



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

236

Berechnung von Sturmintensitäten für Deutschland

von
Gisela Augter
Marita Roos

Zitationsvorschlag:

Augter, Gisela ; Roos, Marita (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst): Berechnung von Sturmintensitäten für Deutschland

(Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 236)

ISBN 978-3-88148-452-7

ISSN 0072-4130

ISBN 978-3-88148-452-7

Nutzungsbedingungen

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz



Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden.

Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an

Herausgeber und Verlag:

Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Straße 135
D- 63067 Offenbach am Main
Internet: www.dwd.de
Mail: bibliothek@dwd.de

Anschrift der Autorinnen:

Augter, Gisela
Roos, Marita
Deutscher Wetterdienst
Abteilung Klima- und Umweltberatung
Frankfurter Straße 135
D- 63067 Offenbach am Main

INHALT		Seite
Abbildungsverzeichnis		5
Tabellenverzeichnis		9
Abkürzungen		11
Abstract		12
Zusammenfassung		13
1	Einleitung	16
2	Methodik der Extremwertanalyse	18
2.1	Exemplarische Auswertungen	21
2.1.1	Verteilungen der Jahreswindspitzen	21
2.1.1.1	Gumbelverteilungen	21
2.1.1.2	Generalisierte Extremwertverteilungen	26
2.1.2	r größte Windspitzen eines jeden Jahres (RLV)	30
2.1.2.1	Festlegung eines Wertes für r	30
2.1.2.2	Hannover	30
2.1.2.3	Berus	33
2.1.2.4	List auf Sylt	35
2.1.2.5	Leinefelde	37
2.1.2.6	Nürnberg	39
2.1.2.7	Schlussfolgerungen	40
2.1.3	Windspitzen oberhalb einer Schwelle (POT)	41
2.1.3.1	Festlegung eines Schwellenwertes	41
2.1.3.2	Anpassungsergebnisse	44
2.1.3.3	Hannover	46
2.1.3.4	Berus	47
2.1.3.5	List auf Sylt	48
2.1.3.6	Leinefelde	49
2.1.3.7	Nürnberg	50
2.1.3.8	Schlussfolgerungen	50
2.1.4	GEV für alle unabhängigen Tageswindspitzen	51
2.1.4.1	Hannover	51
2.1.4.2	Berus	51
2.1.4.3	List auf Sylt	51
2.1.4.4	Leinefelde	51
2.1.4.5	Nürnberg	52
2.1.4.6	Schlussfolgerungen	58
2.2	Vergleich aller Anpassungsergebnisse	58
3	Stationsauswahl	65

4	Extremwindklima	71
4.1	Location-Parameter	71
4.2	Scale-Parameter	73
4.3	Shape-Parameter	73
4.4	Clusteranalyse	74
4.5	Wiederkehrwerte	78
4.6	Einfluss der Geberhöhen	81
5	Regressionsrechnungen	86
5.1	Methodik	87
5.2	Location-Parameter	88
5.3	Scale-Parameter	90
5.4	Shape-Parameter	93
6	Wiederkehrwerte	100
6.1	Berechnung der Wiederkehrwerte und ihrer Konfidenzintervalle	100
6.2	Festlegung der Wiederkehrzeiten	102
6.3	Konfidenzintervalle für Gitterpunktwerte	105
6.4	Vergleich der Wiederkehrwerte	108
6.5	Klassengrenzen für die Darstellung der Wiederkehrwerte	112
7	Rasterdaten	114
7.1	Berechnungsmethode	114
7.2	Kartendarstellungen	115
7.3	Vergleich der Rasterdaten mit den Windspitzen aus Orkanen	122
8	Schlussbemerkung	127
9	Literatur	128
Anhang		130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Wiederkehrwerte für GEV mit Location = 25, Scale=2,5 und Shape = 0,10 (schwarz), Shape = 0,00 (rot), Shape = -0,10 (grün).....	19
Abbildung 2-2	Verteilung der Schiefen der Verteilungen der Jahreswindspitzen.....	22
Abbildung 2-3	Hannover: Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen....	23
Abbildung 2-4	Berus: Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen.....	24
Abbildung 2-5	List auf Sylt: Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen.	24
Abbildung 2-6	Leinefelde: Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen ..	25
Abbildung 2-7	Nürnberg: Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen	25
Abbildung 2-8	Hannover: Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen	26
Abbildung 2-9	Berus: Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen	27
Abbildung 2-10	List auf Sylt: Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen.....	27
Abbildung 2-11	Leinefelde: Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen.....	28
Abbildung 2-12	Nürnberg: Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen.....	28
Abbildung 2-13	Hannover: Ergebnisse der Anpassung für die r größten Werte eines jeden Jahres, Return-Level-Plot.....	31
Abbildung 2-14	Berus: Ergebnisse der Anpassung für die r größten Werte eines jeden Jahres, Return-Level-Plot.....	33
Abbildung 2-15	List auf Sylt: Ergebnisse der Anpassung für die r größten Werte eines jeden Jahres, Return-Level-Plot.....	35
Abbildung 2-16	Leinefelde: Ergebnisse der Anpassung für die r größten Werte eines jeden Jahres, Return-Level-Plot.....	37
Abbildung 2-17	Nürnberg: Ergebnisse der Anpassung für die r größten Werte eines jeden Jahres, Return-Level-Plot.....	39
Abbildung 2-18	Zusammenhang zwischen dem Schwellenwert (m/s) und den Scale- und Shape-Parametern (dimensionslos) der GEV	44
Abbildung 2-19	Hannover, Anpassung einer Pareto-Verteilung an die POT.....	46
Abbildung 2-20	Berus, Anpassung einer Pareto-Verteilung an die POT	47
Abbildung 2-21	List auf Sylt, Anpassung einer Pareto-Verteilung an die POT	48
Abbildung 2-22	Leinefelde, Anpassung einer Pareto-Verteilung an die POT	49
Abbildung 2-23	Nürnberg, Anpassung einer Pareto-Verteilung an die POT	50
Abbildung 2-24	Hannover: Anpassung einer GEV an die unabhängigen Tageswindspitzen.	53

Abbildung 2-25	Hannover: Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit	53
Abbildung 2-26	Berus: Anpassung einer GEV an die unabhängigen Tageswindspitzen	54
Abbildung 2-27	Berus: Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit.....	54
Abbildung 2-28	List auf Sylt: Anpassung einer GEV an die unabhängigen Tageswindspitzen	55
Abbildung 2-29	List auf Sylt: Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit	55
Abbildung 2-30	Leinefelde: Anpassung einer GEV an die unabhängigen Tageswindspitzen	56
Abbildung 2-31	Leinefelde: Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit	56
Abbildung 2-32	Nürnberg: Anpassung einer GEV an die unabhängigen Tageswindspitzen..	57
Abbildung 2-33	Nürnberg: Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit	57
Abbildung 2-34	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen, an die die Extremwertverteilungen angepasst wurden, Station: Hannover.....	60
Abbildung 2-35	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen, an die die Extremwertverteilungen angepasst wurden, Station: Berus	60
Abbildung 2-36	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen, an die die Extremwertverteilungen angepasst wurden, Station: List auf Sylt.....	61
Abbildung 2-37	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen, an die die Extremwertverteilungen angepasst wurden, Station: Leinefelde.....	61
Abbildung 2-38	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen, an die die Extremwertverteilungen angepasst wurden, Station: Nürnberg	62
Abbildung 3-1	Windmessstationen mit mindestens 25 Beobachtungsjahren im Zeitraum 1971 bis 2008, Eintragungswert: Stations-ID.....	67
Abbildung 3-2	Windmessstationen mit inhomogenen Reihen (rotes Kreuz).....	68
Abbildung 3-3	Geberhöhen aller Windmessstationen in Meter über Grund	69
Abbildung 4-1	Verteilung der Location-Parameter	71
Abbildung 4-2	Location-Parameter	72
Abbildung 4-3	Häufigkeitsverteilung des Scale-Parameters.....	73
Abbildung 4-4	Häufigkeitsverteilung der Shape-Parameter.....	74
Abbildung 4-5	Clustermittelwerte für die genormten Parameter der GEV	75
Abbildung 4-6	Wiederkehrwerte für Cluster 1 (blau), Cluster 2 (rot), Cluster 3 (grün) und Cluster 4 (magenta)	76
Abbildung 4-7	Clustereinteilung der Windmessstationen, Unterdruck: Höhe über NN.....	77
Abbildung 4-8	Häufigkeitsverteilung der Windspitzen mit einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit von 1/50 Jahren.....	78

Abbildung 4-9	Wiederkehrwerte für 50 Jahre (berechnet aus den POT) sowie die größte Jahreswindspitze für 130 Stationen, sortiert nach der maximalen Jahreswindspitze.....	79
Abbildung 4-10	Wie Abbildung 4-9, aber Anpassung der Verteilung an die Jahreswindspitzen GUM: Gumbel-Verteilung, GEV: generalisierte Extremwertverteilung	80
Abbildung 4-11	Größte Windspitze und Konfidenzbereich der Wiederkehrwerte für 50 Jahre, berechnet aus den POT für eine Sicherheit von 95%	81
Abbildung 4-12	Zusammenhang zwischen der mittleren Windgeschwindigkeit und dem Location-Parameter in Abhängigkeit von Geländeform und Geberhöhe, Legende unten	83
Abbildung 4-13	Zusammenhang zwischen dem Location- und dem Scale-Parameter in Abhängigkeit von Geländeform und Geberhöhe	84
Abbildung 4-14	Zusammenhang zwischen dem Location- und dem Shape-Parameter in Abhängigkeit von Geländeform und Geberhöhe, Legende siehe Abbildung 4-13	85
Abbildung 5-1	Korrelation angepasster (GEV) und berechneter (Regression) normierter Location-Parameter für alle Geländeformen	90
Abbildung 5-2	Zusammenhang zwischen dem berechneten Location- und dem angepassten Scale-Parameter (normierte Werte).....	91
Abbildung 5-3	Korrelation angepasster (GEV) und berechneter (Regression) normierter Scale-Parameter für alle Geländeformen	93
Abbildung 5-4	Zusammenhang zwischen den Parametern der GEV	94
Abbildung 5-5	Korrelation angepasster (GEV) und berechneter (Regression) normierter Shape-Parameter für alle Geländeformen.....	95
Abbildung 5-6	wie Abbildung 5-5, aber Berechnung des Shape-Parameters mit den zuvor berechneten Location- und Scale-Parametern.....	96
Abbildung 5-7	Vergleich der berechneten Location-Parameter mit den 95%-Konfidenzbereich der angepassten Werte; Anpassung: GEV an POT	97
Abbildung 5-8	Vergleich der berechneten Scale-Parameter mit den 95%-Konfidenzbereich der angepassten Werte; Anpassung: GEV an POT	98
Abbildung 5-9	Vergleich der berechneten Shape-Parameter mit den 95%-Konfidenzbereich der angepassten Werte; Anpassung: GEV an POT	99
Abbildung 6-1	95%-Konfidenzbereiche für Wiederkehrwerte rote, durchgezogene Linien: berechnet mit der Delta-Methode	101
Abbildung 6-2	Wiederkehrwerte (WKW) mit den zugehörigen Unter (PLUG)- und Obergrenzen (PLOG) der Konfidenzbereiche für eine Sicherheit von 95% für Wiederkehrzeiten von 10, 50 und 500 Jahren, berechnet mit der Pofil-Likelihood-Methode	104
Abbildung 6-3	Wiederkehrwerte für Wiederkehrzeiten von 500 bis 10.000 Jahren.....	105
Abbildung 6-4	Zusammenhang zwischen dem Wiederkehrwert und der Breite des Konfidenzbereichs, Wiederkehrzeit: 50 Jahre	106
Abbildung 6-5	Häufigkeitsverteilungen der Breite des 95%-Konfidenzbereichs.....	107

Abbildung 6-6	Korrelation berechneter und angepasster Wiederkehrwerte; Wiederkehrzeit: 50 Jahre	109
Abbildung 6-7	Vergleich der berechneten Wiederkehrwerte mit den Konfidenzbereichen für die angepassten Werte, Wiederkehrzeit: 50 Jahre	110
Abbildung 6-8	Korrelation berechneter und angepasster Wiederkehrwerte; Wiederkehrzeit: 10 Jahre	111
Abbildung 6-9	Korrelation berechneter und angepasster Wiederkehrwerte; Wiederkehrzeit: 100 Jahre	111
Abbildung 6-10	Korrelation berechneter und angepasster Wiederkehrwerte; Wiederkehrzeit: 500 Jahre	112
Abbildung 6-11	Häufigkeitsverteilung der Wiederkehrwerte für eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren, berechnet anhand der Gitterpunktwerte	113
Abbildung 7-1	Häufigkeitsverteilung der Residuen der Regressionsrechnung für Windspitzen mit einer Wiederkehrzeit von 50 Jahren	117
Abbildung 7-2	Windspitzen für eine mittlere Wiederkehrzeit von 10 Jahren; statistische Unsicherheit: Kartenwert -1.5 m/s bis Kartenwert +3.5 m/s (95% Konfidenzbereich)	118
Abbildung 7-3	Windspitzen für eine mittlere Wiederkehrzeit von 50 Jahren; statistische Unsicherheit: Kartenwert -3 m/s bis Kartenwert +5 m/s (95% Konfidenzbereich)	119
Abbildung 7-4	Windspitzen für eine mittlere Wiederkehrzeit von 500 Jahren; statistische Unsicherheit: Kartenwert -5 m/s bis Kartenwert +10 m/s (95% Konfidenzbereich)	120
Abbildung 7-5	Vergleich der Wiederkehrwerte für eine mittlere Wiederkehrzeit von 50 Jahren	121
Abbildung 7-6	Anzahl der Überschreitungen des 50-jährigen Wiederkehrwertes der Windspitzen durch die Windspitzen der Orkane Vivian/Wiebke, Lothar, Kyrill und Emma.....	126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Stationen für die exemplarische Extremwertanalyse.....	21
Tabelle 2-2	Ergebnisse der Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen	30
Tabelle 2-3	Hannover: Ergebnis der Anpassung einer GEV an die RLV	32
Tabelle 2-4	Berus: Ergebnis der Anpassung einer GEV an die RLV	34
Tabelle 2-5	List: Ergebnis der Anpassung einer GEV an die RLV	36
Tabelle 2-6	Leinefelde: Ergebnis der Anpassung einer GEV an die RLV	38
Tabelle 2-7	Nürnberg: Ergebnis der Anpassung einer GEV an die RLV.....	40
Tabelle 2-8	Ergebnisse der Anpassung von Extremwertverteilungen an Windspitzen, Erklärungen am Ende der Tabelle	63
Tabelle 4-1	Ergebnisse der Clusteranalyse	75
Tabelle 4-2	Statistische Kennwerte, berechnet aus den Wiederkehrwerten von 130 Stationen	78
Tabelle 4-3	Mittelwerte und Standardabweichungen STD der Verteilungsparameter für die verschiedenen Geländeformen und unterschiedliche Geberhöhen	82
Tabelle 5-1	Variablen der Regressionsrechnung mit den Normierungswerten v_{max} und v_{min} SWM: Statistisches Windfeldmodell	86
Tabelle 5-2	Stationen, die bei der Regressionsrechnung aussortiert wurden.....	87
Tabelle 5-3	Regressionsgleichung für den normierten Location-Parameter, Geländeformen: Ebene, Tal, Küste	89
Tabelle 5-4	Regressionsgleichung für den normierten Location-Parameter, Geländeformen: Kuppe	89
Tabelle 5-5	Regressionsgleichung für den normierten Scale-Parameter; Geländeform: Ebene	92
Tabelle 5-6	Regressionsgleichung für den normierten Scale-Parameter; Geländeform: Tal .	92
Tabelle 5-7	Regressionsgleichung für den normierten Scale-Parameter; Geländeform: Kuppe	92
Tabelle 5-8	Regressionsgleichung für den normierten Shape-Parameter; Geländeformen: Ebene, Tal, Küste	94
Tabelle 5-9	Regressionsgleichung für den normierten Shape-Parameter, Geländeform: Kuppen	95
Tabelle 6-1	Konfidenzgrenzen für berechnete Wiederkehrwerte	108

Tabelle 6-2 Mindest-Klassenbreiten für die Darstellung der Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit 112

Tabelle 7-1 Windspitzen der Orkane Vivian/Wiebke, Lothar, Kyrill und Emma für diejenigen Messstationen, die Messwerte oberhalb des Gitterpunktwertes der Windspitzen mit einer mittleren Wiederkehrzeit von 50 Jahren (GPW) aufweisen 123

Abkürzungen

BBK – Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe

BMASS – Bestimmtheitsmaß (r^2)

DWD – Deutscher Wetterdienst

GEV – generalisierte Extremwertverteilung (s. Seite 18)

GFORM – Kenngröße für die Geländeform (0 = Ebene, 2 = Tal, 8 = Kuppe, 9 = Küste)

GPV – generalisierte Pareto-Verteilung (s. Seite 44)

ID – Stations-Identifikationsnummer der Messstationen des DWD

LOC – Location-Parameter (s. Seite 18)

mff – mittlere Windgeschwindigkeit

norm – normiert (auf den Bereich 0 bis 1)

POT – Peaks over Threshold (s. Seite 19)

RLV – r-largest values (s. Seite 19)

STE – Standardfehler

STD – Standardabweichung

SWM – Statistisches Windfeldmodell

W_SHA – Shape-Parameter der Weibull-Verteilung aus dem SWM

RW, HW – Rechts- und Hochwert (Gauß-Krüger-Koordinaten)

z0 – Rauigkeitslänge

Abstract

This report is about the calculation of return values of wind gusts (duration: 3 sec) for Germany with return periods ranging from 10 to 500 years. The return values have been estimated from generalized extreme value distributions (GEV). The GEV were fitted to measured data by use of "Peaks over Threshold". The gridded data are based on the SWM (Statistical Wind Field Model from Deutscher Wetterdienst): There is a significant relationship between the parameters of the GEV and the mean wind velocity plus the shape parameter of the Weibull distribution fitted to mean hourly wind speeds. Return values were calculated for a grid of 200 m x 200 m and then transferred to a grid of 1000 m x 1000 m by using the maximum value of the underlying 200 m grid. The results have been validated via maximum wind speeds from storms hitting Germany during the last 20 years.

The return values do have uncertainties. These result from the parameter fitting and the use of a regular grid. Therefore confidence intervals are given on every map showing return values. Their magnitude increases with rising return periods and they altogether range from 3.5 to 15 m/s.

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt die Berechnung von Rasterdaten (bzw. Gitterpunktwerten) der Windspitzen (Böenwindgeschwindigkeiten mit Mittelungsintervall 3 Sekunden), deren Auftreten in Deutschland im Mittel einmal in 10, 50, 100 oder 500 Jahren zu erwarten ist. Diese werden Windspitzen für Wiederkehrzeiten von 10, 50, 100 und 500 Jahren genannt. Die Ergebnisse sind in Form von Deutschlandkarten auf der Basis von Rasterdaten mit einem Gitterpunktabstand von 1 km dargestellt.

Windspitzen für extrem lange Wiederkehrzeiten können nicht direkt aus den Messdaten entnommen werden, denn diese liegen nicht für entsprechend lange Zeiträume vor. Sie müssen vielmehr anhand der Messdaten geschätzt werden. Dazu bedient man sich der Extremwertanalyse, die Methoden zur Extrapolation seltener Ereignisse aus den Beobachtungswerten liefert. Diese Extrapolation darf nicht mit einer Vorhersage verwechselt werden: Aus den vorliegenden Beobachtungsdaten können nur Werte extrapoliert werden, die im Rahmen des Windklimas, das zur Beobachtungszeit geherrscht hat, eine bestimmte Eintrittswahrscheinlichkeit haben. Ereignisse, die unter veränderten klimatologischen Bedingungen (Klimawandel) auftreten, können mit diesen Methoden nicht erfasst werden.

Im ersten Arbeitsschritt wurde eine geeignete Methode zur Berechnung der Wiederkehrwerte aus den Beobachtungen der Tageswindspitzen, gemessen in den Jahren 1971 bis 2008, ermittelt. Diese Wiederkehrwerte werden aus theoretischen Verteilungen, die an die Häufigkeitsverteilung der Messwerte angepasst werden, geschätzt. Es zeigte sich, dass man mit der Anpassung einer generalisierten Extremwertverteilung (GEV) an alle Tageswindspitzen oberhalb eines Schwellenwertes ("Peaks over Threshold", POT) Ergebnisse erzielt, die sowohl hinsichtlich der Anpassung der Verteilung an die Daten als auch für die Berechnung von Gitterpunktwerten zufriedenstellend sind. Die Reihen der Tageswindspitzen wurden dabei vor der Auswertung in Reihen unabhängiger Tageswindspitzen transformiert: Jede Tageswindspitze, die am Vor- und Folgetag von Windspitzen mit kleineren Geschwindigkeiten flankiert wird, ist eine unabhängige Tageswindspitze. Der Schwellenwert für die POT wurde aus der Verteilung dieser unabhängigen Tageswindspitzen ermittelt, indem er auf den 90%-Wert der Summenhäufigkeitsverteilung der Tageswindspitzen einer Station festgesetzt wurde. Diese Festsetzung hat den Vorteil, dass es auch an Standorten mit sehr unterschiedlichem Windklima in etwa gleich viele Überschreitungen im Beobachtungszeitraum gibt (im Mittel aller Stationen sind es 350). Damit besteht die Möglichkeit, die Konfidenzbereiche der Schätzwerte aus diesen Verteilungen direkt zu vergleichen. Sowohl für die Anpassung der Verteilungen als auch für die Berechnung der Konfidenzintervalle der Schätzwerte (Wiederkehrwerte) wurden Maximum-Likelihood-Verfahren benutzt.

Eine GEV hat drei Parameter: Location, Scale und Shape. Diese Parameter sind für die Windbeobachtungen von 130 Stationen bestimmt worden. Jede dieser Stationen musste im Zeitraum 1971 bis 2008 mindestens 25 Beobachtungsjahre mit mindestens 330 Tageswerten pro Jahr aufweisen. Die Reihen der Jahreswindspitzen dieser Stationen mussten zudem homogen sein. Dieses Kriterium wurde allerdings nicht von allen Stationen erfüllt: Ausgerechnet die Rei-

hen vieler windstarker und in großen Höhen über NN gelegener Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) erwiesen sich als inhomogen – auf sie konnte man für die Berechnung der Gitterpunktweite aber nicht verzichten, sie wurden daher wie die homogenen Reihen behandelt. Es war zudem nicht möglich, die Auswertungen auf Stationen zu beschränken, an denen der Wind in 10 bis 15 m über Grund gemessen wird, dann hätten die meisten Stationen aus den neuen Ländern gefehlt.

Die drei Parameter unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des Verhältnisses von Standardabweichung zu mittlerem Standardfehler:

- Der Location-Parameter, der Werte zwischen 17 und 54 m/s annimmt, weist innerhalb Deutschlands eine Standardabweichung auf, die erheblich größer ist als der mittlere Standardfehler dieses Parameters, der aus der Anpassung der Verteilung an die Daten resultiert. Damit haben die Stationen signifikant unterschiedliche Location-Parameter.
- Die Scale- und Shape-Parameter sind wesentlich kleiner als der Location-Parameter und variieren weniger. Sie haben – prozentual gesehen – einen wesentlich größeren Standardfehler, sodass der Quotient aus Standardabweichung und mittlerem Standardfehler für diese Parameter nur etwa 1/10 des Quotienten für den Location-Parameter beträgt. Das bedeutet, dass es für viele der 130 Stationen keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich dieser Verteilungsparameter gibt.

Die Grundlage für die Berechnung von Gitterpunktweiten der GEV-Parameter ist das Statistische Windfeldmodell (SWM) des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2010; Gerth und Christopher, 1994). Dieses liefert Gitterpunktweite der Weibull-Parameter für die Weibull-Verteilungen der Stundenmittel der Windgeschwindigkeit sowie mittlere jährliche Windgeschwindigkeiten. Da in einer DWD-internen Voruntersuchung ein sehr enger Zusammenhang zwischen den Weibull-Parametern der Verteilung stündlicher Windspitzen und denen der Verteilung der Stundenmittel der Windgeschwindigkeit festgestellt wurde, kann man vermuten, dass es auch einen Zusammenhang zwischen dem Mittelwindklima und dem Extremwindklima gibt.

Für die Berechnung der Gitterpunktweite sind Regressionsgleichungen aufgestellt worden, die die Parameter der GEV in Abhängigkeit von den geographischen Koordinaten, der Rauiglängelänge (bestimmt aus dem Hindernisanteil des SWM), dem Shape-Parameter und der mittleren Windgeschwindigkeit (beide aus dem SWM, berechnet für Stundenmittel und eine Rasterweite von 200 m) beschreiben. Dabei wurde ggf. nach den Geländeformen Ebene, Tal, Kuppe und Küste (auch diese liefert das SWM) unterschieden. Diese Regressionsgleichungen sind im Kapitel 5 aufgeführt. Alle Gleichungen sind Kreuzvalidiert worden.

Aus den Gitterpunktweiten der GEV-Parameter können dann Gitterpunktweite für Windspitzen (oder Sturmintensitäten), die mit einer vorgegebenen Wiederkehrzeit zu erwarten sind, berechnet werden. Die folgende Tabelle zeigt, wie gut die Regressionsgleichungen die Parameter, die an die Verteilungen der Windmesswerte der Stationen des Deutschen Wetterdienstes angepasst wurden, und die daraus berechneten Wiederkehrwerte abbilden. Hier wurden Bestimmtheitsmaß und Standardfehler über alle Stationen, d.h. über alle Geländeformen und die Stationen, die zur Kreuzvalidierung benutzt wurden, berechnet:

Güte der Regressionsrechnung, berechnet über alle 130 Stationen

Parameter	Bestimmtheitsmaß	Standardfehler
Location	90%	1.64 m/s
Scale	57%	0.24 m/s
Shape	16%	0.05
WKW 10 Jahre	85%	2.12 m/s
WKW 50 Jahre	83%	2.42 m/s
WKW 100 Jahre	79%	2.67 m/s
WKW 500 Jahre	68%	3.40 m/s

Das Bestimmtheitsmaß für den Shape-Parameter zeigt, dass sich dieser nur sehr schlecht abbilden lässt. Das liegt – wie oben beschrieben – daran, dass es kaum signifikante Unterschiede zwischen den Parametern, die für die Stationen berechnet werden, gibt. Außerdem ist dieser Parameter bei der Berechnung das letzte Glied in der Kette: Er wird in Abhängigkeit von den zuvor berechneten Location- und Scale-Parametern bestimmt. Die Ungenauigkeit dieses Parameters wirkt sich mit zunehmender Wiederkehrzeit stärker auf die Güte der berechneten Wiederkehrwerte aus, die insgesamt aber als zufriedenstellend gelten kann.

Die Standardfehler, die in der oben stehenden Tabelle aufgeführt sind, beziehen sich auf den Vergleich berechneter und angepasster Werte. Aber auch die Wiederkehrwerte, die aus den angepassten Verteilungen berechnet werden, sind mit einem Standardfehler bzw. einem Konfidenzbereich behaftet. Dieser kann im Rahmen der Berechnung der Gitterpunktweite nicht bestimmt werden, er muss aber bei der Kartendarstellung dieser Gitterpunktweite mit ausgewiesen werden. Zu diesem Zweck wurden Konfidenzbereiche (Methode: aus der Profile-Likelihood-Funktion) für die Wiederkehrwerte berechnet, die den Bereich abdecken, in dem der Wiederkehrwert mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit liegt.

Die aus der vorliegenden Untersuchung resultierenden Kartendarstellungen (siehe Anhang) beruhen auf Rasterdaten der Wiederkehrwerte mit einem Gitterpunktabstand von 1000 m. Die Berechnung dieser Werte erfolgte zunächst mit einem Gitterpunktabstand von 200 m. Die Gitterpunktweite im 1000 m-Raster sind immer Maxima der 25 Gitterpunktweite des 200 m-Rasters, die zu einer Gitterfläche des 1000 m-Rasters gehören.

Alle Karten zeigen eine generelle Abnahme der Wiederkehrwerte von NW nach SO. Im norddeutschen Flachland gibt es kaum räumliche Unterschiede. Das Relief der Mittelgebirge und der Alpen ist hingegen anhand der Wiederkehrwerte gut zu erkennen. Dieses Resultat ist durchaus plausibel, wenn man die zugrunde liegenden atmosphärischen Vorgänge betrachtet (siehe dazu Kap. 7.2).

1 Einleitung

Stürme verursachen in Deutschland ganz erhebliche Schäden. Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenvorsorge (BBK) in Bonn war daher zur Erstellung von Risikoanalysen an Karten zu Sturmgefahren in Deutschland interessiert und hat mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) vereinbart, dass dieser flächendeckende Daten zu Sturmintensitäten für verschiedene Wiederkehrzeiten erarbeitet. Die Umsetzung der Aufgabe erfolgte durch Dr. Gisela Augter (Dreieich) im Auftrag des DWD. Das Projekt wurde von Dipl.-Met. Marita Roos, DWD, Abteilung Klima- und Umweltberatung (Offenbach), geleitet.

Bislang gibt es nur wenige Untersuchungen über die Sturmverteilung in Deutschland. Diese basieren z.B. neben Datenerhebungen einzelner Sturmereignisse und/oder Stationsauswertungen auf der Auswertung von Böenfaktoren (Kasperski, 2002), von Tageswindspitzen (Klawa und Ulbrich, 2003) oder der Anwendung eines nichthydrostatischen Strömungsmodells und der Gumbelverteilung (Heneka et al., 2006).

Schwerpunkte dieser Untersuchung auf Grundlage der gemessenen Windspitzen sind

- die möglichst objektive Auswahl aller relevanten Sturmereignisse,
- ihre Darstellung mit einer geeigneten Extremwertverteilung,
- Angaben zu den statistischen Unsicherheiten und
- die Umsetzung in die Fläche.

Da beim DWD langjährige Erfahrungen zur Erstellung von Klimakarten (z.B. Wind- und Frostgefährdungskarten (Gerth und Christoffer, 1994; Gerth et al., 2008)) auf der Basis statistischer Ansätze vorliegen, wurde auch für die Entwicklung der Sturmgefährdungskarten ein statistisches Regressionsverfahren benutzt.

Die Karten basieren auf Gitterpunktwerten der Sturmintensitäten. Die vorliegende Untersuchung sieht daher die Berechnung der Gitterpunktwerte von Böenwindgeschwindigkeiten vor, mit deren Auftreten in seltenen Fällen, d.h. im Mittel z.B. einmal in 10, 50 oder 100 Jahren (entsprechend einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 0,1, 0,02 oder 0,01 pro Jahr) zu rechnen ist. Diese Windgeschwindigkeiten können nicht direkt aus den Messwerten entnommen werden. Sie müssen vielmehr anhand der Parameter einer Extremwertverteilung, die an die gemessenen Windgeschwindigkeiten angepasst wird, berechnet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass hier ein Schätzwert aus einer Verteilung berechnet wird, der mit einer Unsicherheit behaftet ist. Zu belastbaren Sturmintensitäten gehört deshalb die Angabe eines Konfidenzbereichs, also des Bereichs, in dem der betreffende Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% anzutreffen ist.

Die Grundlage für die Berechnung von Gitterpunktwerten der Verteilungsparameter ist das Statistische Windfeldmodell (SWM) des DWD (DWD, 2010). Dieses liefert Gitterpunktwerte der Weibull-Parameter für die Weibull-Verteilungen der Stundenmittel der Windgeschwindigkeit sowie mittlere jährliche Windgeschwindigkeiten. Da in einer DWD-internen Voruntersuchung ein sehr enger Zusammenhang zwischen den Weibull-Parametern der Verteilung stündlicher

Windspitzen und denen der Verteilung der Stundenmittel der Windgeschwindigkeit festgestellt wurde, kann man vermuten, dass es auch einen Zusammenhang zwischen dem Mittelwindklima und dem Extremwindklima gibt.

Der erste Schritt für die Berechnung der Gitterpunktwerte ist also die Anpassung einer Extremwertverteilung an die Messdaten. Im Kapitel 2 wird die Methodik der Extremwertanalyse kurz beschrieben und aus den zur Verfügung stehenden Verfahren zur Verteilungsanpassung dasjenige Verfahren ermittelt, das den Messwerten der Windspitzen am ehesten gerecht wird.

Es schließen sich die Auswahl der Messstationen (Kapitel 3) und eine kurze Beschreibung des Extremwindklimas (Kapitel 4), abgeleitet aus den Daten der ausgewählten Stationen, an.

Im Kapitel 5 wird die Herleitung von Gleichungen zur Berechnung der Gitterpunktwerte beschrieben. Es handelt sich um Regressionsgleichungen, mit denen die Parameter der generalisierten Extremwertverteilung berechnet werden können. Diese Parameter kann man dann benutzen, um Gitterpunktwerte von Sturmintensitäten für vorgegebene Wiederkehrzeiten zu berechnen.

Eine Berechnung von Gitterpunktwerten der Konfidenzbereiche, die zu den Sturmintensitäten gehören, ist nicht möglich. Diese müssen vielmehr mit den Mitteln der Inferenzstatistik (d.h. Ableitung von Eigenschaften einer Grundgesamtheit aus einer Stichprobe) aus der Anpassung der Extremwertverteilung an die Messdaten bestimmt werden. Damit befasst sich das Kapitel 6. Im Kapitel 7 werden schließlich die Ergebnisse in Form von Karten mit Sturmintensitäten für Wiederkehrzeiten von 10, 50 und 500 Jahren vorgestellt.

2 Methodik der Extremwertanalyse

Traditionell erfolgt die Auswertung von extremen meteorologischen Beobachtungswerten anhand der jährlichen Extremwerte: An die Verteilung dieser Werte wird eine Extremwertverteilung angepasst und aus den Parametern dieser Verteilung werden dann Wiederkehrwerte für große Wiederkehrzeiten (z.B. 50, 500 oder 1000 Jahre) errechnet. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass es auf der Grundlage unabhängiger Beobachtungswerte arbeitet und selbsterklärend ist. Der Nachteil besteht darin, dass selbst bei sehr langen Beobachtungsreihen nur wenige Werte für die Verteilungsanpassung zur Verfügung stehen. Dadurch sind die Konfidenzbereiche der Wiederkehrwerte sehr groß und einzelne Werte können einen großen Einfluss auf das Ergebnis nehmen – im Zweifelsfall handelt es sich dann um Ausreißer, die so nicht gemessen wurden. Bei den Windbeobachtungen kommt hinzu, dass es kaum eine Station mit einer langen, homogenen Reihe gibt.

Inzwischen stehen Methoden zur Verfügung, die es erlauben, Wiederkehrwerte auf jährlicher Basis auch aus Daten zu errechnen, die nicht nur die Jahresmaxima umfassen. Durch die Hinzunahme weiterer Werte sind die Ergebnisse weniger anfällig für Ausreißer und man erhält engere Konfidenzbereiche. Bei den Ausreißern muss es sich nicht unbedingt um fehlerhafte Messwerte handeln: Wenn man eine Extremwertverteilung an die Verteilung der Jahreswindspitzen anpasst, dann wird jedem Messwert eine Überschreitungswahrscheinlichkeit zugeordnet, die von der Länge des betrachteten Zeitraumes abhängt. Tritt z.B. in einem Zeitraum von 25 Jahren ein Sturmereignis auf, das – klimatologisch gesehen – nur einmal in 50 oder in 100 Jahren zu erwarten ist, dann erhält dieses Ereignis bei der Anpassung aber eine Eintrittswahrscheinlichkeit von $1/25$. Dieses Manko haben Methoden, die nicht nur die Jahresmaxima betrachten, nicht – bzw. es ist weniger gravierend.

Nachfolgend werden die gebräuchlichsten Methoden zur Anpassung von Extremwertverteilungen an Windspitzen kurz beschrieben:

1. Bei der Anpassung einer Extremwertverteilung an Jahreswindspitzen wird meist die Gumbel-Verteilung benutzt. Diese ist eine Verteilung aus der "Location, Scale, Shape" – Familie, bei der allerdings vorausgesetzt wird, dass der Shape gegen Null geht und daher nur Location und Scale berechnet werden. Sie setzt also eine konstante Schiefe der Extremwerte voraus – eine Voraussetzung, die von extremen Windspitzen nur schlecht erfüllt wird. Man benutzt an Stelle der Gumbel-Verteilung deshalb besser die generalisierte Extremwertverteilung (GEV), die alle 3 Parameter hat. Sie entspricht, wenn der Shape gleich Null ist, der Gumbel-Verteilung. Ist der Shape kleiner als Null, nennt man sie inverse Weibull-Verteilung, diese Verteilung hat eine endliche Obergrenze. Die dritte Klasse der GEV hat einen positiven Shape und damit – wie die Gumbel-Verteilung – keine endliche Obergrenze, sie wird Frechet-Verteilung genannt. Bei der Anpassung einer GEV an Extremwerte der Windspitzen können alle 3 Typen auftreten, betrachtet man Jahresmaxima, dann ist der Shape in der Regel kleiner als Null, unterscheidet sich aber oft nicht signifikant von Null. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Wiederkehrwerte für Wiederkehrzeiten von 2 bis 10.000 Jahren,

die sich aus generalisierten Extremwertverteilungen mit drei verschiedenen Shape-Parametern ergeben:

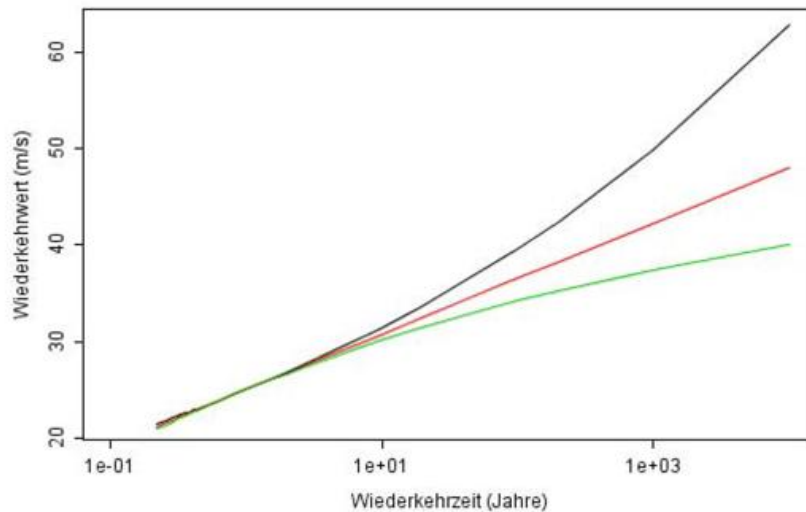


Abbildung 2-1 Wiederkehrwerte für GEV mit Location = 25, Scale=2,5 und Shape = 0,10 (schwarz), Shape = 0,00 (rot), Shape = -0,10 (grün)

2. Wenn nicht nur die Jahreswindspitzen für die Anpassung benutzt werden sollen, dann werden diese in der Regel durch "Peaks Over Threshold" (POT) ersetzt. Hier handelt es sich um alle (unabhängigen) Werte, die oberhalb eines – vom Benutzer vorgegebenen – Schwellenwertes liegen. Dabei muss dieser Schwellenwert so gewählt werden, dass es sich bei den resultierenden n Beobachtungswerten um Werte handelt, deren Verteilung für $n \rightarrow \infty$ gegen eine Extremwertverteilung konvergiert (das ist IMMER die Voraussetzung für die Anpassung einer Extremwertverteilung an Daten). Andererseits soll dieser Schwellenwert so niedrig wie möglich angesetzt werden, damit man eine deutliche Reduktion der Breite des Konfidenzbereichs erreicht. Diese Breite ist – wie bei der Mittelwertstatistik – immer proportional zu $1/(n^{1/2})$. Einen Algorithmus zur Festlegung dieses Schwellenwerts gibt es nicht, es gibt nur die Empfehlung, ihn so festzulegen, dass er keinen Einfluss auf die resultierenden Verteilungsparameter hat. Das kann man überprüfen, indem man die Anpassung für unterschiedliche Schwellenwerte vornimmt und die resultierenden Parameter in Abhängigkeit von der Schwelle darstellt und beurteilt. Dieses Vorgehen ist allerdings bei der Auswertung aller in der BRD zur Verfügung stehenden Winddaten zu aufwändig.
3. Eine andere Möglichkeit, den Umfang der Daten zu erweitern, besteht darin, an Stelle der Jahresmaxima in jedem Jahr die r größten Werte zu betrachten (RLV für r -largest values). Dabei ist der Wert r wieder so zu wählen, dass die resultierende Verteilung gegen eine Extremwertverteilung strebt und dass unterschiedliche Werte von r nicht zu signifikant unterschiedlichen Verteilungsparametern führen. Außerdem müssen die r Werte unabhängig sein, also aus unterschiedlichen Sturmereignissen stammen. Diese Methode wird bei der Auswertung extremer Windgeschwindigkeiten kaum verwendet, weil die Jahreswindspitzen stark schwanken und so in windschwachen Jahren auch ziemlich niedrige Werte in die Ver-

teilung eingehen, sodass die angestrebte Verringerung der Varianz der Werte, die auch zur Verkleinerung des Konfidenzbereichs beiträgt, nicht unbedingt erreicht wird.

4. Auch die Verteilung der Tageswindspitzen selbst kann zur Berechnung der Wiederkehrwerte herangezogen werden. Das setzt voraus, dass die Reihe der Tageswindspitzen in unabhängige Werte zerlegt wird.

Grundsätzlich darf man nur die Windspitzen in einer Verteilung zusammenfassen, die zur selben Grundgesamtheit gehören. Das gilt für Windspitzen aus Winterstürmen und aus Sommergewittern nicht: Die Parameter der GEV, berechnet aus der Verteilung der Windspitzen des Winterhalbjahres, unterscheiden sich systematisch von denen des Sommerhalbjahres, denn sie haben größere Location- und Scale-Parameter und kleinere Shape-Parameter. Wenn man jedoch die Windspitzen des ganzen Jahres betrachtet, dann – und das wurde für die 123 Stationen mit homogenen Reihen der Jahreswindspitzen überprüft – gibt es nur wenige Fälle (4), in denen die Wiederkehrwerte gegenüber denen des windstärkeren Winterhalbjahres unterschätzt (Differenz -2 bis -3 m/s bei 50-jähriger Wiederkehr) werden. Zu Überschätzungen (Differenz 2 bis 4.5 m/s bei 50-jähriger Wiederkehr) kommt es in 10 Fällen und für alle Stationen ist die mittlere Differenz bei einer Wiederkehrzeit von 50 Jahren 0.2 m/s. Von einer Differenzierung wurde deshalb abgesehen und die Windspitzen des gesamten Jahres gemeinsam betrachtet.

Alle Methoden, die hier angewendet werden, sind von COLES (2001) beschrieben worden. Zur Berechnung der Verteilungsparameter wird immer die Maximum-Likelihood Methode benutzt. Für die Berechnung der Verteilungsparameter und der Wiederkehrwerte sowie ihrer Konfidenzbereiche und die Darstellung der Ergebnisse werden Funktionen der Programmiersprache R (R Development Core Team, 2008) und der Pakete ISMEV (2009) und EXTREMES (Gilleland et al., 2009) eingesetzt. Aus diesem Grunde sind die Beschriftungen der Abbildungen zum Teil in Englisch.

Anhand von 5 Beispielstationen soll in einem ersten Schritt untersucht werden, welche dieser Methoden für die Berechnung von Wiederkehrwerten und ihre Umsetzung in Rasterdaten am besten geeignet ist. Das Ergebnis einer solchen Untersuchung hängt immer auch von dem Zweck, für den die Ergebnisse benutzt werden sollen, ab. Hier geht es nicht darum, konservative (z.B. "gerichtsfeste") Ergebnisse zu produzieren, also möglichst große Wiederkehrwerte zu berechnen, sondern darum, eine Methode zu finden, die hinsichtlich der Güte der Anpassung, der Ausweisung von Konfidenzintervallen für die Ergebnisse und der räumlichen Differenzierung die optimalen Ergebnisse liefert.

2.1 Exemplarische Auswertungen

Die Stationen, die für diese Auswertungen ausgewählt wurden, sind in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Tabelle 2-1 Stationen für die exemplarische Extremwertanalyse

ID	Name	Zeitraum	Repräsentanz
2014	Hannover	1971 bis 2008	Norddeutsches Flachland
460	Berus	1971 bis 2008	Kuppenlage
3032	List auf Sylt	1971 bis 2008	Küste
2925	Leinefelde	1977 bis 2008	windschwache Reihe mit Lücken in der Mitte Deutschlands
3668	Nürnberg	1971 bis 2008	windschwacher Südosten

Ihre Windmessreihen erfüllen die Bedingungen, die an jene Stationen, deren Daten für die Berechnung von Gitterpunktwerten benutzt werden, gestellt werden:

- mindestens 25 Beobachtungsjahre im Zeitraum 1971 bis 2008
- mindestens 330 Tageswindspitzen pro Beobachtungsjahr
- homogene Beobachtungsreihen der Jahreswindspitzen.

2.1.1 Verteilungen der Jahreswindspitzen

2.1.1.1 Gumbelverteilungen

Wenn man eine Gumbelverteilung an die Verteilungen der Jahreswindspitzen anpasst, dann geht man davon aus, dass diese Verteilungen alle dieselbe Schiefe haben – idealerweise den Wert 1.14. Berechnet man die Schiefen für die Jahreswindspitzen der Jahre 1971 bis 2008, dann sieht man, dass die meisten Verteilungen deutlich kleinere Werte haben:

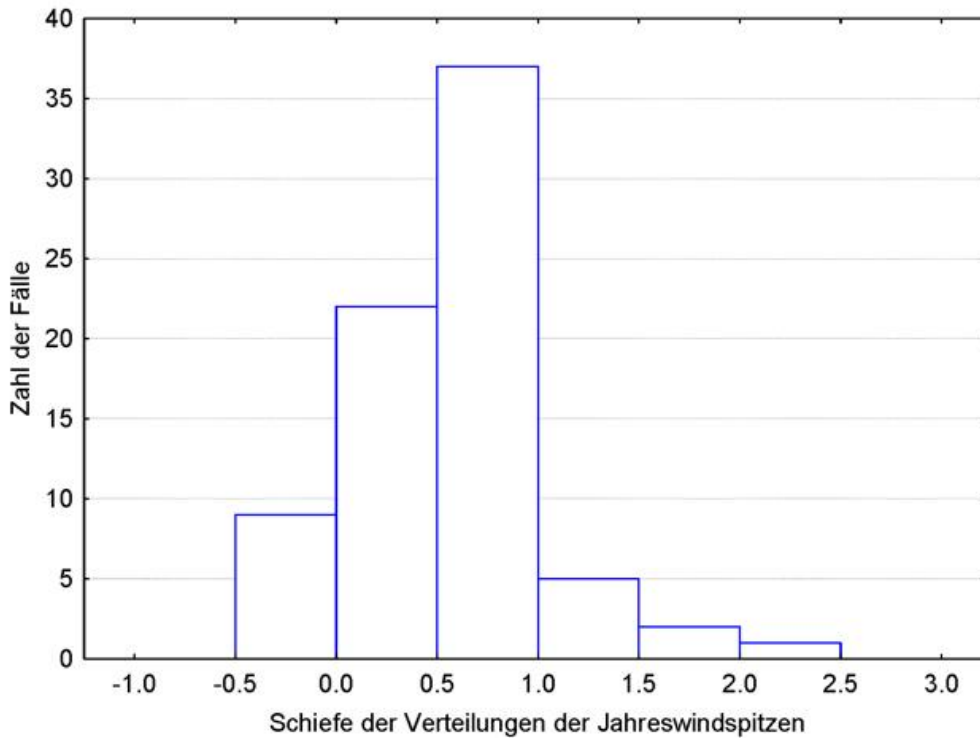


Abbildung 2-2 Verteilung der Schiefen der Verteilungen der Jahreswindspitzen

Es erscheint daher nicht von vornherein sinnvoll, den Shape auf null zu setzen. Man muss vielmehr davon ausgehen, dass der Shape-Parameter i.d.R. kleiner als Null ist. Das bedeutet, dass es eine endliche Obergrenze für die Geschwindigkeit von Windspitzen gibt. Physikalisch gesehen ist das fragwürdig, in klimatologischer Hinsicht kann es jedoch plausibel sein, denn es bedeutet, dass sehr extreme Windgeschwindigkeiten, die zu einer Verteilung mit einem Shape ≥ 0 führen, an den meisten Standorten im Beobachtungszeitraum nicht aufgetreten, bzw. nicht gemessen worden sind.

Die folgenden Abbildungen zeigen, wie gut die angepassten Verteilungen zu den Daten passen. Oben links (Probability Plot, Einheiten auf beiden Achsen: Prozent) sind die Summenhäufigkeiten der Windspitzen gegen die entsprechenden Werte der Verteilung aufgetragen, hier liegen daher der kleinste und der größte der Messwerte (Empirical) immer auf bzw. sehr nahe der Geraden, die vollständige Übereinstimmung bedeutet. Oben rechts (Quantile Plot, Einheiten auf beiden Achsen: Jahre) ist jeder der Messwerte gegen den Verteilungswert, der sich aus seiner Eintrittswahrscheinlichkeit errechnet, aufgetragen. An dieser Darstellung lässt sich die Qualität der Anpassung besser ablesen als an dem Probability Plot, denn jetzt sind Ausreißer der Verteilung auch als solche zu erkennen. Liegen bei dieser Darstellung mehrere Punkte unterhalb oder oberhalb der Geraden, dann passt der Shape der Extremwertverteilung (Model) schlecht zu den Daten. Unten rechts (Return Level Plot, Einheit der x-Achse: Jahre, Einheit der y-Achse: m/s) sind die Wiederkehrwerte (y-Achse) gegen die Wiederkehrzeiten (x-Achse mit logarithmischer Einteilung) aufgetragen. Die schwarze Gerade bzw. Kurve zeigt die Wiederkehrwerte, die sich aus der theoretischen Verteilung errechnen, die beiden blauen Geraden (Kurven) links und rechts markieren den Konfidenzbereich, in dem der Wiederkehrwert mit 95%iger Wahrscheinlichkeit zu finden ist. Bei den Punkten handelt es sich schließlich um die Messwerte, deren theoretische Wiederkehrzeiten sich aus dieser Abbildung ablesen lassen.

Unten rechts (Density Plot, Einheit der x-Achse: m/s, Einheit der y-Achse: Prozent) sind schließlich die empirische Häufigkeitsverteilung und die Dichte der Extremwertverteilung zusammen zu sehen.

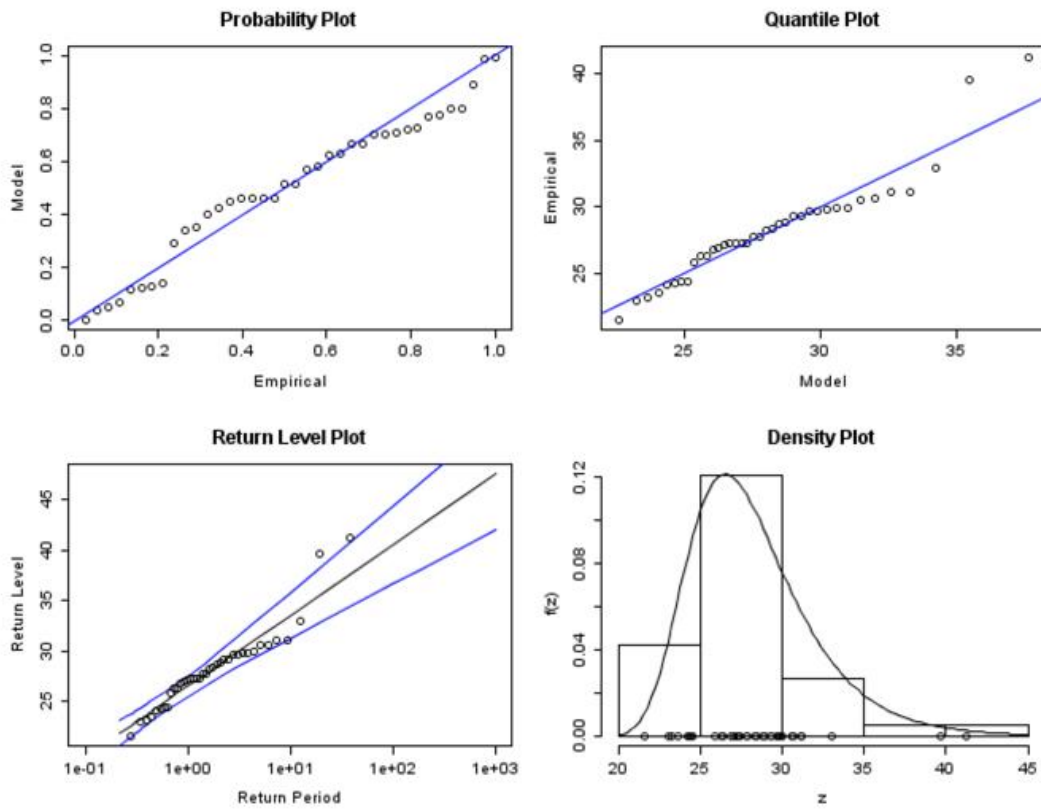


Abbildung 2-3 Hannover: Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen

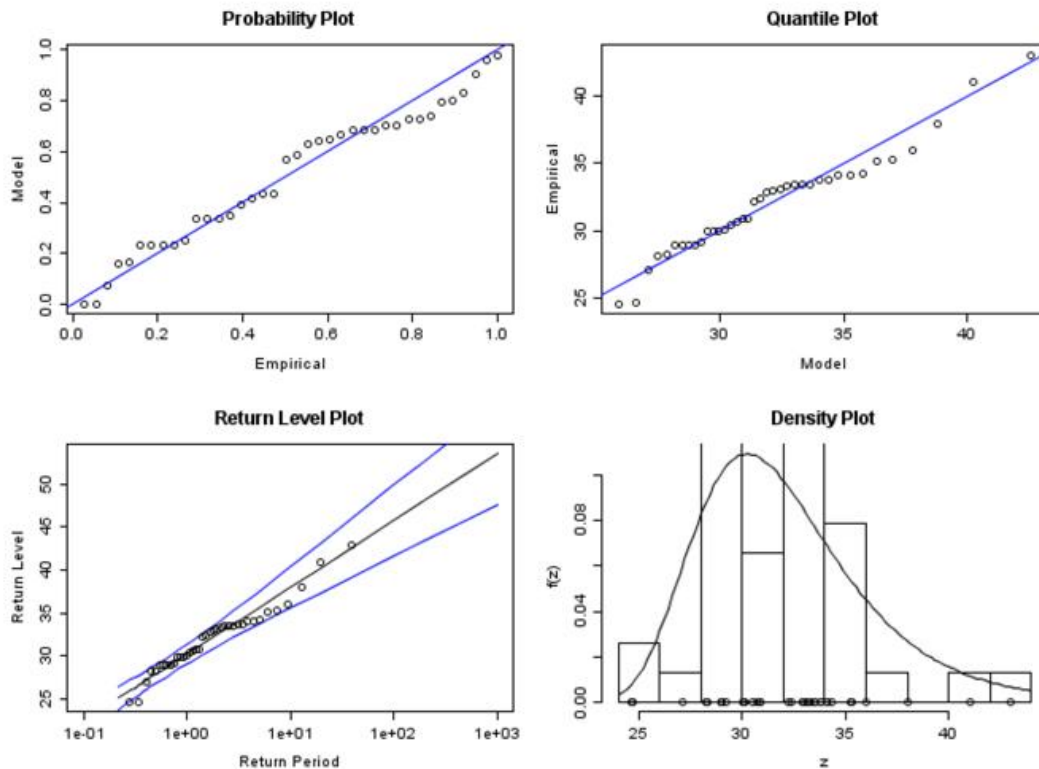


Abbildung 2-4 Berus: Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen

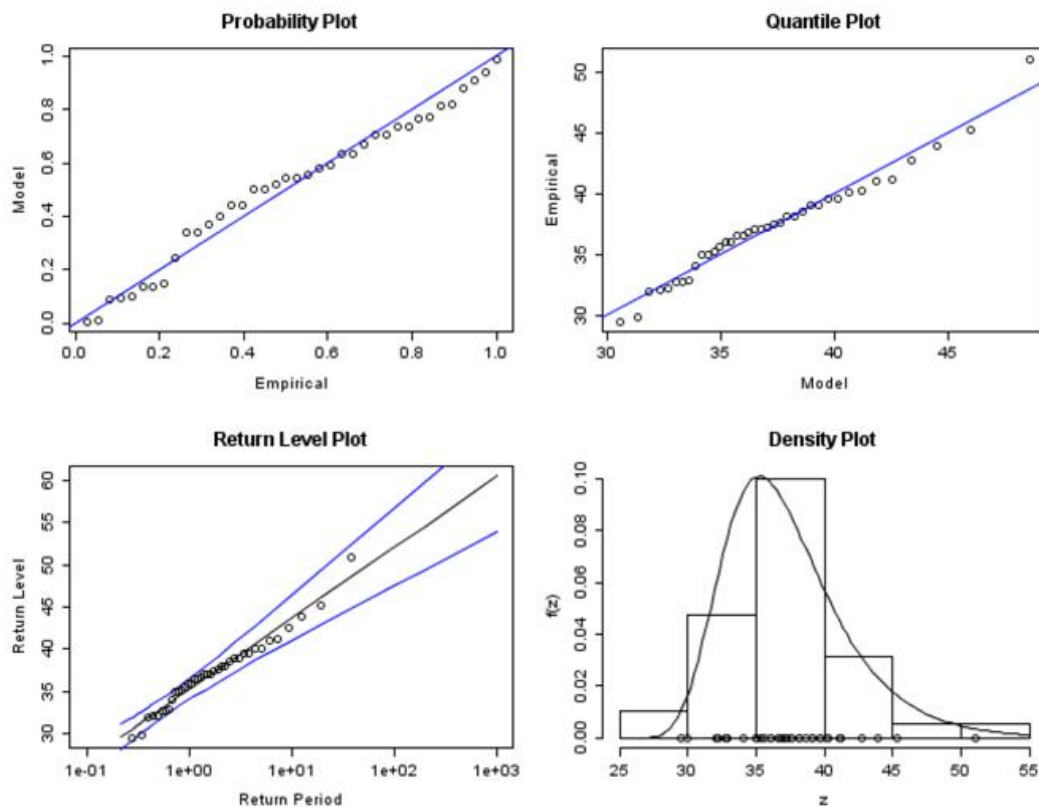


Abbildung 2-5 List auf Sylt: Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen

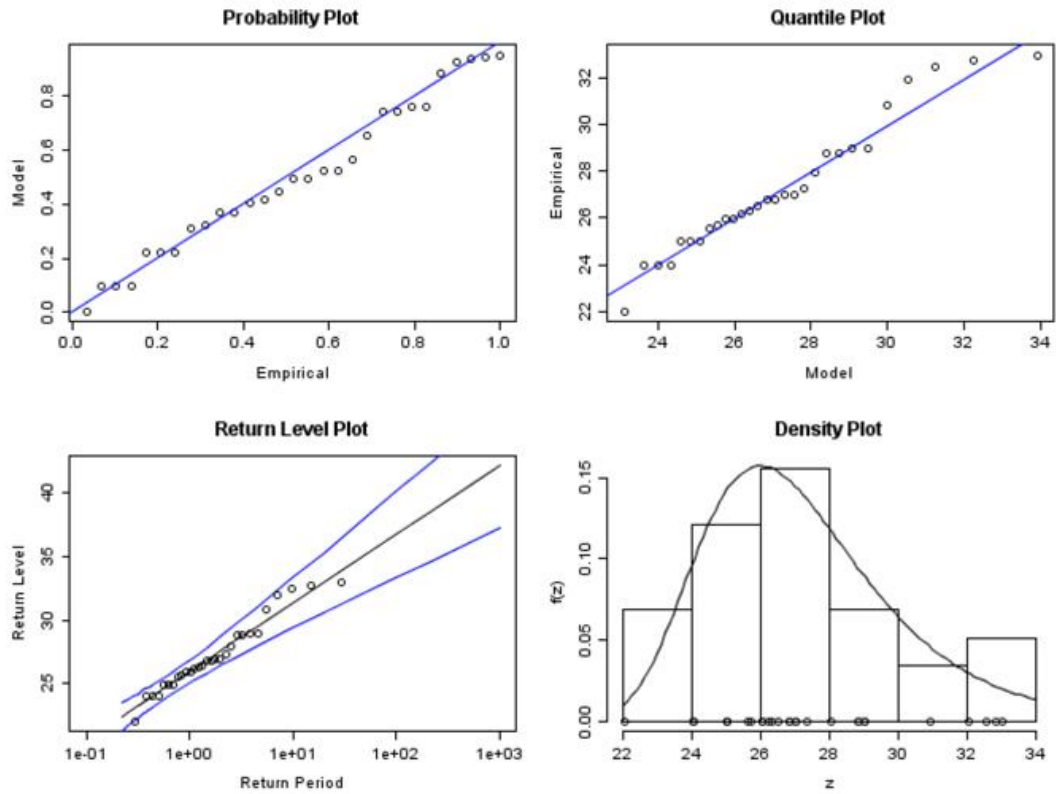


Abbildung 2-6 Leinefelde: Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen

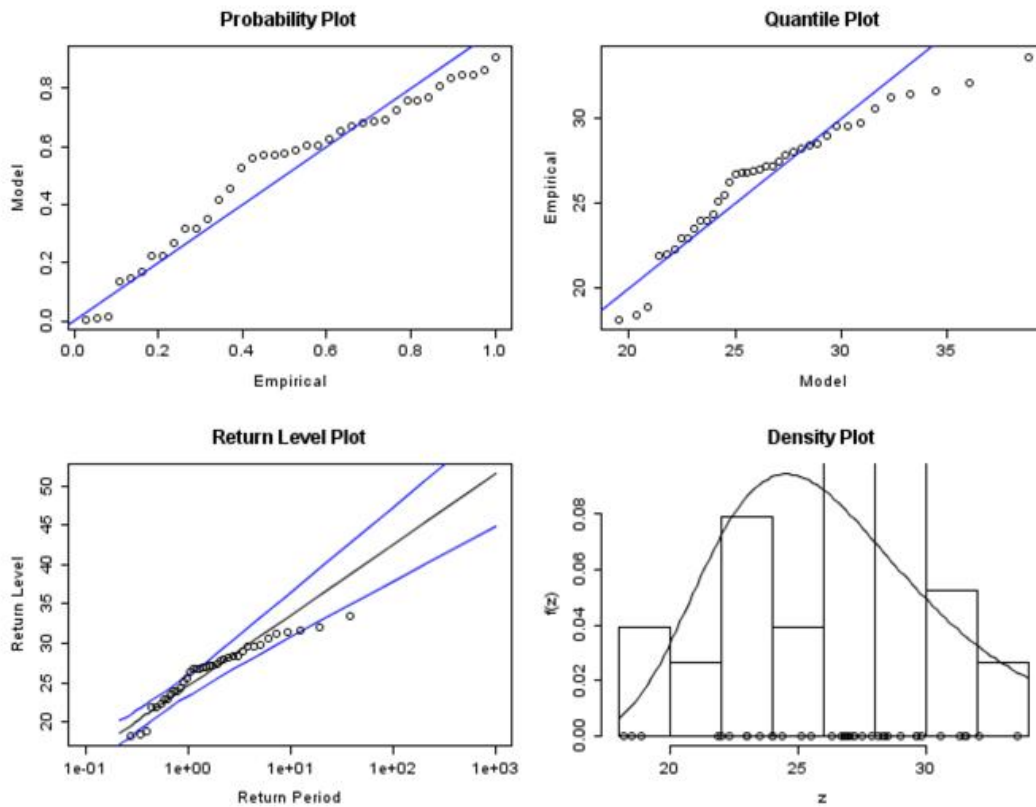


Abbildung 2-7 Nürnberg: Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen

Für die Stationen Hannover, Berus, List auf Sylt und Leinefelde sind die Anpassungsergebnisse recht gut – das gilt insbesondere für die windstarken Stationen Berus und List. Für Nürnberg allerdings, einen windschwachen Standort, dessen Verteilung eine Schiefe von -0.4 hat, passt die Gumbel-Verteilung überhaupt nicht zu den Daten. Ähnliche Ergebnisse erhält man für andere windschwache Standorte.

2.1.1.2 Generalisierte Extremwertverteilungen

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Ergebnis der Anpassung einer GEV an die Verteilungen der Jahreswindspitzen dieser 5 Stationen.

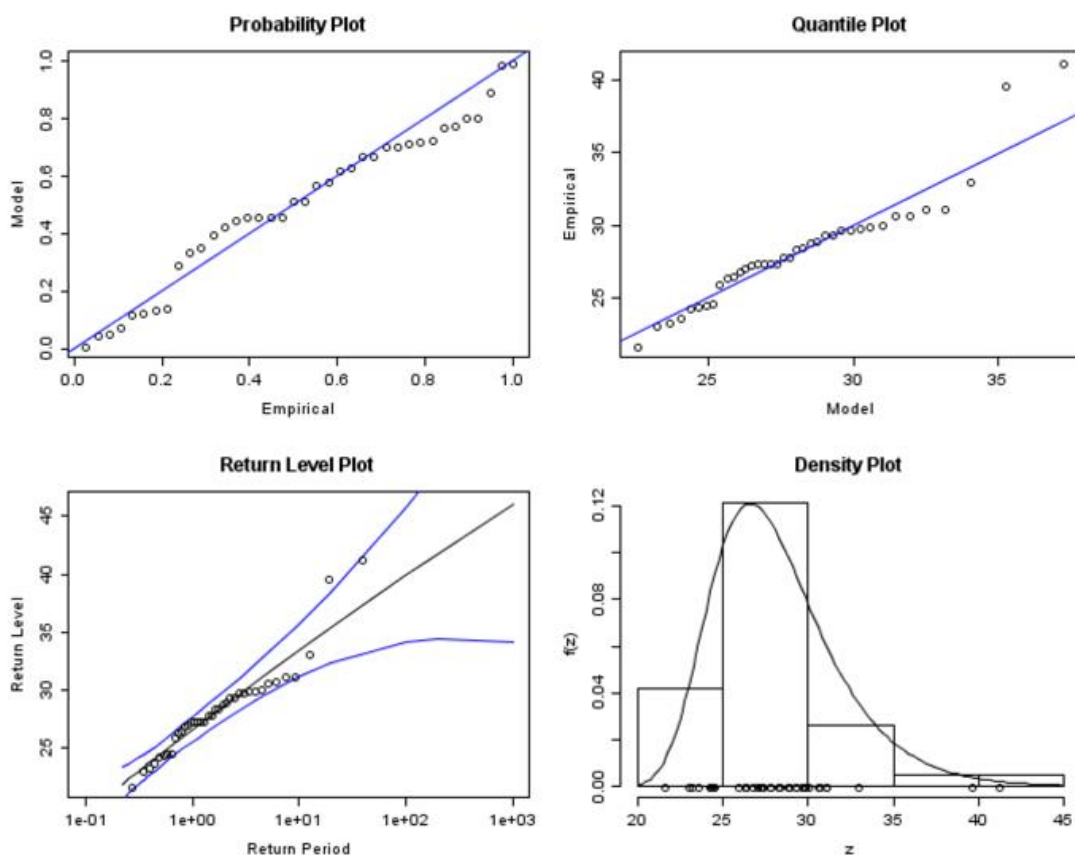


Abbildung 2-8 Hannover: Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen

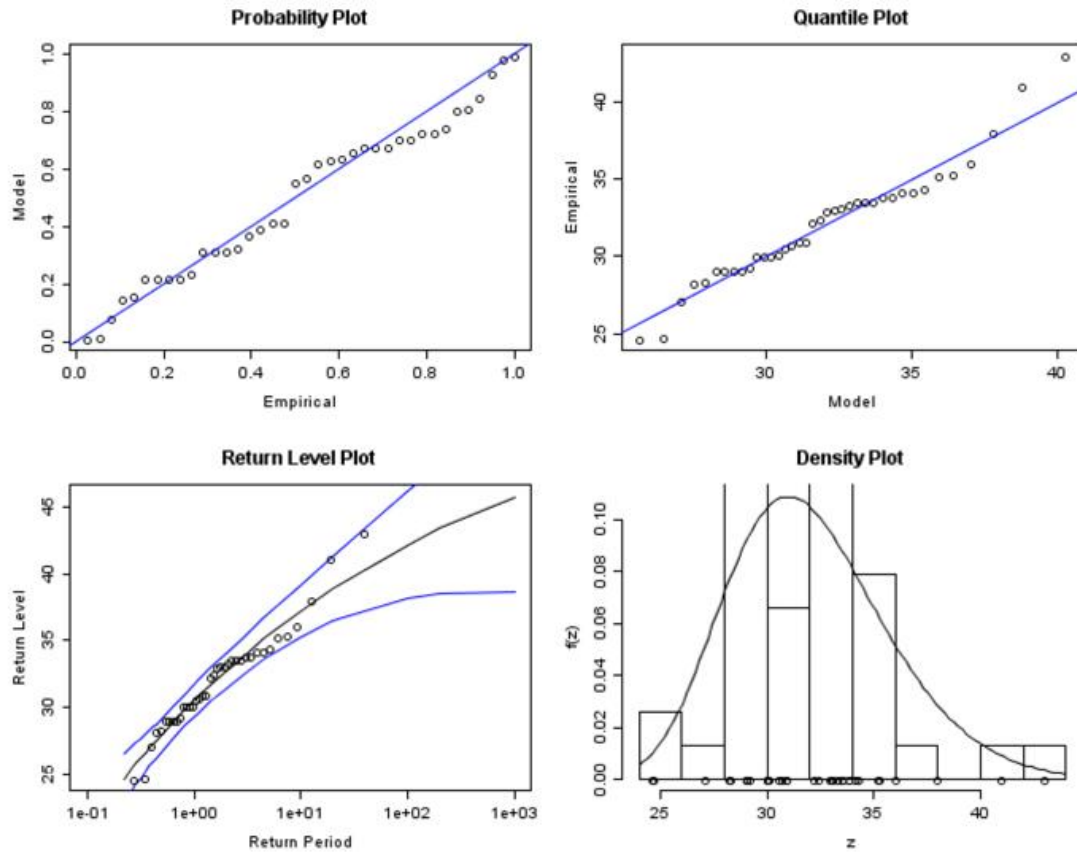


Abbildung 2-9 Berus: Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen

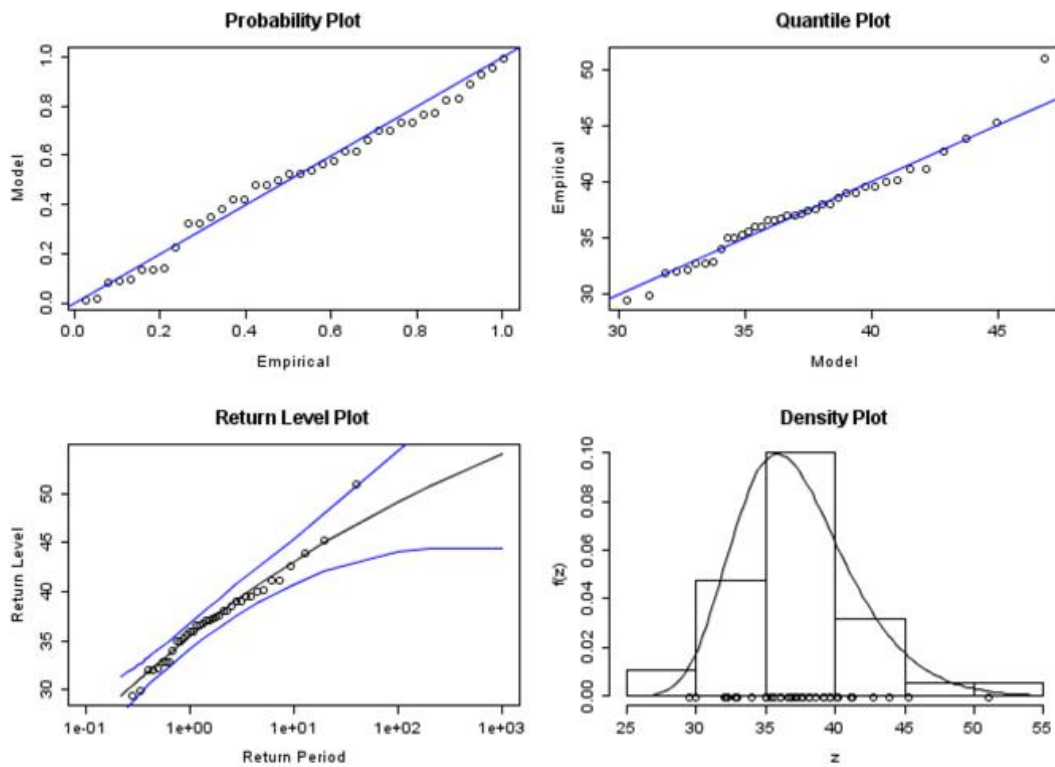


Abbildung 2-10 List auf Sylt: Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen

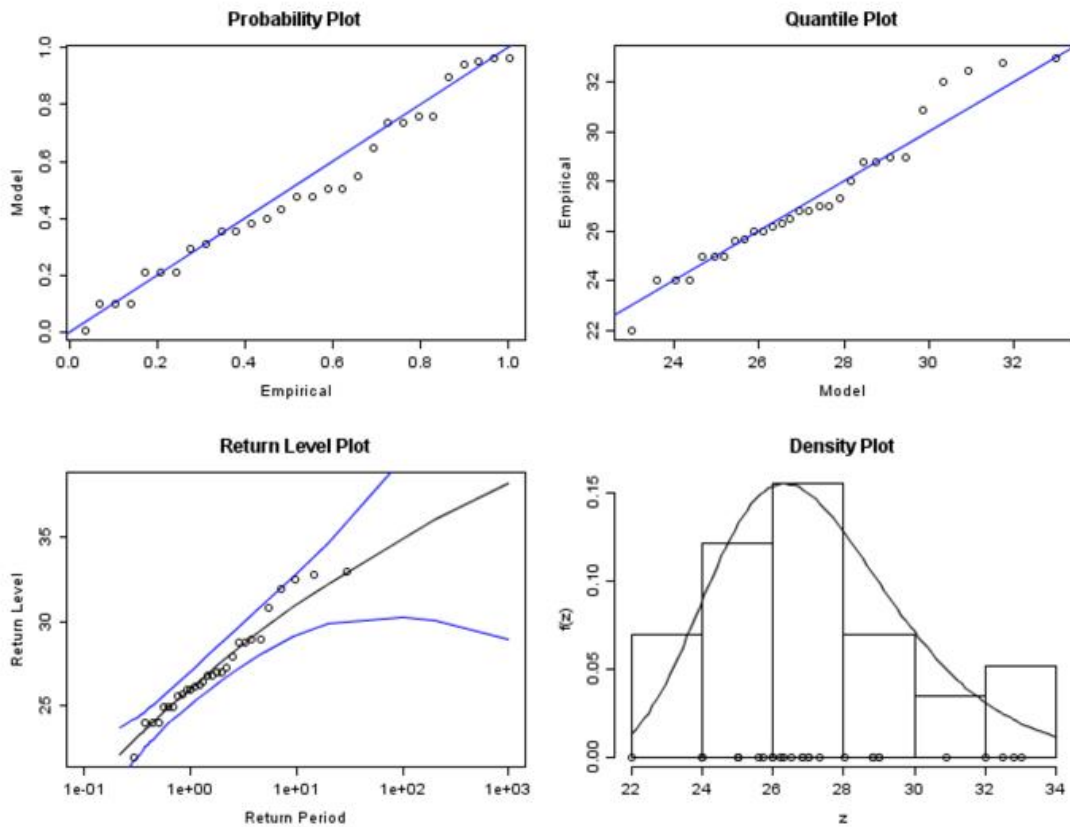


Abbildung 2-11 Lindefeld: Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen

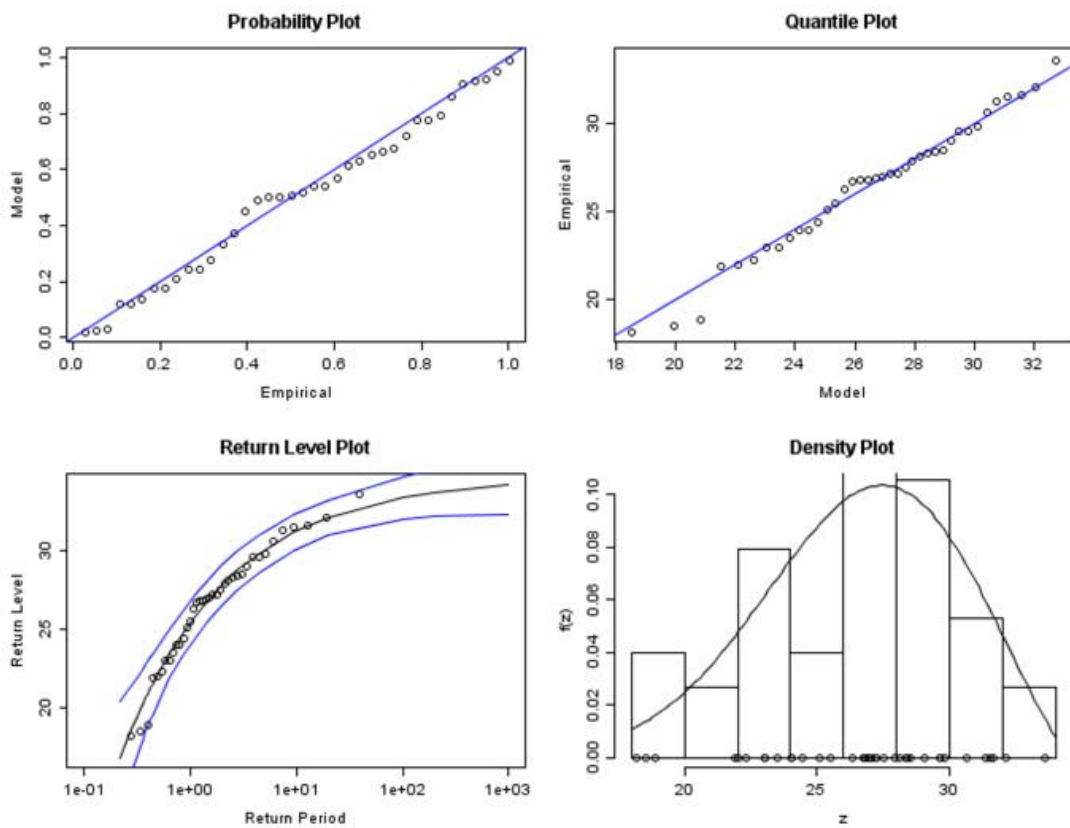


Abbildung 2-12 Nürnberg: Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen

Die Wiederkehrwerte, die aus einer GEV berechnet werden, haben wesentlich breitere Konfidenzbereiche als die Werte, die anhand einer Gumbel-Verteilung berechnet werden. Das liegt daran, dass für die GEV drei Parameter anhand der Verteilung zu schätzen sind, für die Gumbel-Verteilung sind es nur zwei – hier geht also in die Berechnung der Konfidenzbereiche keine Unsicherheit bezüglich des Shape-Parameters ein.

Bei der Betrachtung der Anpassungsergebnisse fällt zum einen auf, dass es bei 3 der 5 Stationen (Hannover, Berus und List auf Sylt) Ausreißer gibt, die – bezogen auf den Wiederkehrwert – gerade noch im oder aber außerhalb des Konfidenzbereichs liegen. Hier handelt es sich – das ergab eine Überprüfung – aber durchaus um gültige Messwerte, die aus Sturmereignissen stammen, deren Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner ist, als die Länge der Messreihe (38 Jahre) suggeriert. Für Hannover und List auf Sylt gibt es längere Reihen: In Hannover werden seit 1954 Windspitzen gemessen und die beiden größten Werte des Zeitraumes 1971 bis 2008 sind auch in den Jahren 1954 bis 1970 nicht überschritten worden. In List auf Sylt beginnt die Messreihe der Tageswindspitzen im Jahre 1950, und auch hier gibt es in der Zeit vor 1971 keinen Messwert, der größer ist als die beiden größten Werte aus den Jahren 1971 bis 2008.

Für Leinefelde ist die untere Grenze des Konfidenzbereich der Wiederkehrwerte deutlich größer als für die anderen 4 Stationen. Sie nimmt mit zunehmender Wiederkehrzeit sogar ab. Das liegt daran, dass es hier nur 28 Jahreswindspitzen gibt, an den anderen Stationen sind es 38. Hier zeigt sich also der Einfluss der Zahl der Fälle auf die Breite des Konfidenzbereichs.

Das Ergebnis für Nürnberg unterscheidet sich deutlich von dem der übrigen Stationen: Dies ist der einzige Standort, für den ein Shape-Parameter berechnet wird, der signifikant kleiner als Null ist. Dementsprechend streben die Wiederkehrwerte mit zunehmender Wiederkehrzeit einer Obergrenze zu. Diese Obergrenze ist, das kann man der Abbildung für die Wiederkehrwerte (Return Level Plot) entnehmen, kleiner als 35 m/s. Auch wenn in Nürnberg bisher keine Windspitze beobachtet wurde, die diesen Wert überschreitet, kann man davon ausgehen, dass dieser Wert nicht die maximal mögliche Böenwindgeschwindigkeit beschreibt, dazu ist er zu klein. Hier zeigt sich demnach, dass die Verteilungsparameter, wenn man nur die Jahreswindspitzen betrachtet, entscheidend von den größten Werten geprägt werden können. Insgesamt passt die GEV aber wesentlich besser zu den Jahreswindspitzen als die Gumbel-Verteilung.

In der Tabelle 2-2 sind die Verteilungsparameter und die Wiederkehrwerte für diese 5 Stationen zusammen aufgelistet worden:

Tabelle 2-2 Ergebnisse der Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen

Station	Location	Scale	Shape	WKW 50 (m/s)		WKW100 (m/s)		WKW500 (m/s)	
				von	bis	von	bis	von	bis
Hannover	26.6	3.046	-0.022	33.5	42.4	34.1	45.7	34.4	54.1
Berus	30.5	3.416	-0.137	37.6	44.1	38.1	46.2	38.7	50.9
List auf Sylt	35.5	3.717	-0.100	43.4	51.5	44.0	54.3	44.5	60.8
Leinefelde	26.1	2.389	-0.095	30.3	37.5	30.3	39.7	29.5	45.1
Nürnberg	25.4	3.975	-0.433	31.7	34.1	32.0	34.7	32.2	35.7

WKW50, WKW100, WKW500: Wiederkehrwerte für 50, 100 und 500 Jahre
 von bis: Konfidenzbereich für eine Sicherheit von 95%

Man kann dieser Tabelle entnehmen, dass die Wiederkehrwerte mit zunehmender Wiederkehrzeit nur wenig ansteigen und dass ihre Konfidenzbereiche so breit sind, dass sich der Wert für eine Wiederkehrzeit von 100 Jahren an allen 5 Stationen nicht signifikant von den Werten für 50 und 500 Jahre unterscheidet. Für Leinefelde sind die Konfidenzbereiche so breit, dass die Untergrenze mit zunehmender Wiederkehrzeit nicht steigt, sondern fällt.

2.1.2 r größte Windspitzen eines jeden Jahres (RLV)

2.1.2.1 Festlegung eines Wertes für r

Betrachtet man in jedem Jahr nicht nur die Jahreswindspitze, sondern die r größten Windspitzen, dann dürfen diese Werte nicht aus denselben Sturmereignissen stammen. Das wird sichergestellt, indem zwischen zweien dieser Werte immer mindestens 24 Stunden liegen müssen.

Zur Festlegung von r werden zunächst die Ergebnisse für Werte von r im Bereich von 2 bis 10 betrachtet und ein Wert für r gesucht, bei dem sich die Verteilungsparameter nicht signifikant ändern, wenn r vergrößert oder verkleinert wird. Die Darstellung der Anpassungsergebnisse erfolgt in der Form von Return-Level-Plots, die auf der logarithmisch eingeteilten x-Achse die Wiederkehrzeit in Jahren zeigen, auf der y-Achse den Wiederkehrwert in m/s.

2.1.2.2 Hannover

Die folgende Abbildung zeigt, wie gut die GEV, die anhand der r größten Windspitzen eines jeden Jahres errechnet wurde, zu den Jahreswindspitzen passt. Es ist jeweils der Return-Level-Plot dargestellt. Die Darstellung für $r=1$ entspricht der Anpassung an die Jahreswindspitzen.

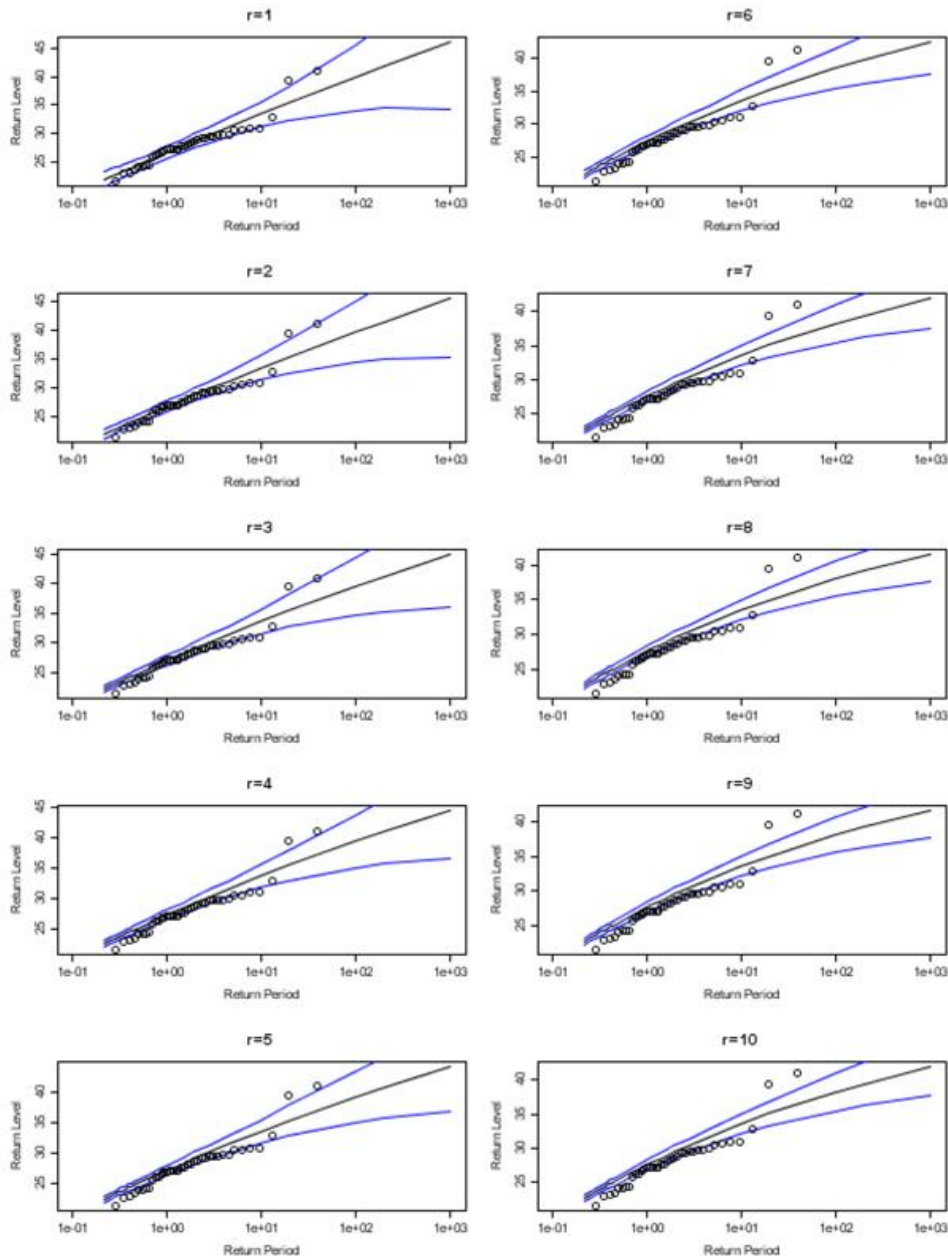


Abbildung 2-13 Hannover: Ergebnisse der Anpassung für die r größten Werte eines jeden Jahres, Return-Level-Plot

Die Ergebnisse der Anpassung sind für die verschiedenen r -Werte ähnlich gut wie für die Jahreswindspitzen. Der Konfidenzbereich wird – gemäß der steigenden Zahl der Fälle – mit zunehmendem r enger, das gilt aber nur bis $r=7$, danach wird der Bereich, wegen der zunehmenden Variabilität der Windspitzen, wieder breiter. Ab $r=4$ führt der engere Konfidenzbereich dazu, dass es zwei Messwerte gibt, die außerhalb des Konfidenzbereichs liegen. Die Werte in der Tabelle 2-3, die die Verteilungsparameter und Wiederkehrwerte für eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren für die verschiedenen r auflistet, zeigen, dass sich die Ergebnisse für r von 3 bis 5 und für $r \geq 6$ kaum ändern. Zwischen $r=5$ und $r=6$ ändert sich aber der Shape-Parameter verhältnismäßig stark und das führt – siehe Abbildung 2-13 – dazu, dass die beiden größten Jahreswindspitzen schlechter abgebildet werden als zuvor. Für Hannover wäre demnach $r=5$ der beste Wert für eine Berechnung der GEV-Parameter.

Tabelle 2-3 Hannover: Ergebnis der Anpassung einer GEV an die RLV

r	LOC	SCALE	SHAPE	WKW50
1	26.56	3.05	-0.02	37.96
2	26.85	3.03	-0.03	37.91
3	27.07	3.03	-0.05	37.85
4	27.24	2.97	-0.05	37.68
5	27.27	2.95	-0.06	37.54
6	27.49	2.98	-0.10	37.09
7	27.54	2.96	-0.11	36.97
8	27.61	2.94	-0.12	36.81
9	27.62	2.94	-0.12	36.84
10	27.56	2.95	-0.11	36.94

LOC Location-Parameter in m/s

SCALE Scale-Parameter in m/s

SHAPE Shape-Parameter (dimensionslos)

WKW50 Windspitze in m/s für eine mittlere Wiederkehrzeit von 50 Jahren

2.1.2.3 Berus

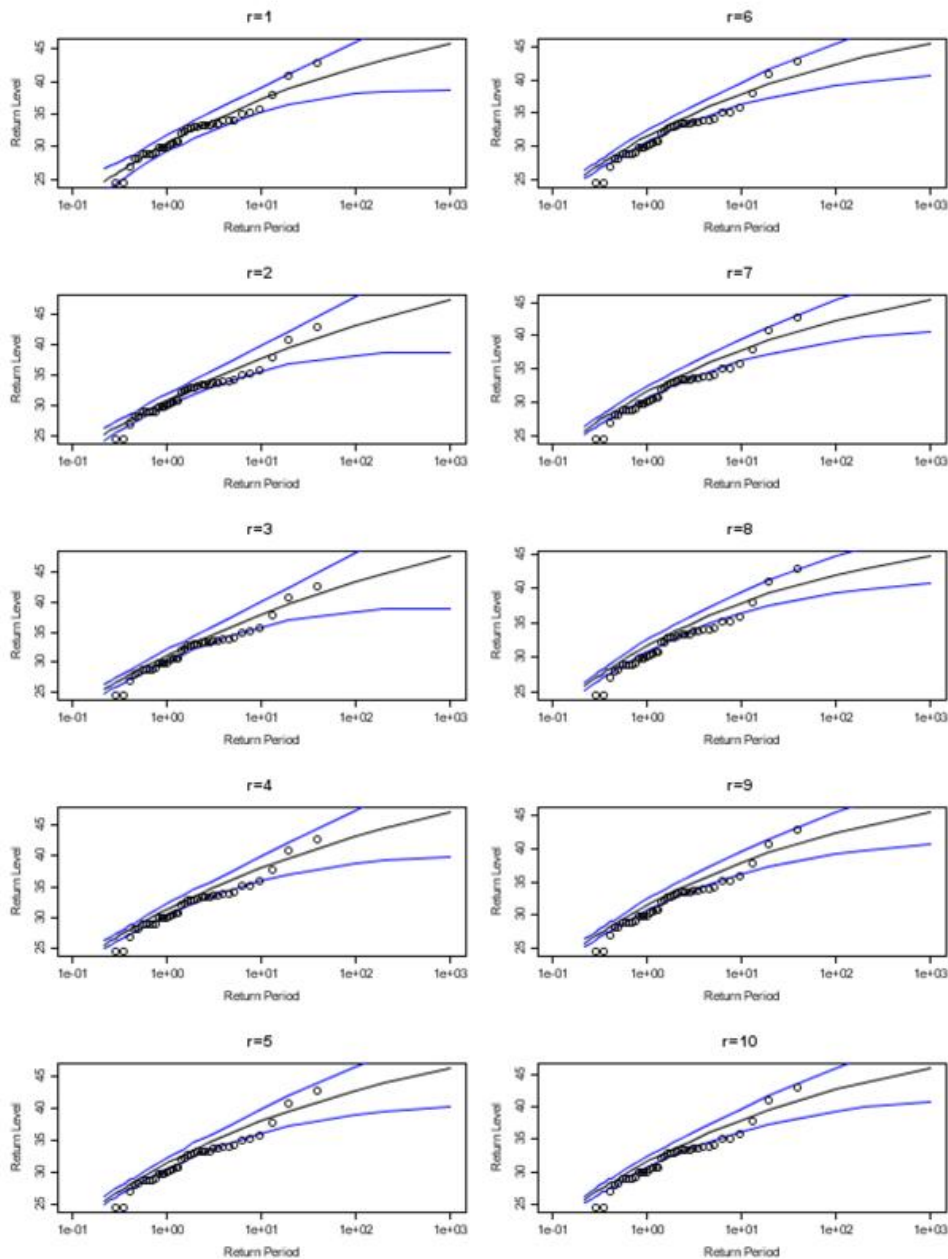


Abbildung 2-14 Berus: Ergebnisse der Anpassung für die r größten Werte eines jeden Jahres, Return-Level-Plot

Für Berus haben die r -Werte von 1 bis 10 kaum einen Einfluss auf das Ergebnis der Anpassung einer GEV an die Daten – die Parameter und die Wiederkehrwerte ändern sich nur minimal und nicht signifikant. Man kann also hier keinen r -Wert erkennen, der sich insbesondere für die Berechnung der GEV eignet.

Tabelle 2-4 Berus: Ergebnis der Anpassung einer GEV an die RLV

r	LOC	SCALE	SHAPE	WKW50
1	30.50	3.42	-0.14	40.82
2	30.86	3.35	-0.11	41.55
3	31.11	3.38	-0.10	41.94
4	31.24	3.38	-0.12	41.76
5	31.38	3.40	-0.15	41.49
6	31.51	3.35	-0.16	41.17
7	31.52	3.32	-0.16	41.13
8	31.67	3.33	-0.19	40.91
9	31.50	3.34	-0.16	41.23
10	31.47	3.36	-0.15	41.35

LOC Location-Parameter in m/s

SCALE Scale-Parameter in m/s

SHAPE Shape-Parameter (dimensionslos)

WKW50 Windspitze in m/s für eine mittlere Wiederkehrzeit von 50 Jahren

2.1.2.4 List auf Sylt

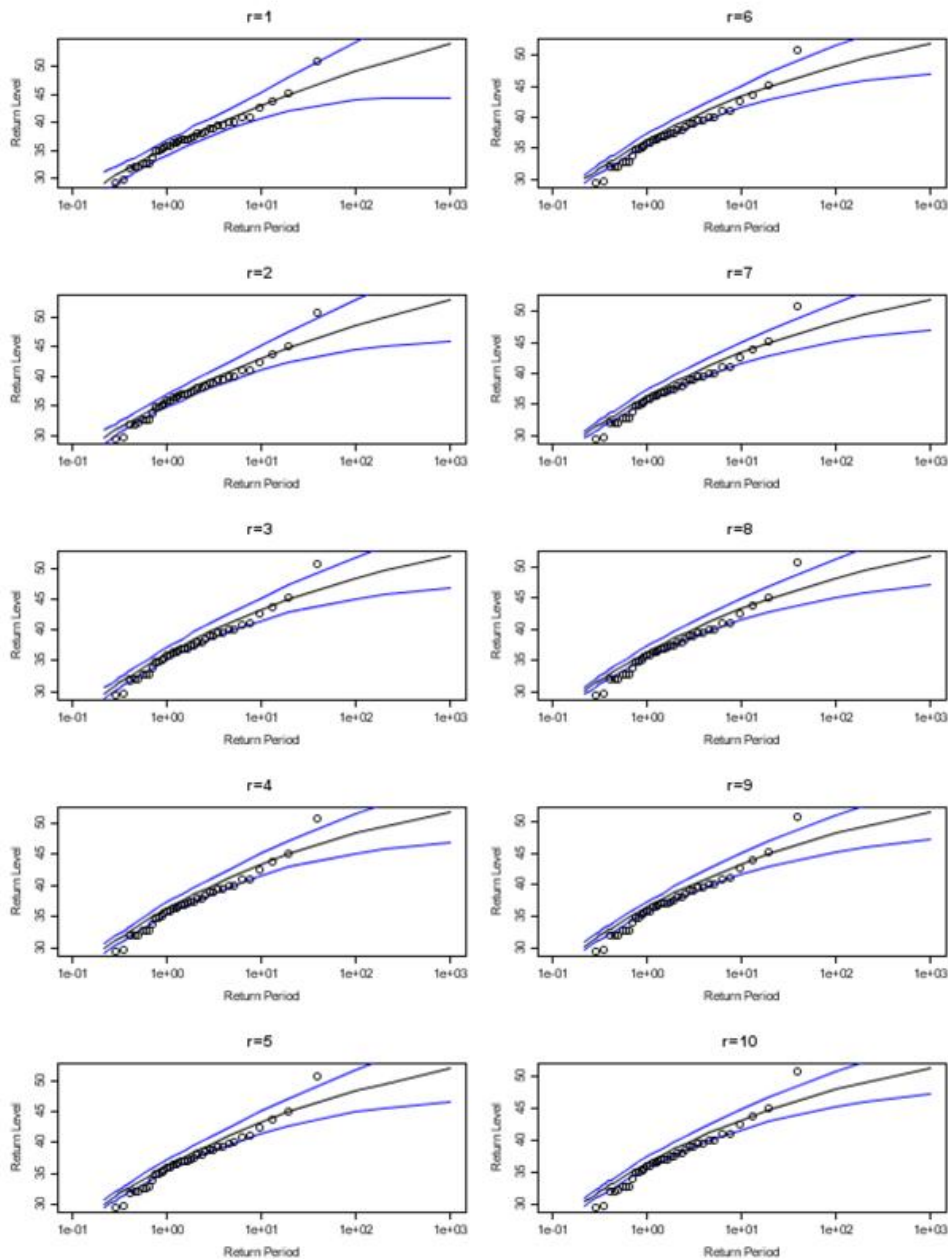


Abbildung 2-15 List auf Sylt: Ergebnisse der Anpassung für die r größten Werte eines jeden Jahres, Return-Level-Plot

Für diese Station gilt dasselbe, wie für die zuvor betrachteten: Die Anpassung der GEV an die Jahreswindspitzen wird durch Hinzunahme der nächstgrößten Windspitzen nicht schlechter. Der Vorteil dieser Methode liegt also darin, dass man ein Ergebnis erhält, das genauso gut zu den Jahreswindspitzen passt, aber mit einer geringeren Unsicherheit behaftet ist. Für Sylt ändern sich die Verteilungsparameter und die Wiederkehrwerte für $r > 2$ so gut wie gar nicht mehr und der Konfidenzbereich wird mit größerem r immer enger. Auch hier geben die Ergebnisse keine Handhabe zur Festlegung eines Wertes für r .

Tabelle 2-5 List: Ergebnis der Anpassung einer GEV an die RLV

r	LOC	SCALE	SHAPE	WKW50
1	35.46	3.72	-0.10	47.47
2	35.85	3.63	-0.12	47.17
3	36.14	3.74	-0.16	47.06
4	36.24	3.72	-0.16	47.01
5	36.23	3.63	-0.14	47.06
6	36.31	3.64	-0.15	47.00
7	36.32	3.60	-0.15	46.95
8	36.34	3.59	-0.15	46.91
9	36.41	3.57	-0.16	46.81
10	36.42	3.55	-0.16	46.73

LOC Location-Parameter in m/s

SCALE Scale-Parameter in m/s

SHAPE Shape-Parameter (dimensionslos)

WKW50 Windspitze in m/s für eine mittlere Wiederkehrzeit von 50 Jahren

2.1.2.5 Leinefelde

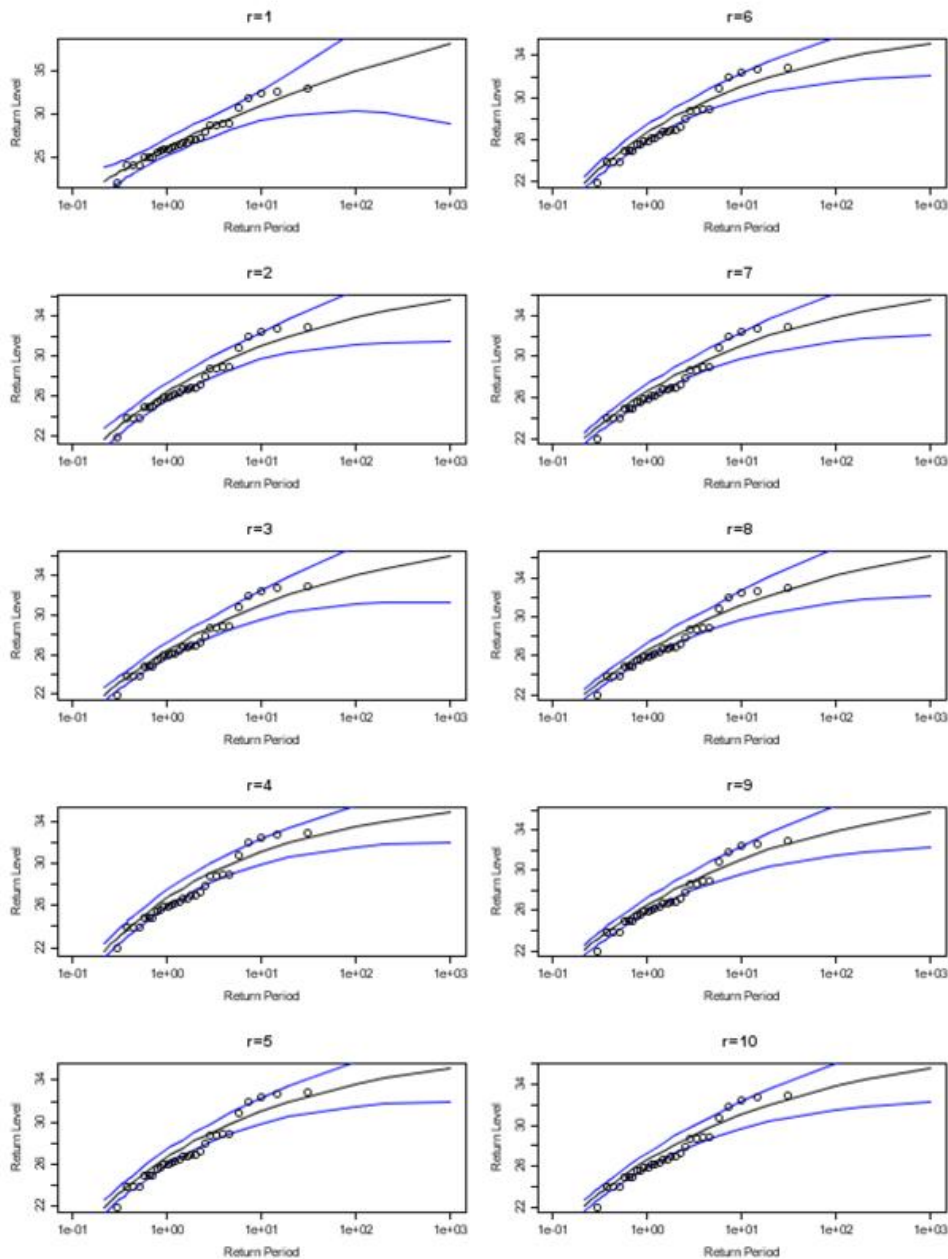


Abbildung 2-16 Leinefelde: Ergebnisse der Anpassung für die r größten Werte eines jeden Jahres, Return-Level-Plot

Für Leinefelde bewirkt die Zunahme der nächstgrößten Windspitzen, dass der Shape der GEV sich deutlich verkleinert. Das passiert sofort nach dem Übergang von $r=1$ zu $r=2$ (siehe Tabelle 2-6), die Shape-Werte ab $r=2$ sind signifikant kleiner als Null, schwanken allerdings bis $r=7$ ziemlich stark. Diese Veränderung führt auch zu einem etwas kleineren Wiederkehrwert ab $r=2$ – allerdings sind die Unterschiede hinsichtlich der Ergebnisse so geringfügig, dass man kaum eine Entscheidung für einen der r -Werte > 1 treffen kann.

Tabelle 2-6 Leinefelde: Ergebnis der Anpassung einer GEV an die RLV

r	LOC	SCALE	SHAPE	WKW50
1	26.09	2.39	-0.10	33.88
2	26.45	2.55	-0.22	33.17
3	26.43	2.50	-0.19	33.29
4	26.66	2.61	-0.27	32.95
5	26.62	2.54	-0.24	33.02
6	26.63	2.54	-0.24	33.01
7	26.57	2.51	-0.22	33.16
8	26.48	2.51	-0.19	33.42
9	26.53	2.48	-0.20	33.23
10	26.57	2.46	-0.21	33.13

LOC Location-Parameter in m/s

SCALE Scale-Parameter in m/s

SHAPE Shape-Parameter (dimensionslos)

WKW50 Windspitze in m/s für eine mittlere Wiederkehrzeit von 50 Jahren

2.1.2.6 Nürnberg

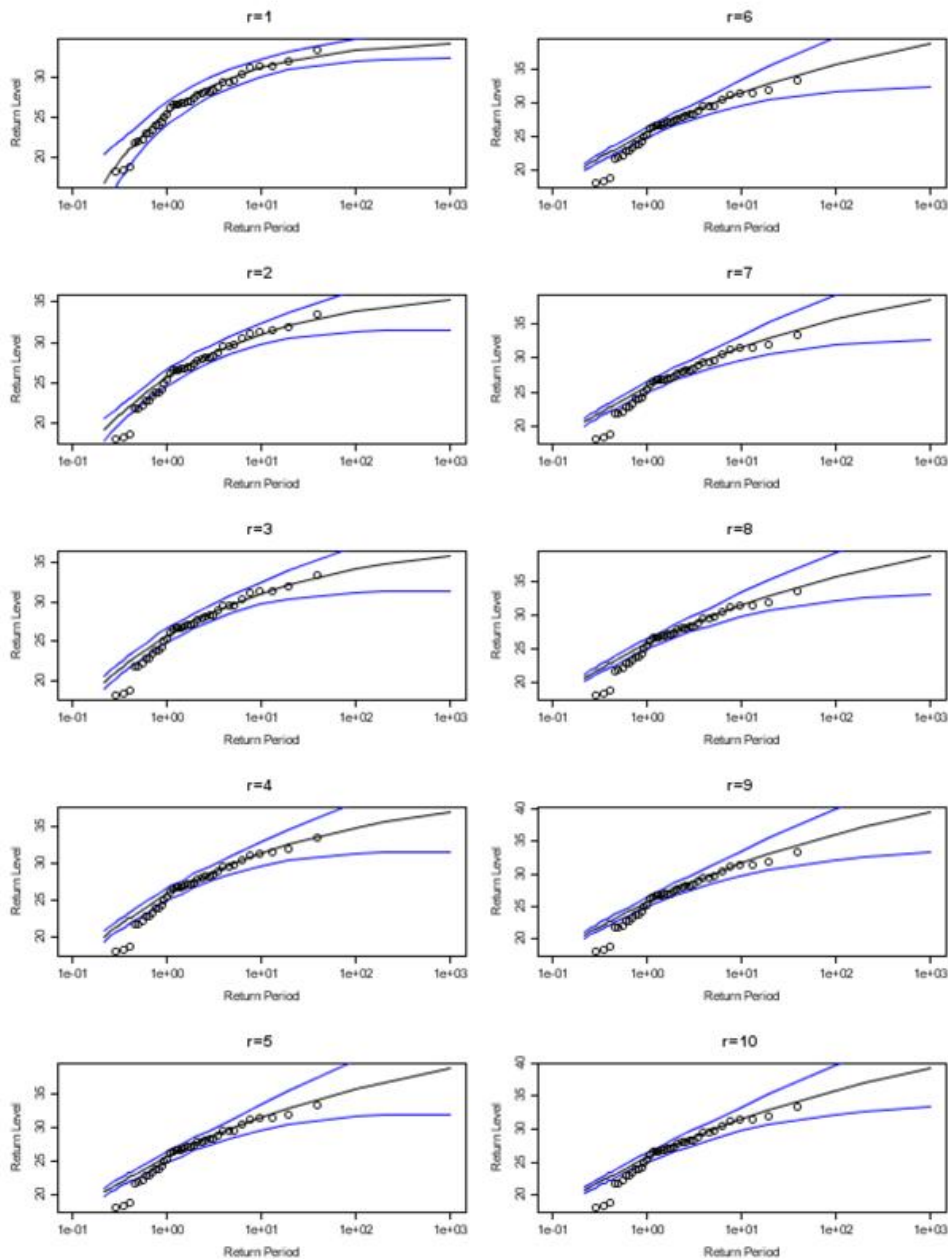


Abbildung 2-17 Nürnberg: Ergebnisse der Anpassung für die r größten Werte eines jeden Jahres, Return-Level-Plot

Bei den bisher betrachteten Stationen ist der Wert des Shape-Parameters mit zunehmendem r meist kleiner geworden, für Nürnberg wird dieser Wert mit zunehmendem r immer größer. Damit gleicht sich die Verteilung dieser Station an die der anderen an – der sehr kleine Shape-Parameter, der sich für die Jahreswindspitzen ergab, erschien ja auch sehr zweifelhaft. Hier führt die Methode der r größten Werte also zu einem glaubwürdigeren Ergebnis als die Anpassung der GEV an die Jahreswindspitzen.

Die Werte in der Tabelle 2-7 zeigen, dass sich die Ergebnisse für $r > 4$ kaum ändern. Die Abbildung 2-17 hilft aber nicht bei der Entscheidung, ob ein Shape < -0.21 oder ein Shape

> -0.16 besser zu den Jahreswindspitzen passt. In Hinblick auf die obere Grenze der Böengeschwindigkeit, die sich aus den Verteilungsparametern ergibt, erscheint der größere Shape-Wert sinnvoller, sodass man hier mit einem r-Wert zwischen 5 und 10 rechnen sollte.

Tabelle 2-7 Nürnberg: Ergebnis der Anpassung einer GEV an die RLV

r	LOC	SCALE	SHAPE	WKW50
1	25.44	3.98	-0.43	32.93
2	25.63	3.30	-0.30	33.22
3	25.69	3.16	-0.26	33.47
4	25.72	3.08	-0.21	33.88
5	25.62	3.04	-0.15	34.63
6	25.65	3.03	-0.15	34.65
7	25.70	2.99	-0.15	34.48
8	25.70	2.96	-0.14	34.54
9	25.66	2.99	-0.13	34.89
10	25.68	2.97	-0.13	34.75

LOC Location-Parameter in m/s

SCALE Scale-Parameter in m/s

SHAPE Shape-Parameter (dimensionslos)

WKW50 Windspitze in m/s für eine mittlere Wiederkehrzeit von 50 Jahren

2.1.2.7 Schlussfolgerungen

Insgesamt ergibt sich durch die Hinzunahme der nächstgrößten Windspitzen eine Vereinheitlichung hinsichtlich des Shape-Parameters der Extremwertverteilungen: Für die Jahreswindspitzen schwankte dieser Wert zwischen -0.02 und -0.43, jetzt liegt er, wenn man bei jeder Station die Ergebnisse für r=5 betrachtet, zwischen -0.06 und -0.24.

2.1.3 Windspitzen oberhalb einer Schwelle (POT)

2.1.3.1 Festlegung eines Schwellenwertes

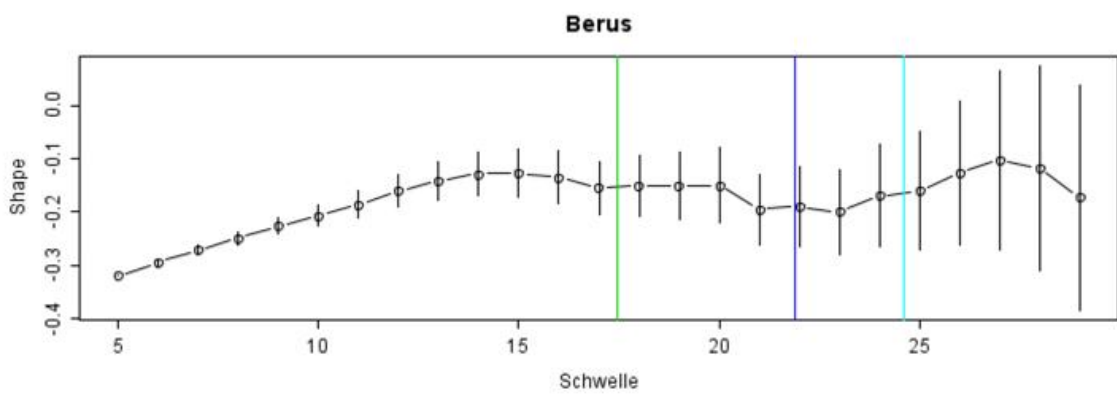
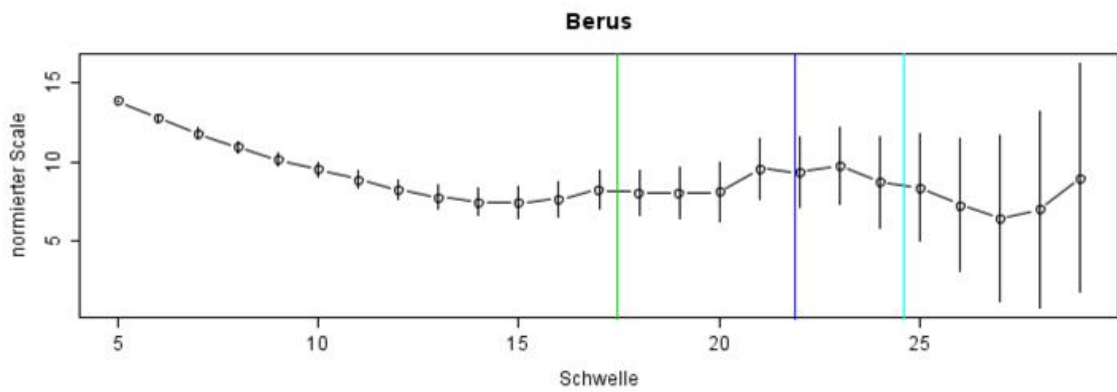
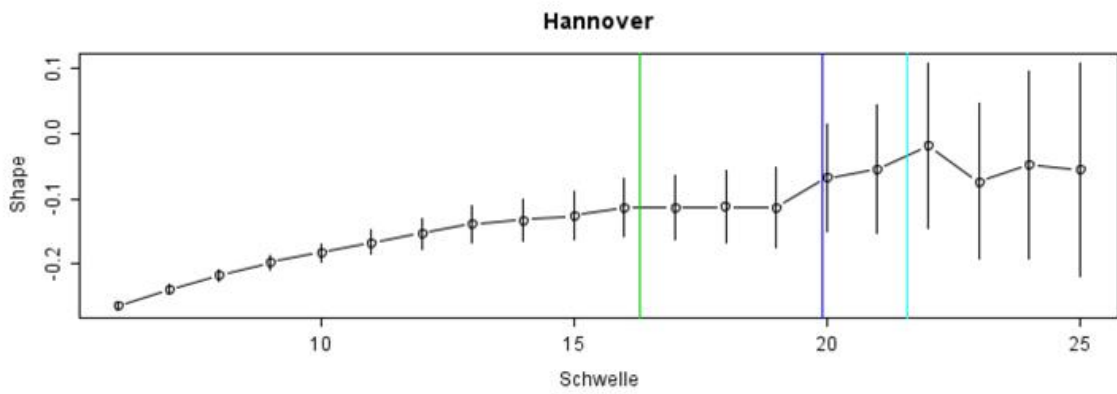
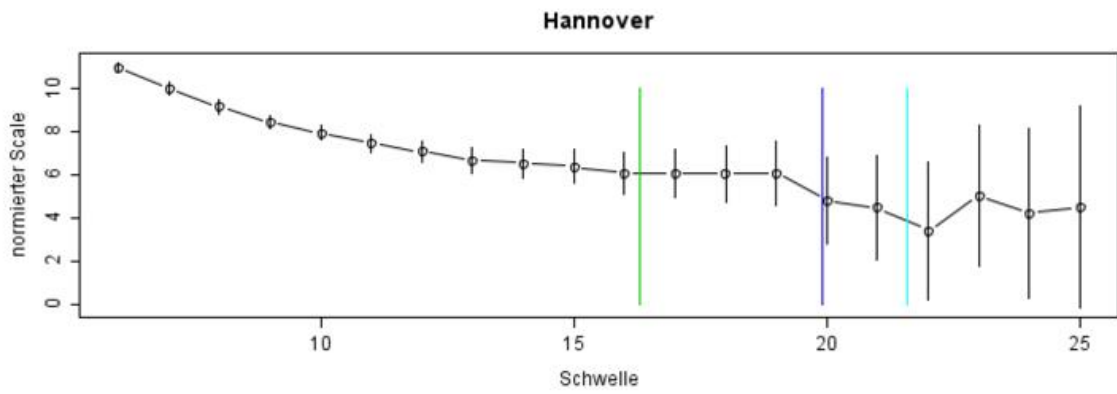
Wenn man mit allen Tageswindspitzen oberhalb eines Schwellenwertes arbeitet, dann muss man dafür sorgen, dass diese Tageswindspitzen unabhängig sind. Bei der Betrachtung der RLV wurde die Unabhängigkeit gewährleistet, indem zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tageswindspitzen mindestens ein Tag liegen musste. Hier werden nach einem Verfahren aus Dänemark (JENSEN und FRANCK, 1970) aus den Reihen der Tageswindspitzen unabhängige Maxima extrahiert, indem jeder Wert, der größer als die Werte des Vor- und Folgetages ist, als unabhängiges Maximum definiert wird. Alle weiteren Auswertungen erfolgen dann anhand dieser unabhängigen Tageswindspitzen. Dieses Verfahren entspricht in etwa der Methode der "Independent Storms", das in Großbritannien (HARRIS, 1999) für die Auswertung extremer Windgeschwindigkeiten herangezogen wird.

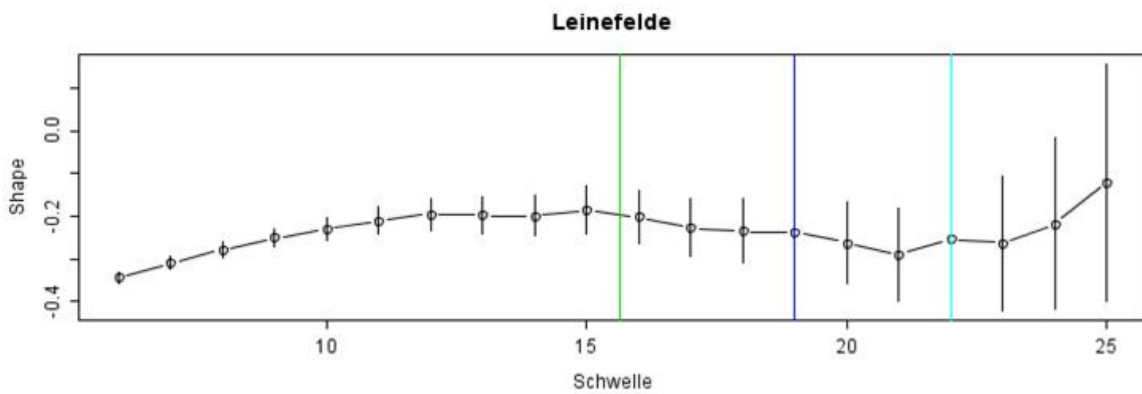
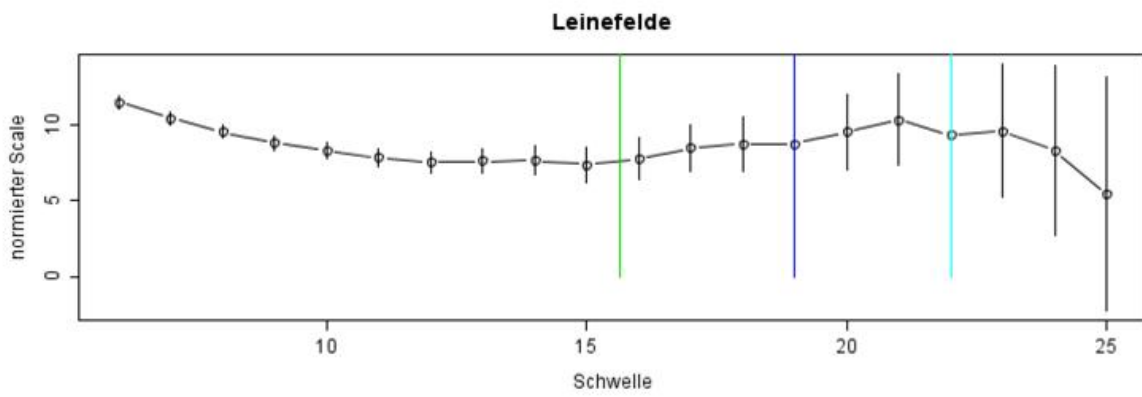
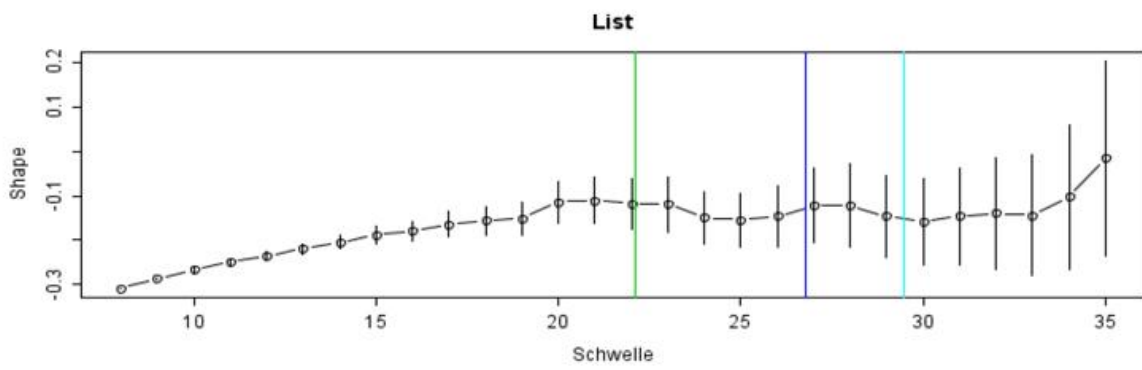
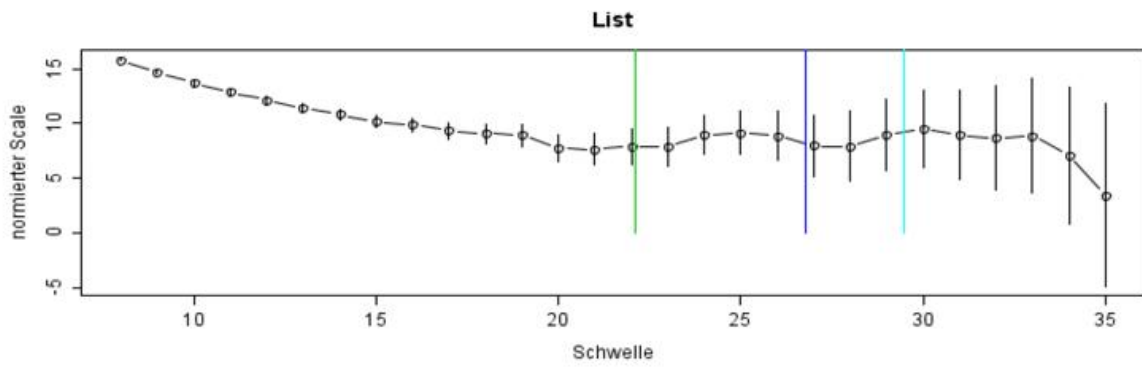
Bei der Festlegung eines Schwellenwertes muss man sich zunächst überlegen, ob man mit einem konstanten Schwellenwert arbeiten soll, oder ob dieser Wert anhand der Verteilung aller unabhängigen Tageswindspitzen einer Station bestimmt werden soll.

Mit dem Übergang von den Jahreswindspitzen zu den POT möchte man auch erreichen, dass die Konfidenzbereiche schmaler werden. Wenn man diese Bereiche für die verschiedenen Standorte in Deutschland vergleichen will, dann geht das nur, wenn man immer mit ähnlich vielen Werten gerechnet hat – ein konstanter Schwellenwert erfüllt diese Forderung nicht. Es wird daher versucht, einen Schwellenwert zu finden, der einem festen Quantil der Verteilung der unabhängigen Tageswindspitzen entspricht. Außerdem wird die Eignung des kleinsten Jahresmaximums als Schwellenwert beurteilt.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Scale- und Shape-Parameter der GEV (beide dimensionslos), die sich bei der Anpassung mit den in der x-Achse aufgeführten Schwellenwerten (angegeben in m/s) ergeben. Die schwarzen Balken geben die Breite der Konfidenzbereiche für die Verteilungsparameter an. Bei den farbigen Balken handelt es sich um 3 mögliche Schwellenwerte:

- grün entspricht dem 75%-Quantil der unabhängigen Tagesmaxima
- blau entspricht dem 90%-Quantil der unabhängigen Tagesmaxima
- türkis entspricht der kleinsten Jahreswindspitze.





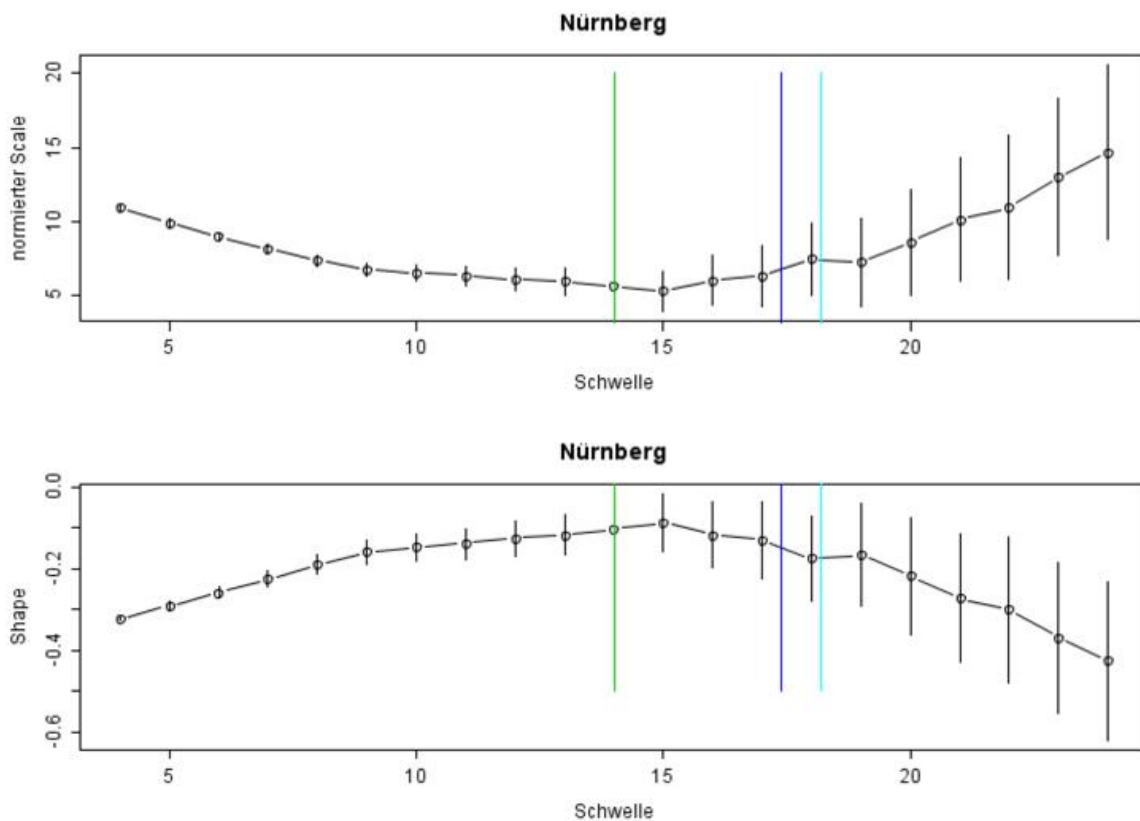


Abbildung 2-18 Zusammenhang zwischen dem Schwellenwert (m/s) und den Scale- und Shape-Parametern (dimensionslos) der GEV

Der Schwellenwert sollte das Ergebnis der Anpassung nicht beeinflussen und deshalb an das untere Ende des Bereichs, in dem sich die Verteilungsparameter nicht oder nur wenig ändern, gesetzt werden. In Hannover und Berus markiert der grüne Balken recht gut den Beginn dieses Bereichs. Für List auf Sylt und Leinefelde ist dieser Schwellenwert aber zu niedrig und für Nürnberg lässt sich gar kein Bereich finden, in dem die Parameter konstant sind. Das 90%-Quantil liegt für Berus, List und Leinefelde im konstanten Bereich, hier fällt nur Hannover aus dem Rahmen. Das kleinste Jahresmaximum hingegen ist als Schwellenwert zu groß. Für die weiteren Betrachtungen wird daher der 90%-Wert der Summenhäufigkeitsverteilung (90%-Quantil) der unabhängigen Maxima als Schwellenwert benutzt.

2.1.3.2 Anpassungsergebnisse

Zur Anpassung einer Extremwertverteilung an POT gibt es zwei Methoden:

- Man kann zum einen an die Verteilung aller Werte oberhalb des Schwellenwertes eine generalisierte Pareto-Verteilung (GPV) anpassen. Hier handelt es sich auch um eine Verteilung aus der Location, Scale und Shape-Familie, die eng mit der GEV zusammenhängt: die beiden Verteilungen haben identische Shape-Parameter, bei der GPV ist der Location-Parameter gleich dem gewählten Schwellenwert und der Scale-Parameter hängt von diesem Schwellenwert ab.

Die Berechnung jährlicher Wiederkehrwerte aus diesen Daten erfolgt unter der Annahme, dass die Zahl der Überschreitungen pro Jahr konstant gleich dem Mittelwert aller jährlichen

Überschreitungen des betrachteten Zeitraumes ist. Hier muss also ein weiterer Wert geschätzt werden – und diese Schätzung vergrößert den Konfidenzbereich der Wiederkehrwerte. Das macht sich allerdings erst in der 2. Stelle hinter dem Komma bemerkbar.

- Unter der Annahme, dass die jährliche Zahl der Überschreitungen des Schwellenwertes einen Poisson-Prozess darstellt (COLES, 2001, Seite 124 ff), kann man auch – wie bei den r -größten Werten – für die Verteilung der POT Parameter einer GEV errechnen, die den Parametern für die Jahreswindspitzen entsprechen, aber kleinere Konfidenzbereiche haben. Dieses Vorgehen entspricht also dem für RLV.

Die Anpassungsergebnisse sind für beide Methoden identisch. Die Güte der Anpassung lässt sich aber besser anhand der GPV darstellen, da hier die Verteilung der POT und die Verteilungsparameter zusammengehören. Für die Berechnung der Gitterpunktweite hingegen benötigt man Parameter, die nicht vom Schwellenwert abhängen – und das wird nur mit der GEV erreicht.

Mit dem 90%-Quantil der unabhängigen Tageswindspitzen als Schwellenwert werden also GPV an die POT der 5 Beispielstationen angepasst. Das führt zu folgenden Ergebnissen, die jetzt mit den Ergebnissen für die Jahreswindspitzen verglichen werden.

2.1.3.3 Hannover

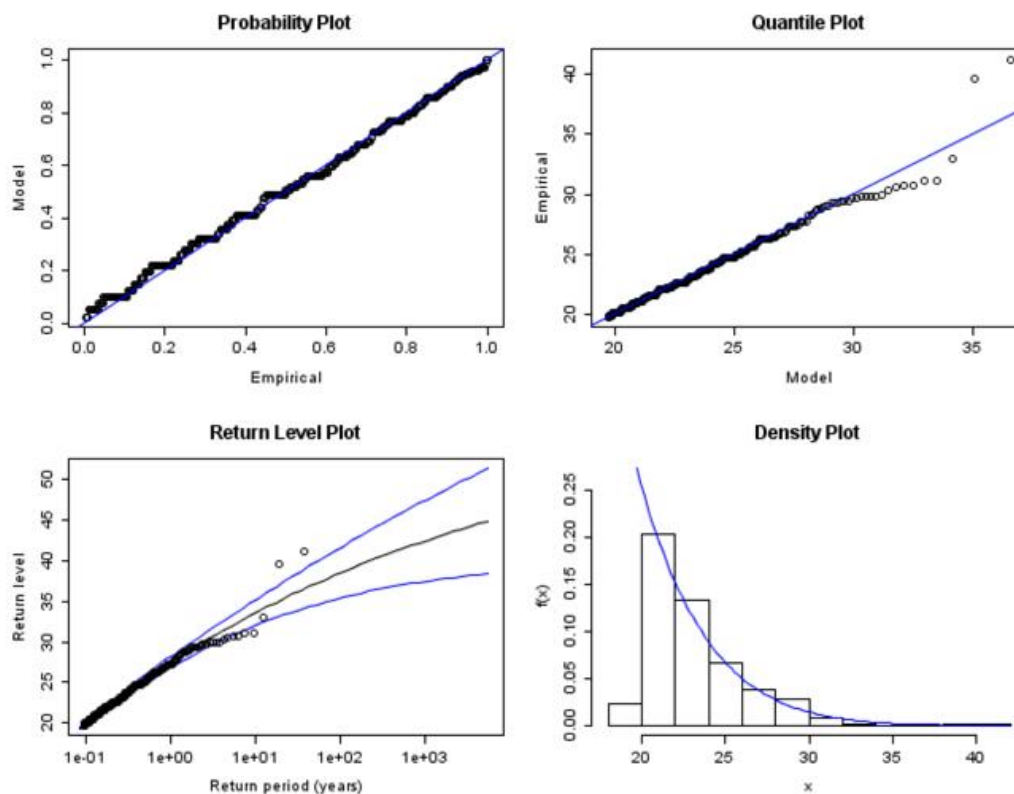


Abbildung 2-19 Hannover, Anpassung einer Pareto-Verteilung an die POT

Der Schwellenwert ist 19.7 m/s, er wird in der Zeit von 1971 bis 2008 an 401 Tagen überschritten, damit ergeben sich im Mittel pro Jahr 10 Überschreitungen – die Datenmenge für die Anpassung hat sich also in etwa verzehnfacht. Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem für die Jahresmaxima (Abbildung 2-8), dann fällt zweierlei auf:

- Der Wertebereich zwischen den 5 größten Jahreswindspitzen wird durch die POT nicht aufgefüllt. Diese Werte erhalten damit eine geringere Eintrittswahrscheinlichkeit und tragen weniger zum Ergebnis bei als zuvor. Dadurch verringert sich der Shape gegenüber dem Ergebnis für die Jahreswindspitzen: er beträgt jetzt -0.09, vorher lag dieser Wert bei -0.02. Der Standardfehler für diesen Parameter ist jetzt 0.04 und damit liegt der Wert null knapp außerhalb des 95%-Konfidenzbereichs für diesen Parameter. Der kleinere Shape führt auch zu einer Verringerung der Wiederkehrwerte.
- Der Konfidenzbereich der Wiederkehrwerte ist jetzt deutlich kleiner als zuvor – so klein, dass er von ca. 6 der Tageswindspitzen überschritten wird. Angesichts dieses Ergebnisses muss man sich fragen, ob diese Konfidenzgrenzen nicht unrealistisch eng sind.

2.1.3.4 Berus

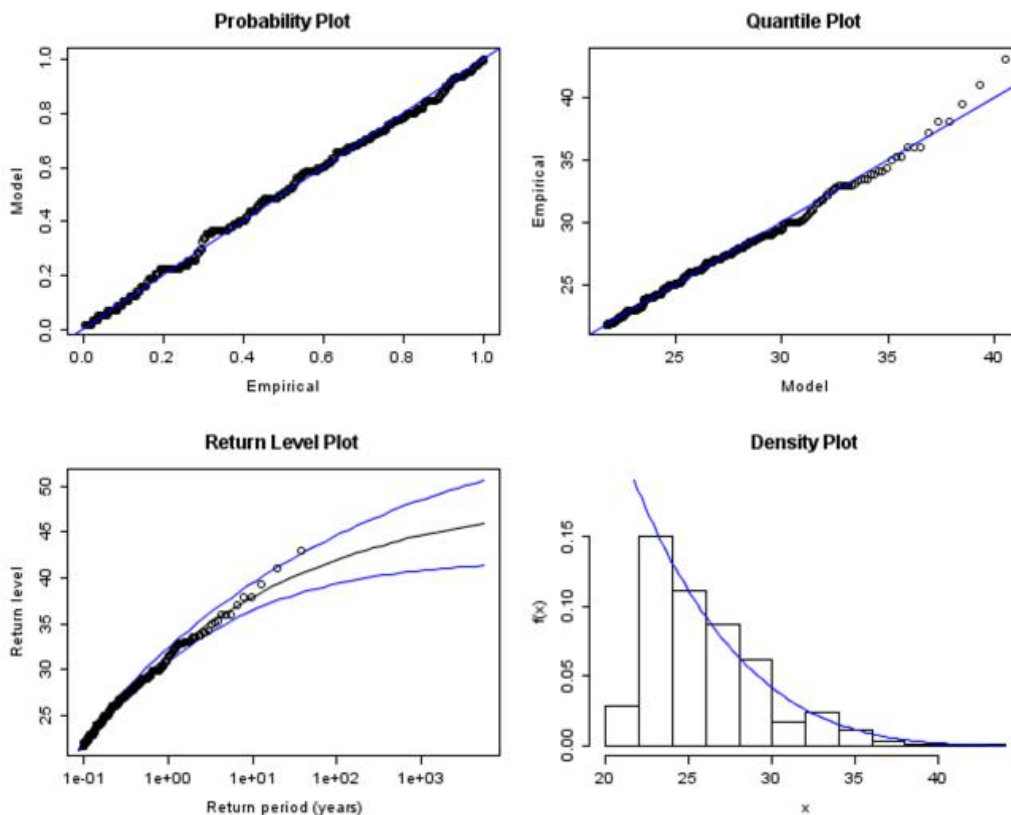


Abbildung 2-20 Berus, Anpassung einer Pareto-Verteilung an die POT

Der Schwellenwert für Berus ist 21.7 m/s, diese Schwelle wird im Zeitraum 1971 bis 2008 398mal überschritten – auch hier verengt sich der Konfidenzbereich für die Wiederkehrwerte gemäß der gestiegenen Zahl der Fälle. Trotzdem gibt es – wie bei der Anpassung an die Jahreswindspitzen (Abbildung 2-9) – keine Beobachtungswerte, die außerhalb des Konfidenzbereichs der Wiederkehrwerte liegen. Die Verteilung hat jetzt einen deutlich kleineren Shape-Wert, gleichzeitig ist aber der Location-Parameter etwas größer geworden, sodass die Änderung des Shapes sich erst bei Wiederkehrzeiten von mehr als 100 Jahren merkbar auswirkt. Auch für Berus gibt es keine Windspitze, die die Lücke zwischen der größten und der zweitgrößten Jahreswindspitze auffüllt, unterhalb dieser Werte sind die POT aber wesentlich homogener als die Jahreswindspitzen.

2.1.3.5 List auf Sylt

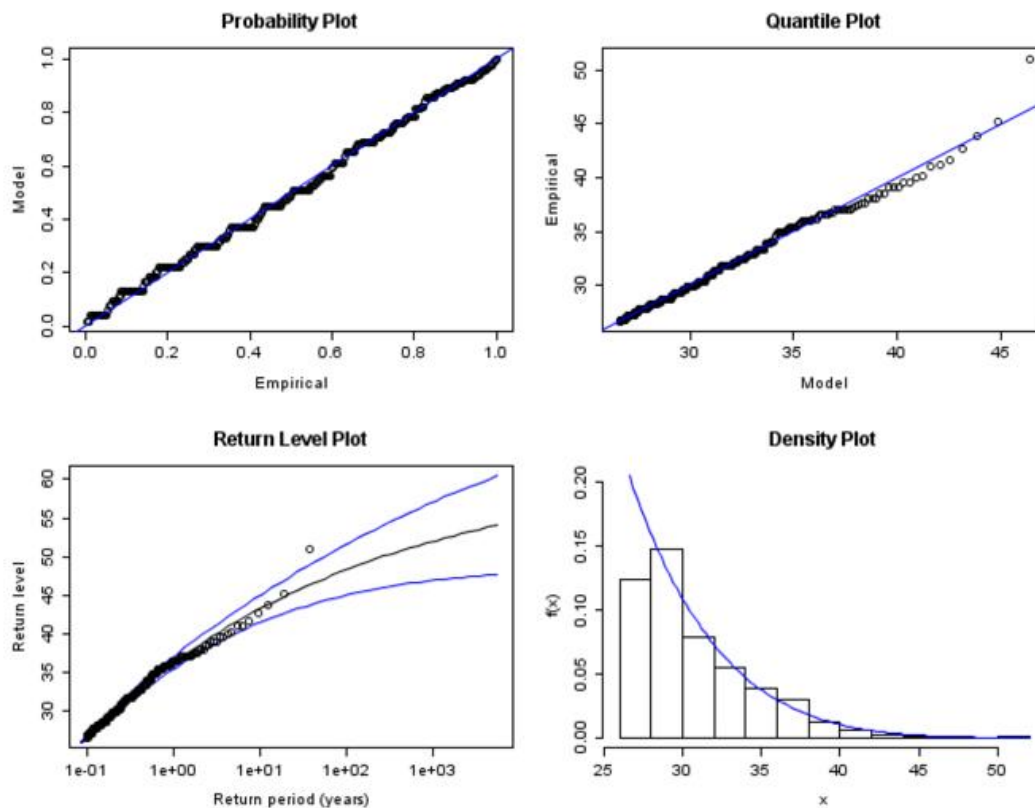


Abbildung 2-21 List auf Sylt, Anpassung einer Pareto-Verteilung an die POT

Bei der Anpassung einer GEV an die Jahreswindspitzen blieb die Frage offen, ob der Shape-Parameter, der den Wert -0.10 annahm, größer oder kleiner als null ist. Die Anpassung an die POT ergibt einen Shape-Parameter von -0.14 mit einem Standardfehler von 0.04 – damit liegt der Wert null außerhalb des 95%-Konfidenzbereichs dieses Parameters und die Ursache ist wieder dieselbe wie bei den vorangegangenen Stationen. Der kleinere Shape und der engere Konfidenzbereich führen auch an dieser Station dazu, dass die größte Windspitze, die auf Sylt beobachtet wurde, außerhalb des Vertrauensbereichs der angepassten Verteilung liegt.

2.1.3.6 Leinefelde

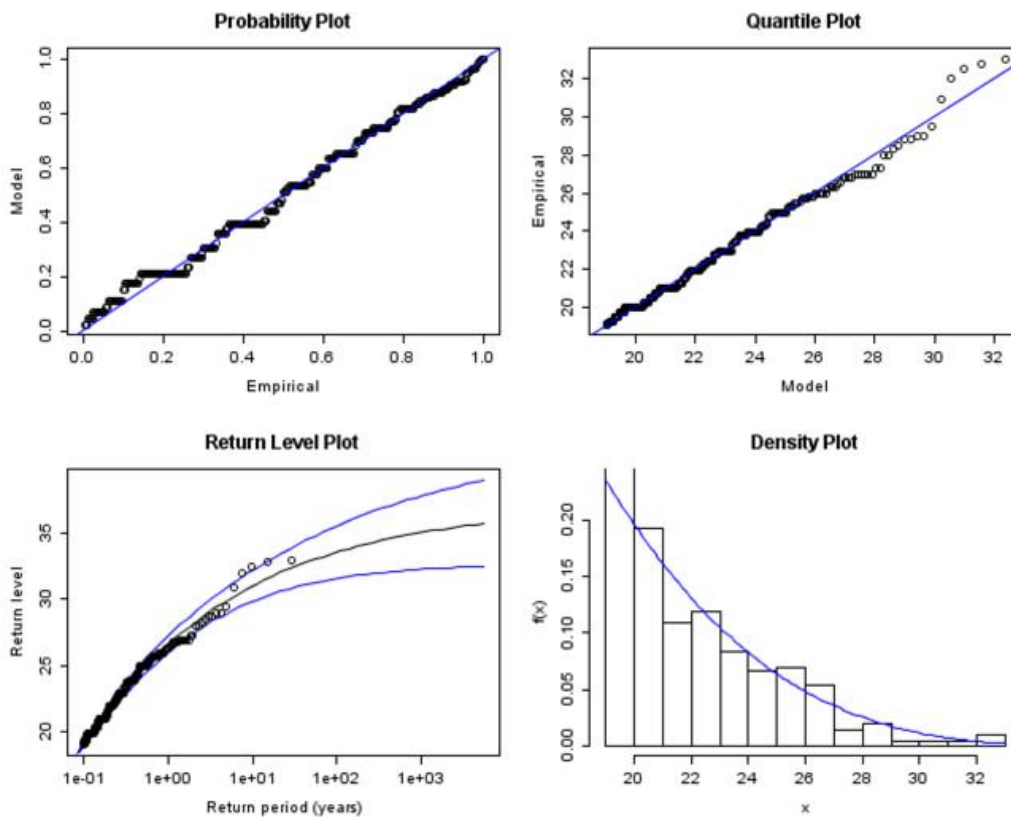


Abbildung 2-22 Leinefelde, Anpassung einer Pareto-Verteilung an die POT

Auch in Leinefelde gibt es keine zusätzlichen Windspitzen im Bereich der 5 größten Jahreswindspitzen. Da die Verteilung jetzt aber an 302 und nicht mehr nur an 28 Werte angepasst wird, haben diese 5 größten Jahreswindspitzen einen wesentlich geringeren Einfluss auf das Ergebnis: der Shape wird deutlich kleiner als für die Jahreswindspitzen und 2 der 5 größten Maxima liegen außerhalb des Konfidenzbereichs für die Wiederkehrwerte. Die Stufen, die in den Probability Plots von List auf Sylt und Leinefelde zu erkennen sind, rühren daher, dass die Windspitzen für viele Jahre nur auf einen Knoten genau (List) bzw. auf einen m/s genau (Leinefelde) angegeben wurden.

2.1.3.7 Nürnberg

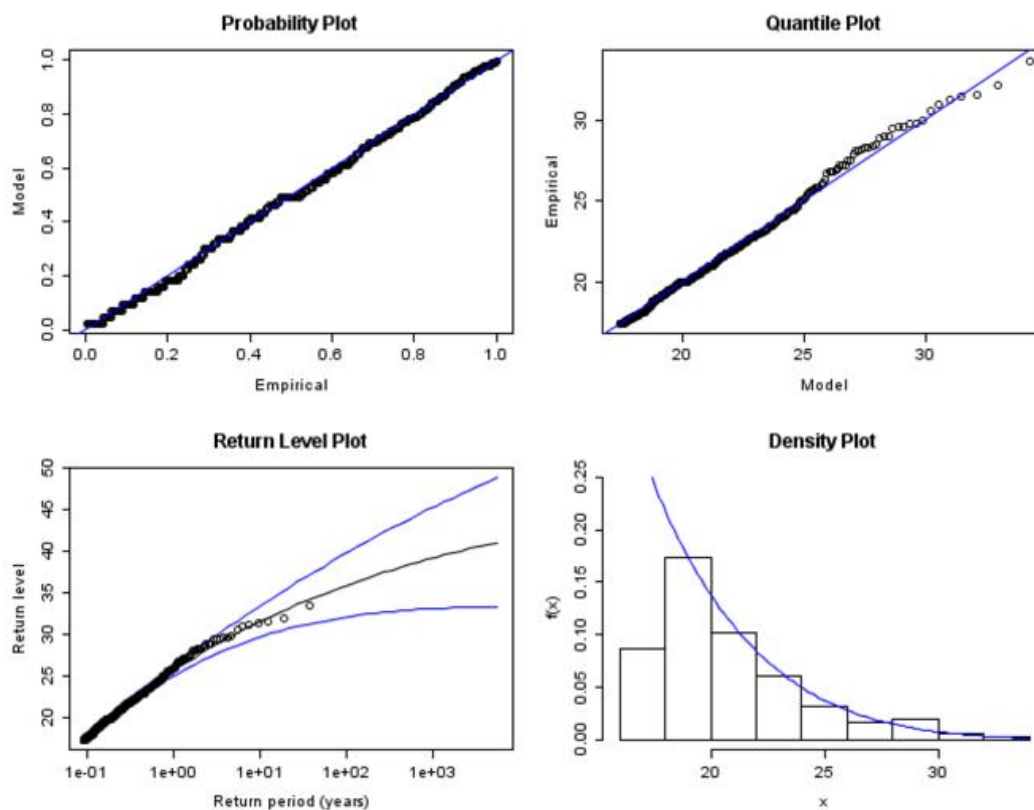


Abbildung 2-23 Nürnberg, Anpassung einer Pareto-Verteilung an die POT

Benutzt man für Nürnberg Tageswindspitzen oberhalb von 17.4 m/s an Stelle der Jahreswindspitzen, dann sieht das Ergebnis der Anpassung wesentlich besser aus, weil der Shape-Parameter nicht mehr so klein ausfällt und sich der Konfidenzbereich nicht mehr so merkwürdig um die Wiederkehrwerte windet. Das liegt auch hier – wie bei allen anderen Stationen – daran, dass die größten der betrachteten Werte sich nicht verändern – obwohl es in Nürnberg keine deutlichen Ausreißer unter den Jahreswindspitzen gibt. Der kleinere Shape führt zu größeren Wiederkehrwerten und die endliche Obergrenze der Windgeschwindigkeit, der jetzt bei 49 m/s liegt, ist auch realistischer.

2.1.3.8 Schlussfolgerungen

Legt man die Schwelle zur Bestimmung der POT auf das 90%-Quantil der Verteilung der unabhängigen Tageswindspitzen, dann erhält man in etwa eine Verzehnfachung der Werte zur Anpassung einer Extremwertverteilung. Diese POT füllen bei den meisten der hier gezeigten Beispiele die Lücke, die zwischen den größten Jahreswindspitzen und dem Rest der Jahresmaxima klafft, nicht auf. Dadurch bekommen diese größten Werte bei der Anpassung der Verteilung ein geringeres Gewicht. Das führt zu kleineren Shape-Parametern und damit zu kleineren Wiederkehrwerten für große Wiederkehrzeiten. Gleichzeitig werden die Konfidenzbereiche für die Wiederkehrwerte deutlich kleiner, sodass es häufiger zu Ausreißern bei den Return-Level-Plots kommt.

2.1.4 GEV für alle unabhängigen Tageswindspitzen

Die bisher betrachteten Verteilungen von Tageswindspitzen sind alle Untermengen der Verteilung aller unabhängigen Tageswindspitzen, diese kann also als "Elternverteilung" (parent distribution) der bisher berechneten Extremwertverteilungen betrachtet werden. Wenn man diese Elternverteilung kennt, kann man auch sie zur Berechnung der Wiederkehrwerte heranziehen. Diese haben dann allerdings sehr viel geringere Eintrittswahrscheinlichkeiten: Für eine Wiederkehrzeit von 10 Jahren beträgt die Eintrittswahrscheinlichkeit für die bisher betrachteten Verteilungen $1/10$, für die Verteilung aller unabhängigen Tageswindspitzen in etwa $1/100$ -tel des bisherigen Wertes, denn es gibt pro Jahr an jeder Station in etwa 100 unabhängige Tageswindspitzen. Die GEV, die an diese Tageswindspitzen angepasst wird, muss daher den rechten Rand der Verteilung sehr gut abbilden, wenn sie für die Berechnung von Wiederkehrwerten für große Wiederkehrzeiten geeignet sein soll.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Anpassungsergebnisse sowie jeweils einen Vergleich dieser Ergebnisse mit denen der POT anhand des Return Level Plots. Bei allen Return-Level-Plots mit der GEV für die unabhängigen Tageswindspitzen können die Wiederkehrzeiten (Return Period) NICHT als Jahre interpretiert werden! Es handelt sich vielmehr um Wiederkehrzeiten von $1/r$ Jahren, der größte Wiederkehrwert, der in diesen Abbildungen zu sehen ist, hat also eine Wiederkehrzeit von etwa 10 Jahren.

2.1.4.1 Hannover

Der Quantile Plot zeigt ganz deutlich, dass der rechte Rand der Verteilung durch die GEV nicht sehr gut abgebildet wird: er hat offensichtlich einen kleineren Shape, als berechnet. Damit werden die Wiederkehrwerte schon für Wiederkehrzeiten von weniger als 10 Jahren überschätzt. Das ist allerdings, wie in der Abbildung 2-25 zu sehen, für die Verteilung, die an die POT angepasst wurde, nicht anders.

2.1.4.2 Berus

Für Berus passt die GEV auch am rechten Rand gut zu den unabhängigen Tageswindspitzen, allerdings werden auch hier die Wiederkehrzeiten für größere Windgeschwindigkeiten unterschätzt. Das Ergebnis der Anpassung ist hier allerdings für die POT etwas besser als für die unabhängigen Tageswindspitzen (Abbildung 2-27).

2.1.4.3 List auf Sylt

Für List auf Sylt ist das Ergebnis noch etwas besser als für Berus – die größte Tageswindspitze, die je an diesem Standort gemessen wurde, erhält mit der GEV eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren und damit einen sehr realistischen Wert. Abgesehen von diesem Wert – das zeigt die Abbildung 2-29 – passen die größten gemessenen Tageswindspitzen aber auch hier besser zu der Verteilung, die an die POT angepasst wurde

2.1.4.4 Leinefelde

Wie schon in Hannover passt auch in Leinefelde die GEV nur schlecht an den rechten Rand der Verteilung der unabhängigen Tageswindspitzen. Allerdings ist hier – anders als in Hanno-

ver – das Ergebnis für die POT besser als für die unabhängigen Tageswindspitzen (Abbildung 2-31).

2.1.4.5 Nürnberg

Auch in Nürnberg folgt die angepasste GEV für Windgeschwindigkeiten oberhalb von 30 m/s den gemessenen Werten nicht mehr. Für diesen Standort ist das Ergebnis der Anpassung für die POT deutlich besser als für die Tageswindspitzen (Abbildung 2-33).

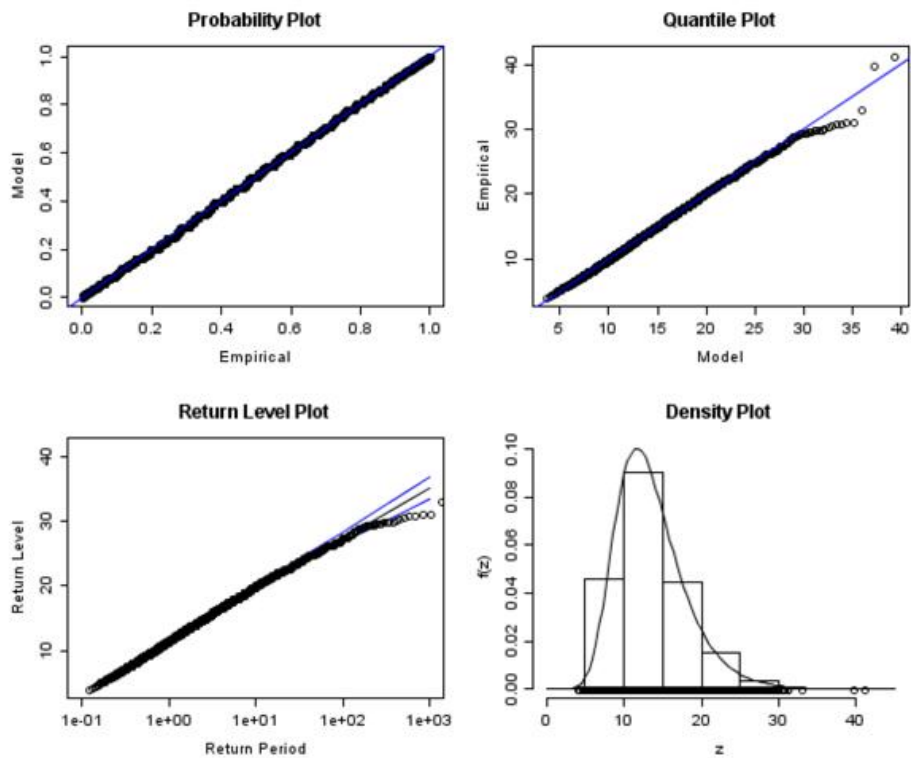


Abbildung 2-24 Hannover: Anpassung einer GEV an die unabhängigen Tageswindspitzen

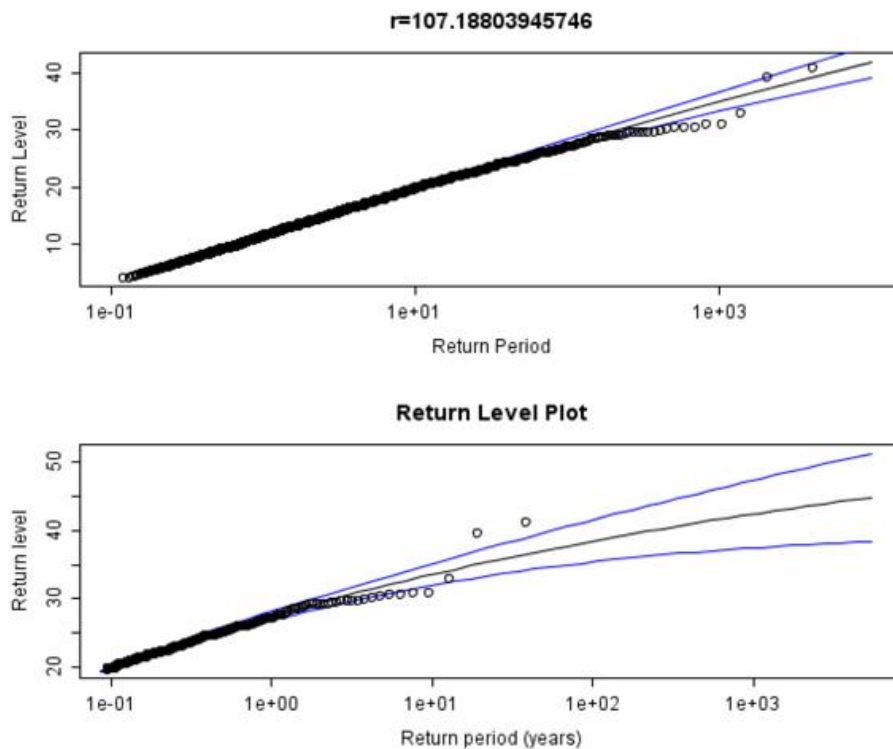


Abbildung 2-25 Hannover: Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit
oben: unabhängige Maxima, Wiederkehrzeit = Jahre/r; unten: POT

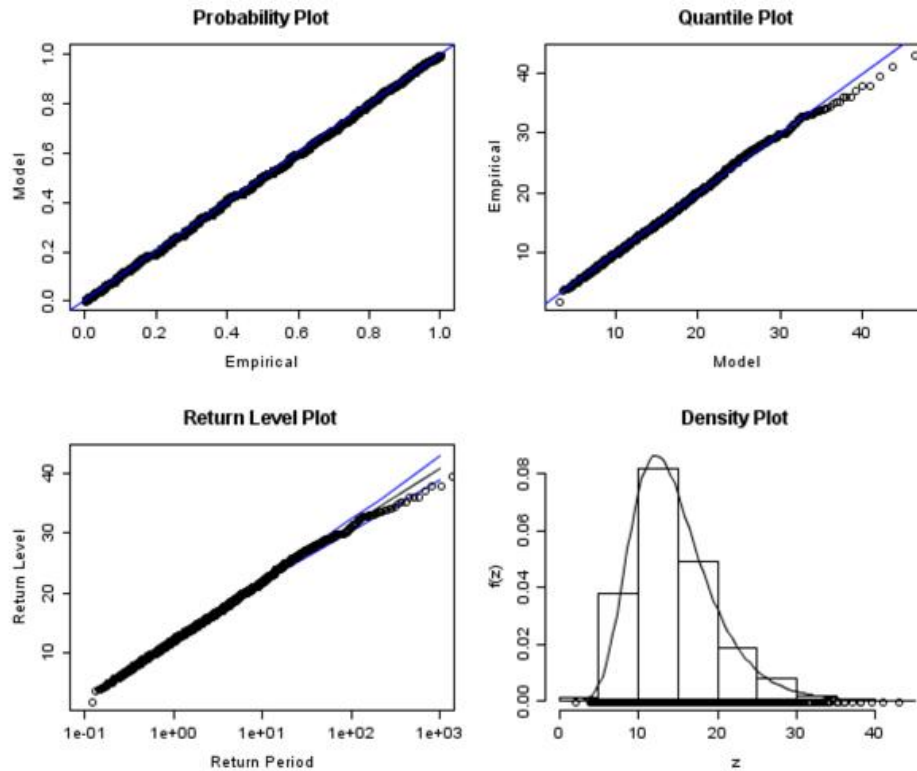


Abbildung 2-26 Berus: Anpassung einer GEV an die unabhängigen Tageswindspitzen

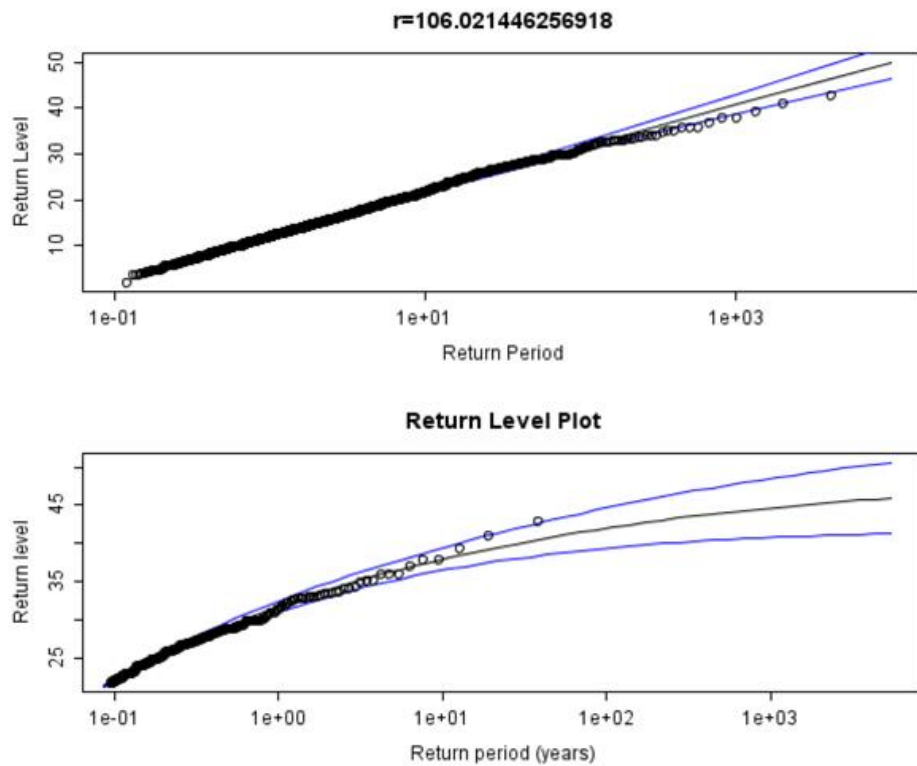


Abbildung 2-27 Berus: Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit
oben: unabhängige Maxima, Wiederkehrzeit = Jahre/r; unten: POT

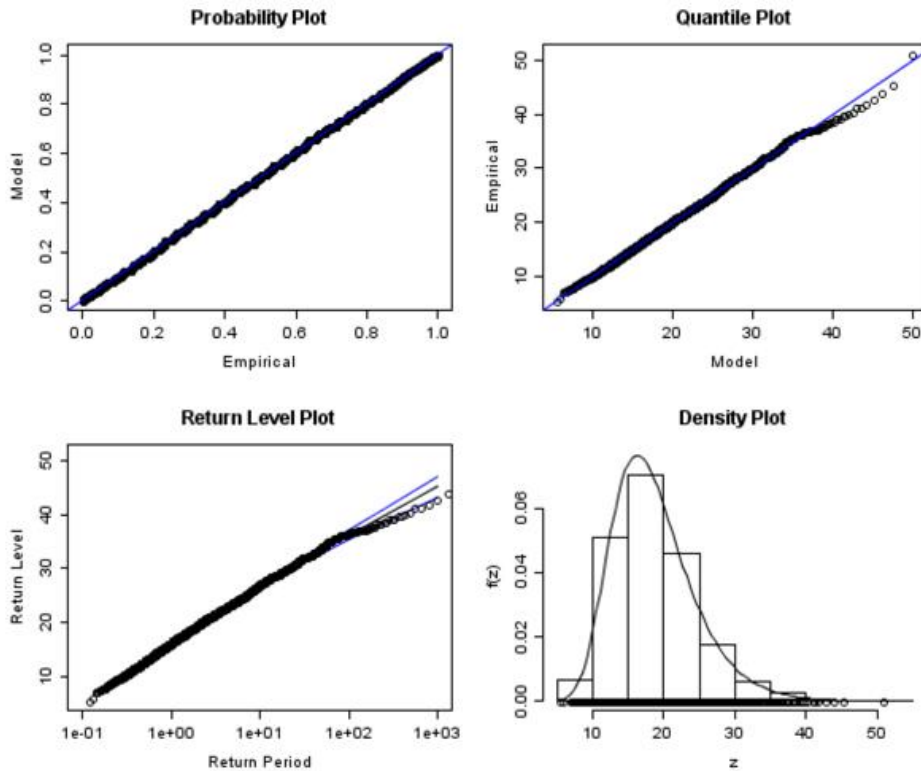


Abbildung 2-28 List auf Sylt: Anpassung einer GEV an die unabhängigen Tageswindspitzen

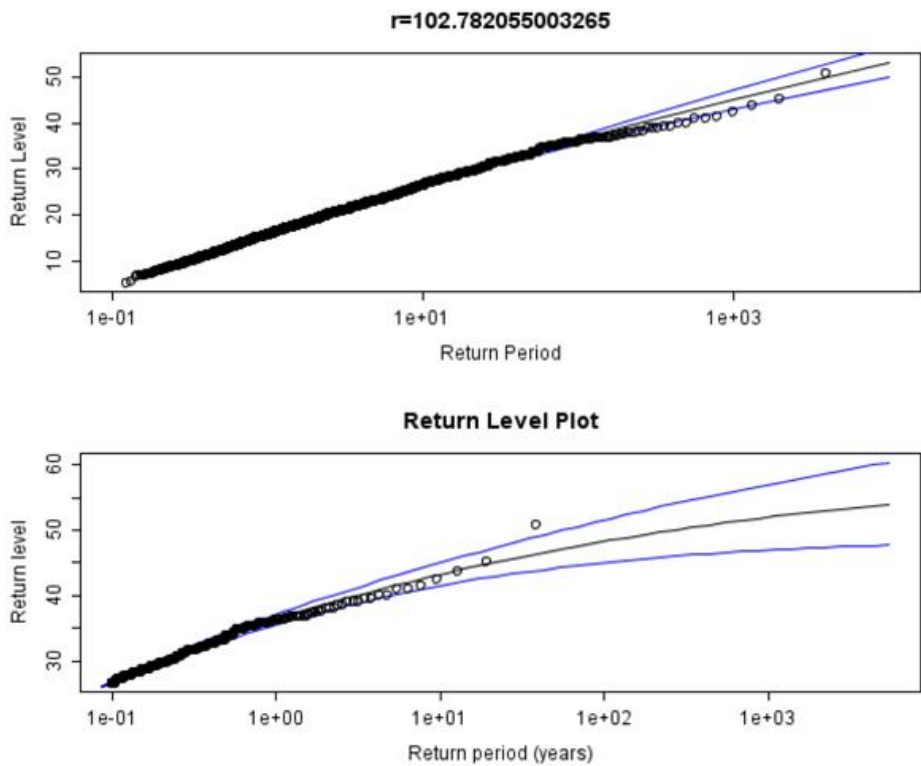


Abbildung 2-29 List auf Sylt: Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit
oben: unabhängige Maxima, Wiederkehrzeit = Jahre/r; unten: POT

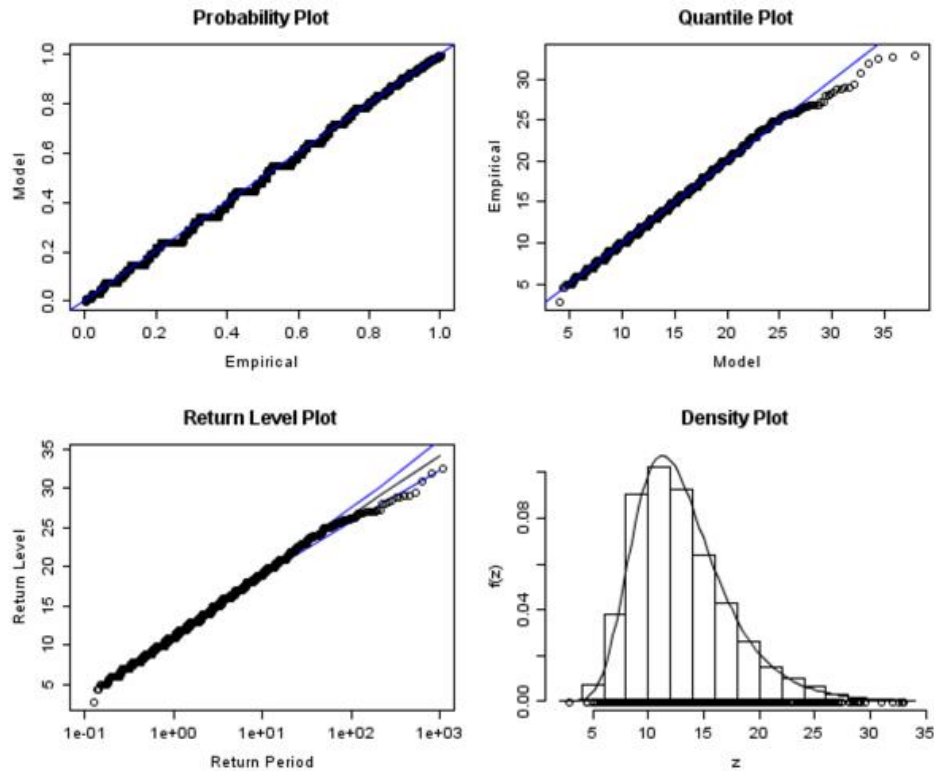


Abbildung 2-30 Leinefelde: Anpassung einer GEV an die unabhängigen Tageswindspitzen

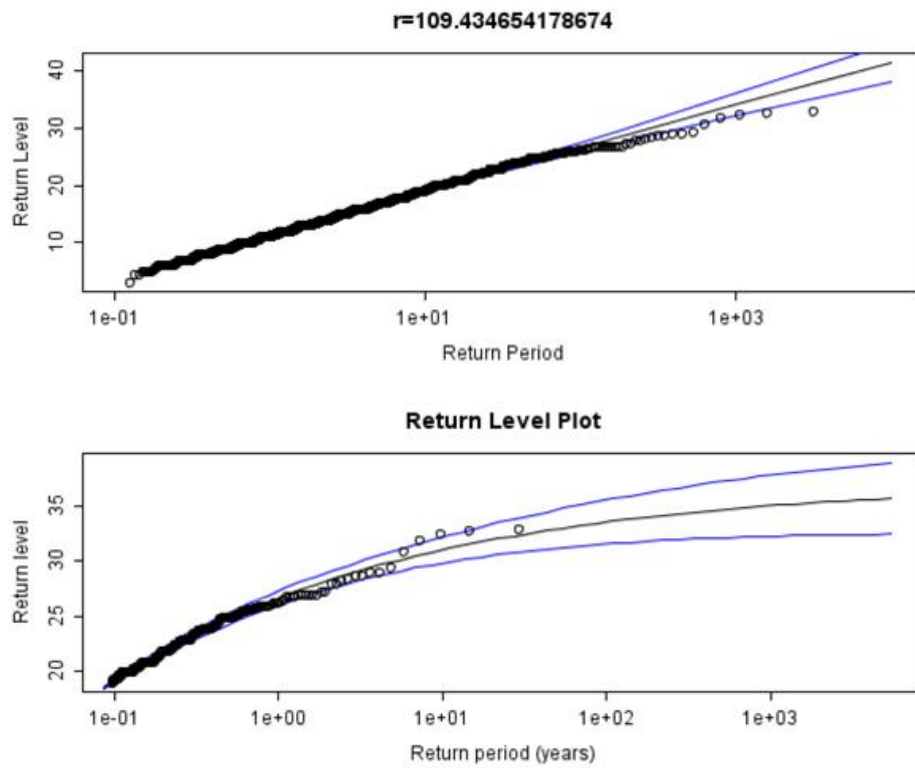


Abbildung 2-31 Leinefelde: Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit
oben: unabhängige Maxima, Wiederkehrzeit = Jahre/r; unten: POT

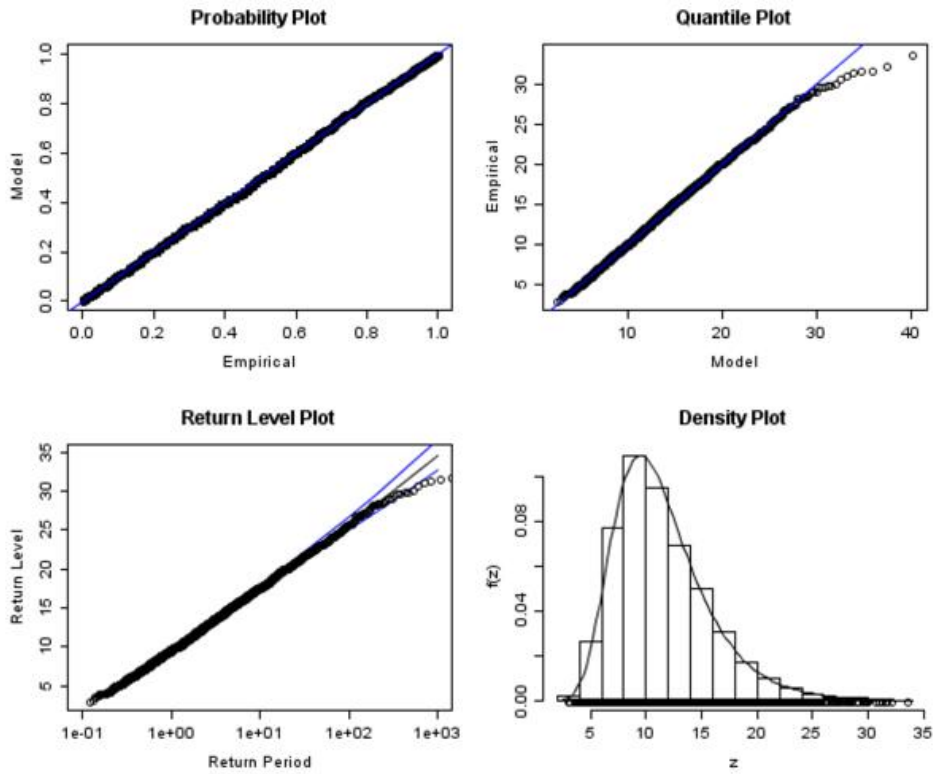


Abbildung 2-32 Nürnberg: Anpassung einer GEV an die unabhängigen Tageswindspitzen

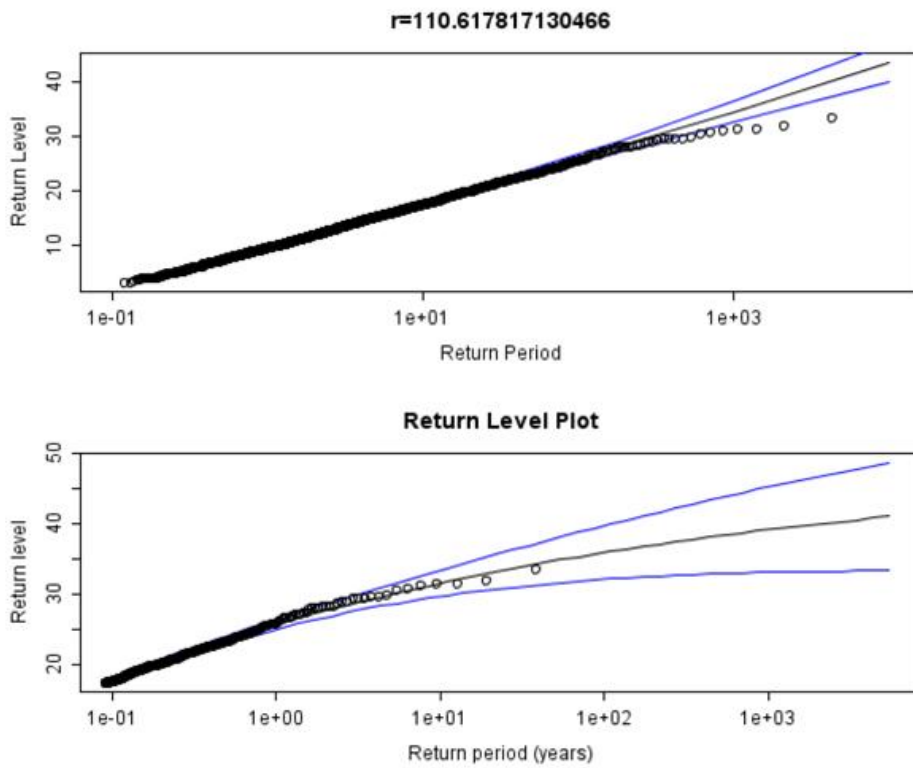


Abbildung 2-33 Nürnberg: Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit
oben: unabhängige Maxima, Wiederkehrzeit = Jahre/r; unten: POT

2.1.4.6 Schlussfolgerungen

Insgesamt werden die Wiederkehrwerte, die mit diesen GEV berechnet werden, also gegenüber den bisherigen Ergebnissen, bei denen nur die größten Tageswindspitzen und damit der rechte Rand der Verteilung der unabhängigen Tageswindspitzen betrachtet wurde, überschätzt. Das gilt für windschwache Standorte stärker als für windstarke Standorte. Der Ansatz, die Wiederkehrwerte anhand der Verteilung aller Tageswindspitzen zu berechnen, wird daher nicht weiter verfolgt.

2.2 Vergleich aller Anpassungsergebnisse

Alle Anpassungsergebnisse sind in der Tabelle 2-8 aufgelistet. Außerdem sind die Häufigkeitsverteilungen der Jahreswindspitzen (rot), der 5 größten Windspitzen eines jeden Jahres (schwarz) und der POT (blau) in den unten stehenden Abbildungen zu sehen.

Den Werten in der Spalte "Schwelle" der Tabelle 2-8 kann man entnehmen, dass der kleinste Wert der RLV immer kleiner ist als der Schwellenwert für die POT, deren Verteilungen in etwa doppelt so viele Werte aufweisen wie die der RLV – bei der Betrachtung der RLV fehlen demnach doch einige Starkwindereignisse. Dennoch liegt der Modus (das ist der häufigste Wert) der Verteilung der RLV immer rechts von dem der POT, also bei größeren Windgeschwindigkeiten. Die Abbildungen zeigen auch, dass die Verteilungen der RLV denen der Jahreswindspitzen ähnlicher sind als die Verteilungen der POT.

Die Verteilungsparameter und Wiederkehrwerte, die anhand der RLV und die POT berechnet werden, unterscheiden sich bei den hier betrachteten 5 Stationen nur unwesentlich und auch hinsichtlich der Wiederkehrwerte, berechnet mit einer GEV, die an die Jahreswindspitzen angepasst wurde, gibt es keine signifikanten Unterschiede: Die Wiederkehrwerte für eine Wiederkehrzeit von 500 Jahren liegen für diese 3 unterschiedlichen Ansätze immer im Konfidenzbereich der Werte, die mit den POT berechnet werden. Lediglich die Gumbel-Verteilungen, die an die Jahreswindspitzen angepasst wurden, führen bei dieser Wiederkehrzeit zu deutlich höheren Wiederkehrwerten, die für 4 der 5 Stationen auch signifikant größer sind als die mit den POT berechneten Werte. Für die Anpassung an die unabhängigen Tageswindspitzen sind nur die Wiederkehrwerte in der Tabelle 2-8 aufgeführt. Diese Werte sind in der Regel deutlich größer als die, die sich aus den anderen GEV errechnen. Für die Standorte Leinefelde und Nürnberg sind die Wiederkehrwerte für eine Wiederkehrzeit von 10 Jahren größer als die größte Tageswindspitze, die an diesen Stationen gemessen wurde. Auch das zeigt, dass man mit einer Anpassung der GEV an die unabhängigen Tageswindspitzen keine vernünftigen Wiederkehrwerte erhält.

Der Shape-Parameter ist diejenige Größe, die sich bei den verschiedenen Methoden am stärksten ändert: Er ist i.d.R. umso kleiner, je mehr Werte die betrachtete Verteilung hat, bzw. je kleiner der Modus der jeweiligen Verteilung ist.

Die Entscheidung für eine der hier getesteten Methoden fällt angesichts dieser geringen Unterschiede nicht leicht. Sie kann auch nicht allein anhand dieser 5 Beispiele getroffen werden. Deshalb wird hier auch auf Ergebnisse zurückgegriffen, die aus den Auswertungen der Daten aller Stationen, die für die Regressionsrechnungen benutzt wurden, resultierten:

- Die "klassische" Methode der Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen wird den unterschiedlichen Schiefen, die diese Verteilungen aufweisen, nicht gerecht. Ergebnisse, die denen für die Station Nürnberg ähneln, also einen Shape haben, der deutlich kleiner als Null ist, erhält man bei 17 der 130 (siehe Kapitel 3) Stationen, deren Daten für die Regressionsrechnung verwendet wurden. Es kommt hinzu, dass die Konfidenzbereiche für die Wiederkehrwerte, die sich aus der Anpassung einer Gumbel-Verteilung ergeben, ohne Berücksichtigung der Unsicherheit, die in der Festlegung des Shape-Parameters liegt, berechnet werden. Sie sind damit deutlich kleiner als die Konfidenzbereiche, die sich aus der Anpassung einer GEV ergeben und täuschen ggf. eine Genauigkeit dieser Schätzwerte vor, die unrealistisch ist. So hat der Wiederkehrwert für eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren für die 59 Stationen, deren Shape-Parameter sich im Bereich von -0.1 bis 0.1 bewegt und damit gegen Null geht, eine mittlere Breite von 12.3 m/s, wenn man ihn anhand der GEV berechnet. Benutzt man die Anpassungsergebnisse der Gumbel-Verteilung, dann sind es im Mittel 7.8 m/s. Beide Bereiche wurden mit der Delta-Methode (siehe Kapitel 0) berechnet. Mit der Gumbel-Verteilung ist man zudem auf die Betrachtung der Jahreswindspitzen beschränkt.
- Die Betrachtung der Jahreswindspitzen allein ist wegen der unterschiedlichen Zeiträume, für die Tageswindspitzen vorliegen, sowie der Lücken, die diese Daten aufweisen, problematisch: Diese Unzulänglichkeiten verstärken die räumliche Heterogenität der Jahreswindspitzen, die wegen des Zufallscharakters, den dieser Wert hat, ohnehin sehr groß ist. Durch die Verwendung zusätzlicher Windspitzen erreicht man eine gewisse Homogenisierung der Verteilungsparameter und der Wiederkehrwerte ohne die Ergebnisse signifikant zu verändern. Diese Feststellung gilt nicht nur für die 5 Standorte, deren Daten exemplarisch ausgewertet worden, sondern kann auf alle Standorte übertragen werden.
- Die Entscheidung für oder gegen die Methoden POT und RLV kann nur willkürlich getroffen werden, denn hier gibt es hinsichtlich der Ergebnisse kaum Unterschiede – da sich aber die POT in der Klimatologie durchgesetzt haben (siehe z.B. Goldstein et. al., 2008 oder Simiu und Heckert, 1995), wird diese Methode zur Berechnung der Verteilungsparameter und Beurteilung der Schwankungsbreiten der Wiederkehrwerte benutzt.

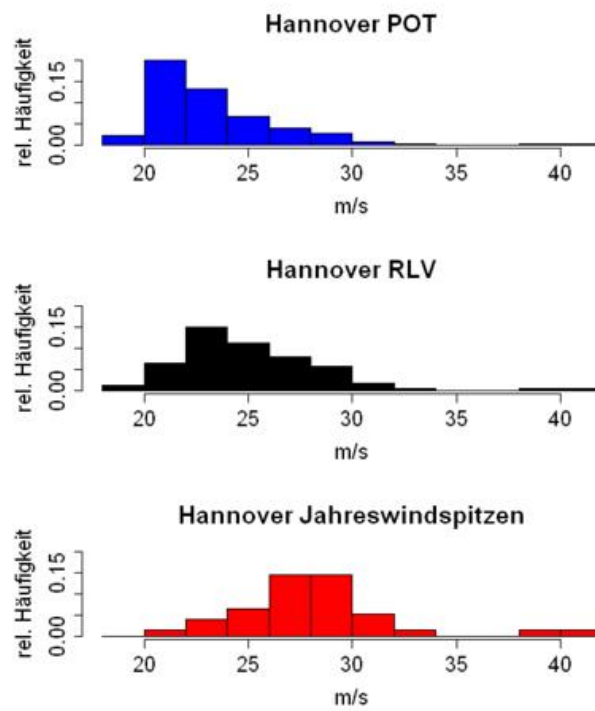


Abbildung 2-34 Vergleich der Häufigkeitsverteilungen, an die die Extremwertverteilungen angepasst wurden, Station: Hannover

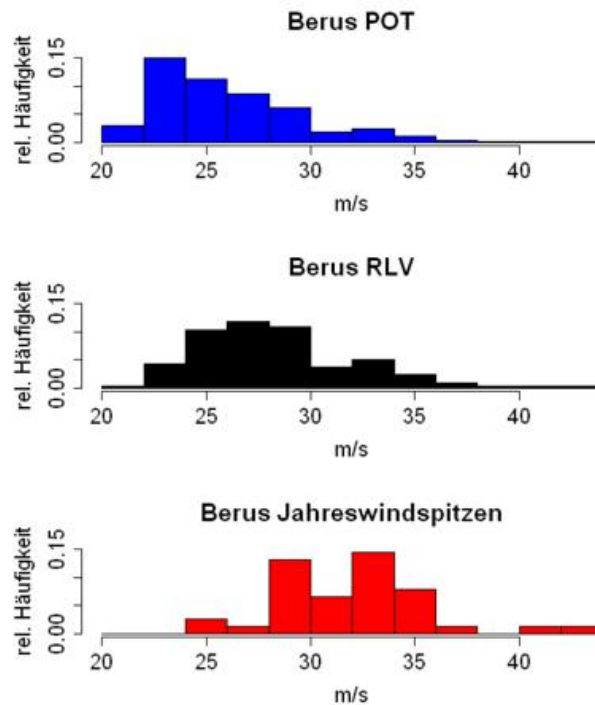


Abbildung 2-35 Vergleich der Häufigkeitsverteilungen, an die die Extremwertverteilungen angepasst wurden, Station: Berus

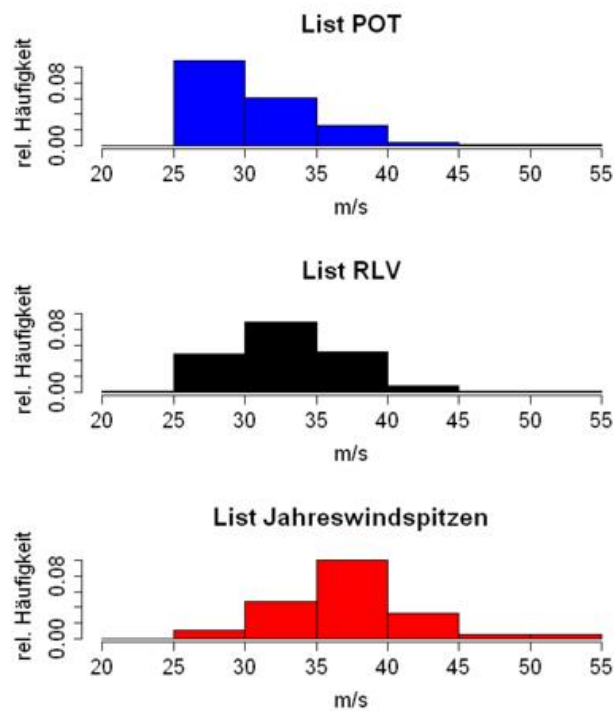


Abbildung 2-36 Vergleich der Häufigkeitsverteilungen, an die die Extremwertverteilungen angepasst wurden, Station: List auf Sylt

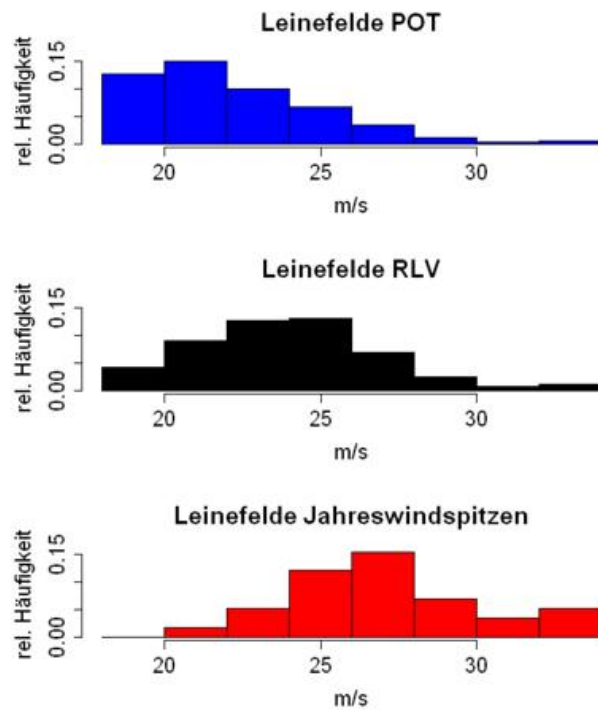


Abbildung 2-37 Vergleich der Häufigkeitsverteilungen, an die die Extremwertverteilungen angepasst wurden, Station: Leinefelde

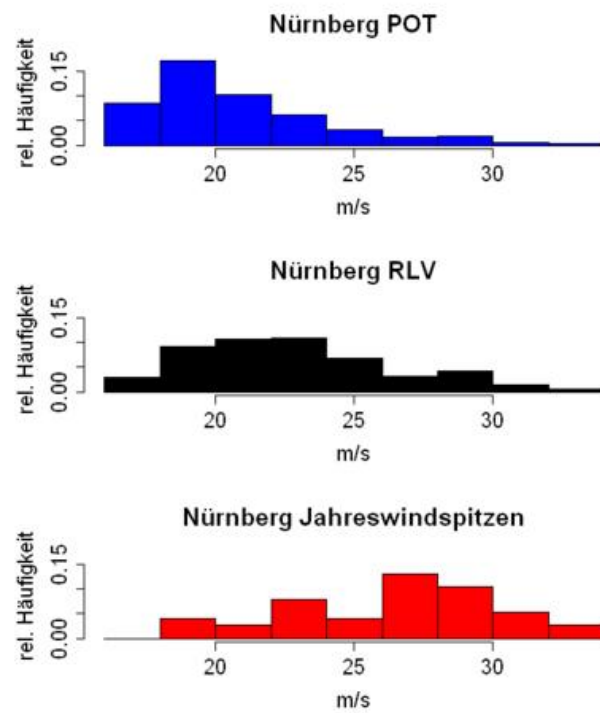


Abbildung 2-38 Vergleich der Häufigkeitsverteilungen, an die die Extremwertverteilungen angepasst wurden, Station: Nürnberg

Tabelle 2-8 Ergebnisse der Anpassung von Extremwertverteilungen an Windspitzen, Erklärungen am Ende der Tabelle

Hannover		max. Windspitze (gemessen): 41 m/s			Standardfehler															
Art	Schwelle	Zd F	Loc	Scale	Shape	Loc	Scale	Shape	MAXFF	WKW10	UG10	OG10	WKW50	UG50	OG50	WKW500	UG500	OG500		
Gumbel		38	26.5	3.031		0.518	0.374			33.3	31.2	35.5	38.3	35.0	41.7	45.4	40.4	50.3		
GEV		38	26.6	3.046	-0.022	0.545	0.381	0.095	168	33.2	31.0	35.5	38.0	33.5	42.4	44.3	34.4	54.1		
5LV	16.4	190	27.3	2.951	-0.060	0.397	0.219	0.051	77	33.5	31.7	35.3	37.5	34.3	40.8	42.6	36.5	48.7		
POT	19.7	401	27.5	2.942	-0.095	0.378	0.184	0.036	59	33.4	31.9	35.0	37.1	34.5	39.6	41.3	36.9	45.7		
UMAX										35.2	33.5	36.9	40.2	37.7	42.7	47.0	43.0	50.9		

Berus		max. Windspitze (gemessen): 43 m/s			Standardfehler															
Art	Schwelle	Zd F	Loc	Scale	Shape	Loc	Scale	Shape	MAXFF	WKW10	UG10	OG10	WKW50	UG50	OG50	WKW500	UG500	OG500		
Gumbel		38	30.3	3.371	-	0.579	0.401			37.8	35.4	40.2	43.4	39.8	47.0	51.2	45.8	56.6		
GEV		38	30.5	3.416	-0.137	0.607	0.413	0.089	55	37.1	35.2	39.0	40.8	37.6	44.1	44.8	38.7	50.9		
5LV	19.5	190	31.4	3.396	-0.145	0.462	0.233	0.055	55	37.9	36.1	39.7	41.5	38.4	44.6	45.3	40.0	50.6		
POT	21.7	398	31.7	3.364	-0.189	0.432	0.190	0.037	49	37.8	36.3	39.3	40.9	38.7	43.2	44.0	40.5	47.5		
UMAX										41.0	39.0	43.1	47.5	44.4	50.6	56.6	51.6	61.6		

List auf Sylt		max. Windspitze (gemessen): 51 m/s			Standardfehler															
Art	Schwelle	Zd F	Loc	Scale	Shape	Loc	Scale	Shape	MAXFF	WKW10	UG10	OG10	WKW50	UG50	OG50	WKW500	UG500	OG500		
Gumbel		38	35.3	3.648		0.626	0.445			43.5	40.8	46.1	49.5	45.5	53.5	57.9	52.0	63.9		
GEV		38	35.5	3.717	-0.100	0.664	0.460	0.094	73	43.0	40.7	45.2	47.5	43.4	51.5	52.7	44.5	60.8		
5LV	22.8	190	36.2	3.631	-0.144	0.491	0.231	0.045	61	43.2	41.4	45.0	47.1	44.2	49.9	51.1	46.3	55.9		
POT	26.6	385	36.3	3.545	-0.139	0.460	0.217	0.038	62	43.2	41.4	44.9	47.0	44.2	49.8	51.1	46.5	55.7		
UMAX										45.2	43.2	47.2	51.9	48.0	53.8	58.5	54.0	63.0		

Leinefelde max. Windspitze (gemessen): 33 m/s

Art	Schwelle	ZdF	Standardfehler						MAXFF	WKW10	UG10	OG10	WKW50	UG50	OG50	WKW500	UG500	OG500
			Loc	Scale	Shape	Loc	Scale	Shape										
Gumbel		29	26.0	2.339		0.458	0.331			31.2	29.3	33.2	35.1	32.2	38.0	40.5	36.1	44.9
GEV		29	26.1	2.389	-0.095	0.500	0.354	0.142	51	30.9	29.2	32.7	33.9	30.3	37.5	37.3	29.5	45.1
5LV	17	145	26.6	2.543	-0.244	0.395	0.172	0.059	37	31.0	29.8	32.2	33.0	31.2	34.9	34.8	31.9	37.6
POT	19	302	26.7	2.412	-0.245	0.356	0.139	0.041	37	30.8	29.8	31.9	32.7	31.2	34.2	34.4	32.2	36.6
UMAX										34.5	32.6	36.5	39.7	36.7	42.6	47.0	42.3	51.6

Nürnberg max. Windspitze (gemessen): 34 m/s

Art	Schwelle	ZdF	Standardfehler						MAXFF	WKW10	UG10	OG10	WKW50	UG50	OG50	WKW500	UG500	OG500
			Loc	Scale	Shape	Loc	Scale	Shape										
Gumbel		38	24.6	3.898		0.672	0.454			33.3	30.6	36.1	39.8	35.7	43.9	48.8	42.7	54.9
GEV		38	25.4	3.975	-0.433	0.701	0.515	0.098	35	31.2	30.0	32.3	32.9	31.7	34.1	34.0	32.3	35.7
5LV	14.8	190	25.6	3.038	-0.148	0.411	0.242	0.070	46	31.4	29.6	33.3	34.6	31.2	38.1	38.0	31.9	44.0
POT	17.4	416	25.7	2.954	-0.128	0.380	0.233	0.051	49	31.5	29.6	33.3	34.8	31.6	37.9	38.3	33.0	43.7
UMAX										35.0	33.0	37.0	41.3	38.2	44.4	50.8	45.7	56.0

Es bedeuten:

- Gumbel Anpassung einer Gumbel-Verteilung an die Jahreswindspitzen
- GEV Anpassung einer generalisierten Extremwertverteilung an die Jahreswindspitzen
- 5LV Anpassung einer generalisierten Extremwertverteilung an die 5 größten Windspitzen eines jeden Jahres
- POT Anpassung einer generalisierten Extremwertverteilung an die "Peaks over Threshold"
- UMAX Anpassung einer generalisierten Extremwertverteilung an die unabhängigen Tageswindspitzen
- Schwelle in der Zeile 5LV: niedrigster Wert der 5 größten Windspitzen eines jeden Jahres
- ZdF Zahl der Fälle
- Loc Location-Parameter
- MAXFF der obere Endwert der Extremwertverteilung
- WKW__ Wiederkehrwert für __ Jahre
- UG__ Untergrenze des Konfidenzbereichs für den Wiederkehrwert, berechnet für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%
- OG__ Obergrenze des Konfidenzbereichs für den Wiederkehrwert, berechnet für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%

alle Angaben – mit Ausnahme der Zahl der Fälle und des Shape-Parameters sowie seines Standardfehlers – in m/s

3 Stationsauswahl

Für die Regressionsanalyse zur Bestimmung von Gleichungen, mit denen Gitterpunktwerte der Verteilungsparameter oder der Wiederkehrwerte berechnet werden können, benötigt man ein möglichst dichtes Netz von Stationen sowie möglichst lange Beobachtungsreihen. Die Tageswindspitzen, die an diesen Stationen gemessen werden, müssen aus einem einheitlichen Zeitraum stammen, damit sie vergleichbar sind. In den alten Bundesländern sind die Messstationen ab Ende der 1960er Jahre mit Registriergeräten ausgerüstet worden, die die Bestimmung von Tageswindspitzen erlauben. In den neuen Ländern beginnen die Beobachtungsreihen der Tageswindspitzen ab 1973. Für die Auswertung wurden deshalb die Jahre 1971 bis 2008 gewählt.

Die Auswahl der Stationen erfolgte in drei Schritten:

1. Im ersten Schritt wurden alle Stationen ermittelt, die im Zeitraum 1971 bis 2008 mindestens 25 Beobachtungsjahre ausweisen. Diese Stationsauswahl ist in der Abbildung 3-1 zu sehen. Es handelt sich um 163 Stationen.
2. Im zweiten Schritt wurden die Reihen der Jahresmaxima dieser Stationen mit drei absoluten Tests auf Homogenität geprüft. Jede Reihe, die von 2 dieser 3 Tests als inhomogen ausgewiesen wurde, wurde als inhomogen klassifiziert. Die Stationen mit inhomogenen Reihen sind in der Abbildung 3-2 zu sehen. Zu diesen Stationen gehören auch die windstärksten Stationen des DWD, der Brocken, die Zugspitze und der Wendelstein. An diesen Stationen ist die Messhöhe über Grund im fraglichen Zeitraum stark verändert worden. Insgesamt weisen 25 der 163 Stationen inhomogene Reihen auf. Bei der Bestimmung der Gleichungen zur Berechnung der Gitterpunktwerte kann man nicht auf die besonders windstarken Stationen verzichten. Daher sind von diesen 25 Stationen nur 19 ausgemustert worden: Neben den drei oben genannten Stationen blieben Sonneberg-Neufang, die Schmücke und Memmingen in der Auswertung.
3. Im dritten Schritt sind die Tageswindspitzen der Stationen auf fehlende Werte untersucht worden: Jahre, in denen zu viele Tageswerte fehlen, können hinsichtlich der größten Windspitzen nicht ausgewertet werden, weil man nicht weiß (und – wegen des enormen Aufwands – auch nicht prüfen kann), ob die Beobachtungslücken in Zeiten mit Sturmereignissen fallen. Ein brauchbares Beobachtungsjahr muss mindestens 330 Tageswerte aufweisen und jede Station, deren Daten in die Auswertung eingehen, mindestens 25 dieser Jahre. Nach diesem Schritt blieben 130 Stationen für die weiteren Auswertungen, die in der Abbildung 3-3 eingetragen sind. Hier ist zu jedem Stationspunkt die Höhe des Windgebers über Grund (in m) eingetragen.

Die Höhen über Grund, in denen die Windspitzen gemessen werden, schwanken zwischen 8 und 45 Metern. Daten, die in unterschiedlichen Höhen gemessen werden, lassen sich nur schlecht vergleichen, weil die Rauigkeit der Erdoberfläche in der Umgebung der Messstation einen starken Einfluss auf die Messungen hat, der mit zunehmender Höhe rasch abnimmt. Zur Angabe einer Windgeschwindigkeit gehört daher auch immer die Höhe über Grund, für die diese Geschwindigkeit gilt. So weist das SWM Windgeschwindigkeiten für 10 m über Grund aus.

Der Abbildung 3-3 kann man entnehmen, dass die Windmessungen an den Stationen in den neuen Bundesländern meist in Höhen von mehr als 15 m vorgenommen werden, während in den alten Bundesländern meist in der Standardhöhe von 10 m über Grund gemessen wird. Da man die Tageswindspitzen nicht auf ein einheitliches Niveau umrechnen kann, stellen diese Unterschiede für die nachfolgenden Auswertungen ein Problem dar: Betrachtet man nur diejenigen Stationen, die in Höhen bis 15 m messen (das sind 72% aller Stationen), dann vernachlässigt man die meisten Stationen in den neuen Ländern und etwa die Hälfte aller Stationen an der Küste und in Kuppenlagen. Deshalb werden zunächst Auswertungen über alle Geberhöhen gemacht und die Ergebnisse mit denen verglichen, die man für Geberhöhen von 10 bis 15 m über Grund erhält. Anhand dieser Auswertungen wird dann entschieden, ob man die Stationen mit den unterschiedlichen Geberhöhen zusammenfassen kann oder nicht (siehe dazu 4.6).

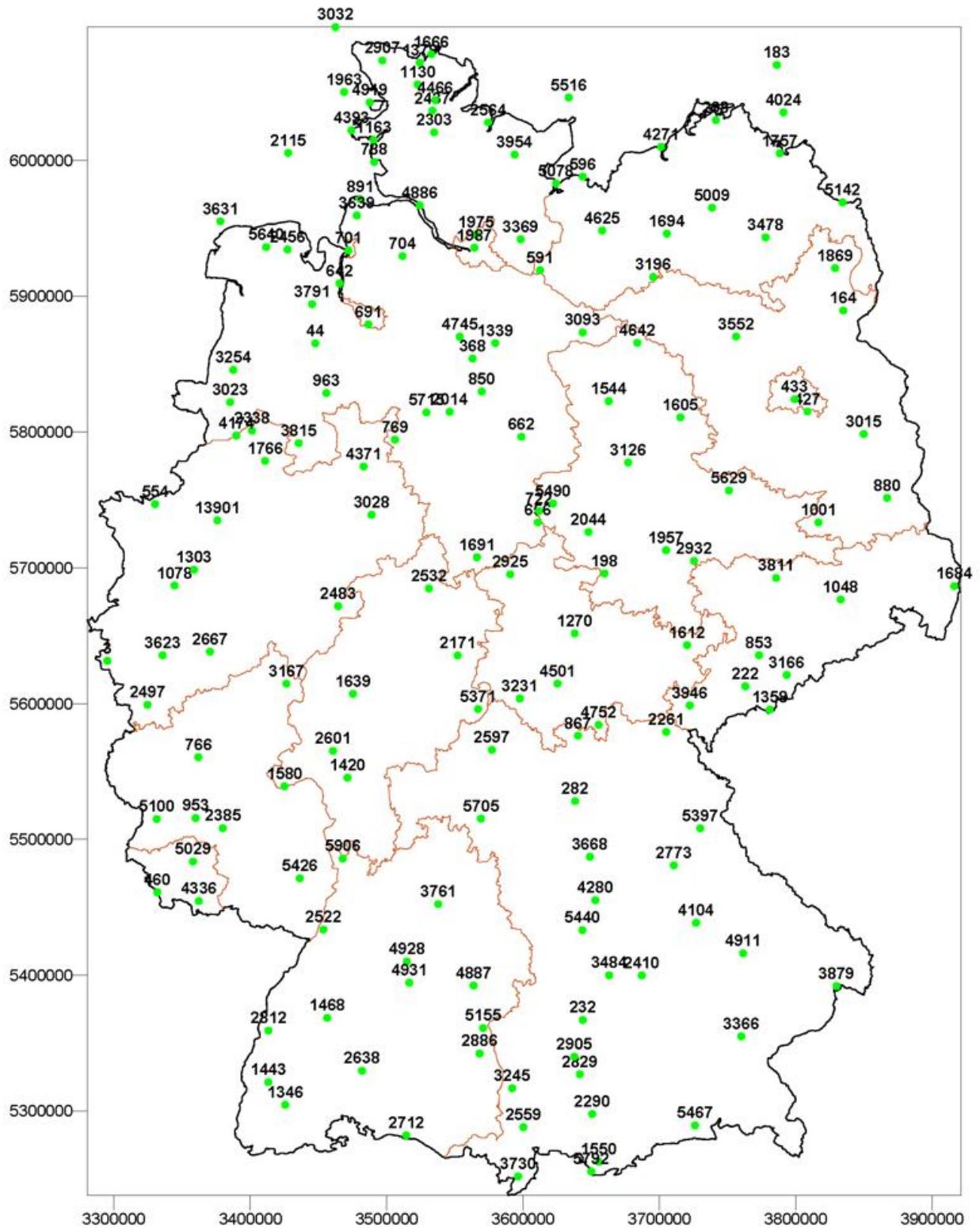


Abbildung 3-1 Windmessstationen mit mindestens 25 Beobachtungsjahren im Zeitraum 1971 bis 2008, Eintragungswert: Stations-ID

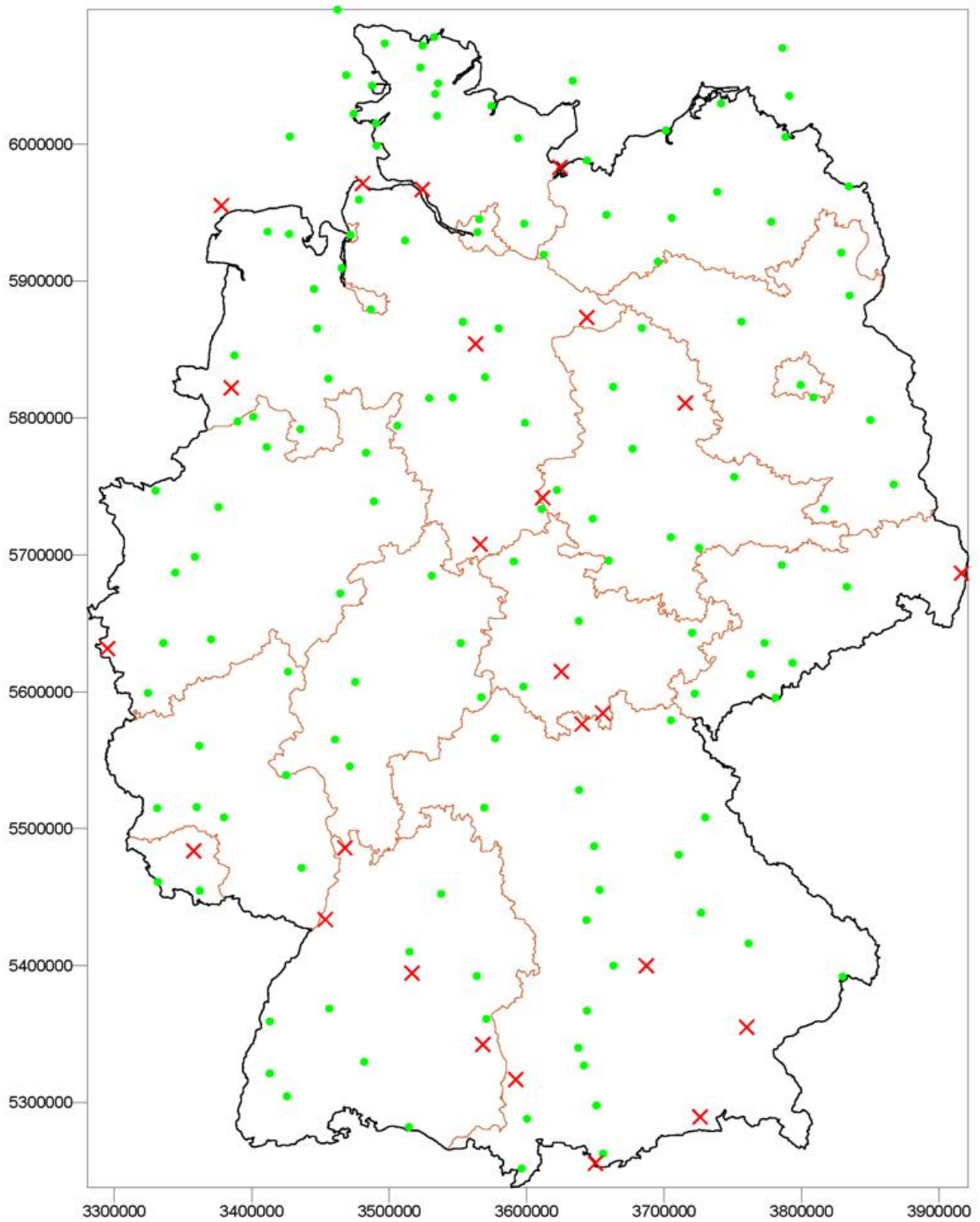


Abbildung 3-2 Windmessstationen mit inhomogenen Reihen (rotes Kreuz)

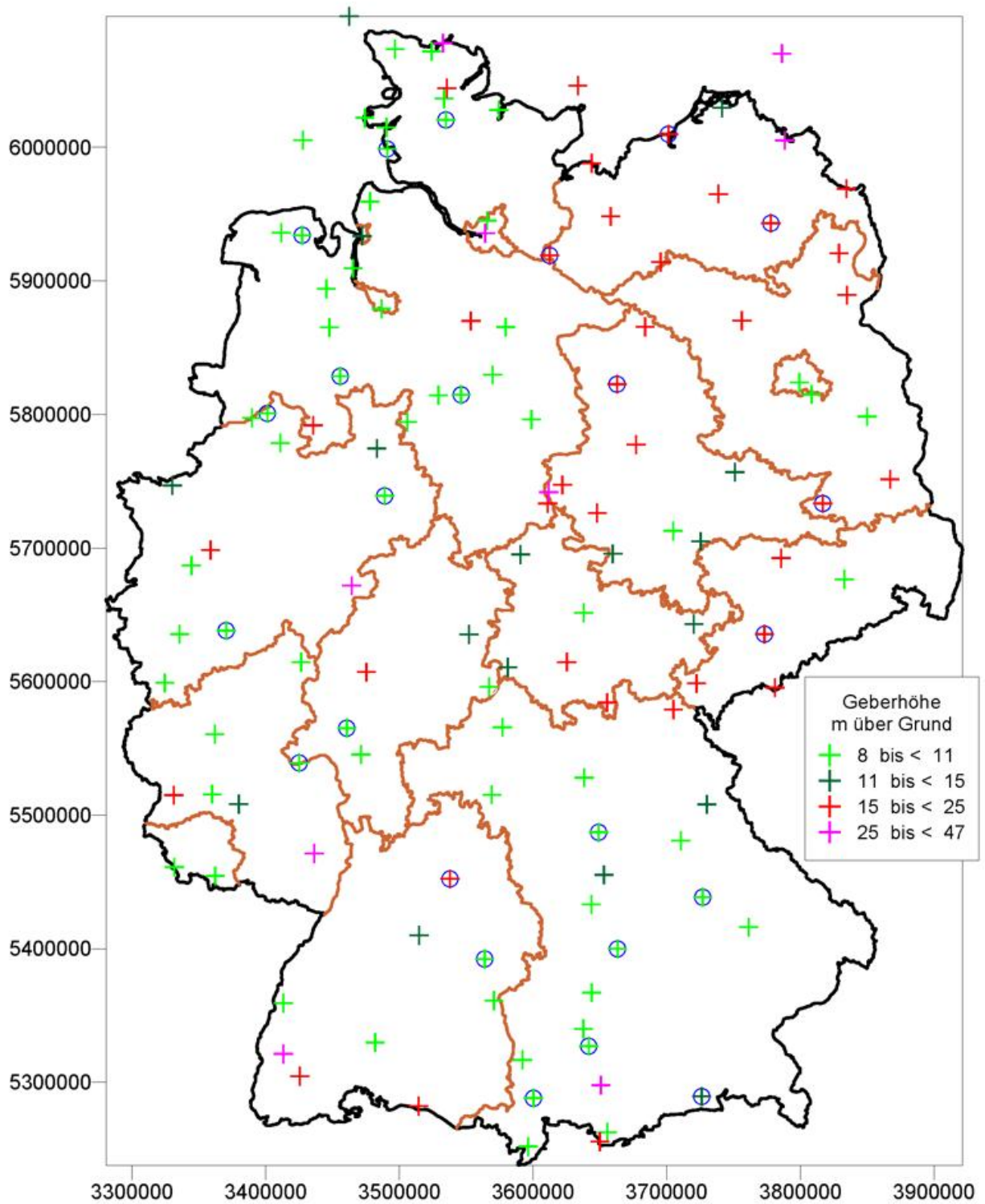


Abbildung 3-3 Geberhöhen aller Windmessstationen in Meter über Grund

blau eingekreist: Überprüfungsstationen (siehe Kapitel 5)

Für die Regressionsrechnungen (siehe Kapitel 5) benötigt man Daten, mit denen man die Ergebnisse überprüfen kann. Die Stationen, deren Daten zur Überprüfung herangezogen werden, sind in der Abbildung 3-3 blau eingekreist. Die Auswahl dieser Stationen erfolgte manuell unter dem Gesichtspunkt, dass diese Stationen die verschiedenen Regionen und Geländeformen so gut wie möglich abdecken.

4 Extremwindklima

An die POT der 130 Stationen aus der Abbildung 3-3 wurden GEV angepasst. Als Schwellenwert wurde der 90%-Wert der Summenhäufigkeitsverteilung der unabhängigen Tageswindspitzen benutzt. Bei dieser Anpassung sind auch Windspitzen für Wiederkehrzeiten von 10, 50 und 500 Jahren mit Konfidenzbereichen berechnet worden. Für Stationen, deren Konfidenzbereiche auffällig breit waren (breiter als 10 m/s für eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren) wurden die Ergebnisse der Anpassung überprüft und der Schwellenwert ggf. verändert.

Im Folgenden wird das Extremwindklima in Deutschland anhand der Verteilungsparameter dieser GEV sowie der Wiederkehrwerte, die sich daraus errechnen, beschrieben.

4.1 Location-Parameter

Der Location-Parameter ist die Windgeschwindigkeit, mit deren Überschreitung man in jedem zweiten Jahr rechnen muss. Dieser Parameter gibt – wie auch die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit – Auskunft darüber, wie windstark ein Standort ist. Die berechneten Werte schwanken zwischen 17 und 54 m/s, der Mittelwert beträgt 29 m/s. Die Abbildung 4-1 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Parameters. Sie hat ein deutlich ausgeprägtes Maximum bei 26 bis 28 m/s – dieser Wert ist für Stationen in der Ebene typisch (siehe Abbildung 4-2). Die kleinsten Werte (kleiner als 20 m/s) werden nur für Standorte in den Alpentälern berechnet, die größten (oberhalb von 35 m/s) nur an der Nordsee und auf Berggipfeln.

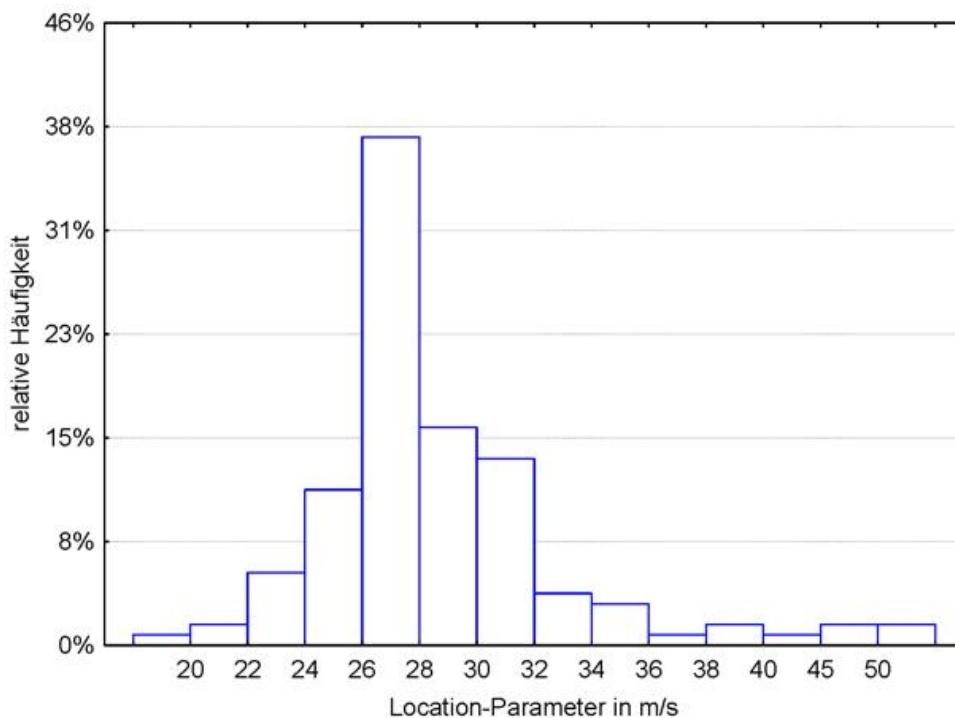


Abbildung 4-1 Verteilung der Location-Parameter

Der mittlere Standardfehler der Location-Parameter liegt bei 0.4 m/s – damit haben die Konfidenzbereiche, berechnet für eine Sicherheit von 95%, für diese Größe eine Breite von etwa \pm

0.8 m/s. Dementsprechend gibt es sehr signifikante Unterschiede hinsichtlich dieses Parameters innerhalb Deutschlands.

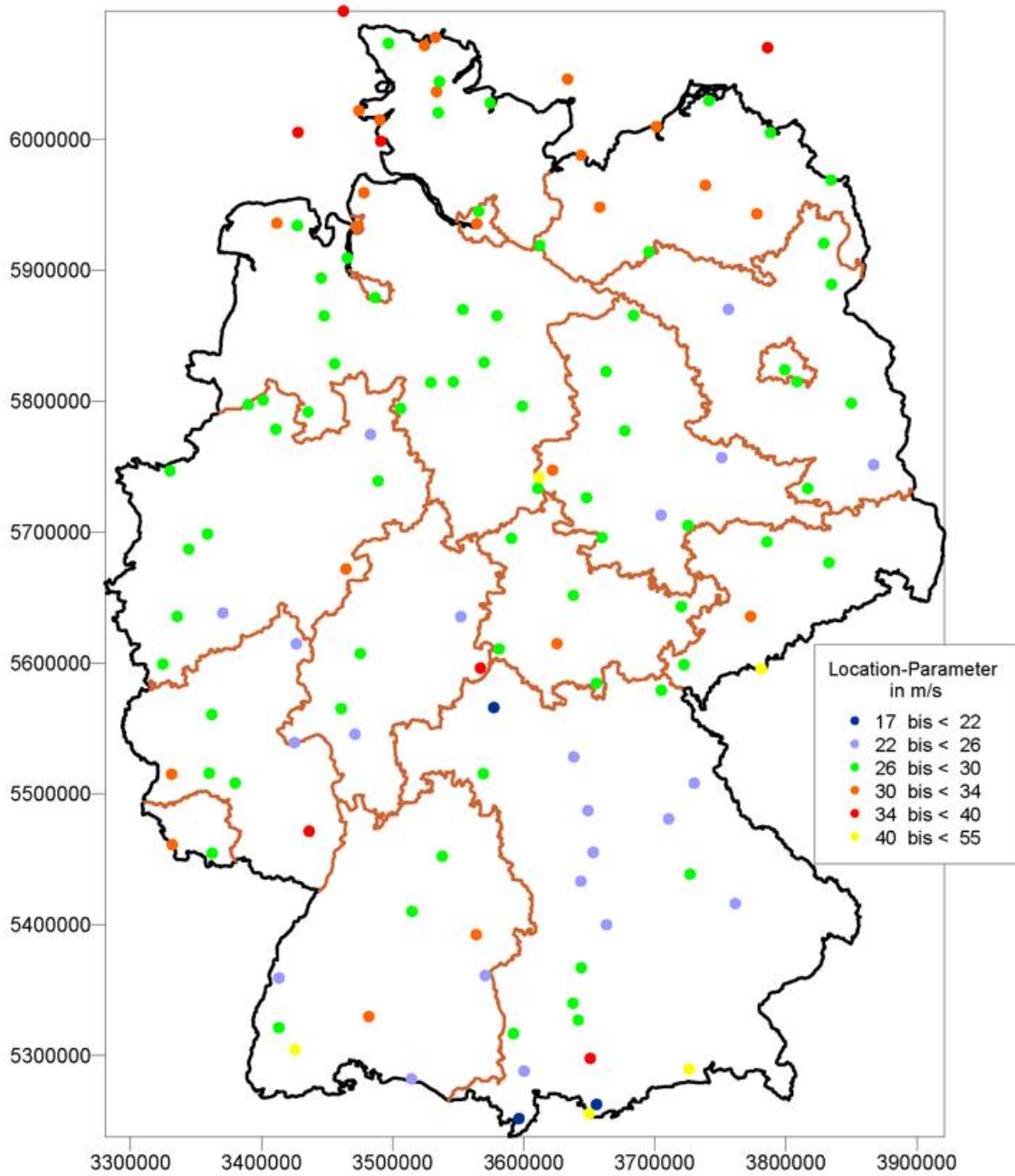


Abbildung 4-2 Location-Parameter

4.2 Scale-Parameter

Die Scale-Parameter bewegen sich zwischen 2.2 und 5.1 m/s, der Mittelwert beträgt 3.1 m/s. Die mittlere Breite des Konfidenzbereichs liegt für diesen Parameter bei ± 0.5 m/s – damit gibt, das kann man der Häufigkeitsverteilung entnehmen (Abbildung 4-3), viele Standorte, deren Scale-Parameter sich nicht signifikant unterscheiden.

Besonders kleine Werte dieses Parameters finden sich an den wind schwachen Standorten, große Werte vor allem auf Kuppen, denn es gibt eine – allerdings nur schwach ausgeprägte – Korrelation der Scale- und Location-Parameter eines Standortes

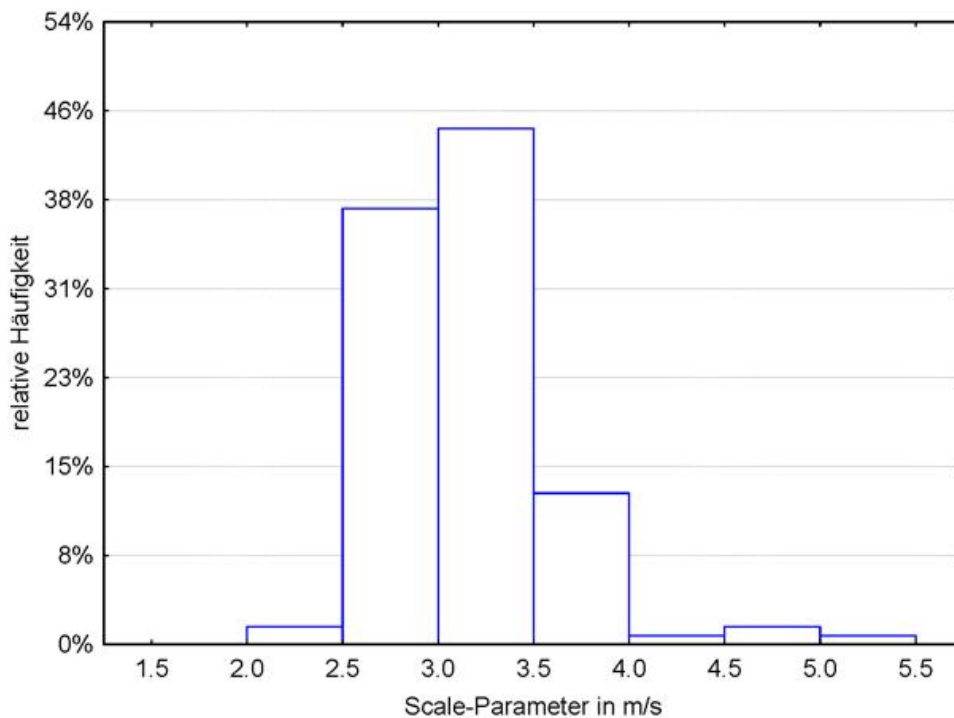


Abbildung 4-3 Häufigkeitsverteilung des Scale-Parameters

4.3 Shape-Parameter

Die Häufigkeitsverteilung der Shape-Parameter ist der der Scale-Parameter sehr ähnlich – jetzt sind allerdings kleine Werte an windstarken Standorten zu finden und große an wind schwachen. Allerdings gilt auch für diesen Parameter, dessen Werte zwischen -0.26 und 0.12 liegen, dass es nur wenig signifikante Unterschiede gibt, denn die Konfidenzbereiche der Shape-Parameter haben eine Breite von ± 0.10 .

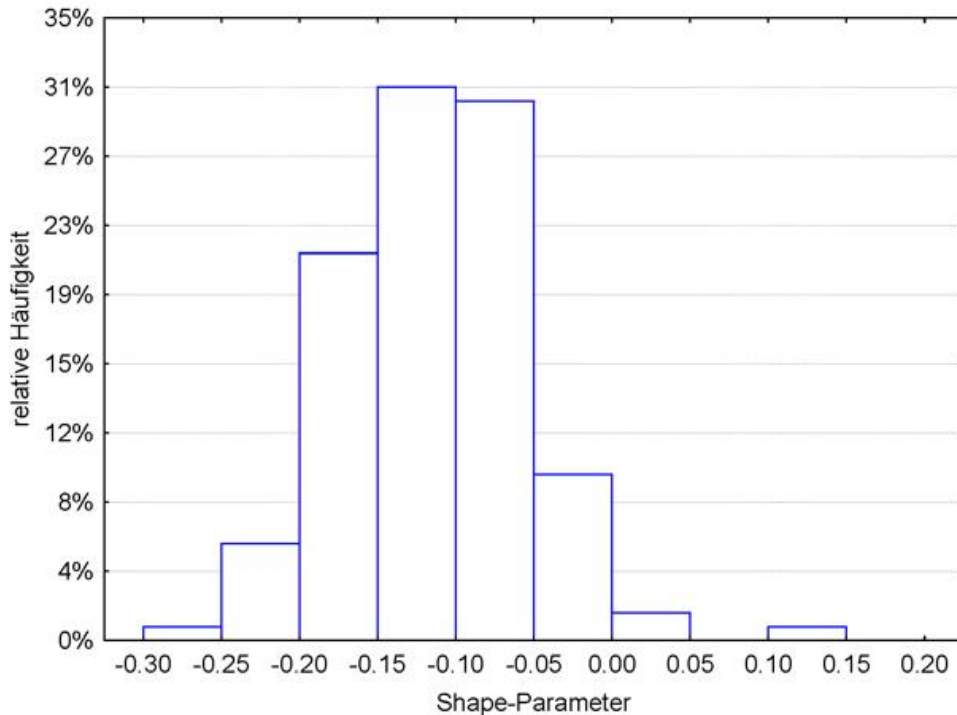


Abbildung 4-4 Häufigkeitsverteilung der Shape-Parameter

4.4 Clusteranalyse

Mithilfe der Clusteranalyse kann man die Stationen in Gruppen (Cluster) mit ähnlichen Verteilungsparametern unterteilen. Dieses explorative Verfahren ist sehr nützlich, um einen qualitativen Eindruck vom Zusammenspiel der Parameter der GEV zu erhalten und von der räumlichen Anordnung der Stationen, die sich hinsichtlich aller 3 Parameter unterscheiden. Zunächst wurde anhand eines Dendrogramms die Zahl der Cluster bestimmt: Die beste Abgrenzung der Stationen anhand der Verteilungsparameter erhält man für 4 Cluster. Danach wurden mit dem Verfahren "k-means-clusterung" 4 Gruppen von Stationen gebildet. Dabei unterscheiden sich die Stationen innerhalb einer Gruppe möglichst wenig und die Gruppen voneinander möglichst stark.

Das Ergebnis dieser Analyse ist in der Abbildung 4-5 zu sehen. Man muss die Parameter alle auf den Bereich 0 bis 1 normieren, um vernünftige Ergebnisse zu bekommen. Daher sind als Variablennamen auch N_LOC, N_SCALE und N_SHAPE angegeben.

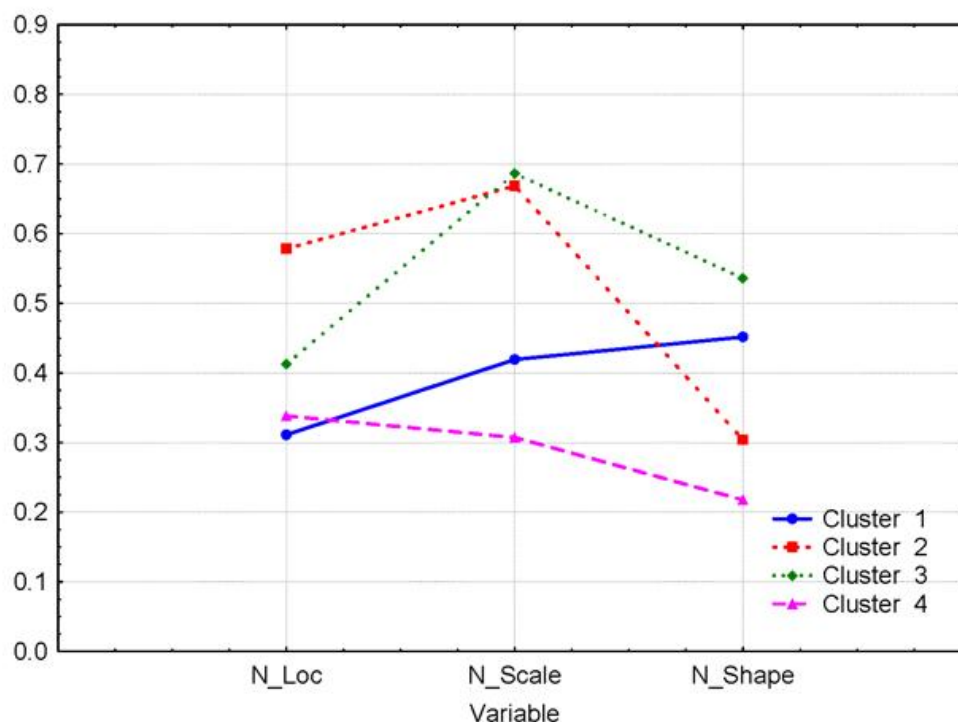


Abbildung 4-5 Clustermittelwerte für die genormten Parameter der GEV

Rechnet man die normierten Mittelwerte zurück, dann ergeben sich für die 4 Cluster folgende Verteilungsparameter:

Tabelle 4-1 Ergebnisse der Clusteranalyse

Cluster	Stationen	Location (m/s)	Scale(m/s)	Shape
1	43	26.1	2.98	-0.087
2	23	33.8	3.48	-0.144
3	28	29.0	3.48	-0.054
4	29	27.0	2.75	-0.177

In der Tabelle 4-1 sind nur 123 Stationen aufgeführt, weil bei der Clusteranalyse alle Stationen mit inhomogenen Reihen ausgeschlossen wurden.

Die Abbildung 4-6 zeigt die Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit für die vier Cluster.

Im Cluster 4 (magenta) sind diejenigen Stationen versammelt, die die kleinsten Wiederkehrwerte haben. Das ergibt sich aus den kleinen Werten für den Scale und den Shape. Das Cluster 1, blau dargestellt, umfasst die meisten Stationen. Hier sind die Wiederkehrwerte, die im Mittel einmal in 10 Jahren auftreten, zwar etwas kleiner als für das Cluster 4, mit zunehmender Wiederkehrzeit steigen sie dann aber viel stärker an. Der obere Endwert dieser Verteilung entspricht schließlich dem der roten Kurve. Diese gehört zu den Parametern für das Cluster 2. Die GEV für das Cluster 3 hat denselben Scale wie die des Cluster 2, aber einen kleineren Location- und einen größeren Shape-Parameter. Hier kann man gut sehen, wie der Shape-Parameter

mit zunehmender Wiederkehrzeit die Wiederkehrwerte beeinflusst: Sie steigen deutlich schneller an als für die Standorte mit dem größeren Location-Parameter, sodass an diesen Stationen in ganz seltenen Fällen (im Mittel einmal in 1000 Jahren oder seltener) mit höheren Wiederkehrwerten gerechnet werden muss.

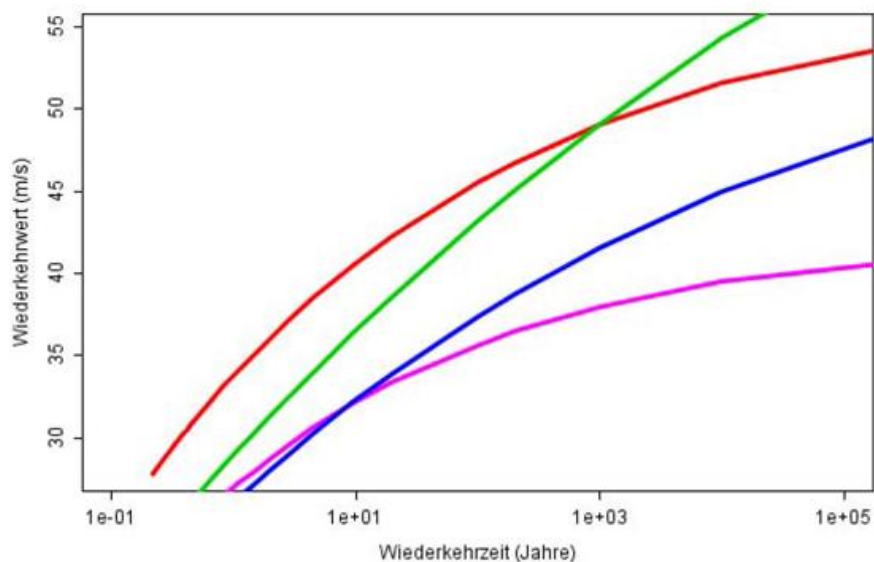


Abbildung 4-6 Wiederkehrwerte für Cluster 1 (blau), Cluster 2 (rot), Cluster 3 (grün) und Cluster 4 (magenta)

Die Abbildung 4-7 zeigt schließlich die räumliche Verteilung der Stationen in den einzelnen Clustern. Hier kann man sehr schön erkennen, dass diese Einteilung klimatologisch Sinn macht: Die windstarken Standorte an der Küste sind im Cluster 2 versammelt. Die Stationen, die etwas weiter von der Küste entfernt sind, finden sich im Cluster 3. Je weiter man nach Süden kommt, desto eher sind diese Stationen in höheren Lagen zu finden.

Die Anzahl von Stationen mit kleinen Wiederkehrwerten nimmt von West nach Ost zu. Die Stationen in den Tälern, die durch besonders kleine Location-Parameter auffallen, gehören wegen ihrer durchweg größeren Shape-Parameter jedoch nicht zu dieser Gruppe, sie finden sich im Cluster 1, allerdings ganz an seinem Rand.

Es gibt einige Stationen, deren Clusterzugehörigkeit darauf hindeutet, dass ihre Messungen nicht repräsentativ für ihren Standort sind. Dazu gehören Warnemünde und Barth, die für ihre Lage an der Küste bzw. in Küstennähe zu kleine GEV-Parameter haben. Auch Artern und Kümmersbrück, die beide auf Kuppen liegen, fallen auf, da sie beide in das Cluster 4 gefallen sind. Die einzige Station südlich von RW 585000 in Cluster 2, die nicht auf einer Kuppe liegt, ist Wunstorf. Sie scheint für ihren Standort zu große Windspitzen zu haben. Insgesamt soll man das Ergebnis einer Clusteranalyse aber auch nicht überbewerten – es zeigt immerhin, dass sich die Parameter der GEV zur Beschreibung des Sturmklimas eignen. In die weiteren Auswertungen gehen die Ergebnisse dieser Analyse nicht ein.

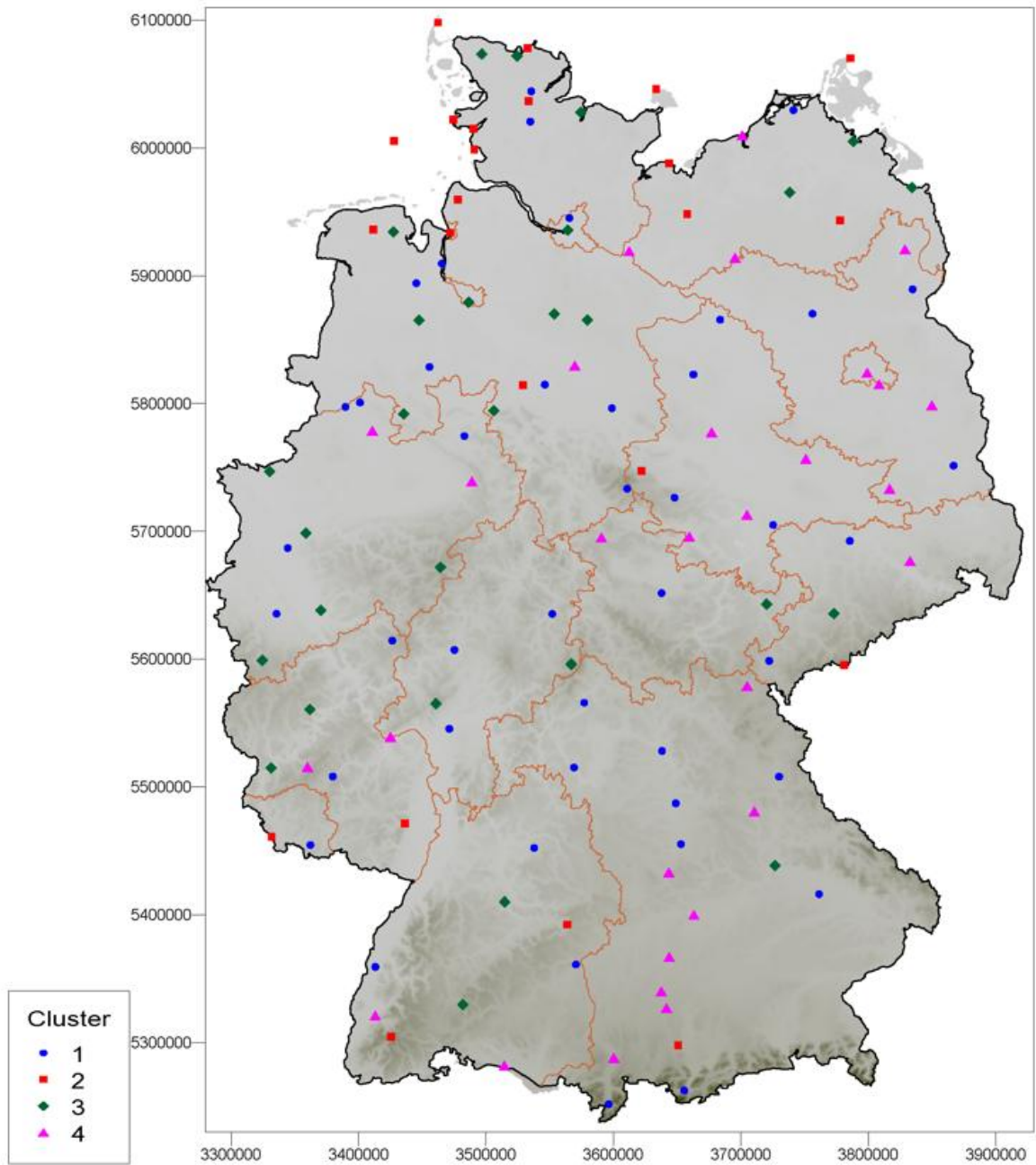


Abbildung 4-7 Clustereinteilung der Windmessstationen, Unterdruck: Höhe über NN

4.5 Wiederkehrwerte

In der Tabelle 4-2 sind einige statistische Kennwerte für Windspitzen mit mittleren Wiederkehrzeiten von 10, 50 und 500 Jahren aufgeführt:

Tabelle 4-2 Statistische Kennwerte, berechnet aus den Wiederkehrwerten von 130 Stationen

Wiederkehrzeit	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum
10 Jahre	35.2	34.0	24.2	63.1
50 Jahre	38.9	37.6	29.8	67.2
500 Jahre	43.1	41.8	31.6	70.9
Differenz WKW50 – WKW10	3.7	3.6	1.9	6.7
Differenz WKW500 – WKW50	4.2	4.0	1.4	11.2

alle Angaben in m/s

Die folgende Abbildung zeigt – stellvertretend für die drei Wiederkehrzeiten – die Häufigkeitsverteilung der Windspitzen für eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren:

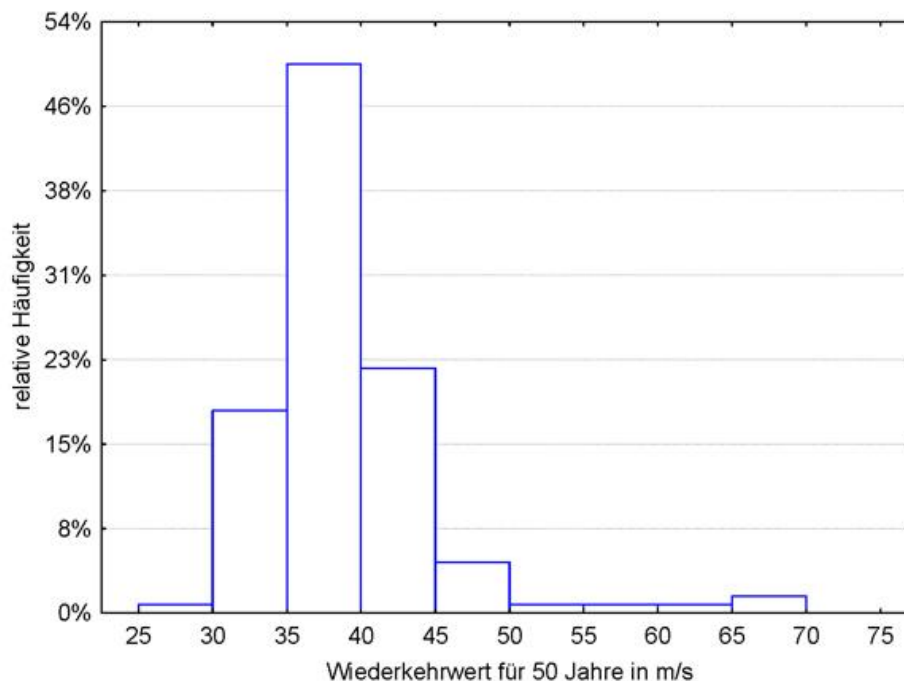


Abbildung 4-8 Häufigkeitsverteilung der Windspitzen mit einer mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit von 1/50 Jahren

An der Hälfte der 130 Stationen, deren Daten hier betrachtet werden, liegt der Wiederkehrwert für 50 Jahre zwischen 35 und 40 m/s, dabei schwanken diese Werte – das kann man entnehmen – zwischen 30 und 67 m/s. Im Vergleich zur Schwankungsbreite eines Wiederkehrwertes innerhalb Deutschlands sind die Unterschiede für die drei Wiederkehrzeiten nur gering:

Zwischen den Wiederkehrwerten für 50 und 10 Jahre liegen im Mittel nur 3.7 m/s, für die Wiederkehrzeiten von 500 und 50 Jahren sind es 4.2 m/s.

In der Abbildung 4-9 sind die Wiederkehrwerte für 50 Jahre und die größten Windspitzen aus dem Zeitraum 1971 bis 2008 zu sehen. Bei vielen Stationen ist die größte Jahreswindspitze größer als der Wiederkehrwert. Das trifft insbesondere für die windstärkeren Stationen zu.

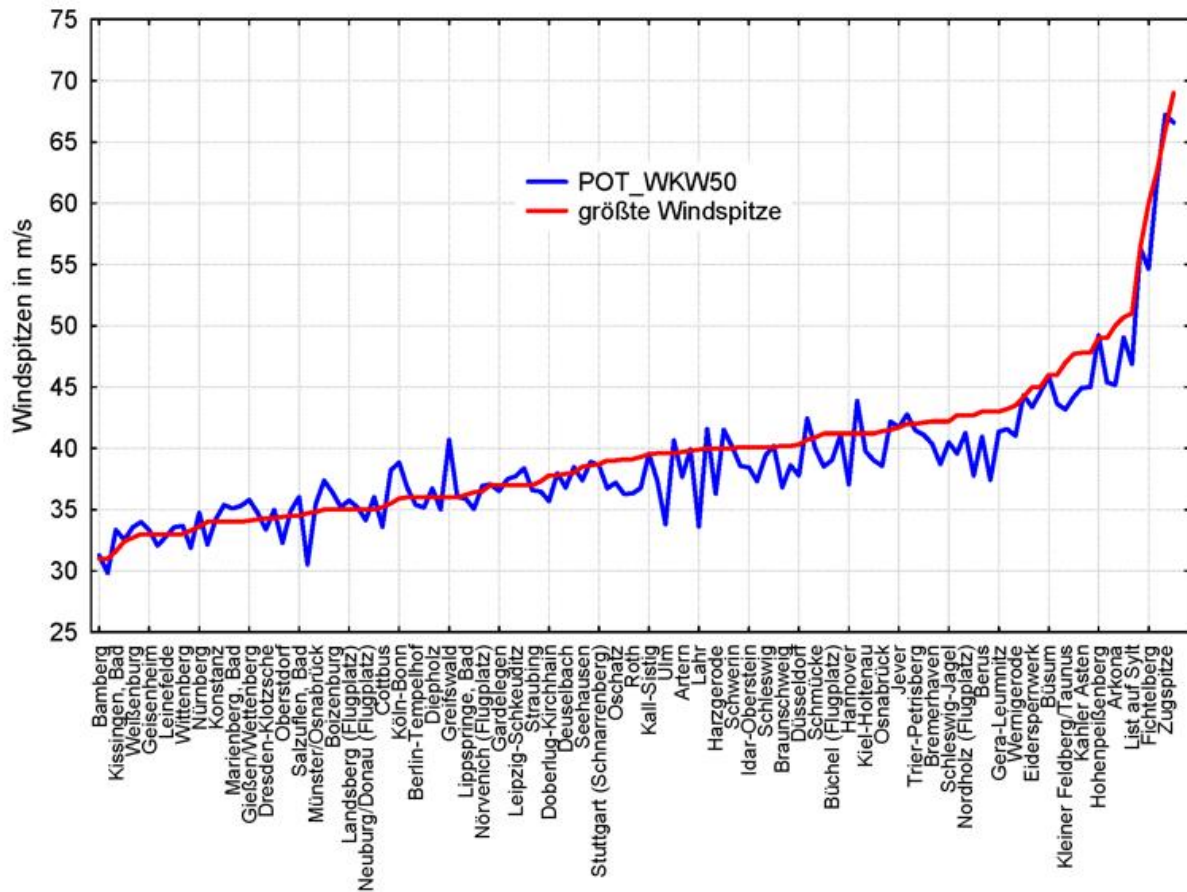


Abbildung 4-9 Wiederkehrwerte für 50 Jahre (berechnet aus den POT) sowie die größte Jahreswindspitze für 130 Stationen, sortiert nach der maximalen Jahreswindspitze

Die Abbildung 4-10 zeigt die größten Jahreswindspitzen zusammen mit Wiederkehrwerten, die anhand der Verteilung der Jahreswindspitzen (und nicht der POT) errechnet wurden, und zwar zum einen aus einer GEV und zum anderen aus einer Gumbel-Verteilung. Hier zeigt sich, dass aus einer Gumbel-Verteilung deutlich größere Wiederkehrwerte resultieren, wenn der Standort windschwach ist – und in diesen Fällen, das hat die exemplarische Auswertung gezeigt, passt die Gumbel-Verteilung nur schlecht zu den Daten. Die Abbildung zeigt zudem, dass es auch dann Messwerte oberhalb des für 50 Jahre berechneten Wiederkehrwertes gibt, wenn man diese anhand der Jahreswindspitzen und nicht anhand der POT berechnet – die Einschätzung, dass es im Zeitraum 1971 bis 2008 Stürme gegeben hat, mit denen man im Mittel nur einmal in mehr als 50 Jahren rechnen muss, ist also nicht allein ein Ergebnis der Verwendung der POT. Man darf aber nicht vergessen, dass hier nur die Wiederkehrwerte – ohne die zugehörigen Konfidenzbereiche – dargestellt wurden. In der Abbildung 4-11 sind die Grenzen dieser Konfidenzbereiche zusammen mit den größten Windspitzen, die an den 130 Standorten beobachtet wurden, zu sehen: Maximale Windspitzen, die diese Grenzen sprengen, gibt es kaum.

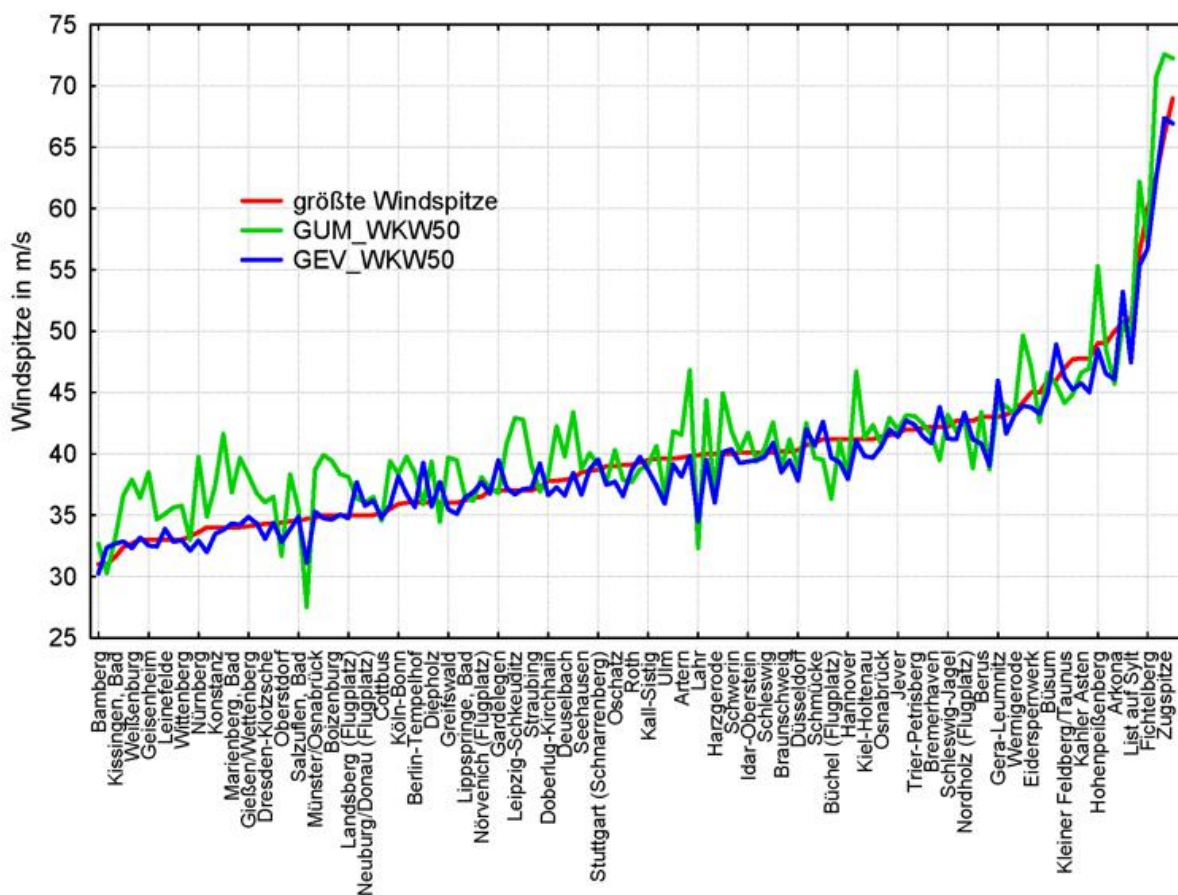


Abbildung 4-10 Wie Abbildung 4-9, aber Anpassung der Verteilung an die Jahreswindspitzen
 GUM: Gumbel-Verteilung, GEV: generalisierte Extremwertverteilung

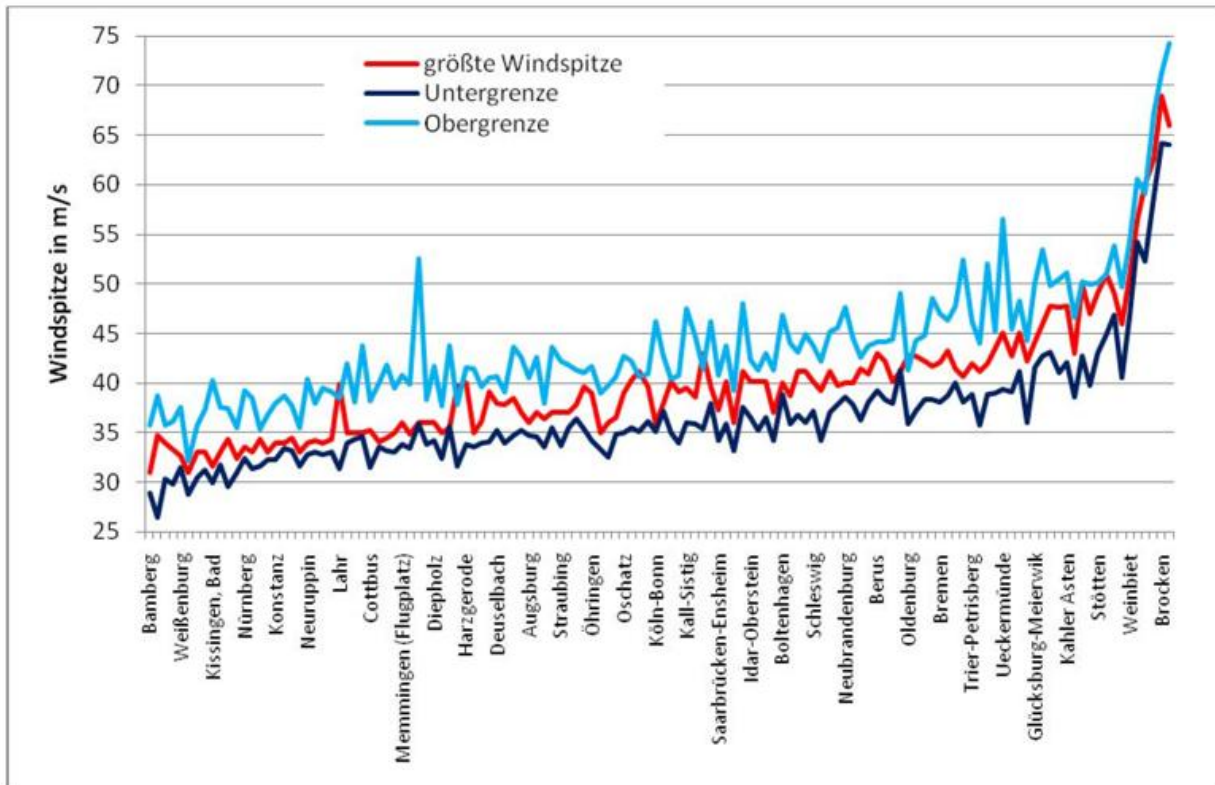


Abbildung 4-11 Größte Windspitze und Konfidenzbereich der Wiederkehrwerte für 50 Jahre, berechnet aus den POT für eine Sicherheit von 95%

4.6 Einfluss der Geberhöhen

Die bisher angegebenen Werte sind mit allen Stationsdaten – ungeachtet der Höhe ihrer Windgeber – berechnet worden. Vor der Bestimmung von Regressionsgleichungen zur Berechnung von Gitterpunktswerten muss man aber untersuchen, ob die Ergebnisse durch die Höhe der Windgeber beeinflusst werden. Neben dieser Höhe hat aber auch die Geländeform einen Einfluss auf die Windmessungen. Deshalb werden die Betrachtungen in Abhängigkeit von der Geländeform angestellt. Die Ergebnisse sollen nicht durch die Daten inhomogener Reihen verfälscht werden. Wie bei der Clusteranalyse sind diese Reihen daher hier ausgeschlossen worden.

Die Werte in der Tabelle 4-3 zeigen, dass die Geberhöhen für die Stationen in der Ebene keinen großen Einfluss auf die Mittelwerte und Standardabweichungen der Verteilungsparameter haben. An den Stationen in Tallage gibt es nur Geberhöhen bis 15 m – hier kann es also keine Unterschiede geben – und auch an der Küste, wo die Geberhöhen zwischen 10 und 32 m variieren, ändern sich die Mittelwerte für kleinere Geberhöhen kaum, der Location-Parameter ist hier für die Stationen mit geringerer Geberhöhe sogar größer als für alle Stationen. Der Anteil von Stationen mit Geberhöhen bis 15 m ist für die Stationen, die auf Kuppen liegen, zwar etwas kleiner als für die Küstenstationen, dennoch sind hier die Unterschiede bei den Parametern am größten und die deutlich größere Standardabweichung des Location-Parameters für alle Stationen zeigt, dass die Daten für alle Stationen in Kuppenlage wesentlich heterogener sind. Das liegt allerdings weniger an den unterschiedlichen Geberhöhen als vielmehr daran, dass die Stationen mit den großen Geberhöhen auch die Stationen sind, die die größten Höhen über NN

aufweisen: Die Stationen auf dem Feldberg im Schwarzwald (1490 m über NN), auf dem Fichtelberg (1213 m über NN) und die Station Hohenpeißenberg (977 m über NN) messen in mehr als 15 m über Grund. Bezüglich der Mittelwerte ist eine Differenzierung der Stationen nach ihrer Geberhöhe also nicht nötig.

Tabelle 4-3 Mittelwerte und Standardabweichungen STD der Verteilungsparameter für die verschiedenen Geländeformen und unterschiedliche Geberhöhen

Geländeform	ZdF	Location		Scale		Shape	
		Mittelwert	STD	Mittelwert	STD	Mittelwert	STD
Ebene	90	27.4	1.85	3.06	0.317	-0.112	0.062
Tal	6	22.6	3.10	2.79	0.130	-0.030	0.088
Kuppe	16	33.0	5.81	3.53	0.349	-0.120	0.061
Küste	11	32.9	1.86	3.28	0.206	-0.136	0.038
nur Geberhöhen von 10 bis 15 m über Grund							
Ebene	65	27.3	1.86	3.06	0.288	-0.111	0.062
Tal	6	22.6	3.10	2.79	0.130	-0.030	0.088
Kuppe	11	29.9	2.88	3.44	0.347	-0.108	0.060
Küste	6	33.7	1.74	3.30	0.202	-0.135	0.029

Für die Berechnung von Gitterpunktweiten nutzt man Zusammenhänge zwischen den Verteilungsparametern und Größen, für die bereits Gitterpunktweite vorliegen. Das sind neben der Höhe über NN, der Rauigkeitslänge und der Geländeform vor allem die Informationen aus dem SWM zu den Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeit: Die mittlere Windgeschwindigkeit sowie die Parameter der Weibull-Verteilungen dieser Werte. Man muss also auch überprüfen, ob die Geberhöhe einen Einfluss auf diese Zusammenhänge hat.

Der Location-Parameter korreliert mit der mittleren Windgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 4-12 in Abhängigkeit von der Geländeform und der Geberhöhe dargestellt. Beide Merkmale haben keinen erkennbaren Einfluss auf den Zusammenhang. Es sind lediglich einige Ausreißer zu erkennen. Die drei Datenpunkte oben rechts, die deutlich oberhalb der Regressionsgeraden liegen, gehören zu Stationen auf Kuppen: Ganz oben ist der Wert für den Feldberg im Schwarzwald zu sehen, der Station mit der größten Höhe über NN, bei den beiden anderen Stationen handelt es sich um den Hohenpeißenberg, dessen Windgeber in 41 m über Grund angebracht ist, und um Weinbiet, wo in 26 m über Grund gemessen wird.

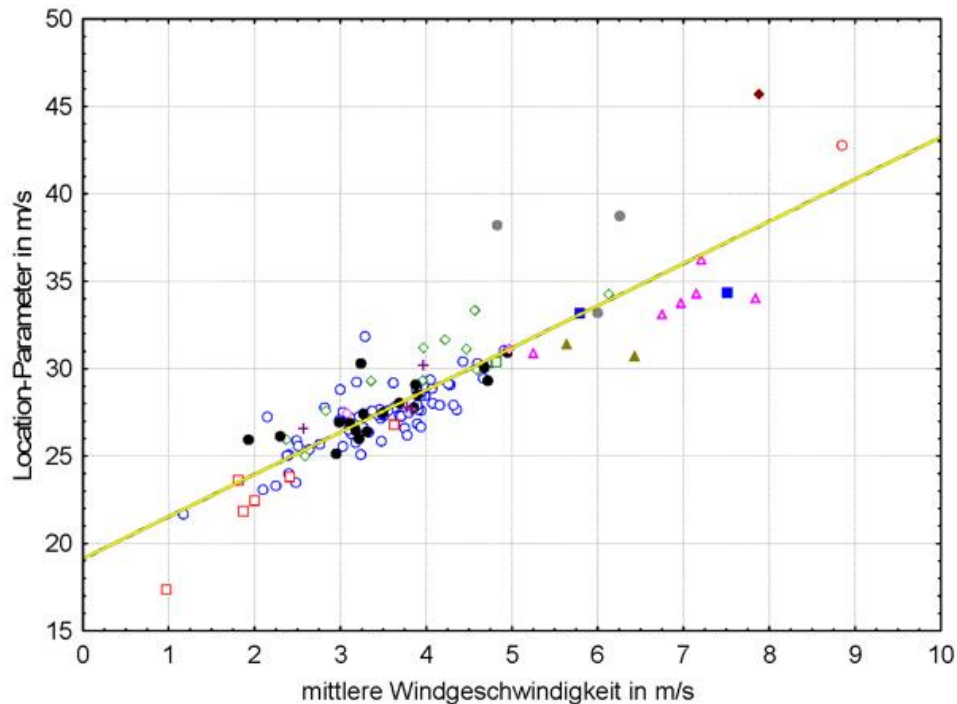


Abbildung 4-12 Zusammenhang zwischen der mittleren Windgeschwindigkeit und dem Location-Parameter in Abhängigkeit von Geländeform und Geberhöhe, Legende unten

GFORM: 0 (Ebene),	Geberhöhe: <= 15
GFORM: 0,	Geberhöhe: (15;20]
GFORM: 0,	Geberhöhe: (20;25]
GFORM: 0,	Geberhöhe: > 25
GFORM: 2 (Tal),	Geberhöhe: <= 15
GFORM: 2,	Geberhöhe: (15;20]
GFORM: 2,	Geberhöhe: (20;25]
GFORM: 2,	Geberhöhe: > 25
GFORM: 8 (Kuppe),	Geberhöhe: <= 15
GFORM: 8,	Geberhöhe: (15;20]
GFORM: 8,	Geberhöhe: (20;25]
GFORM: 8,	Geberhöhe: > 25
GFORM: 9 (Küste),	Geberhöhe: <= 15
GFORM: 9,	Geberhöhe: (15;20]
GFORM: 9,	Geberhöhe: (20;25]
GFORM: 9,	Geberhöhe: > 25

Unterhalb der Regressionsgeraden fällt der Datenpunkt ganz unten links auf, der zu Garmisch-Partenkirchen gehört. Dies ist die windschwächste Station in Deutschland – extreme Windverhältnisse an solchen Standorten wird man mit einem Regressionsmodell nicht genau abbilden können. Man sollte derartige Daten aber auch nicht aus den Betrachtungen herausnehmen, weil man sonst unrealistisch große Bestimmtheitsmaße bzw. kleine Fehler angeben würde. Zwei weitere auffällige Datenpunkte unterhalb der Geraden gehören zu den Insel-Standorten Helgoland (das magentafarbene Dreieck) und Fehmarn (das graue Dreieck).

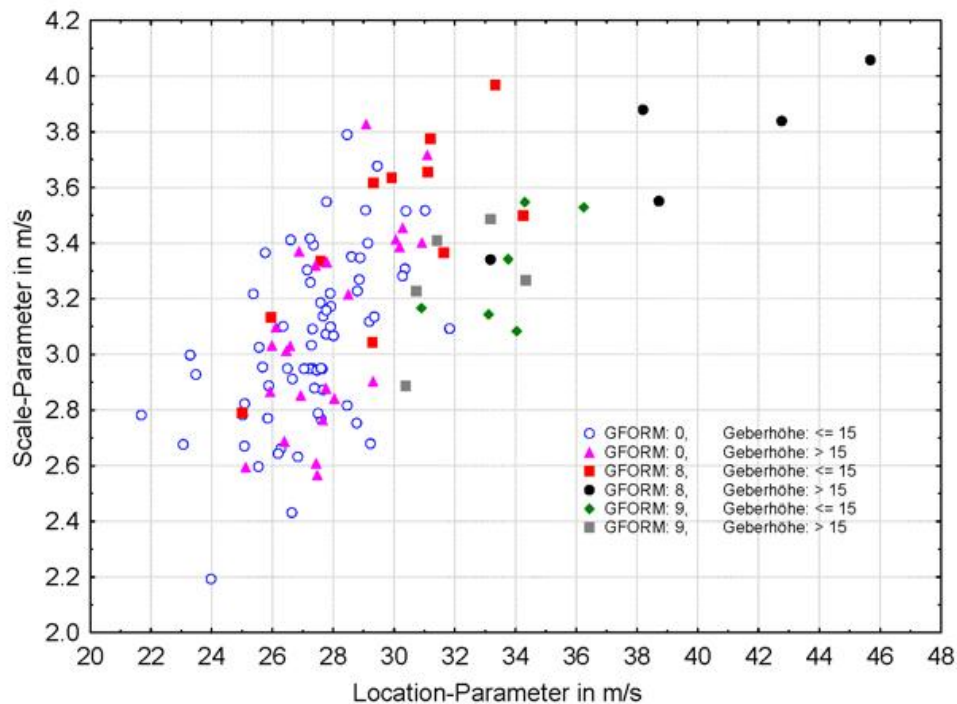


Abbildung 4-13 Zusammenhang zwischen dem Location- und dem Scale-Parameter in Abhängigkeit von Geländeform und Geberhöhe

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen den Location- und Scale-Parametern der GEV (Abbildung 4-13), dann fällt zunächst auf, dass dieser von der Geländeform abhängt: Die Zunahme des Scales mit der Zunahme der Location ist für die windstarken Stationen auf Kuppen und an der Küste sehr gut zu erkennen, für die Stationen in ebenem Gelände ist er weniger gut ausgeprägt. Bei den Bergstationen gibt es wieder Unterschiede für die unterschiedlichen Geberhöhen – wenn man allerdings zusätzlich die Höhe der Stationen über NN betrachtet, dann ist es diese Größe, die den Zusammenhang beeinflusst.

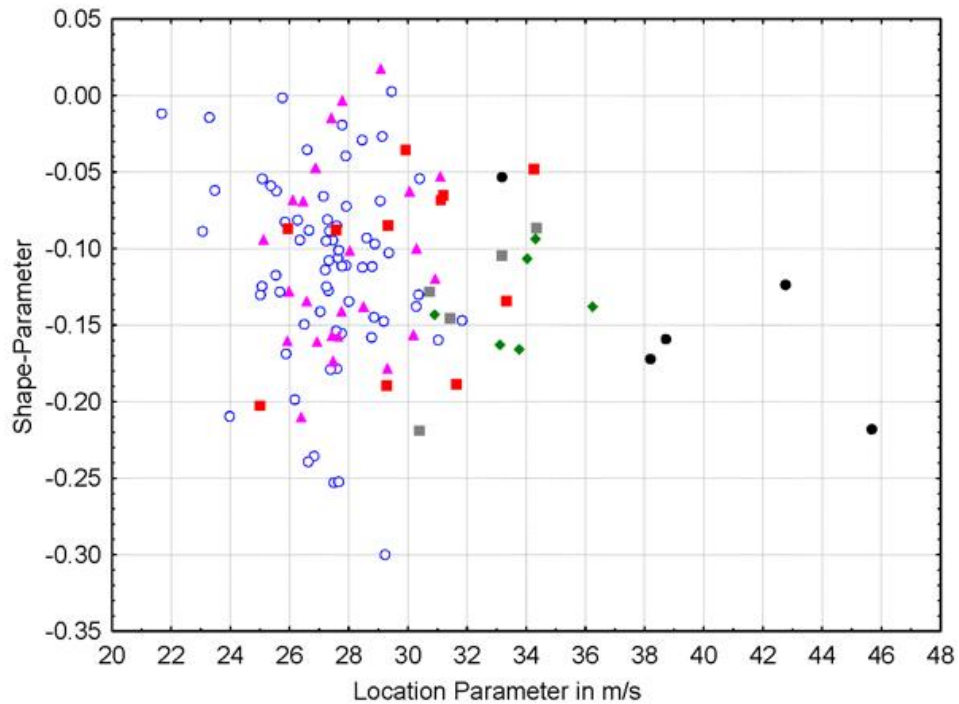


Abbildung 4-14 Zusammenhang zwischen dem Location- und dem Shape-Parameter in Abhängigkeit von Geländeform und Geberhöhe, Legende siehe Abbildung 4-13

Für den Shape-Parameter bietet sich – abgesehen davon, dass dieser mit zunehmender Location kleiner und nicht größer wird – das gleiche Bild wie für den Scale: Eine Abnahme mit dem Location-Parameter ist vor allem für die Geländeform 8 (Kuppen) zu erkennen und die Unterschiede, die man bei dieser Geländeform für die beiden unterschiedlichen Geberhöhen sieht, sind eher auf die Höhe über NN zurückzuführen. Für die anderen Geländeformen gibt es gar keinen Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen. Die Geberhöhe wird daher bei den weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt.

5 Regressionsrechnungen

Die Regressionsrechnungen werden mit dem Ziel durchgeführt, Gleichungen zu erarbeiten, mit denen Gitterpunktwerte der drei Parameter der GEV berechnet werden können. Als unabhängige Variable (Prediktoren) können nur Größen verwendet werden, für die es Gitterpunktwerte gibt. Diese sind in der Tabelle 5-1 aufgeführt.

Wenn die einzelnen Variablen, die in die Regressionsrechnung eingehen, sehr unterschiedlich große Wertebereiche haben, empfiehlt es sich, alle Werte vor der Regressionsrechnung auf den Bereich von 0 bis 1 zu normieren, indem jeder Wert v nach der Gleichung

$$v_{norm} = \frac{(v - v_{min})}{(v_{max} - v_{min})}$$

normiert wird. In der Tabelle 5-1 sind daher zu jeder Variablen auch die Werte v_{max} und v_{min} aufgeführt.

Tabelle 5-1 Variablen der Regressionsrechnung mit den Normierungswerten v_{max} und v_{min}
SWM: Statistisches Windfeldmodell

Variable	Art	Einheit	v_{max}	v_{min}
Höhe über NN	unabhängig	m	2962	0
Rechtswert	unabhängig	m	3930000	3280000
Hochwert	unabhängig	m	6110000	5230000
SWM: Rauigkeitslänge [§]	unabhängig	m		
SWM: Scale	unabhängig	m/s	0.75	10.10
SWM: Shape	unabhängig	-	0.65	2.50
SWM: mff	unabhängig	m/s	0.90	9.00
GEV: Location	abhängig	m/s	70.00	15.00
GEV: Scale	abhängig	m/s	6.00	2.00
GEV: Shape	abhängig	-	0.00	-0.30

§: die Rauigkeitslänge, die nur einen engen Wertebereich einnimmt, ist nicht normiert worden. Hier wurde vielmehr neben dem absoluten Wert auch der Logarithmus dieses Wertes auf seine Tauglichkeit als unabhängige Variable untersucht. Er fand aber keinen Eingang in die Regressionsgleichungen.

Die Variablen, denen "SWM" vorangestellt ist, sind nicht anhand der Stationsdaten bestimmt worden. Es handelt sich hier um die Gitterpunktwerte der Stationen aus dem Statistischen Windfeldmodell im 200-m-Raster.

5.1 Methodik

Es wurden sowohl multiple lineare als auch multiple polynome Regressionsgleichungen bestimmt. Die Regressionsrechnungen werden schrittweise ausgeführt: Die Regressoren (unabhängigen Variablen) werden nacheinander in die Gleichung einbezogen und bei jedem Schritt wird untersucht, ob der jeweilige Regressor einen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Varianz der Zielvariablen liefert – ob sich also das Bestimmtheitsmaß der Regression vergrößert, wenn der Regressor neu hinzu kommt. Nur Regressoren, die einen signifikanten Beitrag leisten, werden berücksichtigt. Das Ergebnis der Regression wird immer per "Crossvalidation" überprüft: Die Regressionsgleichung, die mit den Analysevariablen bestimmt wurde, wird auf die Daten der Testvariablen übertragen und das Ergebnis anhand des Korrelationskoeffizienten oder aber – wenn es zu wenig Testvariable gibt – anhand der grafischen Darstellung von angepassten und berechneten Verteilungsparametern beurteilt.

Die Suche nach der passenden Regressionsgleichung für einen der abhängigen Parameter umfasst folgende Schritte:

1. Bestimmung einer multiplen linearen Regressionsgleichung für alle Geländeformen.
2. Berechnung des Bestimmtheitsmaßes dieser Gleichung für das Testkollektiv sowie für jede Geländeform separat. Wenn eine Geländeform ein deutlich kleineres Bestimmtheitsmaß aufweist, wird versucht, für diese Form eine eigene Gleichung zu finden. Wenn sich die Gleichung nicht crossvalidieren lässt, wird sie verworfen. Stationen, die bei jedem Versuch Ausreißer sind, werden ausgeschlossen.
3. Bestimmung einer multiplen polynomen Regressionsgleichung für polynome 3. Grades. Sollte sich hier eine Gleichung finden, die ein deutlich größeres Bestimmtheitsmaß hat als die lineare Gleichung und die sich auch crossvalidieren lässt, dann wird diese Gleichung der linearen Gleichung vorgezogen.

Im Rahmen der Regressionsrechnungen wurden folgende Stationen ausgeschlossen:

Tabelle 5-2 Stationen, die bei der Regressionsrechnung aussortiert wurden

ID	Name	Grund
1550	Garmisch-Partenkirchen	sehr auffällig geringe Windspitzen, Anpassung einer GEV schwierig
1757	Greifswald	Anpassung einer GEV schwierig, Ergebnisse fragwürdig
1987	HH-St. Pauli	Anpassung einer GEV schwierig, Ergebnisse fragwürdig
5009	Teterow	Anpassung einer GEV schwierig, Ergebnisse fragwürdig
5142	Ückermünde	Anpassung einer GEV schwierig, Ergebnisse fragwürdig
5371	Wasserkuppe	Anpassung einer GEV schwierig, Ergebnisse fragwürdig
5426	Weinbiet	auffällig hohe Windspitzen für die Stationslage
5490	Werningerode	auffällig geringe Windspitzen für die Stationslage

Die Regressionsgleichungen für die drei Parameter der GEV, die auf diese Weise ermittelt wurden, sind in den nachfolgenden Abschnitten tabellarisch aufgeführt. Dabei bedeuten:

STE	im Tabellenkopf: Standardfehler des Koeffizienten
STE	in der vorletzten Zeile: Standardfehler der Regression
t	Prüfgröße zur Beurteilung des Beitrags, den der Regressor zur Erklärung der Varianz der abhängigen Variablen liefert. Je größer t, desto größer der Beitrag
p	Irtumswahrscheinlichkeit für die Annahme, dass $t=0$, der Regressor also keinen Beitrag liefert. Es werden nur Regressoren in die Gleichung aufgenommen, für die $t < 0.05$. Wenn das nicht der Fall ist (das kommt bei der Regressionskonstanten vor), dann ist die entsprechende Zeile rot eingefärbt.
Konfidenzbereich	der Bereich, in dem sich der Regressionskoeffizient mit 95%-iger Sicherheit bewegt
norm	normiert
RW, HW	Rechts- und Hochwert
z0	Rauigkeitslänge in m
W_SHA	Shape-Parameter der Weibull-Verteilung (aus dem SWM)
mff	mittlere Windgeschwindigkeit (aus dem SWM)
LOC_ber	berechneter Location-Parameter
GEV_LOC	Locationparameter aus der Anpassung der GEV
GEV_SCALE	Scale-Parameter aus der Anpassung der GEV
BMASS	korrigiertes multiples Bestimmtheitsmaß der Regression

5.2 Location-Parameter

Der Location-Parameter ist für eine Extremwertverteilung das, was der Mittelwert für eine Normalverteilung ist und die mittlere Windgeschwindigkeit ist auch die Größe, die den größten Beitrag zur Erklärung der Varianz dieses Parameters liefert. Das kann man an der Spalte t der obigen Tabellen erkennen. Die Gleichung für die Geländeformen Ebene (0), Tal (2) und Küste (9) zeigt, dass der Location-Parameter für diese Geländeformen von West nach Ost und von Nord nach Süd abnimmt. Diese Abhängigkeiten kommen bei der Berechnung für die Geländeform Kuppe (8) nicht zum Tragen, denn hier ist die normierte Windgeschwindigkeit der steuernde Parameter.

Tabelle 5-3 Regressionsgleichung für den normierten Location-Parameter, Geländeformen: Ebene, Tal, Küste

Regressor	Koeffizient	STE	t	p	95%-Konfidenzbereich	
					von	bis
Konstante	0.212914	0.038860	5.47904	0.000001	0.135502	0.290327
norm RW	-0.067749	0.021051	-3.21836	0.001905	-0.109684	-0.025814
norm HW	0.118115	0.028262	4.17928	0.000078	0.061814	0.174416
z0	0.063960	0.021915	2.91850	0.004640	0.020302	0.107618
norm W_SHA	-0.320794	0.107364	-2.98790	0.003795	-0.534675	-0.106913
norm_mff	0.371793	0.052274	7.11236	0.000000	0.267657	0.475928

	alle	Ebene	Tal	Küste	Test
Stationen	81	68	4	9	21
BMASS	71%	46%	54%	52%	69%
STE (m/s)	1.449				
Freiheitsgrade	75				

Tabelle 5-4 Regressionsgleichung für den normierten Location-Parameter, Geländeformen: Kuppe

Regressor	Koeffizient	STE	t	p	95%-Konfidenzbereich	
					von	bis
Konstante	0.159712	0.053819	2.96757	0.011754	0.042450	0.276974
norm W_SHA	-0.403501	0.129104	-3.12540	0.008766	-0.684795	-0.122208
norm_mff	0.853805	0.067207	12.70411	0.000000	0.707374	1.000237

	Analyse	Test
Stationen	15	4
BMASS	94%	99%
STE (m/s)	2.372	
Freiheitsgrade	12	

Die Abbildung 5-1 zeigt die Korrelation für alle Geländeformen, getrennt nach Analyse- und Testdaten. Man kann erkennen, dass die Übertragung auf die Teststationen gut ist. Man kann allerdings auch sehen, dass die Regressionsgleichung für die Stationen mit den kleinsten Location-Parametern (< 0.15) keine sehr guten Werte liefert. Diese Stationen gehören den Geländeformen Ebene und Tal an und eine Verbesserung für diese Standorte gelang auch mit einer polynomen Gleichung nicht. Da der Location-Parameter direkt in die Berechnung der Wiederkehrwerte eingeht, werden die Gitterpunktwerte für diese Lagen deshalb etwas überschätzt werden. In den Tabellen mit den Regressionsgleichungen sind auch die Standardfehler (STE) der Regression aufgeführt. Sie liegen bei 2,4 m/s für die Stationen auf Kuppen, bei 1,4 m/s für alle anderen Stationen. Diese Werte sind deutlich größer als die Standardfehler dieses Parameters aus der Anpassung der GEV, die sich im Bereich von 0.33 m/s und 0.75 m/s bewegen. Es gibt daher durchaus signifikante Abweichungen zwischen berechnetem und angepasstem Location-Parameter – man kann aber bei einem Standardfehler aus der Anpassung, der – be-

zogen auf den Location-Parameter – im Mittel nur 2,75% beträgt, kaum eine größere Übereinstimmung erwarten.

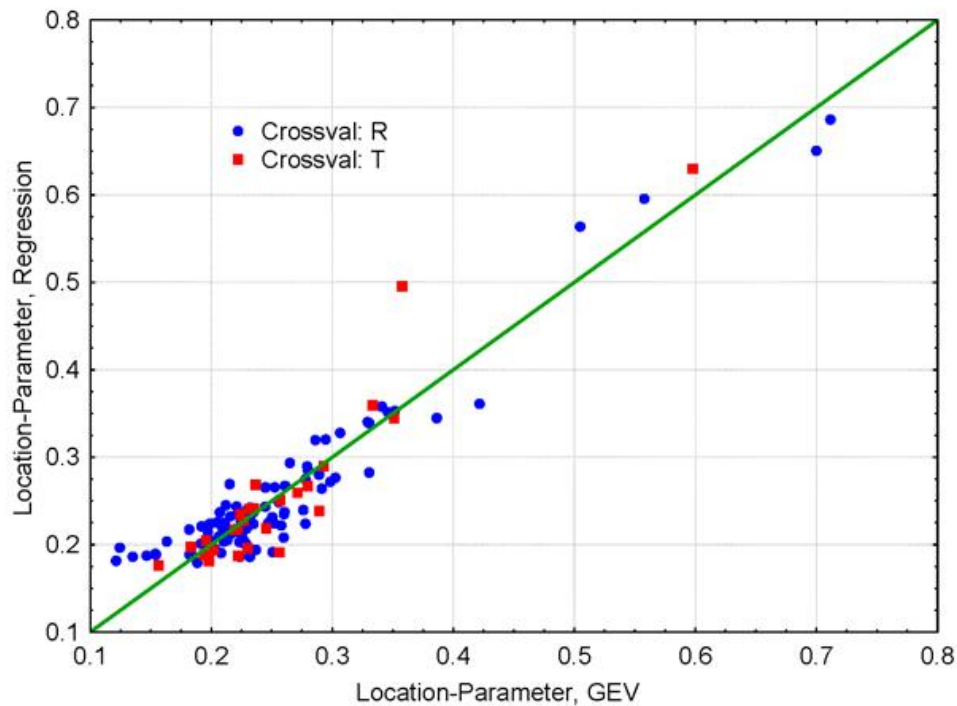


Abbildung 5-1 Korrelation angepasster (GEV) und berechneter (Regression) normierter Location-Parameter für alle Geländeformen

Crossval: R: Analysekollektiv, Crossval: T: Testkollektiv

5.3 Scale-Parameter

Zwischen den Parametern der GEV gibt es Zusammenhänge, die man für die Regression nutzen kann. So besteht ein positiver Zusammenhang zwischen den Parametern Location und Scale, der allerdings für die Stationen in Tälern und an der Küste nicht erkennbar ist und sich für die Stationen auf Kuppen anders darstellt als für die, die in der Ebene liegen.

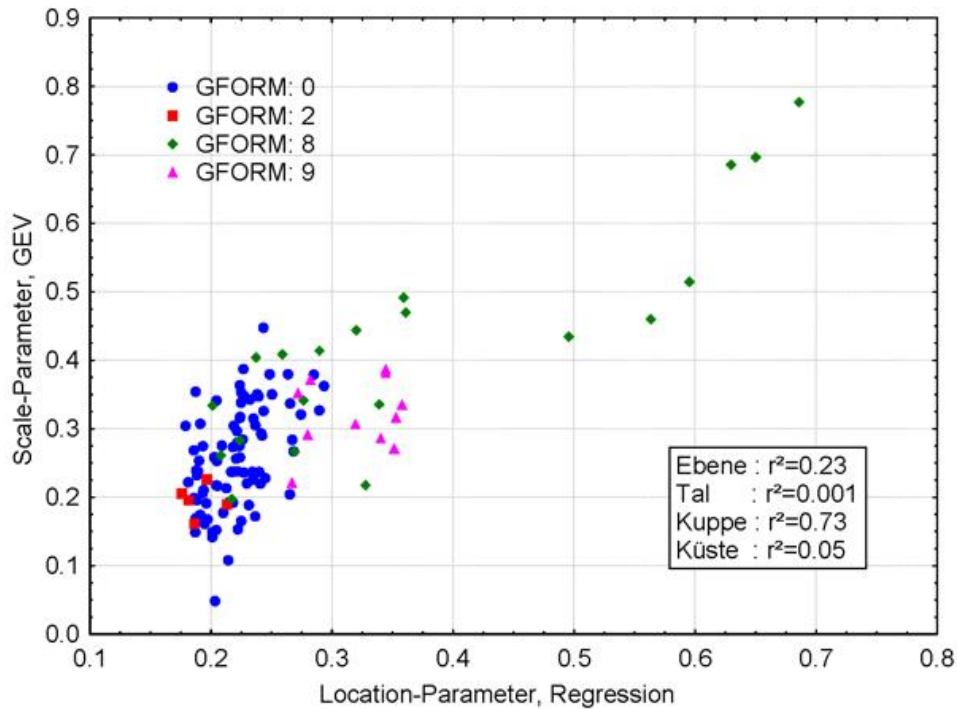


Abbildung 5-2 Zusammenhang zwischen dem berechneten Location- und dem angepassten Scale-Parameter (normierte Werte)

Diese Unterschiede sowie die nur mäßig gute Korrelation für die Stationen in der Ebene machen es schwierig, "vernünftige" Regressionsgleichungen für diesen Parameter zu finden. Da für den Scale die räumliche Variation in etwa dieselbe Größenordnung hat wie die Unsicherheit, die aus der Anpassung resultiert, kann man allerdings auch nicht erwarten, hoch signifikante Zusammenhänge zu finden. Hier – wie auch beim Shape-Parameter – geht es also eher darum, Regressionsbeziehungen zu finden, die etwas besser sind als die Alternative, jeder Station den Mittelwert aller Stationen ihrer Geländeform zuzuordnen, denn das wäre die Alternative, wenn man keine Regressionsgleichung mit einem Bestimmtheitsmaß findet, das signifikant größer als Null ist.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Regressionsgleichungen. In diesem Fall ließ sich keine Gleichung für die Stationen an der Küste finden. Hier liegen die berechneten Scale-Parameter zwischen 2.9 und 3.5 m/s, diese Stationen erhalten einen konstanten Wert von 3.33 m/s, der einem normierten Wert von 0.33 entspricht.

Tabelle 5-5 Regressionsgleichung für den normierten Scale-Parameter; Geländeform: Ebene

Regressor	Koeffizient	STE	t	p	95%-Konfidenzbereich	
					von	bis
Konstante	0.02382	0.037995	0.62689	0.533034	-0.05213	0.09977
normHW	-0.22292	0.061033	-3.65246	0.000536	-0.34493	-0.10092
z0	-0.26328	0.079745	-3.30148	0.001599	-0.42269	-0.10387
normW_Sha ²	0.75547	0.207878	3.63418	0.000568	0.33992	1.17101
norm_mff ²	-1.72318	0.472345	-3.64814	0.000543	-2.66739	-0.77898
Loc_ber ²	8.19628	1.791617	4.57479	0.000023	4.61489	11.77767

Analyse		Test
Stationen	68	18
BMASS	41%	2%
STE (m/s)	0.239	
Freiheitsgrade	62	

Tabelle 5-6 Regressionsgleichung für den normierten Scale-Parameter; Geländeform: Tal

Regressor	Koeffizient	STE	t	p	95%-Konfidenzbereich	
					von	bis
Konstante	0.408908	0.043299	9.44377	0.000225	0.297604	0.520212
normRW	-0.419709	0.084886	-4.94441	0.004306	-0.637915	-0.201504

Analyse		Test
Stationen	5	1
BMASS	70%	passt
STE (m/s)	0.063	
Freiheitsgrade	3	

Tabelle 5-7 Regressionsgleichung für den normierten Scale-Parameter; Geländeform: Kuppe

Regressor	Koeffizient	STE	t	p	95%-Konfidenzbereich	
					von	bis
Konstante	0.286049	0.025705	11.12801	0.000000	0.230516	0.341582
LOC_ber ³	1.385637	0.193818	7.14915	0.000007	0.966918	1.804356

Analyse		Test
Stationen	15	4
BMASS	78%	passt
STE (m/s)	0.312	
Freiheitsgrade	13	

Geländeform: Küste - normierter Scale = 0.33 für alle Stationen bzw. Gitterpunkte.

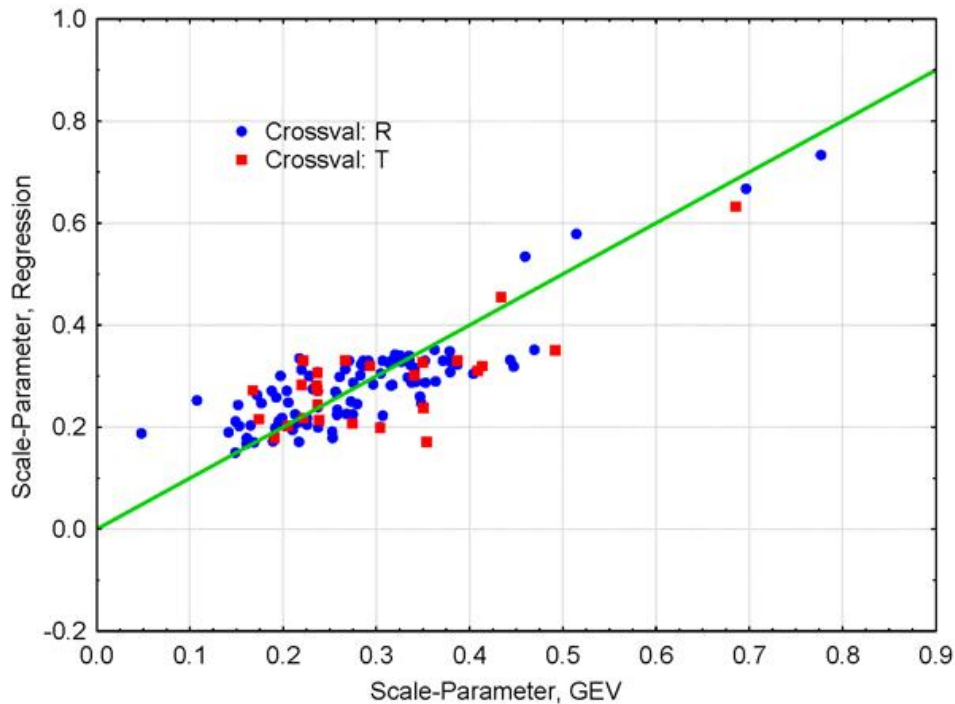


Abbildung 5-3 Korrelation angepasster (GEV) und berechneter (Regression) normierter Scale-Parameter für alle Geländeformen

Crossval: R: Analysekollektiv, Crossval: T: Testkollektiv

Die obige Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen berechneten und angepassten Werten für alle Geländeformen. Er ist zwar nicht besonders gut (das Bestimmtheitsmaß für alle Analysestationen beträgt 65%, für die Teststationen 58%), aber sicher besser, als die Vorgabe konstanter Werte für alle Geländeformen.

5.4 Shape-Parameter

Auch für den Shape-Parameter gibt es Zusammenhänge mit den anderen GEV-Parametern, die allerdings sehr vage sind: In der Abbildung 5-4 ist der Shape-Parameter in Abhängigkeit von dem Location- und dem Scale-Parameter dargestellt. Man kann zumindest erkennen, dass der Shape mit zunehmender Location kleiner und mit zunehmendem Scale größer wird. Bei der Regressionsanalyse zeigt sich dann, dass sich diese Zusammenhänge für die Stationen, die auf Kuppen liegen, deutlich vom Rest der Stationen unterscheiden. Daher gibt es auch für diesen Parameter zwei Regressionsgleichungen, die – das zeigen die entsprechenden Werte in den Tabellen – nur etwa die Hälfte der Varianz des Shape-Parameters erklären. Der Standardfehler dieser Regression ist genauso groß wie der Standardfehler dieses Parameters bei der Anpassung der POT an die GEV – damit erhält man trotz der schlechten Regressionsergebnisse kaum berechnete Parameter, die signifikant von den angepassten abweichen. Und die Abbildung 5-5 zeigt, dass die Anpassungsergebnisse insgesamt so schlecht nicht sind – hier wurden als Prediktoren allerdings die Location- und Scale-Parameter benutzt, die bei der Anpassung der GEV an die POT berechnet wurden. Bei der Berechnung der Gitterpunktweite wird diese Gleichung allerdings mit den zuvor berechneten Werten für Location- und Scale-Parameter benutzt. Dann ist die Übereinstimmung deutlich schlechter (Abbildung 5-6) – aber auch dann ist der Standardfehler noch kleiner als bei der Anpassung der GEV. Man kann der

Abbildung 5-6 auch entnehmen, dass der Bereich der berechneten Shape-Parameter deutlich kleiner ist als der, der sich bei der Anpassung ergeben hat. Das ist sozusagen ein Folgefehler der Regressionsgleichung für den Scale.

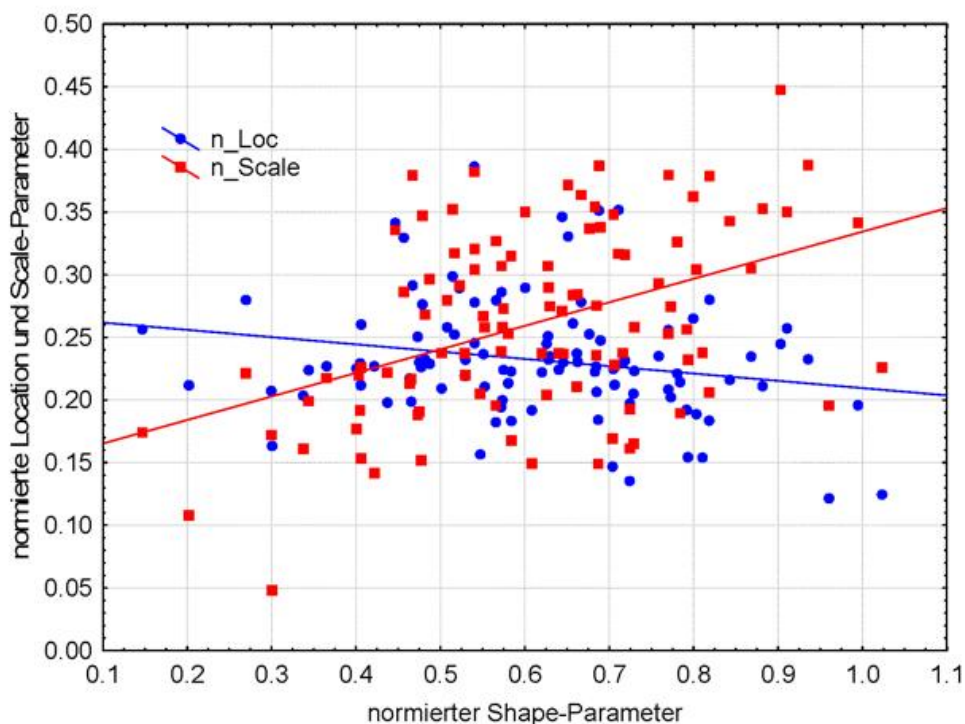


Abbildung 5-4 Zusammenhang zwischen den Parametern der GEV

Tabelle 5-8 Regressionsgleichung für den normierten Shape-Parameter; Geländeformen: Ebene, Tal, Küste

Regressor	Koeffizient	STE	t	p	95%-Konfidenzbereich	
					von	bis
Konstante	0.71905	0.067929	10.58523	0.000000	0.58375	0.85434
z0	0.27123	0.096633	2.80684	0.006353	0.07877	0.46369
norm_mff	0.81759	0.187345	4.36411	0.000040	0.44446	1.19072
GEV_Loc	-4.05664	0.496500	-8.17048	0.000000	-5.04551	-3.06778
GEV_Scale	1.87571	0.203014	9.23929	0.000000	1.47137	2.28005

	Analyse	Ebene	Tal	Küste	Test
Stationen	81	68	4	9	21
BMASS	56%	63%	65%	13%	83%
STE (absolut)	0.034				
Freiheitsgrade	76				

Tabelle 5-9 Regressionsgleichung für den normierten Shape-Parameter, Geländeform: Kuppen

Regressor	Koeffizient	STE	t	p	95%-Konfidenzbereich	
					von	bis
Konstante	0.17584	0.190438	0.92334	0.374023	-0.23909	0.590769
GEV_Loc ³	-2.70179	0.892742	-3.02639	0.010537	-4.64691	-0.756672
GEV_Scale	1.39733	0.633821	2.20461	0.047741	0.01635	2.778304

	Analyse	Test
Stationen	15	4
BMASS	40%	passt
STE (absolut)	0.046	
Freiheitsgrade	12	

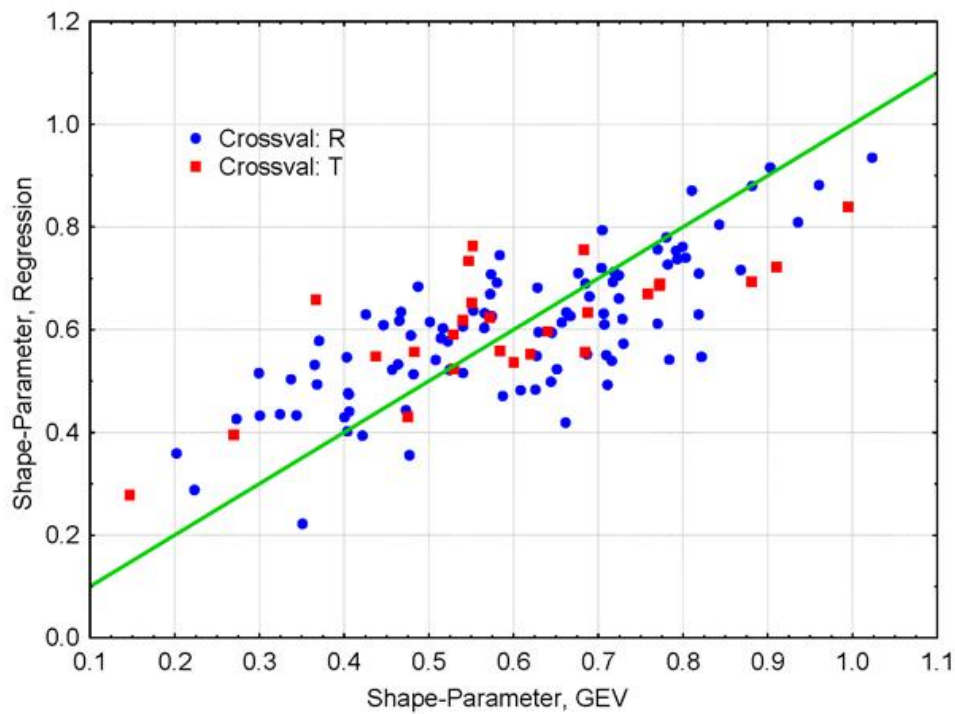


Abbildung 5-5 Korrelation angepasster (GEV) und berechneter (Regression) normierter Shape-Parameter für alle Geländeformen

Crossval: R - Analysekollektiv, Crossval: T - Testkollektiv

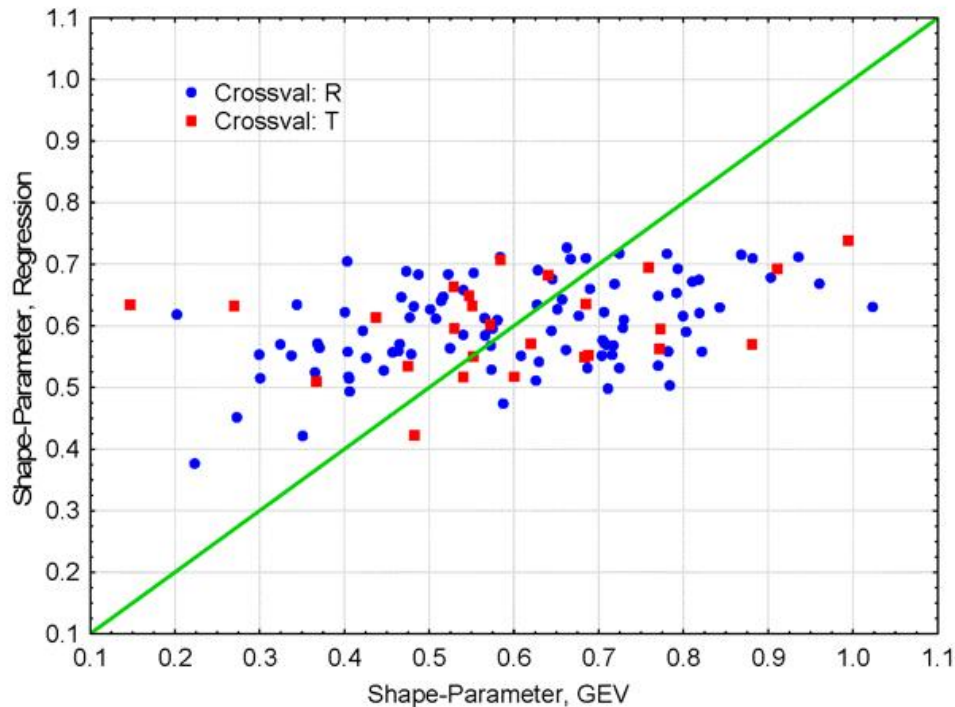


Abbildung 5-6 wie Abbildung 5-5, aber Berechnung des Shape-Parameters mit den zuvor berechneten Location- und Scale-Parametern

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Location- Scale- und Shape-Parameter, die mit den o.a. Gleichungen für die 130 Stationen berechnet werden, im Vergleich mit den Konfidenzbereichen, die diese Parameter aufgrund der Anpassung der GEV an die POT haben. Die Stationen sind nach der Größe des berechneten Location-Parameters sortiert.

Die berechneten Location-Parameter liegen häufiger außerhalb des Konfidenzbereichs. Systematische Abweichungen der berechneten Werte – also systematische Unterschreitung der Untergrenze oder aber Überschreitung der Obergrenze dieses Bereichs gibt es jedoch nicht.

Die Scale- und Shape-Parameter haben – gemessen an den räumlichen Unterschieden innerhalb Deutschlands – wesentlich breite Konfidenzbereiche als der Location-Parameter. Auf diesen Umstand ist schon häufiger hingewiesen worden. Die berechneten Werte liegen deshalb hier – ungeachtet der kleineren Bestimmtheitsmaße für die Regression – nur selten außerhalb des Konfidenzbereichs. Die Abbildung für den Shape zeigt zudem sehr gut, dass die berechneten Werte für diesen Parameter nur einen sehr engen Wertebereich einnehmen.

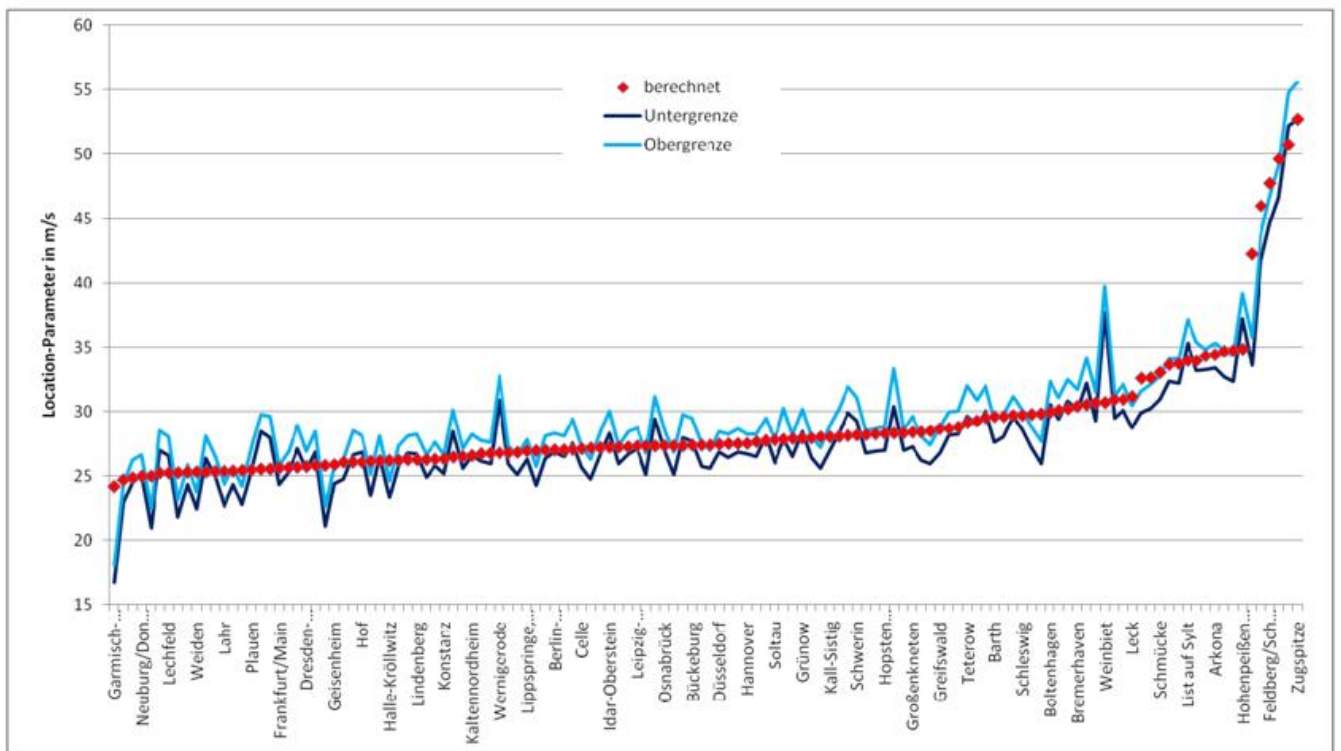


Abbildung 5-7 Vergleich der berechneten Location-Parameter mit den 95%-Konfidenzbereich der angepassten Werte; Anpassung: GEV an POT

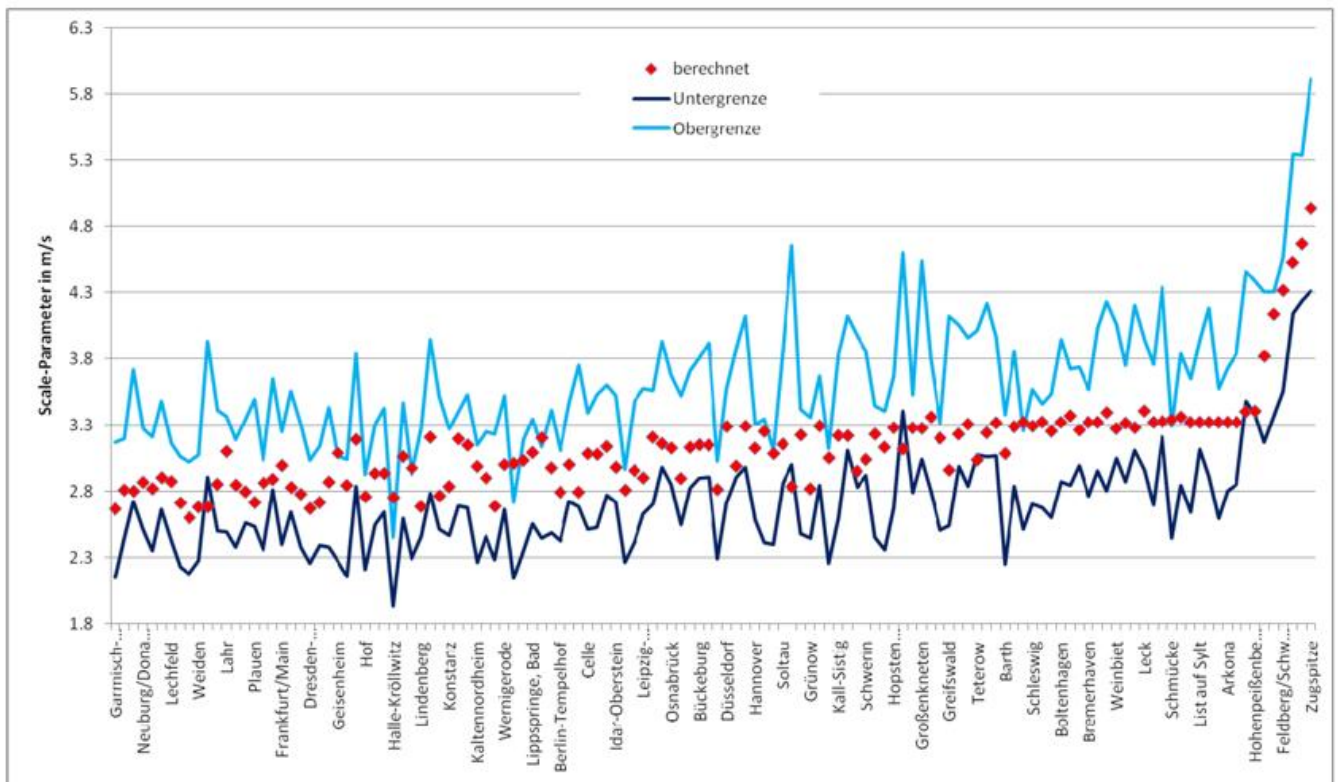


Abbildung 5-8 Vergleich der berechneten Scale-Parameter mit den 95%-Konfidenzbereich der angepassten Werte; Anpassung: GEV an POT

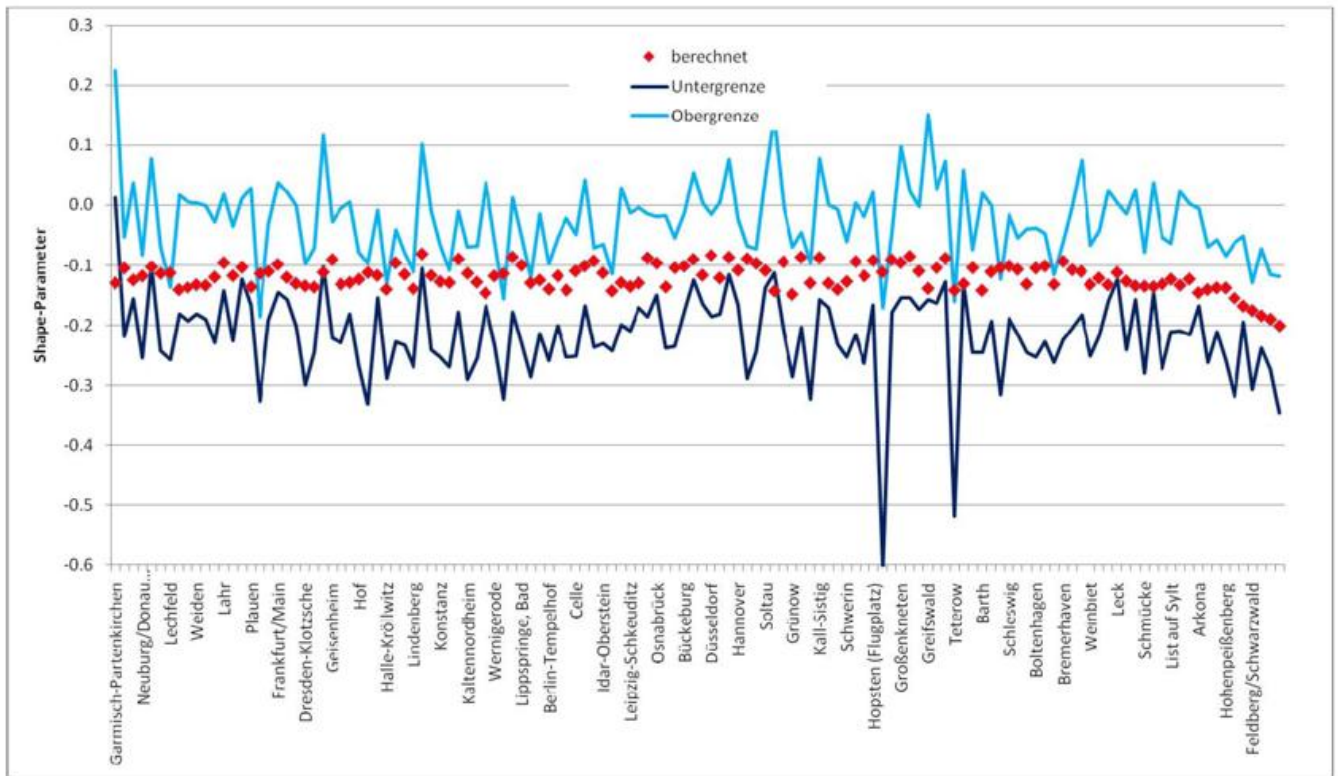


Abbildung 5-9 Vergleich der berechneten Shape-Parameter mit den 95%-Konfidenzbereich der angepassten Werte;

Anpassung: GEV an POT

6 Wiederkehrwerte

Der eigentliche Zweck der Regressionsrechnungen besteht darin, anhand der Gitterpunktweite der GEV-Parameter Wiederkehrwerte von Windspitzen für vorgegebene Wiederkehrzeiten zu berechnen.

Bei diesen Wiederkehrwerten handelt es sich um Schätzwerte aus den GEV. Diese sind mit Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten resultieren zum einen daraus, dass die GEV nicht exakt an die Verteilungen der Windspitzen angepasst werden können und zum anderen daraus, dass auch die Regressionsgleichungen diese Verteilungsparameter nicht exakt abbilden.

Im Folgenden werden beide Fehlerquellen beschrieben und es wird eine Aussage zur Genauigkeit der berechneten Wiederkehrwerte getroffen.

6.1 Berechnung der Wiederkehrwerte und ihrer Konfidenzintervalle

Die Gleichung zur Berechnung eines Wiederkehrwertes WKW in Abhängigkeit von einer Wiederkehrzeit (J), die in Jahren angegeben wird, ist

$$WKW(J) = Location - \frac{Scale}{Shape} \left(1 - \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{J} \right) \right)^{-Shape} \right)$$

mit:

WKW : Wiederkehrwert in m/s

J : Wiederkehrzeit in Jahren

Location : Location-Parameter der GEV in m/s

Scale : Scale-Parameter der GEV in m/s

Shape : Shape-Parameter der GEV

Die drei Verteilungsparameter sind jeweils mit einem Standardfehler behaftet. Diese Fehler gehen in den Wiederkehrwert ein. Es gibt verschiedene Methoden zur Berechnung von Konfidenzintervallen für Schätzwerte aus Verteilungen. Die im Kapitel 2 dargestellten Konfidenzbereiche der Wiederkehrwerte (Return-Level-Plots) wurden mit der Deltamethode berechnet, die voraussetzt, dass die Fehler asymptotisch normalverteilt sind und die Berechnung der Intervallgrenzen der Konfidenzintervalle anhand der Varianz-Kovarianz-Matrix erlaubt (COLES, 2001, S. 56). Diese Methode ist einfach zu handhaben und führt zu Konfidenzintervallen, die symmetrisch um den Wiederkehrwert liegen. Insbesondere bei großen Wiederkehrzeiten werden die Unter- und Obergrenzen sowie die Breite der Intervalle bei Verwendung der Delta-Methode etwas unterschätzt. Die Profile-Likelihood-Funktion (COLES, 2001, S. 57) berücksichtigt, dass die Konfidenzintervalle nicht symmetrisch sind und führt zu breiteren Intervallen. Die Abbildung 6-1 zeigt exemplarisch die beiden unterschiedlichen Konfidenzbereiche. Zur Abschätzung der Unsicherheit, mit der die Wiederkehrwerte, die für die Gitterpunkte berechnet werden, behaftet sind, werden Konfidenzbereiche aus der Profile-Likelihood-Funktion berechnet.

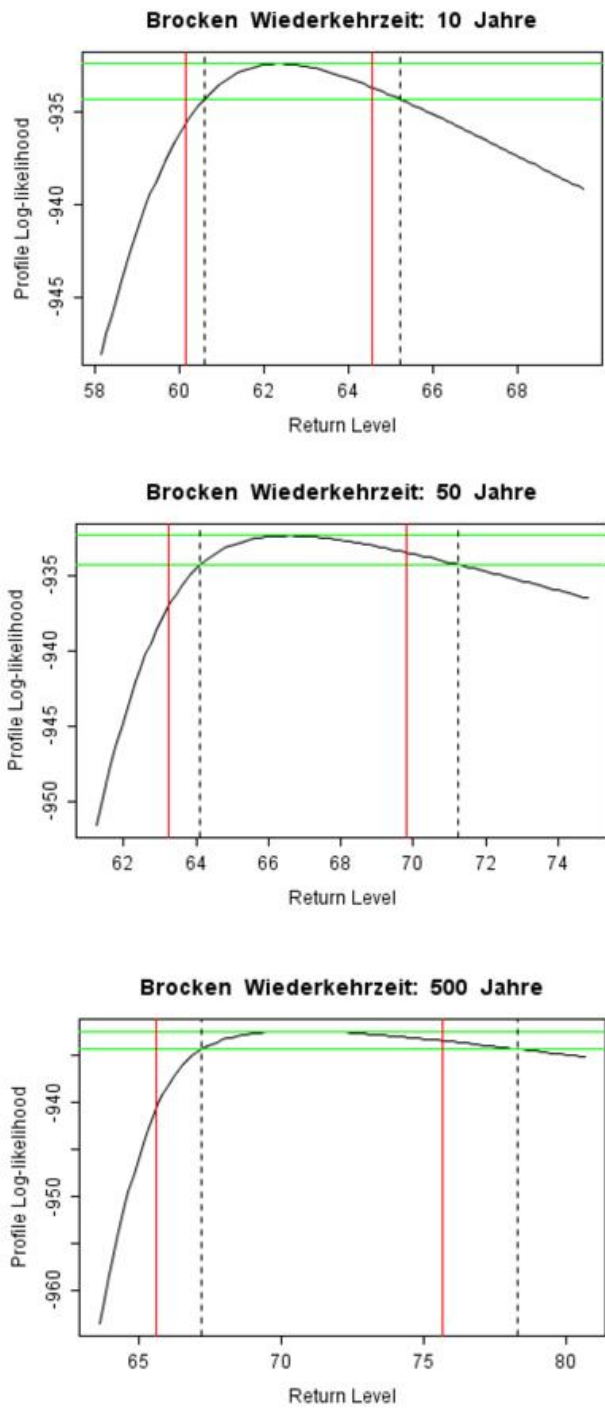


Abbildung 6-1 95%-Konfidenzbereiche für Wiederkehrwerte rote, durchgezogene Linien: berechnet mit der Delta-Methode

schwarze, gestrichelte Linien: berechnet mit der Profile-Likelihood-Funktion

Da es auch für die Extremwertstatistik einen zentralen Grenzwertsatz gibt, also auch hier vorausgesetzt wird, dass sich eine Stichprobe von n Werten für $n \rightarrow \infty$ asymptotisch der angepassten GEV nähert, hängen die Standardfehler der Verteilungsparameter und damit auch die Konfidenzgrenzen der Wiederkehrwerte von der Zahl der Windspitzen, mit denen die Verteilungsanpassung vorgenommen wurde, ab. Man kann die Breite von Konfidenzintervallen daher nur für Standorte mit ähnlicher Anzahl von POT vergleichen. Deshalb werden für die folgenden Auswertungen nur die 72 Standorte herangezogen, bei denen die Anpassung der GEV anhand einer Stichprobe mit 320 bis 420 Werten erfolgte.

6.2 Festlegung der Wiederkehrzeiten

Es sollen Karten mit Wiederkehrwerten für bis zu 5 Wiederkehrzeiten von 10 bis >100 Jahren erstellt werden. Voraussetzung für die Auswahl der Wiederkehrzeiten ist, dass sich ihre Wiederkehrwerte signifikant voneinander unterscheiden. Das tun sie, wenn der Wiederkehrwert einer Wiederkehrzeit außerhalb der Konfidenzbereiche der nächstgrößeren und der nächstkleineren Wiederkehrzeit liegt.

Die Abbildung 6-2 zeigt Wiederkehrwerte mit ihren Konfidenzbereichen für Wiederkehrzeiten von 10, 50 und 500 Jahren und 68 der 72 ausgewählten Stationen, deren ID auf der x-Achse angegeben ist. Die windstärksten Stationen sind nicht dargestellt worden, damit die zur Unterscheidung der Linien notwendige Spreizung der y-Achse erreicht werden konnte. Die Wiederkehrwerte werden von der durchgezogenen Linie dargestellt, die Konfidenzgrenzen von den gepunkteten Linien. Die Stationen wurden nach aufsteigenden Wiederkehrwerten für eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren sortiert. Nur deshalb schwankt diese Linie weniger als die anderen. Man kann zweierlei erkennen:

- Die Konfidenzintervalle sind umso breiter, je größer die Wiederkehrzeit ist.
- Die Wiederkehrwerte für eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren fallen in etwa mit der Untergrenze des Konfidenzbereichs für die Wiederkehrwerte zusammen, deren Wiederkehrzeit 500 Jahre beträgt, und die Wiederkehrwerte für die Wiederkehrzeit von 500 Jahren entsprechen fast genau der Obergrenze des Konfidenzbereichs für 50 Jahre. Eine saubere Trennung gibt es hier also nur für die Wiederkehrwerte mit Wiederkehrzeiten von 10 und 500(!) Jahren.

Die Berechnung von Gitterpunktwerten soll für Wiederkehrzeiten erfolgen, die sich signifikant voneinander unterscheiden. Es ist aber – wie man an der obigen Abbildung sieht – nicht einfach, solche Wiederkehrzeiten festzulegen:

Die Berechnung für eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren ist ein "Muss", denn Windspitzen mit dieser Wiederkehrzeit sind nach der DIN 1055 Teil 4 beim Bauwerksentwurf zu berücksichtigen und daher gibt es für diese Geschwindigkeiten auch Karten für die BRD. Zur Einordnung der Windgeschwindigkeiten, die für diese Wiederkehrzeit berechnet werden, sind zwei weitere Zeiten – je eine kürzere und eine längere – hilfreich. Berechnungen für eine Wiederkehrzeit von 10 Jahren wurden im Vertrag festgelegt, diese Zeit ist als kürzere Zeit auch gut zu gebrauchen. Als längere Wiederkehrperiode werden 500 Jahre gewählt – obwohl die Wiederkehrwerte für diese Wiederkehrzeit in etwa auf dem Niveau der Obergrenze des Konfidenzbereichs für 50 Jahre liegen. Das Problem der überlappenden Konfidenzbereiche bekommt man auch mit grö-

ßeren Wiederkehrzeiten nicht in den Griff, weil die Wiederkehrwerte mit zunehmender Wiederkehrzeit nur wenig ansteigen. Man kann der Darstellung in der Abbildung 6-3 zwar entnehmen, dass sich, im Sinne der signifikanten Unterschiede, eine Wiederkehrzeit von 1000 Jahren besser geeignet hätte als die Zeit von 500 Jahren – aber zum einen sinkt die Qualität der Regressionsergebnisse mit steigender Wiederkehrzeit (siehe Abbildung 6-8 bis Abbildung 6-11) und zum anderen werden die Klassenbreiten für die Kartendarstellung der Wiederkehrwerte und die Konfidenzbereiche, die für diese Werte ausgewiesen werden müssen, mit zunehmender Wiederkehrzeit immer größer, sodass sich schließlich gar keine vernünftige Karte mehr ergibt. Es werden also Rasterdaten für Wiederkehrzeiten von 10, 50 und 500 Jahren berechnet und dargestellt. Zusätzlich werden Rasterdaten für eine Wiederkehrzeit von 100 Jahren berechnet, da diese Wiederkehrzeit bei der Angabe von Hochwassern ("100-jähriges Hochwasser") üblich ist. Auf eine Darstellung dieser Werte wird aber verzichtet.

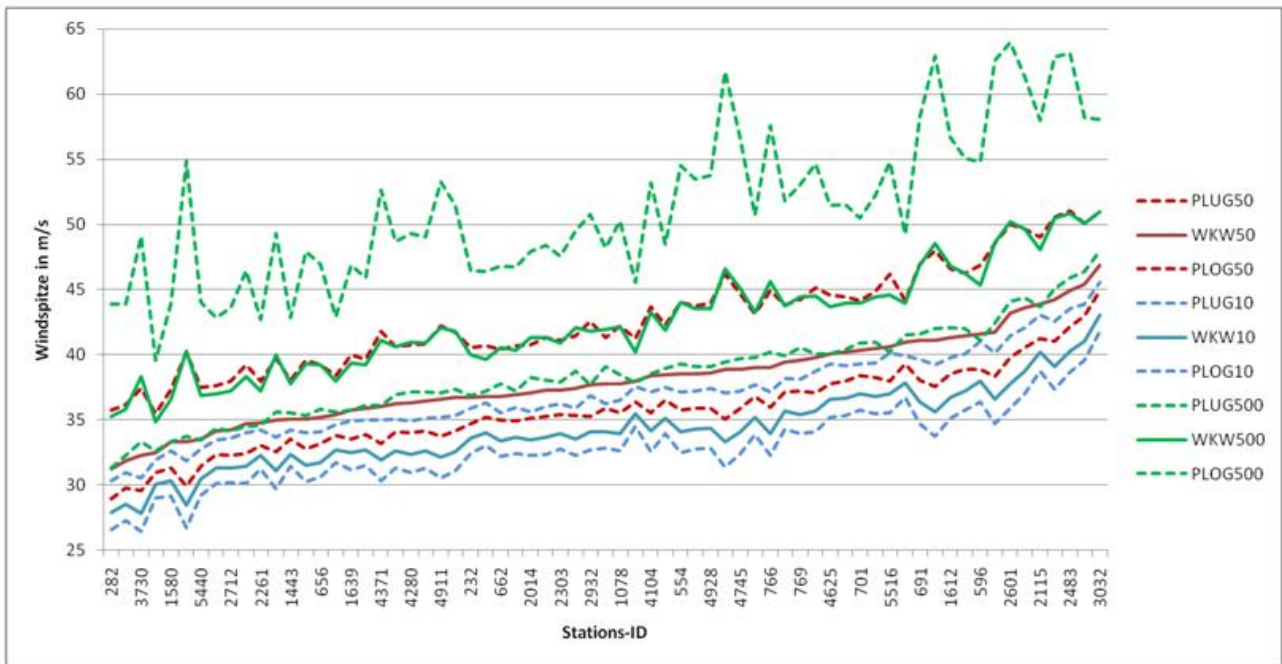


Abbildung 6-2 Wiederkehrwerte (WKW) mit den zugehörigen Unter (PLUG)- und Obergrenzen (PLOG) der Konfidenzbereiche für eine Sicherheit von 95% für Wiederkehrzeiten von 10, 50 und 500 Jahren, berechnet mit der Pofil-Likelihood-Methode

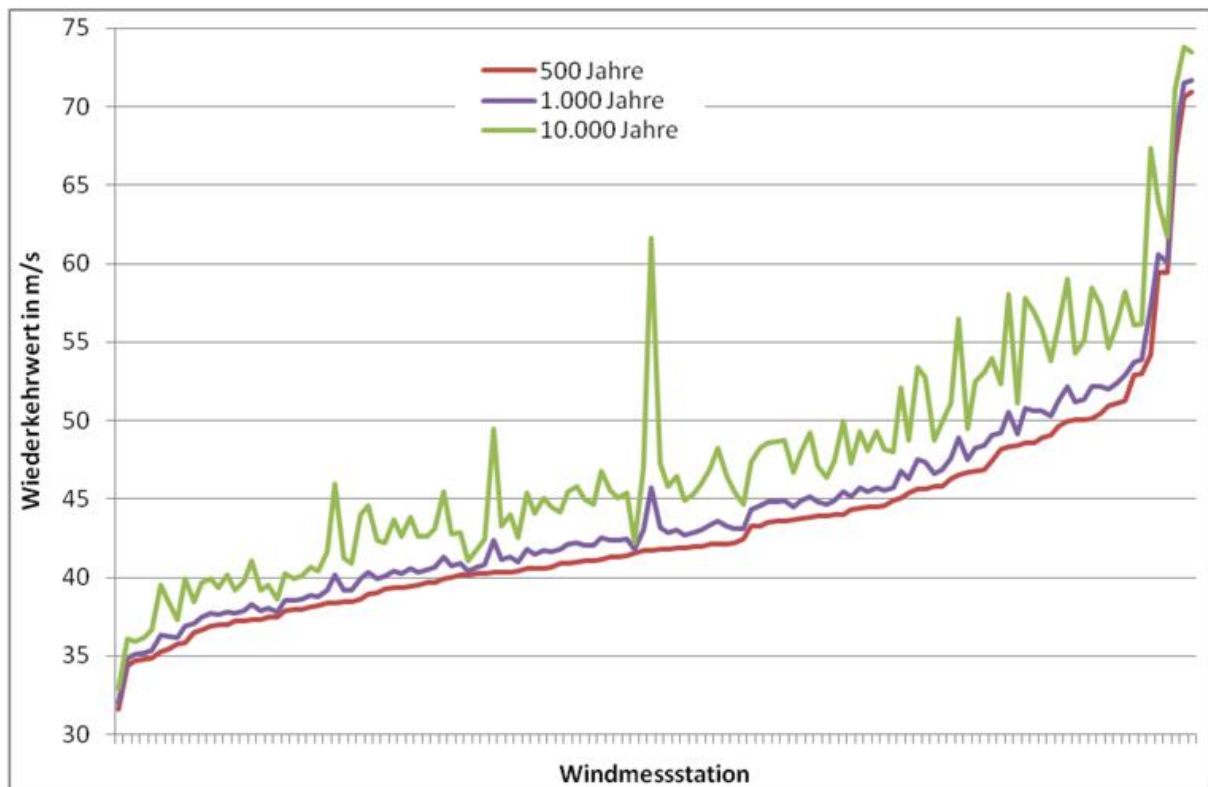


Abbildung 6-3 Wiederkehrwerte für Wiederkehrzeiten von 500 bis 10.000 Jahren

6.3 Konfidenzintervalle für Gitterpunktwerte

Die Regressionsgleichungen liefern die Parameter der GEV, aus denen sich Wiederkehrwerte berechnen lassen. Die Konfidenzbereiche, die diese Wiederkehrwerte haben, kann man daraus aber nicht ableiten. Dazu muss man die Konfidenzintervalle heranziehen, die sich bei der Anpassung der GEV an die Stationsdaten ergeben haben. Hier werden immer die Intervalle betrachtet, die mit der Profile-Likelihood-Funktion berechnet wurden.

Für den Fall, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Wiederkehrwert und der Breite seines Konfidenzbereichs gibt, lassen sich standortabhängige Konfidenzbereiche angeben.

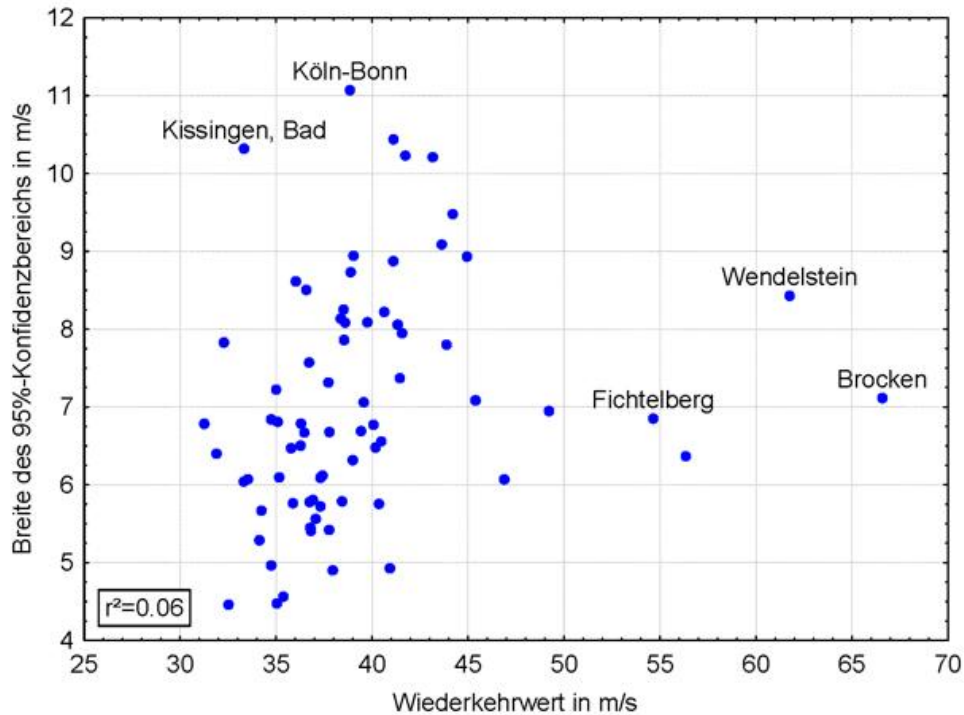
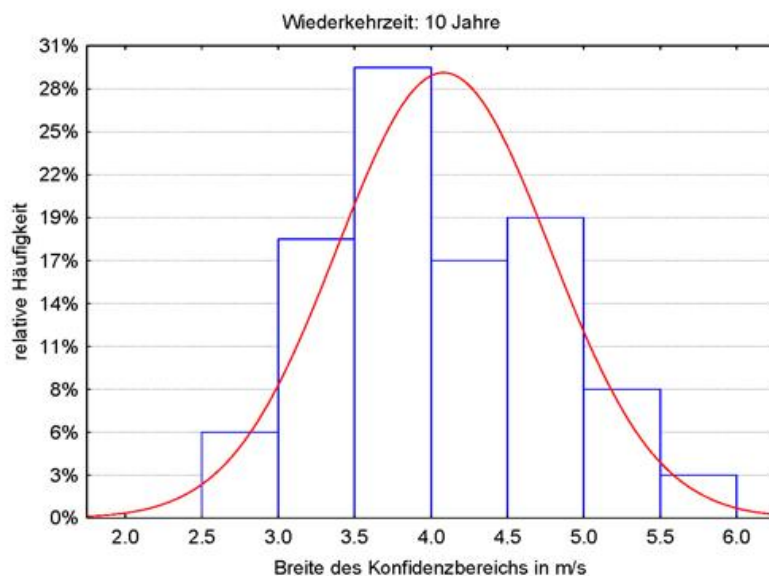


Abbildung 6-4 Zusammenhang zwischen dem Wiederkehrwert und der Breite des Konfidenzbereichs, Wiederkehrzeit: 50 Jahre

Die obige Abbildung lässt eine gewisse Zunahme der Breite des Konfidenzbereichs mit dem Wiederkehrwert erkennen, die allerdings weder für die besonders windschwachen noch für die besonders windstarken Standorte gilt. Die Ausweisung von standortabhängigen Konfidenzbereichen ist daher nicht angebracht. Man muss vielmehr konstante Werte für alle Gitterpunkte und jede Wiederkehrzeit aus den Verteilungen der Breiten der Konfidenzbereiche ableiten:



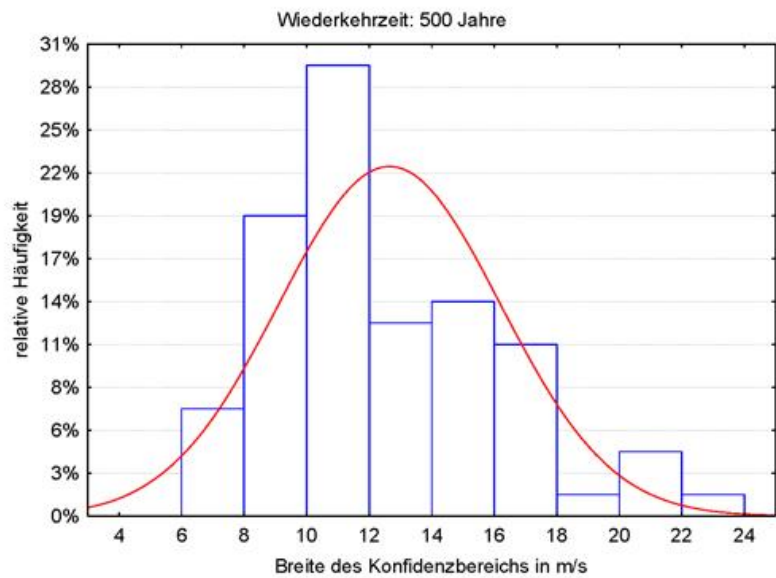
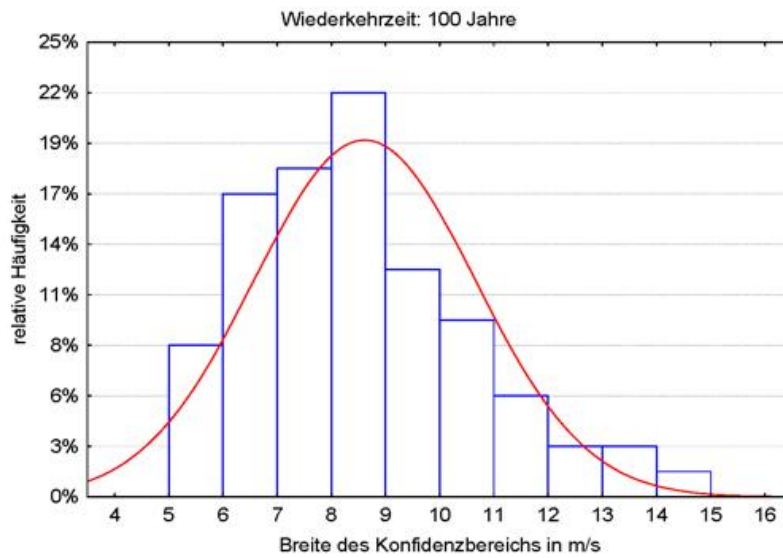
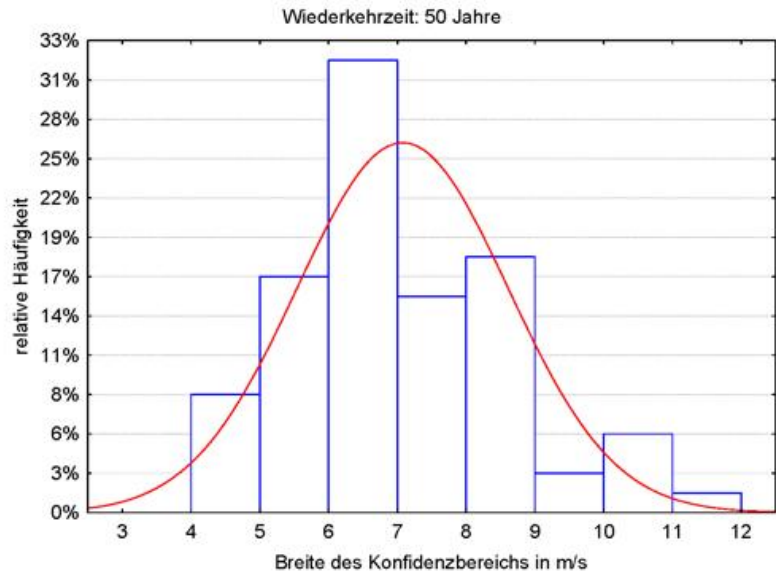


Abbildung 6-5 Häufigkeitsverteilungen der Breite des 95%-Konfidenzbereichs

Die Abbildung 6-5 zeigt diese Häufigkeitsverteilungen. Sie sind alle linksschief und es gibt jeweils einige Stationen mit auffällig großen Konfidenzbereichen, die darauf hindeuten, dass die angepasste GEV nur schlecht zu den Windmessungen passt.

Der Bereich, der für jede Wiederkehrzeit ausgewiesen wird, wird so festgesetzt, dass mindestens 80% aller hier betrachteten Standorte einen kleineren Bereich als die ausgewiesenen Werte haben. Für die Ausweisung muss außerdem die Asymmetrie berücksichtigt werden, d.h. es ist jeweils anzugeben, um wie viel der Konfidenzbereich unter- und oberhalb des Wiederkehrwertes liegt. Diese Angabe wird anhand der Häufigkeitsverteilungen der Differenzen von Wiederkehrwert und Untergrenze des Konfidenzbereichs festgelegt: Auch hier wird die Differenz zur Untergrenze so gewählt, dass 80% aller Standorte eine Differenz aufweisen, die \leq dem angegebenen Wert ist. Die entsprechenden Verteilungen sind in Abbildung 6-2 zu sehen. Die Angaben zur Obergrenze ergeben sich dann als Differenz zur Gesamtbreite. Mit diesen Vorgaben erhält man folgende Werte:

Tabelle 6-1 Konfidenzgrenzen für berechnete Wiederkehrwerte

Wiederkehrzeit	95%-Konfidenzbereich		
	Breite	Untergrenze	Obergrenze
10 Jahre	5 m/s	- 1.5 m/s	+ 3.5 m/s
50 Jahre	8 m/s	- 3.0 m/s	+ 5.0 m/s
100 Jahre	10 m/s	-3.5 m/s	+ 6.5 m/s
500 Jahre	15 m/s	-5.0 m/s	+ 10.0 m/s

6.4 Vergleich der Wiederkehrwerte

Für jede Windmessstation gibt es jetzt 2 Wiederkehrwerte: zum einen die Werte, die sich aus der angepassten GEV errechnen lassen und zum anderen die Werte, die aus den GEV-Parametern berechnet werden, die mit den Regressionsgleichungen für die Standorte bestimmt wurden. Die Güte der Regressionsgleichungen bemisst sich im Grunde nach der Übereinstimmung dieser Werte, denn das Ziel der Regressionsrechnung besteht ja in der Berechnung von Gitterpunktwerten der Wiederkehrwerte.

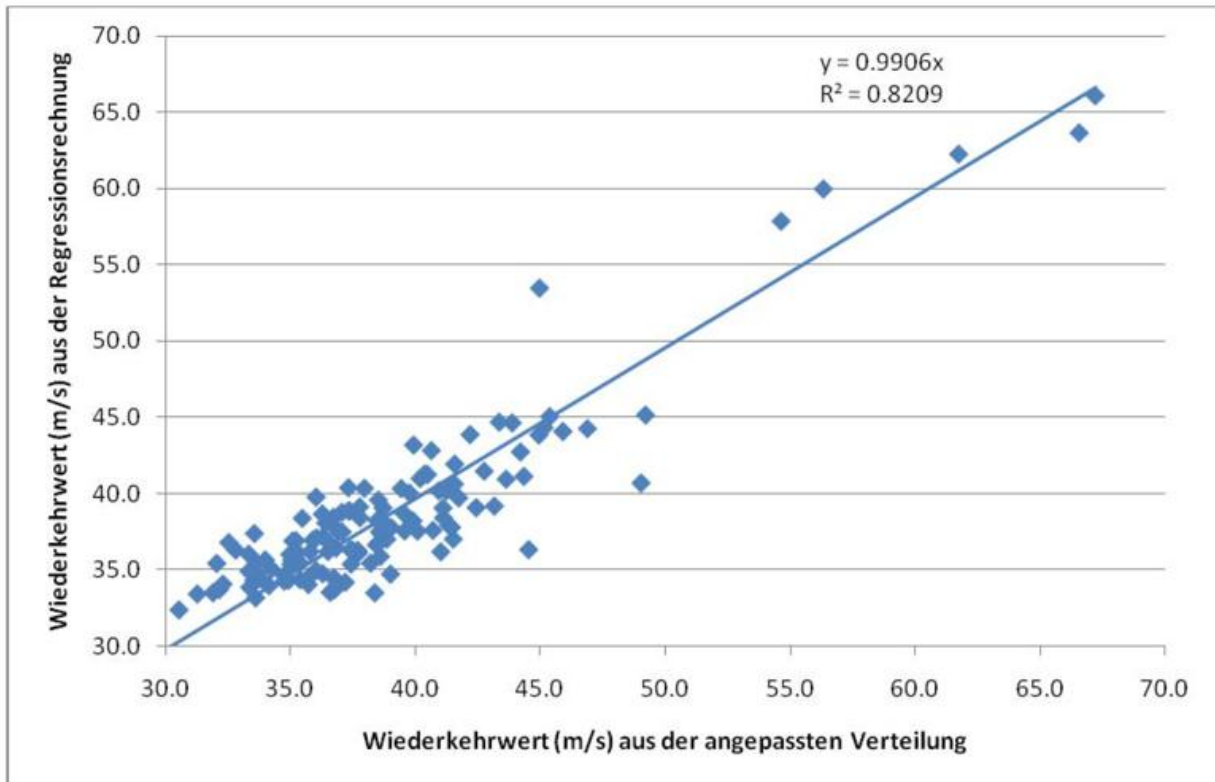


Abbildung 6-6 Korrelation berechneter und angepasster Wiederkehrwerte; Wiederkehrzeit: 50 Jahre

Die Abbildung 6-6 zeigt die Korrelation der beiden Werte. Das Bestimmtheitsmaß beträgt 82%, der Regressionskoeffizient 0.99 – die Berechnung unterschätzt die Wiederkehrwerte also etwas. In der Abbildung 6-7 werden die berechneten Wiederkehrwerte mit den Konfidenzbereichen der angepassten Werte verglichen. In 80% aller Fälle liegen die berechneten Werte innerhalb dieses Konfidenzbereichs. Wenn sie aus dem Bereich herausfallen, dann sind sie in den meisten Fällen zu niedrig. Besonders krasse Unterschiede betreffen dabei in der Regel Standorte, die bei der Aufstellung der Regressionsgleichungen ausgeschlossen wurden: Weinbiet, Werningerode, Ueckermünde. In einigen Fällen lassen sich die großen Differenzen mit der Höhe des Windgebers erklären, so z.B. für die Stationen Hohenpeißenberg und Glücksburg, wo in mehr als 30 m über Grund gemessen wird und der berechnete Wert zu klein ist. Es gibt aber durchaus auch Fälle, für die es eine derartige "Entschuldigung" nicht gibt: Für die Stationen auf der Wasserkuppe, in Halle-Kröllwitz, Seehausen und Kümmersbrück. Insgesamt kann das Ergebnis aber als hinreichend genau gelten.

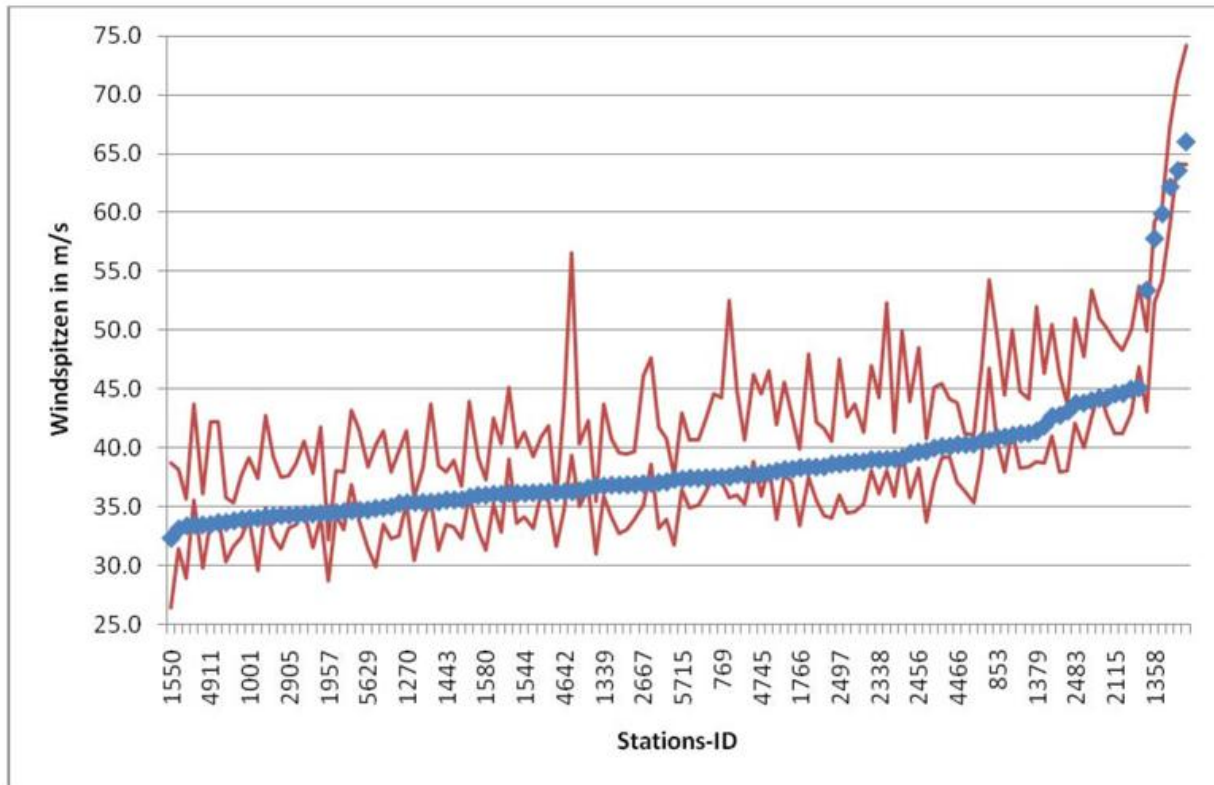


Abbildung 6-7 Vergleich der berechneten Wiederkehrwerte mit den Konfidenzbereichen für die angepassten Werte, Wiederkehrzeit: 50 Jahre

Diese Aussage trifft auch auf die Wiederkehrwerte für Wiederkehrzeiten von 10, 100 und 500 Jahren zu: Auch hier ist das Bestimmtheitsmaß hinreichend groß – insbesondere, wenn man berücksichtigt, dass auch die Stationen, die bei der Regressionsrechnung ausgeschlossen wurden, in diese Berechnung eingegangen sind. Die Wiederkehrwerte werden allerdings mit zunehmender Wiederkehrzeit stärker unterschätzt, weil sich der Einfluss des Shape-Parameters zunehmend bemerkbar macht und die berechneten Shape-Parameter (siehe Abbildung 5-6) ja einen kleinere Wertebereich einnehmen als die der angepassten GEV.

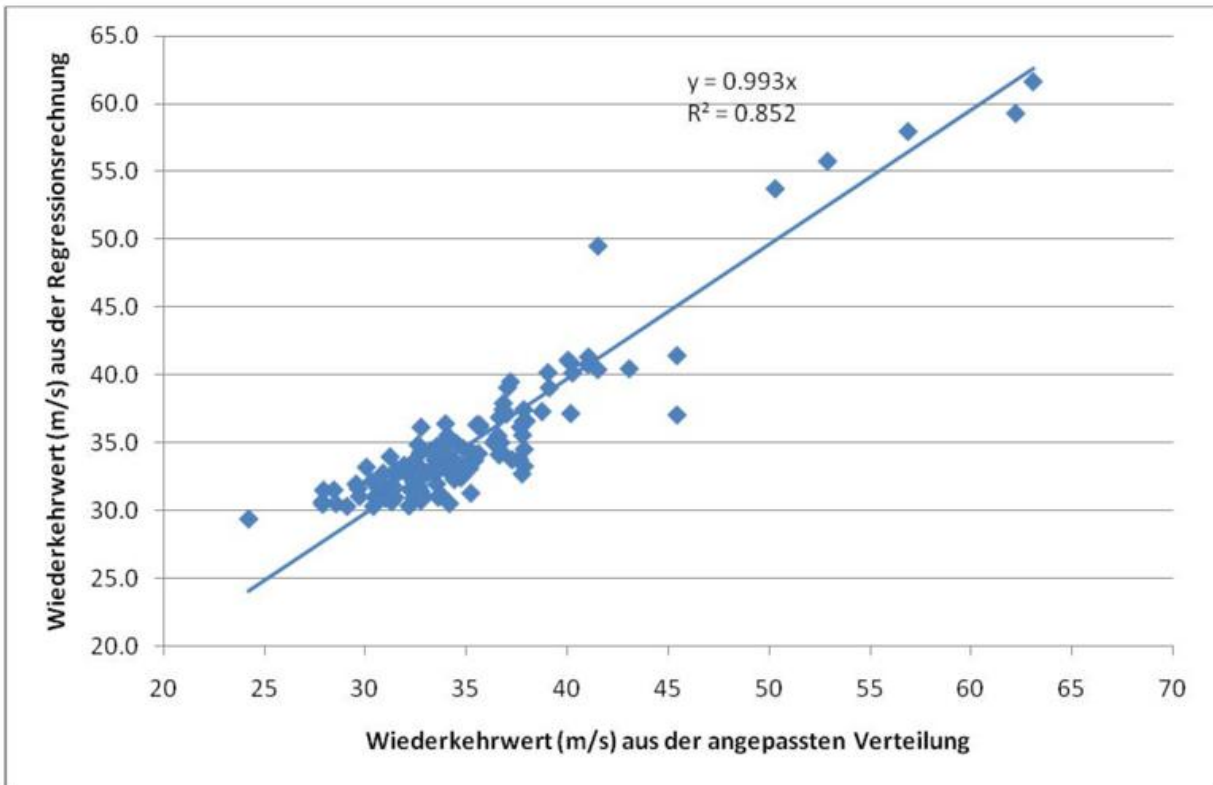


Abbildung 6-8 Korrelation berechneter und angepasster Wiederkehrwerte; Wiederkehrzeit: 10 Jahre

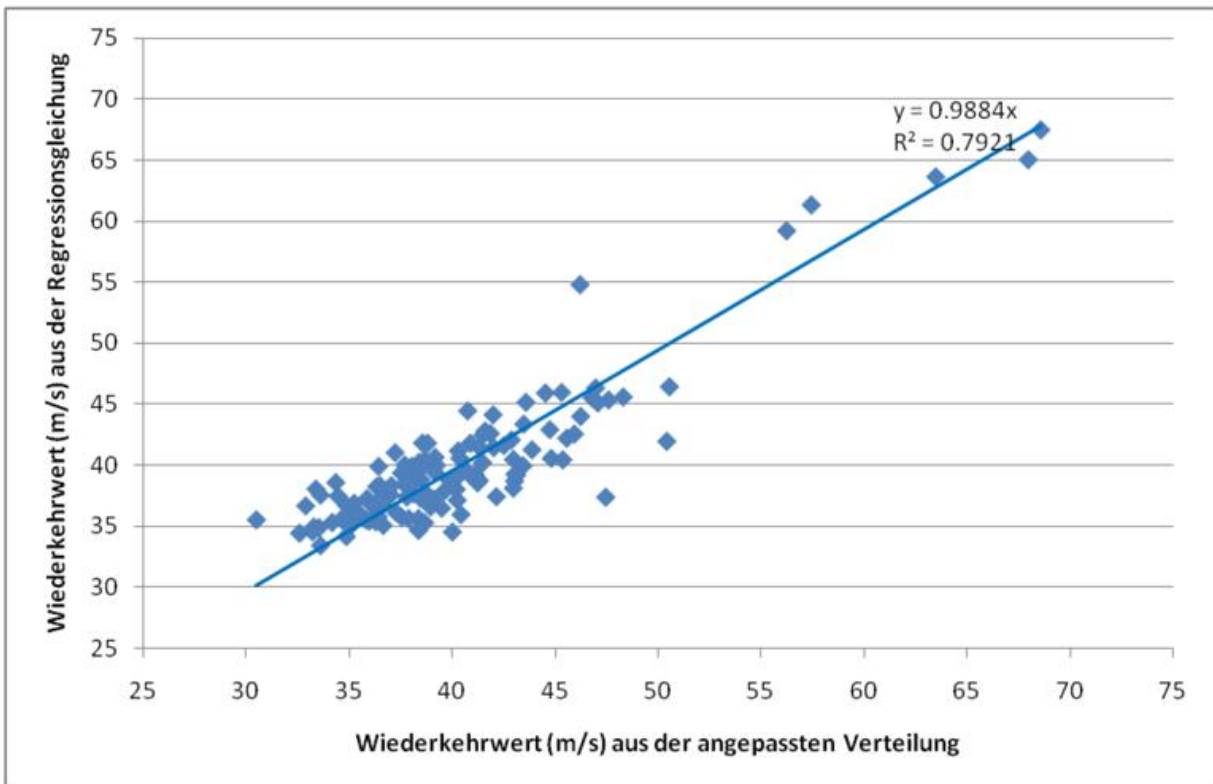


Abbildung 6-9 Korrelation berechneter und angepasster Wiederkehrwerte; Wiederkehrzeit: 100 Jahre

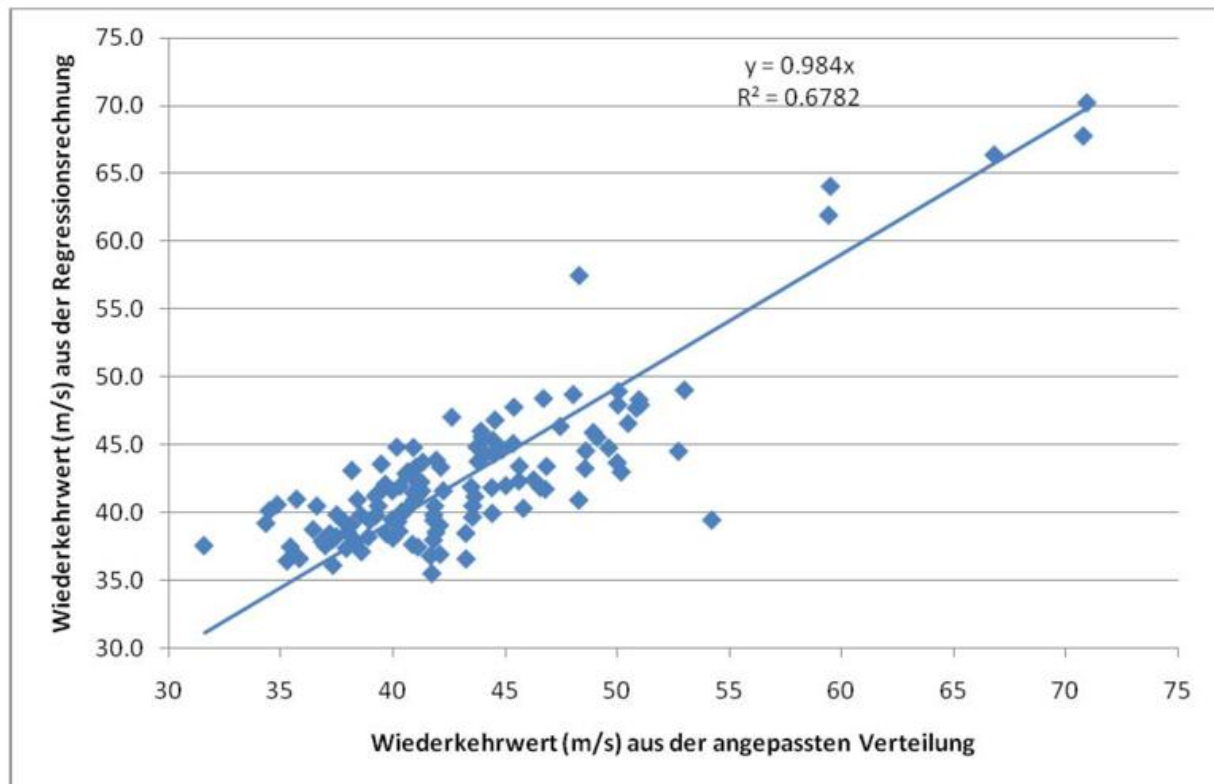


Abbildung 6-10 Korrelation berechneter und angepasster Wiederkehrwerte; Wiederkehrzeit: 500 Jahre

6.5 Klassengrenzen für die Darstellung der Wiederkehrwerte

Für den Fall, dass die Wiederkehrwerte in Kartenform mittels Klassen (z.B. in äquidistante Klassen oder in mehrere Stufen mit einer Sturmgefährdung von gering bis hoch) dargestellt werden sollen, sind aufgrund der Unsicherheit des Berechnungsverfahrens der Rasterdaten Mindest-Klassenbreiten einzuhalten.

Die Klassenbreite wird auf das zweifache des Standardfehlers, gerundet auf 1 m/s, festgesetzt. Damit ergeben sich für die Darstellung folgende Mindest-Klassenbreiten:

Tabelle 6-2 Mindest-Klassenbreiten für die Darstellung der Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit

Wiederkehrzeit	Standardfehler	Klassenbreite
10 Jahre	2.12 m/s	4 m/s
50 Jahre	2.42 m/s	5 m/s
100 Jahre	2.67 m/s	5 m/s
500 Jahre	3.40 m/s	7 m/s

Dabei sollte nach den vorliegenden Daten die erste Klassenobergrenze für die 10- bis 100-jährigen Wiederkehrwerte bei 30 m/s und für die 500-jährigen Werte bei 36 m/s liegen.

Die Klassengrenzen und die Klassenzahlen werden dann jeweils dem Wertebereich der Wiederkehrwerte angepasst. Da die Häufigkeitsverteilungen der Gitterpunktwerte sehr linksschief sind (siehe Abbildung 6-11), empfiehlt es sich, die Klassenbreiten mit der Zunahme der Wiederkehrwerte zu vergrößern.

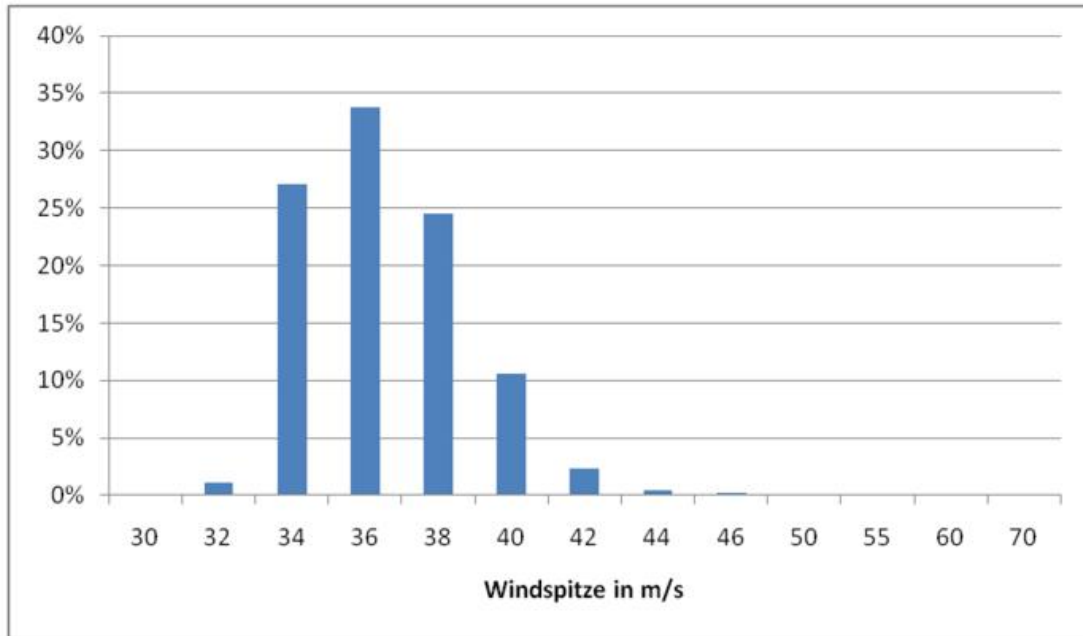


Abbildung 6-11 Häufigkeitsverteilung der Wiederkehrwerte für eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren, berechnet anhand der Gitterpunktwerte

7 Rasterdaten

7.1 Berechnungsmethode

Mit den Regressionsgleichungen aus Kapitel 5 und Gitterpunktwerten der Prediktoren lassen sich Gitterpunktwerte der drei Parameter einer GEV berechnen und aus diesen dann Wiederkehrwerte für vorgegebene Wiederkehrzeiten.

Die unabhängigen Variablen für die Regressionsrechnung sind – soweit sie Ergebnisse des SWM betreffen – anhand der Gitterpunktwerte des 200 m-Rasters dieses Modells bestimmt worden. Daher werden auch die Verteilungsparameter und Wiederkehrwerte zunächst für einen Gitterpunktabstand von 200 m berechnet und dann auf einen Gitterpunktabstand von 1000 m generalisiert.

Die Gitterpunktwerte im 1000 m-Raster müssen die Sturmgefährdung, die für die entsprechende Rasterfläche besteht, angemessen charakterisieren. Da es hier um Extremwerte und nicht – wie z.B. bei den Ergebnissen des SWM – um Mittelwerte geht, erhält man keine angemessenen Rasterdaten, wenn man die 1000 m-Rasterwerte als Mittelwerte der entsprechenden Rasterflächen des 200 m-Rasters angibt. Dieses Vorgehen kann insbesondere für Gitterflächen, die Kuppen einschließen, zu viel zu niedrigen Wiederkehrwerten führen. Dazu als Beispiel die Windspitzen mit 50-jähriger Wiederkehrzeit (m/s), die im 200 m-Raster für die Umgebung des Brocken berechnet werden:

52	54	54	52	50	50	50	48	45	36
52	54	55	54	54	54	53	52	48	37
53	56	57	57	58	58	57	56	53	47
54	56	58	60	62	62	61	59	57	51
53	56	58	62	64	64	62	60	56	51
52	54	57	60	62	64	62	59	56	49
51	52	54	57	59	60	60	58	55	49
50	51	52	53	54	56	56	55	54	50
50	49	49	48	49	50	52	52	53	52
50	48	37	37	37	46	48	50	52	53

Für den Fall, dass die Kuppe des Brockens genau auf die Mitte einer 1000 m x 1000 m-Rasterfläche fallen sollte (rot markierte Werte), erhält man für diese Gitterfläche einen Wiederkehrwert von 60 m/s, wenn man den Mittelwert benutzt. Kuppen fallen aber nicht notwendigerweise in die Mitte von Rasterflächen, für den Brocken errechnet man als Mittelwert des 200 m-Rasters tatsächlich einen Wiederkehrwert von 57 m/s – und in beiden Fällen beträgt der größte Wert des 200 m-Rasters 64 m/s. Die Messwerte der Station auf dem Brocken zeigen, dass ein Wiederkehrwert von 57 m/s für diesen Standort deutlich zu niedrig ist: Hier muss man im Mittel

alle 10 Jahre einmal mit einer Windspitze von 62 m/s rechnen! Ähnliche Ergebnisse erhält man für den Fichtelberg, den Feldberg im Schwarzwald oder die Station Stötten auf dem Schnittlinger Berg.

Wenn man also einen Gitterpunktwert, der nicht von der Lage eines besonders windgefährdeten Standortes (wie z.B. einer Kuppe) innerhalb der Gitterfläche abhängt, angeben will, dann muss man den größten Gitterpunktwert der 25 Gitterpunkte des 200 m-Rasters, die eine Rasterfläche des 1000 m-Rasters überdecken, ausgeben.

Die Rasterdaten haben einen Abstand von 1000 m und überdecken eine Fläche mit den Koordinaten (Gauß-Krüger in m, Rechtswert ist auf den Meridianstreifen 3 bezogen):

Rechtswert von 3280000 bis 3929000

Hochwert von 5230000 bis 6109000

7.2 Kartendarstellungen

Die Generalisierung der Rasterdaten ist nicht auf der Grundlage der GEV-Parameter, sondern auf der Grundlage der Wiederkehrwerte erfolgt. Daher gibt es auch nur Darstellungen dieser Werte und keine Karten, die die räumlichen Verteilungen von Location, Scale und Shape zeigen.

Abbildung 7-2 bis Abbildung 7-4 zeigen jeweils eine Kartendarstellung mit Klassenbreiten, die dem Windgeschwindigkeitsbereich der Wiederkehrwerte angepasst sind (siehe Kap. 6.5).

Alle Karten zeigen eine generelle Abnahme der Wiederkehrwerte von NW nach SO. Auch das Relief ist auf allen Karten zu erkennen, dabei hängt die Ausprägung auf den linken Karten von den gewählten Klassengrenzen ab. Man kann außerdem sehen, dass die Zunahme der Geschwindigkeit der Windspitzen mit der Höhe über NN im Osten geringer ausfällt als im Westen. So haben die Wiederkehrwerte in der Eifel dieselbe Größenordnung wie die Werte im Fichtelgebirge oder im Thüringer Wald. Nördlich der Mittelgebirge lassen sich anhand der Wiederkehrwerte keine Landschaftsformen erkennen. Hier fallen lediglich die vielen kleinen Kuppen, die die Holsteinische Schweiz und die glazial geprägte Landschaft Mecklenburg-Vorpommerns durchziehen, mit leicht erhöhten Wiederkehrwerten auf.

Dieses Resultat ist durchaus plausibel, wenn man die zugrunde liegenden atmosphärischen Vorgänge betrachtet: Durch das Relief kommt es zur Überströmung der Kuppenlagen. Damit erhöht sich bei einem gegebenen (mittleren) Luftdruckgradienten aus Kontinuitätsgründen die mittlere Windgeschwindigkeit. Für die Böen muss das jedoch nicht gelten - sie werden "unterdrückt". In den Binnenlagen, wo es keine Überströmung gibt, gibt es auch keine "Unterdrückung" der Böen. Hier können die Windspitzen deutlich höher ausfallen als die mittlere Windgeschwindigkeit und daher liefert hier die mittlere Windgeschwindigkeit nur einen vergleichsweise (im Vergleich zu den anderen unabhängigen Variablen) geringen Beitrag zur Erklärung der räumlichen Varianz der Wiederkehrwerte (siehe Regressionsgleichungen unter 5.2). Für die Stationen in Kuppenlage, die in diese Auswertungen eingegangen sind, ist die mittlere Windgeschwindigkeit hingegen diejenige Variable, die den größten Beitrag zur Erklärung der Varianz liefert und da die mittlere Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt, ergibt

sich hier eine Höhenabhängigkeit der Wiederkehrwerte, die das Relief im Bereich der Mittelgebirge und der Alpen sichtbar werden lässt.

Die Abbildung 7-5 zeigt, auf dem Unterdruck der Rasterdaten mit den Windspitzen, die eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren haben, die Eintragungswerte der Wiederkehrwerte, die aus den Extremwertverteilungen der Stationsbeobachtungen berechnet wurden. Diese Werte wurden klassiert und in derselben Farbe dargestellt wie der Unterdruck. Hier werden also nur diejenigen Werte als farbige Punkte sichtbar, die aus der Klasse der Rasterdaten herausfallen. Wenn diese Werte außerdem durchkreuzt sind, dann ist die Differenz zwischen dem Stationswert und dem Rasterwert so groß, dass der Rasterwert außerhalb des 95%-Konfidenzbereichs des Stationswertes liegt. Das trifft auf 21 der 130 Stationen zu. Diese Karte zeigt, dass die signifikanten Differenzen zwischen Stations- und Rasterwert häufiger durch zu große Rasterwerte entstehen (in 16 der 21 Fälle) und dass diese Werte vorwiegend im Bereich der Mittelgebirge nördlich des Mains zu finden sind. Sie entstehen, weil der Rasterwert im 1000 m-Raster immer der größte der 25 Rasterwerte im 200 m-Raster ist.

Die meisten der Residuen der Regressionsrechnung liegen im Bereich von ± 2 m/s, wie die Häufigkeitsverteilung dieser Werte (Abbildung 7-1) zeigt. Die drei Stationen mit Residuen von mehr als 8 m/s sind Ueckermünde, Wasserkuppe und Weinbiet. Die Daten dieser Stationen sind nicht in die Regressionsrechnung eingegangen (siehe Tabelle 5-2). Größere Residuen finden sich häufiger an Stationen auf Kuppen. Das liegt daran, dass die abhängigen Variablen für diese Geländeform einen sehr großen Wertebereich einnehmen – dann kommt es auch bei großen Bestimmtheitsmaßen, wie sie die Gleichungen für die Kuppen und den Location- und den Scale-Parameter aufweisen, zu verhältnismäßig großen Standardfehlern, die auf die Berechnung der Wiederkehrwerte durchschlagen.

Die Übereinstimmung zwischen den Stations- und den Rasterdaten ist sicherlich nicht so gut, dass sie über jede Kritik erhaben ist. Bedenkt man aber, dass die Windmessungen zum einen in unterschiedlichen Höhen über Grund vorgenommen wurden und zum anderen nicht alle aus demselben Zeitraum stammen, dann kann man auch keine perfekte Übereinstimmung der Regressionsgleichungen mit den Stationsdaten anstreben, sondern muss mit einer gewissen Unschärfe leben.

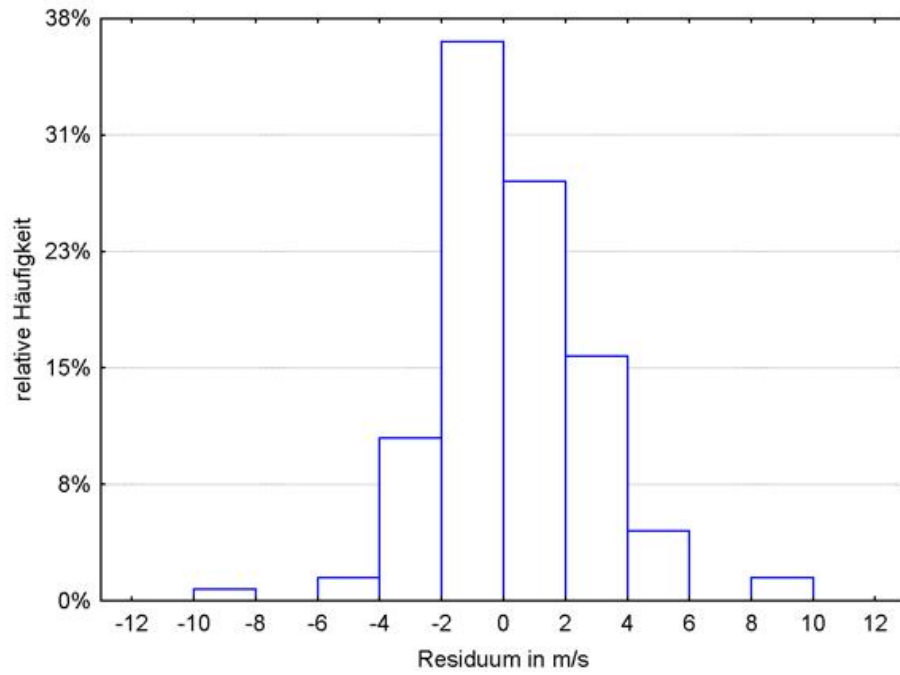


Abbildung 7-1 Häufigkeitsverteilung der Residuen der Regressionsrechnung für Windspitzen mit einer Wiederkehrzeit von 50 Jahren

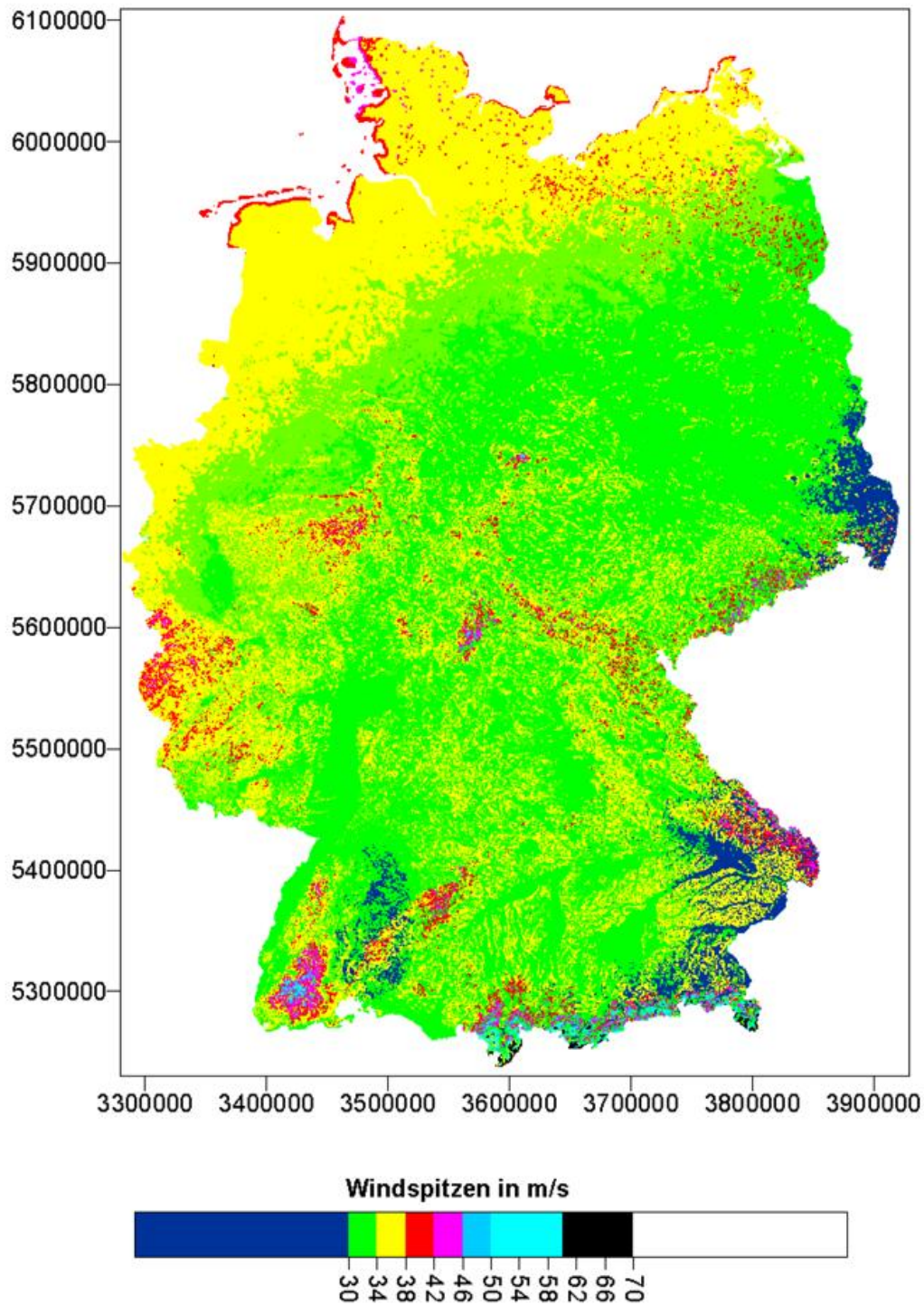


Abbildung 7-2 Windspitzen für eine mittlere Wiederkehrzeit von 10 Jahren; statistische Unsicherheit: Kartenwert -1.5 m/s bis Kartenwert +3.5 m/s (95% Konfidenzbereich)

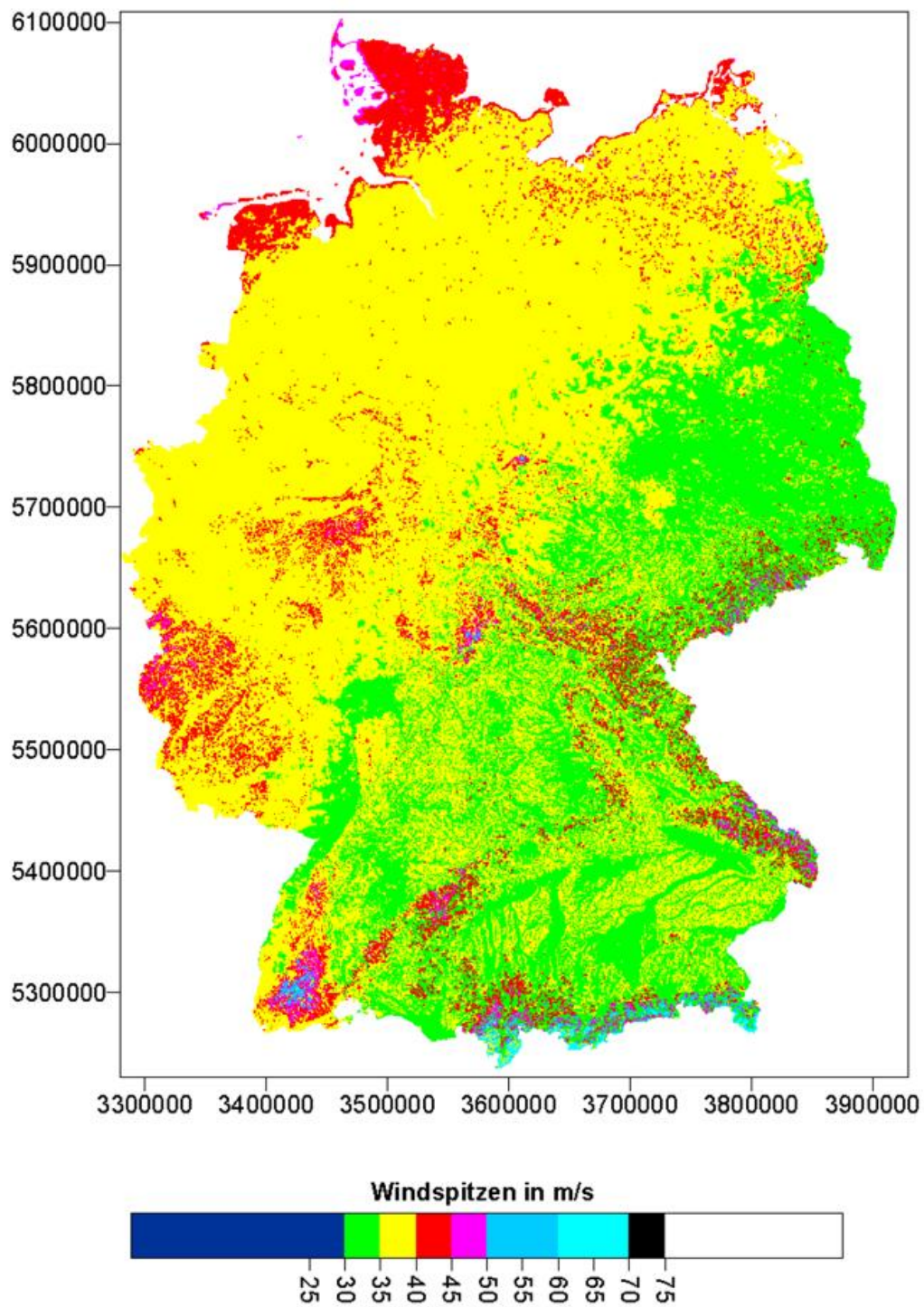


Abbildung 7-3 Windspitzen für eine mittlere Wiederkehrzeit von 50 Jahren; statistische Unsicherheit: Kartenwert -3 m/s bis Kartenwert +5 m/s (95% Konfidenzbereich)

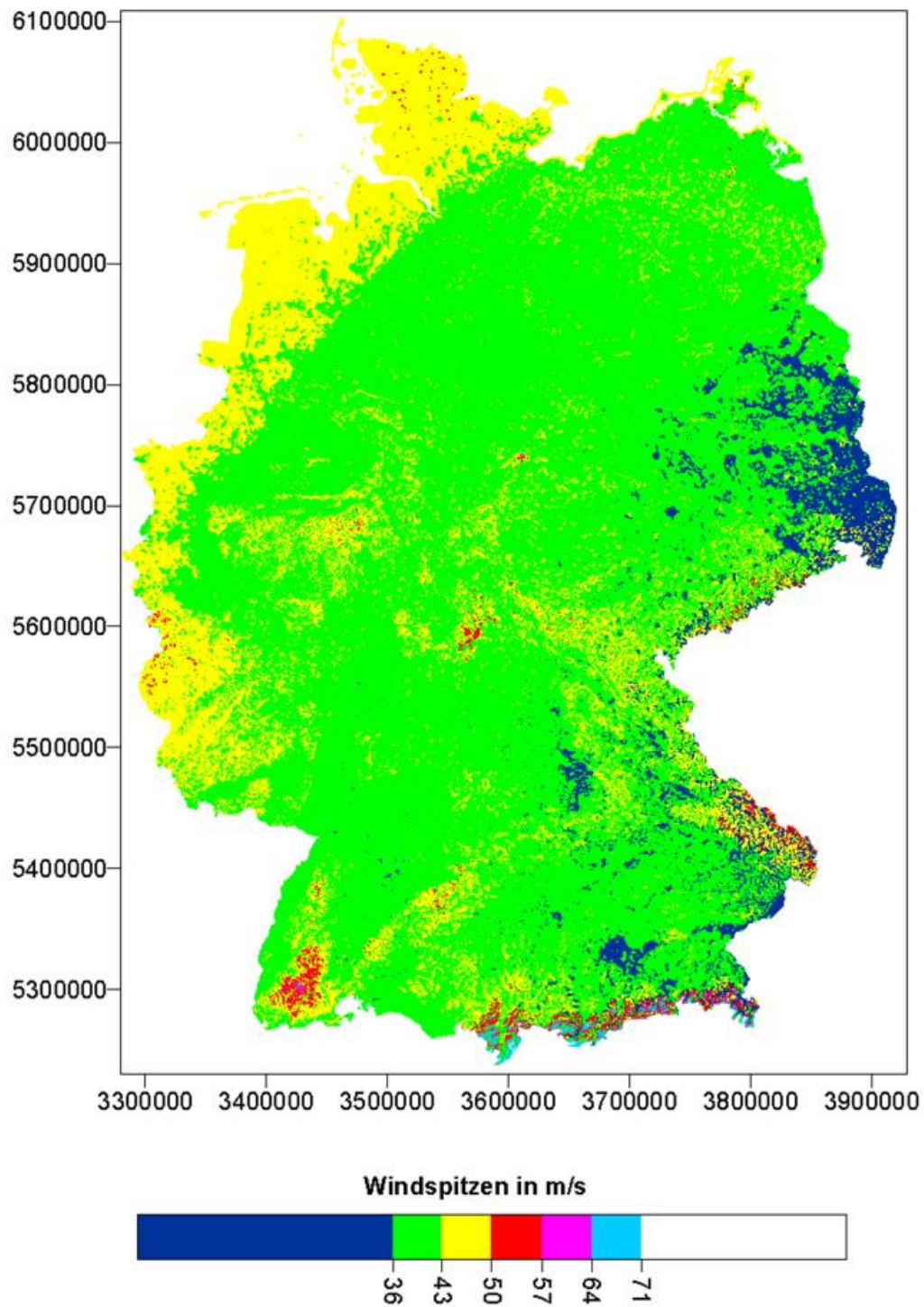


Abbildung 7-4 Windspitzen für eine mittlere Wiederkehrzeit von 500 Jahren; statistische Unsicherheit: Kartenwert -5 m/s bis Kartenwert +10 m/s (95% Konfidenzbereich)

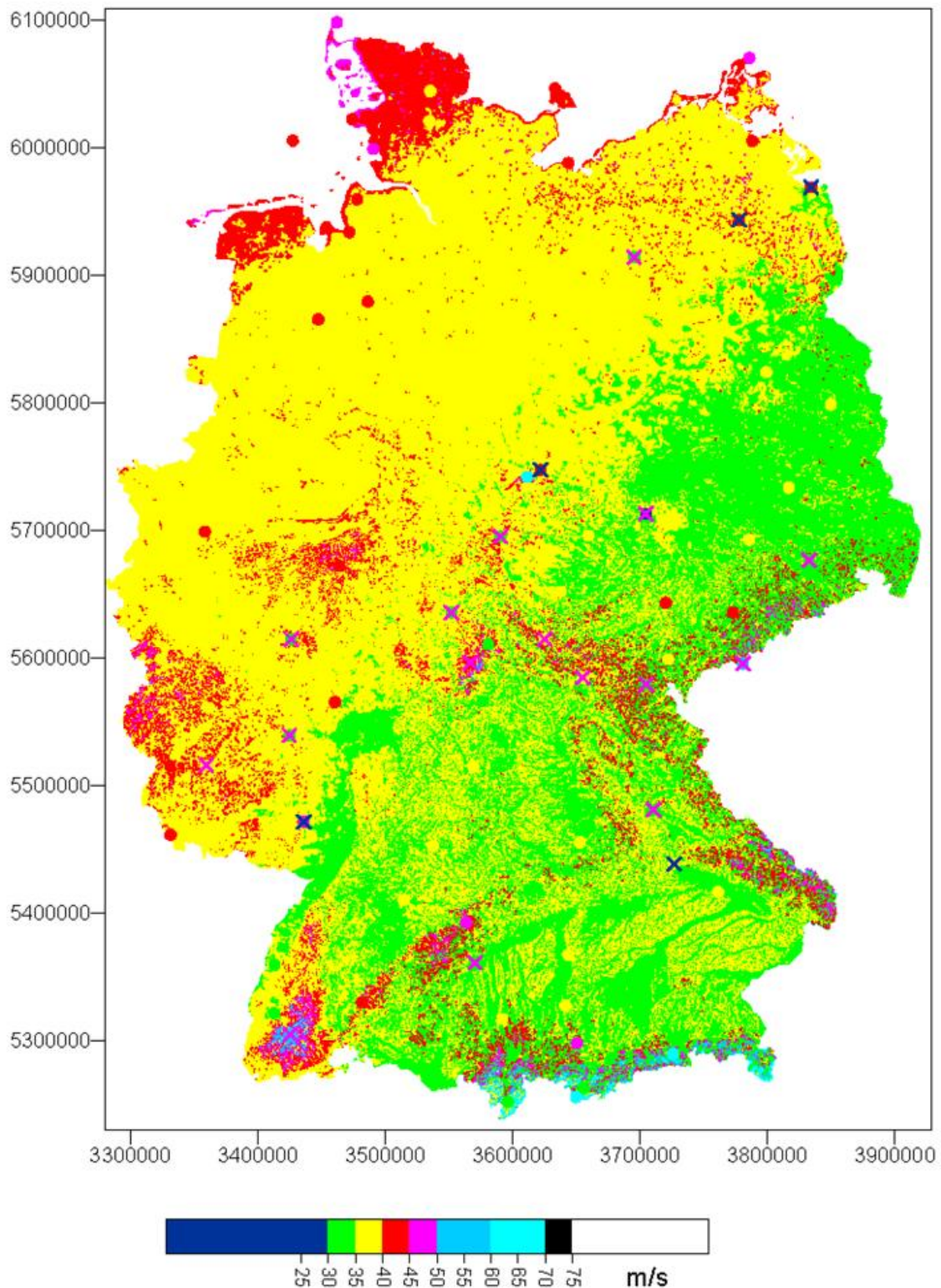


Abbildung 7-5 Vergleich der Wiederkehrwerte für eine mittlere Wiederkehrzeit von 50 Jahren

Eintragungspunkte mit klassierten Wiederkehrwerten aus den angepassten GEV, Kreuz: berechneter Wert außerhalb des 95%-Konfidenzbereichs des angepassten Wertes, magenta: Kartenwert zu groß, blau: Kartenwert zu klein. Weitere Details sind im Text erläutert.

7.3 Vergleich der Rasterdaten mit den Windspitzen aus Orkanen

Es ist selbst für Meteorologen schwierig, die Geschwindigkeit der Wiederkehrwerte einzuordnen und zu beurteilen, ob ihre Größenordnung auch dort, wo es keine Stationsdaten für die Bestimmung der Regressionsgleichungen gegeben hat, stimmt. Deshalb wurden die Windspitzen, die für eine Wiederkehrzeit von 50 Jahren berechnet wurden, mit den größten Windspitzen der stärksten Orkane (Orkane mit Windspitzen > 200 km/h, das entspricht mehr als 55.6 m/s) aus den letzten 20 Jahren verglichen. Es handelt sich dabei um folgende Orkane:

1. Vivian/Wiebkke: diese Orkane überquerten Deutschland in der Zeit vom 25.2. bis 1.3.1990. Im folgenden Text ist immer von Wiebkke die Rede.
2. Lothar: dieser Orkan hat vom 26. bis 27.12.1999 vor allem in Südwestdeutschland große Schäden angerichtet.
3. Kyrill: er ist vom 18. bis 19.1.2007 über Deutschland gezogen und war vor allem in der Mitte Deutschlands wirksam.
4. Emma: dieser Orkan überquerte Mitteleuropa vom 29.2. bis zum 2.3.2008.

Zu jedem Orkan liegen Beobachtungen von 210 bis 240 Stationen vor. Das sind deutlich mehr Stationen, als die 130, deren Daten in die Regressionsrechnung eingegangen sind.

Betrachtet man die gemessenen Windspitzen für die einzelnen Orkane, dann fällt auf, dass die räumliche Verteilung der Werte erstaunlich homogen ist: Ausreißer sind in der Regel Windspitzen, die deutlich niedriger ausfallen als die Werte in der Umgebung, Ausreißer in Richtung auffällig hoher Werte sind selten und lassen sich meist durch die Stationslage erklären

An 48 Stationsstandorten hat es Überschreitungen der Gitterpunktwerte des nächstgelegenen Gitterpunktes im 1000 m-Raster gegeben. Die Tabelle 7-1 und Abbildung 7-6 zeigen, wo und wie oft diese 4 Orkane die berechneten Wiederkehrwerte überschritten haben. Die meisten Eintragungen finden sich südlich des Mains. Sie sind den Orkanen Vivian/Wiebkke und insbesondere Lothar, der ja als "Jahrhundertorkan" bezeichnet wird, geschuldet. Die Überschreitungen an der Küste stammen ausnahmslos von Vivian/Wiebkke – diese beiden Orkane, die innerhalb von 5 Tagen Deutschland überquerten, haben also im gesamten Land zu ungewöhnlich hohen Windspitzen geführt.

Tabelle 7-1 Windspitzen der Orkane Vivian/Wiebke, Lothar, Kyrill und Emma für diejenigen Messstationen, die Messwerte oberhalb des Gitterpunktwertes der Windspitzen mit einer mittleren Wiederkehrzeit von 50 Jahren (GPW) aufweisen

ID	Name	m		GFORM*	m/s				
		Höhe			Wiebke	Lothar	Kyrill	Emma	GPW
198	Artern	164		8	29.00	21.50	39.70	32.10	37
232	Augsburg	461		0	36.00	35.80	30.70	30.50	34
766	Büchel (Flugplatz)	477		0	41.20				41
788	Büsum	7		9	45.00	21.90	34.80	28.00	44
840	Carlsfeld	897		0		28.80	35.80	27.10	34
853	Chemnitz	418		8	35.00	32.00	37.40	42.20	41
880	Cottbus	69		0	23.00	11.80	35.20	23.60	33
1078	Düsseldorf	37		0	35.00	14.20	40.30	29.00	39
1262	München-Flughafen	444		0		34.50	33.00	30.20	34
1303	Essen-Bredeneu	150		0	39.10	15.40	29.00	22.10	39
1443	Freiburg	236		0	31.30	36.40	23.90	25.90	35
1468	Freudenstadt	797		8	36.00	34.00	31.60	36.50	36
1605	Genthin	35		0	37.00	10.30	25.70	24.50	35
1666	Glücksburg-Meierwik	27		9	44.20				42
1684	Görlitz	238		0	27.00	24.30	34.30	26.80	33
1993	Hameln	66		0			37.20		37
2290	Hohenpeißenberg	977		8	47.80	48.40	45.10	40.90	46
2385	Idar-Oberstein	376		0	40.10				38
2410	Ingolstadt (Flugplatz)	364		0	39.10				34
2456	Jever	7		0	41.20				39
2522	Karlsruhe	112		0	31.10	42.50	29.50	26.70	35
2573	Waging am See-Schnöbling	470		0		35.60	46.20	37.90	38
2812	Lahr	155		0	25.70	39.90	22.60	21.30	36
2886	Laupheim	539		0	36.00				35

ID	Name	m	GFORM*	m/s				
		Höhe		Wiebke	Lothar	Kyrill	Emma	GPW
2905	Lechfeld	550	0	34.50				34
2907	Leck	7	0	43.20	15.40	28.60	27.80	42
3245	Memmingen (Flugplatz)	630	0	36.00				35
3366	Mühldorf	405	0	33.50	33.20	38.30	38.40	34
3639	Nordholz (Flugplatz)	25	0	41.20				40
3761	Öhringen	276	0	32.10	34.50	30.50	26.30	34
3879	Passau-Oberhaus	409	2	37.20				32
4104	Regensburg	365	0	37.00	33.70	31.90	15.80	33
4225	Roding-Wetterfeld	373	0		26.90	28.50	34.40	34
4336	Saarbrücken-Ensheim	320	0	37.30	35.60	29.60	28.10	37
4887	Stötten	734	8	37.60	49.50	37.00	36.00	45
4911	Straubing	351	0	31.90	34.50	28.80	25.90	33
4928	Stuttgart (Schnarrenberg)	314	8	36.30	38.70	29.90	29.70	36
4931	Stuttgart-Echterdingen	371	0	34.10	39.80	25.70	27.20	34
5226	Vilgertshofen	708	0		34.90			34
5404	Weihenstephan-Dürnast	477	0		35.50			34
5426	Weinbiet	553	8	44.90	50.70	45.40	36.70	41
5467	Wendelstein	1832	8	73.70	71.90	56.30	62.00	65
5490	Wernigerode	234	0	28.00	19.50	38.10	28.80	36
5715	Wunstorf	57	0	37.10				37
5906	Mannheim	96	0	36.00	28.40	27.30	27.90	35
6096	Altmühlsee	416	0		35.50	33.20	35.40	35
6102	Lindau (SWN)	397	0		37.90	23.90	25.50	35
7369	Feuchtwangen-Heilbronn	475	0				36.20	35

* GFORM – Geländeform: 0 – Ebene, 2 – Tal, 8 – Kuppe, 9 – Küste

Die Werte in der Tabelle 7-1 zeigen, dass der Gitterpunktwert in den meisten Fällen nur von einem der 4 Orkane überschritten wird und oft auch nur um einen geringen Betrag. In 7 der 48 Fälle lagen die gemessenen Windspitzen mehr als 5 m/s über den zugehörigen Gitterpunktwerten (blaue Zahlen) und damit außerhalb des Bereichs der statistischen Unsicherheit (95% Konfidenzbereich).

An den Stationen Mühldorf, Weinbiet und Wendelstein sind bei mehr als einem dieser Orkane Windspitzen aufgetreten, deren Geschwindigkeiten deutlich über dem zugehörigen Gitterpunktwert liegen. Hier handelt es sich ausnahmslos um Stationen mit problematischen Messbedingungen und/oder inhomogenen Beobachtungsreihen. Mühldorf und Weinbiet sind aus diesem Grunde bei der Regressionsrechnung nicht berücksichtigt worden. Die Messungen auf dem Wendelstein wurden trotz der erheblichen Inhomogenität der Reihe, die durch eine Veränderung der Messhöhe über Grund im Jahre 1986 ausgelöst wurde, berücksichtigt, weil es keine andere Station in vergleichbarer Lage gibt. Allerdings fallen die Windspitzen, die bei den vier betrachteten Orkanen an dieser Station gemessen wurden, doch deutlich aus dem Rahmen: Sie sind durchweg höher als die Werte, die auf der Zugspitze gemessen werden. Gleichzeitig ist aber die mittlere Windgeschwindigkeit des Zeitraumes 1971 bis 2008 auf dem Wendelstein niedriger (um 1 m/s) als auf der Zugspitze. Hier zeigt sich, dass es in Einzelfällen Einflüsse der Stationsumgebung auf die Windspitzen geben kann, die durch die Regressionsgleichungen nicht erfasst werden.

Insgesamt zeigt dieser Vergleich der Orkanwindspitzen mit den Gitterpunktwerten, dass die hier berechneten Wiederkehrwerte realistisch sind.

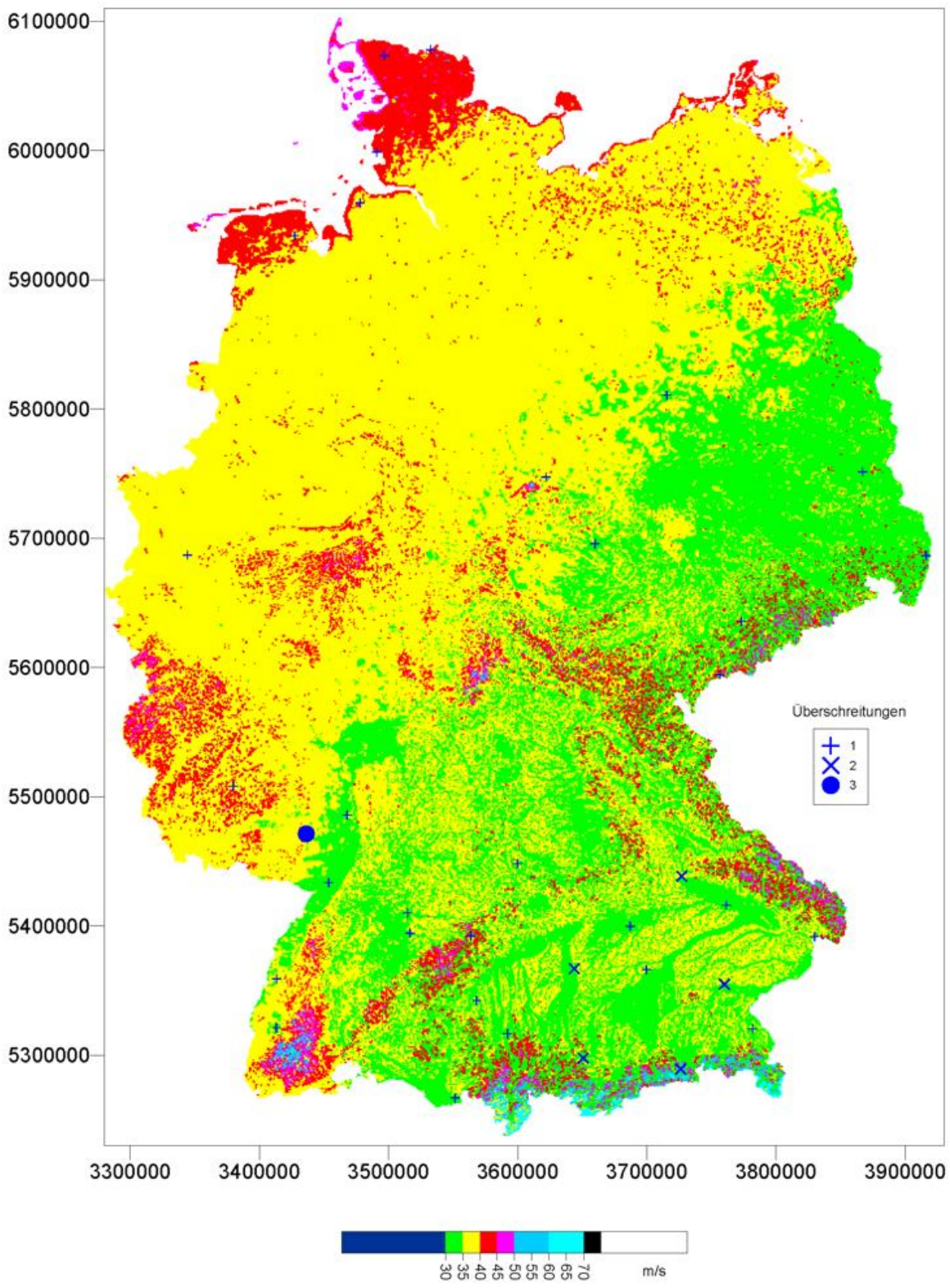


Abbildung 7-6 Anzahl der Überschreitungen des 50-jährigen Wiederkehrwertes der Windspitzen durch die Windspitzen der Orkane Vivian/Wiebke, Lothar, Kyrill und Emma

8 Schlussbemerkung

Es gibt verschiedene Skalen, die Windgeschwindigkeiten mit den Auswirkungen, die diese auf natürliche Strukturen oder Bauwerke haben, verknüpfen: Beaufort, TORRO oder Fujita (Dotzek, 2009). Sollen anhand dieser Skalen die Auswirkungen, die mit den dargestellten Windgeschwindigkeiten verbunden sind, beschrieben werden, dann ist immer zu berücksichtigen, dass sich die Windgeschwindigkeiten, die in diesen Skalen angegeben sind, i.d.R. auf ein 10-Minuten-Mittel der Windgeschwindigkeit beziehen, während es sich bei den Windspitzen um 3-Sekunden-Mittelwerte handelt. Diese betragen in etwa das 1,4-fache der 10-Minuten-Mittel.

Zwischen dem Abschluss der Untersuchung zur Sturmgefährdung in Deutschland und der Fertigstellung des vorliegenden DWD-Berichts ist ein knappes Jahr vergangen. Seitdem

- wurden nachträglich die Rasterdaten für eine Wiederkehrzeit von 5 Jahren berechnet. Angaben zu den Unsicherheiten dieser Daten sind dem DWD-Informationsblatt „*Karten der Sturmgefährdung für Deutschland*“ im Anhang zu entnehmen.
- hat das BBK dem Deutschen Bundestag einen „*Bericht über die Methode zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2010*“ vorgelegt, in dem am Beispiel der Sturmgefährdungskarten gezeigt wird, wie eine gezielte Unterstützung der Risikoanalyse möglich ist (Deutscher Bundestag, 2010).
- erstellte der Deutsche Wetterdienst 5 Sturmgefährdungskarten auf Basis der hier berechneten Rasterdaten sowie ein Informationsblatt. Die Karten und das Informationsblatt befinden sich im Anhang dieses Berichts. Die in Kapitel 7.2 gezeigten Karten sind als Entwürfe zu verstehen.

9 Literatur

- Coles, Stuart (2001): An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer Verlag, London, 208 Seiten
- Deutscher Bundestag (2010): Bericht über die Methode zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2010; 17. Wahlperiode; Drucksache 17/4178
- Dotzek, N., 2009: Derivation of physically motivated wind speed scales. Atmospheric Research 93, 564–574.
- DWD (2010): Windkarten und Winddaten für Deutschland. Bezugszeitraum 1981 – 2000. Informationsblatt (siehe Anhang)
- Gerth, W.-P.; Christoffer, J (1994): Windkarten von Deutschland, Meteorologische Zeitschrift, N.F. 3
- Gerth, W.-P., M. Roos, G. Augter (2008): Aktualisierung der Frostgefährdung im Straßenbau. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Heft 1002, 32 S.
- Gilleland, Eric, Rick Katz and Greg Young (2009): extRemes: Extreme value toolkit. R package version 1.60. <http://www.assessment.ucar.edu/toolkit/>
- Goldstein, Jenna, Jean-Daniel Langlois, Milena Dimitrijevic, Malik Sadoud, Vincent David (2008): Approaches for Extreme Wind Speed Assessment, 7th World Wind Energy Conference (WWEC2008) - June 2008
- Harris, R.I. (1999): Improvements to the "Method of Independent Storms", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 80; 1-30
- P. Heneka, T. Hofherr, B. Ruck und C. Kottmeier (2006): Winter storm risk of residential structures – model development and application to the German state of Baden-Württemberg. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 6, 721–733, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/721/2006/
- ISMEV (2009): Original S functions by Stuart Coles, R port and R documentation files by Alec Stephenson. (2009). ismev: An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. R package version 1.33. <http://www.ral.ucar.edu/~ericg/softextreme.php>
- Jensen, M. und N. Franck 1970: The Climate of Strong Winds in Denmark, Kopenhagen: Danish Technical Press
- Kasperski, M. (2002): A new wind zone map of Germany, J. Wind Eng. Ind. Aerod., 90, 1271–1287
- M. Klawa und U. Ulbrich (2003): A model for the estimation of storm losses and the identification of severe winter storms in Germany. Natural Hazards and Earth System Sciences 3, 725–732
- Perrin, O., H. Rootzen und R. Taesler (2006): A discussion of statistical methods used to estimate extreme wind speeds, Theor. Appl. Climatol. 85, 203–215

R Development Core Team (2008): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

Simiu, E., N. A. Hecker (1995): Extreme Wind Distribution Tails: A 'Peaks Over Threshold' Approach, NIST BUILDING SCIENCE SERIES 174, 71 Seiten

Anhang

Informationsblatt: Windkarten und Winddaten für Deutschland, Bezugszeitraum 1981 – 2000

Informationsblatt: Karten der Sturmgefährdung für Deutschland

Karte der Sturmgefährdung in Deutschland, Mittlere Wiederkehrzeit: 5 Jahre

Karte der Sturmgefährdung in Deutschland, Mittlere Wiederkehrzeit: 10 Jahre

Karte der Sturmgefährdung in Deutschland, Mittlere Wiederkehrzeit: 50 Jahre

Karte der Sturmgefährdung in Deutschland, Mittlere Wiederkehrzeit: 100 Jahre

Karte der Sturmgefährdung in Deutschland, Mittlere Wiederkehrzeit: 500 Jahre

Windkarten und Winddaten für Deutschland

Bezugszeitraum 1981 – 2000

Das Statistische Windfeldmodell (SWM) bildet die Grundlage für die Windkarten und –daten der Bundesrepublik Deutschland. Anhand von 218 Windmessstationen des Deutschen Wetterdienstes wurde die räumliche Verteilung des Jahresmittels der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren, wie z. B. der Höhe über dem Meeresspiegel, der geographischen Lage, der Geländeform und der Landnutzung mittels statistischer Verfahren bestimmt.

Zusätzlich wurden die Stationsmesswerte hindernisbereinigt, das heißt der Einfluss von Einzelhindernissen auf die gemessene Windgeschwindigkeit wurde ausgeschaltet. Das Verfahren ist im Europäischen Windatlas beschrieben. Mit Hilfe eines Rechenprogramms werden die Ergebnisse für den neueren Bezugszeitraum 1981 bis 2000 im 200-m-Raster berechnet und in Windkarten umgesetzt. Mit dem SWM werden zwischen den gemessenen und den berechneten Windgeschwindigkeiten im Mittel Abweichungen von ± 0.15 m/s erzielt.

Die Windkarten im DIN-A3-Format zeigen die mittlere jährli-

che Windgeschwindigkeit in den Standardhöhen 10 m bzw. 80 m über Grund. Während in den Bundeslandkarten die Windgeschwindigkeit im 200-m-Raster dargestellt ist, wurden für die BRD-Karten die Winddaten auf ein 1-km-Raster generalisiert. Zusätzlich zu den DIN-A3-Karten stehen für die mittlere Windgeschwindigkeit Poster für Deutschland im Maßstab 1:1 Mio. zur Verfügung.

Gemäß dem Charakter von klimatologischen Größen, sind die Grenzen von Klimakarten nicht als fest, sondern als räumlich fließend anzusehen. Der Übergang von einer Windgeschwindigkeitsklasse in die andere ist daher nicht als eine räumlich exakt vorgegebene Grenze zu interpretieren, sondern als der Mittelpunkt eines mehr oder weniger breiten Streubereichs, in dem sich der Übergang zwischen den Klassen vollzieht.

Die Mittelwerte der Windgeschwindigkeit zwischen 10 m und 100 m und zusätzlich auch die der Weibullparameter für jeweils 10 m und 80 m über Grund liegen im 200-m-Raster sowie im generalisierten 1-km-Raster flächendeckend für Deutschland vor. Diese Daten sind komplett, bundeslandweise oder in

Ausschnitten verfügbar. Die Daten orientieren sich am Gauß-Krüger-Koordinatensystem und werden im ASCII-Code und auf Wunsch GIS-kompatibel geliefert.

HINWEIS FÜR WINDENERGIE-NUTZER:

Die Windkarten und –daten ermöglichen eine Abschätzung der Größenordnung des zu erwartenden Windenergieertrags. Sie liefern somit erste Anhaltspunkte, wo eine Windenergienutzung sinnvoll sein kann. Für die Errichtung von Windenergiekonvertern wird zur Absicherung der Wirtschaftlichkeitsberechnungen ein standortbezogenes Windgutachten empfohlen.

Literaturhinweise:

Europäischer Windatlas, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1990 .

Windkarten von Deutschland, W.-P. Gerth und J. Christoffer, Meteorologische Zeitschrift, N.F. 3, 67-77, 1994.

Kontakt

Deutscher Wetterdienst
Abteilung Klima- und Umweltberatung
Postfach 10 04 65

63004 Offenbach

Telefon: 0 69 / 8062 2990
Telefax: 0 69 / 8062 2993
E-Mail: klima.offenbach@dwd.de
www.dwd.de/windkarten
www.dwd-shop.de/klima

Karten der Sturmgefährdung für Deutschland

Windspitzen für Wiederkehrzeiten von 5, 10, 50, 100 und 500 Jahren

WIEDERKEHRZEIT

Die vorliegenden Sturmkarten für Deutschland zeigen Windspitzen (Böenwindgeschwindigkeit im Mittelungsintervall 3 Sekunden), deren Auftreten im Mittel einmal in 5, 10, 50, 100 oder 500 Jahren (Wiederkehrzeit) zu erwarten ist. Die Karten basieren auf Rasterwerten mit einem Gitterpunktabstand von 1 km.

GRUNDLAGEN

Die Windspitzen für extrem lange Wiederkehrzeiten (Wiederkehrwerte) können nicht direkt aus den Messdaten entnommen werden, da sie nicht für ausreichend lange Zeiträume vorliegen. Sie müssen vielmehr anhand vorhandener Messdaten geschätzt werden. Dazu bedient man sich der Extremwertanalyse, die Methoden zur Extrapolation seltener Ereignisse aus den Beobachtungswerten liefert. Aussagen zum Einfluss des Klimawandels auf diese Ereignisse sind damit allerdings nicht möglich.

Grundlage zur Berechnung der Wiederkehrwerte bilden die gemessenen Tageswindspitzen von 130 Stationen des Deutschen Wetterdienstes aus dem Zeitraum 1971 bis 2008. Die Häufigkeitsverteilung der Jahreswindspitzen lässt sich durch eine generalisierte Extremwertverteilung, die an alle Tageswindspitzen oberhalb eines Schwellenwertes angepasst wird, beschreiben.

Der Deutsche Wetterdienst hat bereits Karten der mittleren Windgeschwindigkeiten und Weibull-Parameter für Deutschland erstellt (siehe www.dwd.de/windkarten). Voruntersuchungen zeigten einen Zusammenhang zwischen dem Extremwindklima und dem Mittelwindklima. So konnten die Parameter der generalisierten Extremwertverteilung mit Hilfe von Regressionsgleichungen (u.a. in Abhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit, des Form-Parameters der Weibullverteilung, der geographischen Lage, der Geländeform und -rauigkeit) für jeden Gitterpunkt berechnet werden. Hieraus resultieren

schließlich die 1-km-Rasterwerte der Windspitzen für die verschiedenen Wiederkehrzeiten.

UNSIKERHEITEN

Gemäß den angewandten statistischen Verfahren sind die in den Karten abgebildeten Windspitzen mit Unsicherheiten behaftet. Aus den Regressionsrechnungen resultiert der Standardfehler. Die Breite des Konfidenzbereichs, in dem der Wiederkehrwert mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit liegt, ist ein Maß für die Güte der angepassten Extremwertverteilungen. Je größer die betrachtete Wiederkehrzeit, desto größer sind die Unsicherheiten der berechneten Windspitzen:

Wiederkehrzeit	Standardfehler	95%-Konfidenzbereich	
		Untergrenze	Obergrenze
5 Jahre	±2,0 m/s	-1,5 m/s	+2,0 m/s
10 Jahre	±2,0 m/s	-1,5 m/s	+3,5 m/s
50 Jahre	±2,5 m/s	-3,0 m/s	+5,0 m/s
100 Jahre	±2,5 m/s	-3,5 m/s	+6,0 m/s
500 Jahre	±3,5 m/s	-5,0 m/s	+11,0 m/s

ERGEBNISSE

Auf allen Karten nehmen die Windspitzen generell von NW nach SO ab. Im norddeutschen Flachland gibt es kaum räumliche Unterschiede. Das Relief der Mittelgebirge und der Alpen ist anhand der größeren Wiederkehrwerte gut zu erkennen.

Ein Vergleich der stärksten Orkane der vergangenen 2 Jahrzehnte mit den Rasterwerten der 50-jährigen Wiederkehrzeit zeigt, dass die berechneten Windspitzen realistisch sind.

HINWEIS

Die Karten entstanden mit Unterstützung des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe in Bonn.

Kontakt

Deutscher Wetterdienst
Abteilung Klima- und Umweltberatung
Postfach 100465
63004 Offenbach

Telefon: 069/8062-2990
Telefax: 069/8062-2993
klima.offenbach@dwd.de
www.dwd.de/klima

Sturmgefährdung in Deutschland

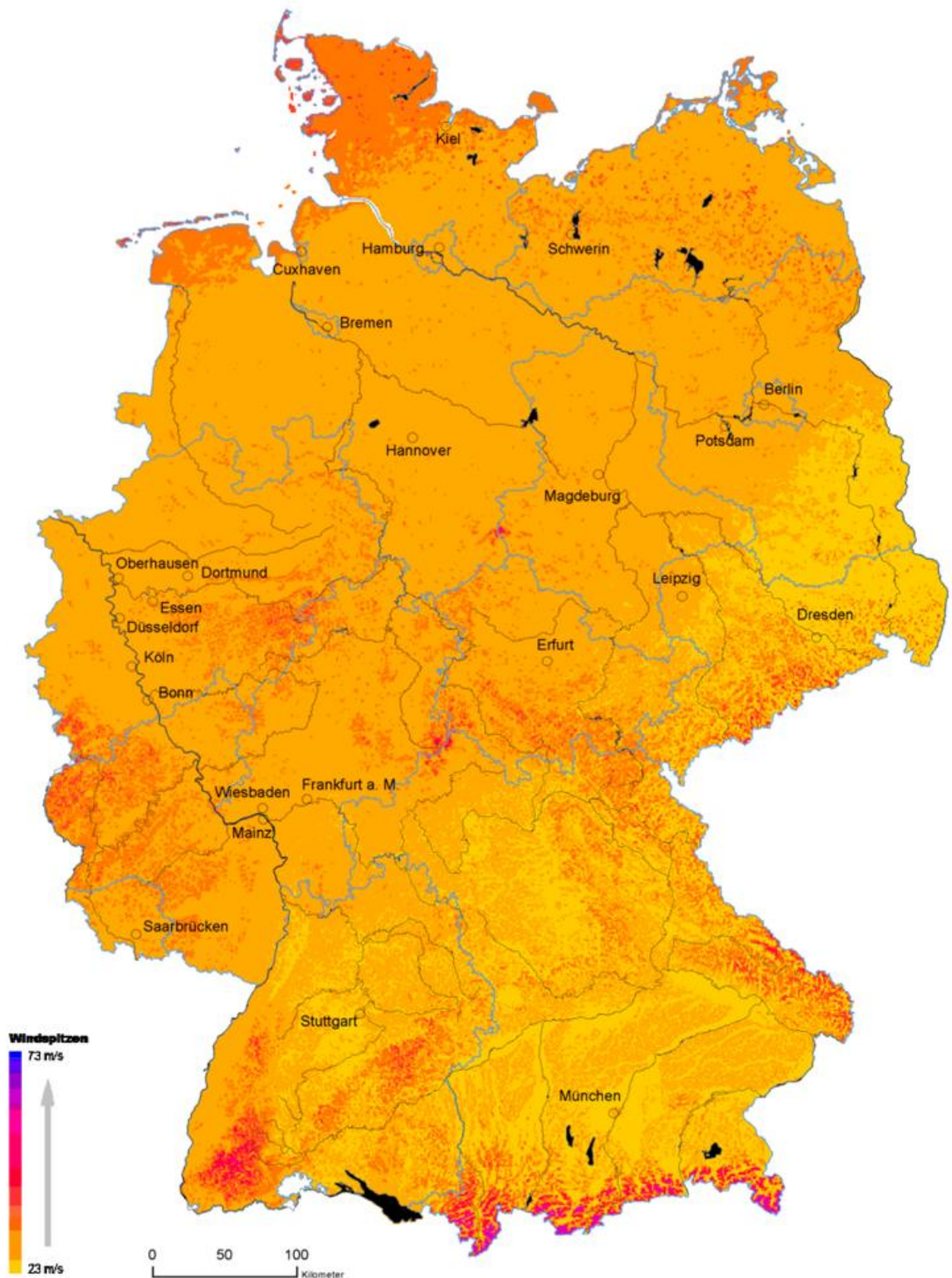
Mittlere Wiederkehrzeit: 5 Jahre



Die Karte zeigt Windspitzen (Böengeschwindigkeit im Mittlungsintervall 3 Sekunden), deren Auftreten im Mittel einmal in 5 Jahren (Wiederkehrzeit) zu erwarten ist. Die Karte basiert auf Rasterwerten mit einem Gitterpunkt-
abstand von 1 km. Der Konfidenzbereich, in dem jeder Rasterwert mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit liegt, hat die Untergrenze -1,5 und die Obergrenze +2,0 m/s.

Sturmgefährdung in Deutschland

Mittlere Wiederkehrzeit: 10 Jahre



Die Karte zeigt Windspitzen (Böengeschwindigkeit im Mittelungsintervall 3 Sekunden), deren Auftreten im Mittel einmal in 10 Jahren (Wiederkehrzeit) zu erwarten ist. Die Karte basiert auf Rasterwerten mit einem Gitterpunkt-
abstand von 1 km. Der Konfidenzbereich, in dem jeder Rasterwert mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit liegt, hat die Untergrenze -1,5 und die Obergrenze +3,5 m/s.

Sturmgefährdung in Deutschland

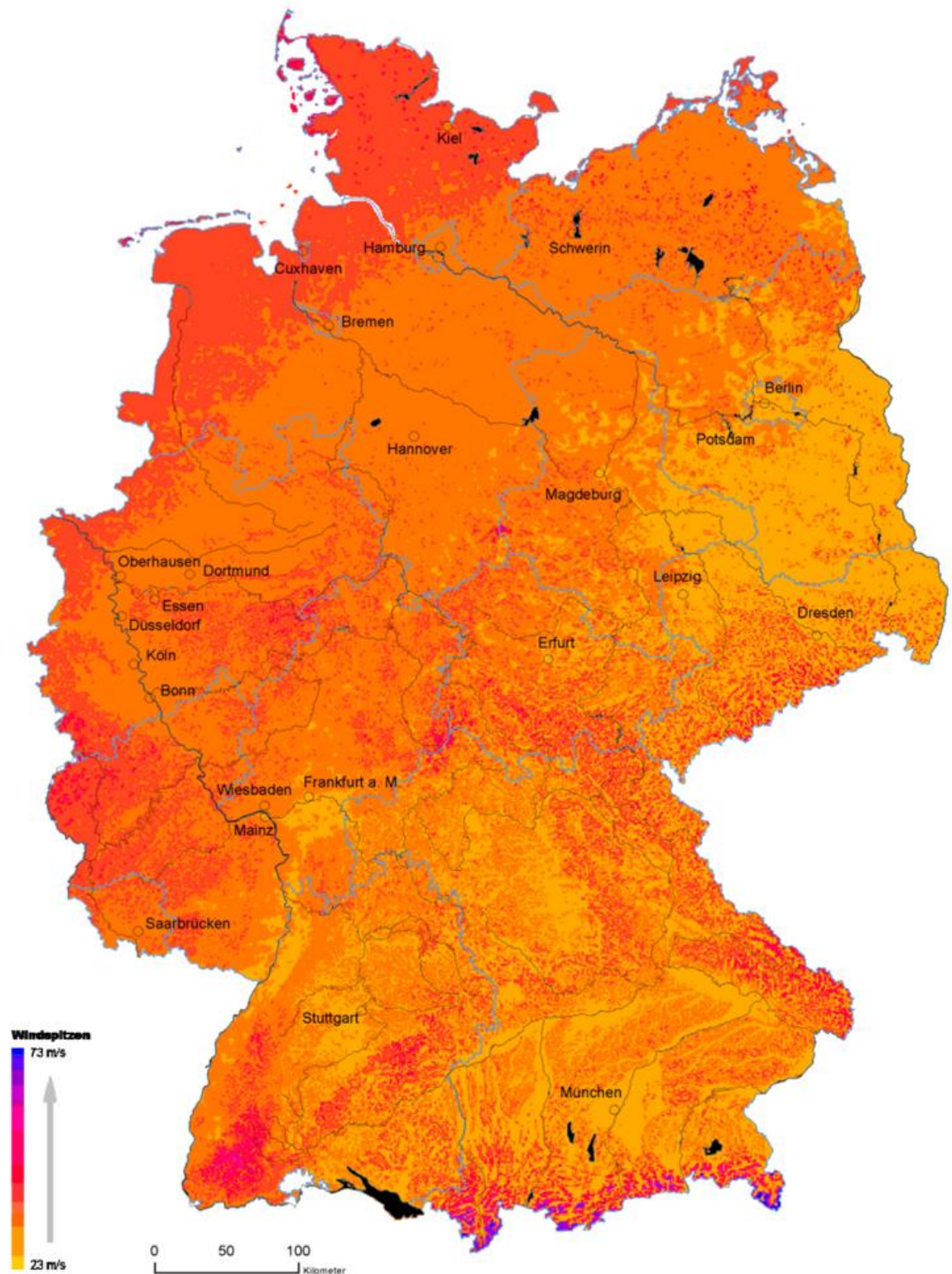
Mittlere Wiederkehrzeit: 50 Jahre



Die Karte zeigt Windspitzen (Böengeschwindigkeit im Mittelungsintervall 3 Sekunden), deren Auftreten im Mittel einmal in 50 Jahren (Wiederkehrzeit) zu erwarten ist. Die Karte basiert auf Rasterwerten mit einem Gitterpunkt-
abstand von 1 km. Der Konfidenzbereich, in dem jeder Rasterwert mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit liegt, hat die Untergrenze $-3,0$ und die Obergrenze $+5,0$ m/s.

Sturmgefährdung in Deutschland

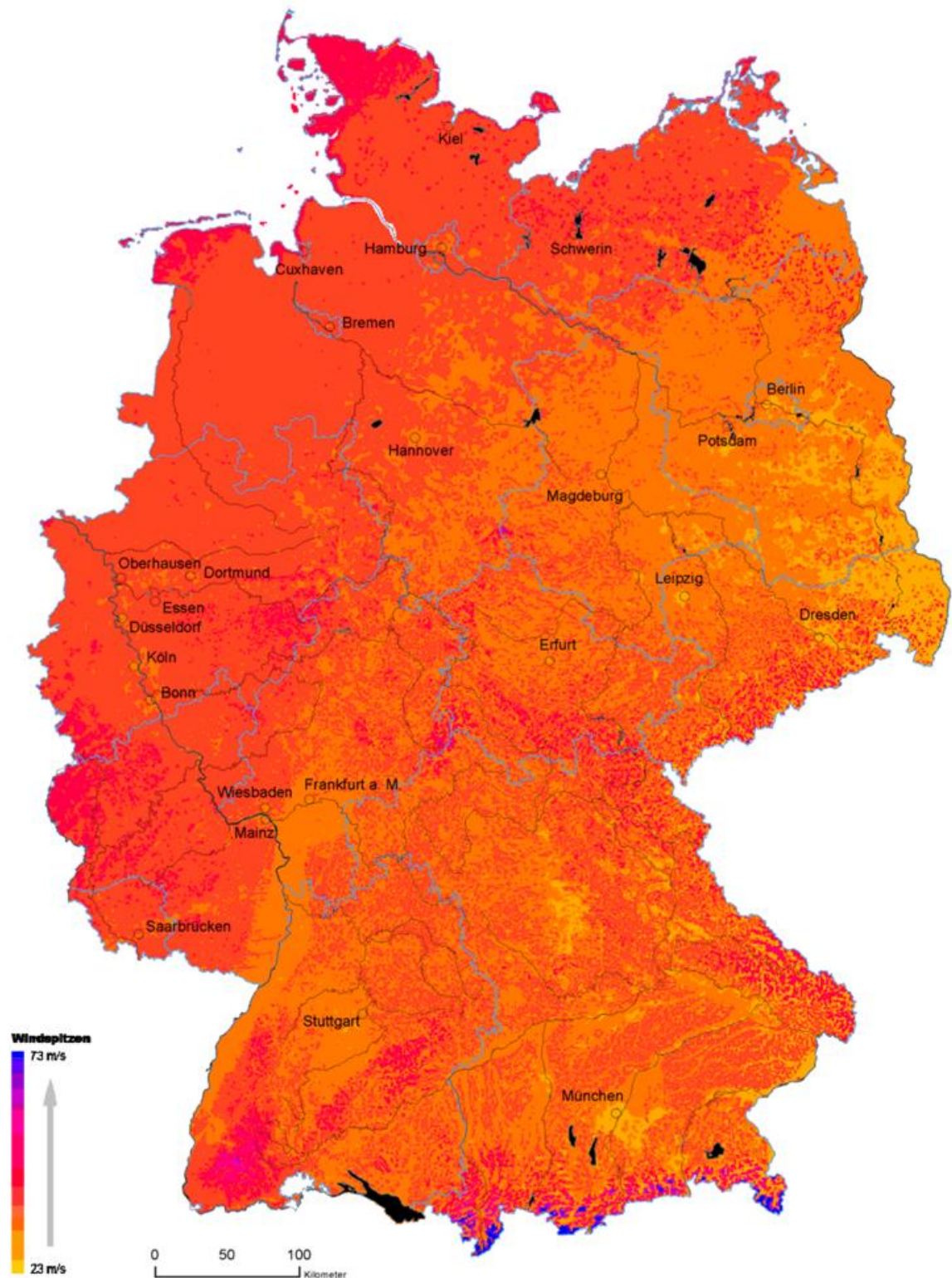
Mittlere Wiederkehrzeit: 100 Jahre



Die Karte zeigt Windspitzen (Böengeschwindigkeit im Mittlungsintervall 3 Sekunden), deren Auftreten im Mittel einmal in 100 Jahren (Wiederkehrzeit) zu erwarten ist. Die Karte basiert auf Rasterwerten mit einem Gitterpunktabstand von 1 km. Der Konfidenzbereich, in dem jeder Rasterwert mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit liegt, hat die Untergrenze $-3,5$ und die Obergrenze $+6,5$ m/s.

Sturmgefährdung in Deutschland

Mittlere Wiederkehrzeit: 500 Jahre



Die Karte zeigt Windspitzen (Boengeschwindigkeit im Mittlungsintervall 3 Sekunden), deren Auftreten im Mittel einmal in 500 Jahren (Wiederkehrzeit) zu erwarten ist. Die Karte basiert auf Rasterwerten mit einem Gitterpunktabstand von 1 km. Der Konfidenzbereich, in dem jeder Rasterwert mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit liegt, hat die Untergrenze $-5,0$ und die Obergrenze $+10,0$ m/s.

Berichte des Deutschen Wetterdienstes

- Nr. 237 B. Früh, M. Koßmann, M. Roos:
Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung
- Nr. 236 G. Augter, M. Roos:
Berechnung von Sturmintensitäten für Deutschland
- Nr. 235 U. Maier, G. Müller-Westermeier:
Verifikation klimatologischer Rasterfelder
- Nr. 234 W. Riecke, G. Rosenhagen:
Das Klima in Hamburg : Entwicklung in Hamburg und der Metropolregion
- Nr. 233 P. Winkler:
Wissenschaftshistorische Untersuchungen zur Geschichte und insbesondere zur Datenqualität der langen meteorologischen Reihen des Observatoriums Hohenpeißenberg
- Nr. 232 H.-J. Heinemann:
Eine Winterchronik : die Kälte der Winter von 1960/61 bis 2007/08
- Nr. 231 A. Kolodziej:
Klimawandel in Sachsen-Anhalt: Auswirkungen auf die phänologischen Phasen wildwachsender Pflanzen
- Nr. 230 F. Beyrich, W. K. Adam:
Site and Data Report for the Lindenberg Reference Site in CEOP-Phase I
- Nr. 229 U. Maier u.a.:
Klimatologische Auswertungen von Zeitreihen der Monatsmittel von Temperaturminima und Temperaturmaxima im 20. Jahrhundert
- Nr. 228 B. Tinz, P. Hupfer:
Die thermischen Verhältnisse im Bereich der deutschen Ostseeküste unter besonderer Berücksichtigung des Bioklimas und der Eisverhältnisse
- Nr. 227 U. Sievers:
Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 : theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells
- Nr. 226 C. Koppe:
Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse
- Nr. 225 S. Trepte, P. Winkler:
Rekonstruktion der UV-Strahlung am Hohen Peißenberg und in Würzburg ab 1968 unter Berücksichtigung der langfristigen Veränderungen von Gesamt ozon, Bewölkung und atmosphärischer Trübung
- Nr. 224 C. Leifeld:
Weiterentwicklung des Nowcastingsystems ADWICE zur Erkennung vereisungsgefährdeter Lufträume
- Nr. 223 U. Maier u.a.:
Klimatologische Auswertungen von Zeitreihen des Monatsmittels der Lufttemperatur und der monatlichen Niederschlagshöhe im 20. Jahrhundert
- Nr. 222 P. Lange u.a.:
KONRAD – Ein operationelles Verfahren zur Analyse von Gewitterzellen und deren Zugbahnen, basierend auf Wetterradarprodukten
- Nr. 221 Gaßmann, A.:
Numerische Verfahren in der nichthydrostatischen Modellierung und ihr Einfluß auf die Güte der Niederschlagsvorhersage
- Nr. 220 Kurz, M.:
Die Dezemberstürme 1999
- Nr. 219 K. Blümel u.a.:
Hydrometeorologische Untersuchungen zum Problem der Klimaveränderungen
- Nr. 218 A. Walter:
Zur Anwendung neuronaler Netze in der Klimatologie
- Nr. 217 J. Ballach:
Entwicklung und Absicherung leistungsfähiger Analyseverfahren zur Bestimmung von Benzol und Ruß in der Lufthygiene
- Nr. 216 W. Janssen, R. Sedlatschek:
Ablauf der Datenprüfung und –vervollständigung im Geschäftsfeld Landwirtschaft
- Nr. 215 U. Kaminski u.a.:
Qualitätssicherung von Meßreihen, Untersuchungen zu Sammelverlusten eines Berner Niederdruck-Impaktors
- Nr. 214 P. Winkler u.a.:
Beobachtungen am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg während der Sonnenfinsternis vom 11.8.1999
- Nr. 213 G. Kluge, G. Müller-Westermeier:
Das Klima ausgewählter Orte der Bundesrepublik Deutschland: Jena
- Nr. 212 J. Rapp:
Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland
- Nr. 211 F. Fricke u.a.:
Filterung luftchemischer Meßreihen im Alpenraum zur Charakterisierung ihrer Repräsentanz. GAW-DACH-Projekt
- Nr. 210 W. Steinbrecht, P. Winkler:
Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Ozon und Temperatur in der Stratosphäre
- Nr. 209 U. Görsdorf:
Genauigkeit und Verfügbarkeit von Windprofiler/RASS-Messungen
- Nr. 208 W. Höhne:
Komponenten automatischer meteorologischer Meßsysteme
- Nr. 207 S. Tilmes:
Verfahren zur Analyse von Messungen atmosphärischer Spurengase mit dem Ziel der Assimilation in Chemie-Transportmodellen
- Nr. 206 D. Spänkuch:
Climatology of Total Ozone Measurements 1964 – 1997 at Potsdam, Based on Re-evaluated Dobson Series
- Nr. 205 H. Berresheim:
Beiträge zur Rolle des natürlichen Schwefelkreislaufs in der Atmosphäre
- Nr. 204 U. Kohler u.a.:
Spectral and Integral Observations of UV-B-Radiation and Ozone Measurements