

Maximal möglicher Niederschlag über einem Mittelgebirge

A. Raabe, M. Wilsdorf und M. Barth

Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig
(raabe@uni-leipzig.de)

Zusammenfassung

Hier wird ein Verfahren beschrieben, das den Einfluss der Geländestruktur auf die Niederschlagsmenge, speziell bei Starkniederschlagsereignissen, abbildet.

Die physikalischen Prozesse, die in der Atmosphäre zu einer Niederschlagsbildung führen, sind an die Hebung der feuchtegesättigten Luftmassen u.a. an Gebirgshängen gebunden. Diese Niederschlagsbildungsprozesse weisen aus, dass es umso mehr regnet, je stärker das Gelände an Höhe gewinnt und nicht je höher das Gelände liegt. Das Ziel des beschriebenen Verfahrens ist die Abschätzung des flächengemittelten **Maximal Möglichen Niederschlages** (fMMN) bei vorgegebenen meteorologischen Bedingungen und einer variablen Orografie einer Landschaft. Dieser fMMN setzt sich aus einem an die synoptischen Prozesse gebundenen Niederschlagsanteil (sMMN) und einem aus den orografischen Verhältnisse resultierenden Anteil (oMMN) zusammen. Um die Variabilität der Niederschlagsmengen in Bezug auf die Orografie der Landschaft zu zeigen wird hier ein Niederschlagsverstärkungsfaktor F_{RR} als eine Verhältniszahl zwischen fMMN und sMMN eingeführt. Diese Verhältniszahl kann mit realen Niederschlagsereignissen verglichen werden. Das Verfahren wird exemplarisch für eine Region des mittleren Erzgebirges validiert und steht so für andere Mittelgebirgsregionen zur Verfügung.

Abstract

Here, a method is described to calculate the influence of terrain to the amount of precipitation, especially under heavy rainfall conditions.

The physical processes which generate rainfall in the atmosphere are coupled to the slope of the terrain. These precipitation processes indicate that it will rain the more the steeper the slope of the terrain is. As a result, it rains most where the terrain height varies greatly especially during heavy rain events.

The aim of the method described is the estimation of the maximum possible precipitation (MMN) for given meteorological conditions and a variable orography. As an example, the method is validated applied here to a region of the central Erzgebirge and is now usable for other low mountain regions.

1. Das Verfahren zur Berechnung des maximal möglichen Niederschlages

Auf grundsätzliches Interesse stößt die Frage nach der maximal möglichen Niederschlagsmenge, die in einer bestimmten Zeit bei gegebenen klimatischen Verhältnissen auf einen Landschaftsausschnitt fallen kann. Danach richten sich u.a. Aussagen zum Hochwasserschutz bzw. zur Wassernetzbewirtschaftung.

Im Wesentlichen gibt es zwei Möglichkeiten, die wahrscheinlich größte Niederschlagsmenge abzuschätzen.

Auf der Basis von beobachteten Niederschlagsmengen unter Anwendung statistischer Methoden um auf maximale Regenmengen zu schließen. Oder auf der Basis der Abschätzung des maximal möglichen Niederschlages unter Verwendung von Berechnungsmethoden die auf einer Maximierung der physikalischen Prozesse beruhen, die zu einer Niederschlagsbildung in der Atmosphäre führen.

Das erste Vorgehen benötigt die Beobachtung der Niederschlagsmengen über einen langen Zeitraum. Ergebnisse solcher Untersuchungen sind z.B. der bei Wiesner, 1970 dargestellt Zusammenhang zwischen maximaler beobachteter Regenmenge und der Regenereignisdauer. Auch die Abschätzung von maximierten Gebietsniederschlagshöhen verschiedener Dauerstufen unter Verwendung jahrzehntelanger Niederschlagsbeobachtungen, wie sie Schmidt, 1997 für das Gebiet von Deutschland vorstellt.

Die zweite Methode sucht nach dem atmosphärischen Zustand (Temperatur, Feuchte, Strömungsverhältnisse) der für sich genommen in dem betrachteten Gebiet ein maximales Niederschlagspotenzial aufweist. Es werden also die aus Wetterbeobachtungen vorliegenden physikalischen Größen (Temperatur, Feuchte, Wind) einer Maximierung zugeführt, auf deren Grundlage der Niederschlag dann in der Atmosphäre entsteht. Für die Abschätzung wird also ein Atmosphärenzustand benötigt, der im betrachteten Gebiet nicht wärmer und nicht feuchter sein kann. Diese dann in Bewegung gesetzte Luftmasse neigt zu einem Maximum an Regenwasserbildung, wenn diese aus welchem Grund auch immer in die Höhe gehoben wird – wie das z.B. am Hang eines Mittelgebirges der Fall ist. Vorteilhaft kann diese Methode auch sein, wenn z.B. im Zusammenhang mit zurückliegenden historischen Hochwasserereignissen keine Niederschlagsmengen bekannt sind, der Atmosphärenzustand allerdings aus überlieferten Angaben recht gut rekonstruierbar ist (s. z.B. Tetzlaff et al., 2002)

Hier wird diese zweite Methode verwendet, um die maximale Niederschlagsmenge abzuschätzen, die auf einen bestimmten Landschaftsausschnitt fällt.

Neben der Kenntnis der vertikalen Luftmassenstruktur muss diese Methode verschiedene Niederschlagsentstehungsprozesse berücksichtigen.

1. Die Regenmengen, die durch die großräumige meteorologischen Verhältnisse – sog. synoptische Verhältnisse – entstehen und

2. die Regenmengen, die lokal aufgrund der besonderen Situation der Geländestructur – Orografie – des Landschaftsausschnittes entstehen.

Beiden Prozessen liegt zugrunde, dass es eine extrem warme und feuchtegesättigte Luft gibt, die gezwungen wird aufzusteigen, als Folge der

- zu.1. großräumigen Auftriebsbewegungen in der Atmosphäre aufgrund der meteorologischen Verhältnisse (wie diese z.B. innerhalb von Tiefdruckgebiet herrschen) oder
zu. 2. Hebung der feuchtegesättigten Luftmasse an orografischen Hindernissen (z.B. Gebirgshängen).

Basierend hierauf kann eine Aussage zu dem maximal möglichen Niederschlag (MMN) getroffen werden, wenn die Gesamt-Hebungsgeschwindigkeit $w(z) + \Delta w$ der Luft proportional

- zu 1. zur zeitlichen Änderung des synoptischen Druckverhältnisse $\Delta p / \Delta t$ (700hPa.Fläche)

$$\Delta w = - \frac{\Delta p / \Delta t}{\bar{\rho}(z) \cdot g} \cdot \exp\left[\frac{-z}{11000m}\right], \quad (1)$$

(mit $\bar{\rho}(z)$ als mittlere Luftdichte der gehobenen Luftschicht und g der Schwerebeschleunigung),

- zu 2. zur horizontalen Windgeschwindigkeit v_{hor} und zum Anstieg $\Delta h / \Delta x$ der Landschaft über eine Strecke von z.B. $\Delta x = 1km$ hinweg:

$$w(z) = v_{hor} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta x} \cdot \exp\left[\frac{-z}{11000m}\right], \quad (2)$$

in die Abschätzung einbezogen wird.

Für beider Größen Δw und $w(z)$ wird dabei berücksichtigt, dass sich die Hebungsgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe z nur zum Teil (exponentiell abnehmend) auf den regenmengenerzeugenden Prozess auswirkt. Eine solche Reduzierung zeigt sich in den Wettermodellen, die die vertikale Struktur der Atmosphäre detailliert beschreiben und ist von dort abgeleitet (Zimmer et al., 2006).

Beide Teile der Gesamthebungsgeschwindigkeit sind somit Maximalwerte und unter natürlichen Bedingungen nicht erreichbar. Die dann generierbare maximal mögliche Regenmenge MMN an einem Ort x , an dem die Geländehöhe über eine Strecke Δx um einen Höhe Δh zunimmt lässt sich ermitteln, indem man die maximale Hebungsgeschwindigkeit der Luft und die höhenabhängige Änderung der Sättigungsfeuchte $\Delta q_{sätt}(z) = q_{sätt}(z + \Delta h) - q_{sätt}(z)$ miteinander verknüpft.

$$MMN(x) = \bar{\rho}(z) \cdot w(x) \cdot \Delta q_{sätt}(z) \cdot \Delta t + \bar{\rho}(z) \cdot \Delta w \cdot \Delta q_{sätt}(z) \cdot \Delta t \quad \left[\frac{kg}{m^2} = mm \right]$$

$$MMN(x) = oMMN(x) + sMMN \quad (3)$$

$$fMMN = foMMN + sMMN$$

Der flächengemittelte maximal mögliche Niederschlag (fMMN) setzt sich dabei entsprechend der obigen Angaben aus dem flächengemittelten orographischen maximal möglichen Niederschlag (foMMN) und dem synoptischen maximal möglichen Niederschlag (sMMN) zusammen (vgl. Abbildung 1). Beschrieben ist dieses Verfahren zum berechnen des fMMN bei Tetzlaff und Raabe (1999).

Die höhenabhängige Feuchteverteilung in der Atmosphäre, aus der dann die hebungsbedingte Änderung der Sättigungsfeuchte $\Delta q_{sätt}(z)$ in der entsprechenden Höhe z ermittelt wird, wird dabei über ein vorgegebenes Temperatur- und Taupunktprofil berechnet.

Das Temperatur- und Taupunktprofil muss dafür eine Atmosphärenstruktur repräsentieren, bei der im Untersuchungsgebiet tatsächlich extrem starker Niederschlag aufgetreten ist. Diese Profile können durch Auswertung von Klimabeobachtungen ermittelt werden (vgl. Zimmer et al., 2006, s. Abbildung. 3).

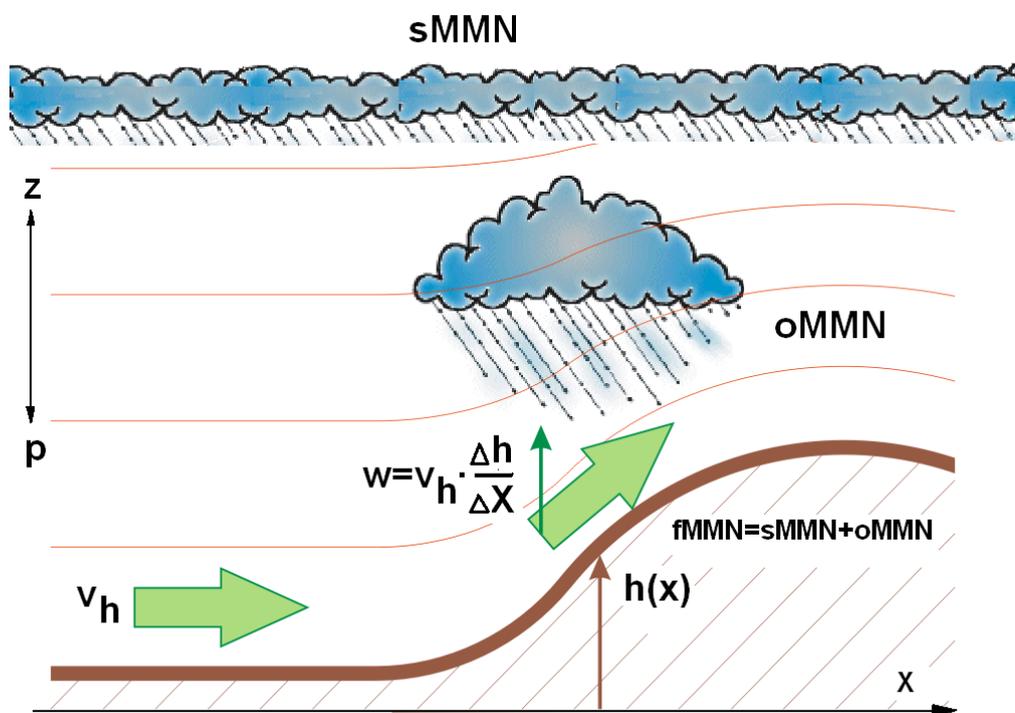


Abbildung. 1: Schematische Darstellung der Zusammensetzung des flächengemittelten maximal möglichen Niederschlages $fMMN$ aus den synoptischen ($sMMN$) und orographisch induzierten ($foMMN$) Niederschlagsanteilen.

In die Abschätzung der Menge des dann für einen bestimmten Punkt repräsentativen MMN(x) geht noch die vorgegebene horizontale Windgeschwindigkeit und ein Verdriften $x_{drift} = v_{hor} \cdot t_{RR}$ der aus verschiedenen Höhen z der Atmosphäre herausfallenden Regentropfen ein. Deren Fallzeit $t_{RR} = z/v_{RR}$ wird über eine vorgegebene Fallgeschwindigkeit v_{RR} der Regentropfen festgelegt. So ist der Entstehungsort des Niederschlages in der Atmosphäre, der dann am Boden zur Niederschlagssumme MMN beiträgt, um eine Strecke x_{drift} in Richtung des Windes verschoben.

Damit steht entsprechend der räumlichen Vorgaben ($\Delta x = 1km$) für jeden Kilometer einer Landschaft entsprechend des gewählten Weges der sich mit dem Wind bewegenden niederschlagsbildenden Luftmasse ein MMN zu Verfügung. Aus diesen Werten, die bei Vorgabe einer bestimmten Strömungsrichtung von Ort zu Ort verschieden ausfallen, lässt sich ein auf eine Fläche, z.B. auf ein Einzugsgebiet bezogener, flächengemittelter maximal möglicher Niederschlag ermitteln (fMMN).

Der darin enthaltene orografische maximal mögliche Niederschlag (oMMN), der die sonst ohne Hebung schon fallende Regenmenge noch verstärkt, wird hier als **orografische Niederschlagsverstärkung** bezeichnet.

Zur Verdeutlichung des Einflusses einer zunehmenden Geländehöhe auf die Niederschlagsmenge wird darüber hinaus ein **Niederschlagsverstärkungsfaktor** F_{RR} eingeführt:

$$F_{RR}(x) = \frac{sMMN + oMMN(x)}{sMMN} \quad (4)$$

Im Fall eines konkreten Starkregenereignisses ergeben sich diese Faktoren damit aus dem Verhältnis zwischen den Regenmengenbeobachtungen im Gebirge und den im Vorland gemachten Beobachtungen, wobei sich die Vorlandwerte, bezogen auf die Anströmung, im Luv des Landschaftsanstieges befinden müssen. Die auf diese Weise für einen bestimmten Landschaftsausschnitt berechneten Faktoren können so mit den auf gleiche Weise aus Beobachtungen ermittelten Faktoren verglichen werden. Das nützt der Überprüfung der Berechnungsergebnisse und lässt eine Bewertung der Aussagekraft der berechneten regionalen Verteilung von Niederschlagsverstärkungsfaktoren zu.

2. Eine beispielhafte Anwendung

Das in Abschnitt 1 beschriebene Verfahren wird hier eingesetzt, um Niederschlagsverstärkungen im Raum Sachsen zu berechnen. Die numerisch ermittelten Niederschlagsverstärkungen werden im Anschluss exemplarisch mit zwei Starkniederschlagsereignissen verglichen (Starkregenereignis vom August 2002 und Mai/Juni 2013) die in dem untersuchten Gebiet zur Hochwasser führten. Im Wesentlichen wird das Gebiet der Freiburger Mulde in die Betrachtung einbezogen. Das die Luftmasse zum Aufstieg zwingende Hindernis bildet damit das mittlere Erzgebirge.

2.1 Die Auswahl des Einzugsgebietes

In Abbildung 2 ist schematisch das Einzugsgebiet „Oberlauf Freiburger Mulde“ (schattierte Fläche) dargestellt. Es umfasst ein Gebiet beginnend bei Oberbobritzsch (in Abbildung 2 durch einen blauen Punkt markiert) bis hin zum Erzgebirgskamm. Die vier verschiedenfarbigen, parallel verlaufenden Strecken repräsentieren die für die Untersuchung gewählten Anströmrichtungen, unter der Vorgabe, dass das Gelände über den gewählten Landschaftsausschnitt ansteigt. Deshalb fehlen auch die Richtungen parallel zum Erzgebirgskamm (West; Ost). Das Gebiet hat eine Ausdehnung von ca. 23 km in Längsrichtung, sowie eine Breite von etwa 17 km (knapp 400 km²). Für die das Gebiet durchlaufenden Strecken liegt etwa im Abstand von einem Kilometer ein Landhöhenwert vor, so dass für jede Anströmrichtung insgesamt zwischen 57 und 66 Werte entlang der drei parallel verlaufenden Strecken zur Verfügung stehen. Damit wird die Fläche des betrachteten Gebietes abgedeckt und ein repräsentatives Flächenmittel kann berechnet werden.

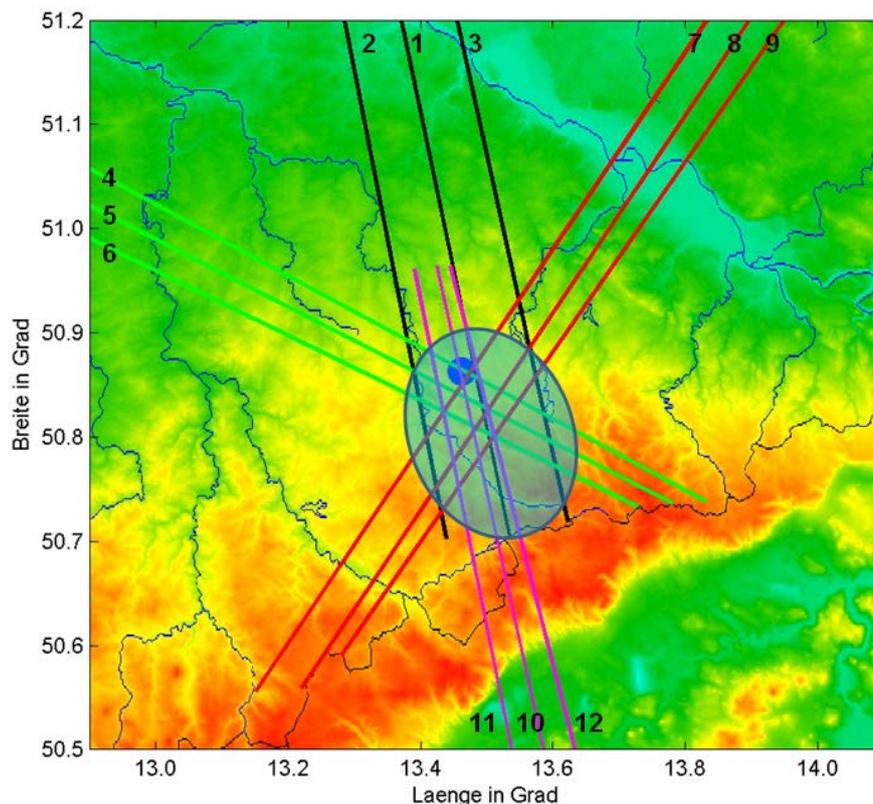


Abbildung 2: Räumliche Zuordnung des Einzugsgebietes (schattiertes Gebiet), der blaue Punkt markiert den Ort Oberbobritzsch. Die vier parallel verlaufenden Strecken repräsentieren in den verschiedenen Farben die der Untersuchung zu Grunde liegenden Anströmrichtungen: schwarz für Nord(1,2,3), rot für Nordost (7,8,9), grün für Nordwest (4,5,6) und magenta für Süd (10,11,12) steht.

2.2 Die meteorologischen Vorgaben

Die Regenmengen werden hier für einen Zeitraum von $\Delta t = 24h$ (Gl. 3) ermittelt. Dazu sind meteorologische Vorgaben notwendig, um die maximal möglichen Niederschlagsmengen berechnen zu können.

Vorgegeben werden die Strömungsgeschwindigkeit der Luftmasse mit welcher diese den Gebirgshang hinaufgleitet (15m/s), sowie die Temperatur und der Feuchtegehalt der Luft in verschiedenen Höhen. Die zur Berechnung genutzten Temperatur- und Taupunktprofile, die aus Radiosondendaten abgeleitet wurden zeigt Abbildung. 3. Die festgelegten Profile repräsentieren die feuchteste und wärmste Atmosphärenstruktur die in den Radiosondendaten (Station Lindenberg, Dresden) gefunden werden konnte (1970-2000) für den Fall, wenn mindestens eine Regenmenge von 10mm/24h im Untersuchungsgebiet gefallen war. Für diese Fälle wurde auch die maximale Strömungsgeschwindigkeit (15m/s für eine Zeit von 24h, 850hPa Höhe) ermittelt.

Der vordefinierten Luftmasse wird bei einer Hebung eine entsprechende Wassermenge entzogen und in Regentropfen umgewandelt, solange bis die Luftmasse den höchsten Punkt einer Strecke erreicht hat. Ab diesem Punkt wird kein Niederschlag mehr generiert. Der so in einer bestimmten Höhe entstandene Regen wird unter Berücksichtigung der Winddrift (horizontale Windgeschwindigkeit: 15 m/s) unter Berücksichtigung einer vorgegebenen, mittleren Fallgeschwindigkeit der entstandenen Regentropfen (7 m/s) auf die betrachtete Oberfläche bezogen.

Berücksichtigt ist bei der Wahl der Verteilung von Temperatur und Taupunkt, dass nur eine Niederschlagsbildung durch die Hebung der Luftmasse am Gelände erfolgt. Das bedeutet, dass Konvektion nahezu ausgeschlossen ist und die Luftmasse ein Maximum an Feuchtigkeit enthält.

Weiter dargestellt ist (Abbildung. 3) der Feuchtegehalt der Luft in den verschiedenen Höhen und die daraus resultierende Freisetzung von Niederschlag, wenn die Luft in der entsprechenden Höhe mit einer Geschwindigkeit Δw (Gl. 1) gehoben wird und dabei feuchtadiabatisch abkühlt. Diese Abschätzung basiert auf dem Wert $\Delta p / \Delta t = -50hPa/h$ (nach Analysen von 700hPa Vertikalwindkarten) und einer Veränderung der Luftdichte entsprechend dem vorgegeben Temperaturprofil. Der so ermittelte sMMN=163mm wird hier als plausibel für die maximale Regenmenge angesehen, die bei den gegebenen atmosphärischen Bedingungen in 24h fallen kann, gerade dann wenn eine orografisch generiert Luftmassenhebung keine Rolle spielt (Gebirgsvorland, Flachland).

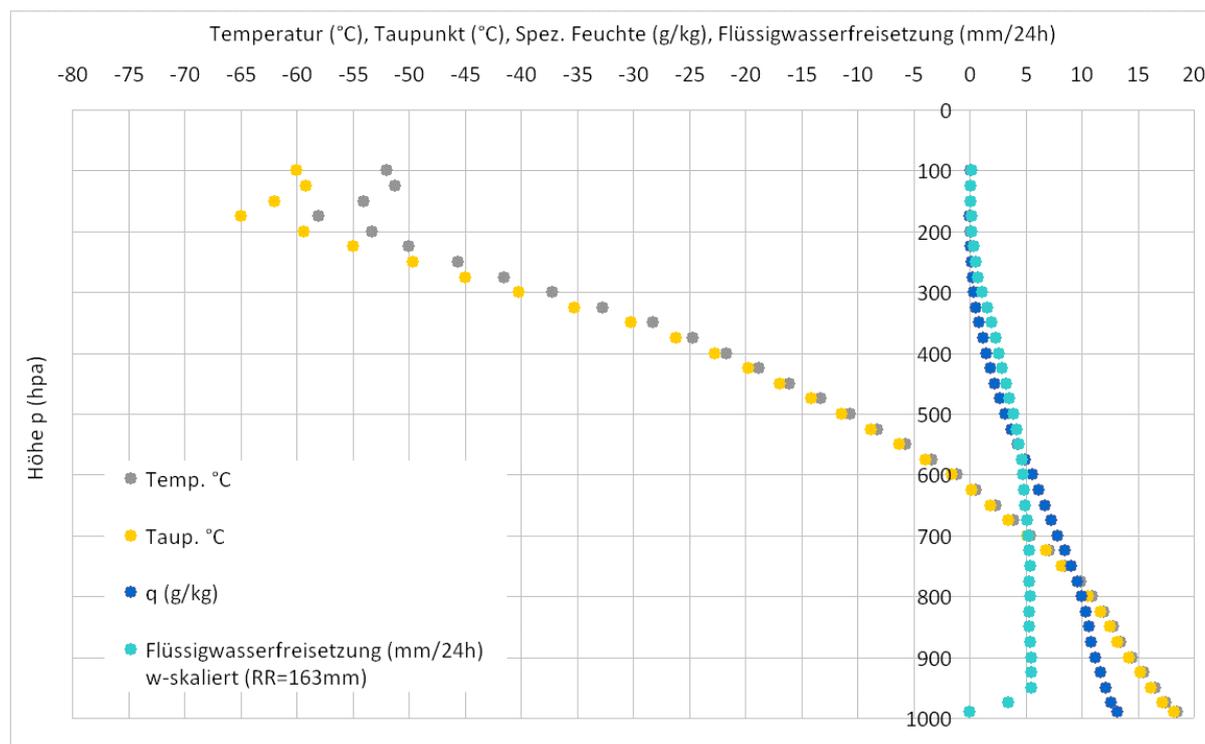


Abbildung 3: Die zur Berechnung der Niederschlagsmengen vorausgesetzten und angewendeten Profile von Temperatur, Taupunkt, spez. Luftfeuchte, sowie die Flüssigwasserfreisetzung in verschiedenen Höhen bei einer Hebung über 24h hinweg mit einer nach Gl. 1 ermittelten Geschwindigkeit $\Delta w(\Delta p/\Delta t = -50 \text{ hPa/h})$. Die Summe des freigesetzten Flüssigwassers über die Höhen hinweg ergibt den sMMN=163mm.

2.3 Das Geländeprofil (Orografie)

Bezogen auf das Einzugsgebiet, für welches die orografische Niederschlagsverstärkung ausgewiesen wird, werden die verschiedenen Strömungsrichtungen so abgedeckt, dass aus den entlang einer Richtung berechneten oMMN(x) letztlich ein repräsentatives Flächenmittel foMMN bestimmbar ist. Aus diesem Grund wurden vier Anströmrichtungen, welche jeweils durch drei Strecken repräsentiert werden, festgelegt. Die Strecken einer Anströmrichtung verlaufen dabei nahezu parallel und haben einen Abstand von 3,5 km bis 5 km zueinander.

Für die Anströmung aus Norden stehen beispielsweise die Strecken 1-3 (vgl. Abbildung 2), welche in etwa von Falkenberg (Elster) über Oberbobritzsch bis zur Grenze bei Rechenberg-Bienenmühle, über eine Länge von ca. 100 km verlaufen.

In der Abbildung 4 sind die Geländeprofile entlang der drei die nördliche Anströmung charakterisierenden Strecken aufgetragen. Obwohl im Mittel ähnlich, fällt doch von Ort zu Ort der Geländeanstieg unterschiedlich aus, was sich dann in einer veränderlichen Regenmenge äußert, die mit dem hier beschriebenen Verfahren ermittelt wird.

Der zu einem Streckentrio gehörende Geländeverlauf wird in den folgenden Ergebnisabbildungen (ab Abbildung 5) durch eine Referenzorografie vertreten (s. Abbildung

4). Die Referenz ist dabei diejenige Strecke, die in der entsprechenden Richtung den längsten Weg im Einzugsgebiet zurücklegt.

Damit liegen entsprechend dem individuellen Anstieg der Topografie Regenmengen vor, die über das betrachtete Gebiet hinweg unterschiedlich ausfallen, da der Anstieg des Geländes von Ort zu Ort variiert.

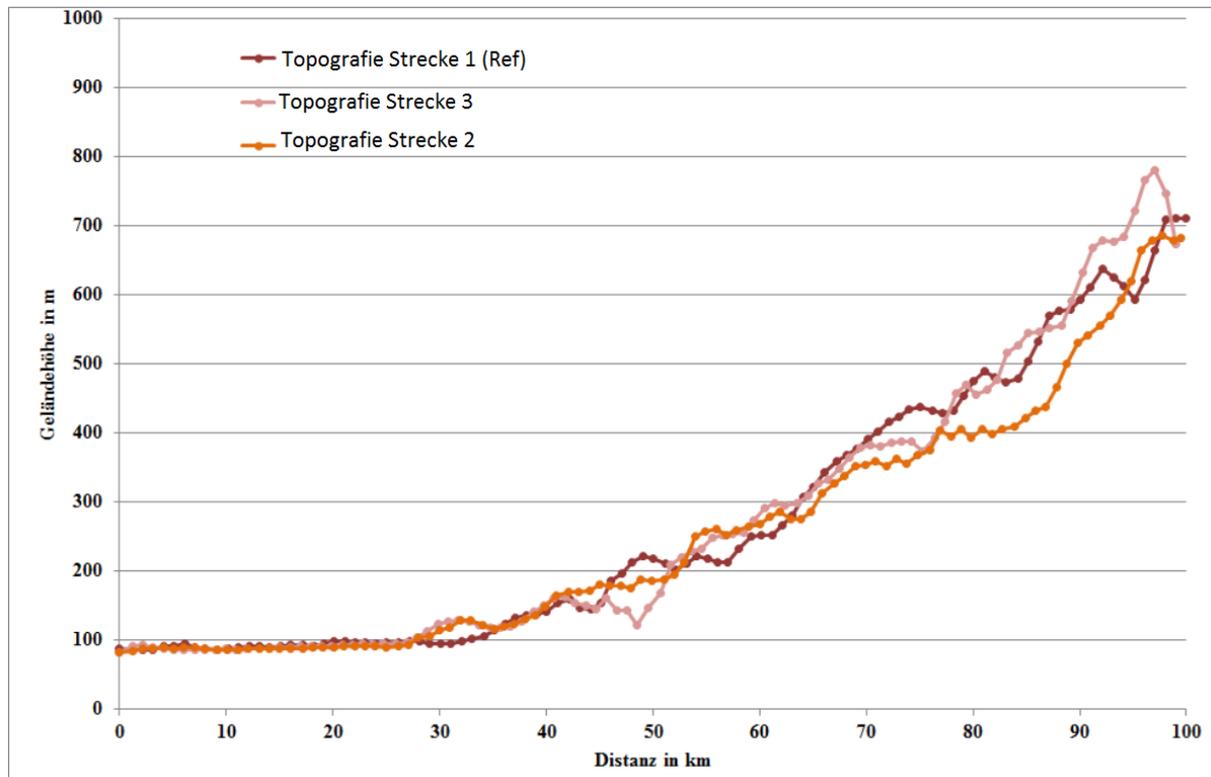


Abbildung 4: Darstellung der unterschiedlichen Höhenprofile (Orografie) des Streckentrios der nördlichen Anströmung (gleitend gemittelt über ca. 3km).

Die weiteren Anströmrichtungen werden ebenfalls durch jeweils drei Strecken vertreten und sind im Einzelnen:

- Richtung Nordwest (Strecke 4-6), Verlauf von Bad Lausick über Oberbobritzsch nach Fürstenaue/Erzg. (Länge: 94 km);
- Richtung Nordost (Strecke 7-9), Verlauf von Königsbrück über Oberbobritzsch nach Steinbach (95 km);
- Richtung Süd (Strecke 10-12), Verlauf von Rakovník (Cz) über Oberbobritzsch nach Niederschöna b. Freiberg (98 km).

Mit diesen Ortsvorgaben und unter Zuhilfenahme des frei im Netz verfügbaren Tools: „Automatische Höhenprofilberechnung“ (Ernst Basler + Partner, 2013) wurden die Orografien entlang der Strecken bestimmt.

Die horizontale Auflösung der auf diese Weise gewonnenen Profildaten beträgt 200-250 m. Anschließend werden die Daten auf einen Abstand von ca. 1 km gemittelt und über 3km geglättet (gleitendes Mittel).

3. Ergebnisse

3.1 Die berechneten oMMN

Die Bestimmung der maximalen Verstärkung der Regenmenge aufgrund des orografischen Einflusses (oMMN) unter Berücksichtigung der Verdriftung erfolgt mit Hilfe eines auf MS-Excel basierenden Werkzeugs **MAXRR**, das das oben beschriebene Verfahren umsetzt (vgl. Tetzlaff und Raabe, 1999; Zimmer et al., 2006; Zimmer, 2005).

Die Abbildungen 5 – 8 veranschaulichen die maximale Niederschlagsverstärkung aufgrund orografisch bedingter Hebung in den einzelnen Anströmrichtungen, bezogen auf das betrachtete Einzugsgebiet (vgl. Abbildung 2).

Die unterschiedlich farbigen Linien stehen für den berechneten orografisch induzierten Niederschlag entlang der einzelnen Strecken für jede Anströmrichtung aufsummiert über 24 h.

Die, durch die orografische Hebung entstehende Verstärkung des Niederschlages ist auf der linken Ordinate angegeben (mm Niederschlag in 24h).

Die braune Linie in jeder Abbildung steht für das Referenzprofil der jeweiligen Anströmung, ablesbar auf der rechten Ordinate (Höhe über NN in m).

In den Abbildungen 5, 6 und 7 wird die stetige Zunahme des orografisch erzeugten Niederschlagsanteils im ansteigenden Gelände und über das ausgewiesene Einzugsgebiet hinweg deutlich. Die rote Linie stellt den Mittelwert des Niederschlages im Bereich des Einzugsgebietes dar und beschreibt die flächengemittelte orografische Verstärkung des Niederschlages in Bezug auf die Fläche des Einzugsgebietes (foMMN).

Für die drei Anströmungen aus den nördlichen Richtungen (Abbildung 5-7) wird ein Flächenmittel zwischen 125 mm und 185 mm ausgewiesen. Der Wert für die Anströmung aus Richtung Süd fällt geringer aus (Abbildung 8, 95mm), da sich für diese Strömungsrichtung das Einzugsgebiet hinter dem Erzgebirgskamm befindet. Das führt dazu, dass große Mengen Niederschlag an dem steil aufsteigenden Südhang des Erzgebirges (Tschechien) fallen und das hier betrachtete Einzugsgebiet dann nicht erreichen.

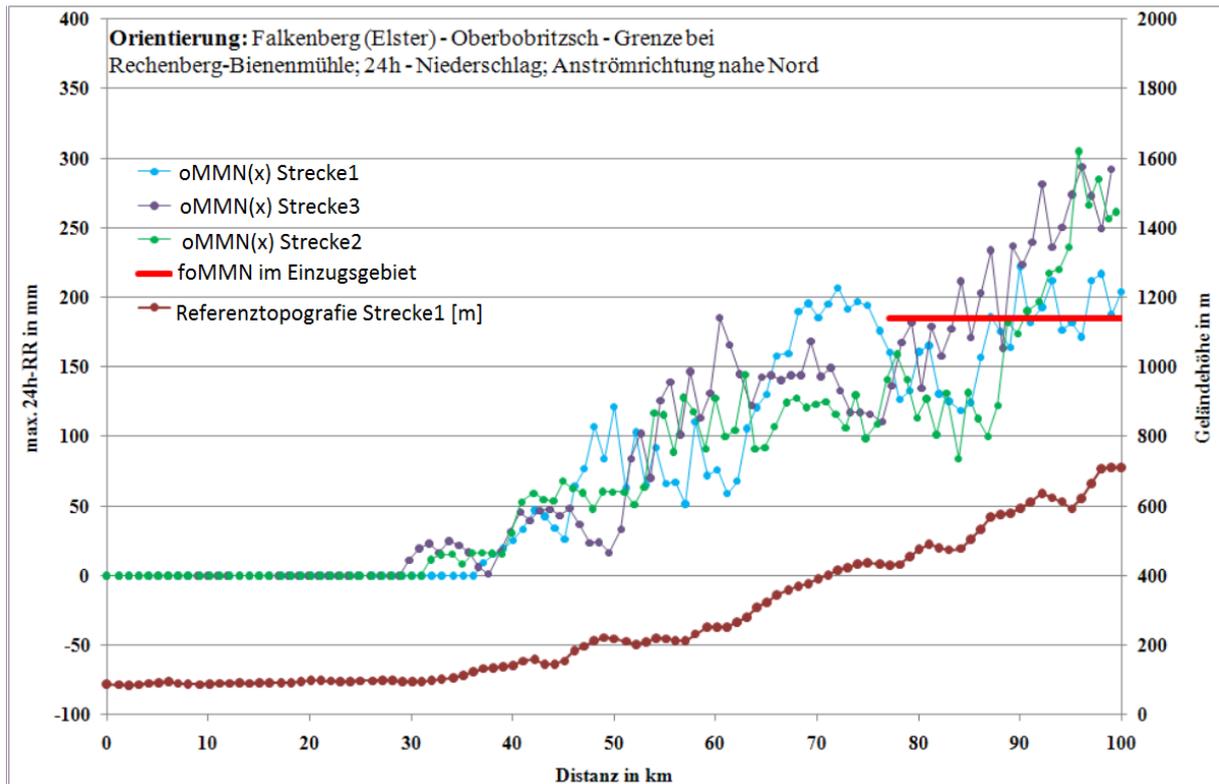


Abbildung 5: Die orografische Niederschlagsverstärkung (oMMN) für ein Ereignis von 24h Dauer im Gebiet ‚Oberlauf Freiberger Mulde‘, nördliche Anströmung.
 - rote Linie: foMMN bezogen auf das Einzugsgebiet (185mm).

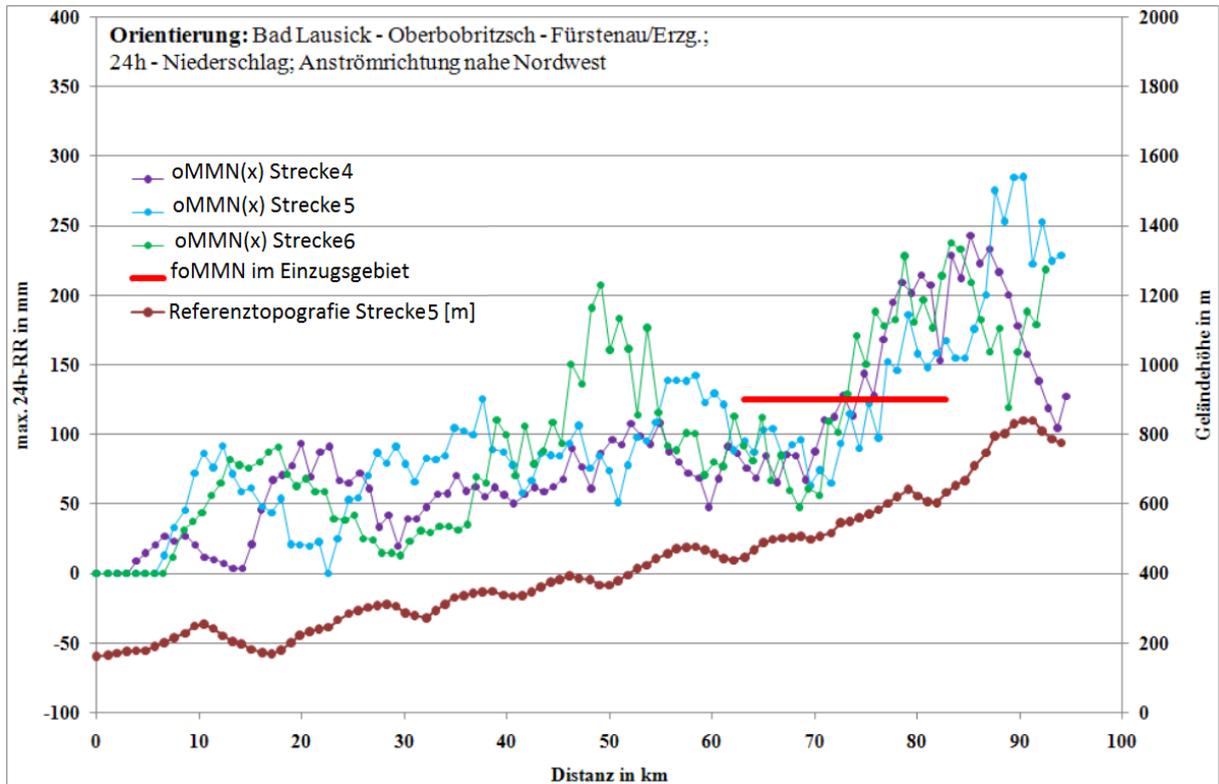


Abbildung 6: Die orografische Niederschlagsverstärkung (oMMN) für ein Ereignis von 24h Dauer im Gebiet ‚Oberlauf Freiberger Mulde‘ nordwestliche Anströmung.
 - rote Linie: foMMN bezogen auf das Einzugsgebiet (125mm).

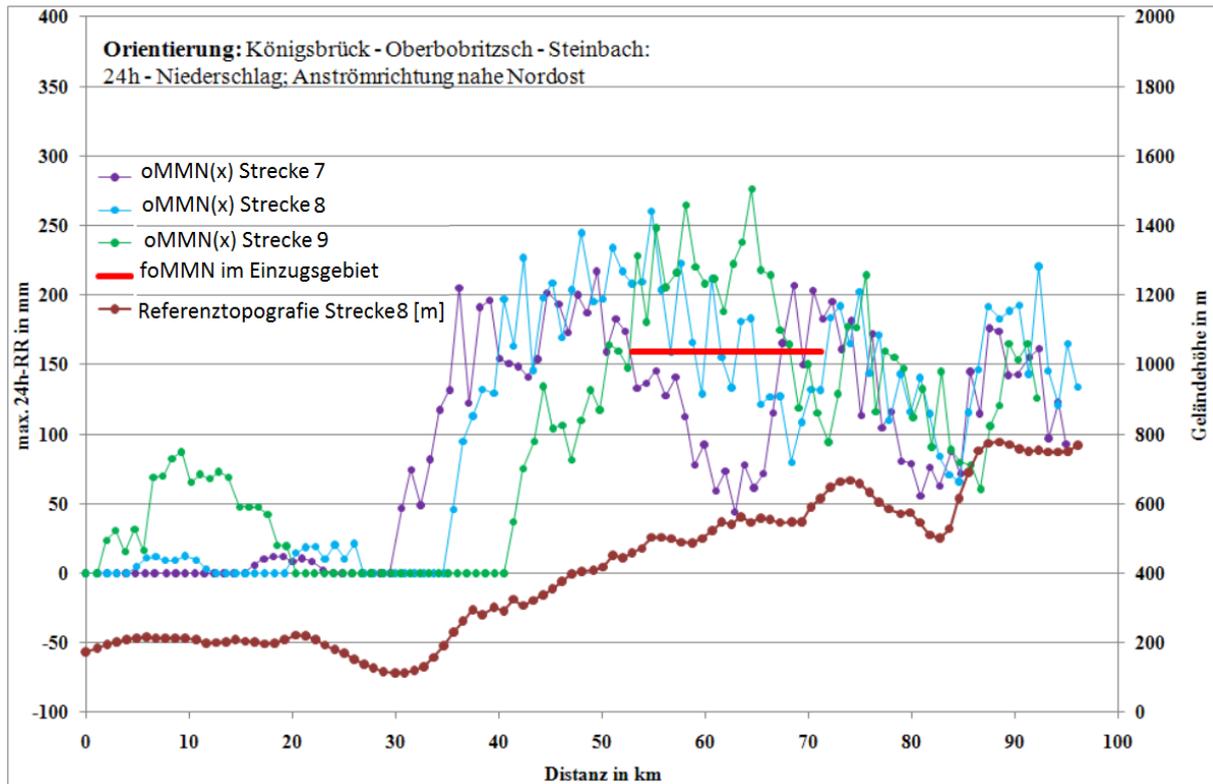


Abbildung 7: Die orografische Niederschlagsverstärkung (oMMN) für ein Ereignis von 24h Dauer im Gebiet ‚Oberlauf Freiburger Mulde‘ nordöstliche Anströmung. - rote Linie: foMMN bezogen auf das Einzugsgebiet (160mm).

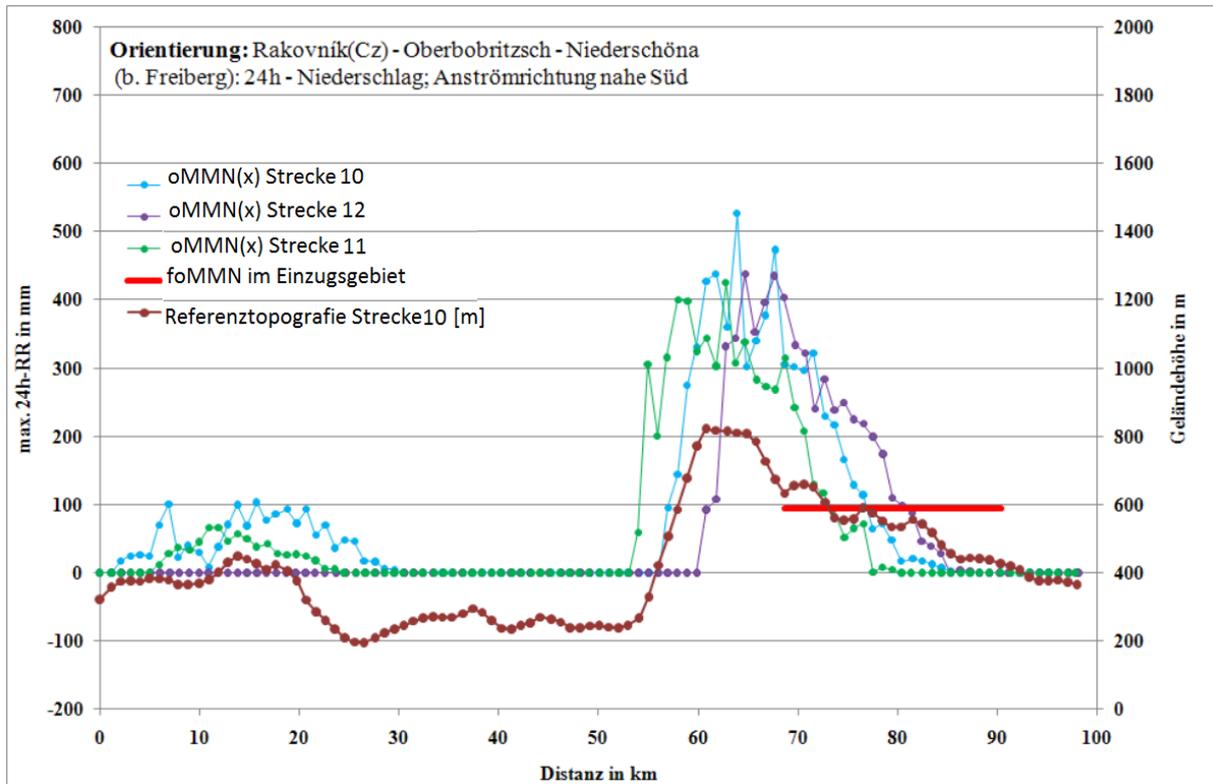


Abbildung 8: Die orografische Niederschlagsverstärkung (oMMN) für ein Ereignis von 24h Dauer im Gebiet ‚Oberlauf Freiburger Mulde‘ südliche Anströmung. - rote Linie: foMMN bezogen auf das Einzugsgebiet (95mm).

3.2 Die berechneten Niederschlagsverstärkungsfaktoren

Die orografische Niederschlagsverstärkung oMMN (Abbildung. 9, orange) werden unter Verwendung des berechneten synoptischen maximal möglichen Niederschlages ($sMMN=163mm$) nach Gl. (4) in die entsprechenden Niederschlagsverstärkungsfaktoren (blau) umgerechnet (Abbildung. 9). Für die nördliche Anströmrichtung erreichen die Faktoren im Gebietsmittel 2,13 bei Strömungsrichtung Süd 1,6 (blau in Abbildung. 9) wobei aufgrund der starken Geländehöhenzunahme bei südlicher Anströmung individuell häufiger Werte $>2,9$ auftreten, was bei Nordanströmung (flacherer Geländeanstieg) nicht der Fall ist. Die unterschiedliche Anzahl an Werten auf den einzelnen Strecken ergibt sich aus der Länge des Weges durch das Einzugsgebiet.

Nord						Süd							
Gebietsmittel oMMN: 185						Gebietsmittel oMMN: 94.5							
Gebietsmittel F_{RR} 2.13						Gebietsmittel F_{RR} 1.6							
Distanz	Strecke 2	Strecke 1		Strecke 3		Distanz	Strecke 11	Strecke 10		Strecke 12			
im Gebiet (km)	oMMN 2	F_{RR} 2	oMMN 1	F_{RR} 1	oMMN 3	F_{RR} 3	oMMN 11	F_{RR} 11	oMMN 10	F_{RR} 10	oMMN 12	F_{RR} 12	
77.1			160.6	1.99			68.7		305.0	2.9			
78.1			126.4	1.78			69.6	241.9	2.5	302.0	2.9	333.6	3.0
79.1			132.7	1.81			70.6	207.7	2.3	296.3	2.8	321.9	3.0
80.1			160.8	1.99	134.5	1.83	71.5	129.2	1.8	322.2	3.0	240.1	2.5
81.1			165.5	2.02	179.1	2.10	72.7	116.7	1.7	229.8	2.4	284.0	2.7
82.0	101.2	1.62	130.7	1.80	157.8	1.97	73.7	91.7	1.6	217.2	2.3	238.3	2.5
83.0	131.2	1.80	125.3	1.77	177.2	2.09	74.6	52.1	1.3	166.2	2.0	249.5	2.5
84.2	84.1	1.52	118.4	1.73	211.7	2.30	75.6	65.6	1.4	128.5	1.8	225.0	2.4
85.2	131.5	1.81	124.6	1.76	171.4	2.05	76.5	72.2	1.4	114.1	1.7	218.2	2.3
86.1	113.0	1.69	157.1	1.96	203.4	2.25	77.5	1.2	1.0	64.3	1.4	199.3	2.2
87.1	100.0	1.61	185.9	2.14	233.9	2.44	78.4	7.7	1.0	72.4	1.4	173.9	2.1
88.1	122.0	1.75	175.7	2.08	163.6	2.00	79.4	5.1	1.0	47.7	1.3	109.4	1.7
89.1	182.2	2.12	163.7	2.00	236.9	2.45	80.4	0.0	1.0	17.2	1.1	98.9	1.6
90.0	174.1	2.07	222.4	2.36	223.5	2.37	81.5	0.0	1.0	20.4	1.1	88.4	1.5
91.0	190.3	2.17	182.0	2.12	239.5	2.47	82.5	0.0	1.0	17.7	1.1	46.7	1.3
92.2	196.9	2.21	192.9	2.18	281.3	2.73	83.4	0.0	1.0	13.0	1.1	39.2	1.2
93.2	217.5	2.33	212.1	2.30	236.0	2.45	84.4	0.0	1.0	7.0	1.0	28.1	1.2
94.1	220.3	2.35	176.7	2.08	250.3	2.54	85.4	0.0	1.0	2.4	1.0	0.0	1.0
95.1	236.4	2.45	181.7	2.11	273.9	2.68	86.3	0.0	1.0	0.0	1.0	3.5	1.0
96.1	305.0	2.87	171.5	2.05	294.2	2.80	87.3	0.0	1.0	0.0	1.0	2.5	1.0
97.1			212.3	2.30	273.0	2.67	88.2	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0
98.0			217.0	2.33			89.2	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0
99.0			187.6	2.15			90.3			0.0	1.0	0.0	1.0
100.0			204.1	2.25						0.0	1.0	0.0	1.0

Abbildung 9: Auflistung der Werte des orografisch maximal möglichen Niederschlages (oMMN in mm) entlang der drei Strecken (Nord 1,2,3, Süd 10,11,12) sowie die dazu gehörenden Verstärkungsfaktoren (F_{RR}).

Bei der Betrachtung von Werten der nördlichen Anströmung wird deutlich, dass auf dem Weg Richtung Erzgebirgskamm die Verstärkungsfaktoren nicht kontinuierlich zunehmen. Vielmehr gibt es Streckenabschnitte in denen die Verstärkungsfaktoren reduziert sind. Auf diesen Streckenabschnitten regnet es dann weniger als in der Umgebung.

Die Werte der Südanströmung in der Liste (Abbildung 9) zeigen zusätzlich den Prozess der Winddrift des Niederschlages als Folge der Fallzeit der Regentropfen. In Abschnitt 2.2 wurde dargestellt, dass der feuchtegesättigten Luft durch Hebung eine entsprechende Wassermenge entzogen wird, und dies solange bis die Luftmasse den

höchsten Punkt des Geländeprofiles erreicht hat. Ab diesem Punkt wird die Luft nicht mehr gehoben und es wird kein Niederschlag mehr generiert. Bei einer Anströmung von Süd ist die höchste Stelle des Weges (Erzgebirgskamm) noch vor dem Einzugsgebiet erreicht und dennoch ergibt sich ein Flächenmittel von 95 mm aufgrund der Drift der fallenden Regentropfen mit der horizontalen Strömung.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Berechnungen zusammengefasst. Diese Angaben in mm-Regenmenge in 24h stellen die maximal möglichen Regenmengen dar, die aufgrund der Orografie als Flächenmittel im Untersuchungsgebiet auftreten kann. Der Verstärkungsfaktor bezieht einen durch synoptische Prozesse generierten maximal möglichen Niederschlag ein ($sMMN=163\text{mm}$, vgl. auch Zimmer et al., 2006).

Die maximale flächengemittelte orografische Niederschlagsverstärkung erhält man mit knapp 185 mm in 24h bei einer nördlichen Anströmung. Die geringste Menge ergibt sich erwartungsgemäß bei einer Südanströmung des Gebietes, wenn sich das Einzugsgebiet schon im Lee des Gebirgskammes des Erzgebirges befindet. Die Verstärkungsfaktoren schwanken zwischen 2,14 bei Nordströmung und 1,59 bei Südströmung.

Diese hier numerisch abgeleiteten Verstärkungsfaktoren (s. Tabelle 1, F_{RR}) sind für maximal mögliche Niederschlagsmengen zutreffend. Auch diese Faktoren sind Flächenmittel.

	synoptisch generierter maximal möglicher Niederschlag $sMMN$	flächengemittelter max. möglicher Niederschlag $fMMN=sMMN+oMMN$ [mm]	$F_{RR}=\frac{fMMN}{sMMN}$ infolge orografischer Verstärkung
Vorland	163mm	$163=163+0$	1,00 $=163/163$
Nord	163mm	$348=163+185$	2,14 $=348/163$
Nordwest	163mm	$288=163+125$	1,77 $=288/163$
Nordost	163mm	$322=163+160$	1,98 $=322/163$
Süd	163mm	$258=163+95$	1,59 $=258/163$

Tabelle 1: Die orografische Niederschlagsverstärkungen für verschiedene Anströmungsrichtungen des Gebietes ‚Oberlauf Freiburger Mulde‘, als max. Zunahme der Regenmenge in 24h sowie entsprechender Verstärkungsfaktor aufgrund des Einflusses der Orografie in Abhängigkeit von der Anströmrichtung (Strömungsgeschwindigkeit 15 m/s).

3.3 Vergleich mit Beobachtungen

Der Vorteil der Betrachtung von Niederschlagsverstärkungsfaktoren besteht darin, dass die mit dem hier beschriebenen Verfahren berechneten mit solchen aus Beobachtungen verglichen werden können, da die individuellen Niederschlagsmengen in einem

Gebiet auf eine Verhältniszahl zwischen dem synoptisch genierten und dem orografisch induzierten Niederschlagsanteil zurückgeführt werden. Diese für das Untersuchungsgebiet berechneten Verstärkungsfaktoren lassen sich jetzt mit realen Niederschlagsituationen vergleichen. Exemplarisch sind im Folgenden zwei Niederschlagsereignisse analysiert, die im Bereich des Erzgebirges zu Hochwasser führten.

Das erste Beispiel bezieht sich auf das Hochwasserereignis vom 24. Mai bis zum 6. Juni 2013, bei dem sich die hier beschriebene Zunahme der Niederschlagsmengen in der Anströmung des Erzgebirges mit zunehmender Geländehöhe zeigt.

Die unterschiedlichen Regenmengen, die während dieses Hochwasserereignisses auf einer Strecke zwischen Elsterwerda über Dippoldiswalde nach Rechenberg-Bienenmühle als nördlicher Anströmung des Erzgebirges fielen, sind in Abbildung 10 dargestellt.

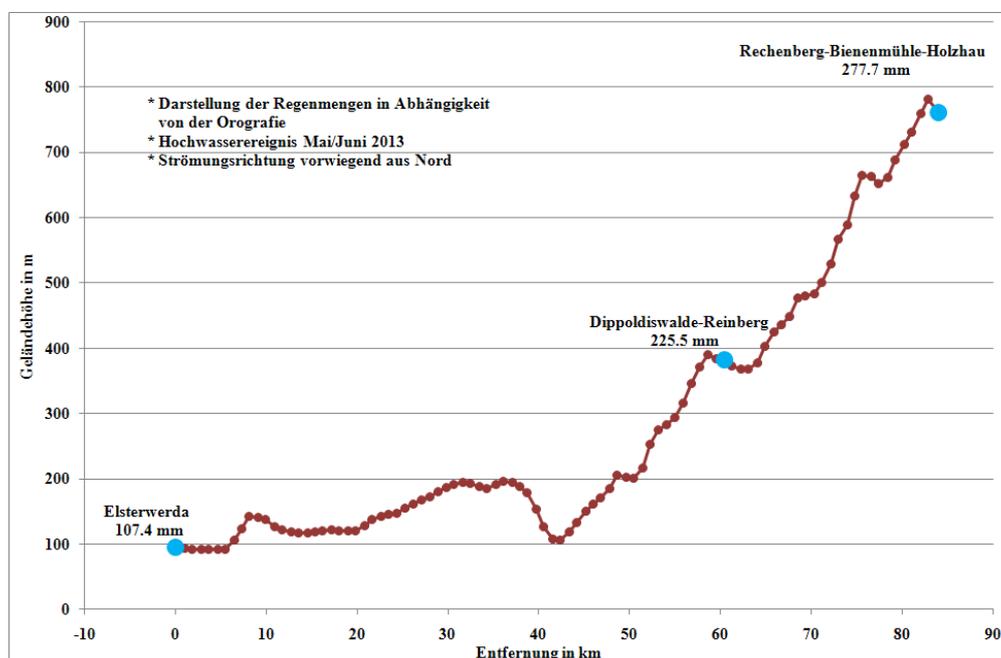


Abbildung 10: Darstellung aktueller (Hochwasserereignis Mai/Juni 2013) absoluter Regenmengen (Summe über ganzes Ereignis) in Abhängigkeit von der Orografie. Die Ortswahl entspricht einer Strecke entlang der nördlichen Anströmung.

Nach Gleichung (4) weisen diese Messdaten folgende orografische Verstärkungsfaktoren aus:

	fMMN / sMMN	Verstärkungsfaktor
ElsterwerdaVorland (95m ü. NN)	108/108	1
Dippoldiswalde (380m ü. NN)	226/108	2,1
Rechenberg (760m ü. NN)	278/108	2,6

Tabelle 2: Verstärkungsfaktoren für ein reales Beispiel aus dem Jahr 2013 (s. Abbildung 10).

Das zweite Beispiel folgt aus dem Hochwasserereignis vom 12./13. August 2002 (s. Tabelle 3, zitiert nach Zimmer et al., 2006). Betrachtet wird hierbei wiederum eine nördliche bis leicht nordwestliche Anströmung des Erzgebirges vom Erzgebirgsvorland über die Talsperre Malter bis hinauf nach Zinnwald.

	fMMN / sMMN	Verstärkungsfaktor
Vorland (60m ü. NN)	120/120	1,0
Grumbach (300m ü. NN)	183/120	1,5
Malter (350m ü. NN)	218/120	1,8
Altenberg (750m ü. NN)	251/120	2,1
Zinnwald (800m ü. NN)	312/120	2,6

Tabelle 3: Verstärkungsfaktoren für ein reales Beispiel aus dem Jahr 2002 (vgl. Zimmer et al., 2006).

Diese aus beobachteten Niederschlagsereignissen ermittelten Faktoren (Tabelle 2, 3) die sich auf die tatsächliche Dauer der Niederschlagsereignisse an einer Messstation beziehen erreichen eine vergleichbare Größenordnung wie die mit den nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten berechneten flächengemittelten Niederschlagsverstärkungsfaktoren (s. Tabelle. 1). Bezogen auf eine Position in einer Landschaft ist offenbar bei solchen Maximalregenereignissen das Verhältnis zwischen dem Gesamtniederschlag (enthält die orografisch erzeugte Niederschlagsverstärkung) und dem synoptisch generierten Niederschlag nahezu konstant.

4. Schlussfolgerungen und Diskussion

Der physikalische Prozess, der zu einer orografischen Niederschlagsverstärkung führt, ist unbestritten: Eine definierte Luftmasse (charakterisiert durch Temperatur und Feuchte) wird an ein orografisches Hindernis mit einer bestimmten Windgeschwindigkeit / Windrichtung, in unserem Fall das Erzgebirge, herangeführt. Die synoptischen Strömungsverhältnisse sorgen dafür, dass permanent weitere Luft nachströmt. Die Luft wird dadurch gezwungen, am Hindernis aufzusteigen. Dieses Aufsteigen führt zu einer Abkühlung der Luftmasse. Sinkt dadurch die Temperatur der aufsteigenden Luftmasse unter den sie definierenden Taupunkt erfolgt Kondensation mit darauffolgender Niederschlagsbildung. Die Menge des als Folge der orografischen Hebung entstehenden Niederschlages hängt im Wesentlichen davon ab, wie die Luftmasse in ihrer Bewegungsrichtung dem Geländeanstieg folgen kann. Unter natürlichen Bedingungen würde eine Luftmasse u.U. einem direkten Aufstieg ausweichen und das Gebirge eher umströmen (s. z.B. die Ausführungen bei Kunz und Kottmeier, 2006). Für ein Maximum an Niederschlagsproduktion ist jedoch ein unmittelbares Folgen des Geländeanstiegs notwendig, was hier im Rahmen dieser Abschätzungen vorausgesetzt wird.

Aus den berechneten Niederschlagsmengen entlang einer Bewegungsrichtung einer Luftmasse ist allerdings auch ersichtlich, dass es entlang dieser Strecke unterschiedlich

stark regnen kann. Nicht notwendigerweise regnet es in dem Streckenabschnitt mehr, der eine größere Höhe über NN hat, sondern in einem Streckenabschnitt in dem es zu einer starken Geländehöhenzunahme kommt (Variabilität der Werte in Abbildung. 9). Das erklärt auch die Aussage von Beobachtern, die in Zweifel ziehen, dass sich die orografisch erzeugte Niederschlagsverstärkung an ihrem Beobachtungsort auswirkt. Es kann bei einem konkreten Niederschlagsereignis der Eindruck entstehen, als ob es keinen generellen Zusammenhang zwischen Geländehöhe und Niederschlagsmenge gibt – ist doch der den Niederschlagsprozess auslösende Parameter die Geländehöhenänderung bzw. der Anteil der Geländehöhenänderung, die in ein Aufsteigen der Luftmasse umgesetzt wird.

Als ein Ergebnis bleibt festzuhalten, dass die örtliche orografische Niederschlagsverstärkung nicht von der Geländehöhe selbst, sondern vielmehr von der vorgelagerten Geländehöhenzunahme abhängt.

So wird es durchaus verständlich, dass an einem bestimmten hochgelegenen Punkt einer Landschaft keine erhöhten Niederschlagsmengen beobachtet werden, obwohl das im näheren Umfeld dieses Punktes der Fall ist. Erst der auf eine Fläche bezogene Wert ist dann repräsentativ und der nimmt im höher gelegenen Gelände dann auch höher Werte an.

Der Vergleich zwischen berechneten und beobachteten Niederschlagsverstärkungsfaktoren lassen es als möglich erscheinen, die in den Datenbanken (z.B. WebWerdis vom Deutschen Wetterdienst, <https://werdis.dwd.de>) täglich für ein Raster von 1km x1km aufgeführten Regenmengen zu Niederschlagsverstärkungskarten umzuarbeiten. Diese Reanalysedaten, zusammengefasst aus verschiedenen Niederschlagssituationen, enthielten dann Hinweise auf die räumliche Verteilung der mittleren Niederschlagsverstärkungsfaktoren in diesem Gebiet. Diese wären dann, anders als individuelle Beobachtungen, für das jeweilige Gebiet repräsentativ. Gemittelt über die Fläche z.B. eines Einzugsgebietes könnten diese Faktoren das Gefährdungspotenzial im Fall von Niederschlagsereignissen bildlich vor Augen führen. Ein Faktor von 3 bedeutet dann, dass in dem Gebiet im Mittel dreimal mehr Niederschlag fällt als im Luv der Strömung über dem vorgelagerten Flachland.

5. Literatur

Ernst Basler + Partner, 2013: „Automatische Höhenprofilberechnung Version 2.0 (beta)“ (<http://geo.ebp.ch/gelaendeprofil/>)

Kunz, M., Kottmeier, Ch., 2006: Orographic enhancement of precipitation over low mountain ranges, Part I: Model formulation. J. Appl. Meteor. Climatol., 1, 1025-1040.

Schmidt, T., (Bearb.), 1997: Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland *DVWK-Mitteilungen*, **29**, 112S.

Tetzlaff, G., Raabe, A., 1999: Räumliche und zeitliche Verteilung maximaler Niederschläge. In: Extreme Naturereignisse und Wasserwirtschaft - Niederschlag und Abfluß, Internat. *Symposium, Bayr. Landesamt f. Wirtschaft, Informationsh.* 5, S. 57-64.

Tetzlaff, G., Börngen, M., Mudelsee, M., Raabe, A., 2002: Das Jahrtausendhochwasser von 1342 am Main aus meteorologisch-hydrologischer Sicht. *Wasser & Boden* Bd. 54 H. 10, S. 41-49.

Wiesner, C.J., 1970: Hydrometeorology. *Chapman and Hall LTD London*, 232p.

Zimmer, J., 2005: Topografische Beeinflussung von Niederschlag, *Diplomarbeit LIM Univ. Leipzig*, 64S.

Zimmer, J., Raabe, A., Tetzlaff, G., 2006: Quantification of topographic effects on predicted precipitation in the Erzgebirge, *Wiss. Mitteil. Inst. f. Meteorol. Univ. Leipzig*, Bd. 37, S 125-136 (<http://www.uni-leipzig.de/~meteo/de/orga/band37.pdf>).