenereignisse die sehr steil ansteigende Regenintensität, das Erreichen eines Maximalwerts und den anschließenden steilen Abfall der Kurve. Das Regenereignis von 24.07.2016 weist sowohl einen anderen Verlauf der zeitlichen Regenintensität als auch der Tropfengrößenverteilung auf.

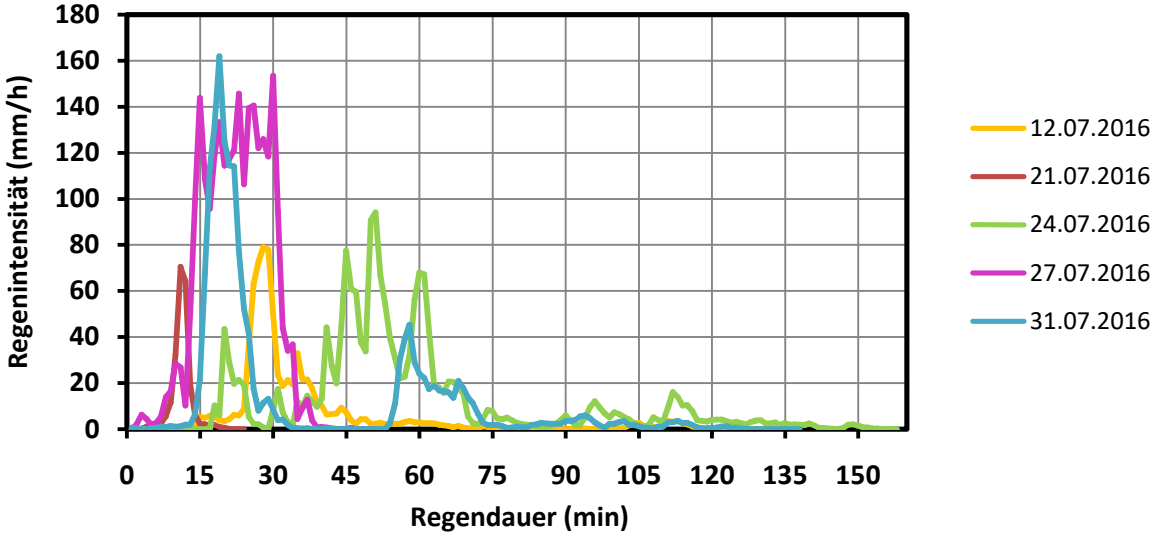



Abb. 46: Verlauf der Regenintensität über die Dauer der Regenereignisse

### 3.3.4. Tropfengrößenverteilung Messintervalle

Der Vergleich der einzelnen 60-Sekunden-Messintervalle der Feldmessungen zeigt, wie groß die Unterschiede zwischen den Verläufen innerhalb desselben Regenereignisses ausfallen können. Die Aussage von Van Dijk et al. (2002), dass sich die Zustände und Tropfengrößenverteilungen innerhalb der Regenereignisse sehr schnell ändern, kann mit den folgenden Messversuchen bestätigt werden. In Abb. 47 sind drei 60-Sekunden-Messintervalle mit gleicher Regenintensität dargestellt, die innerhalb eines Zeitraums von 5 min aufgezeichnet wurden. Die Kurven in blau und grün zeigen einen beinahe identischen Verlauf, der sich angesichts des flachen Kurvenverlaufs sehr stark von der Monatsverteilung unterscheidet. Die rote Kurve andererseits, wurde nur drei Minuten zuvor detektiert und zeigt eine ausgeprägte Spitze bei 0,9 mm.

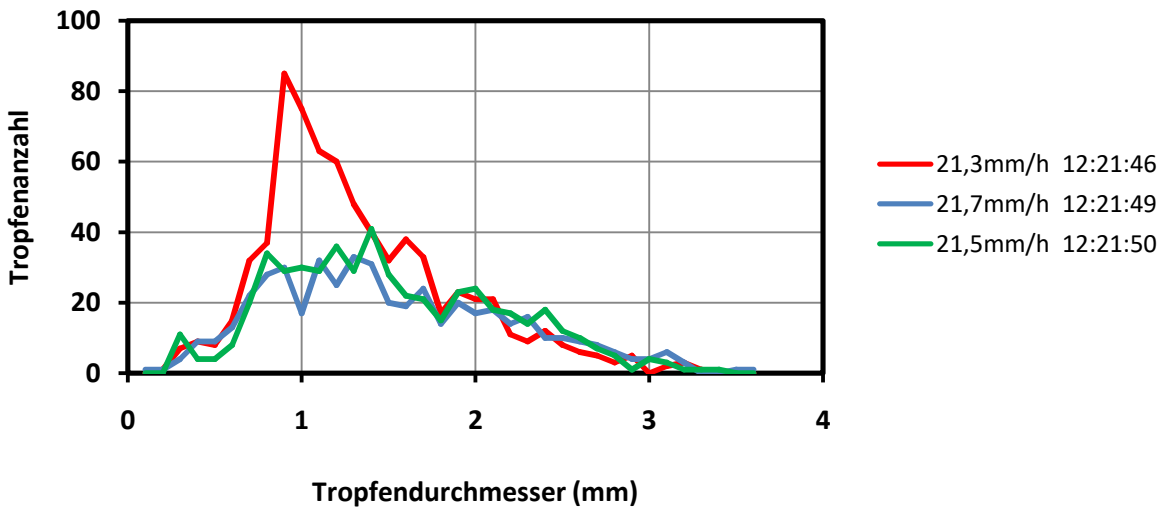



Abb. 47: Drei 60-Sekunden-Messintervalle innerhalb eines Regenereignisses

In Abb. 48 wurde noch zusätzlich ein 60-Sekunden-Messintervall der Laborversuche hinzugefügt. Diese Darstellung soll noch einmal den großen Unterschied der Tropfenanzahl zwischen Regensimulator und Feldmessung für ein einzelnes 60-Sekunden-Messintervall verdeutlichen.

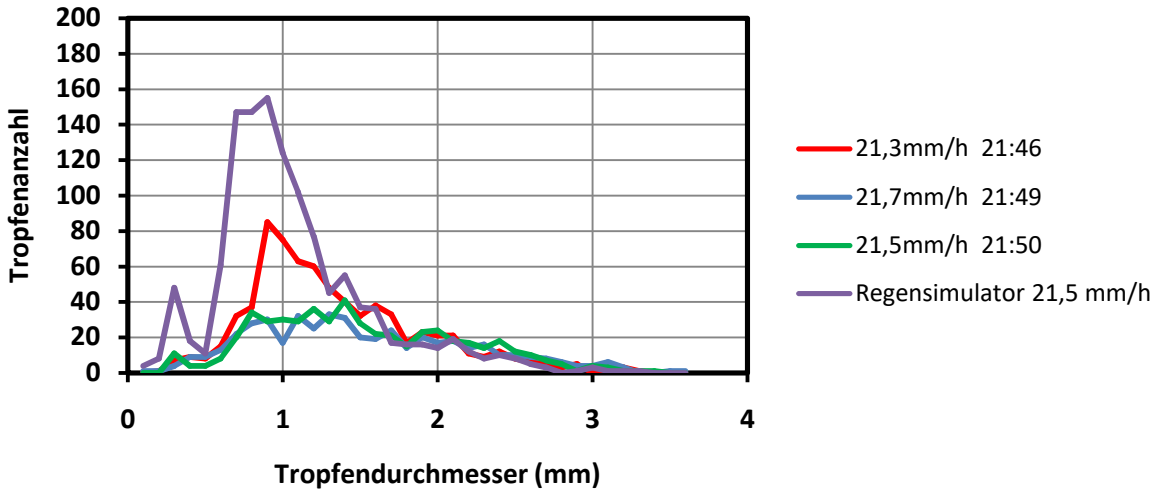



Abb. 48: Vergleich der Tropfengrößenverteilungen einzelner 60-Sekunden-Messintervalle aus der Feldmessung mit einem 60-Sekunden-Messintervall des Regensimulators

# 3.4. Erosivität von Niederschlägen

## 3.4.1. Begriffsdefinition

Regentropfen treffen in Stürmen und Niederschlagsereignissen mit unterschiedlichen Größen und unterschiedlichen Geschwindigkeiten am Boden auf (Kapitel 2.1 Eigenschaften von Regentropfen). Erreicht ein natürlicher Regentropfen die Erdoberfläche, gibt er seine Energie an die Oberfläche ab. Durch den Aufprall der Regentropfen auf der Erdoberfläche können Bodenpartikel und Bodenaggregate in Bewegung gesetzt und zerstört werden (Bisal, 1960).

Fällt mehr Regen als in den Boden infiltrieren kann, entsteht Oberflächenabfluss, der durch Regentropfen mobilisierte Bodenpartikel mit sich reißt (Rose, 1960). Bei entsprechend hohen Abflussmengen bilden sich in weiterer Folge sogenannte Gullies bzw. Interrill-Abflüsse. Laut Rose (1960) haben ausreichend viele Forscher bewiesen, dass der Aufprall von Regentropfen auf die Erdoberfläche eine entscheidende Rolle für die Erosion spielt und einen viel höheren Effekt auf den Boden hat, als dieselbe Menge als Oberflächenabfluss, bevor es zu Gullies und Interrill-Abfluss kommt. Die kinetische Energie der Regentropfen beim Aufprall auf Bodenpartikel ist somit Wegbereiter für den nachfolgenden Oberflächenabfluss, der in Starkregenereignissen eintritt und die Bodenpartikel wegschwemmt und verlagert. Durch Bodenverlagerung entstehen Probleme in der Agrarwirtschaft, für Weidetiere oder ingenieurtechnischer Art. Bodenerosion durch Wasser ist neben Winderosion ein entscheidender Faktor für Bodenverlust durch Erosion (Bisal, 1960; Rose 1960).

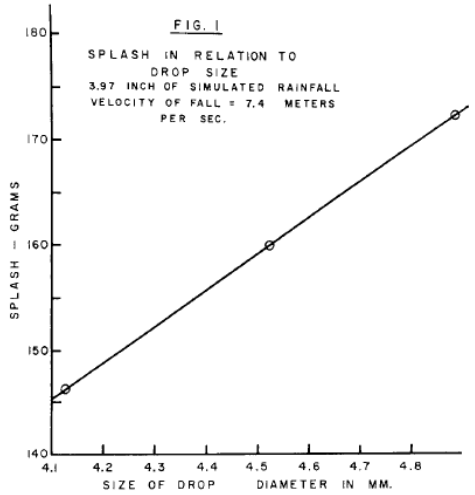



Abb. 49: Versuchsauswertung der Splash-Cups mit der Beziehung zwischen Tropfengröße und Bodenverlagerung aus Bisal (1960)

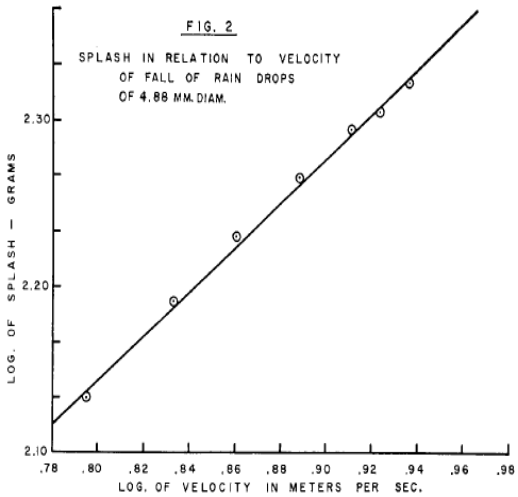



Abb. 50: Versuchsauswertung der Splash-Cups mit der Beziehung zwischen Tropfenfallgeschwindigkeit und Bodenverlagerung aus Bisal (1960)

Abb. 49 und Abb. 50 zeigen, dass die Masse an herausgespritztem Sand linear zur Tropfengröße bzw. zur Tropfenfallgeschwindigkeit ansteigt (Bisal, 1960). Die wichtigsten leicht messbaren Parameter zur Ermittlung der Erosivität von Niederschlägen sind neben der Niederschlagsintensität somit die Größe und die Fallgeschwindigkeit von Regentropfen.

Die Erosivität von Niederschlägen kann durch die kinetische Energie oder den Impuls der Regentropfen ausgedrückt werden. Die Formeln hierfür lauten (Sanchez-Moreno, Mannaerts, Jetten und Löffler-Mang, 2012):

Kinetische Energie: $\mathrm{KE} = \frac{\mathrm{m} \,.\, \mathrm{v}^2}{2}$ (J)

Impuls: $\mathrm{M} = \mathrm{m} \,.\, \mathrm{v}$ (kgm/s)

m … Masse des Regentropfens (kg)

v … Fallgeschwindigkeit des Regentropfens (m/s)

Laut Sanchez-Moreno et al. (2012) gab es unter den verschiedenen Forschern Uneinigkeit, welcher der beiden Parameter geeigneter wäre um die Erosivität von Niederschlägen am geeignetsten zu charakterisieren. Bezüglich der Verwendung der kinetischen Energie in diversen Berechnungsmodellen, wie z. B. in der sehr häufig angewandten USLE (UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION) zur Berechnung des langjährigen, mittleren jährlichen Bodenabtrags in t $ha^{-1}$ $a^{-1}$ eines Einzelhanges von Wischmeier und Smith (1978), wird in dieser Arbeit ebenfalls die kinetische Energie als Größe für die Charakterisierung der Erosivät ermittelt. In der USLE geht die kinetische Energie in den Regen- und Abflussfaktor, R-Faktor genannt, ein (Wischmeier und Smith 1978; Renard und Freimund, 1994).

Der R-Faktor ist ein Maß für die potentielle Erosivität aller Niederschläge eines spezifischen Gebiets während des Jahres. Zur Berechnung der Erosivität von Niederschlägen wird die Niederschlagsintensität miteinbezogen. Die Niederschlagsintensität bzw. die Niederschlagshöhe sind ein Maß für die Bildung des Oberflächenabflusses (Wischmeier und Smith, 1978; Renard und Freimund, 1994). Bei geringen Niederschlagsintensitäten besteht die Neigung die Erosivität von Niederschlagen zu überschätzen (Van Dijk et al., 2002).

Renard und Freimund (1994) führen die mathematische Bestimmung des mittleren jährlichen R- Faktors von Wischmeier und Smith (1978) zu folgender Formel aus:

$$R = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left[\sum_{k=1}^{m}(E)_k(I_{30})_k\right]_j$$

R … Regen- und Oberflächenfaktor (MJ mm $ha^{-2}$ $h^{-1}$ $a^{-1}$)

E … kinetische Energie des Regenereignisses (MJ $ha^{-1}$)

$I_{30}$ … maximale 30-Minuten-Regenintenistät des Regenereignisses (mm $h^{-1}$)

m … Anzahl der Regenereignisse pro Jahr

n … Anzahl der Jahre für die Mittelwertbildung

k … Index der Anzahl der Regenereignisse pro Jahr

j … Index der verwendeten Jahre zur Mittelwertbildung

Um die Stärke eines spezifischen Erosionsprozesses ermitteln zu können, muss neben dem R-Faktor noch die Erodierbarkeit des Bodens festgestellt werden. Die kinetische Energie bzw. Erosivität des Niederschlags selbst stellt nur das Potential dar, das ein Regenereignis hätte und ist somit unabhängig vom bertoffenen Boden zu sehen (Wischmeier und Smith, 1978; Renard und Freimund, 1994).

In den folgenden Unterkapiteln werden verschiedene Varianten zur Berechnung der kinetischen Energie mit den Ausgabewerten des Distrometers PWS100 vorgestellt. Die ermittelten Werte stammen aus den Feldmessungen und werden mit Werten aus der Literaturrecherche verglichen.

### 3.4.2. Berechnung der Kinetischen Energie

Die Ermittlung der kinetischen Energie wurde auf drei unterschiedliche Arten durchgeführt. Bei Berechnungsvariante 1 wurden die Klassenmitten der Tropfengrößen und Fallgeschwindigkeiten aus der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix als Ausgangsgrößen verwendet. In Berechnungsvariante 2 wurden die breiten Größenklassen der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix nach Vorbild der Ausgabefunktion Tropfengrößenverteilung (TGV) in schmalere Klassenbreiten aufgeteilt und damit verfeinert. Die Fallgeschwindigkeiten wurden wie in Variante 1 und 2 aus der Geschwindigkeitsausgabe der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix übernommen. Bei Berechnungsvariante 3 handelt es sich um die Tropfengrößen der Ausgabefunktion Tropfengrößenverteilung (TGV), die Fallgeschwindigkeiten wurden laut Dingle (1970) und Van Dijk et al. (2002) berechnet. Die verwendeten Regressionsformeln für die Berechnung wurden nur für Tropfengrößen bis maximal 7,0 mm konzipiert. Die Berechnung aller drei Varianten wurde deshalb zum Zweck der Vergleichbarkeit für alle drei Varianten für Tropfengrößen bis maximal 7,0 mm durchgeführt.

#### 3.4.2.1. Berechnungsvariante 1: Tropfengrößen und Fallgeschwindigkeiten laut Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix

Sowohl die Tropfengrößen als auch die Fallgeschwindigkeiten wurden aus der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix entnommen. Es wurden für beide Messgrößen jeweils die Klassenmitten als Ausgangswerte für die Berechnung herangezogen. Die Berechnung erfolgte anhand der Formel für die kinetische Energie:

$$\frac{m \,.\, v^2}{2}$$

wobei die Masse m aus dem Tropfendurchmesser d und der Dichte ρ des Wassers berechnet wurde. Die vollständige Berechnungsformel lautet:

$$KE = \sum_{i,m=1}^{k} \frac{\frac{1}{6} \,.\, \pi \,.\, d_{i,m}^3 \,.\, \rho \,.\, v_{i,m}^2}{2} \,.\sum T_{i,m} \,.250$$

KE (J/m²) … Kinetische Energie

$\frac{1}{6}\pi\, d^3_{i,m}$ (m³) … Volumen eines Regentropfens der Matrix-Größenklasse i,m

ρ (kg/m³) … Dichte von Wasser

$v_{i,m}$ (m/s) … Fallgeschwindigkeit des Tropfens laut Matrix-Geschwindigkeitsklasse i,m

$T_{i,m}$ … Tropfenanzahl des Matrixfeldes i,m

k… Anzahl der Klassen

i,m… Index der Matrixklassen

Mit dem Faktor 250 wird das Berechnungsergebnis auf eine Fläche von 1 m² bezogen. Ohne den Faktor wäre das Ergebnis auf die kinetische Energie pro 40 cm² beschränkt, was der Messfläche des Distrometers entspricht. Mit dem Bezug auf die Fläche von 1 m² werden die Ergebnisse mit bereits bestehenden Werten anderer Forscher vergleichbar.

Die Berechnung wird theoretisch für alle 1156 Matrixfelder durchgeführt. Die Summe aller Matrixfelder ergibt die gesamte kinetische Energie des Regenereignisses. Da wie bereits ausgeführt, Berechnungsvariante 3 nur bis maximal 7,0 mm Tropfengrößen anwendbar ist, wurden alle Varianten bis zu dieser Tropfengrößenklasse von 7,0 mm berechnet. Die Summen der Klassen > 7,0 mm bis 25,6 mm gingen damit verloren. Da Tropfen in natürlichem Regen Tropfengrößen von mehr als maximal 7,0 mm Durchmesser kaum überschreiten, entstand kein signifikanter Unterschied im Vergleich zur Aufsummierung aller vorhandenen Klassen. Für das Regenereignis vom 31.07.2016 handelte es sich um insgesamt 3 Tropfen die in den Klassen > 7,0 mm in der Rechnung nicht berücksichtigt wurden. Weiters besteht bei derart großen detektierten Tropfen die Möglichkeit, dass es sich dabei um Messfehler handeln könnte.

#### 3.4.2.2. Berechnungsvariante 2: Tropfengrößen angepasst, Fallgeschwindigkeiten aus Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix

Für die 2. Berechnungsmethode wurden die Klassen der Tropfengröße der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix verändert. Die Klassenbreiten der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix nehmen mit steigenden Tropfengrößen sehr schnell zu. Das bedeutet, es kommt zu größeren Ungenauigkeiten für die tatsächlichen Werte innerhalb der Matrixklasse. Um diese Ungenauigkeiten zu verkleinern, wurden die Matrixwerte aus Abb. 51 an die Tropfengrößenverteilung (TGV) angepasst. In Abb. 52 ist ein Histogramm der Ausgabefunktion Tropfengrößenverteilung (TGV) zu sehen. Ab einem Tropfendurchmesser von 1,0 mm bis 2,0 mm verdoppeln sich die Klassenbreiten der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix im Vergleich zur Tropfengrößenverteilung (TGV). Die Histogramme in Abb. 51 und Abb. 52 weisen dadurch völlig unterschiedliche Verläufe auf.

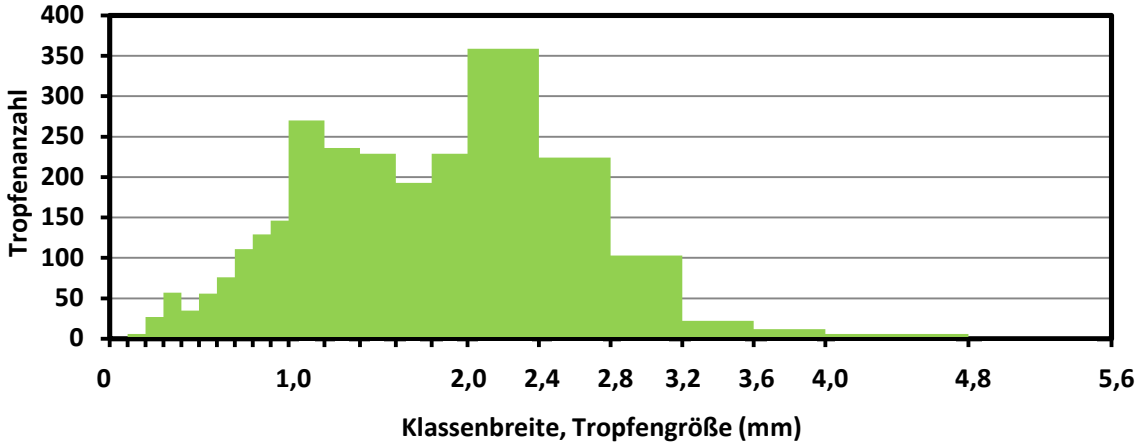



Abb. 51: Tropfengrößenverteilung der Ausgabefunktion Campbell Scientific 34x34-Datenmatix

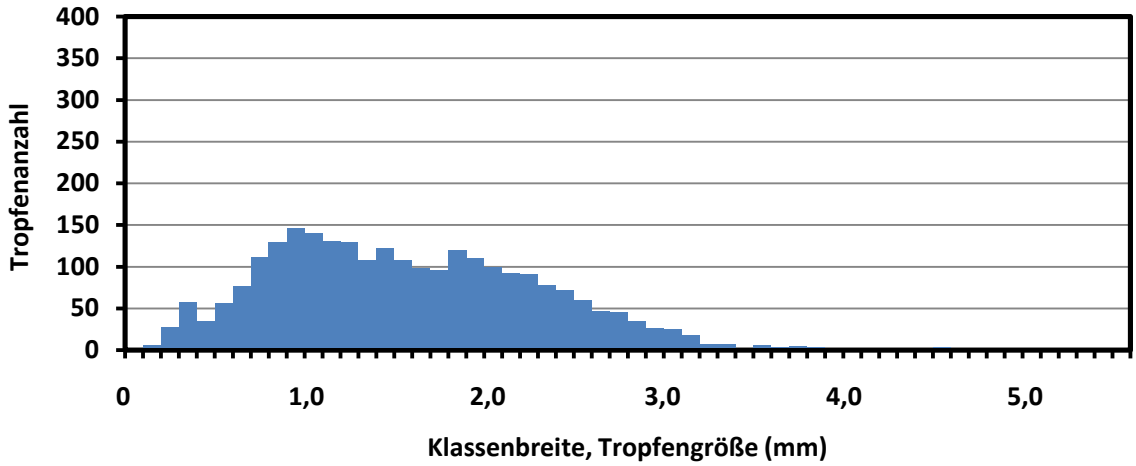



Abb. 52: Tropfengrößenverteilung der Ausgabefunktion Tropfengrößenverteilung (TGV)

Mittelt man die detektierten Tropfen der breiten Matrixklassen auf entsprechend viele Klassen der Tropfengrößenverteilung (TGV), erhält man einen sehr gut genäherten Verlauf der beiden Ausgabefunktionen (Abb. 53).

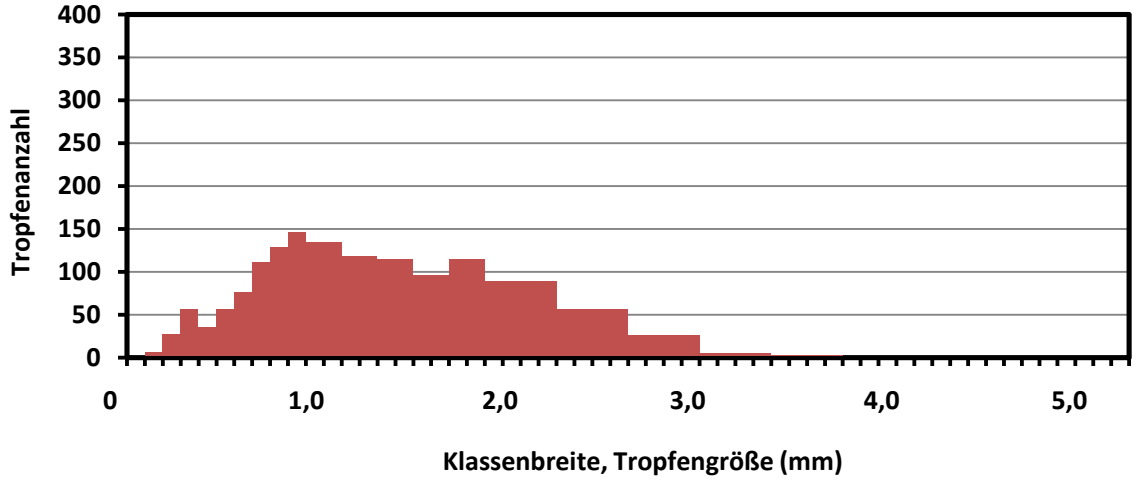



Abb. 53: Tropfengrößenverteilung der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix auf die Klassenbreiten der Ausgabefunktion Tropfengrößenverteilung (TGV) gemittelt

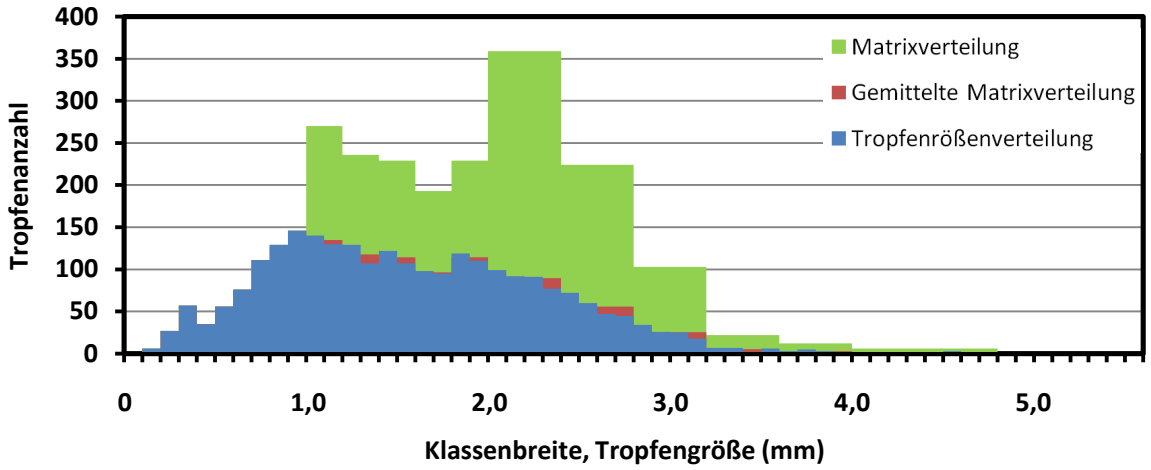



Abb. 54: Vergleich der Tropfengrößenverteilungen der verschiedenen Ausgabefunktionen, Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix, gemittelte Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix, Tropfengrößenverteilung (TGV)

Bis zu einer Tropfengröße von 1,0 mm decken sich die drei Verläufe bzw. weisen dieselben Klassenbreiten auf. Danach sieht man die doppelten Klassenbreiten der Matrixverteilung mit entsprechend höheren Partikelanzahlen pro Klasse. Die rote Verteilung zeigt die gemittelte Matrixverteilung, die sehr gut der genauer aufgelösten Tropfengrößenverteilung (TGV) genähert ist (Abb. 54). Der Berechnungsvorgang der kinetischen Energie verläuft analog zu Berechnungsvariante 1.

#### 3.4.2.3. Berechnungsvariante 3: Tropfengrößen aus TGV, Fallgeschwindigkeiten berechnet

Die 3. Berechnungsmethode verwendet die genauer aufgelösten Tropfengrößen laut Ausgabefunktion Tropfengrößenverteilung (TGV) mit Klassenbreiten von 0,1 mm. Da den Tropfen aus der TGV keine Fallgeschwindigkeiten der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix zugeordnet werden können, müssen die Fallgeschwindigkeiten für diese Berechnungsvariante aus Regressionsformeln von Dingle (1972) und Van Dijk, et al. (2002) berechnet werden.
Die verwendeten Formeln zur Berechnung der Fallgeschwindigkeiten orientieren sich an den Tropfengrößen, um die beste Näherung an die tatsächlichen Fallgeschwindigkeiten zu ermitteln und werden in drei Tropfengrößenbereiche eingeteilt.

Für Tropfengrößen von 0,1 mm ≤ d ≤ 1,4 mm wurde folgende Formel für die Berechnung der Fallgeschwindigkeit der Regentropfen nach Dingle (1972) verwendet:

$$v = -17{,}8951 + 448{,}9498d + 16{,}3719d^2 - 45{,}9516d^3$$

Für Tropfengrößen von 1,4 mm ≤ d ≤ 5,8 mm wurde folgende Formel für die Berechnung der Fallgeschwindigkeit der Regentropfen nach Dingle (1972) verwendet:

$$v = 24{,}1660 + 448{,}8336d - 75{,}6265d^2 + 4{,}2659d^3$$

Die Abweichungen zu den experimentell ermittelten Fallgeschwindigkeitsversuchen von Gunn und Kinzer (1949) betragen hierbei weniger als 1 % (Dingle, 1972).

Für Tropfengrößen von 5,8 mm ≤ d ≤ 7,0 mm wurde die Formel aus Van Dijk, et al. (2002) verwendet, die sich mit 3 % Genauigkeit an den komplexeren Formeln von Beard und Pruppacher (1969) und Beard (1976) orientiert:

$$v = 0{,}0561d^3 - 0{,}912d^2 + 5{,}03d - 0{,}254$$

Die Berechnungsformel ähnelt jenen Formeln der Berechnungsvarianten 1 und 2, mit dem Unterschied, dass die Größenklassen der Tropfengrößenverteilung (TGV) und die berechneten Fallgeschwindigkeiten, anstatt der Matrixklassen in die Rechnung eingingen:

$$KE = \sum_{i,t=1}^{k} \frac{\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_{i,t}^3 \cdot \rho \cdot v_{i,ber}^2}{2} \cdot \sum T_{i,t} \cdot 250$$

KE (J/m²) … Kinetische Energie

$\frac{1}{6}\pi d^3_{i,t}$ (m³) … Volumen eines Regentropfens der TGV-Größenklasse i,t

ρ (kg/m³) … Dichte von Wasser

$v_{i,ber}$ (m/s) … berechnete Fallgeschwindigkeit des Tropfens i, ber laut Dingle (1972) bzw. Van Dijk et al. (2002)

$T_{i,t}$ … Tropfenanzahl der TGV Klasse i,t

k… Anzahl der Klassen

i,t… Index der TGV-Klassen

## 3.4.3. Ergebnisse Kinetische Energie

### 3.4.3.1. 60-Sekunden-Messintervalle

Abb. 55 zeigt die Ergebnisse der drei Berechnungsvarianten der kinetischen Energie KE für einige ausgewählte 60-Sekunden-Messintervalle. Die Berechnungsvarianten 1 und 2 zeigen für jedes 60-Sekunden-Messintervall sehr ähnliche Ergebnisse. Berechnungsvariante 3 weist zumeist eine etwas geringere kinetische Energie auf. Lediglich die Berechnungswerte der Niederschlagsintensitäten mit 100 mm/h und 130 mm/h fallen für Variante 3 merklich höher aus, als bei Berechnungsmethode 1 und 2. Der Verlauf der Trendkurve zeigt einen annähernd linearen Verlauf. Das Bestimmungsmaß liegt bei 95,6 %. Die auftretenden Abweichungen ergeben sich aufgrund der individuellen Tropfengrößenverteilungen der einzelnen 60-Sekunden-Messintervalle zu einem speziellen Zeitpunkt eines Regenereignisses (Kapitel 3.4.7 Zeitlicher Verlauf des Zusammenhangs N-Intensität-kinetische Energie).

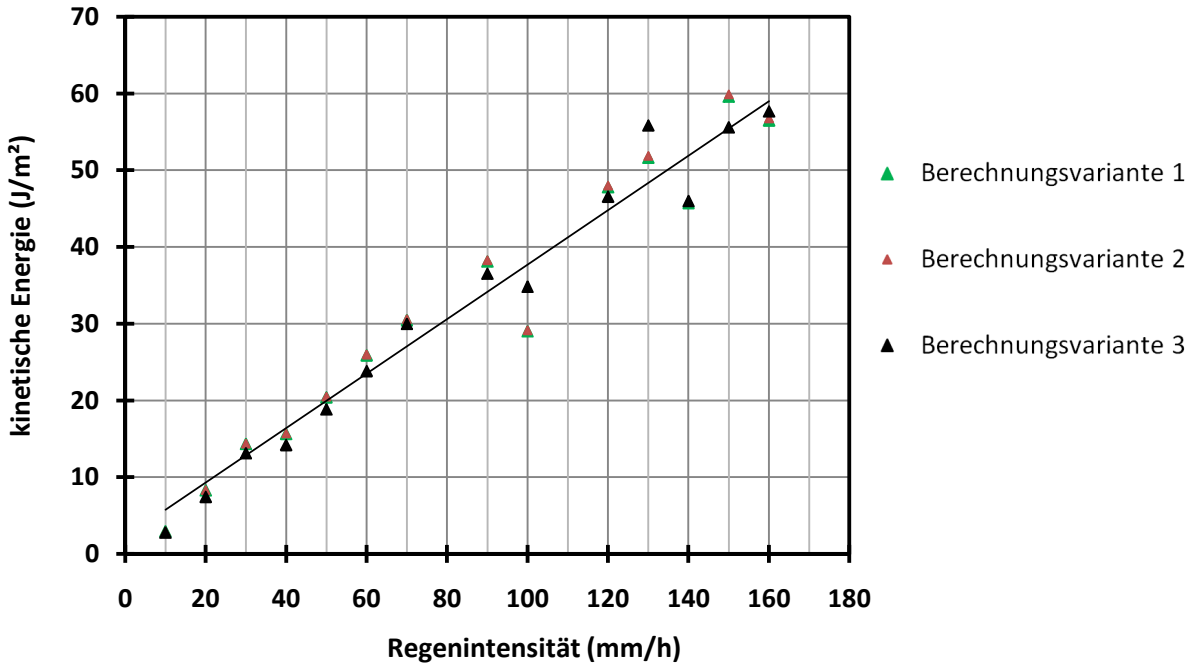



Abb. 55: Kinetische Energie einzelner 60-Sekunden-Messintervalle

#### 3.4.3.2. Regenereignisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der drei Berechnungsvarianten für die kinetische Energie pro Regenereignis angeführt:

12.07.2016, Niederschlagshöhe= 13,0 mm, Regendauer= 132 min, durchschnittliche N-Intensität = 6,0 mm/h

| | | |
|---|---|---|
| KE Variante 1: | 279,47 | J/m² |
| KE Variante 2: | 280,8852554 | J/m² |
| KE Variante 3: | 262,05 | J/m² |

21.07.2016, Niederschlagshöhe= 3,8 mm, Regendauer= 24 min, durchschnittliche N-Intensität = 9,5 mm/h

| | | |
|---|---|---|
| KE Variante 1: | 87,28 | J/m² |
| KE Variante 2: | 87,72096679 | J/m² |
| KE Variante 3: | 88,03 | J/m² |

24.07.2016, Niederschlagshöhe 30,0 mm, Regendauer= 158 min, durchschnittliche N-Intensität = 11,5 mm/h

| | | |
|---|---|---|
| KE Variante 1: | 713,13 | J/m² |
| KE Variante 2: | 716,5891816 | J/m² |
| KE Variante 3: | 667,23 | J/m² |

27.07.2016 Niederschlagshöhe 42,0 mm, Regendauer= 51 min, durchschnittliche N-Intensität = 49,0 mm/h

| | | |
|---|---|---|
| KE Variante 1: | 899,70 | J/m² |
| KE Variante 2: | 904,1550979 | J/m² |
| KE Variante 3: | 902,58 | J/m² |

31.07.2016, Niederschlagshöhe 26,6 mm, Regendauer= 138 min, durchschnittliche N-Intensität = 11,5 mm/h

| | | |
|---|---|---|
| KE Variante 1: | 582,05 | J/m² |
| KE Variante 2: | 584,9813694 | J/m² |
| KE Variante 3: | 570,51 | J/m² |

Die Berechnungsvarianten 1 und 2 weisen eine maximale Differenz von 0,55 % der kinetischen Energie zwischen den Regenereignissen auf. Daraus kann geschlossen werden, dass die Klassenbreiten der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix zur Berechnung der

kinetischen Energie ausreichend genau sind und nicht auf die Klassenbreiten der Tropfengrößenverteilung (TGV) gemittelt werden müssen.

Beim Vergleich der Berechnungsvariante 3 mit den Berechnungsvarianten 1 und 2 wird deutlich, dass sich die Ergebnisse mit bis zu 6,9 %, stärker voneinander unterscheiden. Diese maximale Differenz tritt beim längsten andauernden Ereignis vom 24.07.2016 mit einer Regendauer von 158 Minuten auf. Bei kürzeren Regenereignissen mit Regendauern < 60 min, beträgt die Differenz der Ergebnisse für die kinetische Energie zwischen Berechnungsvariante 3 und den Varianten 1 und 2 nur 0,3 %. Der Grund hierfür könnte sein, dass sich kleine Differenzen zwischen den Berechnungsmethoden der einzelnen 60-Sekunden-Messintervalle für sehr lange Regenereignisse aufsummieren und dadurch größere Abweichungen entstehen als für kurze Regenereignisse.

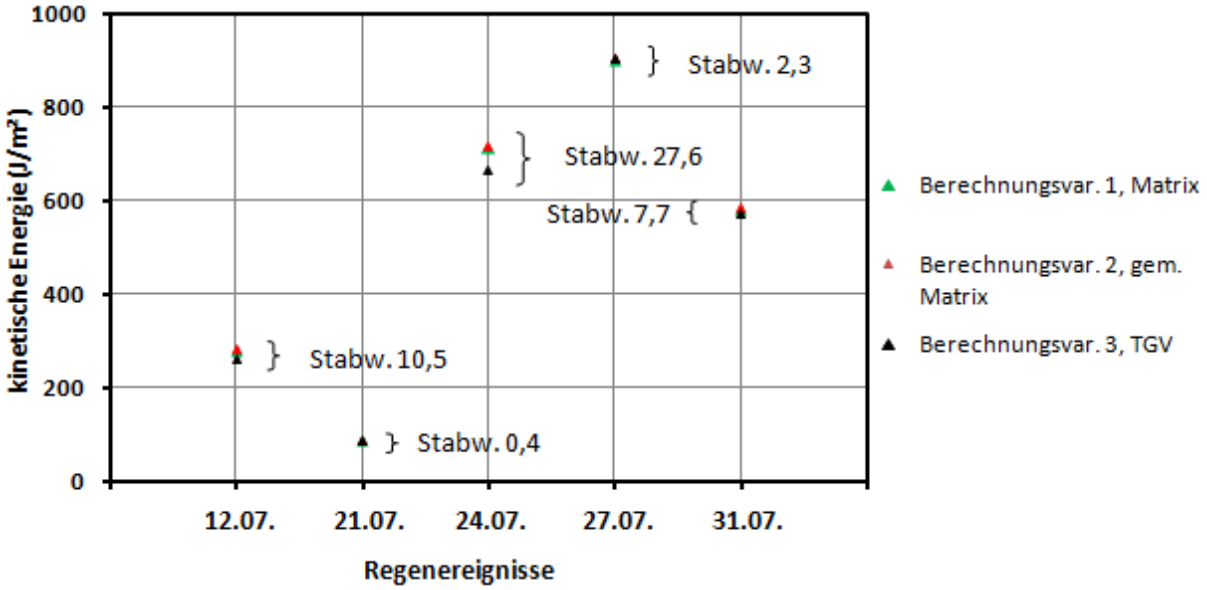



Abb. 56: Standardabweichung zwischen den Ergebnissen der Berechnungsvarianten für die kinetische Energie der fünf Regenereignisse im Juli 2016

Wie in Abb. 56 graphisch dargestellt, tritt die größte Standardabweichung von 27,6 beim längsten andauernden Regenereignis mit 158 Minuten Regendauer auf. Die geringste Standardabweichung von 0,4 war beim kürzesten Regenereignis mit 24 Minuten Regendauer zu finden.

Für kurze Regenereignisse ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der drei Berechnungsvarianten. Die Abweichungen ergeben sich durch die Messung der individuellen Tropfenfallgeschwindigkeiten bei speziellen Bedingungen, die durch Berechnung der Fallgeschwindigkeit nicht ermittelt werden können. Für alle weiteren Berechnungen und Darstellungen in den Folgekapiteln, wurde Berechnungsvariante 1 mit den tatsächlich detektierten Größen und Fallgeschwindigkeiten der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix zur Berechnung der kinetischen Energie verwendet.

### 3.4.4. Prüfung der Ergebnisse

Abb. 57 zeigt eine Tabelle mit Daten von historischen Stürmen und Niederschlagsereignissen, die von Van Dijk et al. (2002) gesammelt und aufbereitet wurden. Die Regenereignisse sind nach ihren Niederschlagshöhen gereiht. Die beiden markierten Spalten enthalten die durchschnittlichen kinetischen Energien der gesammelten Niederschlagsereignisse. Im roten Kasten befinden tatsächlich gemessene Werte, im blauen Rechteck wurden berechnete Vergleichswerte für die kinetische Energie von Rosewell (1986) aufgelistet.

| Storm size class (mm) | Rainfall characteristics | | | Observed | | Predicted (Rosewell, 1986) | | Storm based difference | | Cumulative difference | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Number of storms | Total storm depth (mm) | Avg. intens. $R$ (mm h$^{-1}$) | Avg. storm $E_K$ (J m$^{-2}$) | Total $E_K$ (J m$^{-2}$) | Avg. storm $E_K$ (J m$^{-2}$) | Total $E_K$ (J m$^{-2}$) | Avg. Abs. (J m$^{-2}$) | Avg. Rel. (%) | Class total (J m$^{-2}$) | Percentage of total |
| 0–2.5 | 10 | 12.4 | 3.1 | 31 | 311 | 20 | 202 | 11 | 25 | −109 | −2 |
| 2.5–5 | 2 | 6.2 | 4.7 | 79 | 158 | 51 | 102 | 28 | 36 | −56 | −1 |
| 5–25 | 8 | 104.5 | 6.2 | 322 | 2580 | 280 | 2241 | 43 | 13 | −339 | −5 |
| 25–50 | 3 | 115.6 | 4.4 | 730 | 2190 | 729 | 2187 | 64 | 8 | −3 | 0 |
| >50 | 1 | 93.0 | 6.3 | 1770 | 1770 | 1798 | 1798 | 28 | 2 | 28 | 0 |
| Total | 24 | 331.7 | 5.3 | 292 | 7008 | 272 | 6529 | 30 | 19 | −479 | −7 |

Abb. 57: Vergleich der kinetischen Energie für Stürme aus Van Dijk et al. (2002)

Obwohl die Niederschlagsdaten einst mit verschiedensten Messmethoden wie mit Distrometern, fotografischen Methoden, Filterpapier und der Mehlmethode ermittelt wurden, liegen die Werte der kinetische Energie aus dieser Arbeit sehr gut im Bereich der Werte aus Van Dijk et al. (2002). In Tab. 12 befindet sich eine Gegenüberstellung der Werte aus Van Dijk et al. (2002) auf der linken Tabellenseite, mit den Werten dieser Arbeit auf der rechten Tabellenseite. Die Werte der kinetischen Energie sind nach der zugehörigen Niederschlagshöhe des Regenereignisses gereiht.

Tab. 12: Gegenüberstellung der Ergebnisse der kinetischen Energie für Regenereignisse (rechte Tabellenseite), mit Werten aus der Literaturrecherche (linke Tabellenseite) aus Van Dijk et al.(2002)

| N-Höhe (mm) | durchschn. N-Intensität (mm/h) | Kinetische Energie (J/m²) | | N-Höhe (mm) | durchschn. N-Intensität (mm/h) | Kinetische Energie (J/m²) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | gemessen (van Dijk) | berechnet (Rosewell) | | | Ber.variante 1 | Ber.variante 3 |
| 2,5 - 5 | 4,7 | 79 | 51 | 3,8 | 9,5 | 87 | 88 |
| 5 - 25 | 6,2 | 322 | 280 | 13,0 | 6,0 | 279 | 262 |
| 25 - 50 | 4,4 | 730 | 729 | 27,0 | 11,5 | 582 | 570 |
| | | | | 30,0 | 11,5 | 713 | 667 |
| | | | | 42,0 | 49,0 | 899 | 902 |

### 3.4.5. Zusammenhang Niederschlagsintensität – Kinetische Energie

Die Datenpunkte in Abb. 58 stellen die kinetische Energie pro 60-Sekunden-Messintervall in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität für das Regenereignis vom 21.07.2016 dar. Die kinetische Energie in J/m² steigt linear mit der Niederschlagsintensität an. Das Bestimmungsmaß weist mit 98,9 % einen sehr hohen Wert auf.

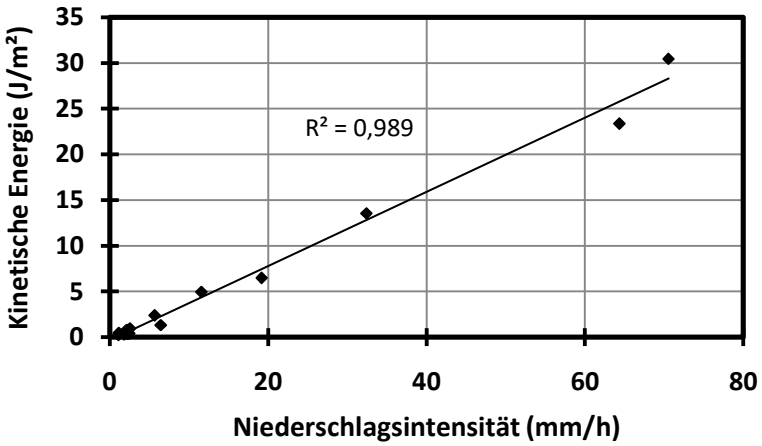



Abb. 58: Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und kinetischer Energie für das Regenereignis vom 21.07.2016

Auch für das Regenereignis vom 27.07.2016 zeigt sich ein linearer Verlauf zwischen Niederschlagsintensität und kinetischer Energie. Wie aus einigen Datenpunkten hervorgeht, kann die kinetische Energie selbst bei gleich großer Niederschlagsintensität zweier 60-Sekunden-Messintervalle z.B. bei 95 mm/h, unterschiedlich hoch ausfallen (Abb. 59). Der Grund hierfür ist, dass jedes 60-Sekunden-Messintervall eine individuelle Tropfengrößenverteilung besitzt und durch größere Regentropfen höhere kinetische Energie zustande kommt, als bei allgemein kleineren Tropfen in einem 60-Sekunden-Messintervall mit derselben durchschnittlichen Niederschlagsintensität.

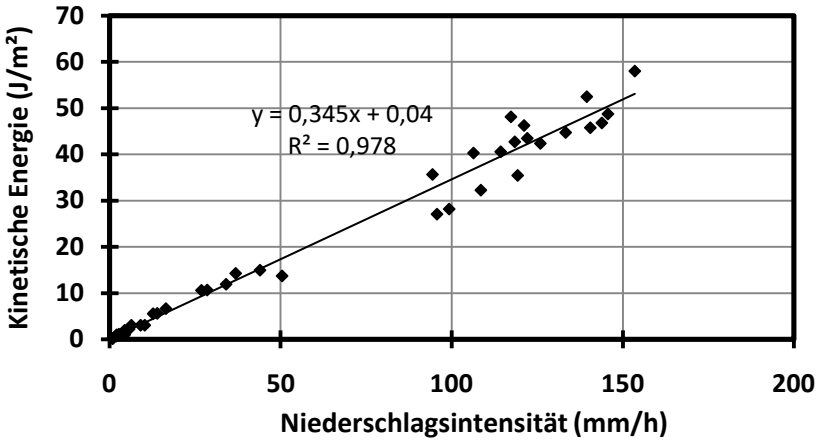



Abb. 59: Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und kinetischer Energie für das Regenereignis vom 27.07.2016

Bezieht man die kinetische Energie für jedes 60-Sekunden-Messintervall auf 1 mm Niederschlagshöhe, zeigt sich eine völlig andere Verteilung. Die Einheit der kinetischen Energie $KE_{mm}$ in (J $m^{-2}$ $mm^{-1}$) bezieht sich jetzt für alle 60-Sekunde-Messintervalle auf die gleiche Niederschlagshöhe von 1 mm, nicht wie bisher auf die tatsächlich gemessene Niederschlagshöhe. In Abb. 60 wird veranschaulicht, dass Regentropfen bei kleinen Niederschlagsintensitäten angesichts ihrer Tropfengröße durchaus höhere kinetische Energie aufweisen können als Regentropfen bei hohen Niederschlagsintensitäten, dieselbe Niederschlagsmenge vorausgesetzt (Van Dijk et al., 2002).

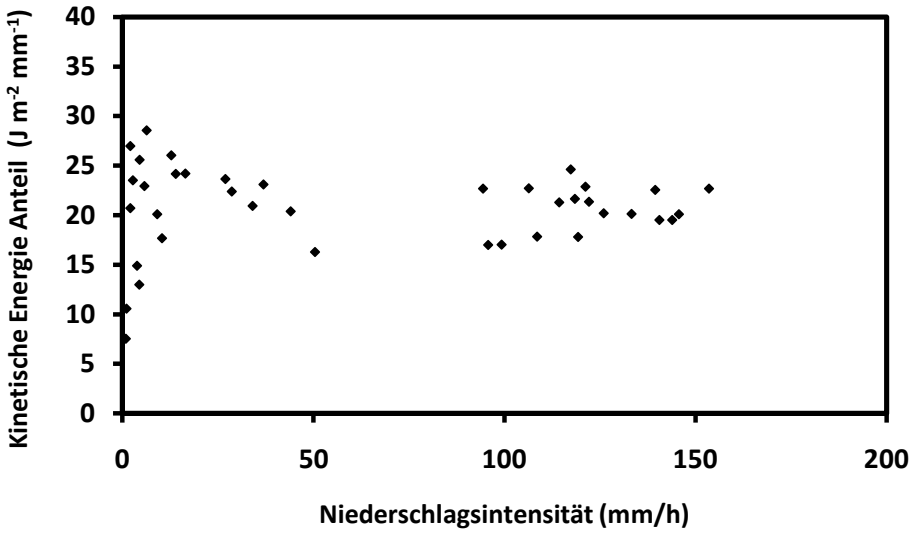



Abb. 60: Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und kinetischer Energie bezogen auf 1 mm Niederschlagshöhe für das Regenereignis vom 21.07.2016

Als Vergleichswerte zu den Berechnungen in dieser Arbeit, sind in den Abb. 61 aus Van Dijk et al. (2002) bzw. Abb. 62 aus Sanchez-Moreno et al. (2012) Ergebnisse der $KE_{mm}$-I-Beziehung abgebildet. Abb. 61 basiert auf den Messdaten von Laws und Parsons (1943), an die diverse Näherungskurven nach dem Potenzgesetz und der Exponentialgleichung von Van Dijk et al. (2002) und die Logarithmischen Gleichung von Wischmeier und Smith (1958, 1978) angepasst wurden. Wie in den Abb. 61 und Abb. 62 zum Ausdruck kommt, ergeben sich Maximal- und Minimalwert für die kinetische Energie bei entsprechenden Niederschlagsintensitäten für die $KE_{mm}$-I-Beziehung (Van Dijk et al., 2002).

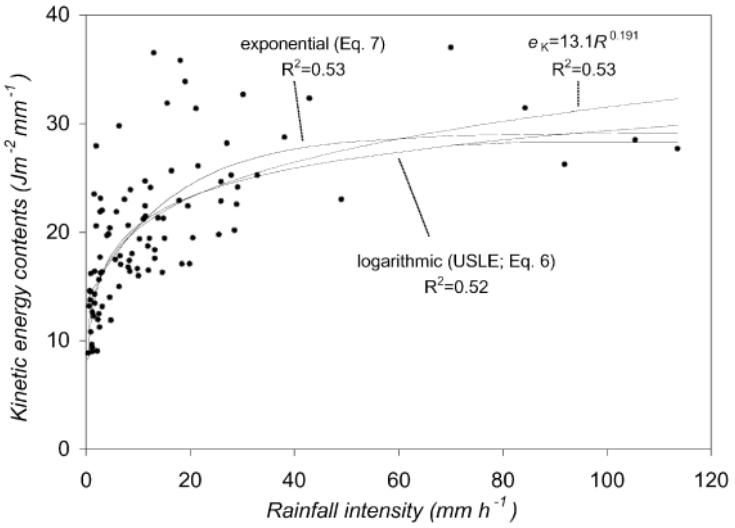



Abb. 61: $KE_{mm}$-I Daten mit angepassten Näherungskurven aus Van Dijk et al. (2002), basierend auf den Messdaten von Laws und Parsons (1943) und der logarithmischen Gleichung von Wischmeier und Smith (1958, 1978)

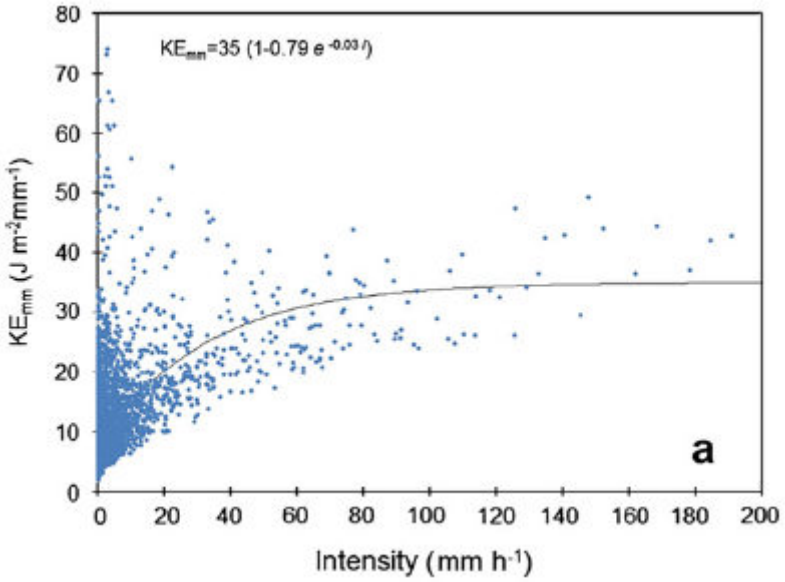



Abb. 62: $KE_{mm}$-I Daten mit Exponentialkurve aus Sanchez-Moreno et al. (2012)

Beim Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit den Daten von Sanchez-Moreno et al. (2012) bzw. Van Dijk et al. (2002) zeigen sich sehr ähnliche Ergebnisse (Abb. 61, Abb. 62). Trotz der Tatsache, dass die Daten von Sanchez-Moreno et al. (2012) in Kap Verde mit einem OTT Parsivel Distrometer aufgezeichnet wurden und mit zwei Jahren Aufzeichnungsdauer einen wesentlich größeren Datenumfang aufweisen, zeigen sich gute Näherungen in der Größenordnung und dem Verlauf der Kurven. Auffällig ist die teilweise extrem hohe Spannweite der kinetischen Energie von < 5 J $m^{-2}$ $mm^{-1}$ bis > 70 J $m^{-2}$ $mm^{-1}$ für Regenintensitäten kleiner als 10 mm/h. In den folgenden Kapiteln wird darauf eingegangen, warum derart große Unterschiede der kinetischen Energie für Messintervalle mit gleicher Niederschlagsintensität entstehen können.

### 3.4.6. $KE_{mm}$-I Hysterese

Weitere aufschlussreiche Vergleichsdarstellungen bieten Abb. 63 und Abb. 64. Die Darstellungen zeigen die Hysterese von $KE_{mm}$-I, zum einen für das Regenereignis vom 21.07.2016 und zum anderen für die Daten aus Van Dijk et al. (2002). Die beiden Abbildungen zeigen ähnliche Verläufe der Hysterese-Kurven mit sehr ähnlicher Beziehung zwischen $KE_{mm}$ und der Regenintensität. Aus den Kurven kann abgelesen werden, dass die kinetische Energie zu Beginn des Regenereignisses höhere Werte aufweist als gegen Ende des Regenereignisses.

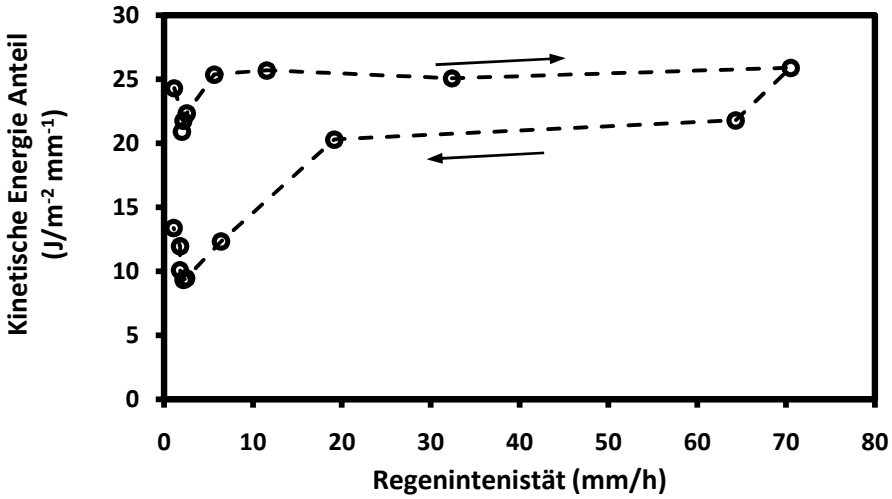



Abb. 63: Hysterese der $KE_{mm}$-I-Beziehung für das Regenereignis vom 21.07.2016

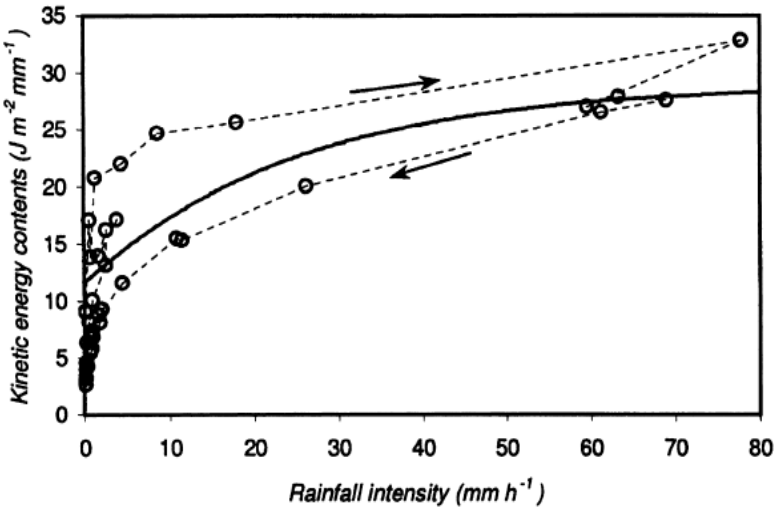



Abb. 64: Hysterese der $KE_{mm}$-I-Beziehung für ein Regenereignis aus Van Dijk et al. (2002); die unterbrochene Linie zeigt die Messergebnisse, während die volle Linie die Berechnungen von Rosewell (1986) darstellt

### 3.4.7. Zeitlicher Verlauf des Zusammenhangs N-Intensität-kinetische Energie

Das Regenereignis für Abb. 65 wurde aufgrund seiner anhaltend hohen Regenintensität für diese Darstellung ausgewählt. Aus der Graphik wird sichtbar, dass sich die Verläufe für Regenintensität und kinetische Energie in Bereichen niedriger Regenintensität fast exakt decken. Bei den höchsten Regenintensitäten dieses Regenereignisses, verläuft die Kurve der kinetischen Energie immer über dem Intensitätsverlauf.

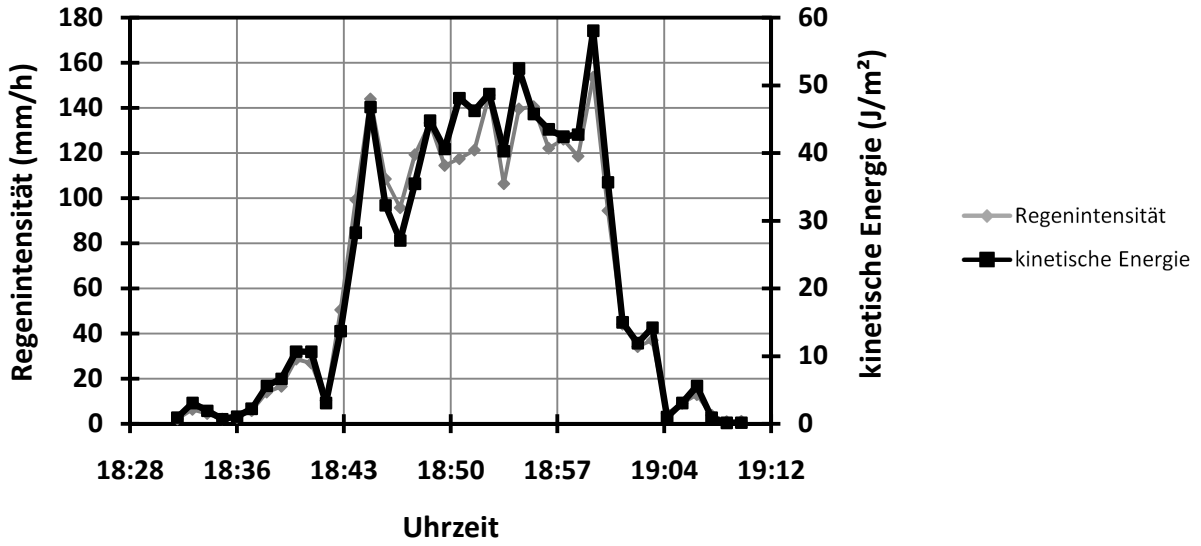



Abb. 65: Zeitliche Verläufe von Regenintensität und kinetischer Energie für das Regenereignis vom 27.07.2016

Aus den Verläufen des Regenereignisses vom 21.07.2016 geht hervor, dass sich die beiden Kurven bis zum Erreichen der maximalen Regenintensität um 22:40 Uhr exakt decken (Abb. 66). Danach verläuft die Kurve der kinetischen Energie permanent unter der Regenintensitätskurve. Betrachtet man die Verteilungen der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix einiger 60-Sekunden-Messintervalle der Regenereignisse, wird erkennbar was der Grund für dieses Phänomen ist.

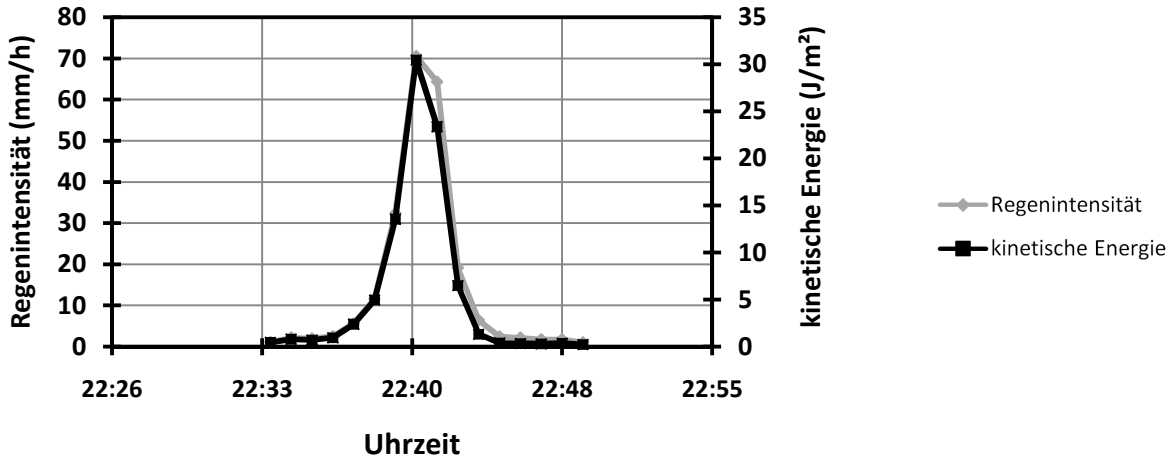



Abb. 66: zeitliche Verläufe der Regenintensität und der kinetischer Energie für das Regenereignis vom 21.07.2016

Zu den Uhrzeiten 22:35 und 22:46 traten mit 2,18 mm/h exakt dieselben Regenintensitäten innerhalb zweier 60-Sekunde-Messintervalle für das Regenereignis vom 21.07.2016 auf. Das 60-Skunden-Messintervall um 22:35 befindet sich am Beginn des Regenereignisses (Abb. 67), jenes um 22:46 ein paar Minuten vor Ende des Ereignisses (Abb. 68). Aus Abb. 67 tritt hervor, dass die Tropfen zu Beginn des Regenereignisses größere Durchmesser aufwiesen aber in geringerer Anzahl auftraten als am Ende desselben Ereignisses in Abb. 68. Damit kommt zwar dieselbe Regenintensität zustande, die kinetische Energie zu Beginn des Regenereignisses fällt wegen der größeren Regentropfen allerdings erheblich höher aus. An den violetten Matrixfeldern ist erkennbar in welchen Größenklassen die meisten Regentropfen detektiert wurden. Die Parameter der beiden Vergleichsintervalle wurden in Tab. 13 zusammengefasst.

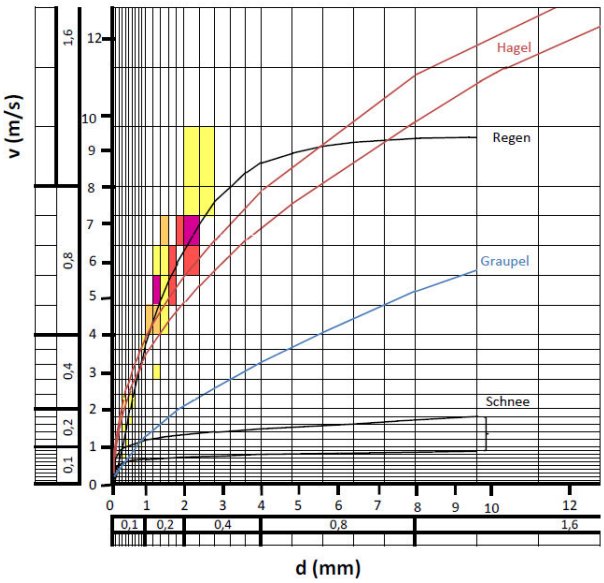



Abb. 67: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für ein 60-Sekunden-Messintervall mit einer Regenintensität von 2,2 mm/h am Beginn des Regenereignisses

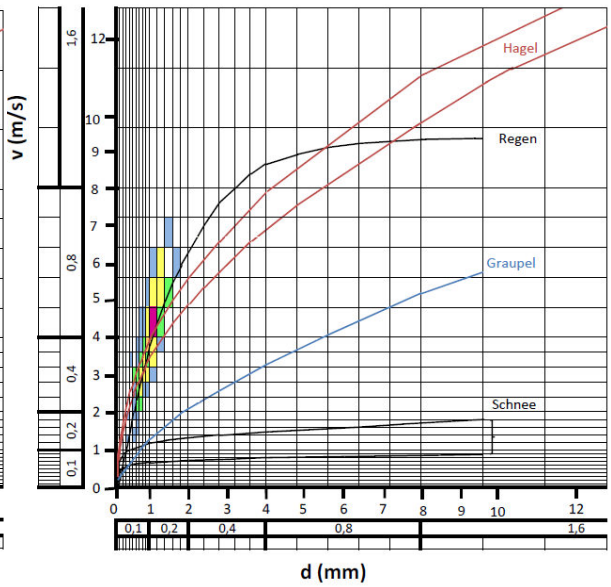



Abb. 68: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für ein 60-Sekunden-Messintervall mit einer Regenintensität von 2,2 mm/h am Ende des Regenereignisses

Tab. 13: Unterschiede der Parameter zweier 60- Sekunden-Messintervalle mit Regenintensitäten von jeweils 2,2 mm/h, zu Beginn und am Ende desselben Regenereignisses

| **Messintervalle** | **22:35** | **22:46** |
|---|---|---|
| Anzahl der detektierten Tropfen | 59 | 232 |
| Durchschnittlicher Tropfendurchmesser (mm) | 1,71 | 1,09 |
| Regenintensität (mm/h) | 2,2 | 2,2 |
| Kinetische Energie (J/m²) | **0,79** | **0,34** |

Für das Regenereignis vom 27.07.2016 konnte dieselbe Erkenntnis gewonnen werden, wie für jenes vom 21.07.2016. In Abb. 69 treten wiederum zu Beginn des Regenereignisses die Tropfen mit größeren Durchmessern und geringerer Anzahl als gegen Ende des Regenereignisses in Abb. 70 auf. Die kinetische Energie fällt wiederum zu Beginn des Regenereignisses doppelt so hoch aus wie zum Ende des Regenereignisses, obwohl beide 60-Sekunden-Messintervalle dieselbe Regenintensität aufweisen. Die Parameter der beiden Vergleichsintervalle wurden in Tab. 14 zusammengefasst.

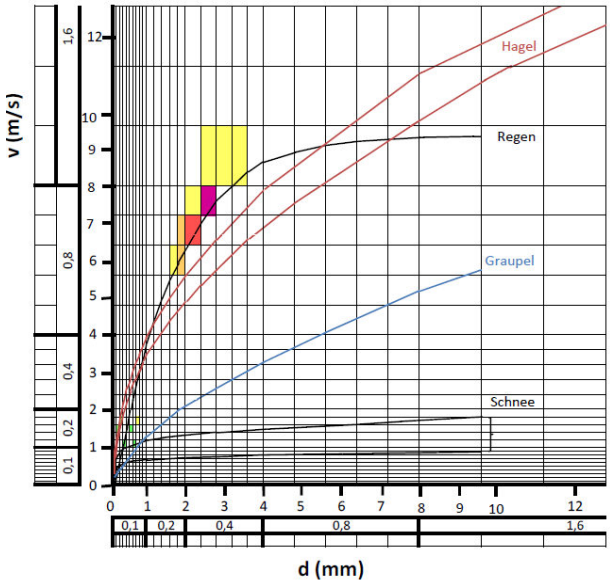



Abb. 69: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für ein 60-Sekunden-Messintervall mit einer Intensität von 2,2 mm/h am Beginn des Regenereignisses

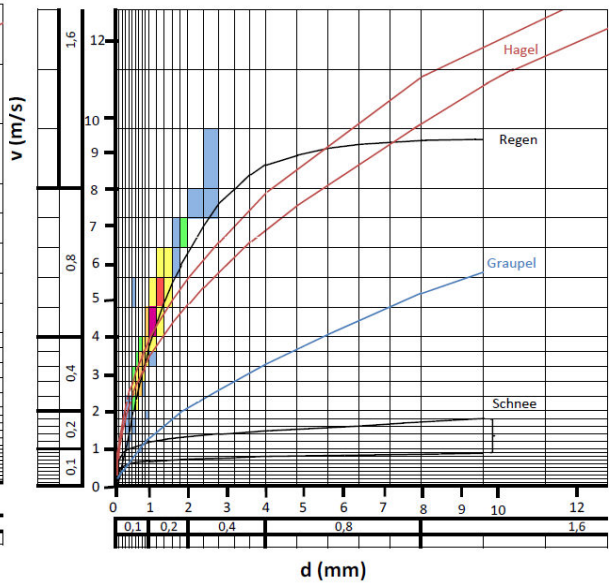



Abb. 70: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für ein 60-Sekunden-Messintervall mit einer Intensität von 2,2 mm/h am Ende des Regenereignisses

Tab. 14: Unterschiede der Parameter zweier 60- Sekunden-Messintervalle mit Regenintensitäten von jeweils 4,4 mm/h, zu Beginn und am Ende desselben Regenereignisses

| **Messintervalle** | **18:34** | **19:05** |
|---|---|---|
| Anzahl der detektierten Tropfen | 42 | 413 |
| Durchschnittlicher Tropfendurchmesser (mm) | 2,30 | 1,13 |
| Regenintensität (mm/h) | 4,4 | 4,4 |
| Kinetische Energie (J/m²) | **1,91** | **0,96** |

### 3.4.8. Kinetische Energie der Labormessungen

Die Berechnung der kinetischen Energie aus den Labormessungen mit dem Regensimulator beträgt ca. 70 % der kinetischen Energie von natürlichem Regen bei ähnlichen Bedingungen. Das Ergebnis stimmt sehr gut mit Versuchen von Abudi, Carmi und Berliner (2012) überein, die auf einen Anteil von 67 % der kinetischen Energie in ähnlichen Versuchen mit Regensimulatoren kommen.

# 4. Schlussfolgerung

**Funktionsweise Tropfendetektion**

Hinsichtlich der Messung für flüssige Niederschläge mittels Brechungswinkel beim Austritt der Lichtstrahlen, treten einige kritische Betrachtungen auf. Die Messung über den Brechungswinkel kann für Tropfen, die keine runde oder leicht abgeplattete Form aufweisen, zu Problemen führen. Laut den Versuchen von Jones (1959) fiel ein großer Prozentanteil der großen Tropfen mit > 1,9 mm Durchmesser, in die Kategorie vertikal gelängt bzw. irreguläre Tropfenform. Bei derartigen Tropfenformen unterscheidet sich der Austrittswinkel von jenem bei horizontal gelängten Tropfen. Das würde bedeuten, dass in Regenereignissen mit großen Tropfen und windigen Verhältnissen, vermehrt Unknown- und Error-Partikel detektiert werden würden. Somit gehen für die Ausgabefunktionen Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix und Tropfengrößenverteilung (TGV) speziell große Tropfen verloren, die für die Berechnung der kinetischen Energie von großer Wichtigkeit wären.

Durch Stoffe die im Fallvorgang von Regentropfen aufgenommen werden, könnte sich der Brechungsindex in den Regentropfen ebenfalls verändern und zu Abweichungen von den tatsächlichen Werten führen.

Der Einsatz des Regensimulators für die Durchführung der Laborversuche, erwies sich als wichtiger Teil der Versuchsreihe, da das Distrometer an die Grenzen der korrekten Aufzeichnung gebracht wurde. Durch die im Labor vorherrschenden Bedingungen konnte das Distrometer ab einer gewissen Regenintensität keine korrekten Messwerte mehr liefern, was durch den Einsatz der Auffangschalen als Referenzwert erkannt wurde. Der Grund hierfür liegt vermutlich an der zu großen Anzahl an produzierten Regentropfen die einander im optischen Pfad überlappten und dadurch nicht detektiert werden konnten. Das Tropfenspektrum des Regensimulators ist deshalb nur bedingt geeignet, um natürlichen Regen bis zu hohen Regenintensitäten korrekt zu simulieren.

Ein wichtiger Punkt zur Überprüfung der Feldmessungen wären entsprechend genaue zusätzliche Regenmessgeräte in der unmittelbaren Nähe des Distometers im Feld, um ähnlich zu den Auffangschalen der Laborversuche Referenzwerte zu den Distrometermessungen zu erhalten. Unglücklicherweise konnten in dieser Arbeit keine Referenzwerte für die Feldmessungen ermittelt werden. Es bleibt damit ungeklärt ob und ab welchen Niederschlagsintensitäten bei natürlichen Regenereignissen ähnliche Messprobleme wie in den Laborversuchen auftreten könnten. Laut Angabe der Campbell Scientific, Inc. (2006) ist die Messung bis zu einer Niederschlagsintensität von 400 mm/h möglich.

Bei der Auswertung der Ausgabefunktion Art der Niederschlagsklassifizierung zeigten sich einige Messfehler. In den Laborversuchen wurden neben Nieselregen und Regen auch Eispellets detektiert. Auch in den Feldversuchen wurden in einigen 60-Sekunden-Messintervallen Eispellets und Hagelkörner aufgezeichnet. Aufgrund des gleichen linearen Anstiegs sowohl in den Labor- als auch in den Feldmessungen, muss davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um Fehlmessungen handelte. Der Anteil der detektierten Eispellets an den detektierten Gesamtpartikeln ist allerdings vernachlässigbar klein.

**Ausgabefunktionen**

Bei der Wahl der geeignetsten Ausgabefunktion für weitere Berechnungen, sind der Verwendungszweck und die benötigte Genauigkeit der Daten von entscheidender Bedeutung. Die Ausgabefunktionen Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe geben zufolge der intern korrigierten Ausgabewerte der Unknown-Partikel die beste Näherung für die tatsächliche Niederschlagsintensität wieder. Die Verwendung der Ausgabefunktion Tropfengrößenverteilung (TGV) ist angesichts der Verwendung der schmalen Klassenbreiten die akkurateste Ausgabeform für die tatsächlich detektierten Tropfengrößen. Die Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix bietet durch Ausgabe der Tropfengrößen mit zugehörigen Fallgeschwindigkeiten die Ausgangsbasis für sehr anschauliche Tropfengrößen-Fallgeschwindigkeitsdarstellungen und ist für die Berechnung der kinetischen Energie die beste Wahl. Die Ausgabefunktionen Mittlere Größe und Mittlere Geschwindigkeit zeigen gute Übereinstimmung mit den händisch gebildeten Mittelwerten aus Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix und Tropfengrößenverteilung (TGV) und können für grobe Angaben der Durchschnittswerte verwendet werden. Allerdings ist noch einmal zu betonen, dass nur für die Ausgabefunktion Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe eine interne Korrektur der Unknown-Partikel durch das Distrometer vorgenommen wird und damit bei sämtlichen weiteren Ausgabefunktionen Tropfen verloren gehen.

**Tropfengrößenverteilungen**

Die Tropfengrößenverteilungen für einzelne 60-Sekunden-Messintervalle unterscheiden sich selbst bei gleichen Niederschlagsintensitäten sehr stark voneinander und weisen innerhalb weniger Minuten völlig unterschiedliche Verläufe auf. Es ist daher nicht möglich Tropfengrößenverteilungen für bestimmte Niederschlagsintensitäten vorherzusagen, da in natürlichen Regenereignissen die Bedingungen sehr schnell wechseln und die Tropfengrößen beeinflussen. Beim Vergleich der Regenereignisse zeigte sich, dass Regenereignisse mit ähnlichen zeitlichen Verläufen der Niederschlagsintensität auch ähnliche Tropfengrößenverteilungen aufwiesen. Die Tropfengrößenverteilungen waren mithilfe der Gamma-Verteilung von Ulbrich und Atlas (1984) gut beschreibbar.

**Kinetische Energie**

Die mithilfe der unterschiedlichen Ausgabefunktionen ermittelte kinetische Energie, zeigte sehr gute Übereinstimmungen mit bereits vorhandenen Werten der Literaturrecherche. Als geeignetste Ausgabefunktion kann die Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix empfohlen werden, da nur in dieser Ausgabefunktion die tatsächlichen Fallgeschwindigkeiten der Tropfen gemessen werden. Eine Möglichkeit zur Korrektur der Unknown-Partikel könnte sein, die berechneten Werte der kinetischen Energie auf Basis der Campbell 34x34-Datenmatrix, um einen Faktor zu erhöhen, der dem Unterschied zwischen dem intern korrigierten Wert der Ausgabefunktion Niederschlagsintensität und der ermittelten Niederschlagsintensität der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix entspricht.

**Ausblick**

Das Distrometer PWS100 bietet dank der großen Menge an Ausgabedaten sehr viele Niederschlagsinformationen. Aufgrund der optischen Messtechnik konnten bei zu hohen Tropfenanzahlen in den Labormessungen nicht alle zu messenden Partikel korrekt erfasst werden. Um noch bessere Aussagen über die Zuverlässigkeit der Messung in natürlichen Regenereignissen treffen zu können, wäre eine Versuchsreihe mit Referenzwerten für Feldmessdaten von großer Bedeutung. Bei langen Versuchsreihen ist ein gutes Datenmanagement angesichts der enormen Menge an Daten von Vorteil.

# 5. Literaturverzeichnis

Abudi, I., G. Carmi und P. Berliner, 2012: Rainfall simulator for field runoff studies. Journal of Hydrology, 454–455, 76–81.

Beard, K., und H. Pruppacher, 1969: A determination of the terminal velocity and drag of small water drops by means of a wind tunnel. Journal of the Atmospheric Sciences, 26, 1066-1072.

Beard, K. V., 1976: Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft. Journal of the Atmospheric Sciences, 34, 851-864.

Beard, K. V., und C. Chuang, 1987: A new model for the equilibrium shape of raindrops. Journal of the Atmospheric Sciences, 44, 1509–1524.

Bentley, W. A., 1904: Studies of raindrops and raindrop phenomena. Monthly Weather Review, 32, 450-456.

Best, A.C., 1950a: The size distribution of raindrops. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 76, 16-36.

Best, A.C., 1950b: Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 76, 302-311.

Bisal, F., 1960: The effect of raindrop size and impact velocity on sand-splash. Canadian Journal of Soil Science, 40, 242-245.

Blanchard, D. C., 1950: The behavior of water drops at terminal velocity. Transactions of the American Geophysical Union, 31, 836-842.

Böhm, H. P., 1989: A General Equation for the Terminal Fall Speed of Solid Hydrometeors. Journal of the Atmospheric Sciences, 46, 2419-2427.

Bradley, S. G., und C. D. Stow, 1974: The Measurement of Charge and Size of Raindrops: Part I. The Distrometer. Journal of Applied Meteorology, 13, 114-130.

Campbell Scientific, Inc., 2006-2012: PWS100 Present Weather Sensor. Instruction Manual.

Davies, C.N., 1942: Unpublished Ministry of Supply reports quoted by Sutton in Air Ministry report, Meteor. Res. Paper, 40, 9 pp.

Defant, A., 1905: Gesetzmäßigkeiten in der Verteilung der verschiedenen Tropfengrößen bei Regenfällen. Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, 114, 583-646.

Dingle, A. N., und Y. Lee, 1972: Terminal Fallspeeds of Raindrops. Journal of Applied Meteorology, 11, 877-879.

Ellis, R.A, A. P. Sandford, G. E. Jones, J. Richards, J. Petzing und J. M. Coupland, 2006: New laser technology to determine present weather parameters. Measurement Science and Technology, 17, pp. 1715-1722

Foote, G. B., 1969: On the internal circulation and shape of large raindrops. Journal of the Atmospheric Sciences, 26, 179-181.

Foote, G. B., und P. S. du Toit, 1969: Terminal velocities of raindrops aloft. Journal of Applied Meteorology, 8, 249-253.

Fujiwara, M., 1965: Raindrop-size distribution from individual storms. Journal of the Atmospheric Sciences, 22, 585-591.

Gorgucci, E., G. Scarchilli, V. Chandrasekar und V. N. Bringi, 2000: Measurement of Mean Raindrop Shape from Polarimetric Radar Observations, Journal of the Atmospheric Sciences, 57, 3406-3413.

Green, A. W., 1975: An Approximation for the Shapes of Large Raindrops, Journal of Applied Meteorology, 14, 1578–1583.

Gunn, R., und G. D. Kinzer, 1949: The terminal velocity of fall for droplets in stagnant air. Journal of Meteorology, 6, 243-248.

Hodson, M.C., 1986: Raindrop Size Distribution, Journal of Climate and Applied Meteorology, 25, 1070-1074.

Jameson, A. R., und A. B. Kostinski, 2001: What is a Raindrop Size Distribution?, Bulletin of the American Meteorological Society, 82, 1169-1177.

Jones, D. M., 1959: The shape of raindrops. Journal of Meteorology, 16, 504-510.

Joss, J., und E. G. Gori, 1978: Shape of raindrop size distributions. Journal of Applied Meteorology, 17, 1054-1061.

König, L. R., 1965: Drop freezing through drop breakup. Journal of the Atmospheric Sciences, 22, 448-451.

Langmuir, I., 1948: Production of rain by a chain reaction in cumulus clouds at temperatures above freezing. Journal of Meteorology, 5, 175-192.

Laws, J. O., 1941: Measurement of the fall velocity of water-drops and raindrops. Transactions of the American Geophysical Union, 22, 709-721.

Laws, J. O., und D. A. Parsons, 1943: The relation of raindrop size to intensity. Transactions of the American Geophysical Union, 26, 452-460.

LeClair, B. P., A. E. Hamielec, H. R. Pruppacher und W. D. Hall, 1972: A theoretical and experimental study of the internal circulation in water drops falling at terminal velocity in air. Journal of the Atmospheric Sciences, 29, 728-740.

Lee, G.W., und I. Zawadzki, 2004: Variability of Drop Size Distributions: Time-Scale Dependence of the Variability and Its Effects on Rain Estimation, Journal of Applied Meteorology, 44, 241-255.

Lenard, P., 1904: Über Regen. Meteorologische Zeitschrift, 21, 248-262.

Magono, C., 1954: On the shape of water drops falling in stagnant air. Journal of Meteorology, 11, 77-79.

Marshall, J. S., und W. M. K. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. Journal of Meteorology, 5, 165-166.

McDonald, J. E., 1954: The shape and aerodynamics of large raindrops. Journal of Meteorology, 11, 478-494.

Pruppacher, H. R., und R. L. Pitter, 1971: A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops. Journal of the Atmospheric Sciences, 28, 86-94.

Renard, K. G., und J.R. Freimund, 1994: Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE, Journal of Hydrology, 157, 287-306.

Rose, C.W., 1960: Soil detachment caused by rainfall. Soil Science, 89, 28-35.

Rosewell, C. J., 1986: Rainfall kinetic energy in Eastern Australia. Journal of Climate and Applied Meteorology, 25, 1695-1701.

Sanchez-Moreno, J. F., C.M. Mannaerts, V. Jetten und M. Löffler-Mang, 2012: Rainfall kinetic energy–intensity and rainfall momentum–intensity relationships for Cape Verde, Journal of Hydrology, 454–455, 131–140.

Schmidt, W., 1909: Eine unmittelbare Bestimmung der Fallgeschwindigkeit von Regentropfen. Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, 118(2A), 71-84.

Sheppard, B. E., 1990: Measurement of raindrop size distributionusing a small Doppler radar. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 7, 255–268.

Sheppard, B. E., und P. I. Joe, 1994: Comparison of raindrop size distribution measurements by a Joss–Waldvogel disdrometer, a PMS 2DG spectrometer, and a POSS Doppler radar. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 11, 874–887.

Spilhaus, A. F., 1948: Raindrop size, shape and falling speed. Journal of Meteorology, 5, 108-110.

Sutton, O. G., 1942: Investigations on falling drops carried out at the Chemical Defense Experimental Station, Porton. Meteor. Res. Paper, 40, 9 pp.

Ulbrich, C. W., 1983: Natural variations in the analytical form of raindrop size distributions, Journal of Climate and Applied Meteorology, 22, 1764–1775.

Ulbrich, C. W., und D. Atlas, 1984: Assessment of the contribution of differantial polarization to improved rainfall measurements. Radio Science, 19, 49-57.

Van Dijk, A.I.J.M., L.A. Bruijnzeel und C. J. Rosewell, 2002: Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal, Journal of Hydrology, 261, 1-23.

Waldvogel, A., 1974: The $N_0$ jump of raindrop spectra. Journal of the Atmospheric Sciences, 31, 1067-1078.

Wischmeier, W. H., und D. D. Smith, 1958: Rainfall energy and ist relation to soil loss. Transactions of the American Geophysical Union, 39, 285-291.

Wischmeier, W.H., und D. D. Smith, 1978: Predicting Rainfall Erosion Losses, Agricultural Handbook 537. Science and Education Administration, USDA.

Wobus, H. B., F. W. Murray und L. R. König, 1971: Calculation of the terminal velocity of water drops. Journal of Applied Meteorology, 10, 751-754.

Woo, S., und A. E. Hamielec, 1971: A numerical method of determining the rate of evaporation of small waterdrops falling at terminal velocity in air. Journal of the Atmospheric Sciences, 28, 1448-1454.

**Onlinequellen:**

NÖ Atlas,
http://atlas.noe.gv.at/webgisatlas/(S(20dkrmglrmkrnhfqqrcfj21g))/init.aspx?karte=atlas_gst
(29.06.2017)

Universität Wien,
https://www.univie.ac.at/mikroskopie/1_grundlagen/optik/strahlenoptik/2d_totalrefelxion.htm
(25.04.2017)

# 6. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Wassertropfen in der Fallphase aus Magono (1953) ... 3

Abb. 2: Sehr großer Wassertropfen mit Einbuchtung an der Unterseite aus König (1965) ... 3

Abb. 3: Berechnungsmodelle für Tropfenformen verschiedener Größen, links: Durchmesser 1,1 mm, rechts: Durchmesser 4,0 mm aus Pruppacher und Pitter (1971) ... 4

Abb. 4: Achsenbezeichnungen eines abgeplatteten Regentropfens aus Jones (1959) ... 4

Abb. 5: Tropfengrößen-Fallgeschwindigkeitsbeziehung bei verschiedenen Druck- und Temperaturbedingungen aus Foote und du Toit (1969) ... 6

Abb. 6: Turbulente Strömung im Sog eines großen Tropfens aus Beard (1976) ... 9

Abb. 7: Zerplatzen eines Tropfens aus König (1965) ... 9

Abb. 8: Distrometer PWS100 Draufsicht aus Ellis et al. (2006) ... 12

Abb. 9: Distrometer PWS 100 Seitenansicht aus Ellis et al. (2006) ... 12

Abb. 10: Prinzipskizze der Messung von flüssigem Niederschlag (Ellis et al., 2006) ... 13

Abb. 11: Lichtstreuung an einem kristallinen Teilchen aus Ellis et al. (2006) ... 15

Abb. 12: Tropfengrößenverteilung (TGV) eines 60-Sekunden-Messintervalls im Juli 2016 mit einer Niederschlagsintensität von 162 mm/h ... 18

Abb. 13: Zweidimensionale Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix bei der Datenauswertung in EXCEL ... 22

Abb. 14: Umgestaltete Datenmatrix für ein 60-Sekunden-Messintervall der Feldmessung mit einer Niederschlagsintensität von 153 mm/h ... 23

Abb. 15: Regensimulator ... 25

Abb. 16: Steuerungseinheit des Regensimulators ... 25

Abb. 17: Anordnung der Auffangschalen unter dem Regensimulator ... 27

Abb. 18: Beziehung zwischen sweeps/min und Regenintensität für alle 112 Auffangschalen ... 28

Abb. 19: Beziehung zwischen sweeps/min und Regenintensität für die Auffangschalen 49 und 50 .. 28

Abb. 20: Intensitätsverteilung der gewogenen Auffangschalen bei 120 sweeps /min ... 29

Abb. 21: Auffangschalenschalen zur Ermittlung der Intensitätsverteilung unter dem Regensimulator ... 29

Abb. 22: Distrometer mit Auffangschalen im Labor ... 30

Abb. 23: Draufsicht Distrometer mit skizziertem Messbereich (rotes Rechteck) ... 30

Abb. 24: Beziehung zwischen sweeps/min und der Niederschlagsintensität des Regensimulators .... 31

Abb. 25: Neue Versuchsanordnung mit nur einer Auffangschale ... 32

Abb. 26: Beziehung zwischen sweeps/min und der Niederschlagsintensität bei veränderter Versuchsanordnung ... 32

Abb. 27: Kartenausschnitt mit dem Aufstellungsort des Distrometers in Niederösterreich (NÖ Atlas, 2017) ... 33

Abb. 28: Aufstellung des Distrometers für die Messungen im Feld ... 34

Abb. 29: Batterie zur Sicherstellung der Energieversorgung des PWS100 ..... 34

Abb. 30: Fertige Versuchsanordnung mit Distrometer, Solarpaneelen, Verkabelung und in der Hütte untergebrachter Batterie. ..... 34

Abb. 31: Vergleich der berechneten Regenintensitäten der verschiedenen Ausgabefunktionen mit dem Bezugswert der Ausgabefunktion Niederschlagsintensität ..... 40

Abb. 32: Aufgezeichnete Nieselregenpartikel ..... 43

Abb. 33: Aufgezeichnete Regenpartikel ..... 43

Abb. 34: Aufgezeichnete Error-Partikel ..... 44

Abb. 35: Aufgezeichnete Unknown-Partikel ..... 44

Abb. 36: Aufgezeichnete Eispartikel ..... 44

Abb. 37: . Gesamtverteilung der Art der Niederschlagsklassifizierung ..... 45

Abb. 38: Tropfengrößenverteilung (TGV) eines 60-Sekunden-Messintervalls des Regensimulators mit 60 mm/h Regenintensität ..... 47

Abb. 39: Tropfengrößenverteilung (TGV) eines 60-Sekunden-Messintervalls der Feldmessung mit 162 mm/h Regenintensität ..... 47

Abb. 40: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für eine Regensimulator-Messung mit 16,1 mm/h Regenintensität, 20 min Regendauer, 2071 Unknown-Partikel ..... 48

Abb. 41: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für eine Feldmessung mit 16,1 mm/h Regenintensität, 20 min Regendauer, 418 Unknown-Partikel ..... 49

Abb. 42: Tropfengrößenverteilungen aus Hodson (1986) ..... 50

Abb. 43: Tropfengrößenverteilung aus Fujiwara (1965) ..... 50

Abb. 44: Tropfengrößenverteilung für den gesamten Messzeitraum der Feldmessungen ..... 52

Abb. 45: Tropfengrößenverteilungen der einzelnen Regenereignisse ..... 52

Abb. 46: Verlauf der Regenintensität über die Dauer der Regenereignisse ..... 53

Abb. 47: Drei 60-Sekunden-Messintervalle innerhalb eines Regenereignisses ..... 54

Abb. 48: Vergleich der Tropfengrößenverteilungen einzelner 60-Sekunden-Messintervalle aus der Feldmessung mit einem 60-Sekunden-Messintervall des Regensimulators ..... 54

Abb. 49: Versuchsauswertung der Splash-Cups mit der Beziehung zwischen Tropfengröße und Bodenverlagerung aus Bisal (1960) ..... 55

Abb. 50: Versuchsauswertung der Splash-Cups mit der Beziehung zwischen Tropfenfallgeschwindigkeit und Bodenverlagerung aus Bisal (1960) ..... 55

Abb. 51: Tropfengrößenverteilung der Ausgabefunktion Campbell Scientific 34x34-Datenmatix ..... 59

Abb. 52: Tropfengrößenverteilung der Ausgabefunktion Tropfengrößenverteilung (TGV) ..... 59

Abb. 53: Tropfengrößenverteilung der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix auf die Klassenbreiten der Ausgabefunktion Tropfengrößenverteilung (TGV) gemittelt ..... 60

Abb. 54: Vergleich der Tropfengrößenverteilungen der verschiedenen Ausgabefunktionen, Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix, gemittelte Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix, Tropfengrößenverteilung (TGV) ..... 60

Abb. 55: Kinetische Energie einzelner 60-Sekunden-Messintervalle ..... 62

Abb. 56: Standardabweichung zwischen den Ergebnissen der Berechnungsvarianten für die kinetische Energie der fünf Regenereignisse im Juli 2016 ..... 64

Abb. 57: Vergleich der kinetischen Energie für Stürme aus Van Dijk et al. (2002) ..... 65

Abb. 58: Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und kinetischer Energie für das Regenereignis vom 21.07.2016 ..... 66

Abb. 59: Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und kinetischer Energie für das Regenereignis vom 27.07.2016 ..... 66

Abb. 60: Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und kinetischer Energie bezogen auf 1 mm Niederschlagshöhe für das Regenereignis vom 21.07.2016 ..... 67

Abb. 61: KEmm-I Daten mit angepassten Näherungskurven aus Van Dijk et al. (2002), basierend auf den Messdaten von Laws und Parsons (1943) und der logarithmischen Gleichung von Wischmeier und Smith (1958, 1978) ..... 68

Abb. 62: KEmm-I Daten mit Exponentialkurve aus Sanchez-Moreno et al. (2012) ..... 68

Abb. 63: Hysterese der KEmm-I-Beziehung für das Regenereignis vom 21.07.2016 ..... 69

Abb. 64: Hysterese der KEmm-I-Beziehung für ein Regenereignis aus Van Dijk et al. (2002); die unterbrochene Linie zeigt die Messergebnisse, während die volle Linie die Berechnungen von Rosewell (1986) darstellt ..... 69

Abb. 65: Zeitliche Verläufe von Regenintensität und kinetischer Energie für das Regenereignis vom 27.07.2016 ..... 70

Abb. 66: zeitliche Verläufe der Regenintensität und der kinetischer Energie für das Regenereignis vom 21.07.2016 ..... 70

Abb. 67: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für ein 60-Sekunden-Messintervall mit einer Regenintensität von 2,2 mm/h am Beginn des Regenereignisses ..... 71

Abb. 68: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für ein 60-Sekunden-Messintervall mit einer Regenintensität von 2,2 mm/h am Ende des Regenereignisses ..... 71

Abb. 69: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für ein 60-Sekunden-Messintervall mit einer Intensität von 2,2 mm/h am Beginn des Regenereignisses ..... 72

Abb. 70: Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für ein 60-Sekunden-Messintervall mit einer Intensität von 2,2 mm/h am Ende des Regenereignisses ..... 72

# 7. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Ausgabeparameter aus Campbell Scientific, Inc. (2006) ..... 16

Tab. 2: Ausgabeparameter Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe für ein 60-Sekunden-Messintervall im Juli 2016 ..... 18

Tab. 3: Ausschnitt der Ausgabeparameter Tropfengrößenverteilung (TGV) von 0,0 mm bis 1,0 mm Durchmesser für ein 60-Sekunden-Messintervall im Juli 2016 ..... 18

Tab. 4: Ausgabeparameter Mittlere Geschwindigkeit und Mittlere Größe für ein 60-Sekunden-Messintervall im Juli 2016 ..... 19

Tab. 5: Ausgabeparameter Art der Niederschlagsklassifizierung für ein 60-Sekunden-Messintervall im Juli 2016 ..... 19

Tab. 6: Ausgabeparameter Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix für 2,0 mm bis 2,4 mm eines 60-Sekunden-Messintervall im Juli 2016 ..... 22

Tab. 7: Ausgangswert für die Berechnung durch Tropfengrößenverteilung (TGV) ..... 38

Tab. 8: Gegenüberstellung der gemessenen bzw. berechneten hydrometrischen Vergleichsgrößen. 40

Tab. 9: Vergleichswerte ohne interne Korrektur des Distrometers für Niederschlagsintensität und akkumulierte Niederschlagshöhe ..... 41

Tab. 10: Übereinstimmung der ausgegebenen Tropfenanzahl der unterschiedlichen Ausgabefunktionen ..... 42

Tab. 11: Prozentanteile der Niederschlagsarten an der Gesamttropfenanzahl für einzelne Niederschlagsereignisse ..... 46

Tab. 12: Gegenüberstellung der Ergebnisse der kinetischen Energie für Regenereignisse (rechte Tabellenseite), mit Werten aus der Literaturrecherche (linke Tabellenseite) aus Van Dijk et al.(2002) ..... 65

Tab. 13: Unterschiede der Parameter zweier 60- Sekunden-Messintervalle mit Regenintensitäten von jeweils 2,2 mm/h, zu Beginn und am Ende desselben Regenereignisses ..... 71

Tab. 14: Unterschiede der Parameter zweier 60- Sekunden-Messintervalle mit Regenintensitäten von jeweils 4,4 mm/h, zu Beginn und am Ende desselben Regenereignisses ..... 72

# 8. Anhang

**A1: Klassengrenzen der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix laut Campbell Scientific, Inc. (2006) ..... 85**

**A2: Auswertungsdaten der Ermittlung der Intensitätsverteilung des Regensimulators ..... 87**

**A3: Auswertungsdaten der Distrometerversuche im Labor ..... 100**

**A4: Boxplots der Art der Niederschlagsklassifizierung für die Regenereignisse der Feldversuche ..... 110**

**A5: Datenfiles der Distrometerausgabe sämtlicher Labor- und Feldversuche dieser Arbeit auf CD ..... 111**

# A1: Klassengrenzen der Campbell Scientific 34x34-Datenmatrix laut Campbell Scientific, Inc. (2006)

| Particle diameter class | | |
|---|---|---|
| Class | Diameter [mm] | Class width [mm] |
| 1 | =>0.00 | 0.1 |
| 2 | =>0.10 | 0.1 |
| 3 | =>0.20 | 0.1 |
| 4 | =>0.30 | 0.1 |
| 5 | =>0.40 | 0.1 |
| 6 | =>0.50 | 0.1 |
| 7 | =>0.60 | 0.1 |
| 8 | =>0.70 | 0.1 |
| 9 | =>0.80 | 0.1 |
| 10 | =>0.90 | 0.1 |
| 11 | =>1.00 | 0.2 |
| 12 | =>1.20 | 0.2 |
| 13 | =>1.40 | 0.2 |
| 14 | =>1.60 | 0.2 |
| 15 | =>1.80 | 0.2 |
| 16 | =>2.00 | 0.4 |
| 17 | =>2.40 | 0.4 |
| 18 | =>2.80 | 0.4 |
| 19 | =>3.20 | 0.4 |
| 20 | =>3.60 | 0.4 |
| 21 | =>4.00 | 0.8 |
| 22 | =>4.80 | 0.8 |
| 23 | =>5.60 | 0.8 |
| 24 | =>6.40 | 0.8 |
| 25 | =>7.20 | 0.8 |
| 26 | =>8.00 | 1.6 |
| 27 | =>9.60 | 1.6 |
| 28 | =>11.20 | 1.6 |
| 29 | =>12.80 | 1.6 |
| 30 | =>14.40 | 1.6 |
| 31 | =>16.00 | 3.2 |
| 32 | =>19.20 | 3.2 |
| 33 | =>22.40 | 3.2 |
| 34 | =>25.60 | 74.4 |

| Particle speed class | | |
|---|---|---|
| Class | Speed [m/s] | Class width [m/s] |
| 1 | =>0.00 | 0.1 |
| 2 | =>0.10 | 0.1 |
| 3 | =>0.20 | 0.1 |
| 4 | =>0.30 | 0.1 |
| 5 | =>0.40 | 0.1 |
| 6 | =>0.50 | 0.1 |
| 7 | =>0.60 | 0.1 |
| 8 | =>0.70 | 0.1 |
| 9 | =>0.80 | 0.1 |
| 10 | =>0.90 | 0.1 |
| 11 | =>1.00 | 0.2 |
| 12 | =>1.20 | 0.2 |
| 13 | =>1.40 | 0.2 |
| 14 | =>1.60 | 0.2 |
| 15 | =>1.80 | 0.2 |
| 16 | =>2.00 | 0.4 |
| 17 | =>2.40 | 0.4 |
| 18 | =>2.80 | 0.4 |
| 19 | =>3.20 | 0.4 |
| 20 | =>3.60 | 0.4 |
| 21 | =>4.00 | 0.8 |
| 22 | =>4.80 | 0.8 |
| 23 | =>5.60 | 0.8 |
| 24 | =>6.40 | 0.8 |
| 25 | =>7.20 | 0.8 |
| 26 | =>8.00 | 1.6 |
| 27 | =>9.60 | 1.6 |
| 28 | =>11.20 | 1.6 |
| 29 | =>12.80 | 1.6 |
| 30 | =>14.40 | 1.6 |
| 31 | =>16.00 | 3.2 |
| 32 | =>19.20 | 3.2 |
| 33 | =>22.40 | 3.2 |
| 34 | =>25.60 | 74.4 |

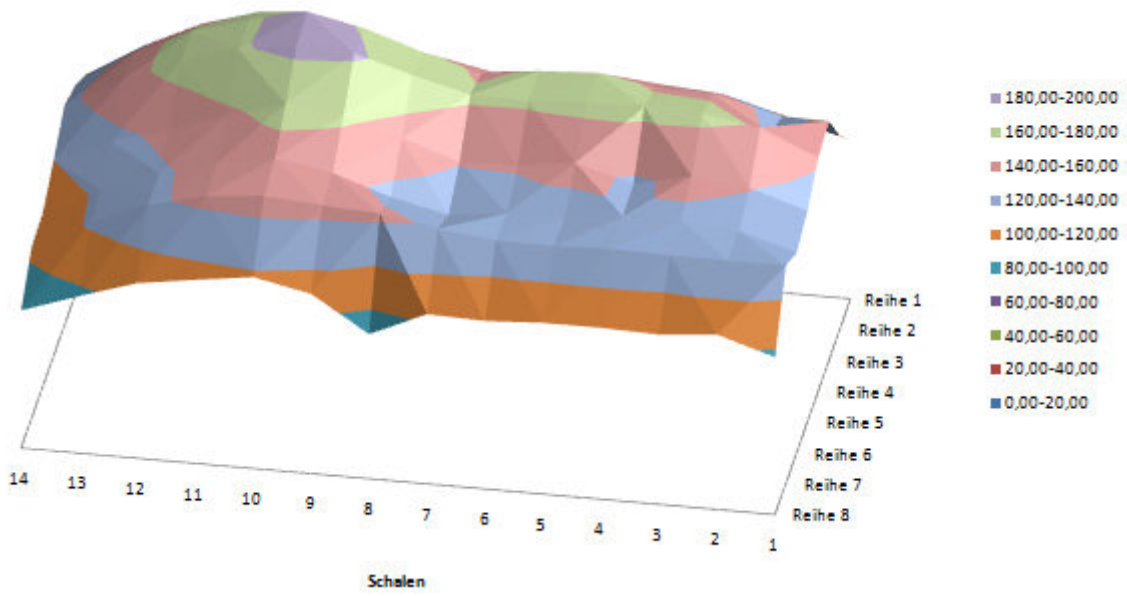
# A2: Auswertungsdaten der Ermittlung der Intensitätsverteilung des Regensimulators

| | |
|---|---|
| 20 | sweeps/min |
| 1,5 | Lag |
| 20 | min Duration |

| | Schale Nr. | Gesamtgew. (g) | Schalengew. (g) | Wassergew. (g) | Intensität (mm/h) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 296,93 | 198,86 | 98,07 | 7,81 |
| | 2 | 304,82 | 197,10 | 107,72 | 8,58 |
| | 3 | 310,03 | 193,39 | 116,64 | 9,29 |
| | 4 | 311,17 | 195,28 | 115,89 | 9,23 |
| | 5 | 313,00 | 197,16 | 115,84 | 9,23 |
| | 6 | 306,85 | 192,96 | 113,89 | 9,08 |
| | 7 | 312,20 | 193,21 | 118,99 | 9,48 |
| | 8 | 321,72 | 198,88 | 122,84 | 9,79 |
| | 9 | 324,28 | 195,51 | 128,77 | 10,26 |
| | 10 | 328,39 | 196,79 | 131,60 | 10,49 |
| | 11 | 330,34 | 196,81 | 133,53 | 10,64 |
| | 12 | 321,60 | 193,89 | 127,71 | 10,18 |
| | 13 | 307,82 | 195,57 | 112,25 | 8,94 |
| | 14 | 293,15 | 196,35 | 96,80 | 7,71 |
| 2. Reihe | 15 | 315,90 | 197,23 | 118,67 | 9,46 |
| | 16 | 324,02 | 196,05 | 127,97 | 10,20 |
| | 17 | 330,56 | 192,07 | 138,49 | 11,04 |
| | 18 | 340,30 | 199,41 | 140,89 | 11,23 |
| | 19 | 337,19 | 196,93 | 140,26 | 11,18 |
| | 20 | 334,70 | 194,46 | 140,24 | 11,18 |
| | 21 | 337,18 | 197,56 | 139,62 | 11,13 |
| | 22 | 333,47 | 190,84 | 142,63 | 11,37 |
| | 23 | 350,01 | 195,39 | 154,62 | 12,32 |
| | 24 | 359,66 | 196,05 | 163,61 | 13,04 |
| | 25 | 360,85 | 196,87 | 163,98 | 13,07 |
| | 26 | 349,27 | 195,73 | 153,54 | 12,24 |
| | 27 | 331,86 | 194,81 | 137,05 | 10,92 |
| | 28 | 311,70 | 195,45 | 116,25 | 9,26 |
| 3. Reihe | 29 | 346,51 | 199,48 | 147,03 | 11,72 |
| | 30 | 327,92 | 192,12 | 135,80 | 10,82 |
| | 31 | 351,95 | 194,34 | 157,61 | 12,56 |
| | 32 | 352,69 | 194,24 | 158,45 | 12,63 |
| | 33 | 362,81 | 198,62 | 164,19 | 13,08 |
| | 34 | 359,50 | 197,38 | 162,12 | 12,92 |
| | 35 | 350,02 | 192,81 | 157,21 | 12,53 |
| | 36 | 365,60 | 198,21 | 167,39 | 13,34 |
| | 37 | 375,14 | 196,44 | 178,70 | 14,24 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 38 | 377,37 | 191,23 | 186,14 | 14,83 |
| | 39 | 372,32 | 194,45 | 177,87 | 14,17 |
| | 40 | 361,71 | 194,02 | 167,69 | 13,36 |
| | 41 | 348,41 | 197,67 | 150,74 | 12,01 |
| | 42 | 317,79 | 189,43 | 128,36 | 10,23 |
| 4. Reihe | 43 | 336,83 | 193,44 | 143,39 | 11,43 |
| | 44 | 351,72 | 192,94 | 158,78 | 12,65 |
| | 45 | 359,08 | 194,81 | 164,27 | 13,09 |
| | 46 | 358,80 | 193,53 | 165,27 | 13,17 |
| | 47 | 360,63 | 195,99 | 164,64 | 13,12 |
| | 48 | 359,38 | 196,63 | 162,75 | 12,97 |
| | 49 | 357,50 | 194,20 | 163,30 | **13,01** |
| | 50 | 367,29 | 195,10 | 172,19 | **13,72** |
| | 51 | 374,28 | 191,74 | 182,54 | 14,55 |
| | 52 | 375,37 | 191,16 | 184,21 | 14,68 |
| | 53 | 373,55 | 194,99 | 178,56 | 14,23 |
| | 54 | 362,85 | 195,54 | 167,31 | 13,33 |
| | 55 | 348,78 | 195,44 | 153,34 | 12,22 |
| | 56 | 331,54 | 196,43 | 135,11 | 10,77 |
| 5. Reihe | 57 | 325,53 | 195,67 | 129,86 | 10,35 |
| | 58 | 336,58 | 195,86 | 140,72 | 11,21 |
| | 59 | 339,77 | 194,93 | 144,84 | 11,54 |
| | 60 | 332,26 | 195,29 | 136,97 | 10,91 |
| | 61 | 344,78 | 197,98 | 146,80 | 11,70 |
| | 62 | 337,26 | 195,56 | 141,70 | 11,29 |
| | 63 | - | | 141,00 | 11,24 |
| | 64 | 347,64 | 195,15 | 152,49 | 12,15 |
| | 65 | 359,53 | 196,01 | 163,52 | 13,03 |
| | 66 | 364,34 | 197,30 | 167,04 | 13,31 |
| | 67 | 347,31 | 190,43 | 156,88 | 12,50 |
| | 68 | 339,16 | 194,13 | 145,03 | 11,56 |
| | 69 | 329,39 | 194,72 | 134,67 | 10,73 |
| | 70 | 315,03 | 194,82 | 120,21 | 9,58 |
| 6. Reihe | 71 | 323,94 | 201,02 | 122,92 | 9,80 |
| | 72 | 328,29 | 195,19 | 133,10 | 10,61 |
| | 73 | 334,00 | 197,40 | 136,60 | 10,89 |
| | 74 | 329,53 | 193,59 | 135,94 | 10,83 |
| | 75 | 322,47 | 190,45 | 132,02 | 10,52 |
| | 76 | 325,42 | 193,89 | 131,53 | 10,48 |
| | 77 | 324,00 | 196,59 | 127,41 | 10,15 |
| | 78 | 327,17 | 192,01 | 135,16 | 10,77 |
| | 79 | 342,16 | 195,32 | 146,84 | 11,70 |
| | 80 | 351,28 | 198,60 | 152,68 | 12,17 |
| | 81 | 341,87 | 195,33 | 146,54 | 11,68 |
| | 82 | 336,67 | 199,24 | 137,43 | 10,95 |
| | 83 | 320,12 | 196,61 | 123,51 | 9,84 |
| | 84 | 304,25 | 197,49 | 106,76 | 8,51 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 7. Reihe | 85 | - | 200,94 | 134,00 | 10,68 |
| | 86 | - | 196,42 | 134,00 | 10,68 |
| | 87 | - | 196,38 | 134,00 | 10,68 |
| | 88 | 329,35 | 194,64 | 134,71 | 10,73 |
| | 89 | 327,84 | 194,47 | 133,37 | 10,63 |
| | 90 | 328,96 | 195,13 | 133,83 | 10,66 |
| | 91 | 334,94 | 197,22 | 137,72 | 10,97 |
| | 92 | 341,09 | 197,12 | 143,97 | 11,47 |
| | 93 | 339,86 | 194,15 | 145,71 | 11,61 |
| | 94 | 341,76 | 193,25 | 148,51 | 11,83 |
| | 95 | 339,69 | 194,65 | 145,04 | 11,56 |
| | 96 | 332,19 | 195,72 | 136,47 | 10,87 |
| | 97 | 316,79 | 194,72 | 122,07 | 9,73 |
| | 98 | 302,61 | 197,33 | 105,28 | 8,39 |
| 8. Reihe | 99 | 292,72 | 196,10 | 96,62 | 7,70 |
| | 100 | 305,53 | 198,18 | 107,35 | 8,55 |
| | 101 | 299,96 | 195,71 | 104,25 | 8,31 |
| | 102 | 302,28 | 197,00 | 105,28 | 8,39 |
| | 103 | 296,21 | 191,05 | 105,16 | 8,38 |
| | 104 | 300,89 | 197,69 | 103,20 | 8,22 |
| | 105 | 298,69 | 194,48 | 104,21 | 8,30 |
| | 106 | 282,99 | 194,14 | 88,85 | 7,08 |
| | 107 | 305,46 | 195,04 | 110,42 | 8,80 |
| | 108 | 310,57 | 193,03 | 117,54 | 9,37 |
| | 109 | 310,34 | 197,61 | 112,73 | 8,98 |
| | 110 | 303,55 | 196,05 | 107,50 | 8,57 |
| | 111 | 291,44 | 195,02 | 96,42 | 7,68 |
| | 112 | 277,98 | 193,47 | 84,51 | 6,73 |
| | | | | **Mittelwert:** | **10,94** **mm/h** |

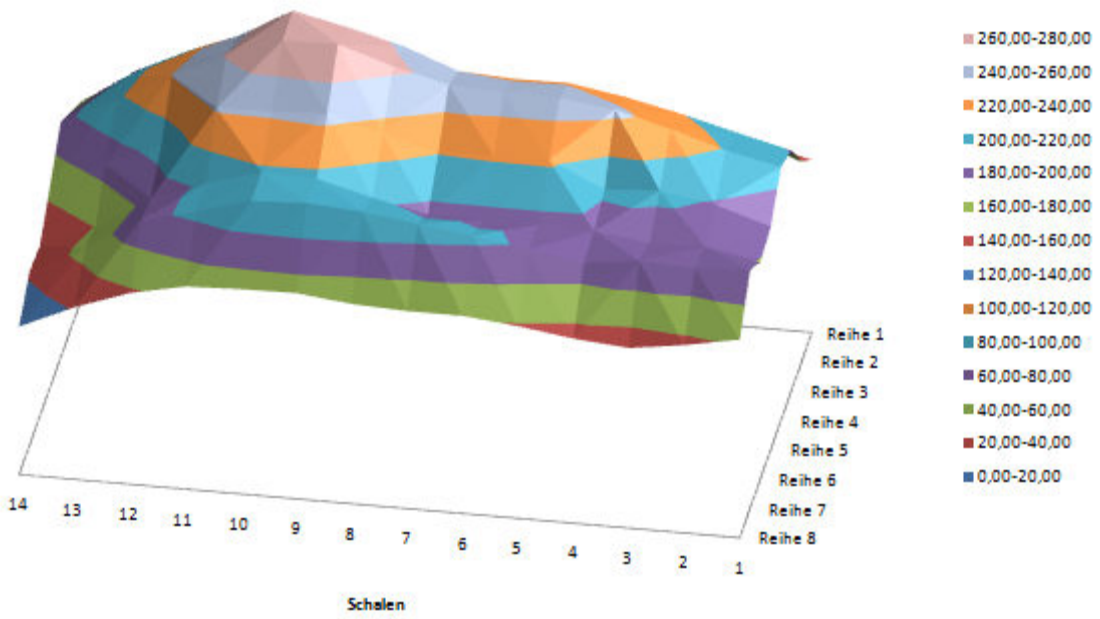


| | |
|---|---|
| 60 | sweeps/min |
| 0,5 | Lag |
| 10 | min Duration |

| | Schale Nr. | Gesamtgew. (g) | Schalengew. (g) | Wassergew. (g) | Intensität (mm/h) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 341,43 | 198,86 | 142,57 | 22,72 |
| | 2 | 348,83 | 197,10 | 151,73 | 24,18 |
| | 3 | 348,30 | 193,39 | 154,91 | 24,69 |
| | 4 | 357,25 | 195,28 | 161,97 | 25,81 |
| | 5 | 358,90 | 197,16 | 161,74 | 25,78 |
| | 6 | 355,60 | 192,96 | 162,64 | 25,92 |
| | 7 | 365,68 | 193,21 | 172,47 | 27,49 |
| | 8 | 384,54 | 198,88 | 185,66 | 29,59 |
| | 9 | 388,40 | 195,51 | 192,89 | 30,74 |
| | 10 | 389,55 | 196,79 | 192,76 | 30,72 |
| | 11 | 384,30 | 196,81 | 187,49 | 29,88 |
| | 12 | 375,38 | 193,89 | 181,49 | 28,92 |
| | 13 | 359,26 | 195,57 | 163,69 | 26,09 |
| | 14 | 338,00 | 196,35 | 141,65 | 22,58 |
| 2. Reihe | 15 | 362,43 | 197,23 | 165,20 | 26,33 |
| | 16 | 375,90 | 196,05 | 179,85 | 28,66 |
| | 17 | 385,26 | 192,07 | 193,19 | 30,79 |
| | 18 | 403,32 | 199,41 | 203,91 | 32,50 |
| | 19 | 401,33 | 196,93 | 204,40 | 32,58 |
| | 20 | 395,82 | 194,46 | 201,36 | 32,09 |
| | 21 | 401,67 | 197,56 | 204,11 | 32,53 |
| | 22 | 405,31 | 190,84 | 214,47 | 34,18 |
| | 23 | 429,69 | 195,39 | 234,30 | 37,34 |
| | 24 | 438,48 | 196,05 | 242,43 | 38,64 |
| | 25 | 428,14 | 196,87 | 231,27 | 36,86 |
| | 26 | 409,45 | 195,73 | 213,72 | 34,06 |
| | 27 | 387,22 | 194,81 | 192,41 | 30,67 |
| | 28 | 358,22 | 195,45 | 162,77 | 25,94 |
| 3. Reihe | 29 | 398,14 | 199,48 | 198,66 | 31,66 |
| | 30 | 401,67 | 192,12 | 209,55 | 33,40 |
| | 31 | 415,38 | 194,34 | 221,04 | 35,23 |
| | 32 | 425,06 | 194,24 | 230,82 | 36,79 |
| | 33 | 436,80 | 198,62 | 238,18 | 37,96 |
| | 34 | 435,11 | 197,38 | 237,73 | 37,89 |
| | 35 | 432,80 | 192,81 | 239,99 | 38,25 |
| | 36 | 454,84 | 198,21 | 256,63 | 40,90 |
| | 37 | 464,51 | 196,44 | 268,07 | 42,72 |
| | 38 | 469,22 | 191,23 | 277,99 | 44,30 |
| | 39 | 447,07 | 194,45 | 252,62 | 40,26 |
| | 40 | 426,83 | 194,02 | 232,81 | 37,10 |
| | 41 | 408,90 | 197,67 | 211,23 | 33,66 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 42 | 367,78 | 189,43 | 178,35 | 28,42 |
| 4. Reihe | 43 | 402,75 | 193,44 | 209,31 | 33,36 |
| | 44 | 412,02 | 192,94 | 219,08 | 34,92 |
| | 45 | 427,36 | 194,81 | 232,55 | 37,06 |
| | 46 | 438,08 | 193,53 | 244,55 | 38,98 |
| | 47 | 446,12 | 195,99 | 250,13 | 39,86 |
| | 48 | 447,36 | 196,63 | 250,73 | 39,96 |
| | 49 | 447,22 | 194,20 | 253,02 | **40,32** |
| | 50 | 459,29 | 195,10 | 264,19 | **42,11** |
| | 51 | 470,22 | 191,74 | 278,48 | 44,38 |
| | 52 | 468,62 | 191,16 | 277,46 | 44,22 |
| | 53 | 456,80 | 194,99 | 261,81 | 41,73 |
| | 54 | 435,89 | 195,54 | 240,35 | 38,31 |
| | 55 | 412,19 | 195,44 | 216,75 | 34,54 |
| | 56 | 390,32 | 196,43 | 193,89 | 30,90 |
| 5. Reihe | 57 | 379,74 | 195,67 | 184,07 | 29,34 |
| | 58 | 394,25 | 195,86 | 198,39 | 31,62 |
| | 59 | 400,68 | 194,93 | 205,75 | 32,79 |
| | 60 | 398,00 | 195,29 | 202,71 | 32,31 |
| | 61 | 421,15 | 197,98 | 223,17 | 35,57 |
| | 62 | 418,23 | 195,56 | 222,67 | 35,49 |
| | 63 | 416,62 | 196,27 | 220,35 | 35,12 |
| | 64 | 428,05 | 195,15 | 232,90 | 37,12 |
| | 65 | 441,79 | 196,01 | 245,78 | 39,17 |
| | 66 | 440,00 | 197,30 | 242,70 | 38,68 |
| | 67 | - | 190,43 | 242,00 | 38,57 |
| | 68 | 401,30 | 194,13 | 207,17 | 33,02 |
| | 69 | 382,58 | 194,72 | 187,86 | 29,94 |
| | 70 | 362,34 | 194,82 | 167,52 | 26,70 |
| 6. Reihe | 71 | 380,17 | 201,02 | 179,15 | 28,55 |
| | 72 | 383,03 | 195,19 | 187,84 | 29,94 |
| | 73 | 384,29 | 197,40 | 186,89 | 29,79 |
| | 74 | 386,10 | 193,59 | 192,51 | 30,68 |
| | 75 | 384,46 | 190,45 | 194,01 | 30,92 |
| | 76 | - | 193,89 | 194,00 | 30,92 |
| | 77 | 390,62 | 196,59 | 194,03 | 30,92 |
| | 78 | 396,12 | 192,01 | 204,11 | 32,53 |
| | 79 | 411,09 | 195,32 | 215,77 | 34,39 |
| | 80 | 415,78 | 198,60 | 217,18 | 34,61 |
| | 81 | 399,46 | 195,33 | 204,13 | 32,53 |
| | 82 | 386,51 | 199,24 | 187,27 | 29,85 |
| | 83 | 357,38 | 196,61 | 160,77 | 25,62 |
| | 84 | 338,19 | 197,49 | 140,70 | 22,42 |
| 7. Reihe | 85 | 397,82 | 200,94 | 196,88 | 31,38 |
| | 86 | 390,70 | 196,42 | 194,28 | 30,96 |
| | 87 | 392,72 | 196,38 | 196,34 | 31,29 |
| | 88 | 385,17 | 194,64 | 190,53 | 30,37 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 89 | 392,07 | 194,47 | 197,60 | 31,49 | |
| | 90 | 400,06 | 195,13 | 204,93 | 32,66 | |
| | 91 | 407,99 | 197,22 | 210,77 | 33,59 | |
| | 92 | 413,97 | 197,12 | 216,85 | 34,56 | |
| | 93 | 413,90 | 194,15 | 219,75 | 35,02 | |
| | 94 | 410,84 | 193,25 | 217,59 | 34,68 | |
| | 95 | 399,45 | 194,65 | 204,80 | 32,64 | |
| | 96 | 389,22 | 195,72 | 193,50 | 30,84 | |
| | 97 | 361,65 | 194,72 | 166,93 | 26,60 | |
| | 98 | 340,43 | 197,33 | 143,10 | 22,81 | |
| 8. Reihe | 99 | 359,74 | 196,10 | 163,64 | 26,08 | |
| | 100 | 353,19 | 198,18 | 155,01 | 24,70 | |
| | 101 | 344,30 | 195,71 | 148,59 | 23,68 | |
| | 102 | 349,37 | 197,00 | 152,37 | 24,28 | |
| | 103 | 349,57 | 191,05 | 158,52 | 25,26 | |
| | 104 | 360,74 | 197,69 | 163,05 | 25,99 | |
| | 105 | - | 194,48 | 163,00 | 25,98 | |
| | 106 | 358,92 | 194,14 | 164,78 | 26,26 | |
| | 107 | 364,81 | 195,04 | 169,77 | 27,06 | |
| | 108 | 262,79 | 193,03 | 169,00 | 26,93 | |
| | 109 | 364,76 | 197,61 | 167,15 | 26,64 | |
| | 110 | 353,84 | 196,05 | 157,79 | 25,15 | |
| | 111 | 337,08 | 195,02 | 142,06 | 22,64 | |
| | 112 | 315,54 | 193,47 | 122,07 | 19,45 | |
| | | | | **Mittelwert** | **31,92** | **mm/h** |

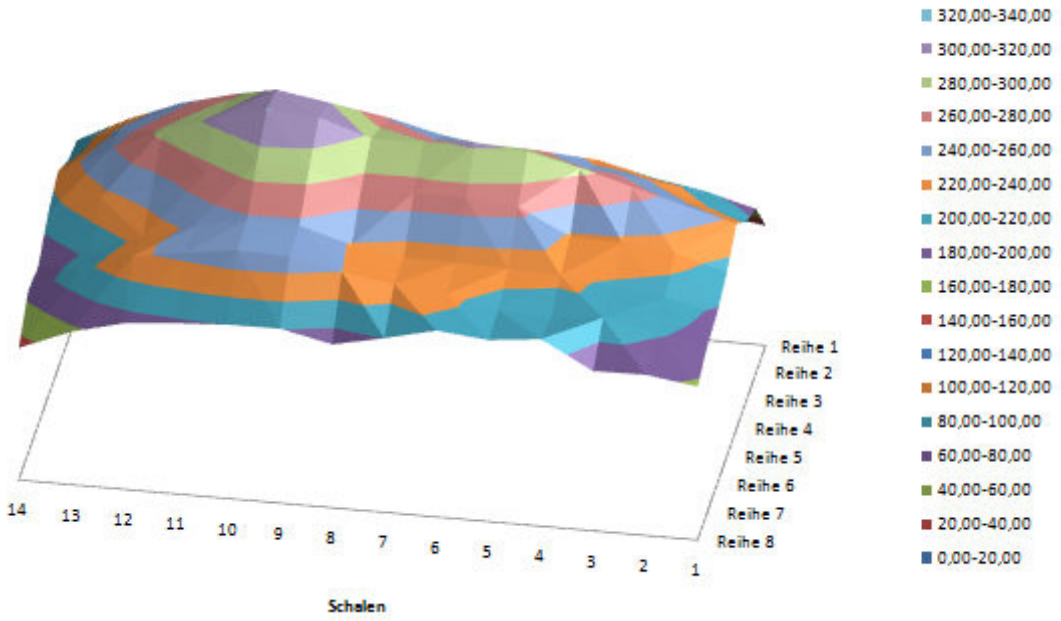


| | |
|---|---|
| 100 | sweeps/min |
| 0,3 | Lag |
| 7 | min Duration |

| | Schale Nr. | Gesamtgew. (g) | Schalengew. (g) | Wassergew.(g) | Intensität (mm/h) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 337,04 | 198,86 | 138,18 | 31,46 |
| | 2 | 343,16 | 197,10 | 146,06 | 33,25 |
| | 3 | 343,56 | 193,39 | 150,17 | 34,18 |
| | 4 | 353,27 | 195,28 | 157,99 | 35,96 |
| | 5 | 365,38 | 197,16 | 168,22 | 38,29 |
| | 6 | 366,04 | 192,96 | 173,08 | 39,40 |
| | 7 | 372,82 | 193,21 | 179,61 | 40,89 |
| | 8 | 390,25 | 198,88 | 191,37 | 43,56 |
| | 9 | 391,12 | 195,51 | 195,61 | 44,53 |
| | 10 | 398,44 | 196,79 | 201,65 | 45,90 |
| | 11 | 398,44 | 196,81 | 201,63 | 45,90 |
| | 12 | 385,26 | 193,89 | 191,37 | 43,56 |
| | 13 | 370,75 | 195,57 | 175,18 | 39,88 |
| | 14 | 348,35 | 196,35 | 152,00 | 34,60 |
| 2. Reihe | 15 | 386,78 | 197,23 | 189,55 | 43,15 |
| | 16 | 401,16 | 196,05 | 205,11 | 46,69 |
| | 17 | 407,15 | 192,07 | 215,08 | 48,96 |
| | 18 | 429,09 | 199,41 | 229,68 | 52,28 |
| | 19 | 429,98 | 196,93 | 233,05 | 53,05 |
| | 20 | 428,85 | 194,46 | 234,39 | 53,36 |
| | 21 | 440,09 | 197,56 | 242,53 | 55,21 |
| | 22 | 447,75 | 190,84 | 256,91 | 58,48 |
| | 23 | 460,48 | 195,39 | 265,09 | 60,35 |
| | 24 | 467,76 | 196,05 | 271,71 | 61,85 |
| | 25 | 465,45 | 196,87 | 268,58 | 61,14 |
| | 26 | 449,09 | 195,73 | 253,36 | 57,67 |
| | 27 | 424,68 | 194,81 | 229,87 | 52,33 |
| | 28 | 395,50 | 195,45 | 200,05 | 45,54 |
| 3. Reihe | 29 | 406,04 | 199,48 | 206,56 | 47,02 |
| | 30 | 416,67 | 192,12 | 224,55 | 51,12 |
| | 31 | 440,00 | 194,34 | 245,66 | 55,92 |
| | 32 | 444,77 | 194,24 | 250,53 | 57,03 |
| | 33 | 466,32 | 198,62 | 267,70 | 60,94 |
| | 34 | 464,60 | 197,38 | 267,22 | 60,83 |
| | 35 | 459,27 | 192,81 | 266,46 | 60,66 |
| | 36 | 476,52 | 198,21 | 278,31 | 63,35 |
| | 37 | 498,01 | 196,44 | 301,57 | 68,65 |
| | 38 | 502,33 | 191,23 | 311,10 | 70,82 |
| | 39 | 482,48 | 194,45 | 288,03 | 65,57 |
| | 40 | 463,13 | 194,02 | 269,11 | 61,26 |
| | 41 | 445,57 | 197,67 | 247,90 | 56,43 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 42 | 397,57 | 189,43 | 208,14 | 47,38 |
| 4. Reihe | 43 | 429,97 | 193,44 | 236,53 | 53,84 |
| | 44 | 445,07 | 192,94 | 252,13 | 57,39 |
| | 45 | 463,17 | 194,81 | 268,36 | 61,09 |
| | 46 | 478,46 | 193,53 | 284,93 | 64,86 |
| | 47 | 494,37 | 195,99 | 298,38 | 67,92 |
| | 48 | 499,67 | 196,63 | 303,04 | 68,98 |
| | 49 | 491,98 | 194,20 | 297,78 | **67,79** |
| | 50 | 492,85 | 195,10 | 297,75 | **67,78** |
| | 51 | 508,52 | 191,74 | 316,78 | 72,11 |
| | 52 | 511,70 | 191,16 | 320,54 | 72,97 |
| | 53 | 500,20 | 194,99 | 305,21 | 69,48 |
| | 54 | 480,32 | 195,54 | 284,78 | 64,83 |
| | 55 | 453,61 | 195,44 | 258,17 | 58,77 |
| | 56 | 423,38 | 196,43 | 226,95 | 51,66 |
| 5. Reihe | 57 | 407,94 | 195,67 | 212,27 | 48,32 |
| | 58 | 425,01 | 195,86 | 229,15 | 52,16 |
| | 59 | 431,25 | 194,93 | 236,32 | 53,80 |
| | 60 | 432,96 | 195,29 | 237,67 | 54,10 |
| | 61 | 464,64 | 197,98 | 266,66 | 60,70 |
| | 62 | 467,59 | 195,56 | 272,03 | 61,92 |
| | 63 | 468,34 | 196,27 | 272,07 | 61,93 |
| | 64 | 467,56 | 195,15 | 272,41 | 62,01 |
| | 65 | 485,28 | 196,01 | 289,27 | 65,85 |
| | 66 | 488,88 | 197,30 | 291,58 | 66,38 |
| | 67 | 464,07 | 190,43 | 273,64 | 62,29 |
| | 68 | 444,48 | 194,13 | 250,35 | 56,99 |
| | 69 | 429,64 | 194,72 | 234,92 | 53,48 |
| | 70 | 405,89 | 194,82 | 211,07 | 48,05 |
| 6. Reihe | 71 | 398,27 | 201,02 | 197,25 | 44,90 |
| | 72 | 405,63 | 195,19 | 210,44 | 47,90 |
| | 73 | 414,23 | 197,40 | 216,83 | 49,36 |
| | 74 | 418,41 | 193,59 | 224,82 | 51,18 |
| | 75 | 417,86 | 190,45 | 227,41 | 51,77 |
| | 76 | 422,86 | 193,89 | 228,97 | 52,12 |
| | 77 | 425,31 | 196,59 | 228,72 | 52,07 |
| | 78 | 430,46 | 192,01 | 238,45 | 54,28 |
| | 79 | 451,23 | 195,32 | 255,91 | 58,26 |
| | 80 | 455,98 | 198,60 | 257,38 | 58,59 |
| | 81 | 440,56 | 195,33 | 245,23 | 55,82 |
| | 82 | 425,19 | 199,24 | 225,95 | 51,44 |
| | 83 | 401,70 | 196,61 | 205,09 | 46,69 |
| | 84 | 379,56 | 197,49 | 182,07 | 41,45 |
| 7. Reihe | 85 | 392,99 | 200,94 | 192,05 | 43,72 |
| | 86 | 399,16 | 196,42 | 202,74 | 46,15 |
| | 87 | 409,85 | 196,38 | 213,47 | 48,59 |
| | 88 | 402,85 | 194,64 | 208,21 | 47,40 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 89 | 407,12 | 194,47 | 212,65 | 48,41 | |
| | 90 | 419,33 | 195,13 | 224,20 | 51,04 | |
| | 91 | 428,08 | 197,22 | 230,86 | 52,55 | |
| | 92 | 437,26 | 197,12 | 240,14 | 54,67 | |
| | 93 | 446,16 | 194,15 | 252,01 | 57,37 | |
| | 94 | 447,41 | 193,25 | 254,16 | 57,86 | |
| | 95 | 440,93 | 194,65 | 246,28 | 56,06 | |
| | 96 | 432,19 | 195,72 | 236,47 | 53,83 | |
| | 97 | 408,83 | 194,72 | 214,11 | 48,74 | |
| | 98 | 383,99 | 197,33 | 186,66 | 42,49 | |
| 8. Reihe | 99 | 372,96 | 196,10 | 176,86 | 40,26 | |
| | 100 | 383,38 | 198,18 | 185,20 | 42,16 | |
| | 101 | 379,72 | 195,71 | 184,01 | 41,89 | |
| | 102 | 412,46 | 197,00 | 215,46 | 49,05 | |
| | 103 | 400,20 | 191,05 | 209,15 | 47,61 | |
| | 104 | 412,54 | 197,69 | 214,85 | 48,91 | |
| | 105 | 395,10 | 194,48 | 200,62 | 45,67 | |
| | 106 | 382,31 | 194,14 | 188,17 | 42,83 | |
| | 107 | 396,10 | 195,04 | 201,06 | 45,77 | |
| | 108 | 393,24 | 193,03 | 200,21 | 45,58 | |
| | 109 | 394,38 | 197,61 | 196,77 | 44,79 | |
| | 110 | 387,28 | 196,05 | 191,23 | 43,53 | |
| | 111 | 371,09 | 195,02 | 176,07 | 40,08 | |
| | 112 | 345,72 | 193,47 | 152,25 | 34,66 | |
| | | | | **Mittelwert** | **52,44** | **mm/h** |

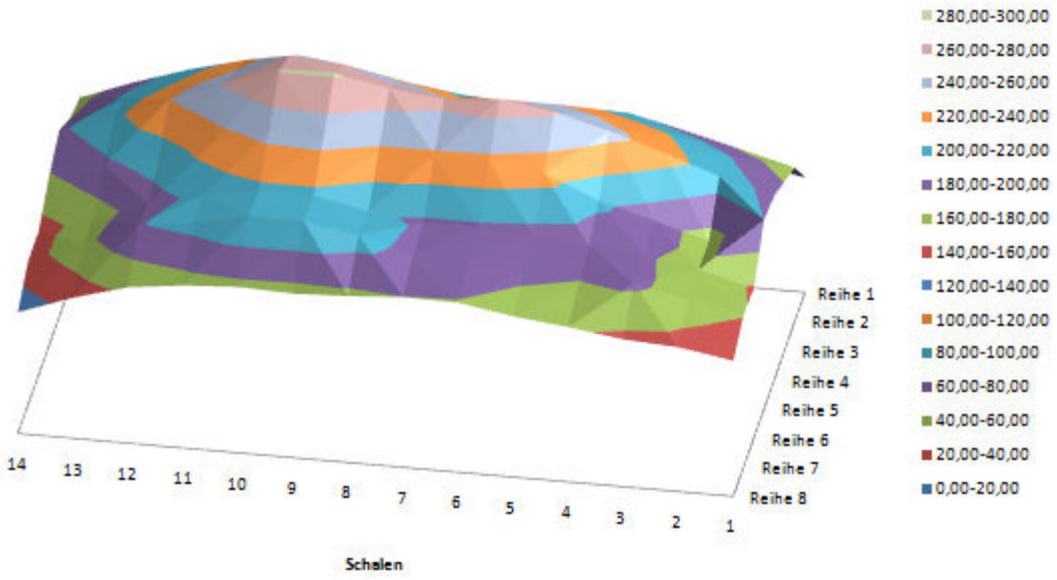


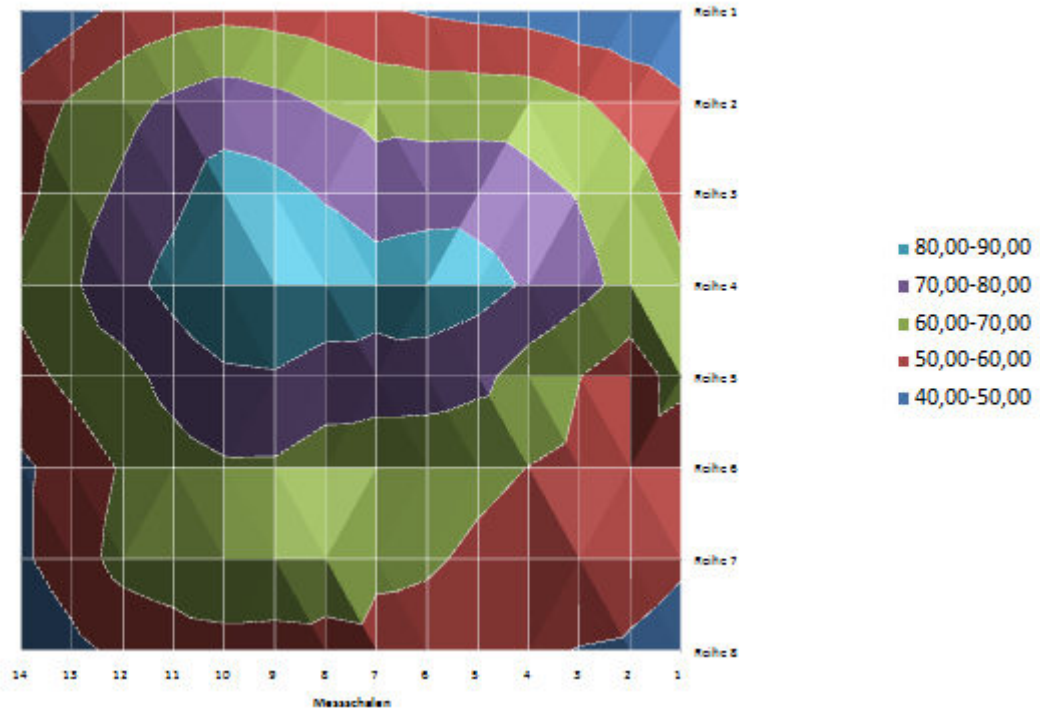
| | |
|---|---|
| 120 | sweeps/min |
| 0,25 | Lag |
| 5 | min Duration |

| | Schale Nr. | Gesamtgew. (g) | Schalengew. (g) | Wassergew. (g) | Intensität (mm/h) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 320,14 | 198,86 | 121,28 | 38,66 |
| | 2 | 328,79 | 197,10 | 131,69 | 41,98 |
| | 3 | 330,18 | 193,39 | 136,79 | 43,60 |
| | 4 | 340,54 | 195,28 | 145,26 | 46,30 |
| | 5 | 345,82 | 197,16 | 148,66 | 47,39 |
| | 6 | 346,42 | 192,96 | 153,46 | 48,92 |
| | 7 | 354,04 | 193,21 | 160,83 | 51,26 |
| | 8 | 370,05 | 198,88 | 171,17 | 54,56 |
| | 9 | 372,11 | 195,51 | 176,60 | 56,29 |
| | 10 | 376,00 | 196,79 | 179,21 | 57,12 |
| | 11 | 371,66 | 196,81 | 174,85 | 55,73 |
| | 12 | 358,27 | 193,89 | 164,38 | 52,40 |
| | 13 | 340,99 | 195,57 | 145,42 | 46,35 |
| | 14 | 322,63 | 196,35 | 126,28 | 40,25 |
| 2. Reihe | 15 | 359,62 | 197,23 | 162,39 | 51,76 |
| | 16 | 373,33 | 196,05 | 177,28 | 56,51 |
| | 17 | 383,63 | 192,07 | 191,56 | 61,06 |
| | 18 | 404,15 | 199,41 | 204,74 | 65,26 |
| | 19 | 402,77 | 196,93 | 205,84 | 65,61 |
| | 20 | 400,11 | 194,46 | 205,65 | 65,55 |
| | 21 | 406,01 | 197,56 | 208,45 | 66,44 |
| | 22 | 407,19 | 190,84 | 216,35 | 68,96 |
| | 23 | 422,88 | 195,39 | 227,49 | 72,51 |
| | 24 | 431,27 | 196,05 | 235,22 | 74,98 |
| | 25 | 421,99 | 196,87 | 225,12 | 71,76 |
| | 26 | 406,00 | 195,73 | 210,27 | 67,02 |
| | 27 | 386,43 | 194,81 | 191,62 | 61,08 |
| | 28 | 365,72 | 195,45 | 170,27 | 54,27 |
| 3. Reihe | 29 | 378,48 | 199,48 | 179,00 | 57,06 |
| | 30 | 392,46 | 192,12 | 200,34 | 63,86 |
| | 31 | 411,93 | 194,34 | 217,59 | 69,36 |
| | 32 | 423,38 | 194,24 | 229,14 | 73,04 |
| | 33 | 437,46 | 198,62 | 238,84 | 76,13 |
| | 34 | 434,95 | 197,38 | 237,57 | 75,73 |
| | 35 | 426,75 | 192,81 | 233,94 | 74,57 |
| | 36 | 446,03 | 198,21 | 247,82 | 78,99 |
| | 37 | 457,83 | 196,44 | 261,39 | 83,32 |
| | 38 | 456,85 | 191,23 | 265,62 | 84,67 |
| | 39 | 437,71 | 194,45 | 243,26 | 77,54 |
| | 40 | 419,08 | 194,02 | 225,06 | 71,74 |
| | 41 | 403,65 | 197,67 | 205,98 | 65,66 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 42 | 368,11 | 189,43 | 178,68 | 56,95 |
| 4. Reihe | 43 | 388,00 | 193,44 | 194,56 | 62,02 |
| | 44 | 402,65 | 192,94 | 209,71 | 66,84 |
| | 45 | 424,17 | 194,81 | 229,36 | 73,11 |
| | 46 | 440,94 | 193,53 | 247,41 | 78,86 |
| | 47 | 458,24 | 195,99 | 262,25 | 83,59 |
| | 48 | 467,59 | 196,63 | 270,96 | 86,37 |
| | 49 | 459,89 | 194,20 | 265,69 | **84,69** |
| | 50 | 467,44 | 195,10 | 272,34 | **86,81** |
| | 51 | 473,82 | 191,74 | 282,08 | 89,91 |
| | 52 | 472,06 | 191,16 | 280,90 | 89,54 |
| | 53 | 456,58 | 194,99 | 261,59 | 83,38 |
| | 54 | 435,48 | 195,54 | 239,94 | 76,48 |
| | 55 | 410,99 | 195,44 | 215,55 | 68,71 |
| | 56 | 393,05 | 196,43 | 196,62 | 62,67 |
| 5. Reihe | 57 | 395,54 | 195,67 | 199,87 | 63,71 |
| | 58 | 367,84 | 195,86 | 171,98 | 54,82 |
| | 59 | 383,63 | 194,93 | 188,70 | 60,15 |
| | 60 | 400,13 | 195,29 | 204,84 | 65,29 |
| | 61 | 426,30 | 197,98 | 228,32 | 72,78 |
| | 62 | 431,55 | 195,56 | 235,99 | 75,22 |
| | 63 | 433,71 | 196,27 | 237,44 | 75,68 |
| | 64 | 433,17 | 195,15 | 238,02 | 75,87 |
| | 65 | 444,43 | 196,01 | 248,42 | 79,18 |
| | 66 | 443,19 | 197,30 | 245,89 | 78,38 |
| | 67 | 421,09 | 190,43 | 230,66 | 73,52 |
| | 68 | 403,35 | 194,13 | 209,22 | 66,69 |
| | 69 | 390,89 | 194,72 | 196,17 | 62,53 |
| | 70 | 372,44 | 194,82 | 177,62 | 56,62 |
| 6. Reihe | 71 | 358,98 | 201,02 | 157,96 | 50,35 |
| | 72 | 368,25 | 195,19 | 173,06 | 55,16 |
| | 73 | 379,46 | 197,40 | 182,06 | 58,03 |
| | 74 | 381,54 | 193,59 | 187,95 | 59,91 |
| | 75 | 383,59 | 190,45 | 193,14 | 61,56 |
| | 76 | 391,15 | 193,89 | 197,26 | 62,88 |
| | 77 | 393,75 | 196,59 | 197,16 | 62,84 |
| | 78 | 395,37 | 192,01 | 203,36 | 64,82 |
| | 79 | 410,94 | 195,32 | 215,62 | 68,73 |
| | 80 | 414,46 | 198,60 | 215,86 | 68,81 |
| | 81 | 401,76 | 195,33 | 206,43 | 65,80 |
| | 82 | 390,55 | 199,24 | 191,31 | 60,98 |
| | 83 | 366,39 | 196,61 | 169,78 | 54,12 |
| | 84 | 349,02 | 197,49 | 151,53 | 48,30 |
| 7. Reihe | 85 | 362,24 | 200,94 | 161,30 | 51,41 |
| | 86 | 368,03 | 196,42 | 171,61 | 54,70 |
| | 87 | 380,07 | 196,38 | 183,69 | 58,55 |
| | 88 | 374,04 | 194,64 | 179,40 | 57,18 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 89 | 378,85 | 194,47 | 184,38 | 58,77 | |
| | 90 | 386,13 | 195,13 | 191,00 | 60,88 | |
| | 91 | 390,71 | 197,22 | 193,49 | 61,67 | |
| | 92 | 406,61 | 197,12 | 209,49 | 66,77 | |
| | 93 | 413,18 | 194,15 | 219,03 | 69,82 | |
| | 94 | 412,30 | 193,25 | 219,05 | 69,82 | |
| | 95 | 401,76 | 194,65 | 207,11 | 66,02 | |
| | 96 | 394,54 | 195,72 | 198,82 | 63,37 | |
| | 97 | 368,87 | 194,72 | 174,15 | 55,51 | |
| | 98 | 348,97 | 197,33 | 151,64 | 48,34 | |
| 8. Reihe | 99 | 339,35 | 196,10 | 143,25 | 45,66 | |
| | 100 | 350,65 | 198,18 | 152,47 | 48,60 | |
| | 101 | 351,28 | 195,71 | 155,57 | 49,59 | |
| | 102 | 360,31 | 197,00 | 163,31 | 52,05 | |
| | 103 | 360,73 | 191,05 | 169,68 | 54,09 | |
| | 104 | 376,68 | 197,69 | 178,99 | 57,05 | |
| | 105 | 374,24 | 194,48 | 179,76 | 57,30 | |
| | 106 | 369,86 | 194,14 | 175,72 | 56,01 | |
| | 107 | 368,23 | 195,04 | 173,19 | 55,20 | |
| | 108 | 368,19 | 193,03 | 175,16 | 55,83 | |
| | 109 | 369,19 | 197,61 | 171,58 | 54,69 | |
| | 110 | 360,62 | 196,05 | 164,57 | 52,46 | |
| | 111 | 343,47 | 195,02 | 148,45 | 47,32 | |
| | 112 | 321,46 | 193,47 | 127,99 | 40,80 | |
| | | | | Mittelwert | 63,01 | mm/h |




Reihe 1
Reihe 2
Reihe 3
Reihe 4
Reihe 5
Reihe 6
Reihe 7
Reihe 8
14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
Messschalen
80,00-90,00
70,00-80,00
60,00-70,00
50,00-60,00
40,00-50,00

# A3: Auswertungsdaten der Distrometerversuche im Labor

## Messtag 1:

1.Messung mit dem Distrometer:

| | | |
|---|---|---|
| 100 | sweeps/min | |
| 0,3 | Lag | |
| 7 | min Duration | |
| 26.04.2016 | Datum | 13.41 Uhr |

| | Schale Nr. | Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 426,73 | 198,86 | 224,87 | 51,19 |
| | 2 | 439,28 | 197,10 | 239,18 | 54,45 |
| | 3 | 456,54 | 193,39 | 260,15 | 59,22 |
| | 4 | 477,09 | 195,28 | 278,81 | **63,47** |
| | 5 | 492,32 | 197,16 | 292,16 | **66,51** |
| | 6 | 469,80 | 192,96 | 273,84 | 62,34 |
| | 7 | 475,90 | 193,21 | 279,69 | 63,67 |
| | 8 | 440,21 | 198,88 | 238,33 | 54,25 |
| 2. Reihe | 9 | 429,50 | 195,51 | 230,99 | 52,58 |
| | 10 | 425,36 | 196,79 | 225,57 | 51,35 |
| | 11 | 434,76 | 196,81 | 234,95 | 53,48 |
| | 12 | 434,36 | 193,89 | 237,47 | 54,06 |
| | 13 | 446,69 | 195,57 | 248,12 | 56,48 |
| | 14 | 454,02 | 196,35 | 254,67 | 57,97 |
| | 15 | 452,73 | 197,23 | 252,50 | 57,48 |
| | 16 | 436,69 | 196,05 | 237,64 | 54,10 |
| | | | | **Mittelwert:** | **57,04** **mm/h** |

**Schalen 4 & 5:**

| | | |
|---|---|---|
| Akkumulation | **7,58** | **mm** |
| Intensität | **64,99** | **mm/h** |

| | **Intensität (mm/h)** | **Niederschlagshöhe (mm)** |
|---|---|---|
| Schalen 49&50 | 64,99 | 7,58 |
| Distrometer | 59,61 | 6,95 |
| Matrix | 50,81 | 5,92 |
| Tropfengrößenverteilung | 54,82 | 6,39 |

2.Messung mit dem Distrometer:

| | | |
|---|---|---|
| 20 | sweeps/min | |
| 1,5 | Lag | |
| 20 | min Duration | |
| 26.04.2016 | Datum | 14.12 Uhr |

| | Schale Nr. | Gesamtgew. (g) | Schalengew. (g) | Wassergew. (g) | Intensität (mm/h) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 328,49 | 198,86 | 126,63 | 10,09 |
| | 2 | 344,73 | 197,10 | 144,63 | 11,53 |
| | 3 | 342,49 | 193,39 | 146,10 | 11,64 |
| | 4 | 355,46 | 195,28 | 157,18 | **12,53** |
| | 5 | 363,39 | 197,16 | 163,23 | **13,01** |
| | 6 | 348,76 | 192,96 | 152,80 | 12,18 |
| | 7 | 356,87 | 193,21 | 160,66 | 12,80 |
| | 8 | 335,78 | 198,88 | 133,90 | 10,67 |
| 2. Reihe | 9 | 324,57 | 195,51 | 126,06 | 10,05 |
| | 10 | 325,17 | 196,79 | 125,38 | 9,99 |
| | 11 | 328,53 | 196,81 | 128,72 | 10,26 |
| | 12 | 325,64 | 193,89 | 128,75 | 10,26 |
| | 13 | 335,00 | 195,57 | 136,43 | 10,87 |
| | 14 | 344,69 | 196,35 | 145,34 | 11,58 |
| | 15 | 348,23 | 197,23 | 148,00 | 11,79 |
| | 16 | 340,15 | 196,05 | 141,10 | 11,24 |
| | | | | **Mittelwert:** | **11,28** **mm/h** |

**Schalen 4 & 5:**

| | | |
|---|---|---|
| Akkum. N | **4,26** | **mm** |
| Intensität | **12,77** | **mm/h** |

| | **Intensität (mm/h)** | **Niederschlagshöhe (mm)** |
|---|---|---|
| Schalen 49&50 | 12,77 | 4,26 |
| Distrometer | 14,21 | 4,74 |
| Matrix | 12,84 | 4,28 |
| Tropfengrößenverteilung | 14,00 | 4,67 |

## Messtag 2:

3.Messung mit dem Distrometer:

| | | |
|---|---|---|
| 60 | sweeps/min | |
| 0,5 | Lag | |
| 15 | min Duration | |
| 27.04.2016 | Datum | 12.05 Uhr |

| | Schale Nr. | Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität mm/h |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 487,87 | 198,86 | 288,01 | 30,60 |
| | 2 | 506,33 | 197,10 | 308,23 | 32,75 |
| | 3 | 525,44 | 193,39 | 331,05 | 35,17 |
| | 4 | 551,98 | 195,28 | 355,70 | **37,79** |
| | 5 | 574,40 | 197,16 | 376,24 | **39,98** |
| | 6 | 543,38 | 192,96 | 349,42 | 37,13 |
| | 7 | 554,64 | 193,21 | 360,43 | 38,30 |
| | 8 | 507,65 | 198,88 | 307,77 | 32,70 |
| 2. Reihe | 9 | 489,14 | 195,51 | 292,63 | 31,09 |
| | 10 | 485,48 | 196,79 | 287,69 | 30,57 |
| | 11 | 491,71 | 196,81 | 293,90 | 31,23 |
| | 12 | 496,46 | 193,89 | 301,57 | 32,04 |
| | 13 | 509,02 | 195,57 | 312,45 | 33,20 |
| | 14 | 528,09 | 196,35 | 330,74 | 35,14 |
| | 15 | 530,59 | 197,23 | 332,36 | 35,31 |
| | 16 | 507,39 | 196,05 | 310,34 | 32,97 |
| | | | | **Mittelwert:** | **34,12** **mm/h** |

**Schalen 4 & 5:**

| | | |
|---|---|---|
| Akkumuliert | **9,72** | **mm** |
| Intensität | **38,88** | **mm/h** |

| | **Intensität (mm/h)** | **Niederschlagshöhe (mm)** |
|---|---|---|
| Schalen 49&50 | 38,88 | 9,72 |
| Distrometer | 45,39 | 11,35 |
| Matrix | 38,53 | 9,63 |
| Tropfengrößenverteilung | 41,74 | 10,43 |

4.Messung mit dem Distrometer:

| | | |
|---|---|---|
| 100 | sweeps/min | |
| 0,3 | Lag | |
| 15 | min Duration | |
| 27.04.2016 | Datum | 12.23 Uhr |

| | Schale Nr. | Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität mm/h |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 667,89 | 198,86 | 466,03 | 49,52 |
| | 2 | 736,17 | 197,10 | 536,07 | 56,96 |
| | 3 | 762,93 | 193,39 | 566,54 | 60,19 |
| | 4 | 829,54 | 195,28 | 631,26 | **67,07** |
| | 5 | 855,28 | 197,16 | 655,12 | **69,61** |
| | 6 | 806,46 | 192,96 | 610,50 | 64,87 |
| | 7 | 840,05 | 193,21 | 643,84 | 68,41 |
| | 8 | 711,24 | 198,88 | 509,36 | 54,12 |
| 2. Reihe | 9 | 663,23 | 195,51 | 464,72 | 49,38 |
| | 10 | 680,54 | 196,79 | 480,75 | 51,08 |
| | 11 | 704,28 | 196,81 | 504,47 | 53,60 |
| | 12 | 735,62 | 193,89 | 538,73 | 57,24 |
| | 13 | 766,67 | 195,57 | 568,10 | 60,36 |
| | 14 | 786,80 | 196,35 | 587,45 | 62,42 |
| | 15 | 779,89 | 197,23 | 579,66 | 61,59 |
| | 16 | 728,01 | 196,05 | 528,96 | 56,20 |
| | | | | **Mittelwert** | **58,91** **mm/h** |

**Schalen 4 & 5:**

| | | |
|---|---|---|
| Akkumuliert | **17,08** | **mm** |
| Intensität | **68,34** | **mm/h** |

| | **Intensität (mm/h)** | **Niederschlagshöhe (mm)** |
|---|---|---|
| Schalen 49&50 | 68,34 | 17,08 |
| Distrometer | 61,97 | 15,49 |
| Matrix | 52,95 | 13,24 |
| Tropfengrößenverteilung | 56,68 | 14,17 |

5.Messung mit dem Distrometer:

| | | |
|---|---|---|
| 120 | sweeps/min | |
| 0,25 | Lag | |
| 10 | min Duration | |
| 27.04.2016 | Datum | 14.00 Uhr |

| | Schale Nr. | Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität mm/h |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 578,48 | 198,86 | 376,62 | 60,02 |
| | 2 | 632,50 | 197,10 | 432,40 | 68,91 |
| | 3 | 645,76 | 193,39 | 449,37 | 71,62 |
| | 4 | 691,00 | 195,28 | 492,72 | **78,53** |
| | 5 | 707,33 | 197,16 | 507,17 | **80,83** |
| | 6 | 659,66 | 192,96 | 463,70 | 73,90 |
| | 7 | 684,85 | 193,21 | 488,64 | 77,88 |
| | 8 | 598,56 | 198,88 | 396,68 | 63,22 |
| 2. Reihe | 9 | 579,07 | 195,51 | 380,56 | 60,65 |
| | 10 | 588,35 | 196,79 | 388,56 | 61,93 |
| | 11 | 602,02 | 196,81 | 402,21 | 64,10 |
| | 12 | 614,10 | 193,89 | 417,21 | 66,49 |
| | 13 | 628,55 | 195,57 | 429,98 | 68,53 |
| | 14 | 642,53 | 196,35 | 443,18 | 70,63 |
| | 15 | 636,20 | 197,23 | 435,97 | 69,48 |
| | 16 | 602,55 | 196,05 | 403,50 | 64,31 |
| | | | | **Mittelwert** | **68,81** **mm/h** |

**Schalen 4 & 5:**

| | | |
|---|---|---|
| Akkumuliert | **13,28** | **mm** |
| Intensität | **79,68** | **mm/h** |

| | **Intensität (mm/h)** | **Niederschlagshöhe (mm)** |
|---|---|---|
| Schalen 49&50 | 79,68 | 13,28 |
| Distrometer | 58,53 | 9,75 |
| Matrix | 48,77 | 8,13 |
| Tropfengrößenverteilung | 52,50 | 8,75 |

## Messtag 3:

6.Messung mit dem Distrometer:

| | | |
|---|---|---|
| 20 | sweeps/min | |
| 1,5 | Lag | |
| 40 | min Duration | |
| 03.05.2016 | Datum | 9.57 Uhr |

| | Schale Nr. | Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität mm/h |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 493,89 | 198,86 | 294,03 | 11,72 |
| | 2 | 524,72 | 197,10 | 326,62 | 13,01 |
| | 3 | 507,98 | 193,39 | 313,59 | 12,49 |
| | 4 | 535,61 | 195,28 | 339,33 | **13,52** |
| | 5 | 547,58 | 197,16 | 349,42 | **13,92** |
| | 6 | 529,66 | 192,96 | 335,70 | 13,38 |
| | 7 | 562,32 | 193,21 | 368,11 | 14,67 |
| | 8 | 519,25 | 198,88 | 319,37 | 12,72 |
| 2. Reihe | 9 | 491,01 | 195,51 | 294,50 | 11,73 |
| | 10 | 499,02 | 196,79 | 301,23 | 12,00 |
| | 11 | 501,29 | 196,81 | 303,48 | 12,09 |
| | 12 | 500,52 | 193,89 | 305,63 | 12,18 |
| | 13 | 512,78 | 195,57 | 316,21 | 12,60 |
| | 14 | 530,90 | 196,35 | 333,55 | 13,29 |
| | 15 | 543,10 | 197,23 | 344,87 | 13,74 |
| | 16 | 526,50 | 196,05 | 329,45 | 13,13 |
| | | | | **Mittelwert** | **12,89** **mm/h** |

**Schalen 4 & 5:**

| | | |
|---|---|---|
| Akkumuliert | **9,15** | **mm** |
| Intensität | **13,72** | **mm/h** |

| | **Intensität (mm/h)** | **Niederschlagshöhe (mm)** |
|---|---|---|
| Schalen 49&50 | 13,72 | 9,15 |
| Distrometer | 15,99 | 10,93 |
| Matrix | 14,76 | 9,84 |
| Tropfengrößenverteilung | 15,98 | 10,66 |

7.Messung mit dem Distrometer:

| | | |
|---|---|---|
| 60 | sweeps/min | |
| 0,5 | Lag | |
| 30 | min Duration | |
| 03.05.2016 | Datum | 10.53 Uhr |

| | Schale Nr. | Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität mm/h | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 870,44 | 198,86 | 668,58 | 35,52 | |
| | 2 | 972,70 | 197,10 | 772,60 | 41,04 | |
| | 3 | 916,15 | 193,39 | 719,76 | 38,24 | |
| | 4 | 995,36 | 195,28 | 797,08 | **42,34** | |
| | 5 | 1027,90 | 197,16 | 827,74 | **43,97** | |
| | 6 | 976,89 | 192,96 | 780,93 | 41,49 | |
| | 7 | 1056,98 | 193,21 | 860,77 | 45,73 | |
| | 8 | 926,41 | 198,88 | 724,53 | 38,49 | |
| 2. Reihe | 9 | 870,11 | 195,51 | 671,60 | 35,68 | |
| | 10 | 873,28 | 196,79 | 673,49 | 35,78 | |
| | 11 | 887,01 | 196,81 | 687,20 | 36,51 | |
| | 12 | 905,25 | 193,89 | 708,36 | 37,63 | |
| | 13 | 936,51 | 195,57 | 737,94 | 39,20 | |
| | 14 | 974,64 | 196,35 | 775,29 | 41,19 | |
| | 15 | 977,76 | 197,23 | 777,53 | 41,31 | |
| | 16 | 929,75 | 196,05 | 730,70 | 38,82 | |
| | | | | **Mittelwert** | **39,56** | **mm/h** |

**Schalen 4 & 5:**

| | | |
|---|---|---|
| Akkumuliert | **21,58** | **mm** |
| Intensität | **43,16** | **mm/h** |

| | **Intensität (mm/h)** | **Niederschlagshöhe (mm)** |
|---|---|---|
| Schalen 49&50 | 43,16 | 21,58 |
| Distrometer | 52,11 | 26,06 |
| Matrix | 45,51 | 22,76 |
| Tropfengrößenverteilung | 49,23 | 24,62 |

8.Messung mit dem Distrometer:

| | | |
|---|---|---|
| 120 | sweeps/min | |
| 0,25 | Lag | |
| 10 | min Duration | |
| 03.05.2016 | Datum | 12.31 Uhr |

| | Schale Nr. | Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität mm/h | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. Reihe | 1 | 638,05 | 198,86 | 436,19 | 69,52 | |
| | 2 | 716,29 | 197,10 | 516,19 | 82,27 | |
| | 3 | 699,28 | 193,39 | 502,89 | 80,15 | |
| | 4 | 745,12 | 195,28 | 546,84 | **87,15** | |
| | 5 | 758,70 | 197,16 | 558,54 | **89,02** | |
| | 6 | 706,51 | 192,96 | 510,55 | 81,37 | |
| | 7 | 771,27 | 193,21 | 575,06 | 91,65 | |
| | 8 | 682,63 | 198,88 | 480,75 | 76,62 | |
| 2. Reihe | 9 | 623,36 | 195,51 | 424,85 | 67,71 | |
| | 10 | 647,54 | 196,79 | 447,75 | 71,36 | |
| | 11 | 675,82 | 196,81 | 476,01 | 75,86 | |
| | 12 | 680,35 | 193,89 | 483,46 | 77,05 | |
| | 13 | 689,48 | 195,57 | 490,91 | 78,24 | |
| | 14 | 713,72 | 196,35 | 514,37 | 81,98 | |
| | 15 | 714,69 | 197,23 | 514,46 | 81,99 | |
| | 16 | 681,75 | 196,05 | 482,70 | 76,93 | |
| | | | | **Mittelwert** | **79,30** | **mm/h** |

**Schalen 4 & 5:**

| | | |
|---|---|---|
| Akkumuliert | **14,68** | **mm** |
| Intensität | **88,08** | **mm/h** |

| | **Intensität (mm/h)** | **Niederschlagshöhe (mm)** |
|---|---|---|
| Schalen 49&50 | 88,08 | 14,68 |
| Distrometer | 54,33 | 9,05 |
| Matrix | 44,83 | 7,47 |
| Tropfengrößenverteilung | 48,02 | 8,00 |

Messung mit nur einer Schale:

15 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 267,67 | 198,86 | 68,81 | 10,97 | 12,74 |

20 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 252,86 | 198,86 | 51,00 | 16,26 | 16,27 |

25 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 262,79 | 198,86 | 60,93 | 19,42 | 20,07 |

30 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 271,39 | 198,86 | 69,53 | 22,16 | 24,79 |

35 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 290,23 | 198,86 | 88,37 | 28,17 | 28,98 |

40 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 295,62 | 198,86 | 93,76 | 29,89 | 34,45 |

45 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 313,81 | 198,86 | 111,95 | 35,68 | 41,38 |

50 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 318,81 | 198,86 | 116,95 | 37,28 | 40,91 |

55 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 336,16 | 198,86 | 134,30 | 42,81 | 48,63 |

60 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 347,94 | 198,86 | 146,08 | 46,56 | 58,11 |

70 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 373,08 | 198,86 | 171,22 | 54,58 | 61,88 |

80 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 392,28 | 198,86 | 190,42 | 60,70 | 60,45 |

90 sweeps/min

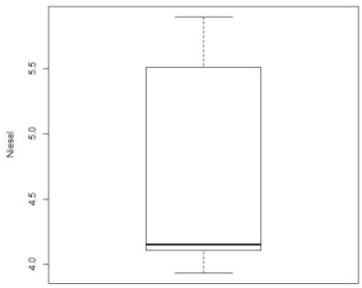
| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 413,7 | 198,86 | 211,84 | 67,52 | 63,24 |

120 sweeps/min

| Gesamtmasse (g) | Schalenmasse (g) | Wassermasse (g) | Intensität (mm/h) | Distrometer Int. (mm/h) |
|---|---|---|---|---|
| 501,73 | 198,86 | 299,87 | 95,58 | 58,24 |

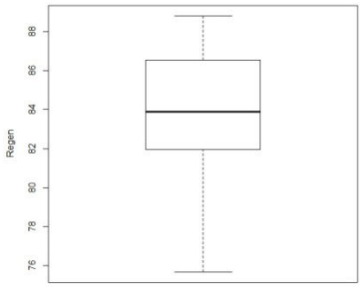
# A4: Boxplots der Art der Niederschlagsklassifizierung für die Regenereignisse der Feldversuche

Nieselregen



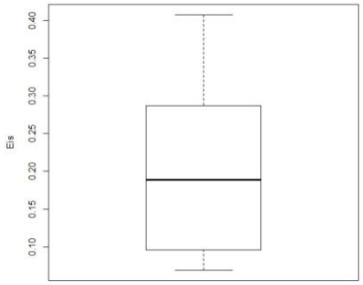

Median: 4,2%
Quartile: 4,1%, 5,5%

Regen



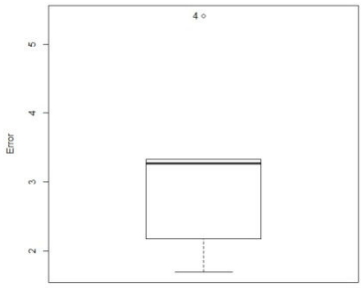

Median: 84,0%
Quartile: 82,0%, 87,0%

Eispellets



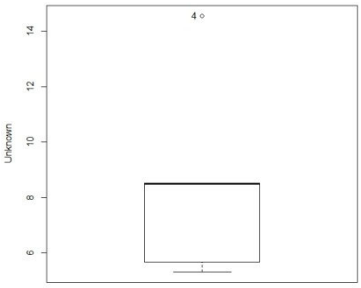

Median: 0,2%
Quartile: 0,1%, 0,3%

Error




Median: 3,3%
Quartile: 2,2%, 3,3%
Ausreißer: 5,5%

Unknown




Median: 8,5%
Quartile: 5,9%, 8,4%
Ausreißer: 14,1%

# A5: Datenfiles der Distrometerausgabe sämtlicher Labor- und Feldversuche dieser Arbeit auf CD