



Erzeugung meteorologischer Stundendaten

Schriftenreihe, Heft 3/2019



Entwicklung eines Wettergenerators zur zeitlichen Disaggregation von Tages- auf Stundenwerte

Thomas Pluntke, Dr. Rico Kronenberg, Prof. Dr. Christian Bernhofer
(Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie)

Inhalt

1	Einleitung	7
2	Daten	8
3	Methoden	9
3.1	Datenaufbereitung	9
3.2	Selektionsprozess	10
3.3	Anpassung der Stundendaten	11
3.4	Plausibilisierung der Modellergebnisse	12
4	Ergebnisse	14
4.1	Validierung der Disaggregation von Stationsreihen	14
4.2	Validierung der Disaggregation interpolierter Daten	20
4.3	Validierung mittels Radardaten	28
5	Benutzeroberfläche	33
6	Zusammenfassung	34
7	Ausblick	36
	Literaturverzeichnis	37
	Anhang	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Links: Quantil-Quantil-Plot der disaggregierten und beobachteten stündlichen Niederschläge, Rechts: Taylordiagramm der disaggregierten und beobachteten stündlichen Werte der Temperatur, Sonnenscheindauer, relativen Feuchte und Windgeschwindigkeit.....	15
Abbildung 2:	Beobachtete und disaggregierte Tagesgänge für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg, Jahresmittel.....	18
Abbildung 3:	Beobachtete und disaggregierte Tagesgänge des Niederschlags für Dresden-Klotzsche und Fichtelberg, Sommerhalbjahr und Winterhalbjahr	19
Abbildung 4:	Links: Quantil-Quantil-Plot der disaggregierten und beobachteten stündlichen Niederschläge, Rechts: Taylordiagramm der disaggregierten und beobachteten stündlichen Werte der Temperatur, Sonnenscheindauer, relativen Feuchte und Windgeschwindigkeit.....	22
Abbildung 5:	Tagesgang der beobachteten stündlichen Werte und der nächstgelegenen disaggregierten Rasterzelle des Referenzdatensatzes an den Stationen Dresden und Fichtelberg, Jahresmittel.....	24
Abbildung 6:	Tagesgang der beobachteten stündlichen Niederschläge und der nächstgelegenen disaggregierten Rasterzelle des Referenzdatensatzes an den Stationen Dresden und Fichtelberg, Sommerhalbjahr und Winterhalbjahr	25
Abbildung 7:	Jahresgang der beobachteten stündlichen Werte und der nächstgelegenen disaggregierten Rasterzelle des Referenzdatensatzes an den Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg	26
Abbildung 8:	Statistische Kennzahlen des Vergleichs disaggregierter Rasterzellen des RDS und beobachteter Stundendaten aller Klimaelemente an zehn Klimastationen	27
Abbildung 9:	Vergleich der Jahresgänge, gebildet aus disaggregierten Niederschlägen von zehn Klimastationen und beobachteten Radarwerten.....	30
Abbildung 10:	Quantil-Quantil-Plots für disaggregierte Niederschläge von zehn Klimastationen und beobachteten Radarwerten (RADOLAN-Wert der nächstgelegenen vier Zellen)	31
Abbildung 11:	Tagesgänge des Sommerhalbjahrs für disaggregierte Niederschläge von zehn Klimastationen und beobachteten Radarwerten (RADOLAN-Wert der nächstgelegenen vier Zellen)	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Statistische Kennzahlen (Minimum, Mittelwert, Median, 95.Perzentil, Maximum) der beobachteten und simulierten Stundenwerte sowie Performancemaße (σ_n , r , RMSD_n)	16
Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten zwischen den beobachteten und disaggregierten stündlichen Daten zur Feststellung der elementübergreifenden Konsistenz.....	16
Tabelle 3: Vergleich der Fehler (Root Mean Square Difference) und des Korrelationskoeffizienten r zwischen beobachteten und disaggregierten Stundendaten für Dresden und Fichtelberg und die Disaggregation von FÖRSTER ET AL., 2016 (Spannbreite von fünf Orten weltweit)	20
Tabelle 4: Korrelationskoeffizienten zwischen den beobachteten und disaggregierten stündlichen Daten zur Feststellung der elementübergreifenden Konsistenz.....	23
Tabelle 5: Beobachtete und disaggregierte Korrelationskoeffizienten einzelner Klimaelemente zwischen jeweils zwei Stationen	28
Tabelle 6: Statistische Kennzahlen der beobachteten Stundenwerte von zehn Stationen und der nächstgelegenen disaggregierten Rasterzellen sowie Performancemaße (SD_n , r , RMSD_n)	38
Tabelle 7: Statistische Kennzahlen der Radolan-Niederschläge und disaggregierten Stundenwerte sowie Performancemaße (σ_n , r , RMSD_n)	40

Abkürzungsverzeichnis

DWD	Deutscher Wetterdienst
ED	Euklidische Distanz
EDM	Modell der Euklidischen Distanz
FF	Windgeschwindigkeit
GUI	Graphical User Interface (dt.: Benutzeroberfläche)
Obs	observiert (gemessen)
RDS	Referenzdatensatz
RMSDn	Normalized Root Mean Square Difference (dt.: normalisierte mittlere quadratische Abweichung)
RR	Niederschlag
RF	relative Luftfeuchte
SD	Sonnenscheindauer
Sim	simuliert
TM	Temperaturmittel
TN	Temperaturminimum
TX	Temperaturmaximum

1 Einleitung

Im Rahmen des Workshops "Informations- und Erfahrungsaustausch zu Anforderungen an regionale Klimadaten aus Nutzersicht" des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) im September 2015 wurde das Problem der geringen flächenhaften Informationsdichte für meteorologische Elemente in Stundenauflösung und der hier vergleichsweise kurzen Datenverfügbarkeit hervorgehoben. Zahlreiche hydrologische und ökologische Wirkmodelle benötigen einen stündlichen Klimadateninput, um die Prozesse geeignet abbilden zu können. Die Disaggregation von täglichen Niederschlägen (beobachtet und projiziert für die Zukunft) wurde an der Professur für Meteorologie der TU Dresden von LISNIAK ET AL. (2013) und BLUMENSAAT ET AL. (2012) umgesetzt. Die Disaggregation von gleichzeitig mehreren Klimaelementen wurde u. a. durch GÖRNER ET AL. (2018) entwickelt. Es handelt sich hierbei um einen parameterlosen Ansatz, der auf der Analogmethode beruht. Es liegt die Annahme zugrunde, dass es den zu disaggregierenden Tag schon einmal in der Vergangenheit mit sehr ähnlichen Witterungsbedingungen gab. Das Modell sucht demzufolge den ähnlichsten Tag aus dem zur Verfügung stehenden Datensatz von mehreren Klimastationen und übernimmt den Tagesgang. Die physikalische Konsistenz bleibt dabei gewahrt, da eine beobachtete Kombination an Klimaelementen verwendet wird.

Ziel dieses Projekts war es, den von GÖRNER ET AL. (2018) entwickelten Ansatz eines Wettergenerators in ein ausführbares Programm zu überführen, zu plausibilisieren, zu dokumentieren und über die Klimaserviceplattform ReKIS bereitzustellen.

Der Begriff Wettergenerator wird in der Literatur meist für ein Tool verwendet, das synthetische Klimazeitreihen auf der Grundlage beobachteter statistischer Zusammenhänge erzeugt. Auch eine Anwendung auf unbeobachtete Orte wird durch eine Interpolation der Parameter des Wettergenerators möglich. Beliebige lange Zeitreihen können generiert werden, die stets statistisch identisch mit den Beobachtungen sind. Bei dem hier erstellten Wettergenerator handelt es sich um ein Tool zur Disaggregation, also zeitlichen Zerlegung, von Tages- zu Stundendaten. Es können nicht beliebig viele, stochastisch ähnliche Zeitreihen erzeugt werden, sondern lediglich eine vorhandene Reihe. Das Ergebnis der Disaggregation ist, da es sich um ein deterministisches Verfahren handelt, stets identisch. Eine Nutzung auf unbeobachtete Orte wird durch die Verwendung von interpolierten Tagesdaten möglich. Trotz der Unterschiede wird für das Disaggregationstool der Begriff Wettergenerator verwendet, in der Absicht, einen eingängigeren, leichter verständlichen Begriff zu gebrauchen.

2 Daten

Die für zahlreiche Wirkmodelle (z. B. Wasserhaushalts- und Ertragsmodelle) benötigten Klimaelemente werden hier betrachtet:

- Niederschlag RR [mm],
- Temperaturen TN (min), TM (mittel), TX (max) [°C],
- Relative Luftfeuchte RF [%],
- Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe FF2 [m/s] und
- Sonnenscheindauer SD [min].

TN und TX werden nur für die Suche nach dem ähnlichsten Tag verwendet und nicht selbst disaggregiert.

Die Basis für den Wettergenerator stellen stündliche DWD-Daten aus Sachsen und der näheren Umgebung, das heißt in einem Längengradbereich von 11,67° bis 15,23° und einem Breitengradbereich von 50,15° bis 51,80°, dar. Es befinden sich 108 Klimastationen mit Stundenwerten in diesem Ausschnitt.

Problematisch an den Daten der Sonnenscheindauer ist, dass Werte zwischen 21:00 und 2:00 Uhr UTC häufig als Fehlwerte deklariert sind. Dies würde in einem automatisierten Algorithmus dazu führen, dass diese Tage keine vollständigen Stundendaten aufweisen. Solche Fehlwerte wurden auf 0 gesetzt.

Die Winddaten des DWD stellen die Beobachtungen auf der Höhe des Windgebers dar. Die Höhe kann von Station zu Station variieren. Um die Verwendung von benachbarten Stationen für die Disaggregation zu ermöglichen, wurden alle Winddaten mit Hilfe des logarithmischen Windprofils auf 2 m umgerechnet.

Für die weitere Arbeit wurden nur solche Tage verwendet, die komplett bezüglich der Anzahl an Stundendaten und bezüglich der sieben Elemente sind. Für 24 Stationen liegen insgesamt 160.197 Tage mit kompletten Stundendaten (alle Elemente) vor. Die Stundendatei „wg_data_h.txt“ ist im Pfad des Wettergenerators abgespeichert

Die täglichen Daten für die zu disaggregierenden Stationen wurden mit Hilfe des R-Skripts „Data-preparation.r“ formatiert. Hiermit werden DWD-Daten vom CDC-Server heruntergeladen und in das Format der Input-Textdatei des Wettergenerators formatiert. Das Script kann durch den Nutzer für weitere interessierende Stationen genutzt werden (auf DVD mitgeliefert).

Sollen Daten anderer Datenprovider (z. B. Agrarmeteorologisches Netz) disaggregiert werden, müssen sie vom Nutzer selbständig in das Format der Input-Textdateien gebracht werden (siehe Benutzerhandbuch).

3 Methoden

Die Methode von GÖRNER ET AL. (2018) zur Disaggregation von Tages- in Stundendaten basiert auf der Suche nach dem ähnlichsten Tag in der Messhistorie der umgebenden Stationen (sowie der Station an sich) und der Anwendung des Tagesgangs dieses Tages auf den zu disaggregierenden Tag. Bekannt ist dieser Ansatz auch als Analogmethode. Die Ähnlichkeit wird mittels der Euklidischen Distanz (ED) festgestellt, weshalb der Name „Modell der Euklidischen Distanz“ (EDM) eingeführt wurde. „In der zweidimensionalen euklidischen Ebene oder im dreidimensionalen euklidischen Raum stimmt der euklidische Abstand ... mit dem anschaulichen Abstand überein.“ (https://de.wikipedia.org/wiki/Euklidischer_Abstand, 01.10.2018). Im zweidimensionalen Fall kann der Abstand mittels des Satzes des Pythagoras berechnet werden, im n-dimensionalen Fall durch wiederholte Anwendung dieses Satzes.

Die Formelzeichen werden für diesen Bericht aus GÖRNER ET AL. (2018) übernommen. Nachfolgend werden die Arbeitsschritte zum Aufbau der Datenbank, der Erstellung des Modells und der Plausibilisierung des Modells beschrieben.

3.1 Datenaufbereitung

Der erste Schritt ist das Einlesen der Stundendaten aller Klimaelemente der Periode 1961 bis 2017 vom FTP-Server des DWD. Die Daten wurden hierbei auf Plausibilität geprüft ($RR \geq 0$, $0 \leq RF \leq 100$, $FF \geq 0$, $SD \geq 0$). Weitere Korrekturen waren für die Windgeschwindigkeit und die Sonnenscheindauer nötig (siehe Kapitel 2).

Für das Modell werden im Folgenden nur Tage mit vollständigen Stundenmessungen sowie dem kompletten Elementspektrum verwendet. Aus den Stundendaten werden Tagesdaten berechnet. Diese Daten stellen die Basis für das Modell EDM dar.

Der Pool von zu disaggregierenden Stationen mit Tagesdaten wird – wie in Kapitel 2 beschrieben – erstellt.

Für jede Station wird die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer, bzw. Tageslänge (engl. length of day, LOD) in Abhängigkeit vom Datum und der geografischen Breite berechnet und als look-up-table gespeichert.

Im nächsten Schritt wird eine z-Transformation der täglichen Daten aller Elemente E durchgeführt, um die Einheiten zu eliminieren und die Elemente auf eine ähnliche Werteskala zu bringen. Hierzu werden die Einzelwerte x_E mittels des Reihenmittelwerts $\bar{x}_E$ und der Standardabweichung σ_{x_E} transformiert (Formel 1):

$$z_E = \frac{x_E - \bar{x}_E}{\sigma_{x_E}}$$

Formel 1

Um die Klimaelemente vergleichbar zu machen, werden sie im nächsten Schritt mittels des maximalen und minimalen Wertes aller Klimaelemente ($\max_{j=1..i} z_E(j)$, $\min_{j=1..i} z_E(j)$) aller Stationen und aller Tage standardisiert (Formel 2):

$$z_{E_s} = \frac{z_E}{\min_{j=1..i} z_E(j) - \max_{j=1..i} z_E(j)}$$

Formel 2

3.2 Selektionsprozess

Für die zu disaggregierende Station wird nachfolgend das Kürzel D und für die zur Verfügung stehenden Basisstationen der Umgebung (beinhaltet auch die Station selbst) das Kürzel B eingeführt. Damit sind D_D und D_B die jeweiligen Disaggregations- bzw. Basistage.

Der Datenpool wird nach folgenden Kriterien geteilt: Niederschlagstag (Ja/ Nein) und Sonnenscheindauer größer Null (Ja/Nein). Es entstehen vier Gruppen über die eine Vorselektion stattfindet:

- Niederschlag und Sonnenscheindauer größer Null
- Niederschlag und Sonnenscheindauer gleich Null
- Kein Niederschlag und Sonnenscheindauer größer Null
- Niederschlag größer Null und Sonnenscheindauer gleich Null

Es wird nun die elementübergreifende Euklidische Distanz ED zwischen allen Klimaelementen E_i der zu disaggregierenden Tage D_D und den umliegenden Basisstationen D_B berechnet (Formel 3). Hierbei werden nur Tage aus dem vorselektierten Datenpool verwendet (s. o.):

$$ED = \sqrt{(z_{E1_{s,B}} - z_{E1_{s,D}})^2 + (z_{E2_{s,B}} - z_{E2_{s,D}})^2 + \dots + (z_{Ei_{s,B}} - z_{Ei_{s,D}})^2}$$

Formel 3

In GÖRNER ET AL. (2018) wurde eine Vorauswahl in Abhängigkeit von der Tageslänge LOD durchgeführt, um den Aufwand bei der Berechnung der ED zu minimieren. Da der Programmcode zeitmäßig sehr effektiv gestaltet werden konnte, ist eine Eingrenzung des Datensatzes mittels LOD nicht mehr notwendig. Daher wird lediglich geprüft, ob der ausgewählte Basistag eine ähnliche LOD (± 2 Stunden) wie der Disaggregationstag aufweist.

Auf eine Einbeziehung der objektiven Wetterlagen des DWD, wie in GÖRNER ET AL. (2018) umgesetzt, wird verzichtet, da keine besseren Ergebnisse erzielt wurden.

Es wird nicht empfohlen den zu disaggregierenden Tag sowie die drei vorhergehenden und drei nachfolgenden Tage der gleichen Station für die Disaggregation zu verwenden (GÖRNER ET AL., 2018).

Letztendlich wird derjenige Basistag gewählt, der die geringste Euklidische Distanz unter Wahrung der oben genannten Kriterien aufweist.

3.3 Anpassung der Stundendaten

Da die Tagessummen bzw. Tagesmittel der Klimaelemente des Aggregations- und des Basistages i. d. R. nicht übereinstimmen, sind diese anzupassen. Hierzu werden die Quotienten R_E bzw. Differenzen ΔT (nur für die Temperatur) des Klimaelements berechnet:

$$R_E = \frac{E_D}{E_B}$$

Formel 4

$$\Delta T = T_D - T_B$$

Formel 5

Durch Multiplikation bzw. Addition des Quotienten bzw. der Differenz werden nun die Stundendaten der Basisstation angepasst, wobei $T_{D_{hr}}$ und $T_{B_{hr}}$ die stündlichen Temperaturen des Disaggregations- und Basistages und $E_{D_{hr}}$ und $E_{B_{hr}}$ die Werte der weiteren Elemente sind.

$$E_{D_{hr}} = E_{B_{hr}} * R_E$$

Formel 6

$$T_{D_{hr}} = T_{B_{hr}} + \Delta T$$

Formel 7

Durch die Anwendung von R_E kann es zu physikalisch nicht sinnvollen Ergebnissen kommen. Daher werden relative Luftfeuchten mit Werten größer als 100 % auf 100 % gesetzt und Sonnenscheindauern auf 60 min begrenzt.

Niederschlagssummen von 0 mm und Sonnenscheindauern von 0 h am Tag werden nicht disaggregiert. Die 24 Stundenwerte werden auf 0 gesetzt.

Es erfolgt eine Korrektur von Stunden mit einem Niederschlag > 0 mm und einer Sonnenscheindauer von 60 min, da sich in der Regel Sonnenschein und Niederschlag voneinander ausschließen. Hierzu wird die in Mitteleuropa gültige Beziehung zwischen Dauer t und Menge RR von Starkniederschlägen von WUSOW (KAHLIG, 1991) verwendet (Formel 8). Stellt man Formel 8 nach t um, so kann die Dauer des simulierten Niederschlags berechnet werden und somit die simulierte Sonnenscheindauer (60 min) um diese Dauer vermindert werden. Nach dieser Korrektur können bei einer (auf ganze Minuten gerundeten) Sonnenscheindauer von 60 min nur noch Niederschläge von maximal 1,6 mm auftreten. Höhere Niederschläge führen zu einer Reduktion der Sonnenscheindauer.

$$RR = \sqrt[2]{5t - \left(\frac{t}{24}\right)^2}$$

Formel 8

3.4 Plausibilisierung der Modellergebnisse

Es wurde eine dreistufige Plausibilisierung der disaggregierten Stundendaten durchgeführt:

1. Zunächst werden die täglichen Zeitreihen der Klimastationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg disaggregiert und mit den beobachteten Stundendaten verglichen.
2. Des Weiteren wird der Wettergenerator auf die täglichen 1 km-Rasterklimadaten Sachsens (RaKliDa-basiert) für das gesamte Elementspektrum angewendet. Datengrundlage für die Regionalisierung der Stationsdaten ist der sächsische Referenzdatensatz (PLUNTKE ET AL., 2017). Jede der 19.573 Rasterzellen wird als einzelne Station betrachtet und unter Zuhilfenahme der Klimastationen, welche Stundendaten aufweisen, disaggregiert. Die Performance des Modells EDM wird mittels eines Abgleichs von beobachteten Stundenwerten von exemplarisch 10 Stationen¹ in Sachsen mit der jeweils nächstgelegenen disaggregierten RaKliDa-Rasterzelle festgestellt.
3. Für den Niederschlag erfolgt eine Plausibilisierung mittels des stündlichen Radarproduktes des DWD (Radolan). Für den Zeitraum 2006-2010 werden für 23 Stationen mit Stundendaten die disaggregierten, stündlichen Niederschläge mit den nächstgelegenen vier Radolan-Zellen verglichen.

Zur Ermittlung der Güte der Disaggregation werden folgende Analysen für alle Elemente durchgeführt:

■ Plot des mittleren Jahresgangs

■ Plot des mittleren Tagesgangs

■ Berechnung der statistischen Maße:

■ Minimum (min)

■ Maximum (max)

■ Mittelwert (mitt)

■ Median (med)

■ 95. Perzentil (95p)

■ Standardabweichung (σ)

■ Normalisierte Standardabweichung (σ_n). Die Normalisierung erfolgt mit der beobachteten Standardabweichung (TAYLOR, 2001).

■ Pearson Korrelationskoeffizient (r)

■ Normalisierte Mittlere Quadratische Abweichung (Normalized Root Mean Square Difference RMSDn). Die Normalisierung erfolgt mit der beobachteten Standardabweichung (TAYLOR, 2001).

Des Weiteren werden für die Elemente TM, RF, FF und SD ein Taylordiagramm – bestehend aus Pearson Korrelationskoeffizient, Normalisierter Mittlerer Quadratischer Abweichung und normalisierter Standardabweichung – geplottet.

¹ Stationsnamen (DWD Stations-ID): Aue (222), Carlsfeld (840), Chemnitz (853), Dresden-Klotzsche (1048), Fichtelberg (1358), Görlitz (1684), Hoyerswerda (7393), Leipzig/Halle (2932), Plauen (3946), Zinnwald-Georgenfeld (5779)

Für RR werden zusätzlich die disaggregierten und beobachteten Perzentile im „Quantil-Quantil-Plot“ gegenübergestellt.

Da Tage mit 0 mm Niederschlag oder 0 Stunden Sonnenschein nicht disaggregiert wurden, werden sie auch nicht bei der Plausibilisierung berücksichtigt. Für die Plausibilitätsprüfung der weiteren Klimaelemente können solche Tage verwendet werden.

Eine Überprüfung der elementübergreifenden Konsistenz findet durch eine Gegenüberstellung der beobachteten und simulierten Korrelationskoeffizienten zwischen allen Klimaelementen statt.

Die Klimaelemente korrelieren zwischen verschiedenen Stationen meist recht gut. Zur Überprüfung, ob diese Beziehungen bei der Disaggregation erhalten bleiben, die Daten demzufolge ihre räumliche Konsistenz behalten, werden exemplarisch für die Stationen Aue, Dresden, Chemnitz und Fichtelberg die Korrelationen zwischen den beobachteten Stundendaten und den disaggregierten nächstgelegenen Rasterzellen des Referenzdatensatzes berechnet.

4 Ergebnisse

4.1 Validierung der Disaggregation von Stationsreihen

Für die Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg wird exemplarisch für einen gemeinsamen Zeitraum von ca. 8 Jahren die Performance des Wettergenerators ermittelt.

Der Quantil-Quantil-Plot (Abbildung 1, links) zeigt eine hohe Übereinstimmung von stündlichen Niederschlägen bis zu 7 mm. Stärkere Niederschläge werden vom Modell meist unterschätzt, insbesondere für die Bergstation Fichtelberg.

Die Taylordiagramme² (Abbildung 1, rechts) zeigen eine hohe Güte der Disaggregation der Temperaturdaten an. Die Korrelation ist mit 0,98 sehr hoch, die normalisierte quadratische Abweichung ist nahe Null und weist auf wenig extreme Abweichungen hin. Die normalisierte Standardabweichung, die sehr nah an eins ist, zeigt eine hohe Übereinstimmung der simulierten mit der beobachteten Varianz. Eine etwas schlechtere Performance hinsichtlich der Korrelation und der RMSDn zeigen RF, SD und FF (in dieser Reihenfolge). Die Güte unterscheidet sich etwas zwischen den Stationen Fichtelberg und Dresden, die Windgeschwindigkeit wird besser am Fichtelberg getroffen, RF und TM etwas schlechter.

Tabelle 1 führt weitere statistische Kennwerte auf und verdeutlicht die generell guten Ergebnisse der Disaggregation.

Die beobachteten und simulierten (disaggregierten) Korrelationskoeffizienten zwischen den Klimaelementen (Tabelle 2) weisen für Dresden und den Fichtelberg nur geringfügige Veränderungen auf und zeigen damit eine Erhaltung der elementübergreifenden Konsistenz bei der Disaggregation an.

² Simulationen, die sehr gut mit den Beobachtungen übereinstimmen, liegen nahe dem Wert 1,0 auf der x-Achse. Hier sind die Fehler minimal, die Korrelationen sehr hoch und die Varianz sehr ähnlich.

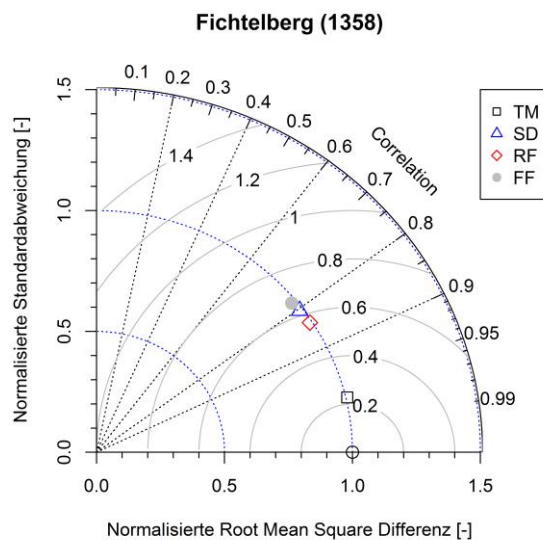
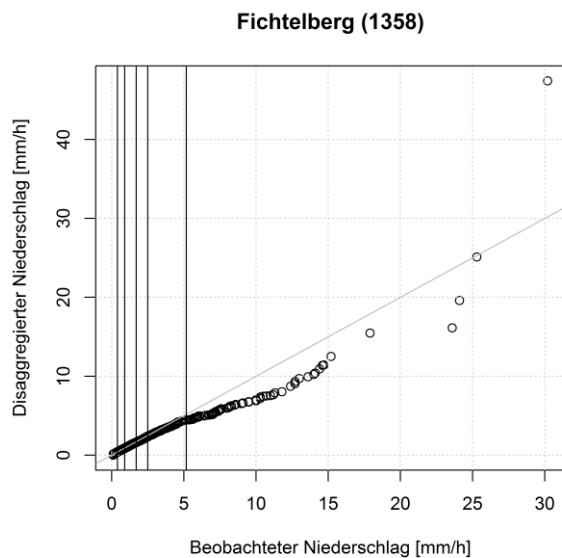
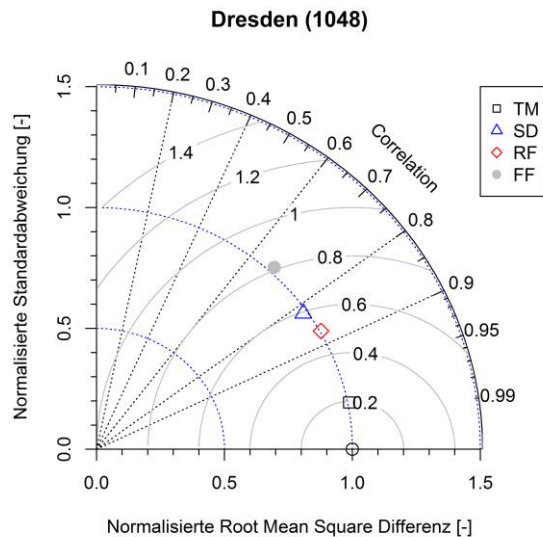
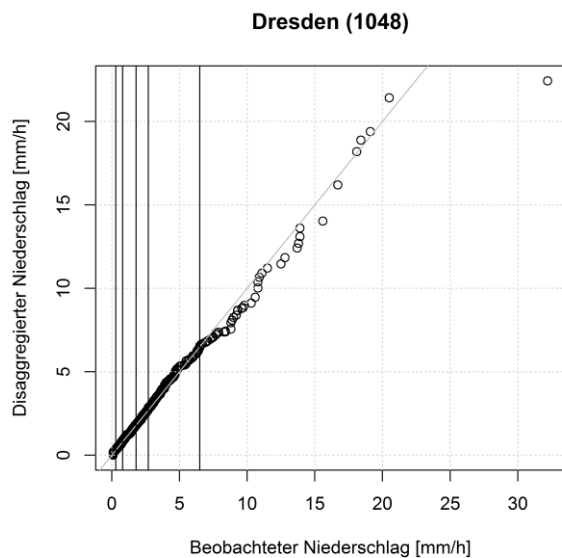


Abbildung 1: Links: Quantil-Quantil-Plot der disaggregierten und beobachteten stündlichen Niederschläge (vertikale Linien markieren v. l. n. r. das 50., 75., 90., 95. und 99. Perzentil des beobachteten Niederschlags). Rechts: Taylordiagramm der disaggregierten und beobachteten stündlichen Werte der Temperatur (TM), Sonnenscheindauer (SD), relativen Feuchte (RF) und Windgeschwindigkeit (FF)

Tabelle 1: Statistische Kennzahlen (Minimum, Mittelwert, Median, 95.Perzentil, Maximum) der beobachteten (Obs) und simulierten (Sim) Stundenwerte sowie Performancemaße (σ_n , r , RMSD_n)

Element	Minimum		Mittelwert		Median		95. Perzentil		Maximum		σ_n	r	RMSD _n
	Obs	Sim	Rad	Sim	Rad	Sim	Rad	Sim	Rad	Sim			
Dresden													
TM	-20.7	-20.2	10.7	10.8	11.5	11.5	24.1	24.4	35.7	36.7	1.01	0.98	0.19
RR	0	0	0.06	0.06	0	0	0.20	0.17	32.2	22.4	0.98	0.13	1.31
SD	0	0	14.6	14.5	0	0	60.0	60.0	60.0	60.0	0.98	0.82	0.59
FF	0	0	3.0	3.0	2.8	2.8	5.9	6.0	12.7	12.6	1.02	0.68	0.81
RF	14	13	74	73	77	77	97	97	100	100	1	0.87	0.5
Fichtelberg													
TM	-21.9	-20.8	5.4	5.4	5.9	5.9	17.1	17.2	28.6	30.2	1.01	0.97	0.23
RR	0	0	0.08	0.09	0	0	0.40	0.54	30.2	47.4	0.98	0.15	1.29
SD	0	0	134	13.1	0	0	60.0	60.0	60.0	60.0	0.99	0.8	0.62
FF	0	0	5.5	5.5	5.1	5.1	10.7	10.7	18.9	19.4	0.98	0.78	0.66
RF	5	5	83	83	91	90	100	100	100	100	0.99	0.84	0.56

Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten zwischen den beobachteten und disaggregierten stündlichen Daten zur Feststellung der elementübergreifenden Konsistenz

Elemente-paar	Dresden Obs Sim		Fichtelberg Obs Sim	
TM / SD	0.39	0.41	0.34	0.36
TM / RR	0.01	0.01	-0.02	-0.03
TM / RF	-0.57	-0.58	-0.37	-0.40
TM / FF	-0.07	-0.03	-0.27	-0.24
SD / RR	-0.08	-0.08	-0.10	-0.11
SD / RF	-0.58	-0.61	-0.48	-0.53
SD / FF	0.03	0.09	-0.19	-0.12
RR / RF	0.15	0.14	0.14	0.15
RR / FF	0.03	0.03	0.09	0.08
RF / FF	-0.13	-0.18	0.25	0.21

Die beobachteten und disaggregierten Tagesgänge sind für Dresden und Fichtelberg in Abbildung 2 dargestellt. Die Temperatur hat generell einen regelmäßigen, sinusförmigen Tagesgang. Dieser wird vom Modell gut wiedergegeben. Die Disaggregation der relativen Luftfeuchtigkeit gelingt gut für Dresden. Die großen temperaturinduzierten Schwankungen werden wiedergegeben. Für den Fichtelberg sind die beobachteten Temperatur- und demzufolge die relativen Feuchteschwankungen wesentlich geringer. Da zur Disaggregation häufig niedrigere Stationen verwendet werden, paust sich deren größere Schwankungsbreite bei der Disaggregation durch. Der Tagesgang der Sonnenscheindauer wird für Dresden gut simuliert, für den Fichtelberg verschiebt sich der disaggregierte Tagesgang um 1-2 Stunden. Die Windgeschwindigkeit ist naturgemäß stochastischer, weist größere, irreguläre tägliche Schwankungen auf. In der Regel gibt es tagsüber höhere Windgeschwindigkeiten als nachts (siehe Dresden). Tagsüber ist die bodennahe Grenzschicht gut gekoppelt mit den darüber liegenden Luftschichten, weshalb stärkere Winde bis zur Erdoberfläche durchdringen können. Nächtliche Temperaturinversionen über der Erdoberfläche sorgen häufig für eine Entkopplung des Windes, mit der Folge, dass sich bodennah die Windgeschwindigkeit vermindert und an der Oberkante der Inversion ein Windmaximum (low-level-jet) auftritt. Ragen nun einzelne topografische Erhebungen häufig aus den Inversionen heraus, können diese im Bereich des low-level-jet liegen, was zu nächtlich erhöhten Windgeschwindigkeiten führt. Dies scheint am Fichtelberg der Fall zu sein (entgegengesetzter beobachtete Tagesgang). Da zur Disaggregation häufig niedrigere Stationen verwendet werden, paust sich deren Jahresgang bei der Disaggregation durch. Für den Niederschlag wurde eine für die Halbjahre getrennte Darstellung gewählt (Abbildung 3). Im Sommerhalbjahr werden die höchsten Werte in den frühen Abendstunden beobachtet und auch so disaggregiert. Im Winterhalbjahr gibt es keinen ausgeprägten Tagesgang. Jedoch weist der mittlere, disaggregierte Tagesgang am Fichtelberg nahezu ganzjährig leicht erhöhte Werte auf.

Auf eine Abbildung der Jahresgänge kann für den stationsweisen Vergleich verzichtet werden, da methodenbedingt die Stundenwerte an die Tageswerte angepasst werden und sich demzufolge keine Abweichungen in den Jahresgängen ergeben.

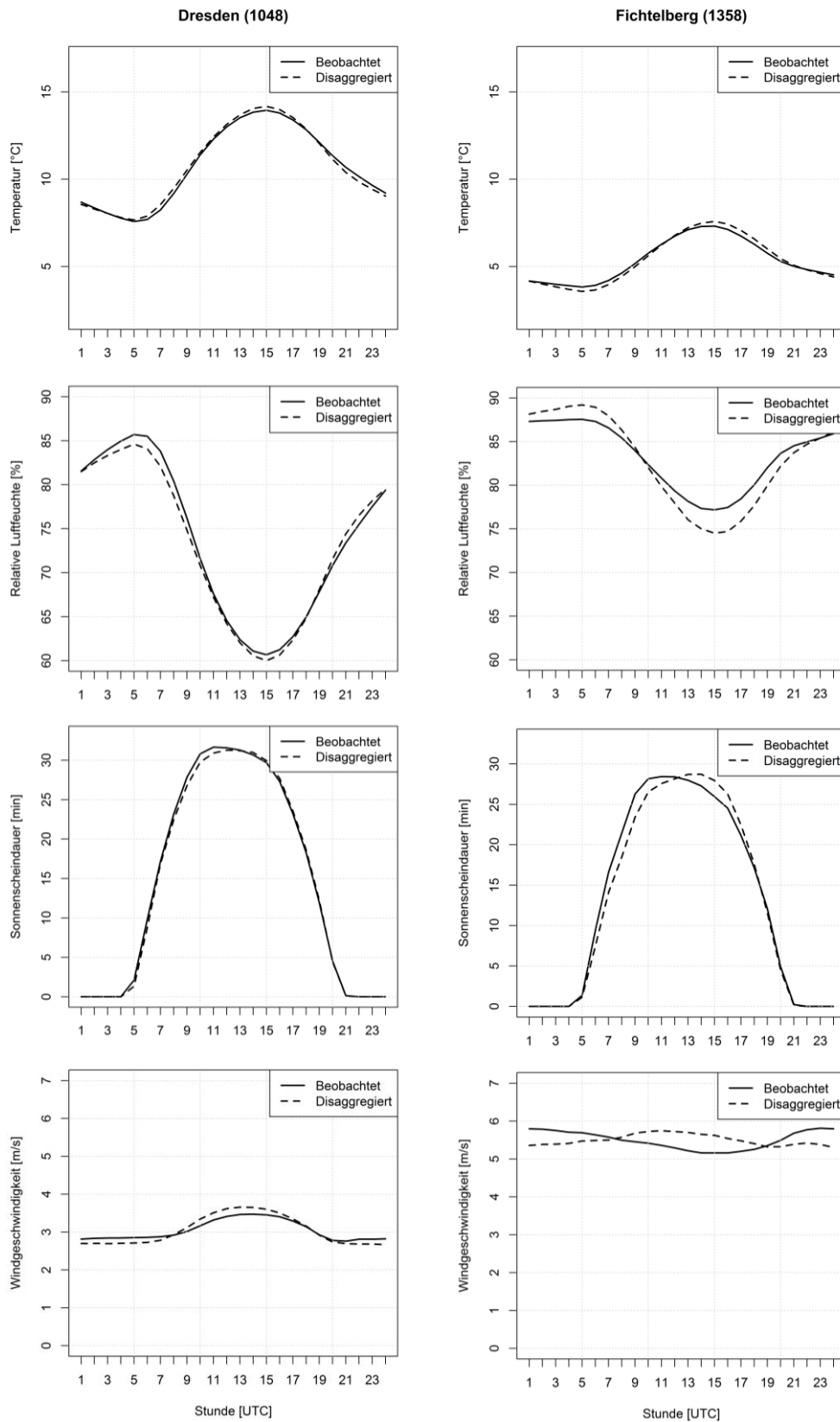


Abbildung 2: Beobachtete und disaggregierte Tagesgänge für Dresden-Klotzsche (links) und Fichtelberg (rechts), Jahresmittel

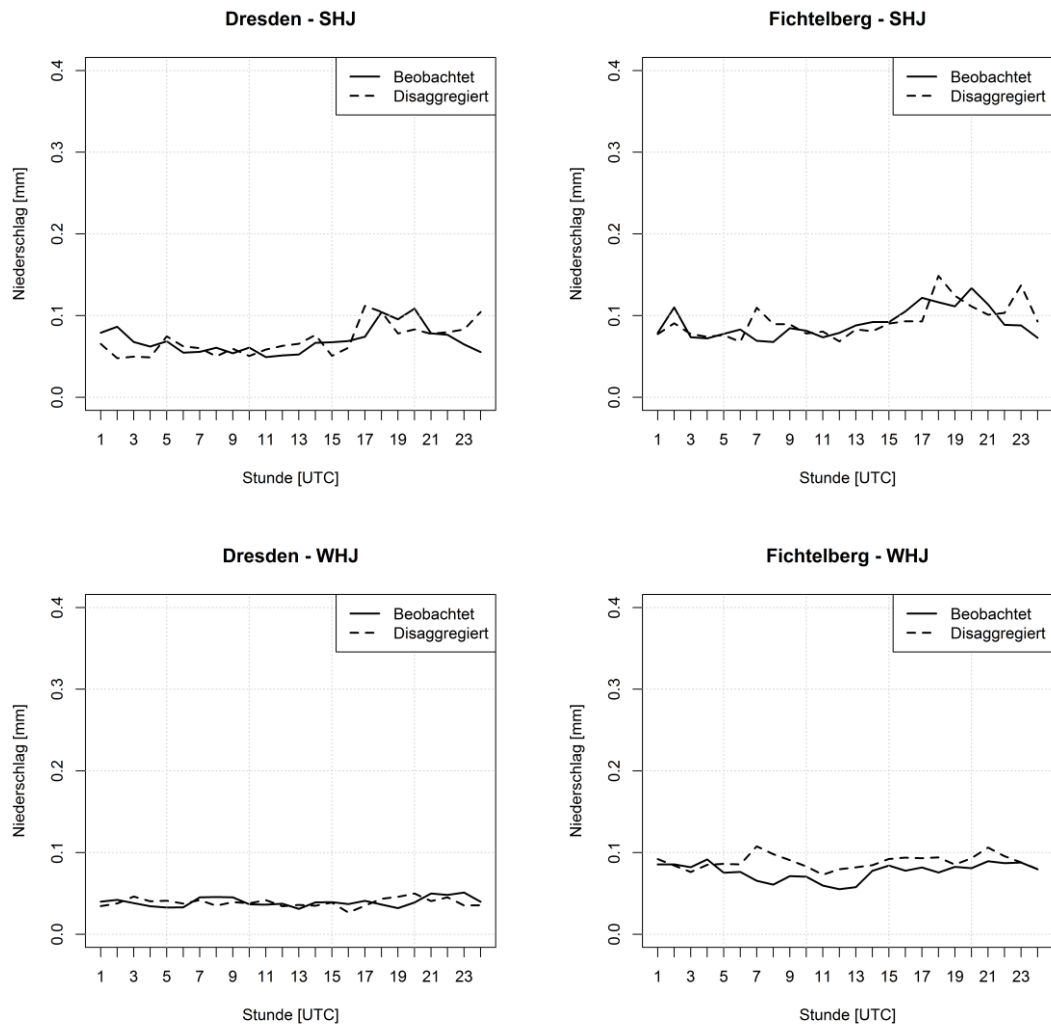


Abbildung 3: Beobachtete und disaggregierte Tagesgänge des Niederschlags für Dresden-Klotzsche (links) und Fichtelberg (rechts), Sommerhalbjahr SHJ und Winterhalbjahr WHJ

Ein Vergleich mit den Ergebnissen eines Disaggregationstools von FÖRSTER ET AL. (2016) (Tabelle 3) verdeutlicht, dass der Wettergenerator Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit besser abbildet. Die Windgeschwindigkeit weist eine ähnliche Güte auf.

Tabelle 3: Vergleich der Fehler (Root Mean Square Difference) und des Korrelationskoeffizienten r zwischen beobachteten und disaggregierten Stundendaten für Dresden und Fichtelberg und die Disaggregation von FÖRSTER ET AL., 2016 (Spannbreite von fünf Orten weltweit)

Klimaelement	Station	RMSD	r
Temperatur	Dresden	1.7	0.98
Temperatur	Fichtelberg	1.75	0.97
Temperatur	FÖRSTER ET AL.	1.63-2.69	0.93-0.97
Windgeschwindigkeit	Dresden	1.24	0.68
Windgeschwindigkeit	Fichtelberg	1.9	0.78
Windgeschwindigkeit	FÖRSTER ET AL.	0.85-1.95	0.57-0.83
Relative Luftfeuchtigkeit	Dresden	9.23	0.87
Relative Luftfeuchtigkeit	Fichtelberg	10.66	0.84
Relative Luftfeuchtigkeit	FÖRSTER ET AL.	10.4-18.5	0.02-0.72

4.2 Validierung der Disaggregation interpolierter Daten

Die Güte der Disaggregation der interpolierten Tagesdaten des Referenzdatensatzes wird durch einen Abgleich von beobachteten Stundenwerten von exemplarisch zehn Stationen mit der jeweils nächstgelegenen disaggregierten RaKliDa-Rasterzelle realisiert. Exemplarisch sind in Abbildung 4 die Quantile und das Taylordiagramm, in Abbildung 7 die Jahresgänge und in Abbildung 5 die Tagesgänge für die Stationen Dresden-Klotzsche und Fichtelberg dargestellt. Abbildungen für die weiteren acht Stationen sind dem digitalen Anhang zu entnehmen.

Die Quantil-Quantil-Plots (Abbildung 4, links) zeigen – wie bei der Disaggregation der Stationstasten – eine hohe Übereinstimmung für geringe stündliche Niederschläge. Höhere Niederschläge der disaggregierte Rasterzelle nahe Dresden (ab 14 mm) fallen deutlich höher aus, beim Fichtelberg (ab 8 mm) deutlich geringer. Die Überschätzung des extremsten Niederschlags am Fichtelberg ist erheblich (70 %).

Die Taylordiagramme (Abbildung 4, rechts) verdeutlichen eine etwas schlechtere Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Die Korrelationskoeffizienten sinken, die Fehler steigen und die Standardabweichung wird geringer (geringere simulierte Variabilität).

Der mittlere Tagesgang (Abbildung 5) der disaggregierten Temperaturen weist an beiden Stationen eine höhere Amplitude auf. Dies wirkt sich direkt auf die Amplituden der relativen Feuchte aus. So geht eine Überschätzung der Mittagstemperaturen am Fichtelberg mit einer Unterschätzung der relativen Feuchte einher. Die Sonnenscheindauern werden um ca. 10 % unterschätzt. Die Windgeschwindigkeiten werden in Dresden trotz der erhöhten Amplitude recht gut simuliert. Am Fichtelberg verstärkt sich die schon beim Stationsvergleich festgestellte Differenz, so dass eine merkliche Unterschätzung resultiert. Der Niederschlag wird in beiden Fällen im Winterhalbjahr überschätzt (Abbildung 6), im Sommerhalbjahr wird der leichte Tagesgang recht gut getroffen.

Der aus den Stundendaten abgeleitete Jahresgang (Abbildung 7) wird für die Temperatur gut wiedergegeben. Ebenso für die relative Luftfeuchtigkeit in Dresden. Die leichte Unterschätzung der disaggregierten Temperatur am Fichtelberg im Winter manifestiert sich in einer Überschätzung der relativen Feuchte. Etwas zu geringe relative Feuchten werden im Rest des Jahres simuliert. Die Sonnenscheindauer wird systematisch um ca. 20 % unterschätzt, im Winter etwas weniger, im Sommer etwas mehr. Die Disaggregation der Windgeschwindigkeit gelingt sehr gut für Dresden, zu einer systematischen Unterschätzung kommt es am Fichtelberg. Die systematische Überschätzung des Niederschlags ist auf die Niederschlagskorrektur zurückzuführen. Die beobachteten Stundendaten liegen unkorrigiert vor, die Disaggregation beruht auf korrigierten Tagesdaten des Referenzdatensatzes. Die Überschätzung beträgt im Sommer zwischen 5 und 11 % und im Winter zwischen 25 und 84 %.

Die statistischen Kennzahlen aller zehn Stationen sind der Tabelle 6 im Anhang zu entnehmen. Sie wurden in der Abbildung 8 visualisiert, um u. a. eventuell vorhandene Abhängigkeiten von der Geländehöhe zu detektieren. Gut erkennbar werden die Unterschiede in der Güte der Disaggregation von verschiedenen Klimaelementen: die Temperatur mit der höchsten Korrelation, dem geringsten Fehler und der ähnlichsten Varianz und als Gegenpol Windgeschwindigkeit und Niederschlag mit geringen Korrelationen, großen Fehlern und stark abweichender Varianz. Systemische Höhengradienten der Performancemaße sind nicht erkennbar. Vielmehr scheinen diese von lokalen Gegebenheiten abzuhängen, wie ein Blick auf die Normalisierte Standardabweichung des Windes vermuten lässt. So treten bei einer Geländehöhe von 400 m an zwei Stationen sehr große und an einer Station nur geringe Fehler auf.

Die beobachteten und simulierten (disaggregierten) Korrelationskoeffizienten zwischen den Klimaelementen (Tabelle 4) weisen für Dresden und den Fichtelberg nur geringfügige Veränderungen auf und zeigen damit eine Erhaltung der elementübergreifenden Konsistenz bei der Disaggregation an. Die größten Probleme – mit Abnahmen der Korrelationskoeffizienten um 0,11 (TM/FF) und 0,17 (RF/FF) – treten bei Beteiligung der Windgeschwindigkeit auf.

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Untersuchung zur räumlichen Konsistenz zusammengetragen. Die Korrelationen der beobachteten stündlichen Temperaturen zwischen den Stationen sind hoch und verändern sich nur geringfügig während der Disaggregation.

Beim Niederschlag sind die beobachteten Korrelationen naturgemäß deutlich geringer. Bei der Aggregation verschlechtern sie sich signifikant, d. h. das Modell ist nicht in der Lage, stündliche Niederschläge real auf den Tag zu verteilen.

Die Korrelationen der beobachteten stündlichen Feuchtwerte der Stationspaare, die den Fichtelberg beinhalten, sind gering, was die klimatische Sonderstellung der Bergstation herausstreicht. Die Korrelationen der disaggregierten Stundenwerte sind dagegen deutlich höher, ein Hinweis darauf, dass durch Verwendung der Tagesgänge benachbarter Stationen auch die Sonderstellung des Fichtelbergs abgeschwächt wird. Bei einigen anderen Stationspaaren ist eine geringe Verminderung der Korrelation zu verzeichnen.

Für die Sonnenscheindauer verschlechtern sich die Korrelationen während der Disaggregation (von durchschnittlich 0.83 auf 0.67).

Für die Windgeschwindigkeit sind keine eindeutigen Tendenzen zu erkennen. Meist sind die Unterschiede in den Korrelationskoeffizienten gering. Lediglich in zwei Fällen (Aue-Chemnitz und Aue-Fichtelberg) kommt es zu einer merklichen Verbesserung der Zusammenhänge bei den disaggregierten Werten.

Generell zeigt sich eine geringere Übereinstimmung der disaggregierten Rasterzellen des Referenzdatensatzes mit den beobachteten Stundendaten als der direkte Vergleich mit den disaggregierten Stationsdaten. Hier manifestieren sich die auftretenden Ungenauigkeiten der Interpolation der meteorologischen Variablen. Insbesondere bei Variablen, die räumlich sehr heterogen sind (FF) und/oder nur über wenig Stützstellen verfügen (SD), sind die Abweichungen groß. Auch Stationen auf den Kammlagen des Erzgebirges, wie der Fichtelberg, weisen aufgrund ihrer Exponiertheit und dem damit zusammenhängenden spezifischen Wetter größere Unsicherheiten bei der Interpolation und somit der Disaggregation auf. Die räumliche Konsistenz der Klimaelemente verschlechtert sich systematisch etwas beim Niederschlag und der Sonnenscheindauer. Des Weiteren sind Tendenzen der Abschwächung der räumlichen Variabilität erkennbar.

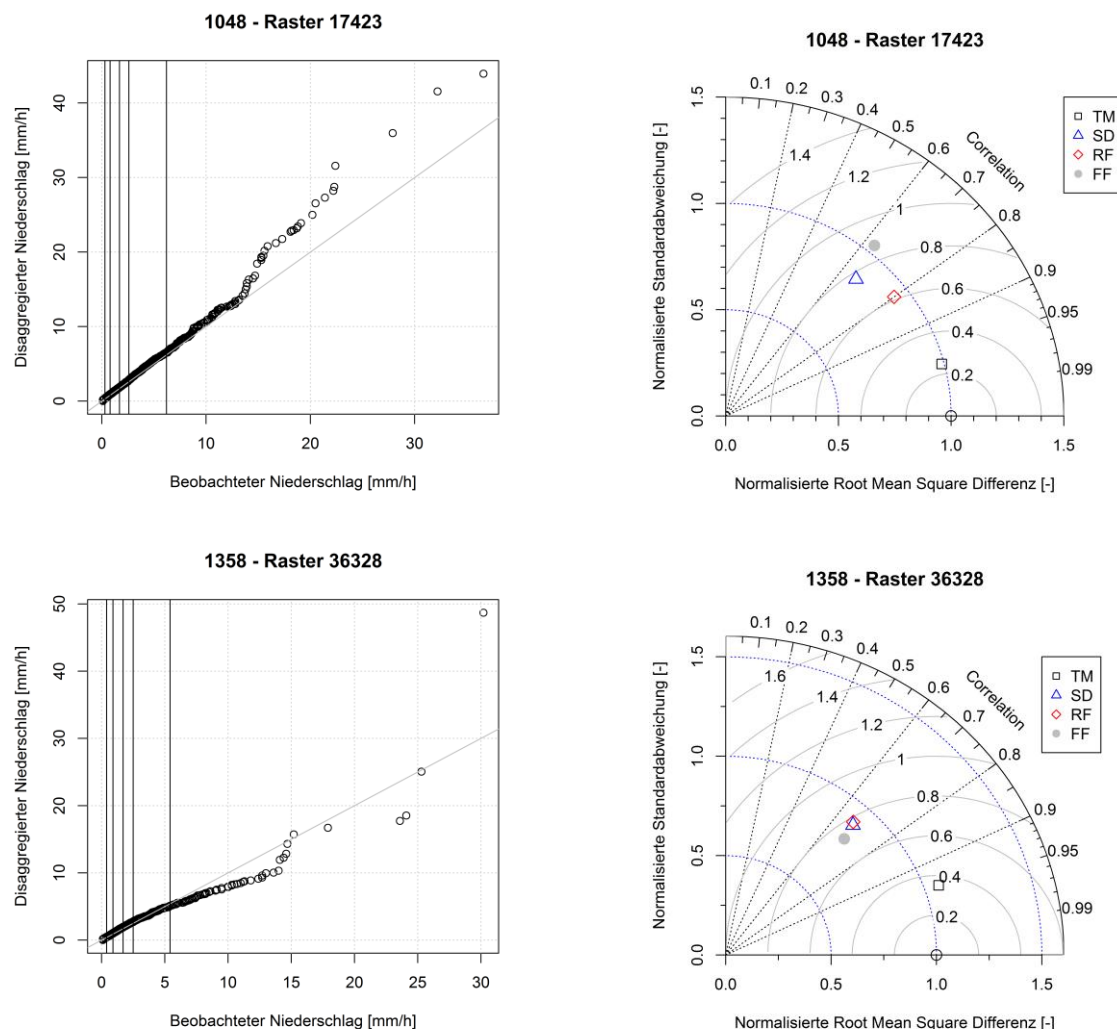


Abbildung 4: Links: Quantil-Quantil-Plot der disaggregierten und beobachteten stündlichen Niederschläge (vertikale Linien markieren v. l. n. r das 50., 75., 90., 95. und 99. Perzentil des beobachteten Niederschlags). Rechts: Taylordiagramm der disaggregierten und beobachteten stündlichen Werte der Temperatur (TM), Sonnenscheindauer (SD), relativen Feuchte (RF) und Windgeschwindigkeit (FF)

Tabelle 4: Korrelationskoeffizienten zwischen den beobachteten und disaggregierten stündlichen Daten zur Feststellung der elementübergreifenden Konsistenz

Elemente- paar	Dresden		Fichtelberg	
	Obs	Sim	Obs	Sim
TM / SD	0.39	0.36	0.34	0.32
TM / RR	0.01	0.01	-0.02	-0.04
TM / RF	-0.55	-0.56	-0.38	-0.47
TM / FF	-0.10	-0.04	-0.27	-0.16
SD / RR	-0.08	-0.07	-0.10	-0.11
SD / RF	-0.58	-0.57	-0.48	-0.56
SD / FF	0.00	0.04	-0.19	-0.01
RR / RF	0.15	0.13	0.14	0.16
RR / FF	0.04	0.05	0.09	0.09
RF / FF	-0.12	-0.18	0.25	0.08

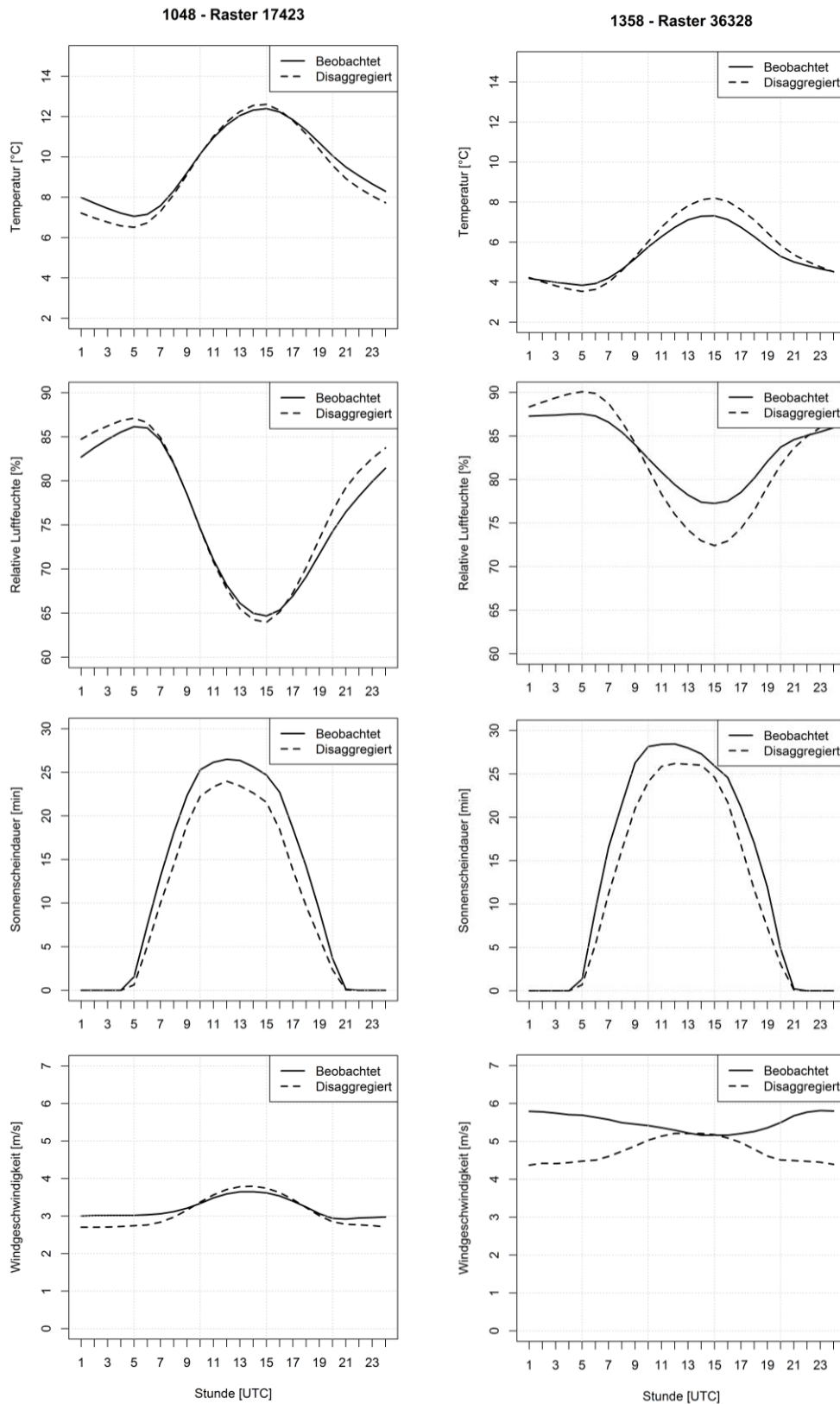


Abbildung 5: Tagesgang der beobachteten stündlichen Werte und der nächstgelegenen disaggregierten Rasterzelle des Referenzdatensatzes an den Stationen Dresden (links) und Fichtelberg (rechts), Jahresmittel

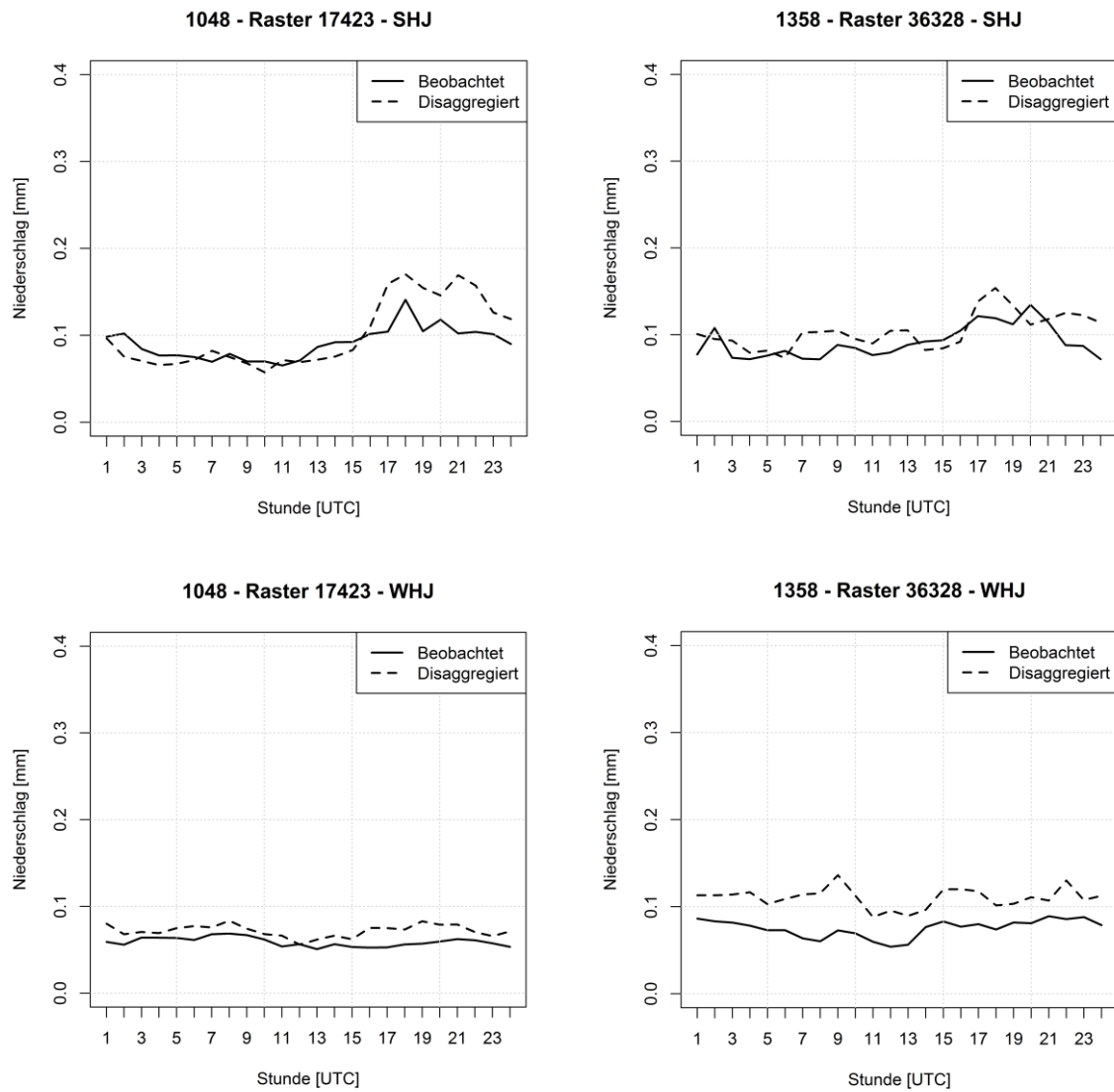


Abbildung 6: Tagesgang der beobachteten stündlichen Niederschläge und der nächstgelegenen disaggregierten Rasterzelle des Referenzdatensatzes an den Stationen Dresden (links) und Fichtelberg (rechts), Sommerhalbjahr SHJ und Winterhalbjahr WHJ

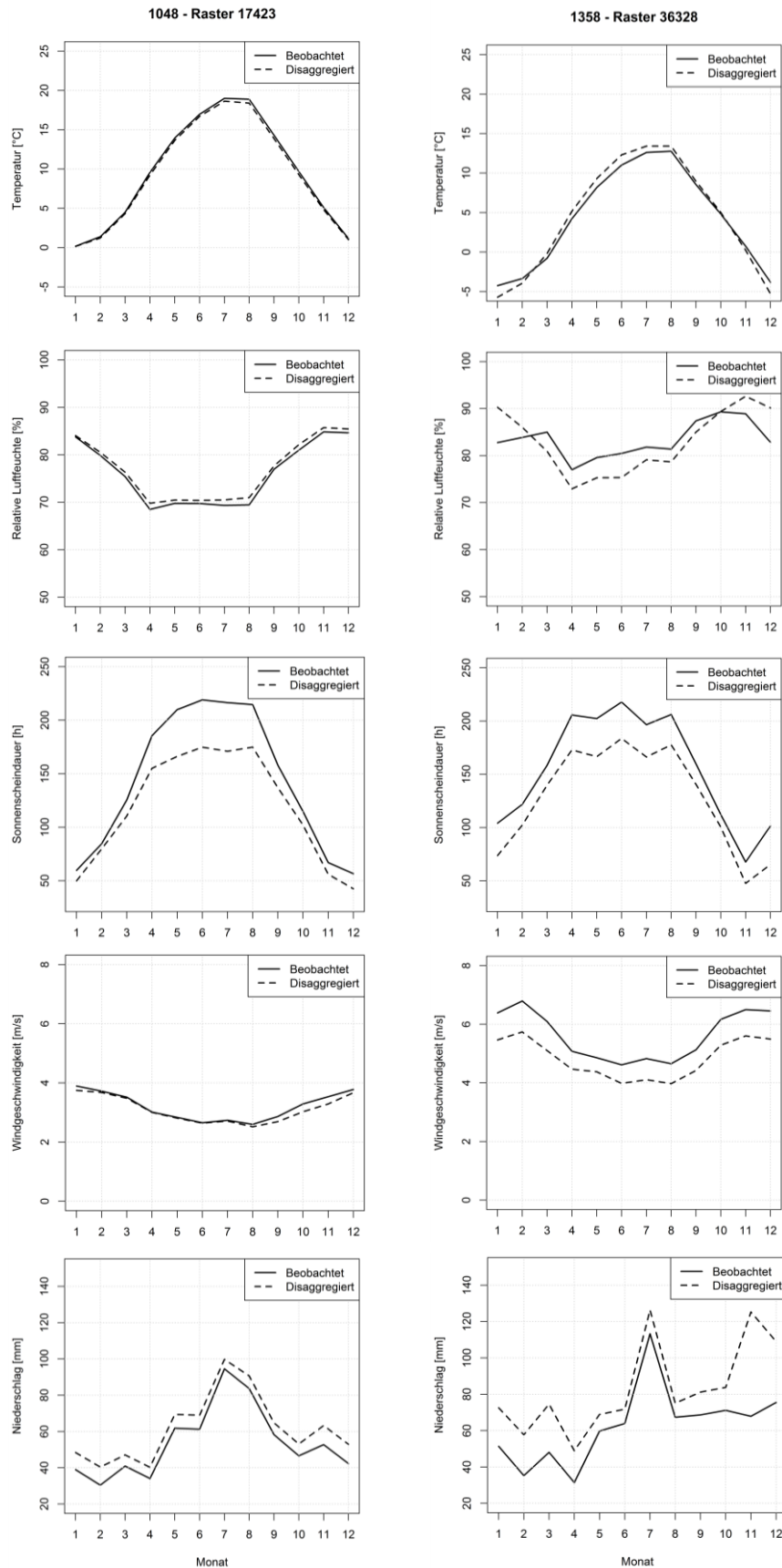


Abbildung 7: Jahresgang der beobachteten stündlichen Werte und der nächstgelegenen disaggregierten Rasterzelle des Referenzdatensatzes an den Stationen Dresden-Klotzsche (links) und Fichtelberg (rechts)

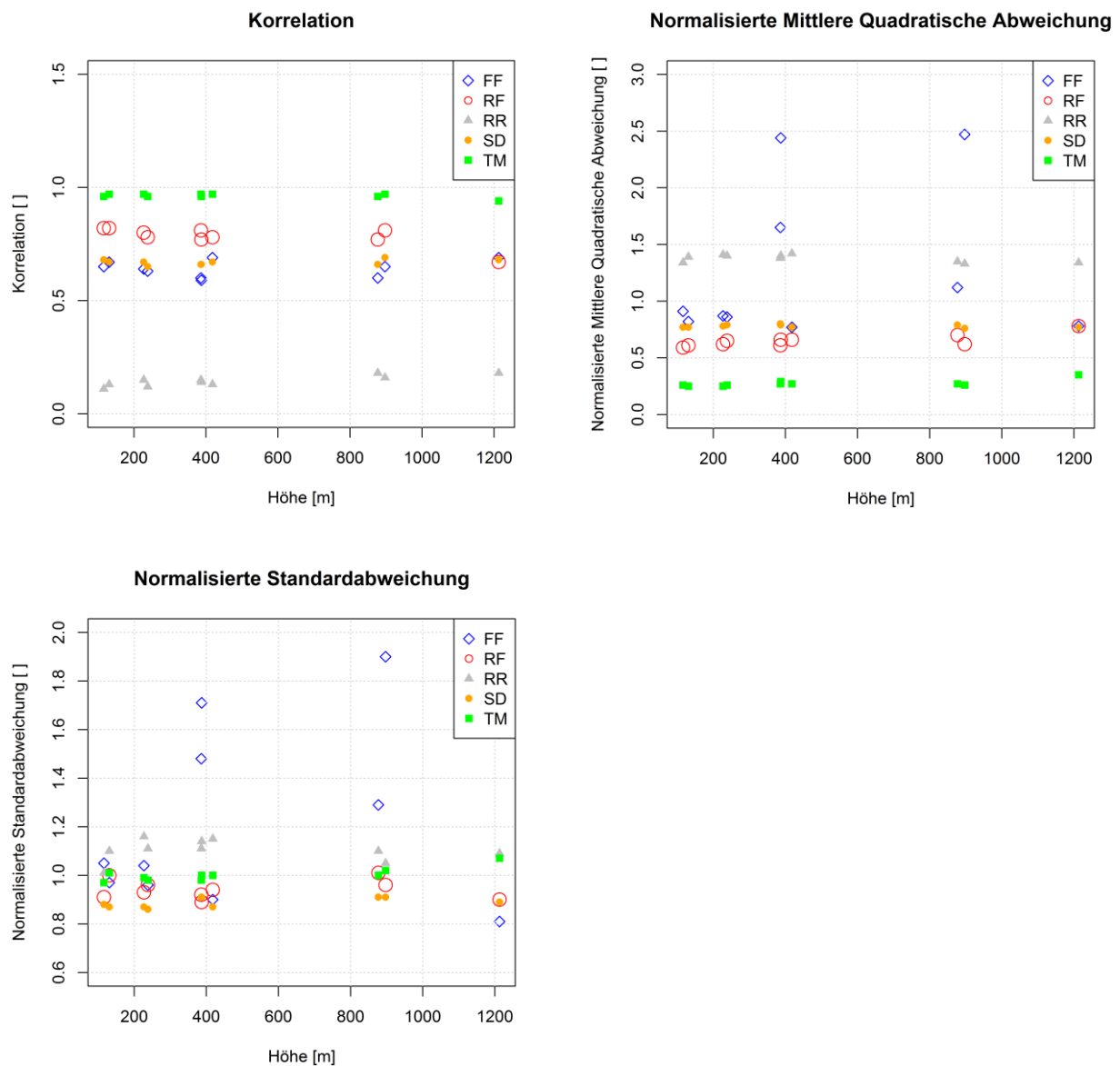


Abbildung 8: Statistische Kennzahlen des Vergleichs disaggregierter Rasterzellen des RDS und beobachteter Stundendaten aller Klimaelemente an zehn Klimastationen (FF: Windgeschwindigkeit, RF: Relative Feuchte, RR: Niederschlag, SD: Sonnenscheindauer, TM: Mitteltemperatur)

Tabelle 5: Beobachtete (Obs) und disaggregierte (Sim) Korrelationskoeffizienten einzelner Klimaelemente zwischen jeweils zwei Stationen

Stationen	Temperatur		Niederschlag		rel. Feuchte		Sonnen.-dauer		Windgeschw.	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
Aue-Chemnitz	0.98	0.99	0.46	0.31	0.85	0.90	0.89	0.86	0.68	0.87
Aue-Dresden	0.97	0.97	0.25	0.15	0.83	0.81	0.79	0.64	0.67	0.73
Aue-Fichtelberg	0.91	0.95	0.61	0.18	0.54	0.75	0.83	0.63	0.45	0.65
Chemnitz-Dresden	0.98	0.97	0.25	0.15	0.88	0.81	0.84	0.65	0.71	0.71
Chemnitz-Fichtelberg	0.96	0.95	0.37	0.11	0.66	0.75	0.84	0.63	0.71	0.64
Dresden-Fichtelberg	0.93	0.94	0.17	0.13	0.54	0.70	0.78	0.60	0.60	0.58

4.3 Validierung mittels Radardaten

Nachfolgende Ergebnisse zeigen einen Vergleich zwischen den Ergebnissen des Wettergenerators von 23 Klimastationen und den jeweils nächst gelegenen vier Radolanzellen. Für die Berechnungen stehen für Dresden zwei, für Plauen ein, für Nossen und Leipzig vier und sonst fünf Jahre zur Verfügung. Es werden die Ergebnisse von zehn Stationen gezeigt, weitere Abbildungen können dem digitalen Anhang entnommen werden. Gütemaße sind der Tabelle 7 im Anhang zu entnehmen.

Der Vergleich der Jahresgänge (Abbildung 9) zeigt an – unabhängig von der stündlichen Auflösung – inwieweit klimatologische Aussagen mit Radolan möglich sind. Die starken Abweichungen in Aue, Dresden, Carlsfeld und Fichtelberg verdeutlichen, dass dies in vielen Fällen noch nicht möglich ist. Die prinzipiellen Probleme des operativen Produktes Radolan für klimatologische Auswertungen wurden u. a. im DWD-Projekt „Radarklimatologie“ beleuchtet (WINTERRATH ET AL., 2017).

Einen Vergleich der Daten auf Stundenbasis ermöglichen die Quantil-Quantil-Plots (Abbildung 10). Generell ist die Übereinstimmung bis ca. 10 mm recht gut. Für größere Niederschlagsintensitäten ergeben sich Über- oder Unterschätzungen. Die durch Radolan ermittelten Perzentile liegen für Dresden deutlich unter den disaggregierten Perzentilen, und für Fichtelberg deutlich darüber. Der Widerspruch von zu geringen stündlichen Radolan-Niederschlägen in Dresden und einer zu hohen Radolan-Jahressumme wird aufgelöst durch die Häufigkeit von Regenstunden (> 0 mm). Detektiert Radolan 14.476 Regenstunden einer mittleren Intensität von 0,35 mm, so ergeben sich bei der Disaggregation 4.686 Regenstunden mit im Mittel 0,76 mm (Tabelle 7). Auf dem Fichtelberg weist Radolan dagegen nur etwa die Hälfte der disaggregierten Regenstunden auf. Die Frage, ob der Wettergenerator prinzipiell die Anzahl an Regenstunden korrekt wiedergibt, kann bejaht werden. Eine Analyse über 10 Stationen zeigte Abweichungen von wenigen Prozent, mit der Ausnahme des Fichtelbergs, an dem 16 % mehr Regenstunden simuliert wurden. Hier muss demzufolge eine Unsicherheit bei Radolan konstatiert werden.

An einigen Stationen zeigen sich Unsicherheiten in der Quantifizierung des Niederschlags durch Radolan. So treten beispielsweise höchst unplausible Niederschläge von bis zu 100 mm/h in Oschatz auf (Abbildung 10). In der Regel liefert Radolan sehr gute stündliche Abschätzungen des Niederschlags (im Gegenteil zu klimatologischen Abschätzungen). Die Abweichungen des Niederschlags oberhalb von ca. 10 mm zeigen an, dass die durch Radolan erfasste, hohe räumliche und zeitliche Variabilität solcher Niederschläge nicht durch den Wettergenerator wiedergegeben wird. Gründe hierfür sind, dass das Modell nicht auf eine optimale Wiedergabe des Niederschlags ausgelegt ist, sondern auf die optimale Wiedergabe aller Variablen. Auch erfolgt keine Anpassung an die aktuelle Witterungssituation bei der Disaggregation. Beispielsweise könnte ein durch konvektive Niederschläge geprägter Frühsommertag im Gebirge einem Herbsttag mit advektiven Niederschlägen im Flachland ähneln (Ähnlichkeit ermittelt über alle fünf Klimaelemente). In diesem Fall würde der Tagesgang der Niederschläge stark voneinander abweichen. Verbesserungen hinsichtlich der Abbildung des Niederschlags sind vorstellbar, z. B. durch eine höhere Wichtung des Niederschlags bei der Berechnung der elementübergreifenden Euklidischen Distanz. Das würde aber zu Lasten der Abbildung der anderen Elemente gehen.

Der Vergleich der mittleren disaggregierten und der Radolan Tagesgänge im Sommerhalbjahr (Abbildung 11), zeigt zum einen systematische Abweichungen der Niederschlagshöhe (z. B. Dresden) und Abweichungen in den höchsten mittleren Stundenwerten (z. B. Görlitz). Zum anderen wird deutlich, dass in den meisten Fällen die Nachbildung des Tagesgangs des Niederschlags – mit einem Minimum in den Morgenstunden und Maximum in den späten Nachmittags-/frühen Abendstunden – gelingt.

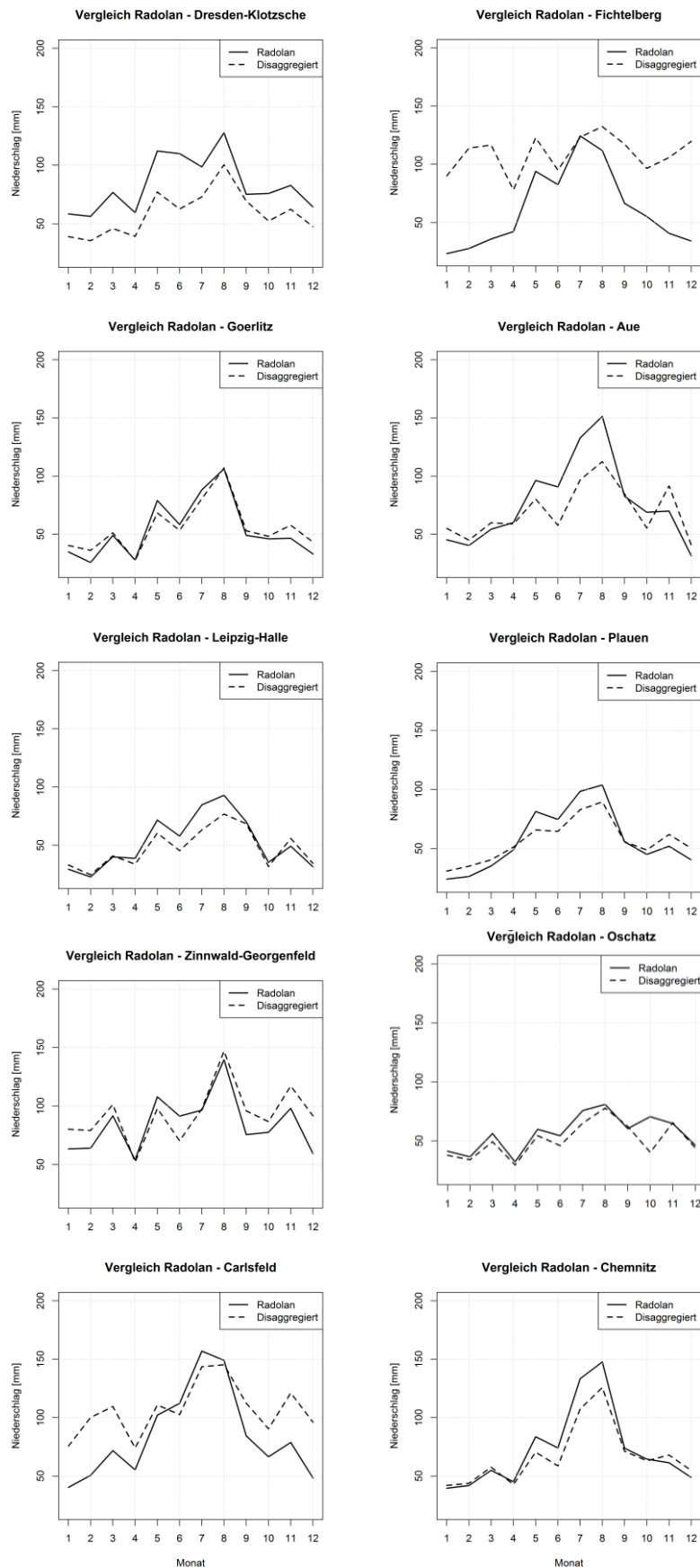


Abbildung 9: Vergleich der Jahresgänge, gebildet aus disaggregierten Niederschlägen von zehn Klimastationen und beobachteten Radarwerten

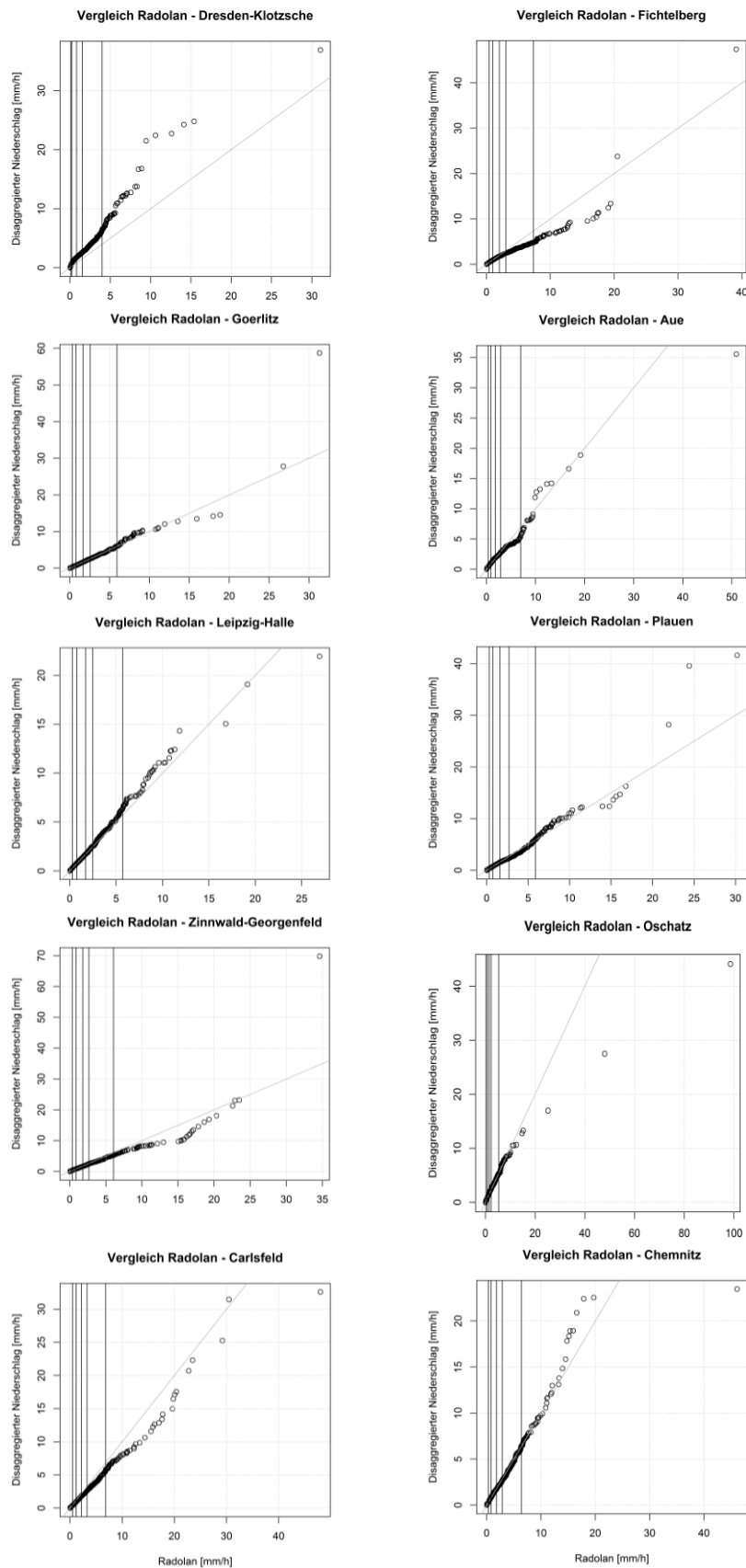


Abbildung 10: Quantil-Quantil-Plots für disaggregierte Niederschläge von zehn Klimastationen und beobachteten Radarwerten (RADOLAN-Wert der nächstgelegenen vier Zellen)

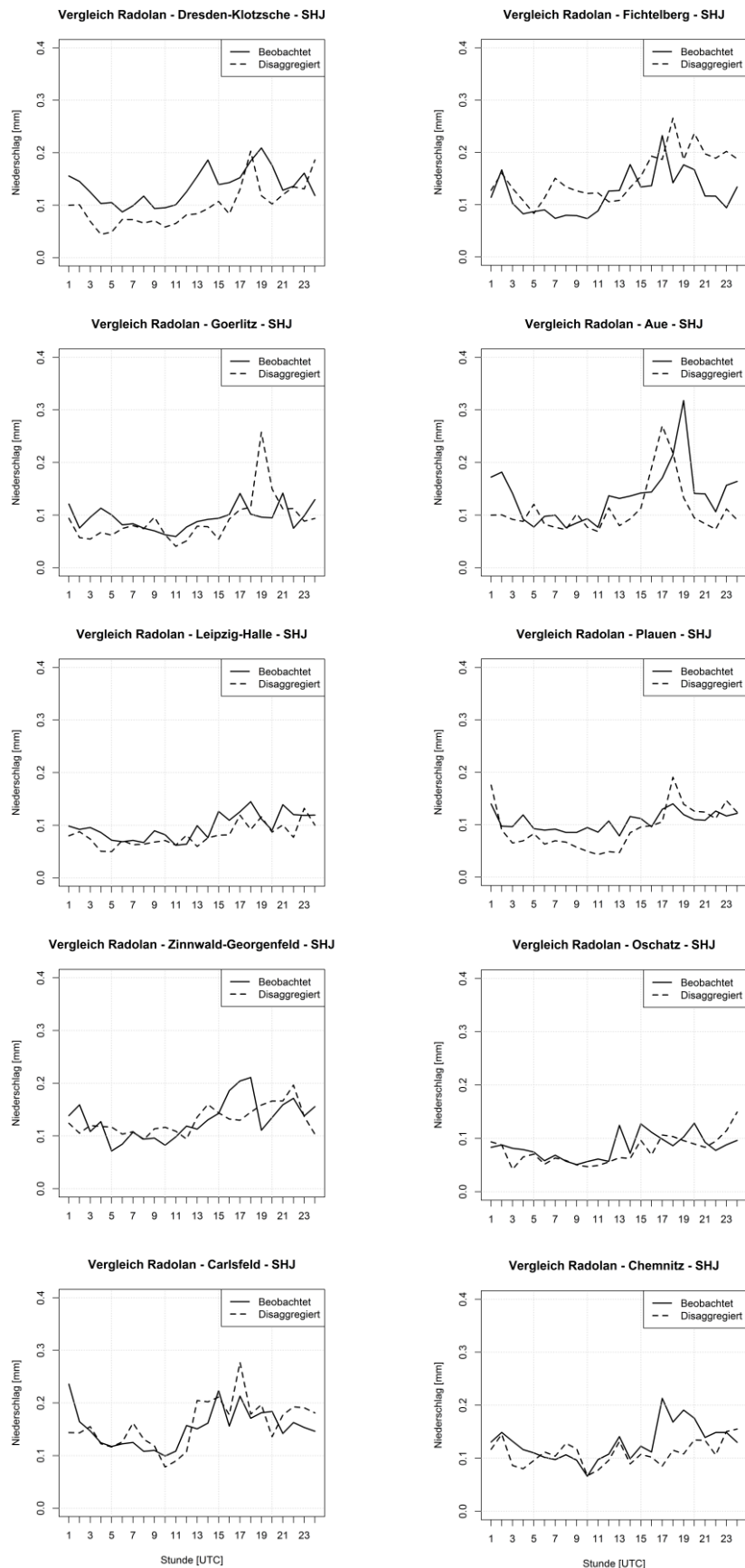


Abbildung 11: Tagesgänge des Sommerhalbjahrs für disaggregierte Niederschläge von zehn Klimastationen und beobachteten Radarwerten (RADOLAN-Wert der nächstgelegenen vier Zellen)

5 Benutzeroberfläche

Der Quellcode des Wettergenerators wurde in JAVA geschrieben und zu einem ausführbaren Programm überführt. Dieses kann, da plattformunabhängig, auf jedem Rechner mittels der JavaVirtualMachine (JVM) ausgeführt werden. Der Arbeitsspeicher des Computers sollte mindestens sechs Gigabyte groß sein.

Der Wettergenerator wird über REKIS unter der Rubrik ReKIS-Viewer/Werkzeuge zur Verfügung gestellt. Nach dem Heruntergeladen wird es an einer geeigneten Stelle auf dem Computer entpackt.

Unter „IN_FILES“ hat der Nutzer die zu disaggregierenden Stationsdateien in täglicher Auflösung und in einem festgelegten Format (siehe „Nutzerhandbuch zum Wettergenerator“) abzulegen. Die Formatierung hat durch den Nutzer zu erfolgen, kann aber durch ein R-Script („Data-preparation.r“) deutlich erleichtert werden. Das Script ermöglicht ein Herunterladen und Formatieren von Daten des DWD.

Die Ergebnisse der Disaggregation sind in „OUT_FILES“ unter demselben Namen wie in IN_FILES gespeichert.

Wird die Datei run.bat ausgeführt, öffnet sich eine Benutzeroberfläche (GUI). Mit dieser ist es möglich, Einstellungen vorzunehmen und das Tool zu starten. Hierbei bedeuten im Einzelnen:

- Datenpfad: Es ist der Pfad zu öffnen, in dem sich die Ordner „IN_FILES“, „OUT_FILES“ und die Datei „wg_data_h.txt“ befinden.
- Start: Start des Programms. Sämtlich im Inputordner befindlichen Stationszeitreihen werden disaggregiert.
- Optional können LogDateien angelegt werden. Das ist zum einen die Datei „out_d.txt“, welche die aus den Stundendaten generierten Tagesdaten beinhaltet und für die Ähnlichkeitssuche benötigt werden. Zum anderen werden auftretende Fehler bei der Disaggregation in die Datei „log.txt“ geschrieben.
- Im Feld Fortschritt werden der Verlauf sowie das Ende der Berechnungen angezeigt.

Wünscht der Nutzer den Abbruch der Berechnungen, so kann dies durch Klicken auf das Kreuz rechts oben auf der Benutzeroberfläche realisiert werden. Die bis zu diesem Zeitpunkt disaggregierten Stationen stehen im OUT_FILES Ordner zur Verfügung.

6 Zusammenfassung

Die flächenhafte Verfügbarkeit von täglichen Messdaten ist in Deutschland, insbesondere in der Vergangenheit, deutlich höher als für Stundendaten. Für viele Anwendungen werden jedoch Daten in stündlicher Auflösung benötigt, wie z. B. für die Hochwassermodellierung. Eine Möglichkeit der Bereitstellung stündlicher Daten ist, tägliche Beobachtungsdaten zu höheren zeitlichen Auflösungen zu disaggregieren.

Der von GÖRNER ET AL. (2018) entwickelte multivariate, parameterfreie Disaggregierungsansatz wurde innerhalb dieses Projekts in ein ausführbares Programm überführt und ausführlich getestet. Das Modell basiert auf der Verwendung von in der Vergangenheit beobachteten Tagesgängen. Durch Veränderungen des Klimas kann es jedoch zu noch nicht beobachteten Tagesgängen kommen, worauf bei der Verwendung des Wettergenerators für Klimaprojektionen geachtet werden sollte. Das Modell bedarf keiner Kalibrierung und weist sehr geringe Rechenzeiten auf. Die statistischen Eigenschaften sowie die Konsistenz der Elemente untereinander werden erhalten. Das Modell kann in der bisherigen Form auf alle Elemente TM, TN, TX, RR, RF, SD und FF gleichzeitig angewendet werden.

Zur Validierung wurden einerseits beobachtete stündliche Stationsdaten und andererseits stündliche Radardaten (Radolan-Produkt des DWD) verwendet. Der Wettergenerator wurde auf gerasterte Klimadaten Sachsens angewendet, die eigens aus dem Referenzdatensatz erstellt wurden. Somit liegen nun für mehr als 19.000 Rasterzellen Stundenwerte der Temperatur, des Niederschlags, der Sonnenscheindauer, der relativen Feuchte und der Windgeschwindigkeit für die Periode 1961-2015 vor.

Die Validierung des Disaggregationstools mittels Stationsdaten zeigt, dass die Disaggregation sehr zuverlässig für die Temperatur und für geringe Niederschlagsintensitäten funktioniert. Höhere stündliche Niederschlagsintensitäten werden meist leicht unterschätzt. Eine etwas geringere Güte zeigen die Disaggregationen für die relative Feuchte, die Sonnenscheindauer und die Windgeschwindigkeit (in dieser Reihenfolge). Die Güte an exponierten Stationen wie dem Fichtelberg ist prinzipiell nicht geringer als bei Flachlandstationen. Zwar ist z. B. die Güte der Luftfeuchtigkeit geringer, die der Windgeschwindigkeit jedoch höher.

Die Validierung der Disaggregation des Referenzdatensatzes zeigt größere Unsicherheiten auf. Durch die Interpolation der Klimaelemente können durch eine geringe Stationsdichte und/oder durch eine hohe räumliche Variabilität einzelner Klimaelemente Unsicherheiten auftreten, die sich nachfolgend in der Disaggregation zeigen. So sinkt die Güte bei höheren Niederschlagsintensitäten, und die Sonnenscheindauer wird unterschätzt. Auch bei Temperatur und Feuchte und insbesondere beim Wind steigen die Differenzen. Eine Abhängigkeit der Güte der Disaggregation von der Stationshöhe zeigt sich nicht.

Eine Validierung des Disaggregationstools mittels des stündlichen Radarproduktes Radolan erwies sich als nicht unproblematisch. Zum einen sind klimatologische Auswertungen von Radolan oft noch stark fehlerbehaftet, was starke positive oder negative Abweichungen vom Jahresgang des Niederschlags hervorruft. Zum anderen weist Radolan für viele Stationen eine stark abweichende Anzahl von Regenstunden mit von der Realität abweichenden Niederschlägen aus. Die disaggregierten Niederschlagsintensitäten bis zu ca. 10 mm stimmen jedoch gut mit Radolan überein. Bei stärkeren Niederschlägen treten zunehmend unsystematische Abweichungen auf, die größtenteils auf die Defizite des Wettergenerators bei der Abbildung stärkerer Niederschläge zurückzuführen ist. Eine prinzipielle Übereinstimmung zwischen Wettergenerator und Radolan besteht hinsichtlich des Tagesgangs.

Der erstellte Wettergenerator ist in der Lage, für einen Großteil von Witterungsbedingungen plausible und über alle Klimaelemente konsistente Stundendaten zu erzeugen. Auch die räumliche Konsistenz bleibt größtenteils erhalten. Es wird über die Klimaserviceplattform ReKIS als ausführbares Programm zur Verfügung gestellt. Es kann auf beliebige Klimastationen (bzw. Rasterzellen) angewendet werden. Es muss drauf geachtet werden, dass eine genügend große Basis mit stündlichen Daten aus der Klimaregion zur Verfügung steht. Andernfalls sinkt die Güte der Disaggregation.

7 Ausblick

Die zeitliche Disaggregation weist elementspezifische Fehler auf. Die Frage ist, ob eine Interpolation von vorhandenen Stundendaten auf einen interessierenden Ort, der nur über tägliche Beobachtungen verfügt, genauere Ergebnisse liefern kann als eine Disaggregation. Die Verfügbarkeit stündlicher Daten nimmt in Deutschland stetig zu. Markante Zunahmen der Stationen mit Stundendaten fanden für die Windgeschwindigkeit 1969, für die Luftfeuchtigkeit 1991 und 2002 sowie für die Temperatur 1981 und 2002 statt. Testrechnungen über fünf Jahre für Dresden (ab 1974) und Fichtelberg (ab 1951) zeigen, dass die Interpolation von stündlichen Daten zu einer höheren Güte (Korrelationskoeffizient) für die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur führt als die Disaggregation. Zielt man auf eine höchst mögliche Güte der Stundendaten ab, so sollte demzufolge elementspezifisch und in Abhängigkeit von der Stationsdichte geprüft werden, welches Verfahren geeigneter ist.

Erweiterungen des Wettergenerators sind unter Umständen sinnvoll, wie die Anwendung auf einzelne oder eine Auswahl an Elementen. Auch kann für spezifische Fragestellungen eine genauere Abbildung einzelner Klimalelemente nötig sein. So besitzt der Niederschlag für hydrologische Fragen eine herausragende Bedeutung, weshalb eine Wichtung der Elemente bei der Bestimmung der euklidischen Distanz sinnvoll sein könnte.

Literaturverzeichnis

- PLUNTKE, T., BARFUS, K., HEIDENREICH, M., KRONENBERG, R., HAUFFE, C., WAGNER, M., SCHWARZE, R., GUTZMANN, B., BERNHOFER, C.: Klima-Referenzdatensatz Sachsen 1961-2015. Abschlussbericht eines LFULG Projektes, (2017), 170 S.
- BLUMENSAAT, F., PAVLIK, D., SCHUBERT, K., TÖNNIES, A., BERNHOFER, C., KREBS, P.: Temporal rainfall disaggregation under minimum data requirements. In: Molnar P, Burlando P, Einfalt T (eds) 9th International Workshop on Precipitation in Urban Areas. ETH Zürich, St. Moritz, Switzerland, (2012), pp 16-21.
- GÖRNER, C., FRANKE, J., KRONENBERG, R., HELLMUTH, O., BERNHOFER, C.: Multivariate non-parametric Euclidean distance model for hourly disaggregation of daily climate data. Theoretical and Applied Climatology (TAAC), submitted in 2018
- LISNIAK, D., FRANKE, J., BERNHOFER, C.: Circulation pattern based parameterization of a multiplicative random cascade for disaggregation of observed and projected daily rainfall time series, Hydrol. Earth Syst. Sci., 17 (2013), pp 2487-2500, doi:10.5194/hess-17-2487-2013.
- KAHLIG, P.: On Deterministic Criteria for Heavy Rainfall at a Point, Institute of Meteorology and Geophysics, University of Vienna, Theor. Appl. Climatol. 46 (1991), pp 203-208.
- TAYLOR, K.E.: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. J Geophys res 106 (2001), pp 7183-7192.
- WINTERRATH, T., BRENDL, C., HAFFER, M., JUNGHÄNEL, T., KLAMETH, A., WALAWENDER, E., WEIG, L. E., BECKER, A.: Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Projekt-Abschlussbericht, (2017) (ftp://ftp-anon.dwd.de/pub/data/gpcc/radarklimatologie/Dokumente/Endbericht_Radarklimatologie_final.pdf, Zugriff: 13.09.2018)

Anhang

Tabelle 6: Statistische Kennzahlen der beobachteten Stundenwerte von zehn Stationen (Obs) und der nächstgelegenen disaggregierten Rasterzellen (Sim) sowie Performancemaße (SD_n, r, RMSD_n)

Ele- ment	Station	Minimum Obs Sim		Mittelwert Obs Sim		Median Obs Sim		95. Perzentil Obs Sim		Maximum Obs Sim		σ _n	r	RMSD _n
TM	Aue	-20.9	-20.2	8.4	8.0	8.3	7.9	22.2	21.6	36.3	35.3	1	0.96	0.29
RR		0	0	0.1	0.1	0	0	0.5	0.57	29.3	30.9	1.14	0.14	1.4
SD		0	0	10.1	9.5	0	0	60	56.3	60	60	0.91	0.66	0.79
FF		0	0	1.3	3.5	1	3.2	3.5	7.11	8	15.5	1.71	0.59	2.44
RF		12	18.4	77.2	78.7	82	82.5	97	97.1	100	100	0.89	0.77	0.66
TM	Carlsfeld	-24.1	-22.1	5.4	5.5	5.3	5.5	18.4	18.6	32.1	33.9	1.02	0.97	0.26
RR		0	0	0.1	0.2	0	0	0.8	0.93	50.7	48.0	1.05	0.16	1.33
SD		0	0	10.1	8.9	0	0	60	56.3	60	60	0.91	0.69	0.76
FF		0	0	2.3	4.6	2.1	4.3	4.5	8.8	9.4	17	1.9	0.65	2.47
RF		11	12	84.9	84.0	92	89.5	100	100	100	100	0.96	0.81	0.62
TM	Chemnitz	-19.7	-21.2	8.8	8.3	8.9	8.2	22.1	21.7	36.6	35.6	1	0.97	0.27
RR		0	0	0.1	0.1	0	0	0.4	0.51	37.4	38.5	1.15	0.13	1.42
SD		0	0	11.6	9.6	0	0	60	56.5	60	60	0.87	0.67	0.77
FF		0	0	3.2	3.5	2.7	3.2	7.3	7	16.5	16.6	0.9	0.69	0.77
RF		10	18.4	77.5	79.1	81	83.2	99	97.6	100	100	0.94	0.78	0.66
TM	Dresden- Klotzsche	-20.7	-21.8	9.6	9.3	9.7	9.3	23.2	23	36.7	37	0.99	0.97	0.25
RR		0	0	0.1	0.1	0	0	0.3	0.41	36.6	43.9	1.16	0.15	1.41
SD		0	0	11.9	9.9	0	0	60	56.7	60	60	0.87	0.67	0.78
FF		0	0	3.2	3.1	2.9	2.8	6.4	6.3	15.6	15.3	1.04	0.64	0.87
RF		14	17.9	76.1	77.0	80	80.8	98	96.7	100	100	0.93	0.8	0.62
TM	Fichtelberg	-21.9	-22.8	5.4	5.7	5.9	6.3	17.1	18.4	28.6	31.9	1.07	0.94	0.35
RR		0	0	0.1	0.1	0	0	0.4	0.63	30.2	48.7	1.09	0.18	1.34
SD		0	0	13.4	11.2	0	0	60	58.6	60	60	0.89	0.68	0.77
FF		0	0	5.5	4.7	5.1	4.4	10.7	9	18.9	17.7	0.81	0.69	0.78
RF		5	13	83.3	82.4	91	88.1	100	100	100	100	0.9	0.67	0.78

Fortsetzung Tabelle 6:

Ele- ment	Station	Minimum Obs Sim		Mittelwert Obs Sim		Median Obs Sim		95. Perzentil Obs Sim		Maximum Obs Sim		σ_n	r	RMSDn
TM	Görlitz	-22.1	-21.9	9.2	9.3	9.3	9.3	23	22.9	36.9	36	0.98	0.96	0.26
RR		0	0	0.1	0.1	0	0	0.3	0.4	35.1	26.9	1.11	0.12	1.4
SD		0	0	12.2	9.9	0	0	60	56.7	60	60	0.86	0.65	0.79
FF		0	0	2.9	3.1	2.5	2.9	6.3	6.4	14.9	16	0.96	0.63	0.86
RF		13	16.8	77.4	77.3	81	81.1	97	96.9	100	100	0.96	0.78	0.65
TM	Leipzig-Halle	-21.5	-21.1	9.8	9.8	9.9	9.7	23.2	23.5	36.6	36.4	1.01	0.97	0.25
RR		0	0	0.1	0.1	0	0	0.2	0.29	32.7	39.8	1.1	0.13	1.39
SD		0	0	12.0	10.0	0	0	60	56.7	60	60	0.87	0.67	0.77
FF		0	0	3.2	2.9	2.8	2.6	6.5	6	15.3	14.9	0.97	0.67	0.82
RF		15	15.1	77.3	76.2	81	79.8	98	96.7	100	100	1	0.82	0.61
TM	Plauen	-23.2	-20.7	8.5	8.1	8.3	8	22.5	21.5	36.8	34.2	0.98	0.97	0.27
RR		0	0	0.1	0.1	0	0	0.3	0.39	31.5	42.3	1.11	0.15	1.38
SD		0	0	10.4	9.5	0	0	60	56.3	60	60	0.91	0.66	0.8
FF		0	0	2.1	3.6	2	3.3	4.4	7	10.5	16.6	1.48	0.6	1.65
RF		12	19.5	77.5	79.4	82	83.5	97	97.7	100	100	0.92	0.81	0.61
TM	Zinnwald- Georgenfeld	-20.8	-22	5.7	6.0	5.9	6.1	18.3	19	31.2	34.6	1	0.96	0.27
RR		0	0	0.1	0.1	0	0	0.7	0.79	67.2	85.1	1.1	0.18	1.35
SD		0	0	10.5	9.3	0	0	60	56.6	60	60	0.91	0.66	0.79
FF		0	0	3.8	4.5	3.5	4.2	7.1	8.7	15	17.5	1.29	0.6	1.12
RF		7	12.1	85.7	83.4	93	88.9	100	100	100	100	1.01	0.77	0.7
TM	Hoyerswerda	-22.9	-20.9	9.8	9.7	9.6	9.6	23.9	23.4	37.7	36.3	0.97	0.96	0.26
RR		0	0	0.1	0.1	0	0	0.3	0.35	40.2	27.7	1.01	0.11	1.34
SD		0	0	12.4	10.2	0	0	60	57.6	60	60	0.88	0.68	0.77
FF		0.1	0	2.5	2.9	2.2	2.6	5.3	5.8	11.1	14.8	1.05	0.65	0.91
RF		16	15.1	76.7	76.9	81	80.5	98	97.4	100	100	0.91	0.82	0.59

Tabelle 7: Statistische Kennzahlen der Radolan-Niederschläge (Rad) und disaggregierten Stundenwerte (Sim) sowie Performancemaße (σ_n , r , RMSD_n). Mittelwert, Median und 95. Perzentil wurden von Regenstunden ($\text{RR} > 0 \text{ mm}$) berechnet.

Station	ID	Regenstunden		Mittelwert		Median		95. Perzentil		Maximum		σ_n	r	RMSD_n
		Rad	Sim	Rad	Sim	Rad	Sim	Rad	Sim	Rad	Sim			
Aue	222	2655	2342	0.81	0.84	0.36	0.42	2.88	2.79	50.9	35.56	0.85	0.16	1.2
Carlsfeld	840	5161	8097	0.99	0.8	0.51	0.4	3.29	2.65	47.98	32.6	1	0.21	1.26
Chemnitz	853	5682	5245	0.77	0.77	0.33	0.34	2.87	2.67	46.09	23.47	0.93	0.18	1.24
Cottbus	880	4793	4098	0.72	0.75	0.31	0.34	2.59	2.44	32.77	63.47	1.09	0.16	1.36
Doberlug-Kirchhain	1001	4829	4194	0.72	0.73	0.3	0.34	2.49	2.53	33.63	30.22	0.89	0.15	1.24
Dresden-Klotzsche	1048	14476	4686	0.35	0.76	0.1	0.35	1.54	2.6	31.05	36.88	1.04	0.17	1.31
Fichtelberg	1358	4168	8536	0.89	0.76	0.42	0.42	3.03	2.45	39.11	47.42	1.1	0.14	1.39
Gera-Leumnitz	1612	5052	4460	0.75	0.73	0.31	0.33	2.65	2.68	97.68	26.94	0.69	0.15	1.13
Görlitz	1684	4528	4686	0.72	0.72	0.32	0.31	2.59	2.56	31.31	58.74	1.13	0.17	1.38
Halle-Kröllwitz	1957	4259	3677	0.79	0.76	0.37	0.37	2.89	2.7	20.66	31.34	0.86	0.16	1.21
Bertsdorf-Hörnitz	2252	4583	4568	0.75	0.8	0.31	0.37	2.57	2.76	37.94	35.88	1.02	0.21	1.27
Hof-Hohensaas	2261	5141	5446	0.77	0.69	0.36	0.33	2.75	2.38	32.89	31.8	0.89	0.17	1.22
Leipzig-Holzhausen	2928	3894	3690	0.72	0.79	0.3	0.36	2.58	2.77	25.61	22.71	1.06	0.19	1.31
Leipzig-Halle	2932	4552	3977	0.7	0.73	0.3	0.32	2.49	2.53	26.92	21.95	0.98	0.12	1.32
Lichtenhain-Mittelndorf	2985	5468	5566	0.74	0.75	0.35	0.36	2.66	2.48	24.72	28.86	1.04	0.16	1.32
Marienberg	3166	5093	5882	0.77	0.74	0.36	0.35	2.66	2.44	24.82	34.51	1.07	0.18	1.33
Oschatz	3811	4990	4269	0.68	0.72	0.3	0.34	2.4	2.53	98.59	44.11	0.68	0.14	1.13
Osterfeld	3821	4622	4120	0.73	0.76	0.3	0.33	2.7	2.76	44.63	37	0.97	0.2	1.25
Plauen	3946	4738	4721	0.71	0.7	0.3	0.31	2.71	2.33	30.18	41.61	1.07	0.18	1.33
Schleiz	4464	5419	4589	0.68	0.7	0.3	0.3	2.54	2.52	40.39	24.94	0.89	0.17	1.22
Zinnwald-Georgenfeld	5779	6129	7060	0.78	0.74	0.36	0.38	2.66	2.47	34.6	69.81	1.04	0.17	1.32
Nossen	6314	11192	3796	0.37	0.73	0.12	0.32	1.48	2.59	18.51	21.56	1	0.15	1.31
Hoyerswerda	7393	1096	992	0.72	0.78	0.27	0.31	2.74	3.06	13.6	21.9	1.14	0.26	1.31

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg
Das LfULG ist eine nachgeordnete Behörde des
Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft

Autor:

Dipl.-Hydrol. Thomas Pluntke, Dr. Rico Kronenberg, Prof. Christian Bernhofer
Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie
Professur für Meteorologie
Pienner Str. 23, 01737 Tharandt
Telefon: + 49 351 463-31343 oder -31340
Telefax: + 49 351 463-31302
E-Mail: meteorologie@tu-dresden.de

Redaktion:

Dr. Johannes Franke
LfULG; Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Klima, Luftqualität
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-5116
Telefax: + 49 351 2612-5199
E-Mail: johannes.franke@smul.sachsen.de

Titelfoto:

Uwe Eichelmann (TU Dresden)

Redaktionsschluss:

05.04.2019

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de