



UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Bachelorarbeit

Das Starkregentief Bernd über Mitteleuropa im Juli 2021

verfasst von
David GEPART

im Rahmen des Bachelorstudiums
Umweltingenieurwissenschaften

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science

Wien, 2024

Betreut von:

Univ.Prof. Dipl.Geoökol. Dr.rer.nat. Karsten Schulz
Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt

Mitbetreut von:

Univ.Prof. Dr. Harald Rieder
Institut für Meteorologie und Klimatologie
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt

Mitbetreut von:

Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Zeman
Institut für Konstruktiver Ingenieurbau
Department für Bautechnik und Naturgefahren.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich diese Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Gedanken, die im Wortlaut oder in grundlegenden Inhalten aus unveröffentlichten Texten oder aus veröffentlichter Literatur übernommen wurden, sind ordnungsgemäß gekennzeichnet, zitiert und mit genauer Quellenangabe versehen.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder ganz noch teilweise in gleicher oder ähnlicher Form an einer Bildungseinrichtung als Voraussetzung für den Erwerb eines akademischen Grades eingereicht. Sie entspricht vollumfänglich den Leitlinien der Wissenschaftlichen Integrität und den Richtlinien der Guten Wissenschaftlichen Praxis.

Ort, Datum



David GEPART (eigenhändig)

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Eidesstattliche Erklärung | i |
| Inhaltsverzeichnis | ii |
| Kurzfassung | iii |
| Abstract | iv |
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Aufgabenstellung und Motivation | 3 |
| 1.2. Zielsetzung | 3 |
| 2. Makroskalige Wetterentstehung..... | 4 |
| 2.1. Der Jetstream..... | 5 |
| 2.2. Fallbeispiel Bernd..... | 6 |
| 2.3. Einfluss des Klimawandels auf den Jetstream | 8 |
| 3. Meteorologische Grundlagen | 10 |
| 3.1. Wetterparameter | 10 |
| 3.1.1. Meteorologische Kenngrößen | 10 |
| 3.1.2. Errechnete Parameter | 12 |
| 3.2. Entstehung eines Tiefdruckgebietes..... | 14 |
| 3.2.1. Die Warmfront..... | 15 |
| 3.2.2. Die Kaltfront..... | 15 |
| 3.3. Niederschlagsdatenerhebung und Auswertung..... | 17 |
| 3.3.1. Methodik der Niederschlagsmessung | 18 |
| 3.3.2. Statistische Auswertung | 21 |
| 4. Analysen zu Starkregentief Bernd | 22 |
| 4.1. Fallbeispiele:..... | 26 |
| 4.1.1. Starkregenereignis in Wien am 17.7.2021 | 27 |
| 4.1.2. Starkregenereignis im Mostviertel in Niederösterreich am 18.7.2021 | 33 |
| 5. Schlusswort – Conclusio..... | 39 |
| Anhang A | 40 |
| Anhang B | 42 |
| Literaturverzeichnis | 43 |
| Abbildungsverzeichnis | 45 |

Kurzfassung

Die Bachelorarbeit untersucht das Starkregentief Bernd, das im Juli 2021 in Mitteleuropa schwere Überflutungen verursachte. Ziel der Arbeit ist es zu klären, ob dieses Ereignis durch die Folgen des Klimawandels beeinflusst wurde oder einen statistischen Ausreißer darstellt. Das Tiefdruckgebiet Bernd entstand über dem Nordatlantik, intensivierte sich auf seinem Weg nach Europa und blieb lange stationär über Mitteleuropa. Diese sogenannte blockierende Wetterlage führte zu Rekordniederschlägen und extremen Überflutungen. Im Rahmen des Themas werden Entstehung und Entwicklung solcher Wetterlagen sowie die Methoden zur Niederschlagsmessung, Datenauswertung und einige Wetterparameter zur Beschreibung dieses Ereignisses beschrieben. Anhand von zwei durch Bernd ausgelöste Starkregenereignisse, wie den beiden in Wien und dem Mostviertel in Niederösterreich im Juli 2021, werden die Auswirkungen dieser Wetterlage detailliert dargestellt. Es wird erörtert, dass die Zunahme und Intensivierung von Extremwetterereignissen, so wie auch Starkregenereignissen, durch den Klimawandel physikalisch begründet ist. Dabei wird betont, dass die Unsicherheiten in den Modellen und historischen Daten definitive Aussagen erschweren. Dennoch gibt es erste qualitative Forschungsansätze wie die Attribution Science, die versucht, genauere Aussagen über den Einfluss der Erderwärmung auf bestimmte Naturphänomene zu machen.

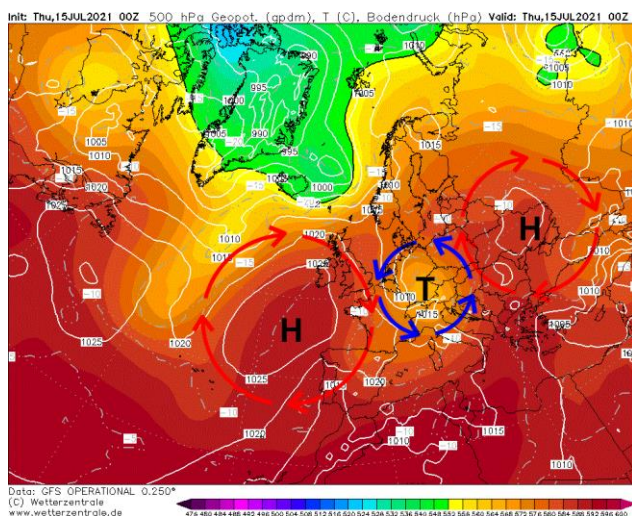
Abstract

The bachelor thesis examines the heavy rainfall low Bernd, which caused severe flooding in Central Europe in July 2021. The aim of the thesis is to clarify whether this event was influenced by the consequences of climate change or is a statistical outlier. The low-pressure system Bernd formed over the North Atlantic, intensified on its way to Europe and remained stationary over Central Europe for a long time. This so-called blocking weather situation led to record rainfall and extreme flooding. This topic describes the formation and development of such weather conditions as well as the methods used to measure precipitation, analyse data and some weather parameters to describe this event. Using two heavy rainfall events triggered by Bernd, such as the two in Vienna and the Mostviertel in Lower Austria in July 2021, the effects of this weather situation are presented in detail. It is discussed that the increase and intensification of extreme weather events, as well as heavy rainfall events, is physically caused by climate change. It is emphasised that the uncertainties in the models and historical data make definitive statements difficult. Nevertheless, there are initial qualitative research approaches such as attribution science, which attempts to make more precise statements about the influence of global warming on certain natural phenomena.

1. Einleitung

Im Juli 2021 zog ein Tiefdruckgebiet, das am 10. Juli 2021 mit dem Namen „Bernd“ getauft wurde [1], über Europa und brachte in seinem Einflussgebiet zahlreiche Starkregenereignisse und Überflutungen [2]. Getrieben von der globalen Zirkulation zog das Tief vom Atlantik kommend weiter über Mitteleuropa.

Jedoch verharrte daraufhin der Tiefdruckkern mehrere Tage über Mitteleuropa und blieb somit über einen längeren Zeitraum stationär, bevor Bernd letztlich unter Abschwächung Richtung Mittelmeer abzog.



Wenn, wie im Fall Bernd, ein Druckgebiet über einen längeren Zeitraum über einem bestimmten Gebiet verharrt, nennt man dies eine blockierende Wetterlage [3].

Dies sorgte dafür, dass über mehrere Tage hinweg in den gleichen Gebieten Unwetter entstehen konnten und das ist charakteristisch für ein blockiertes Tief. Dieser Umstand des blockierten Tiefs wird in nachfolgender Bildserie veranschaulicht.

Abbildung 1-1 Schematische Darstellung Bernds, als blockiertes Tief über Mitteleuropa am 15. Juli 2021

(Quelle: <https://www.wetterzentrale.de>, abgerufen am 15. Juli 2024)

Ein Bild repräsentiert jeweils einen Tag und ist eine Momentaufnahme von 00 Uhr nach UTC-Zeit, was im Sommer in Österreich 2 Uhr nachts nach mitteleuropäischer Sommerzeit entspricht. Der ziehende Tiefdruckkern Bernds ist mit einem „T“ gekennzeichnet und die Landesgrenzen Österreichs zur Orientierung eingezeichnet.

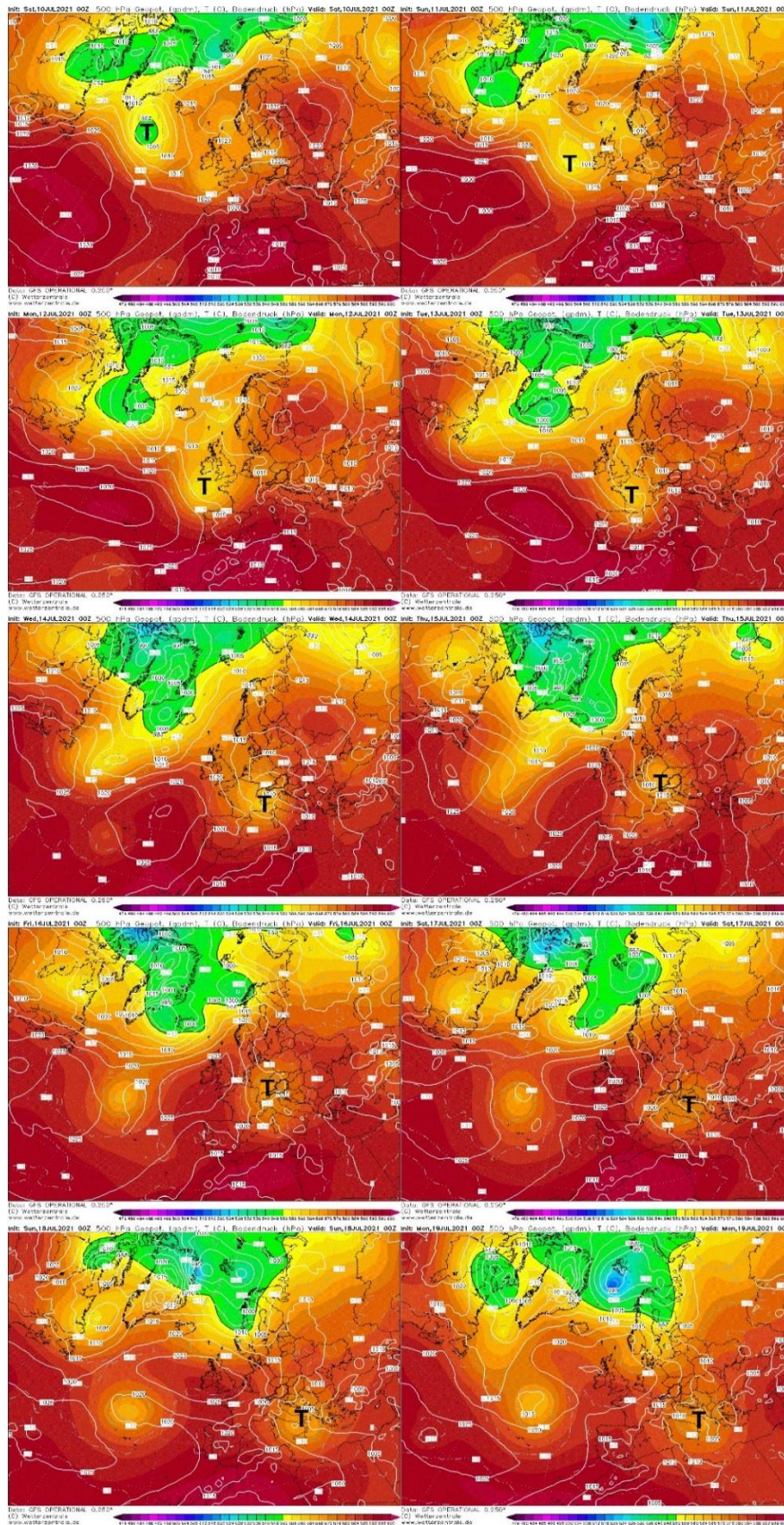


Abbildung 1-2 Position von Bernds Tiefdruckkern vom 10. bis 19. Juli 2021

(Quelle: <https://www.wetterzentrale.de>, abgerufen am 20. Juli 2024)

1.1. Aufgabenstellung und Motivation

Blockierende Wetterlagen sind keine neue Wettererscheinung und aus dem fünften Sachstandsberichts des Weltklimarats geht hervor, dass sich an deren Häufigkeit aufgrund der Klimaerwärmung über Europa nur wenig ändern wird [4]. Allerdings gibt es Anzeichen dafür, dass solche Wetterlagen länger anhalten und stärker ausfallen [5].

Tiefdruckgebiet Bernd hat genau diesen Umstand der Verstärkung durch die Klimaerwärmung gezeigt und aus der Studie der World Weather Attribution geht hervor, dass dieses Ereignis ein Wiederkehrintervall von über 400 Jahren aufweist und die Verstärkung durch Klimaerwärmung 3-19% beträgt [6]. Das zeigt die Korrelation zwischen Klimaerwärmung und Intensivierung von Extremereignissen.

1.2. Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es zu zeigen, dass die Auswirkungen durch das Tiefdruckgebiet Bernd auch ohne Klimaerwärmung verheerend gewesen wären, aber durch die Erderwärmung dieses Extremereignis noch zusätzlich verstärkt worden ist.

Solch eine Zielsetzung prädeterminiert die folgende Struktur der Forschung. Im ersten Abschnitt dieser Arbeit wird beschrieben, wie unser Klimasystem in der Makroskala und die Wetterparameter zur Beschreibung bestimmter Wetterlagen, wie auch das Starkregentief Bernd, durch die Klimaerwärmung beeinflusst werden. Das ermöglicht im zweiten Abschnitt, auf der nächstkleineren Mesoskala Wetterparameter zur Beschreibung des Starkregentiefs zu erörtern, wie Niederschlag entsteht und dieser gemessen wird, so wie die nachfolgende Datenauswertung, um bestimmte Starkregenereignisse mit einer Extremwertstatistik einordnen zu können. Im letzten Abschnitt dieser Arbeit werden zwei Starkregenereignisse über Ostösterreich im Zuge des Tiefdruckgebietes Bernd näher beschrieben. Anhand der Bemessungsniederschläge des Bundesministeriums für Land – und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft werden diese Ereignisse statistisch eingeordnet und mittels der Studie der World Weather Attribution [6], soll der Anteil der Verstärkung des Starkregenereignisses durch die Klimaerwärmung abgeschätzt werden.

2. Makroskalige Wetterentstehung

Um die Entstehung dieser Wetterlagen besser verstehen zu können, muss zuerst die planetarische Zirkulation näher betrachtet werden. Dies dient dazu, die für uns wetterbestimmenden Vorgänge besser einordnen zu können. In weiterer Folge werden auch die Prozesse gezeigt, die Bernd als blockiertes Tief erst möglich gemacht haben.

Die planetare Zirkulation bringt in den Tropen den täglichen Regen, die Trockenheit in die Wüstenregionen, ermöglicht das mild gemäßigte Klima durch den Golfstrom in Europa und trennt die Polarregion von der gemäßigten Klimazone. Allgemein formuliert kann diese Zirkulation auch als ein globaler Wärmetauscher betrachtet werden, der durch die Erhitzung der Luft am Äquator und der Abkühlung am Pol angetrieben wird.

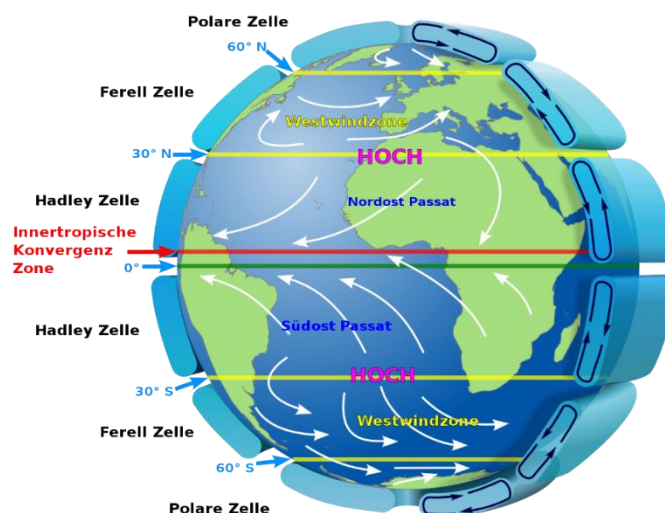


Abbildung 2-1 Die Windbänder der planetaren Zirkulation treiben über den Tropen die Luft zusammen, was als „innertropische Konvergenzzone“ bezeichnet wird. Diese entsteht, da um den Äquator die Erde von der Sonne am stärksten aufgeheizt wird. Durch das Aufsteigen der aufgeheizten Luft entsteht Tiefdruck am Boden und dadurch wird kühlere Luft von weiter nördlich und südlich „angesaugt“. Diese aufsteigende Luft kühlt in der Höhe ab und strömt an der Tropopause in Richtung des 30. Breitengrades. Dort sinkt sie als stark trockene gekühlte Luft wieder zu Boden und strömt weiter Nord oder wieder südwärts. Das ist die Zirkulation in der sogenannten Hadley Zelle, für Mitteleuropa ist die nördlich gelegene Ferrel-Zelle relevant. Die Ost-West Bewegungen der Zellen entstehen durch die Corioliskraft, da sich die Erde am Äquator mit viel höherer Bahngeschwindigkeit dreht und die Winde somit abgelenkt werden.

(Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Planetarische_Zirkulation, abgerufen am 15. April 2024)

2.1. Der Jetstream

Die Ferrel Zelle wird im Süden vom Subtropenjet und im Norden vom Polarjet begrenzt. Der Jetstream ist ein Windband im oberen Teil der Troposphäre. Dieses erreicht sehr hohe Windgeschwindigkeiten und ist für die Verlagerung von Hoch und Tiefdruckgebieten verantwortlich.

Allerdings sind in Abbildung 2-1 nur vereinfachte Szenarien dargestellt. Wie in der Natur üblich, folgt die Realität einem solchen Szenario nur bedingt und die Windbänder werden durch unterschiedliche Temperatur und Druckverteilungen abgelenkt. Wird die Ablenkung der Windbänder zu groß, kann es zu einem sogenannten Cut-Off kommen und ein Teil der Hauptströmung reißt ab. Dann kann es sogar vorkommen, dass diese Wellen wieder Rückwärts wandern. Diese Phänomene sind typisch für den Jetstream [3].

Der Polarjet als Grenze zwischen Polarzelle und Ferrel – Zelle ist für unsere Breitengrade wetterwirksam. So kommen abwechselnd Hoch und Tiefdruckgebiete mit dem Weiterziehen der Rossby – Wellen in Richtung Europa, wie in Abbildung 2-2 gezeigt wird. Allerdings wurde seit 1990 ein Rückgang der Windgeschwindigkeiten im Jetstream um über 10% festgestellt. Durch diese Abnahme der Windgeschwindigkeiten wird die Amplitude der Rossby Wellen größer [3].

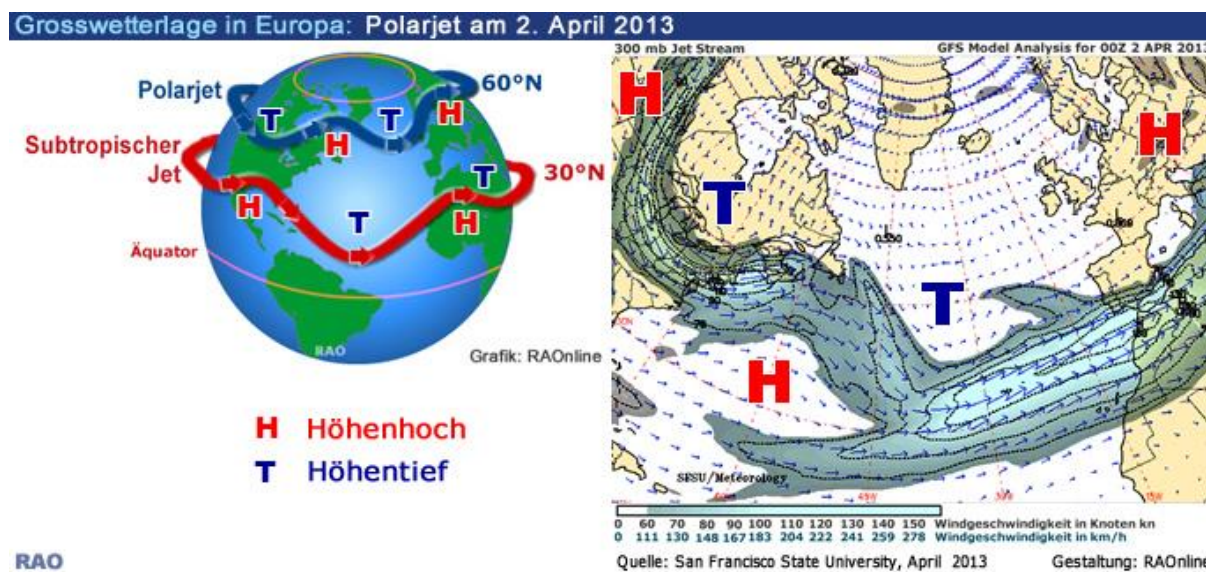


Abbildung 2-2 Ein Beispiel für die Mäander des Jetstreams, den sogenannten Rossby – Wellen. Diese variieren dabei immer in ihrer Amplitude und Position. In diesen Wellen sind Hoch und Tiefdruckgebiete eingelagert. Hochdruckgebiete sind an der Südseite im Wellenberg, Tiefdruckgebiete auf der Nordseite, dem Wellentrog, der Rossby-Wellen eingelagert und wandern üblicherweise mit der globalen Zirkulation von West nach Ost.

(Quelle: <https://www.raonline.ch/pages/edu/cli/strahl01d.html>, abgerufen am 15. April 2024)

2.2. Fallbeispiel Bernd

Die Verlagerung der Tiefdruckgebiete an der Nordseite der Rossby – Wellen folgt normalerweise bestimmten Tiefdrucktrajektorien. Diese wurden von Wilhelm J. v. Bebber Ende des 19. Jahrhunderts dokumentiert und beschrieben [7]. Die Mehrzahl der Tiefdruckgebiete kommt vom Atlantik über die Biskaya nach Mitteleuropa und folgen somit der sogenannten Va – Zugbahn. Weiters folgt dann, abhängig von der Lage der umliegenden Hochdruckgebiete, das Tiefdruckgebiet unterschiedlichen Zugbahnen. So sind vorallem Tiefdruckgebiete mit einer Vb – Zugbahn oftmals für große Hochwasserereignisse in Mitteleuropa verantwortlich [8, 9, 10].

Auch das Tiefdruckgebiet Bernd hat sich anfangs an die Va – Zugbahn gehalten und schien eine weitere Vb – Zugbahn einzulegen. Allerdings verharrte dann der Tiefdruckkern nördlich der Alpen für mehrere Tage und somit blieben auch die Luftströmungen über mehrere Tage ähnlich. Dadurch konnten in denselben Gebieten an der Luftmassengrenze der Fronten des Tiefs laufend neue Schauer entstehen. Erst nach mehreren Tagen wurde das Tiefdruckgebiet unter Abschwächung Richtung Mittelmeer abgedrängt, um sich später dort aufzulösen.

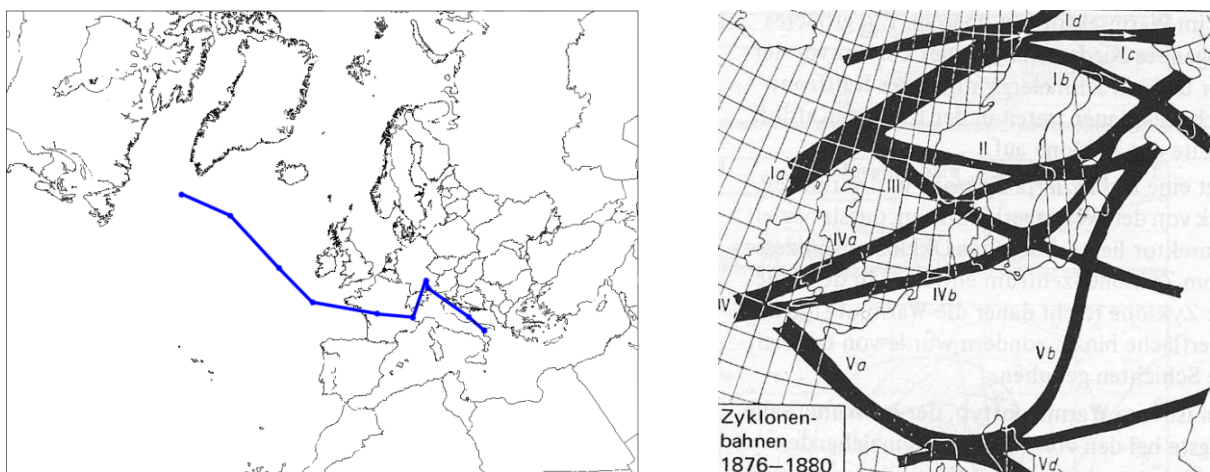


Abbildung 2-3 Gegenüberstellung von Berndts Tiefdrucktrajektorie (links) und den Tiefdrucktrajektorien nach Bebber (rechts)

(Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Mittelveertief>, abgerufen am 21. Juli 2024)

Verantwortlich für diese ungewöhnliche Zugbahn, war das sogenannte Abtropfen von der Hauptströmung, bzw. auch Cut Off genannt. Denn zuerst zog Bernd wie jedes Tief eingebettet im Trog der Rossby Welle Richtung Mitteleuropa und als das Tief begann eine klassische Vb Zugbahn einzulegen, tropfte der Trog dieser Welle von der Hauptströmung ab und blieb somit über einen längeren Zeitraum zwischen dem Hochdruck über den britischen Inseln und Westrussland stationär. Dies wird in der folgenden Abbildung 2-4 anhand der Luftströmungskarten der 500hPa Druckschicht dargestellt. Erst mit dem Weiterziehen der Hauptströmung wurde dann auch das Tief weiter südwärts abgedrängt.

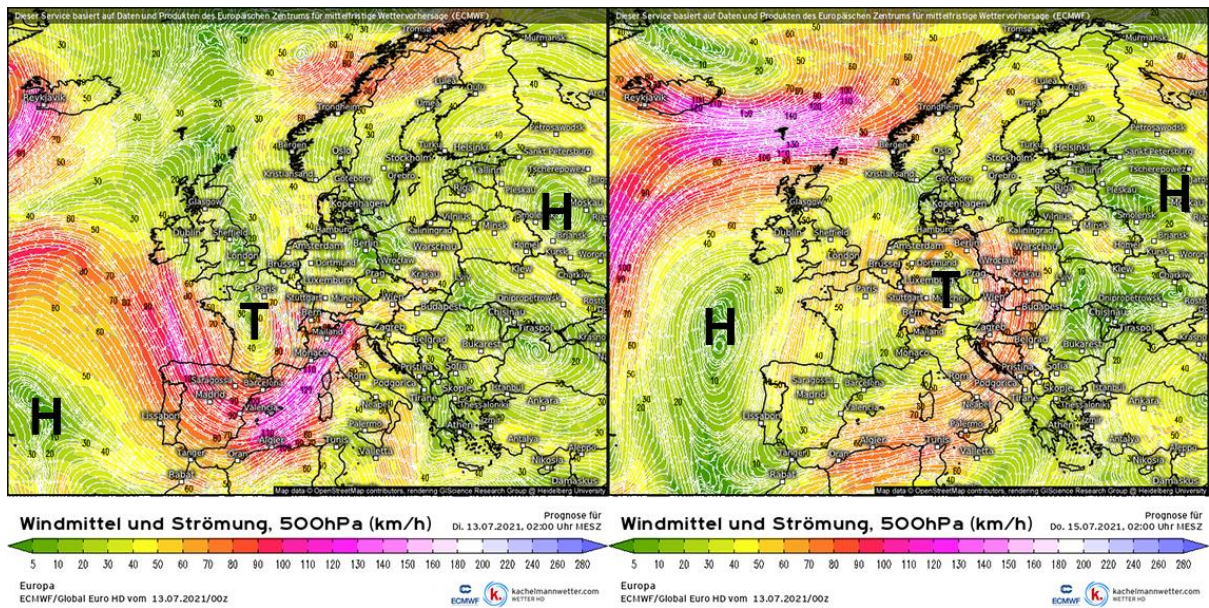


Abbildung 2-4 Im linken Bild vom 13. Juli 2021 ist Tiefdruckgebiet Bernd mit einem T gekennzeichnet, eingebettet im Wellentrog ersichtlich. Im Rechten vom 15. Juli 2021 ist Bernd von der Hauptströmung abgerissen und befindet sich als blockiertes Tiefdruckgebiet zwischen zwei Hochdruckgebieten über Mitteleuropa

(Quelle: <https://kachelmannwetter.com/at>, abgerufen am 15 Juli 2024)

Wie schon anfänglich erwähnt, sind solche Cut Offs nichts außergewöhnliches für den Jetstream allerdings gibt es Anzeichen dafür, dass solche Wetterlagen länger anhalten und stärker ausfallen [5]. Aufgrund physikalischer Gegebenheiten trägt die Erderwärmung einen wesentlichen Teil dazu bei und dieser Einfluss auf den Jetstream wird im folgenden Abschnitt näher erörtert.

2.3. Einfluss des Klimawandels auf den Jetstream

Die Erwärmung im Zuge des Klimawandels betrifft die Polargebiete wesentlich stärker als die Tropen, da die Ausaperung vormals schnee- und eisbedeckter Flächen ausgeprägte positive Rückkopplungen erzeugt. Die verringerten globalen Temperaturgegensätze schwächen somit den Jetstream im Mittel ab, wie schon zuvor in Kapitel 2.1 beschrieben wurde.

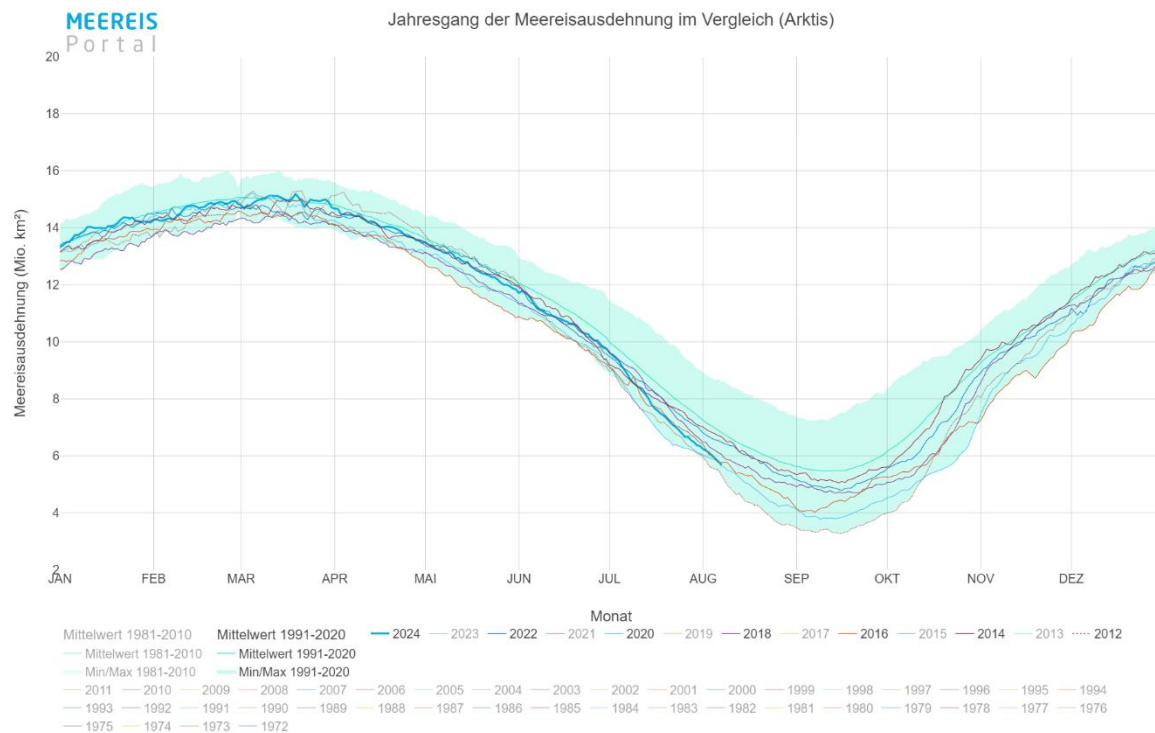


Abbildung 2-5 Anhand der Meereisentwicklung der letzten Jahre in der Arktis, ist der stetige Rückgang der Meereisbedeckung zu erkennen.

Meereisdaten stammen von www.meereisportal.de (Förderung: REKLIM-2013-04), abgerufen am 7. August 2024

Aufgrund des Rückgangs der ehemals schnee- und eisbedeckten Flächen der Arktis geht hervor, dass die reflektierenden hellen Eisflächen kleiner werden, mehr der dunklen Meeresoberfläche frei wird und somit die Albedo der Arktis sinkt. Dadurch wird über die Sommermonate eine größere Fläche des Polarmeeres von der Sonne erhitzt und es kann mehr Wärmeenergie gespeichert werden. Aufgrund der Veränderung der Albedo in den Polarregionen, steigen die Temperaturen in der Arktis im Verhältnis zu anderen Regionen mit gleichbleibender Albedo besonders stark an [11].

Da aber der Jetstream durch die Temperaturunterschiede zwischen Arktis und südlicheren Regionen angetrieben wird, wird dieser bei geringeren Temperaturgradienten schwächer und instabiler. Das bedeutet, dass die Amplitude der

Rossby – Wellen größer wird und diese weiter nach Norden oder Süden mäandrieren können [12].

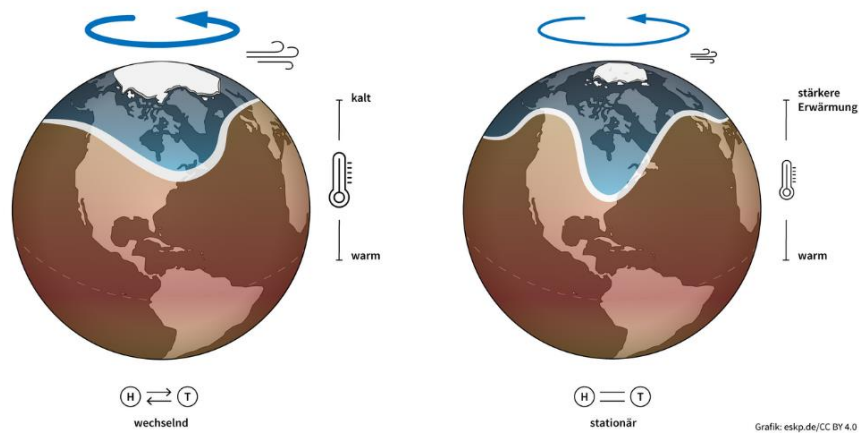


Abbildung 2-6 Größere Wellen Amplitude durch geringeren Temperaturgradienten

(Quelle: <https://www.eskp.de/klimawandel/wie-beeinflusst-der-klimawandel-den-jetstream-9351059/>, abgerufen am 15. April 2024)

Durch die Veränderung der Amplitude des Jetstreams und der daraus resultierenden länger anhaltenden gleichbleibenden Wetterlagen können Extremwetterlagen entstehen [13], wie auch das Tiefdruckgebiet Bernd im Juli 2021.

Jedoch muss an dieser Stelle erneut hervorgehoben werden, dass durch die Veränderung der Amplitude der Rossby Wellen die Entstehung von Extremwetterlagen begünstigt werden kann, aber eine solche Entwicklung von vielen weiteren Faktoren abhängig ist. Denn auch die globalen Meerestemperaturen steigen in den letzten Jahren immer stärker an, was in Abbildung 3-4 verdeutlicht wird. Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf einige Parameter, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

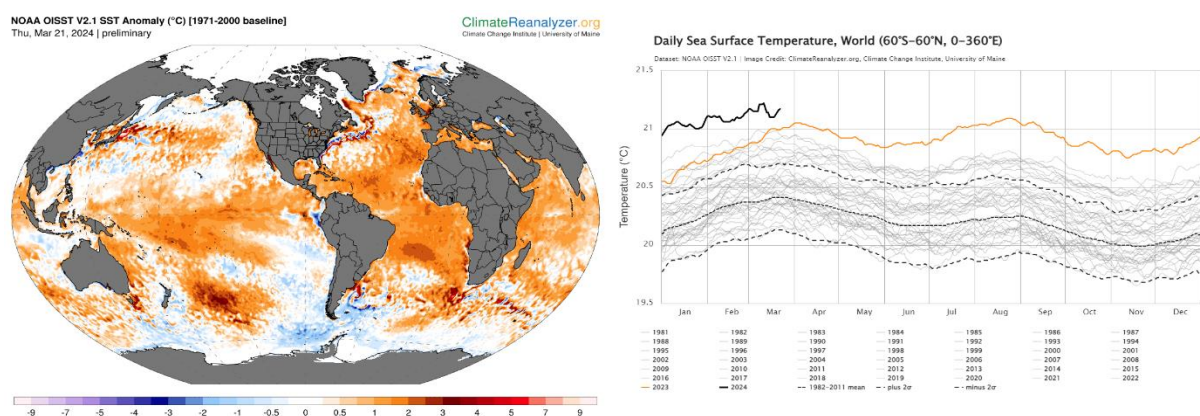


Abbildung 2-7 Meeressoberflächen Temperatur Anomalien als Momentaufnahme aus dem Frühjahr 2024, als Beispiel für einen langjährigen Trend

(Quelle: https://climatoreanalyzer.org/clim/sst_daily, abgerufen am 21.03.2024)

3. Meteorologische Grundlagen

Um die Auswirkungen von mesoskaligen Extremereignissen wie das Starkregentief Bernd beschreiben zu können ist es notwendig zu betrachten, wie die Wetterparameter im Zusammenhang zueinanderstehen und diese die Entstehung eines solchen weiträumigen Ereignisses beeinflussen. Dies wird helfen, die Entwicklungsmuster zu verstehen und die Analyse zu erleichtern. Dazu ist es erforderlich, eine Reihe von Wetterparametern im Kontext des untersuchten Wetterphänomens zu analysieren.

3.1. Wetterparameter

Nachdem nun die Prozesse für die Entstehung solcher blockierenden Wetterlagen betrachtet wurden, ist für die Beschreibung der Auswirkungen der Zusammenhang der Wetterparameter von grundlegender Bedeutung. Diese beschreiben die Beschaffenheit der Atmosphäre und lassen Rückschlüsse auf die mögliche Entstehung bestimmter Ereignisse zu.

Unterteilt werden die Parameter in die direkt gemessenen meteorologischen Kenngrößen und aus diesen werden die errechneten Größen abgeleitet.

3.1.1. Meteorologische Kenngrößen

Die gemessenen meteorologischen Kenngrößen werden direkt an Wetterstationen gemessen. Diese bestehen üblicherweise aus einem Thermometer zur Messung der Temperatur, ein Hygrometer zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit und ein Barometer zur Messung des Luftdrucks. Ein Ombrometer zur Niederschlagsmessung ist ebenfalls Bestandteil einer Wetterstation. Aufgrund der Wichtigkeit, der Niederschlagsmessung und der anschließenden Datenauswertung, für das in dieser Arbeit behandelte Thema, werden diese Methoden im Kapitel 3.3 näher beschrieben.

Temperatur [T]:

Dies ist wohl die wichtigste und bekannteste gemessene Kenngröße. Die Temperatur ist auch als eine physikalische Zustandsgröße beschrieben und ist ein Maß für die mittlere Translationsenergie eines Moleküls, bzw. ein Maß für die mittlere Energie der Luftmoleküle. Grundsätzlich beschreibt sie den Energiegehalt der Luft was auch als Wärmegehalt eines Luftpaketes angesehen werden kann. Da bei kalter Luft der maximal mögliche Sättigungsdampfdruck niedriger ist als bei warmer Luft, kann wärmere Luft mehr Wassermoleküle aufnehmen. Wasser hat die Eigenschaft, bei zunehmender Wärme von einer Oberfläche zu verdampfen. Je höher die Temperatur, desto mehr Wassermoleküle verdunsten von einer Oberfläche, wie zum Beispiel Seen und Meere, und dadurch steigt mit der Temperatur auch der Wassergehalt in der Atmosphäre und somit auch das für Niederschlagsereignisse verfügbare Wasser.

Relative Luftfeuchtigkeit [rH]:

Die relative Luftfeuchtigkeit wird in der Regel mit einem Hygrometer in Prozent gemessen. Sie entspricht dem Verhältnis vom aktuell in der Luft vorhandenen

Wasserdampfpartialdruck zum Sättigungsdampfdruck. Da der Sättigungsdampfdruck mit steigender Temperatur ebenfalls mitsteigt, sinkt die relative Luftfeuchtigkeit in Prozent bei gleichbleibender absoluter Feuchte in g/m^3 . Der Dampfdruck bleibt im genannten Beispiel gleich. Daraus lässt sich allerdings auch schließen, dass die Luft bei steigenden Temperaturen mehr Wasser aufnehmen kann. Aus dem Mollier Diagramm lässt sich ablesen, dass bei Luftdruck auf Meeresebene bei 25°C und 40% rH rund $7,87\text{g}/\text{kg}$ Luft. Erhöht man die Temperatur auf 30°C bei gleicher rH, sind es schon $10,58\text{g}/\text{kg}$ Luft. Dieser Umstand zeigt, dass durch die Temperaturerhöhung aufgrund der Klimaerwärmung deutlich größere Wassermengen in der Atmosphäre gespeichert werden.

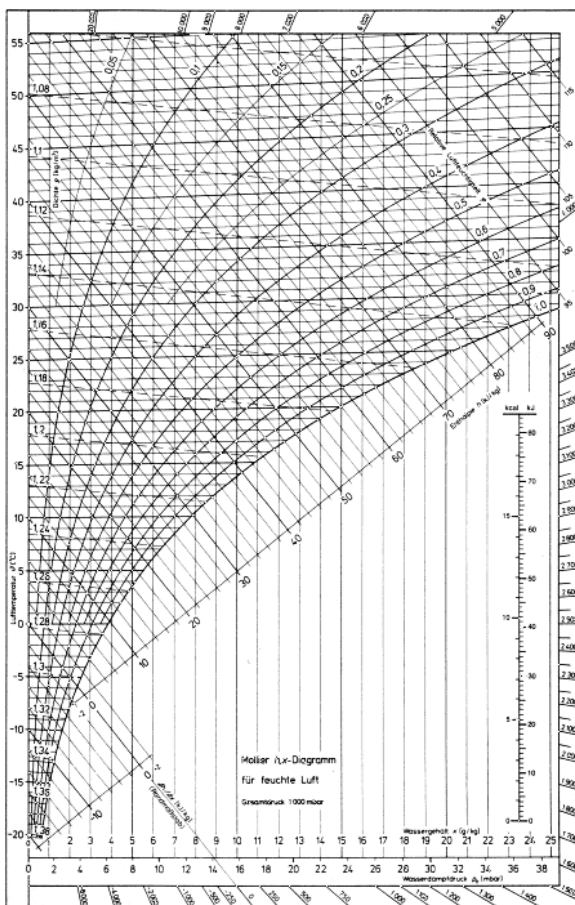


Abbildung 3-1 Mollier h-x Diagramm

(Quelle: <https://www.i-r-b.de/DE/hxdiagramm.html>, abgerufen am 14. April 2024)

Luftdruck [p]:

In der Meteorologie wird der Luftdruck oftmals benutzt, um Hoch und Tiefdruck zu unterscheiden. Ebenso werden bestimmte Atmosphärenschichten, in denen ein bestimmter Luftdruck herrscht, für die Wettervorhersage herangezogen. Grundsätzlich gilt vor allem die Luftschicht, in der ein Druck von 850hPa herrscht in rund 1500m Höhe als weitgehend von Bodeneinflüssen ungestört und somit dient diese für sämtliche Prognosen als Grundlage. Jedoch werden auch die 925hPa und 700hPa Schicht für die untere Troposphäre betrachtet. In der oberen Troposphäre und für den Jetstream sind vor allem die 500, 300 und 200hPa Schicht für weitere Betrachtungen interessant.

Genauer handelt es sich beim Luftdruck um den hydrostatischen Druck der Atmosphäre, also der Gewichtskraft der Luftsäule über dem betrachteten Ort. Aufgrund der Kompressibilität der Luft ist die Dichte in Bodennähe größer als in den höheren Schichten. Daraus resultiert, dass bei gleicher Temperatur und rH, bei steigendem Luftdruck die absolute Feuchte in g/kg Luft sinkt, da der Dampfdruck gleichbleibt, aber die Dichte der Luft steigt und die gleiche Masse Luft weniger Raum einnimmt als die Masse des Wasserdampfes.

3.1.2. Errechnete Parameter

Aus diesen gemessenen Größen lassen sich in weiterer Folge die errechneten Parameter ableiten. Im Zuge dieser Arbeit werden die wichtigsten Parameter für die meteorologische Beschreibung des Starkregentiefs Bernd vorgestellt. Diese geben noch viel genauer Aufschluss über die zum Betrachtungszeitpunkt aktuelle Charakteristik der Atmosphäre.

Taupunkt:

Dies ist jene Temperatur, bei der der Wasserdampfpartialdruck dem Sättigungsdampfdruck bei gleichem Luftdruck entspricht. Einfacher gesagt, wenn die Luftfeuchtigkeit 100% erreicht und die Luft im Wasserdampf gesättigt ist. Dies bedeutet, dass bei sinkender Temperatur Wasser ausgefällt wird, und es kommt zur Bildung von Tau oder Nebel.

Steigt ein Luftpaket auf, kühlt dieses gemäß der Trockenadiabate um 1K/100m Höhendifferenz ab. Dadurch nähert sich die Temperatur der Taupunkttemperatur und sobald diese gleich ist, kommt es zur Kondensation und somit auch zur Wolkenbildung. Bei weiterem Aufstieg des Luftpaketes kühlt dieses gemäß der Feuchtadiabate von ca. 0,4-0,6°C/100m ab. Dadurch lässt sich bestimmen, in welcher Höhe die Wolkenuntergrenze zu finden ist und wie hoch der Wassergehalt eines Luftpaketes ist.

Niederschlagbares Wasser:

Diese Größe ist besonders für die Beschreibung vom in der Atmosphäre vorhandenen Wasserdampf von großer Bedeutung. Diese Größe gibt an, welche Menge an Wasser in einer Luftsäule vom Boden bis zur Tropopause mit einem Quadratmeter Grundfläche vorhanden ist. Theoretisch gesehen wird die gesamte Wassermenge dieser Luftsäule ausgefällt und das ergibt den Wert des niederschlagbaren Wassers in Liter pro Quadratmeter, was auch in Millimeter pro Quadratmeter angegeben werden kann, da ein Liter Wasser auf einem Quadratmeter eine ein Millimeter hohe Wassersäule ergibt.

In kalter Luft ist dieser Wert naturgemäß sehr niedrig, da in kühler Luft die absolute Feuchte gering ist. Steigt allerdings die Temperatur können sehr hohe Werte erreicht werden und besonders bei konvektiven Ereignissen führt dies zu enormen Regenmengen, da durch die Bildung eines mikroskaligen Tiefdruckgebietes einer Schauerzelle die Umgebungsluft angesaugt wird und somit enorme Wassermassen ausgefällt werden können. [14]

Potenzielle Äquivalenttemperatur [θ_e]:

Eine der wichtigsten errechneten Größen ist die Äquivalent potenzielle Temperatur und in diesem Zusammenhang auch die Äquivalenttemperatur.

Dieser Parameter ist ein Maß für die in der Atmosphäre gespeicherten Energie, zusammengesetzt aus der im Gasgemisch der Luft gespeicherten Wärmeenergie und der gespeicherten Energie im Wasserdampf des betrachteten Luftpaketes. Aufgrund dessen ist dieser Parameter besonders bei Schauerbildung relevant. Wird die Luftschichtung labiler, kann je nach Labilität der Luftschichtung ein Teil dieser Energie umgesetzt werden. Vereinfacht gesagt ist die Labilität einer Luftschichtung von der Temperaturabnahme mit der Höhe abhängig. Desto stärker diese Temperaturabnahme ist, desto labiler wird die Luftschichtung, da Bodennahe warme Luft aufgrund ihrer geringeren Dichte stärker dazu neigt aufzusteigen. Das bringt besonders bei sommerlichen Kaltfronten aufgrund der beginnenden Abkühlung in höheren Luftschichten die Gefahr sehr starker konvektiver Erscheinungen mit sich, wie später noch in Kapitel 3.2.2 gezeigt wird.

3.2. Entstehung eines Tiefdruckgebietes

Nachdem nun einige Wetterparameter gezeigt wurden, wird der Prozess der Tiefdruckentstehung vorgestellt und somit auch welcher Zusammenhang zwischen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck spielt.

Vereinfacht beschrieben, entsteht Tiefdruck, wenn sich ein Luftpaket stärker erwärmt als die umliegende Luft, sich dabei ausdehnt, dadurch an Dichte verliert, leichter wird und deshalb aufsteigt. Dann beginnt der Luftdruck zu sinken und die umliegende bodennahe Luft strömt nach. Einerseits aus den wärmeren südlicheren Regionen Warmluft und aus den kühleren nördlicheren Regionen Kaltluft. Durch die Corioliskraft werden die zuströmenden Luftmassen abgelenkt und dieses Tiefdruckgebiet beginnt zu rotieren. Dadurch können sich die sogenannte Warmfront und Kaltfront ausbilden [15].

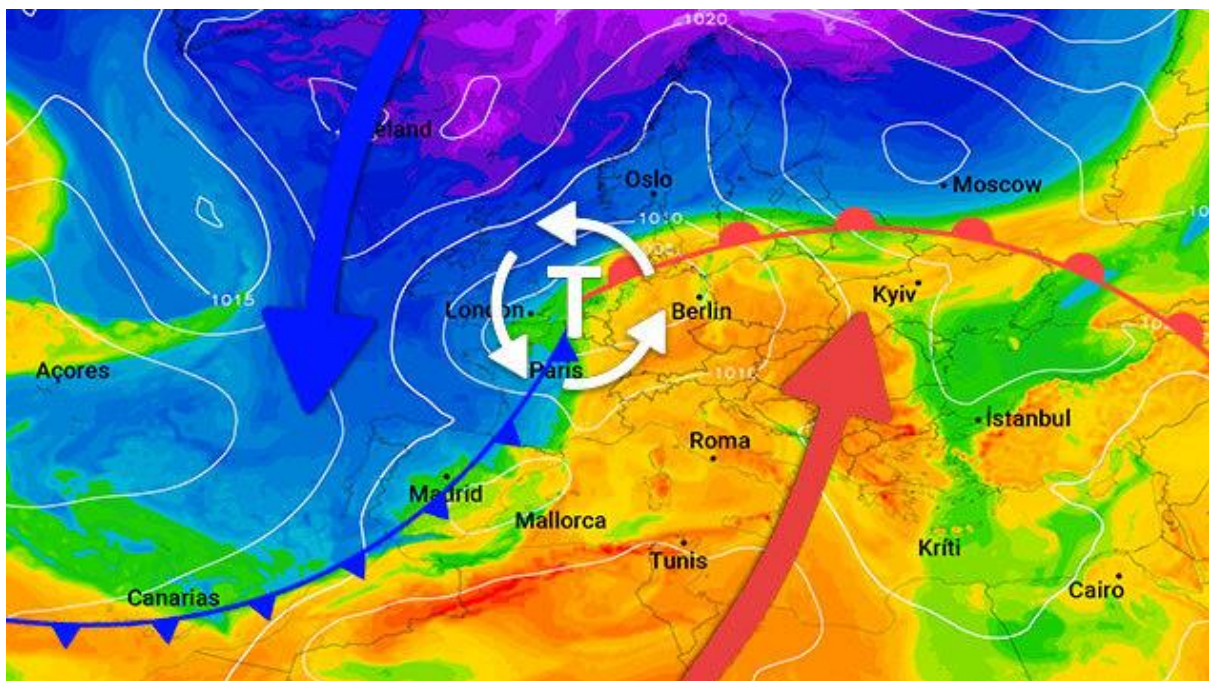


Abbildung 3-2 Darstellung eines Tiefdruckgebietes mit der schematischen Darstellung der aus Süden zuströmenden Warmluft und der aus Norden zuströmenden Kaltluft.

(Quelle: <https://www.wetteronline.at/wetterlexikon/tiefdruckgebiet>, abgerufen am 12. April 2024)

3.2.1. Die Warmfront

Die wärmeren und daher leichteren Luftmassen gleiten auf die in Zugrichtung vor ihnen liegenden schwereren kühleren Luftmassen auf. Der Ablauf eines Warmfrondurchzugs ist in Abbildung 3-3 schematisch dargestellt. Warmfronten haben als Vorboten hohe Cirrus – Bewölkung in über 10km Höhe, auf die mittelhohe Altostratus Bewölkung folgt. Mit Eintreffen der Warmfront folgt auch meist tiefliegende Nimbostratus Bewölkung, die auch als Regenwolken bekannt sind und leicht bis mäßige Niederschläge bringen. Vor dem Eintreffen und nach der Warmfront sinkt der Luftdruck und mit Eintreffen der Warmfront steigt die Temperatur.

Da allerdings im Sommer die Luftmassen über Mitteleuropa generell sehr warm sind, sind diese Fronten meist nur schwach wetterwirksam. So brachte auch Berndts Warmfront keine auffälligen Wettererscheinungen mit sich, allerdings wurden im Warmluftsektor laufend sehr warme und relativ feuchte Luftmassen aus dem Mittelmeerraum in Richtung Mitteleuropa transportiert, wo diese auf Berndts Kaltfront trafen.

3.2.2. Die Kaltfront

Diese bewegt sich in Richtung der Warmfront und bringt im Normalfall eine Abkühlung in allen Höhen der Luftschichten. Da die Warmfront durch das Aufgleiten mit der Zeit an Geschwindigkeit verliert, holt die oftmals schnellere Kaltfront die Warmfront ein und diese beiden Fronten beginnen zu okkludieren (=verschmelzen).

Eine Kaltfront zeichnet sich besonders dadurch aus, dass sie die vor ihr leichteren warmen Luftmassen im Warmluftsektor zum Aufsteigen zwingt und somit verstärkt vertikale Luftbewegungen ausgelöst werden, dies wird ebenso in Abbildung 3-3 schematisch dargestellt. Diese starken vertikalen Luftbewegungen begünstigen die Entstehung von Schauern oder Gewittern, wie es auch bei Starkregentief Berndt der Fall war. Die Ankunft einer Kaltfront wird oft durch starken kühlen Wind, Quellwolken und eventuell Gewitterwolken angekündigt. Die Temperatur sinkt beim Durchgang schlagartig um mehrere Grade und der Luftdruck beginnt wieder zu steigen.

Auf der Rückseite der Kaltfront (Kaltsektor, eine Luftmasse vom kühleren Polarmeer oder der Arktis kommend) sind die höheren Atmosphärenschichten in der Regel stark unterkühlt. Ist die Sonneneinstrahlung Tagsüber stark genug, führt das zu weiterer Schauerbildung, dem so genannten Rückseitenwetter.

Zur Verdeutlichung des zeitlichen Ablaufs eines Tiefdruckgebiet Durchzugs mit der zuerst eintreffenden Warmfront, dem dann wetterbestimmenden Warmluftsektor und der darauffolgenden Kaltfront, ist hier ein Schnitt durch ein Frontensystem schematisch gezeigt.

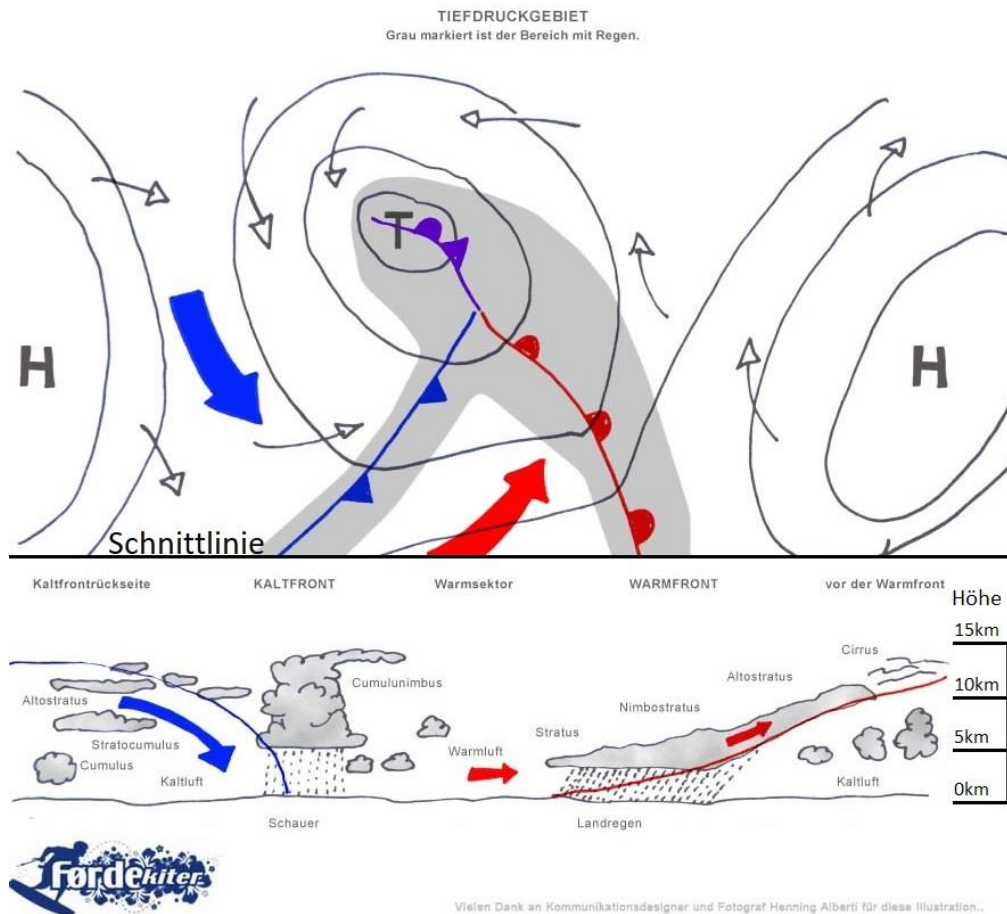


Abbildung 3-3 Schematische Darstellung der Fronten eines Tiefdruckgebietes mit Querschnitt
 (Quelle: https://foerdekiters.yooco.de/kleine_wetterkunde, abgerufen am 10. August 2024)

3.3. Niederschlagsdatenerhebung und Auswertung

Im folgenden Kapitel wird nun die Entstehung von Niederschlag, so wie die Niederschlagsmessung und Auswertung der Messergebnisse zur Darstellung eines Ereignisses näher beschrieben, was auch in weiterer Folge zur Analyse der beiden betrachteten Starkregenereignisse im Detail hilfreich sein wird.

Mit den Fronten eines Tiefdruckgebietes kommt auch Niederschlag in den verschiedensten Formen am Boden an. Hierbei kann es sich um feste oder flüssige Niederschlagsformen handeln. Damit dieser jedoch entstehen kann, ist eine Übersättigung der Wolke notwendig. Der Wasserdampf der übersättigten Wolke kondensiert und bildet kleine Tröpfchen. Sobald die Wolke höher in die Troposphäre wächst und die Temperatur tief genug ist, bilden sich kleine Eiskristalle statt der kleinen Tröpfchen. Diese kleinen Tröpfchen und / oder Eiskristalle kollidieren und verschmelzen durch Koaleszenz. Diese wachsen weiter und sobald die vertikalen Winde diese sogenannten Hydrometeore nicht mehr in Schwebelage halten können, fallen diese zu Boden.

Besonders in Schauer bringenden Wolken, den sogenannten Cumulus congestus und Cumulonimbus Wolken herrschen starke vertikale Winde und oftmals werden diese Hydrometeore in große Höhen mitgerissen, so dass sie dort zu Hagelkörnern heranwachsen können, die auf ihrem Weg zum Boden nicht mehr vollständig schmelzen können.

Mit diesen Schauern werden die höchsten Niederschlagsraten erreicht, wie es auch mit der Kaltfront von Starkregentief Bernd der Fall war. Die Stärke des Niederschlags, die Niederschlagsrate, wird üblicherweise in Millimeter pro Stunde, abgekürzt in mm/h, gemessen. Diese gibt an, wieviel Liter Wasser auf einem Quadratmeter in einer Stunde bei dieser Niederschlagsrate fallen würden. Die Methoden, um diese Niederschlagsraten und daraus resultierenden Niederschlagshöhen ermitteln zu können und statistisch einzuordnen, werden in weiterer Folge vorgestellt.

3.3.1. Methodik der Niederschlagsmessung

Niederschlagsradar

Die bekannteste Form der Niederschlagsmessung ist das Niederschlagsradar. Es bietet aufgrund seiner zwei- und dreidimensionalen Darstellungsmöglichkeit von Niederschlagsereignissen sehr viele flächenbezogene Informationen. Besonders bei örtlich begrenzten Starkregenereignissen können mit dem Niederschlagsradar wertvolle Informationen über Heftigkeit und Entwicklung gewonnen werden.

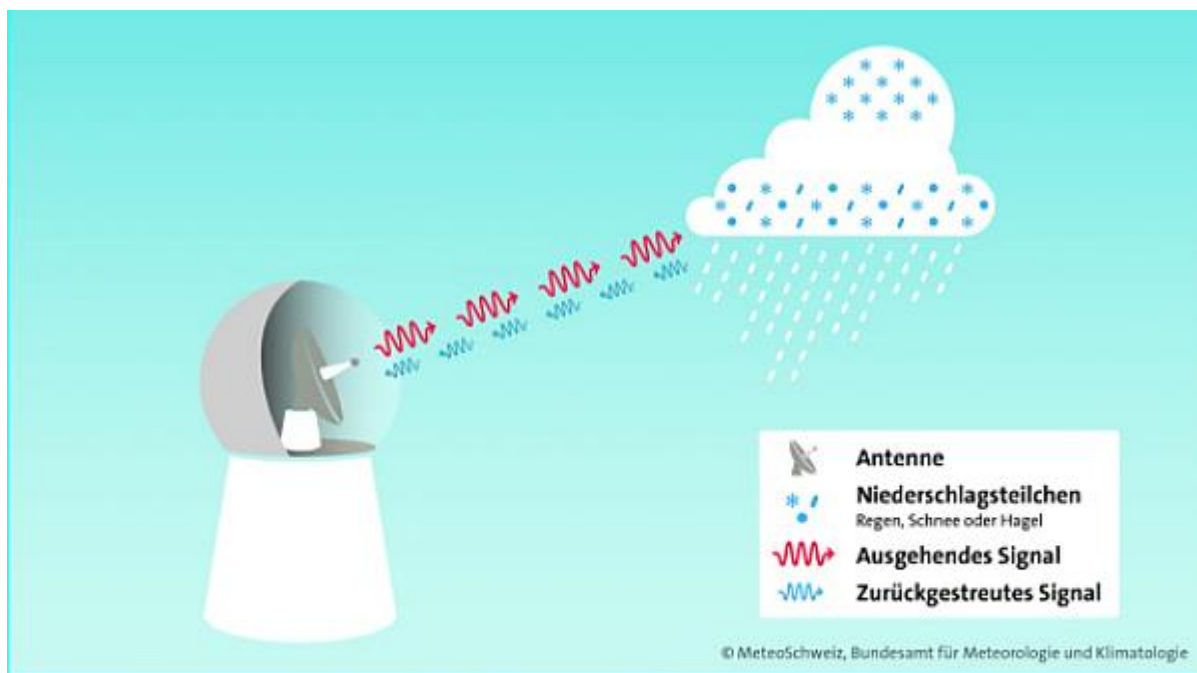


Abbildung 3-4 Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Niederschlagsradars

(Quelle: <https://schwyz-infra.ch/natuurinsel/wie-funktioniert-ein-wetterradar>, abgerufen am 20. April 2024)

Ein Niederschlagsradar funktioniert prinzipiell wie jedes andere Aufklärungsradar, jedoch mit einem signifikanten Unterschied. Ein Sender sendet Radarwellen aus und während das Aufklärungsradar kompakte Objekte identifiziert, wird beim Niederschlagsradar die gesamte Rückstrahlfläche der in einem Kubikmeter enthaltenen Partikel bestimmt (siehe Abbildung 4-6). So kann ein großer Schwarm Vögel ein ähnliches Signal wie ein Regenschauer verursachen, so wie auch sehr große einzelne Hagelsteine dieselbe Reflektivität haben können wie starker Regen.

Die Stärke der zurück geworfenen Wellen wird in der logarithmischen Einheit dBZ angegeben und wird als Reflektivität bezeichnet. Wobei dB für Dezibel, dem zehnten Teil eines Bels steht. Die Einheit Bel beschreibt das Verhältnis der ausgesendeten zur zurück geworfenen Leistungsgröße. Diese gemessene Reflektivität wird dann in Niederschlagsraten mit der Einheit mm/h umgerechnet.

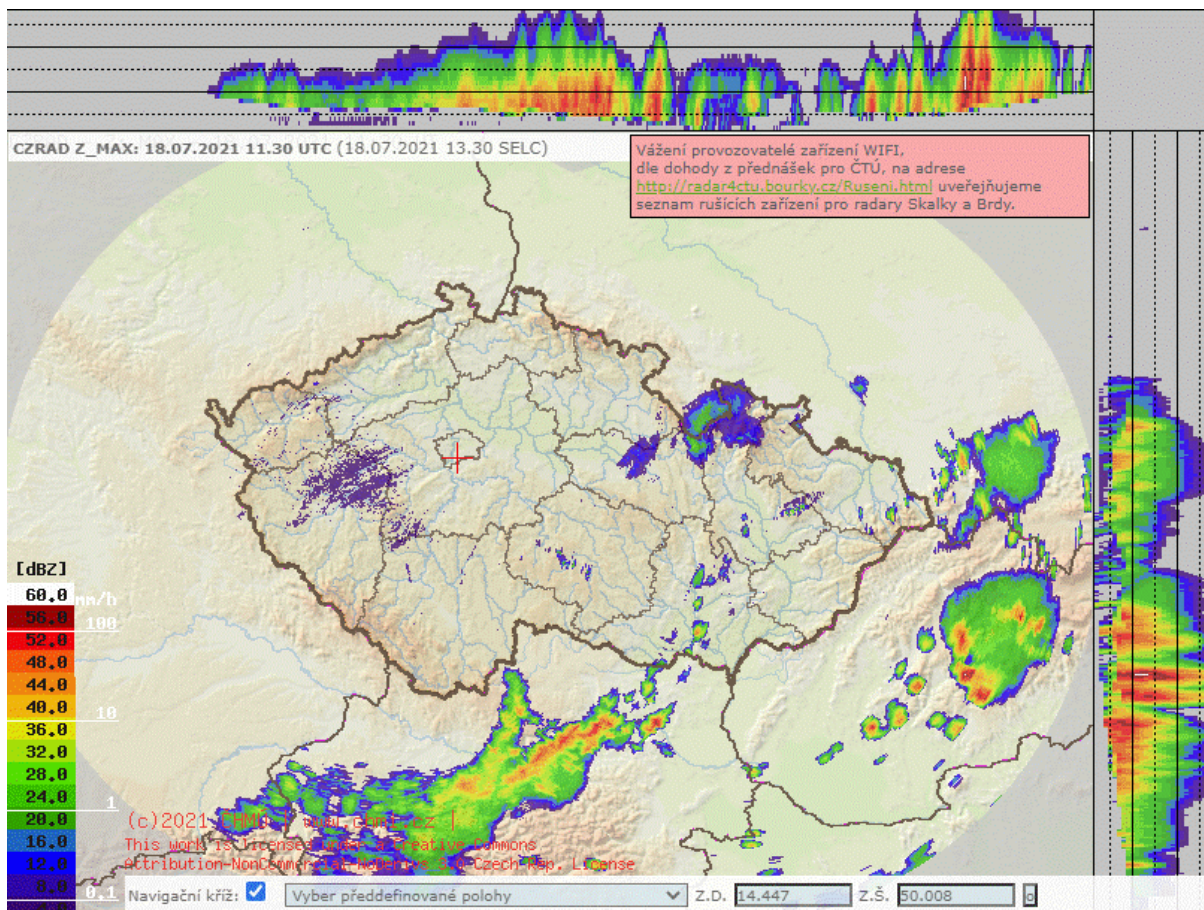


Abbildung 3-5 In einer Radardatenanalyse lassen sich kräftige Schauer anhand der Intensitätsskala, in diesem Beispiel mit roten Farbtönen, identifizieren. Diese Radaranalyse mit Querschnitt zeigt die Starkregenereignisse über dem Niederösterreichischen Mostviertel vom 18. Juli 2021 um 13:30 MESZ.

(Quelle: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/inca-cz/short.html>, abgerufen am 18. Juli 2021)

Ombrometer

Da allerdings ein Niederschlagsradar nur die reflektierenden Partikel oberhalb der Erdoberfläche erfassen kann, werden zur ortsgenauen Niederschlags Erfassung Ombrometer am Boden verwendet. Diese dienen einerseits dazu Radarsignale besser interpretieren zu können und Auskunft über den tatsächlich gefallenen Niederschlag zu geben, andererseits aber werden diese Messungen zur Bestimmung von Stärke und Position von Niederschlagsereignissen herangezogen. Besonders bei starken punktuellen Ereignissen liefern Radar – und Bodenmessungen in Kombination meist relativ genaue Ergebnisse.

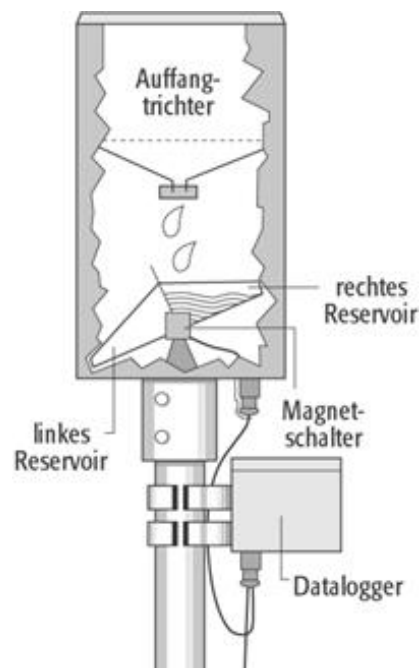


Abbildung 3-6 Eine Methode der digitalen Messung am Boden ist der Ombrometer mit Regenwippe. Hier wird mit dem Auffangtrichter der Niederschlag gesammelt und gelangt in eines der Reservoirs der Wippe. Ist diese bis zu einer bestimmten Höhe gefüllt schlägt die Wippe um und löst am Magnetschalter einen Impuls aus, der an den Datalogger gesendet wird, die Auflösung beträgt meist 0,1mm. Jedoch bringt diese Messweise einige Nachteile mit sich, besonders für feste Niederschlagsformen. Das Wasseräquivalent von festem Niederschlag kann auf diese Art nur mit Hilfe einer Heizung erfasst werden und dadurch kann es zu erheblichen Verdunstungsverlusten kommen. Ebenso kann durch Hagel oder Graupel der Auffangtrichter verstopfen und es kommt zur Verfälschung der Messergebnisse. Um diesen Messfehler zu minimieren, werden Geräte eingesetzt, die den gefallen Niederschlag wägen.

(Quelle: <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/niederschlagsmessung/5502>, abgerufen am 20. April 2024)

3.3.2. Statistische Auswertung

Nachdem die Niederschlagsraten und die tatsächlich gefallenen Niederschlagshöhen erfasst wurden, können die Daten ausgewertet werden und bestimmten Wiederkehrintervallen zugeordnet werden. Den meisten Niederschlagsereignissen mit einer sehr hohen Wiederkehrswahrscheinlichkeit wird in der Regel keine Relevanz für eine Extremwertstatistik zugeschrieben. Allerdings orientiert sich eine Extremwertstatistik an der Dauer und der Intensität eines Ereignisses. So kann es vorkommen, dass ein einzelner Schauer kein relevantes Ereignis darstellt, aber als Teil einer Ereigniskette durchaus die Ausmaße eines Extremereignisses erreichen kann, wie es auch bei den im nächsten Kapitel betrachteten Starkregenereignissen der Fall war.

Der hydrografische Dienst des Bundesministeriums für Land – und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft hat über die Web-GIS Anwendung eHYD einen genauen Leitfaden über die Berechnung der aktuellen Bemessungsniederschläge aus dem Jahr 2020 veröffentlicht.

Diese Bemessungsniederschläge wurden für ein Raster mit 6km Auflösung bestimmt. Die Bemessungshöhe für die jeweiligen Zeitintervalle an den Rasterpunkten wurde durch ein gewichtetes Mittel zwischen den interpolierten Messstellenauswertungen (ÖKOSTRA) und den maximierten Modellniederschlägen (MaxModN) gebildet [16].

Diese Bemessungsniederschläge werden in weiterer Folge zur Einordnung der beiden betrachteten Starkregenereignisse herangezogen.

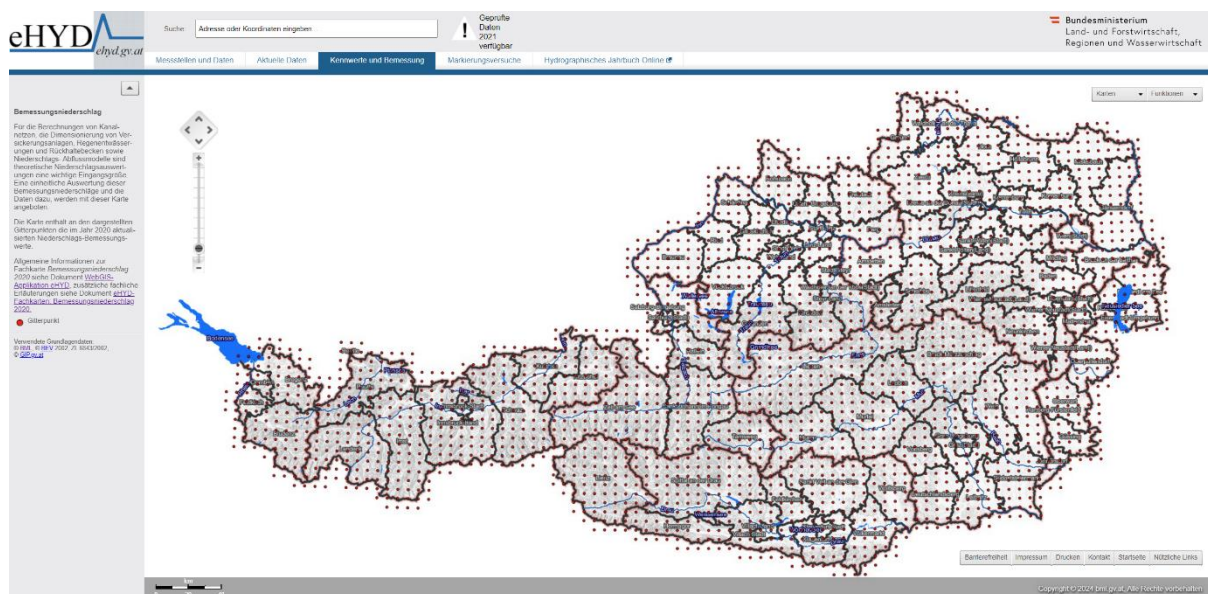


Abbildung 3-7 Die roten Punkte zeigen die Gitterpunkte des 6x6km Rasters für die aktuellen Bemessungsniederschläge des BML aus dem Jahr 2020

(Quelle: https://ehyd.gv.at/?g_card=pegelaktuell, abgerufen am 12. August 2024)

4. Analysen zu Starkregentief Bernd

Anschließend nach Vorstellung der makroskaligen Wetterentstehung, der Wetterparameter zur Beschreibung des Extremereignisses, wie Niederschlag entsteht und dieser gemessen wird, so wie die nachfolgende Datenauswertung, um ein Starkregenereignis mit einer Extremwertstatistik einordnen zu können, werden die Einflüsse, die zu diesem Extremereignis durch das Tiefdruckgebiet Bernd geführt haben im Allgemeinen betrachtet. Danach werden die zwei Starkregenereignisse über Ostösterreich im Zuge des Starkregentiefs Bernd näher betrachtet und diese dem Ergebnis der Studie der World Weather Attribution [6] gegenübergestellt, um den Anteil der Verstärkung der Starkregenereignisse durch die Klimaerwärmung abschätzen zu können.

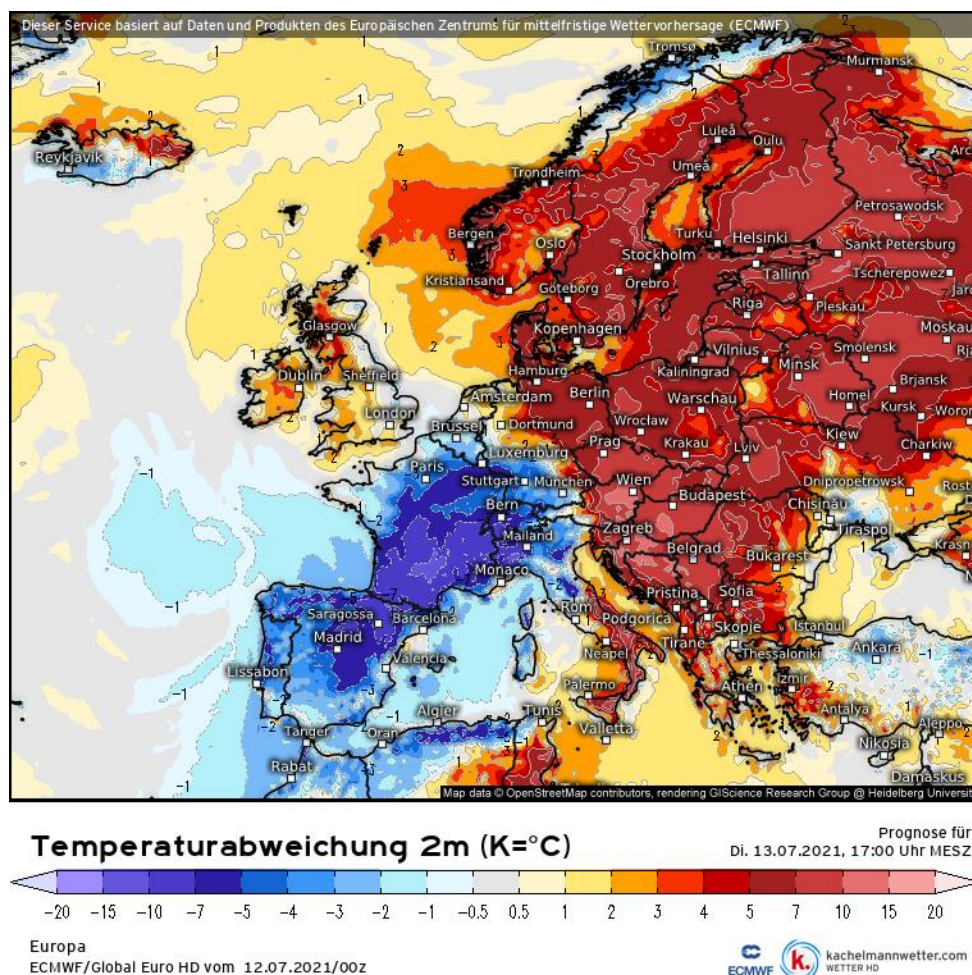


Abbildung 4-1 Anhand der Temperaturabweichung vom langjährigen Mittelwert, sind die Bereiche, die zu warm oder kalt sind, deutlich zu erkennen. Während die osthälfte Europas im Warmluftsektor des Tiefs eindeutig zu warm war, lagen die Temperauren in der Westhälfte im Kaltluftsektor weit unter dem Mittelwert.

(Quelle: <https://kachelmannwetter.com/de>, abgerufen am 13. Juli 2024)

Im Kapitel 3.1.1 ist der Zusammenhang von Wasserdampf in der Atmosphäre und Temperatur näher erklärt worden. Denn auch das Mittelmeer war zu dieser Zeit überdurchschnittlich warm (siehe Abbildung 4-2). Anhand der Strömungskarten (siehe Abbildung 2-4) aus diesem Zeitraum lässt sich schlussfolgern, dass die feucht warmen Luftmassen aus dem Mittelmeerraum nach Mitteleuropa transportiert wurden.

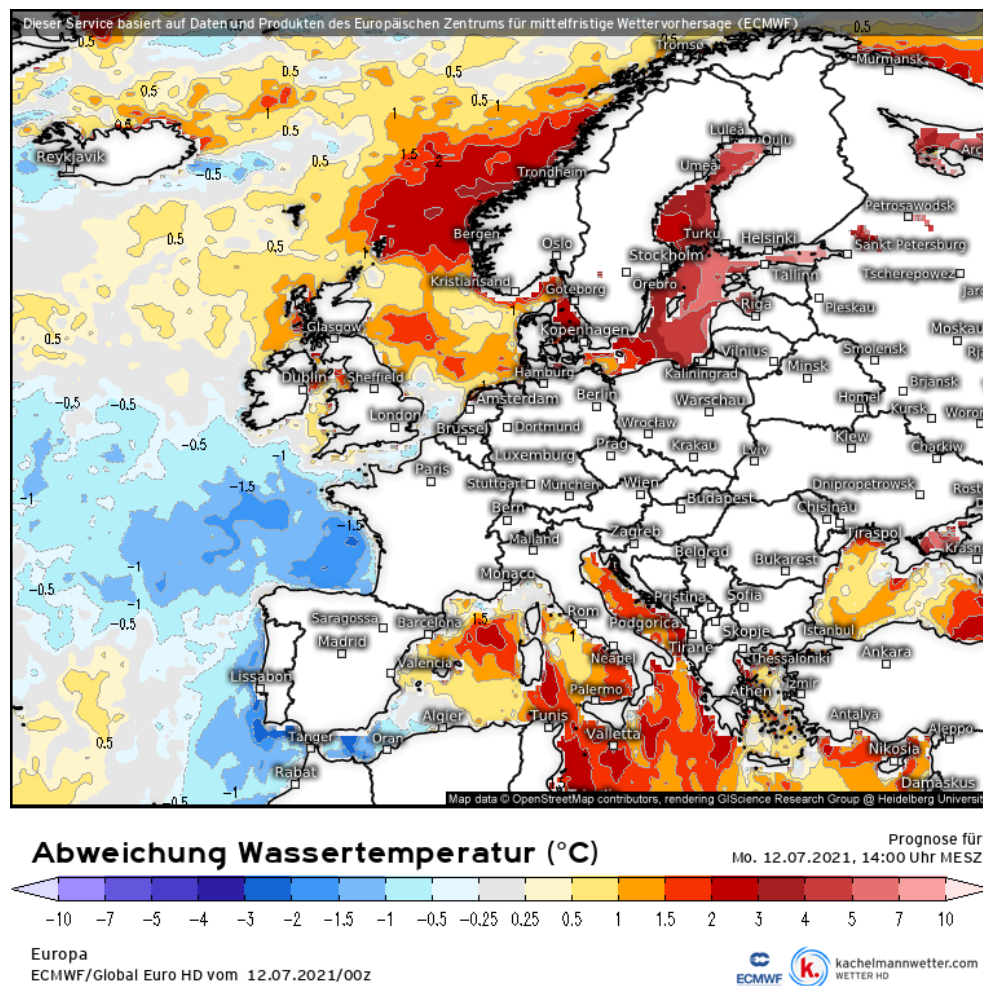
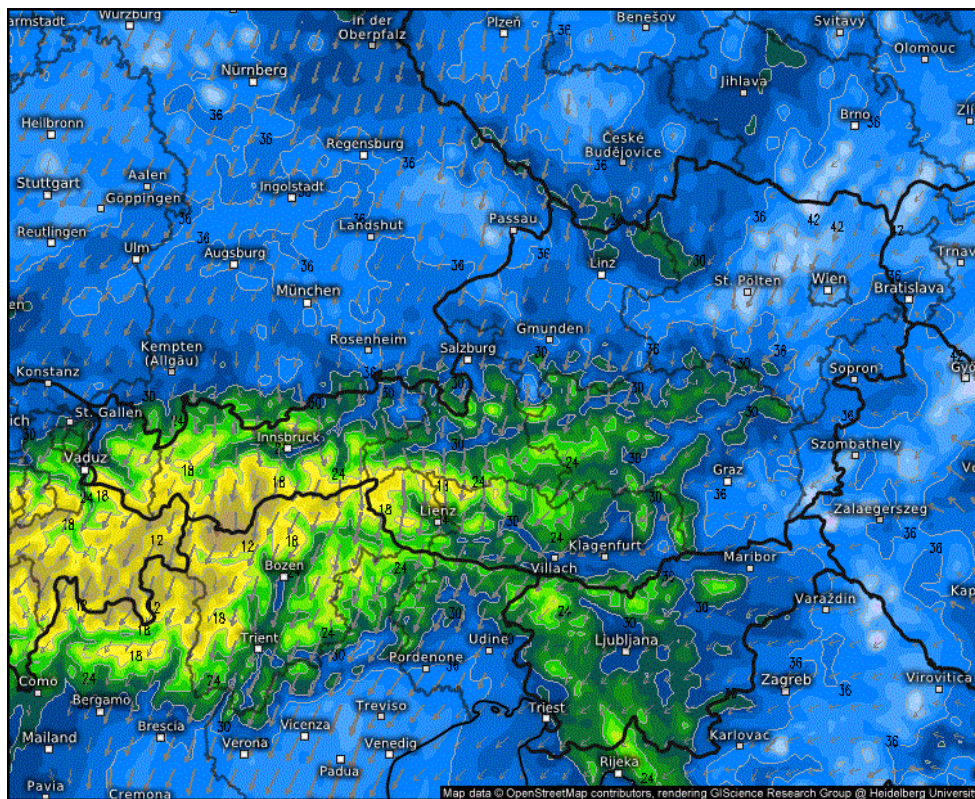


Abbildung 4-2 Die Abweichung der Wassertemperatur zeigt, wie stark die Wassertemperatur zum Betrachtungszeitpunkt vom langjährigen Mittelwert abweicht.

(Quelle: <https://kachelmannwetter.com/de>, abgerufen am 13. Juli 2024)

Durch die stärkere Verdunstung aufgrund der überdurchschnittlichen Temperaturen, konnte auch der Wassergehalt in der Atmosphäre ansteigen. Dies wird in folgender Abbildung 4-3 durch die Karte des atmosphärischen niederschlagbaren Wassers verdeutlicht.



Atmosphärisches Niederschlagswasser (mm) Prognose für 17.07.2021, 17:00 Uhr MESZ
 Österreich
 ECMWFbase Swiss HD 4x4 (2 Tage) vom 16.07.2021/18z

Abbildung 4-3 Niederschlagbares Wasser in der Atmosphäre im Einflussgebiet des Starkregentiefs Bernd zum Zeitpunkt des Starkregenereignisses über Wien am Abend des 17. Juli 2021

(Quelle: <https://kachelmannwetter.com/de>, abgerufen am 16. Juli 2024)

Im Kapitel 3.1.2 wird beschrieben, dass der Wert des niederschlagbaren Wassers in der Atmosphäre angibt, wieviel Wasser in einer Luftsäule vom Boden bis zur Tropopause mit einem Quadratmeter Grundfläche vorhanden ist. Üblicherweise wird mit Durchzug der Kaltfront ein Teil dieser Feuchtigkeit ausgefällt und der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre nimmt ab. Da Bernd als blockiertes Tief mehrere Tage über dem gleichen Gebiet stand, wie in Kapitel 2.2 gezeigt wurde, blieben auch die Luftströmungen und Position der Luftmassengrenzen der Fronten über längere Zeit ähnlich und somit konnten über viele Stunden hinweg an den gleichen Orten Schauer und Gewitter entstehen, da laufend neue feuchtwarme Luftmassen aus dem Mittelmeerraum herantransportiert wurden.

Erst mit der weiteren Verlagerung des Tiefdruckwirbels und veränderten Luftströmungen gingen die Starkniederschläge wieder zu Ende.

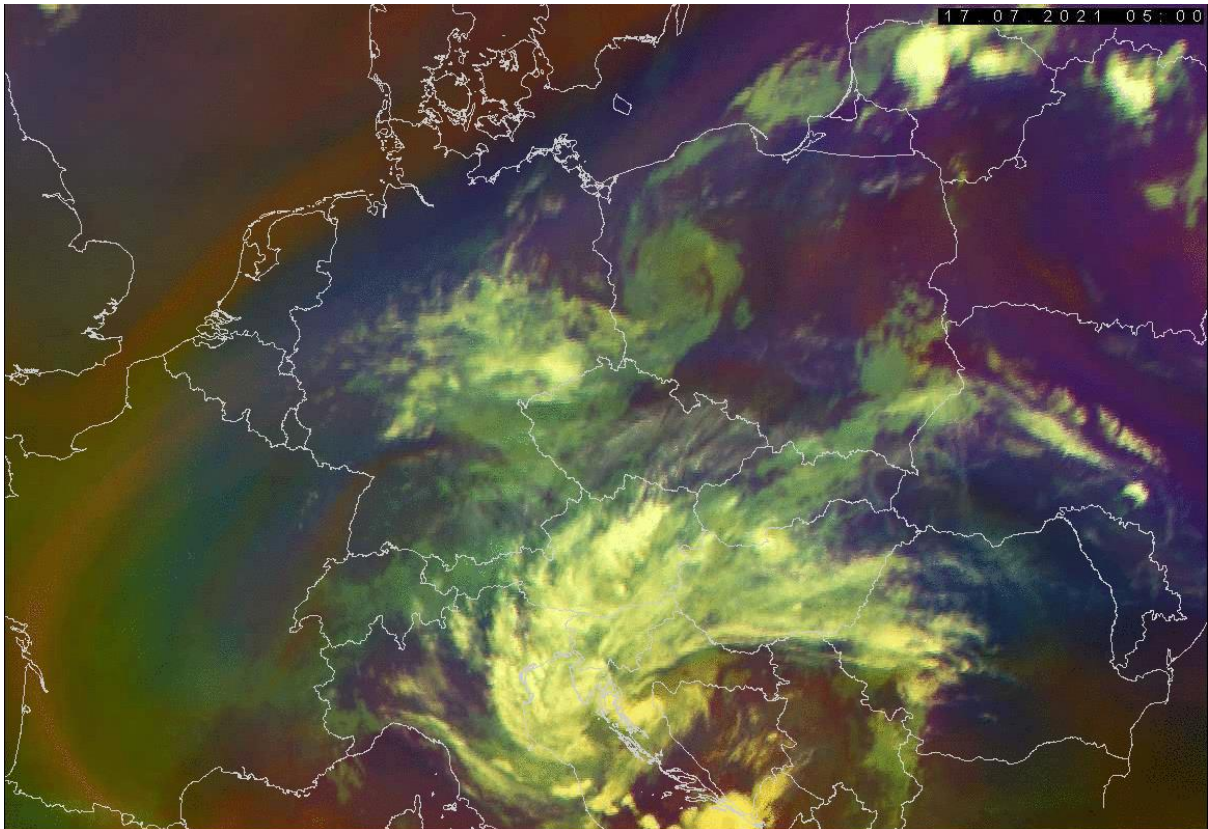


Abbildung 4-4 Am Satellitenbild kennzeichnen Blau-Violette Farben sehr feuchte Luftmassen und orange Töne für trockene Luftmassen. Zum Zeitpunkt der Aufnahme ist der in Richtung Mittelmeer abziehende Tiefdruckwirbel Bernds über der nördlichen Adria zu sehen.

(Quelle: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/sat/data_jsmsgview.html, abgerufen am 17. Juli 2021)

4.1. Fallbeispiele:

Das Starkregentief Bernd brachte über weite Strecken Europas außergewöhnliche Regenmengen mit den entsprechenden Auswirkungen [17], weswegen sich aufgrund des Umfangs in weiterer Folge die genauere Analyse auf die beiden Starkregenereignisse über Wien und dem Mostviertel in Niederösterreich beschränkt.



Abbildung 4-5 Diese Niederschlagssummen Karte wurde von der ZAMG am 19. Juli 2021 veröffentlicht und zeigt die am 17. Und 18. Juli 2021 gefallene Niederschlagshöhe. Anhand der Skala auf der rechten Seite lassen sich die Farben Interpretieren und es werden mehrere Gebiete mit besonders hohen Niederschlagshöhen ersichtlich.

(Quelle: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/aktuell>, abgerufen am 19. Juli 2021)

4.1.1. Starkregenereignis in Wien am 17.7.2021

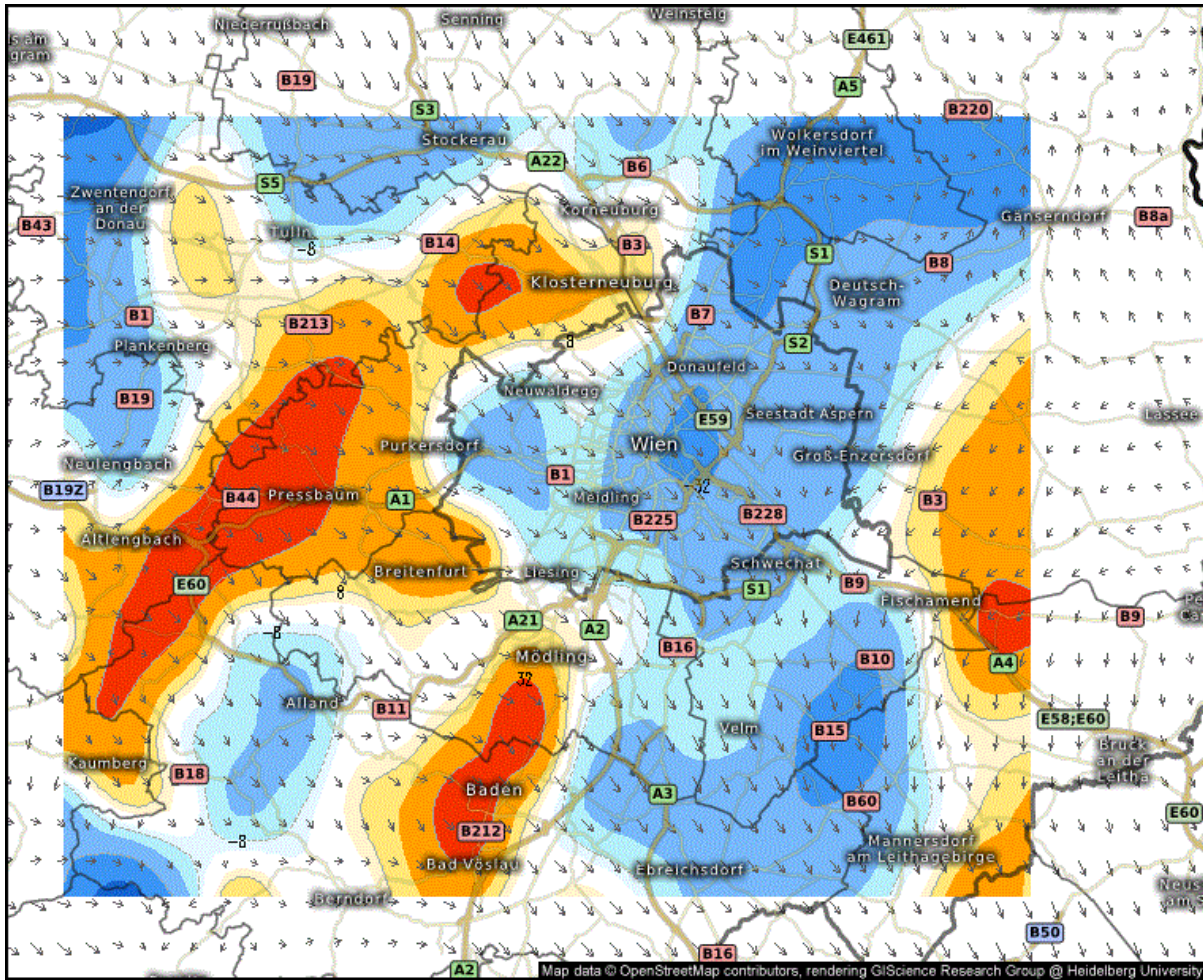
Als Erstes wird das Starkregenereignis über der Nordhälfte Wiens vom Abend des 17. Juli näher betrachtet.



Abbildung 4-6 Die Webcam Hohe Warte konnte am Abend des 17. Juli 2021 den Aufzug der Böenfront der Gewitterzelle festhalten.

(<https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetterwerte-analysen/webcam>, abgerufen am 17. Juli 2021)

Wie später anhand der Diagramme zur Bemessung des Ereignisses mit den Niederschlagssummen des Abends ersichtlich wird, sorgten mindestens zwei klar trennbare Schauer für diese hohen Summen. Entstehen konnten diese durch eine sogenannte Konvergenz vor den Osthängen des Wienerwaldes. Eine Konvergenz beschreibt den Bereich, in dem Luftmassen zusammenströmen und somit können diese nur in die Höhe ausweichen. Dadurch werden diese gehoben und es entstehen Schauer. Aufgrund der hohen Feuchtigkeit in der Luft und der erhöhten Temperatur, stand viel Wasserdampf für ausreichend Niederschlagsbildung und hohe Energiewerte für die Hebung der Luftmassen zur Bildung von Gewittern zur Verfügung.



Feuchtefluss in Bodennähe ($10^{-7}/s$)

Analyse von
Sa. 17.07.2021, 21:00 Uhr MESZ



Wien Umgebung
Super HD Mesoanalyse



Abbildung 4-7 Der Feuchtefluss in Bodennähe beschreibt in Blau gekennzeichnet die Konvergenz über Wien, wo Luftmassen zusammenfließen, und Hebung bei weiterer Zufuhr (=Advektion) feuchtwarmer Luftmassen stattfindet. Die roten Bereiche kennzeichnen Bereiche wo ein Absinken und auseinanderströmen der Luftmassen und somit eine Unterbindung der Schauerbildung stattfindet.

(Quelle: <https://kachelmannwetter.com/de>, abgerufen am 17. Juli 2021)

In weiterer Folge werden die Daten des Starkregenereignisses anhand der Messungen der BOKU-Wetterstation [18] näher betrachtet und mit den Bemessungspunkten des BML für Dornbach und Augarten verglichen, da die BOKU-Wetterstation genau dazwischen liegt. Ebenso wird in den Diagrammen neben dem Bemessungsniederschlag und der Summenkurve der gemessenen Niederschlagshöhen, auch der aus der Studie der World Weather Attribution zu erwartendem Bereich der Niederschlagshöhen, der ohne den Einfluss des Klimawandels um 3-19% geringer wäre [6], dargestellt.

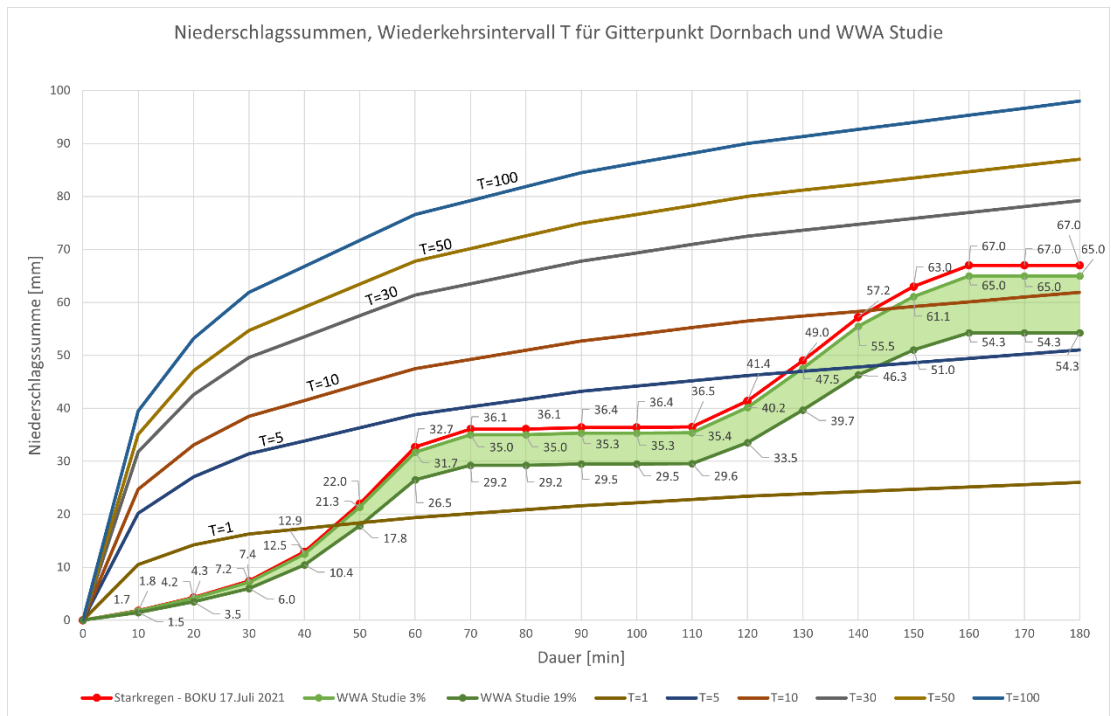


Abbildung 4-9 Bemessungsniederschlag des BML für den Gitterpunkt Dornbach mit Jährlichkeit T und Summenlinie der an der BOKU-Wetterstation gemessenen Niederschlagshöhen. Darunter befindet sich der zu erwartende Bereich der Niederschlagshöhen in grün ohne den Einfluss der Klimaerwärmung laut Studie der WWA.

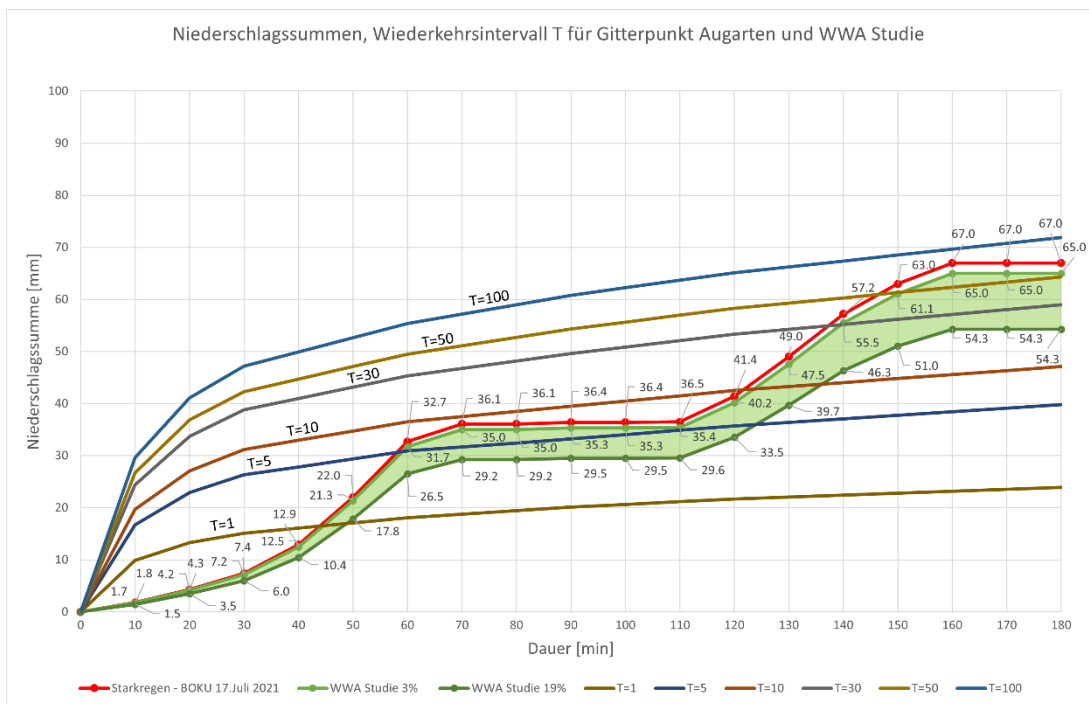


Abbildung 4-8 Bemessungsniederschlag des BML für den Gitterpunkt Augarten mit Jährlichkeit T und Summenlinie der an der BOKU-Wetterstation gemessenen Niederschlagshöhen. Darunter befindet sich der zu erwartende Bereich der Niederschlagshöhen in grün ohne den Einfluss der Klimaerwärmung laut Studie der WWA.

Da beide Bemessungspunkte sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern und der Standort der BOKU-Wetterstation genau zwischen den beiden Bemessungspunkten liegt, wurden die Werte interpoliert, um eine Annäherung an die tatsächliche Jährlichkeit zu bekommen. Die Tabellen mit den Werten der Bemessungsniederschläge für die Bemessungspunkte Dornbach und Augarten sind dem Anhang A zu entnehmen.

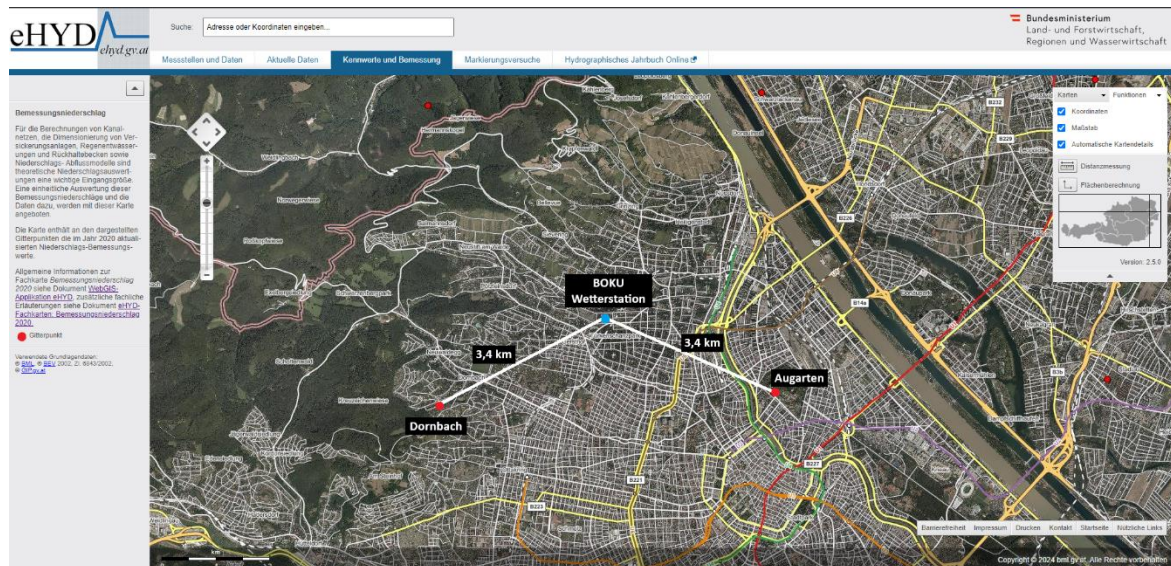


Abbildung 4-11 Übersichtskarte der Bemessungspunkte (rot) und der genau dazwischen liegenden BOKU Wetterstation (blau).

(Quelle: https://ehyd.gv.at/?g_card=pegelaktuell, abgerufen am 14. August 2024)

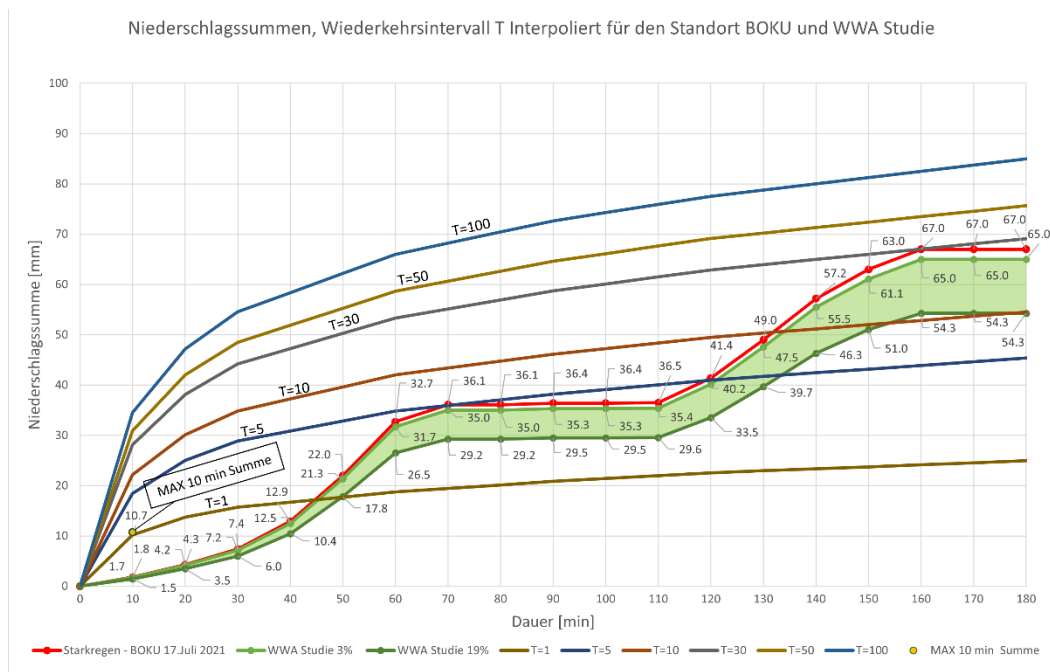


Abbildung 4-10 Bemessungsniederschlag des BML interpoliert für den Standort der BOKU-Wetterstation mit Jährlichkeit T und Summenlinie der an der BOKU-Wetterstation gemessenen Niederschlagshöhen. Darunter befindet sich der zu erwartende Bereich der Niederschlagshöhen in grün ohne den Einfluss der Klimaerwärmung laut Studie der WWA. Der gelbe Punkt markiert die höchste gemessene Niederschlagshöhe im 10min Intervall

Bei genauerer Betrachtung des Ereignisses und der Bemessung der maximal gemessenen 10min Niederschlagssumme, wird ersichtlich, dass diese im Bereich des einjährigen Wiederkehrintervalls liegt. Daraus lässt sich ableiten, dass dieses Ereignis kurzzeitig keine besondere Intensität brachte. Allerdings auf Dauer des gesamten Ereignisses betrachtet, wurde aufgrund der wiederkehrenden Schauer ein deutlich selteneres Wiederkehrintervall eines fast dreißig jährlichen Ereignis erreicht. Ebenso auch der zu erwartende Bereich ohne Verstärkung durch die Klimaerwärmung würde auf eine sehr geringe Wiederkehrswahrscheinlichkeit im Bereich des zehn bis knapp dreißig Jährlichen Ereignisses liegen.

Obwohl die Bemessungspunkte Dornbach und Augarten nur 6km voneinander entfernt sind, weisen diese um über 20% unterschiedliche Bemessungsniederschlagshöhen auf. Das liegt daran, dass der Bemessungspunkt Dornbach in der mitteleuropäischen Übergangsklimazone liegt. An der Grenze zur pannonischen Klimazone ist in etwa die BOKU-Wetterstation zu finden und der Bemessungspunkt Augarten ist in der erheblich trockeneren pannonischen Klimazone positioniert. Dadurch lassen sich auch die großen Unterschiede der Bemessungsniederschläge erklären.

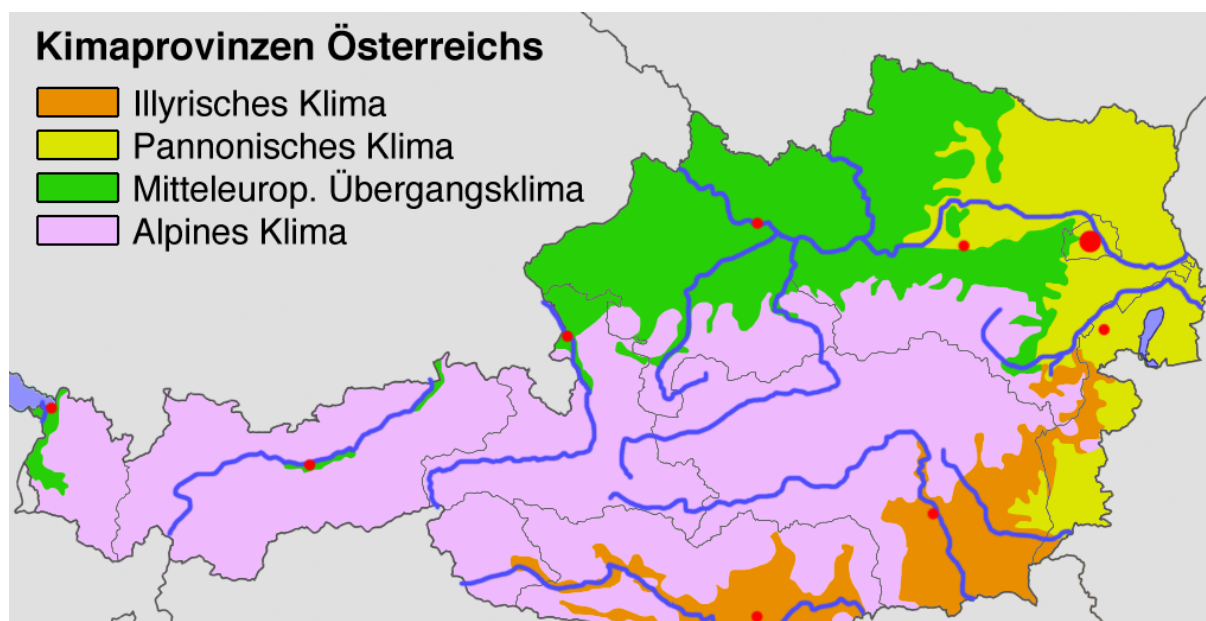


Abbildung 4-12 Die Klimazonen Österreichs lassen sich im Wiener Raum in zwei große Gebiete einteilen. Der mitteleuropäischen Übergangsklimazone, die bis zum Rand des Wiener Waldes reicht. Östlich davon befindet sich die deutlich trockeneren pannonische Klimazone.

(Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Klima_in_%C3%96sterreich, abgerufen am 14. April 2024)

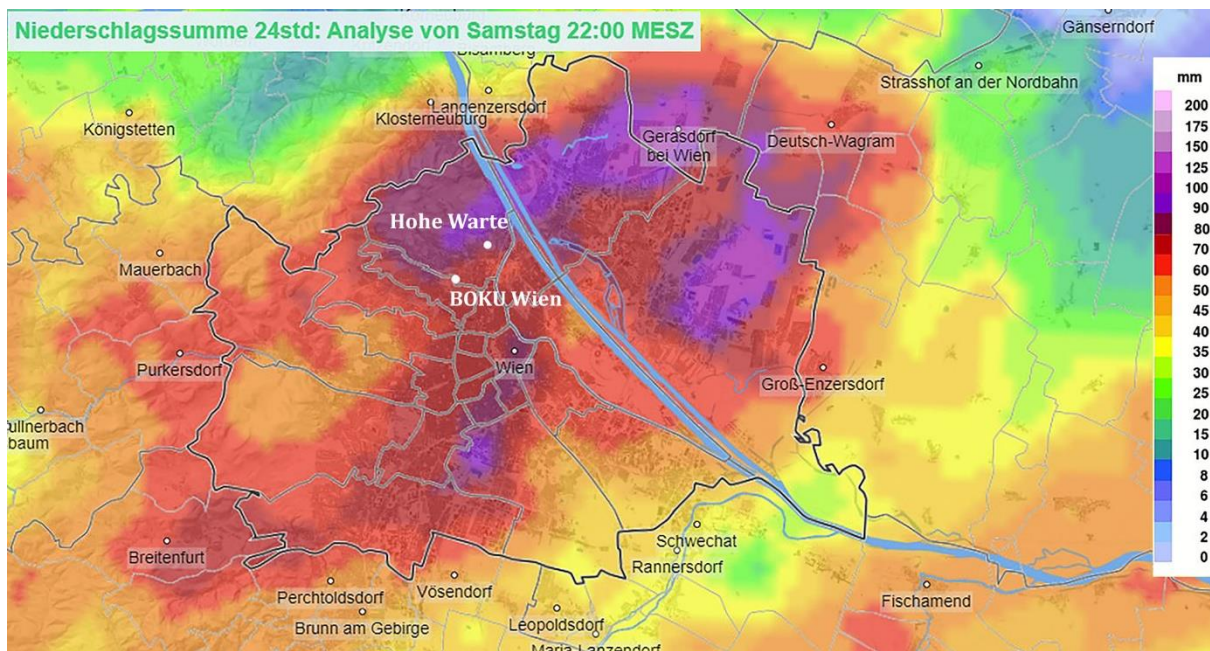


Abbildung 4-13 Die Übersichtskarte der ZAMG INCA-Analyse zeigt die Verteilung der Niederschlagshöhen vom Abend des 17. Juli 2021 über Wien in Folge des Starkregenereignisses

(Quelle: <http://www.zamg.ac.at/incaanalyse/>, abgerufen am 17. Juli 2021)

Punktuell sind noch weitaus größere Summen gefallen. Deswegen ist davon auszugehen, dass sogar erheblich seltenere Wiederkehrintervalle überschritten wurden, da besonders in den Gebieten mit höheren Niederschlagssummen aufgrund des allgemein trockeneren pannonischen Klimas deutlich geringere Bemessungsniederschläge vorliegen. Um ein genaueres Intervall zu ermitteln zu können, bedarf es allerdings weiterer Datenauswertungen mehrerer Wetterstationen und den nahliegenden Bemessungspunkten. Dies würde allerdings den Rahmen dieser Arbeit sprengen, weswegen an dieser Stelle an die frei zugänglichen Datensätze der ZAMG und auf eHYD verwiesen wird.

4.1.2. Starkregenereignis im Mostviertel in Niederösterreich am 18.7.2021

Wesentlich verheerender waren die Auswirkungen des Starkregens am Folgetag im Mostviertel in Niederösterreich. Praktisch den ganzen Tag über entstanden von Krems bis Amstetten immer wieder neue Gewitterzellen.

Die Ursache für diese immer wieder aufflammenden Gewitterzellen waren, wie auch schon am Vortag über Wien, die Konvergenz durch orografische Hebung aufgrund der Anströmungsrichtung und die laufende Advektion energiereicher feuchter Luftmassen. Erst durch das Drehen des Windes aufgrund des sich verlagernden Tiefdruckwirbels und dem Eintreffen weitaus trockenerer Luftmassen aus Nordwesten wurde dieser Prozess beendet.

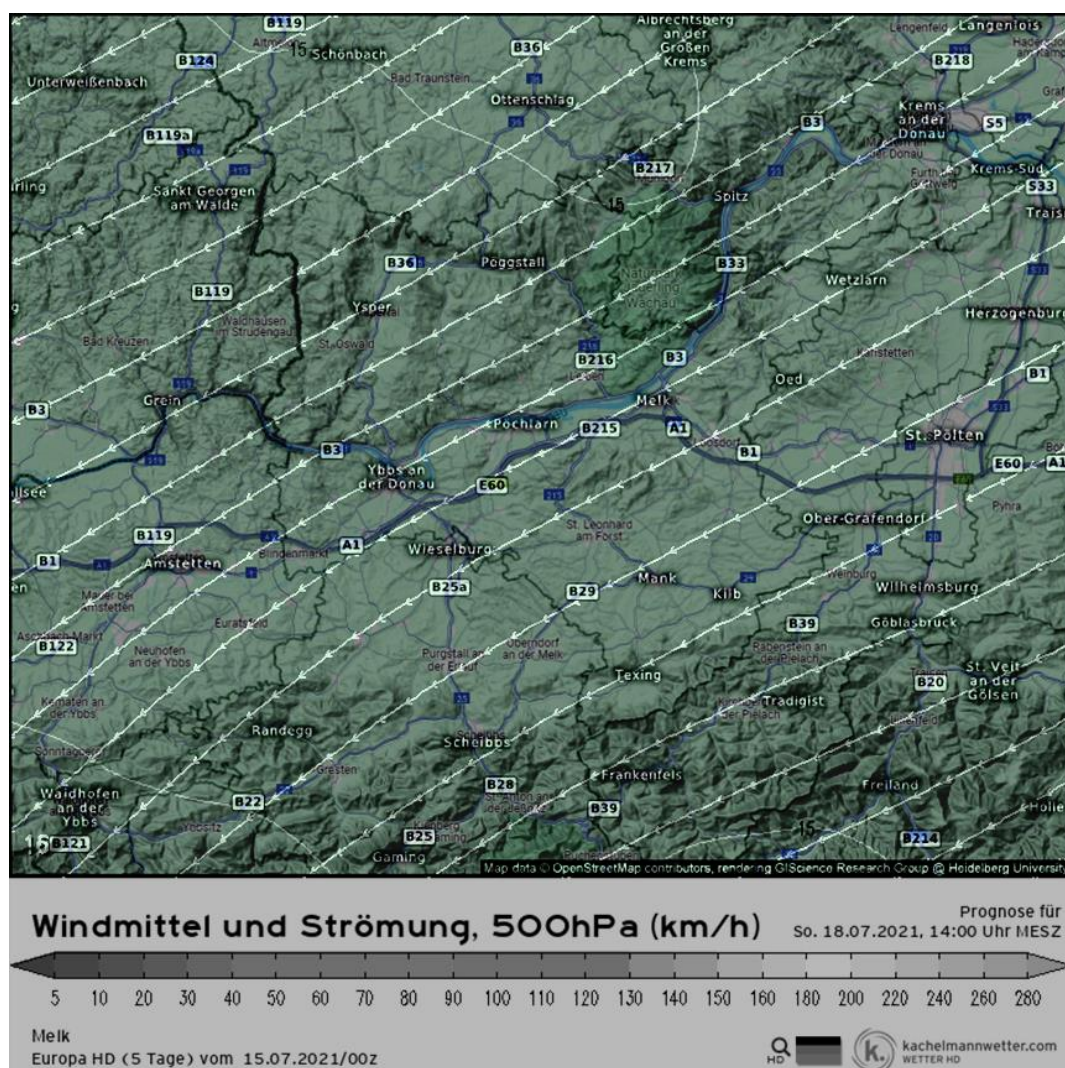
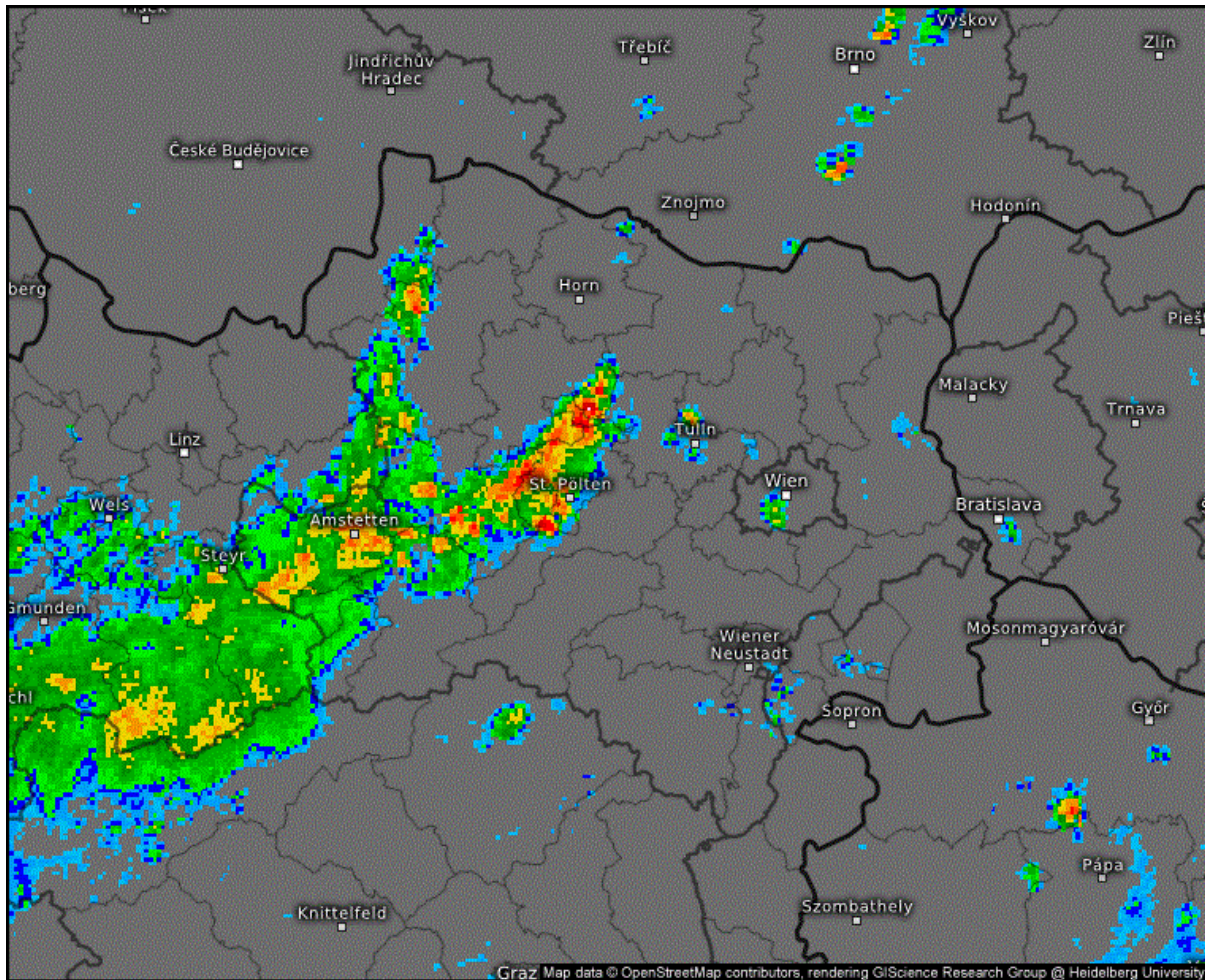


Abbildung 4-14 Durch die Orographie genau in einer Linie mit der Anströmungsrichtung, wurden die Luftmassen laufend gehoben. Die Linien skizzieren die Strömungsrichtung und die Topografiekarte zeigt die Erhebungen der Landschaft, die zur Hebung geführt hat.

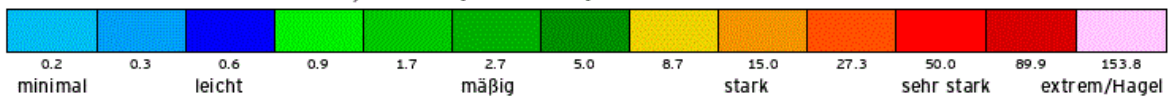
(Quelle: <https://www.google.com/maps> und <https://kachelmannwetter.com/de>, abgerufen am 18. Juli 2024)

Dies hatte zur Folge, dass sich an Ort und Stelle laufend neue Schauerstraßen bilden konnten, die in Staffeln über das nördliche Mostviertel zogen. In der nachfolgenden Radaranalyse werden diese linienförmigen Staffeln von Krems bis Amstetten deutlich sichtbar.



Radar Österreich, 1km (mm/h)

So. 18.07.2021, 12:45 Uhr MESZ



Niederösterreich



Abbildung 4-15 Radaranalyse mit den Schauerstraßen von Krems bis Amstetten.

(Quelle: <https://kachelmannwetter.com/de>, abgerufen am 18. Juli 2021)

Dadurch konnten sich im Laufe des Tages sehr große Niederschlagshöhen akkumulieren.

Die nachfolgende Summenkarte dieses Tages zeigt welche gewaltigen Niederschlagssummen im Zuge dieser Schauerstraßen an diesem Tag gefallen sind.

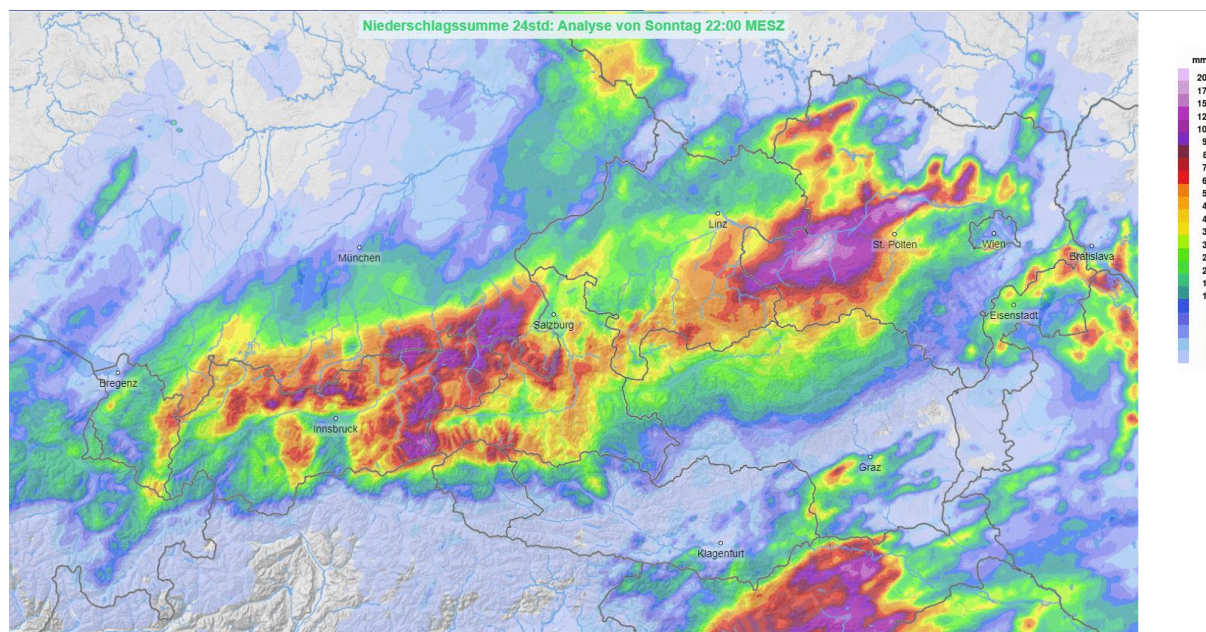


Abbildung 4-16 ZAMG INCA-Analyse mit der 24h Niederschlagssummenkarte vom 18. Juli 2021 22h.

(Quelle: <http://www.zamg.ac.at/incaanalyse/>, abgerufen am 18 Juli 2021)

Besonders auffällig ist, dass die Orografie bei diesem Ereignis eine sehr große Rolle gespielt hat. Während an manchen Orten enorme Regenmengen fielen, blieb es wenige Kilometer bei nur geringen Niederschlägen. Das verdeutlicht noch zusätzlich, wie stark die Auswirkungen sind, wenn der Anteil an niederschlagbarem Wasser in der Atmosphäre steigt und sich diese Feuchtegehalt punktuell entladet.

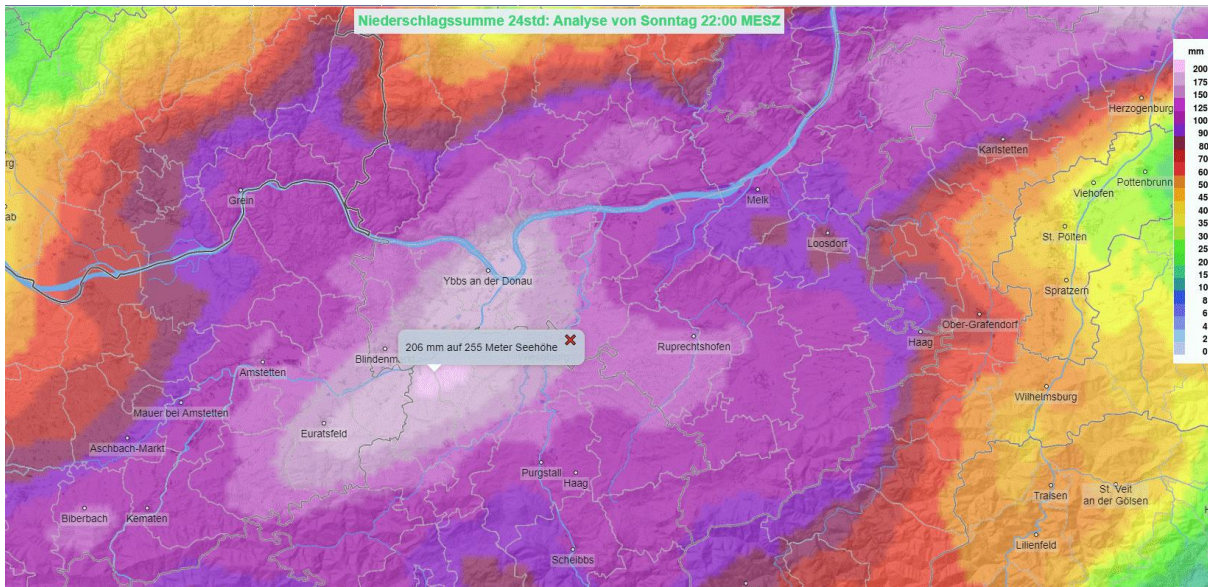


Abbildung 4-17 ZAMG INCA-Analyse mit der 24h Niederschlagssummenkarte vom 18. Juli 2021 22h Detailansicht mit Niederschlagsmaximum in der Nähe von Blindenmarkt an der Ybbs

(Quelle: <http://www.zamg.ac.at/incaanalyse/>, abgerufen am 18 Juli 2021)

Bis zu 206 Liter pro Quadratmeter wurden hier in 24h laut Radaranalyse in der Nähe von Blindenmarkt an der Ybbs registriert. Auch bei diesem Ereignis wurde die Charakteristik der laufend neu entstehenden Gewitter und Schauer deutlich, was durch die Auswertung der Niederschlagsdaten klar zu erkennen ist.

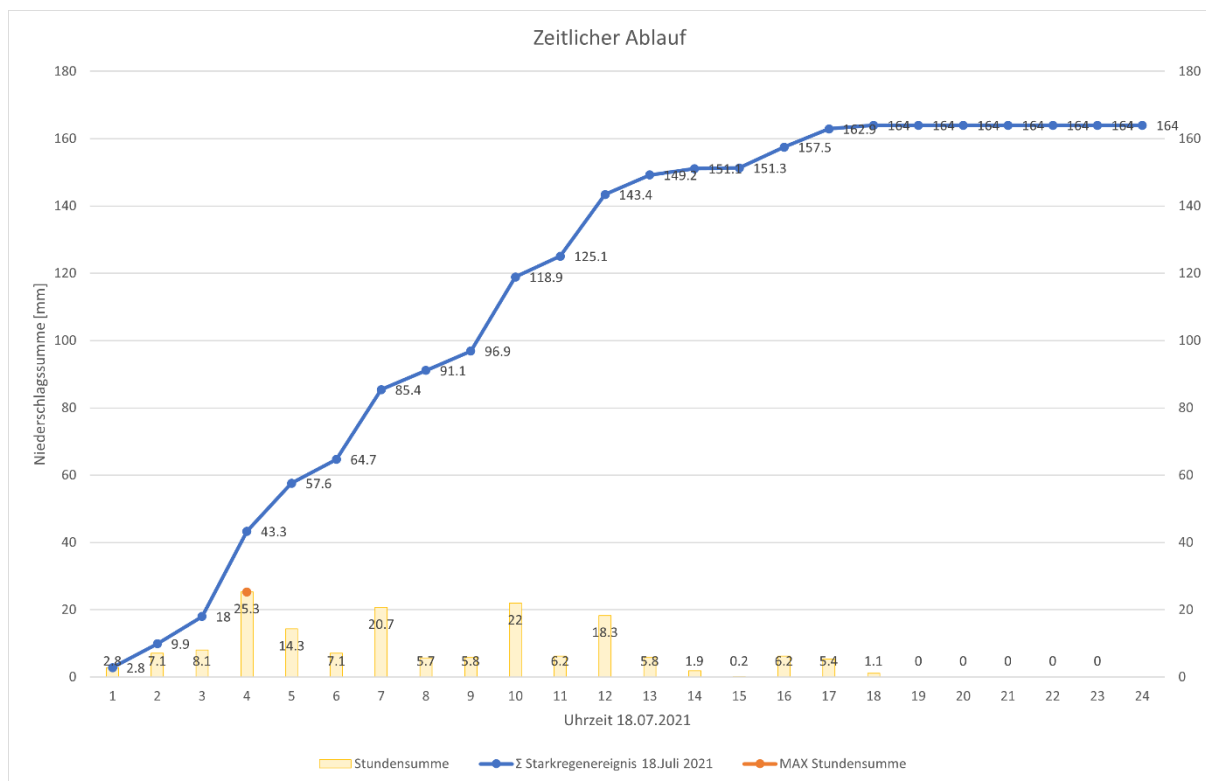


Abbildung 4-18 Zeitlicher Ablauf des Ereignisses als Balkendiagramm mit Summenlinie

Ebenso, wie auch am Vortag in Wien, zeigt die Auswertung der Niederschlagshöhen, dass die Schauer in Wellen kamen.

Legt man diese Summenlinie über die Bemessungsniederschläge für den Rasterpunkt Wieselburg, wird schnell klar, wie außergewöhnlich dieses Ereignis war. Die Werte für das fünfhundert und tausendjährige Ereignis wurden anhand der zur Verfügung stehenden Daten extrapoliert, um diese außergewöhnlichen Niederschlagshöhen einordnen zu können.

Die Tabellen mit den Niederschlagshöhen zur Erstellung der Bemessungsniederschläge Wieselburg sind dem Anhang B zu entnehmen.

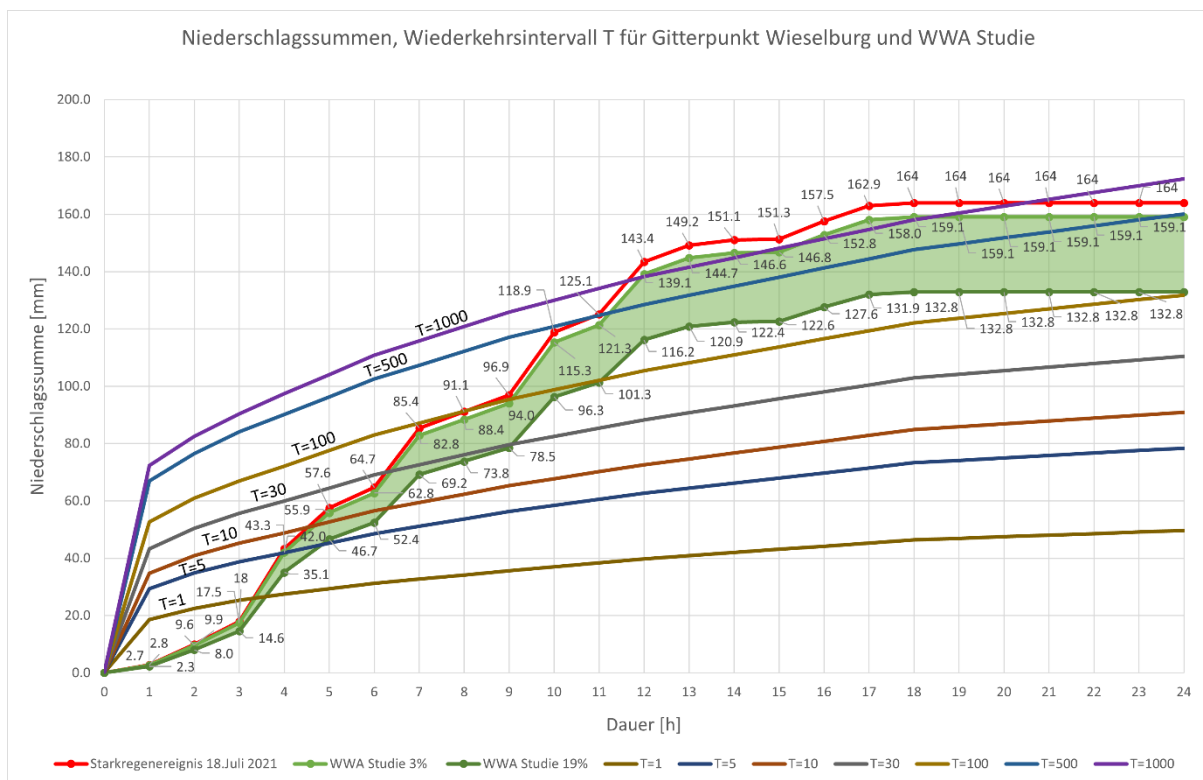


Abbildung 4-19 Bemessungsniederschlag des BML für den Gitterpunkt Wieselburg mit Jährlichkeit T und Summenlinie der an der Wetterstation Wieselburg gemessenen Niederschlagshöhen. Darunter befindet sich der zu erwartende Bereich der Niederschlagshöhen in grün ohne den Einfluss der Klimaerwärmung laut Studie der WWA.

Hier wird das Bild mehrerer kleinerer Ereignisse in Folge noch deutlicher gezeichnet. Die Summe über viele Stunden hinweg hat sogar den tausend jährlichen Bemessungsniederschlag überboten und da stellenweise noch erheblich höhere Niederschlagssummen gefallen sind, wurden wahrscheinlich noch weitaus höhere Wiederkehrintervalle erreicht.

Anhand dieser Auswertung ist zu erkennen, dass auch ohne Klimawandel dieses Ereignis das Hundertjährige Wiederkehrintervall übertroffen hätte. Somit ist auch bei dieser Auswertung klar, dass es mit oder ohne Klimawandel ein Extremereignis gegeben hätte, dieses aber durch die Klimaerwärmung nochmals signifikant verstärkt wurde.



Abbildung 4-20 Überflutungen in Wieselburg am 18. Juli 2021

Quelle: Privatarchiv

5. Schlusswort – Conclusio

Aufgrund der Datengrundlage konnte gezeigt werden, dass Starkregentief Bernd ein durchaus außergewöhnliches Ereignis war. Die physikalischen und meteorologischen Gegebenheiten haben sich gegenseitig so ergänzt, dass es zu diesem Extremereignis kommen konnte.

Die Auswertung der Messdaten hat die Charakteristik dieser Starkregenereignisse gezeigt. Es sind immer wieder einzelne Schauer über das gleiche Gebiet gezogen und somit konnten sich über Stunden diese enormen Niederschlagshöhen akkumulieren. Besonders deutlich wurde dies bei dem Starkregenereignis über dem Niederösterreichischen Mostviertel, wo über den ganzen Tag hinweg neue Gewitter entstehen konnten. Dieser Umstand hat dazu geführt, dass ein hundertjährliches Wiederkehrintervall weit übertroffen wurde und erst durch Extrapolation der vorhandenen Bemessungsdaten konnte diese gemessene Niederschlagshöhe zugeordnet werden.

Dadurch kam die Frage auf, wie stark die Klimaerwärmung bei diesem Extremereignis mitgewirkt hat und anhand der Studie der World Weather Attribution wurde festgestellt, dass Bernd durch die Erderwärmung um 3-19% verstärkt wurde. Somit wurde dieser Prozentsatz von den Messdaten abgezogen und das ergibt ein geringfügig anderes Bild. Es hätte sich ohne Verstärkung durch die Erderwärmung um ein Extremereignis gehandelt, aber die Wiederkehrintervalle wären dadurch deutlich geringer. Dies hat gezeigt, dass die Klimaerwärmung nicht gezwungenermaßen für die Entstehung von Extremereignissen verantwortlich ist. Allerdings sehr wohl Ereignisse verstärkt, wie anhand der makroskaligen Wetterentstehung, der meteorologischen Parameter und der Datenauswertung des Starkregentiefs Bernd gezeigt werden konnte. Diese Ergebnisse werden auch von den Forschungsergebnissen der World Weather Attribution untermauert [19].

Allerdings muss an dieser Stelle auch erwähnt werden, dass erst durch die Digitalisierung der letzten Jahrzehnte zuverlässige Datensätze existieren und besonders historische Ereignisse aus Überlieferungen fehlerbehaftet sein können. Diese liefern jedoch wichtige Daten zur Erstellung von Extremwertstatistiken und zur Bemessung solcher außergewöhnlichen Ereignisse.

Somit ist es aufgrund der aktuellen Datenlage nur schwer möglich exakte Aussagen über Wiederkehrintervalle von aktuellen Extremereignissen zu treffen, wobei aus den Forschungsergebnissen folgt, dass sich die Wissenschaft nicht die Frage stellen sollte, ob Extremereignisse infolge der Erderwärmung zunehmen, sondern vielmehr, in welchem Maße diese in Zukunft stärker werden. Dies stellt eine Herausforderung für die Wissenschaft dar und bildet den Boden für weitere Forschungen.

Anhang A

Bemessungsniederschlag Dornbach

Quelle: https://ehyd.gv.at/?g_card=pegelaktuell

Hydrographischer Dienst in Österreich

13.11.2020 10:35

| Bemessungsniederschlag mit MaxModN (oberen)- und ÖKOSTRA (unteren)-Werten [mm] | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Gitterpunkt: 2763; (M34, R: -3096m, H: 5342902m) | | | | | | | | | | | |
| Flächenabminderung: keine | | | | | | | | | | | |
| Wiederkehrzeit (T) | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 25 | 30 | 50 | 75 | 100 |
| Dauerstufe (D) | | | | | | | | | | | |
| 5 Minuten | 7.5 | 11.6 | 13.9 | 16.9 | 21.0 | 25.0 | 26.3 | 27.4 | 30.4 | 32.8 | 34.5 |
| | 7.1 | 10.4 | 12.2 | 14.6 | 17.8 | 21.0 | 22.0 | 22.9 | 25.3 | 27.2 | 28.5 |
| 10 Minuten | 6.7 | 8.9 | 10.1 | 11.6 | 13.8 | 15.9 | 16.6 | 17.2 | 18.7 | 20.0 | 20.8 |
| | 10.7 | 14.8 | 17.9 | 21.8 | 27.2 | 32.5 | 34.2 | 35.7 | 39.6 | 42.7 | 44.9 |
| 15 Minuten | 10.5 | 14.3 | 16.9 | 20.2 | 24.7 | 29.2 | 30.6 | 31.8 | 35.1 | 37.7 | 39.5 |
| | 12.7 | 17.3 | 20.3 | 24.2 | 29.6 | 35.0 | 36.7 | 38.1 | 42.0 | 45.2 | 47.4 |
| 20 Minuten | 10.2 | 13.8 | 15.9 | 18.5 | 22.0 | 25.6 | 26.6 | 27.6 | 30.2 | 32.2 | 33.6 |
| | 14.2 | 19.5 | 22.6 | 27.1 | 33.1 | 39.1 | 41.1 | 42.6 | 47.1 | 50.6 | 53.2 |
| 30 Minuten | 13.1 | 17.7 | 21.1 | 25.8 | 32.1 | 38.5 | 40.6 | 42.2 | 46.9 | 50.6 | 53.3 |
| | 16.3 | 22.4 | 26.2 | 31.4 | 38.5 | 45.5 | 47.7 | 49.6 | 54.7 | 59.0 | 61.9 |
| 45 Minuten | 14.6 | 20.0 | 23.3 | 28.5 | 35.6 | 42.8 | 45.0 | 46.9 | 52.2 | 56.3 | 59.3 |
| | 18.1 | 25.2 | 29.8 | 35.9 | 44.0 | 52.1 | 54.7 | 56.9 | 62.8 | 67.6 | 70.9 |
| 60 Minuten | 16.7 | 23.0 | 27.1 | 33.3 | 41.7 | 50.0 | 52.7 | 54.9 | 61.1 | 66.0 | 69.5 |
| | 19.4 | 27.2 | 32.4 | 38.8 | 47.5 | 56.3 | 59.1 | 61.4 | 67.8 | 73.0 | 76.6 |
| 90 Minuten | 17.7 | 24.6 | 28.6 | 33.7 | 40.4 | 47.3 | 49.4 | 51.2 | 56.1 | 60.2 | 62.9 |
| | 21.6 | 30.4 | 36.0 | 43.2 | 52.7 | 62.4 | 65.4 | 67.8 | 74.9 | 80.5 | 84.5 |
| | 20.0 | 28.4 | 34.9 | 43.0 | 54.0 | 65.1 | 68.6 | 71.5 | 79.6 | 86.1 | 90.7 |
| | 19.0 | 26.3 | 30.5 | 35.7 | 42.7 | 49.8 | 52.1 | 53.9 | 59.1 | 63.3 | 66.2 |
| | 22.3 | 32.9 | 40.4 | 50.0 | 62.9 | 75.9 | 80.0 | 83.4 | 93.0 | 100.6 | 105.9 |
| | 21.2 | 28.8 | 33.1 | 38.6 | 45.9 | 53.3 | 55.6 | 57.3 | 62.8 | 67.0 | 70.1 |

MaxModN - maximierte Modellniederschläge [HAO=Hydrologischer Atlas Österreichs (konvexives N-Modell); ALADIN-Vorhersagemodell (modifiziert)]
 Bemessungsniederschlag - gewichteter Wert zwischen MaxModN und ÖKOSTRA
 ÖKOSTRA - interpolierte extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen (DWA-A 531, modifiziert)

Hydrographischer Dienst in Österreich

13.11.2020 10:35

| Bemessungsniederschlag mit MaxModN (oberen)- und ÖKOSTRA (unteren)-Werten [mm] | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Gitterpunkt: 2763; (M34, R: -3096m, H: 5342902m) | | | | | | | | | | | |
| Flächenabminderung: keine | | | | | | | | | | | |
| Fortsetzung | | | | | | | | | | | |
| Wiederkehrzeit (T) | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 25 | 30 | 50 | 75 | 100 |
| Dauerstufe (D) | | | | | | | | | | | |
| 2 Stunden | 24.1 | 36.3 | 44.8 | 55.4 | 69.8 | 84.3 | 88.9 | 92.7 | 103.4 | 111.8 | 117.8 |
| | 23.4 | 32.9 | 38.8 | 46.2 | 56.5 | 66.5 | 69.7 | 72.5 | 80.0 | 85.9 | 90.0 |
| 3 Stunden | 23.0 | 30.7 | 35.1 | 40.5 | 48.1 | 55.3 | 57.7 | 59.8 | 65.4 | 69.6 | 72.5 |
| | 26.8 | 42.0 | 51.8 | 64.2 | 81.0 | 97.9 | 103.3 | 107.7 | 120.1 | 130.0 | 136.9 |
| 4 Stunden | 26.0 | 36.5 | 43.0 | 51.0 | 61.9 | 72.7 | 76.4 | 79.2 | 87.0 | 93.4 | 98.0 |
| | 28.9 | 46.2 | 57.2 | 71.0 | 89.8 | 108.5 | 114.6 | 119.5 | 133.3 | 144.3 | 152.1 |
| 6 Stunden | 27.5 | 35.6 | 40.2 | 45.8 | 53.4 | 61.1 | 63.5 | 65.5 | 71.2 | 75.6 | 78.7 |
| | 32.8 | 51.5 | 62.5 | 76.3 | 95.1 | 114.1 | 120.3 | 125.3 | 139.1 | 150.3 | 158.2 |
| 9 Stunden | 31.6 | 43.9 | 51.0 | 59.9 | 72.0 | 84.2 | 88.1 | 91.3 | 100.2 | 107.3 | 112.3 |
| | 38.5 | 57.2 | 68.3 | 82.1 | 100.9 | 119.7 | 125.7 | 130.7 | 144.5 | 155.3 | 163.0 |
| 12 Stunden | 34.7 | 43.2 | 48.1 | 54.3 | 62.6 | 70.8 | 73.8 | 75.7 | 81.9 | 86.6 | 89.9 |
| | 40.2 | 54.1 | 62.2 | 72.3 | 86.1 | 99.8 | 104.4 | 108.0 | 118.1 | 126.1 | 131.5 |
| 18 Stunden | 42.8 | 61.8 | 72.9 | 86.9 | 105.9 | 124.9 | 131.1 | 136.1 | 150.0 | 161.0 | 168.8 |
| | 50.5 | 70.3 | 81.9 | 96.5 | 116.4 | 136.2 | 142.6 | 147.8 | 162.5 | 174.1 | 182.3 |
| 1 Tag | 43.1 | 54.4 | 61.1 | 69.3 | 80.6 | 91.7 | 95.2 | 98.3 | 106.5 | 113.5 | 117.7 |
| | 51.4 | 68.6 | 78.8 | 91.4 | 108.6 | 125.9 | 131.5 | 135.8 | 148.6 | 158.7 | 166.0 |
| | 56.9 | 77.6 | 89.8 | 105.0 | 125.7 | 146.4 | 153.1 | 158.5 | 173.7 | 185.8 | 194.4 |
| | 46.0 | 59.7 | 67.9 | 77.9 | 91.6 | 105.4 | 109.9 | 113.2 | 123.5 | 131.7 | 137.6 |

MaxModN - maximierte Modellniederschläge [HAO=Hydrologischer Atlas Österreichs (konvexives N-Modell); ALADIN-Vorhersagemodell (modifiziert)]
 Bemessungsniederschlag - gewichteter Wert zwischen MaxModN und ÖKOSTRA
 ÖKOSTRA - interpolierte extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen (DWA-A 531, modifiziert)

Bemessungsniederschlag Augarten

Quelle: https://ehyd.gv.at/?g_card=pegelaktuell

Hydrographischer Dienst in Österreich

13.11.2020 10:35

| Bemessungsniederschlag mit MaxModN (oberen)- und ÖKOSTRA (unteren)-Werten [mm] | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Gitterpunkt: 2764; (M34, R: 3095m, H: 5342902m) | | | | | | | | | | | |
| Flächenabminderung: keine | | | | | | | | | | | |
| Wiederkehrzeit (T) | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 25 | 30 | 50 | 75 | 100 |
| Dauerstufe (D) | | | | | | | | | | | |
| 5 Minuten | 6.6 | 8.8 | 10.3 | 12.1 | 14.5 | 16.9 | 17.7 | 18.4 | 20.2 | 21.6 | 22.6 |
| | 6.5 | 8.4 | 9.7 | 11.3 | 13.4 | 15.5 | 16.2 | 16.8 | 18.4 | 19.6 | 20.4 |
| 10 Minuten | 6.3 | 8.0 | 9.0 | 10.2 | 12.0 | 13.7 | 14.2 | 14.7 | 16.0 | 17.0 | 17.7 |
| | 10.1 | 13.1 | 14.9 | 17.1 | 20.1 | 23.2 | 24.1 | 25.0 | 27.3 | 29.0 | 30.3 |
| 15 Minuten | 9.9 | 12.8 | 14.6 | 16.7 | 19.7 | 22.7 | 23.6 | 24.4 | 26.7 | 28.3 | 29.6 |
| | 9.6 | 12.5 | 14.2 | 16.3 | 19.2 | 22.1 | 23.0 | 23.8 | 26.0 | 27.6 | 28.8 |
| 20 Minuten | 12.2 | 16.0 | 18.2 | 20.9 | 24.8 | 28.6 | 29.8 | 30.8 | 33.6 | 35.8 | 37.3 |
| | 11.9 | 15.6 | 17.7 | 20.4 | 24.2 | 27.9 | 29.0 | 30.0 | 32.8 | 34.9 | 36.4 |
| 30 Minuten | 11.6 | 15.2 | 17.3 | 19.9 | 23.6 | 27.2 | 28.3 | 29.3 | 32.0 | 34.1 | 35.5 |
| | 13.6 | 17.9 | 20.4 | 23.5 | 27.8 | 32.1 | 33.5 | 34.5 | 37.8 | 40.3 | 42.1 |
| 45 Minuten | 13.3 | 17.4 | 19.9 | 22.9 | 27.1 | 31.3 | 32.7 | 33.7 | 36.9 | 39.3 | 41.1 |
| | 13.0 | 17.0 | 19.4 | 22.4 | 26.5 | 30.5 | 31.9 | 32.9 | 36.0 | 38.4 | 40.1 |
| 60 Minuten | 15.5 | 20.4 | 23.3 | 27.0 | 32.0 | 36.9 | 38.5 | 39.8 | 43.4 | 46.5 | 48.4 |
| | 15.1 | 19.9 | 22.7 | 26.3 | 31.2 | 36.0 | 37.5 | 38.8 | 42.3 | 45.3 | 47.2 |
| 90 Minuten | 14.8 | 19.5 | 22.2 | 25.7 | 30.5 | 35.2 | 36.6 | 37.9 | 41.4 | 44.3 | 46.1 |
| | 17.3 | 22.8 | 26.1 | 30.2 | 35.8 | 41.5 | 43.2 | 44.7 | 48.8 | 52.2 | 54.5 |
| 120 Minuten | 16.8 | 22.2 | 25.4 | 29.4 | 34.8 | 40.4 | 42.1 | 43.5 | 47.5 | 50.8 | 53.0 |
| | 16.4 | 21.7 | 24.8 | 28.8 | 34.1 | 39.5 | 41.2 | 42.6 | 46.5 | 49.7 | 51.9 |
| 150 Minuten | 18.6 | 24.3 | 27.6 | 31.8 | 37.5 | 43.3 | 45.2 | 46.6 | 51.0 | 54.8 | 57.5 |
| | 18.1 | 23.7 | 26.9 | 30.9 | 36.5 | 42.1 | 43.9 | 45.3 | 49.5 | 53.0 | 55.4 |
| 180 Minuten | 17.8 | 23.2 | 26.3 | 30.3 | 35.7 | 41.2 | 43.0 | 44.4 | 48.4 | 51.7 | 53.9 |
| | 20.7 | 26.5 | 29.9 | 34.2 | 41.7 | 49.2 | 51.7 | 53.7 | 59.2 | 63.6 | 66.8 |
| 210 Minuten | 20.1 | 25.7 | 29.1 | 33.2 | 39.5 | 46.0 | 48.0 | 49.6 | 54.3 | 58.0 | 60.8 |
| | 19.7 | 25.2 | 28.5 | 32.5 | 38.1 | 43.8 | 45.5 | 46.9 | 51.1 | 54.3 | 56.8 |

MaxModN - maximierte Modellniederschläge [HAO=Hydrologischer Atlas Österreichs (konvektives N-Modell); ALADIN-Vorhersagemodell (modifiziert)]
 Bemessungsniederschlag - gewichteter Wert zwischen MaxModN und ÖKOSTRA
 ÖKOSTRA - interpolierte extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen (DWA-A 531, modifiziert)

Hydrographischer Dienst in Österreich

13.11.2020 10:35

| Bemessungsniederschlag mit MaxModN (oberen)- und ÖKOSTRA (unteren)-Werten [mm] | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Gitterpunkt: 2764; (M34, R: 3095m, H: 5342902m) | | | | | | | | | | | |
| Flächenabminderung: keine | | | | | | | | | | | |
| Fortsetzung | | | | | | | | | | | |
| Wiederkehrzeit (T) | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 25 | 30 | 50 | 75 | 100 |
| Dauerstufe (D) | | | | | | | | | | | |
| 2 Stunden | 22.3 | 28.1 | 31.8 | 38.1 | 46.6 | 55.2 | 57.9 | 60.2 | 66.4 | 71.4 | 75.0 |
| | 21.7 | 27.3 | 30.7 | 35.7 | 42.5 | 49.3 | 51.4 | 53.3 | 58.3 | 62.4 | 65.1 |
| 3 Stunden | 21.3 | 26.8 | 30.0 | 34.2 | 40.0 | 45.6 | 47.4 | 49.0 | 53.3 | 56.7 | 58.9 |
| | 24.7 | 31.3 | 37.3 | 44.9 | 55.1 | 65.4 | 68.6 | 71.3 | 78.9 | 84.9 | 89.1 |
| 4 Stunden | 23.9 | 29.9 | 34.2 | 39.8 | 47.1 | 54.5 | 57.0 | 59.0 | 64.3 | 68.7 | 71.9 |
| | 23.5 | 29.1 | 32.5 | 36.9 | 42.6 | 48.3 | 50.4 | 51.9 | 56.0 | 59.4 | 62.0 |
| 6 Stunden | 26.5 | 34.5 | 41.2 | 49.7 | 61.1 | 72.6 | 76.3 | 79.3 | 87.7 | 94.4 | 99.2 |
| | 25.7 | 32.2 | 36.8 | 42.6 | 50.4 | 58.4 | 60.9 | 62.9 | 68.8 | 73.4 | 76.7 |
| 9 Stunden | 25.2 | 31.0 | 34.3 | 38.6 | 44.5 | 50.5 | 52.3 | 53.8 | 58.3 | 61.8 | 64.2 |
| | 30.1 | 40.6 | 47.6 | 56.4 | 68.3 | 80.2 | 84.1 | 87.2 | 96.0 | 102.9 | 107.9 |
| 12 Stunden | 29.2 | 37.0 | 41.9 | 48.0 | 56.4 | 64.8 | 67.5 | 69.7 | 75.9 | 80.7 | 84.3 |
| | 28.7 | 34.7 | 38.3 | 42.8 | 49.1 | 55.3 | 57.2 | 58.8 | 63.4 | 67.0 | 69.6 |
| 18 Stunden | 34.5 | 46.8 | 54.1 | 63.3 | 75.7 | 88.1 | 92.0 | 95.3 | 104.4 | 111.8 | 116.9 |
| | 33.3 | 42.2 | 47.6 | 54.4 | 63.4 | 72.6 | 75.6 | 78.0 | 84.8 | 90.1 | 93.9 |
| 1 Tag | 32.4 | 38.7 | 42.5 | 47.4 | 53.9 | 60.5 | 62.9 | 64.5 | 69.5 | 73.3 | 76.0 |
| | 38.7 | 51.5 | 59.0 | 68.4 | 81.1 | 93.9 | 98.1 | 101.4 | 110.8 | 118.3 | 123.6 |
| 12 Stunden | 36.8 | 46.5 | 52.1 | 59.3 | 69.0 | 78.7 | 82.0 | 84.4 | 91.7 | 97.4 | 101.4 |
| | 35.0 | 41.8 | 45.8 | 50.9 | 57.8 | 64.6 | 67.0 | 68.7 | 74.0 | 78.1 | 80.8 |
| 18 Stunden | 45.4 | 58.8 | 66.5 | 76.4 | 89.8 | 103.3 | 107.6 | 111.2 | 121.1 | 129.0 | 134.6 |
| | 42.5 | 53.5 | 59.9 | 68.0 | 79.1 | 90.1 | 93.6 | 96.6 | 104.7 | 111.3 | 115.7 |
| 1 Tag | 39.7 | 48.2 | 53.3 | 59.6 | 68.4 | 76.9 | 79.6 | 82.1 | 88.4 | 93.7 | 97.0 |
| | 49.9 | 64.0 | 72.2 | 82.5 | 96.5 | 110.6 | 115.1 | 118.8 | 129.2 | 137.3 | 143.1 |
| 1 Tag | 45.3 | 56.7 | 63.3 | 71.9 | 83.8 | 95.8 | 99.6 | 102.7 | 111.6 | 118.5 | 123.5 |
| | 40.7 | 49.4 | 54.5 | 61.4 | 71.2 | 81.0 | 84.1 | 86.7 | 94.0 | 99.7 | 103.9 |

MaxModN - maximierte Modellniederschläge [HAO=Hydrologischer Atlas Österreichs (konvektives N-Modell); ALADIN-Vorhersagemodell (modifiziert)]
 Bemessungsniederschlag - gewichteter Wert zwischen MaxModN und ÖKOSTRA
 ÖKOSTRA - interpolierte extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen (DWA-A 531, modifiziert)

Anhang B

Bemessungsniederschlag Wieselburg

Quelle: https://ehyd.gv.at/?g_card=pegelaktuel

Hydrographischer Dienst in Österreich

13.11.2020 10:58

Bemessungsniederschlag mit MaxModN (oberen)- und ÖKOSTRA (unteren)-Werten [mm]
Gitterpunkt: 2963; (M34, R: -89942m, H: 5332488m)
Flächenabminderung: keine

| Wiederkehrzeit (T) | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 25 | 30 | 50 | 75 | 100 |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Dauerstufe (D) | | | | | | | | | | | |
| 5 Minuten | 6.9 | 9.3 | 10.8 | 12.5 | 15.0 | 17.4 | 18.2 | 18.8 | 20.6 | 22.1 | 23.1 |
| | 6.7 | 8.7 | 10.0 | 11.4 | 13.5 | 15.6 | 16.3 | 16.8 | 18.3 | 19.6 | 20.5 |
| 10 Minuten | 6.4 | 8.0 | 8.9 | 10.1 | 11.7 | 13.3 | 13.8 | 14.3 | 15.4 | 16.4 | 17.1 |
| | 10.1 | 12.4 | 13.9 | 15.8 | 18.7 | 21.6 | 22.5 | 23.2 | 25.3 | 27.0 | 28.2 |
| 15 Minuten | 10.3 | 12.7 | 14.2 | 16.3 | 19.7 | 23.0 | 24.1 | 24.9 | 27.4 | 29.3 | 30.7 |
| | 12.2 | 15.1 | 16.8 | 19.0 | 22.5 | 26.0 | 27.1 | 28.0 | 30.6 | 32.6 | 34.1 |
| 20 Minuten | 11.9 | 14.7 | 16.4 | 18.5 | 21.4 | 24.3 | 25.3 | 26.0 | 28.2 | 29.8 | 31.1 |
| | 14.0 | 17.4 | 19.4 | 21.9 | 26.1 | 30.7 | 32.1 | 33.3 | 36.7 | 39.3 | 41.2 |
| 30 Minuten | 13.7 | 17.0 | 18.9 | 21.3 | 25.1 | 29.0 | 30.2 | 31.2 | 34.2 | 36.4 | 38.0 |
| | 16.0 | 19.8 | 22.1 | 25.0 | 30.3 | 35.6 | 37.3 | 38.7 | 42.7 | 45.8 | 48.0 |
| 45 Minuten | 15.6 | 19.3 | 21.5 | 24.4 | 28.8 | 33.3 | 34.7 | 35.9 | 39.3 | 41.9 | 43.7 |
| | 17.8 | 21.9 | 24.4 | 28.6 | 34.8 | 41.0 | 43.0 | 44.6 | 49.1 | 52.7 | 55.3 |
| 60 Minuten | 15.3 | 18.9 | 21.0 | 23.8 | 27.5 | 31.3 | 32.5 | 33.5 | 36.3 | 38.5 | 40.0 |
| | 17.4 | 21.3 | 23.7 | 27.3 | 32.2 | 37.2 | 38.8 | 40.2 | 43.8 | 46.8 | 48.9 |
| 90 Minuten | 17.8 | 21.9 | 24.4 | 28.6 | 34.8 | 41.0 | 42.2 | 43.0 | 46.0 | 48.4 | 50.4 |
| | 18.6 | 22.8 | 25.5 | 29.4 | 34.8 | 40.2 | 41.9 | 43.3 | 47.3 | 50.4 | 52.7 |
| | 19.1 | 23.5 | 26.4 | 31.4 | 38.2 | 45.0 | 47.2 | 49.0 | 54.0 | 58.0 | 60.9 |
| | 20.8 | 25.0 | 28.2 | 32.5 | 38.2 | 44.0 | 45.8 | 47.4 | 51.6 | 54.9 | 57.4 |
| | 18.2 | 22.3 | 24.8 | 27.9 | 32.3 | 36.6 | 38.0 | 39.1 | 42.4 | 44.9 | 46.7 |
| | 21.4 | 25.7 | 30.1 | 35.9 | 43.7 | 51.5 | 54.0 | 56.0 | 61.8 | 66.3 | 69.6 |
| | 20.4 | 24.5 | 27.0 | 30.2 | 34.5 | 38.9 | 40.3 | 41.6 | 44.7 | 47.3 | 49.2 |

MaxModN - maximierte Modellniederschläge [HAÖ=Hydrologischer Atlas Österreichs (konvexives N-Modell), ALADIN-Vorhersagemodell (modifiziert)]
Bemessungsniederschlag - gewichteter Wert zwischen MaxModN und ÖKOSTRA
ÖKOSTRA - interpolierte extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen (DWA-A 531, modifiziert)

Hydrographischer Dienst in Österreich

13.11.2020 10:58

Bemessungsniederschlag mit MaxModN (oberen)- und ÖKOSTRA (unteren)-Werten [mm]
Gitterpunkt: 2963; (M34, R: -89942m, H: 5332488m)
Flächenabminderung: keine

Fortsetzung

| Wiederkehrzeit (T) | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 25 | 30 | 50 | 75 | 100 |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Dauerstufe (D) | | | | | | | | | | | |
| 2 Stunden | 23.2 | 28.1 | 33.1 | 39.4 | 48.0 | 56.5 | 59.3 | 61.6 | 67.9 | 72.9 | 76.5 |
| | 22.5 | 27.0 | 30.5 | 34.9 | 40.9 | 46.8 | 48.8 | 50.4 | 54.9 | 58.5 | 60.9 |
| 3 Stunden | 22.1 | 26.3 | 28.8 | 32.0 | 36.4 | 40.8 | 42.2 | 43.4 | 46.8 | 49.4 | 51.2 |
| | 25.3 | 30.2 | 34.0 | 38.8 | 45.3 | 51.8 | 53.9 | 55.7 | 60.6 | 64.3 | 67.0 |
| 4 Stunden | 26.1 | 32.0 | 37.8 | 45.0 | 54.8 | 64.6 | 67.7 | 70.3 | 77.6 | 83.3 | 87.4 |
| | 27.5 | 32.7 | 36.8 | 41.9 | 48.8 | 55.8 | 58.1 | 59.9 | 65.0 | 69.2 | 72.1 |
| 6 Stunden | 24.9 | 29.2 | 31.8 | 35.2 | 39.9 | 44.5 | 46.0 | 47.3 | 50.8 | 53.5 | 55.4 |
| | 28.4 | 34.9 | 41.2 | 49.1 | 59.8 | 70.5 | 73.9 | 76.7 | 84.6 | 90.9 | 95.4 |
| 9 Stunden | 32.2 | 42.0 | 49.0 | 57.9 | 69.8 | 81.8 | 85.6 | 88.7 | 97.5 | 104.5 | 109.5 |
| | 31.3 | 38.2 | 42.7 | 48.6 | 56.5 | 64.5 | 67.0 | 69.1 | 74.9 | 79.6 | 83.0 |
| 12 Stunden | 30.7 | 35.8 | 38.8 | 42.9 | 48.2 | 53.8 | 55.5 | 56.9 | 60.9 | 64.2 | 66.5 |
| | 35.6 | 44.4 | 49.7 | 56.3 | 65.3 | 74.4 | 77.4 | 79.6 | 86.5 | 91.8 | 95.4 |
| 18 Stunden | 38.6 | 49.1 | 56.6 | 66.0 | 78.8 | 91.6 | 95.7 | 99.0 | 108.4 | 115.8 | 121.1 |
| | 39.8 | 49.5 | 55.4 | 62.7 | 72.6 | 82.4 | 85.6 | 88.3 | 95.6 | 101.4 | 105.4 |
| 1 Tag | 47.6 | 61.8 | 70.2 | 80.6 | 94.8 | 108.7 | 113.1 | 116.4 | 126.2 | 133.9 | 139.4 |
| | 46.4 | 58.0 | 64.7 | 73.3 | 84.9 | 96.4 | 100.0 | 102.9 | 111.1 | 117.5 | 122.1 |
| | 45.3 | 54.2 | 59.3 | 66.0 | 75.1 | 84.2 | 87.0 | 89.4 | 96.1 | 101.2 | 104.9 |
| | 52.9 | 68.2 | 77.1 | 88.4 | 103.8 | 119.1 | 124.0 | 128.1 | 139.3 | 148.3 | 154.7 |
| | 49.7 | 62.1 | 69.3 | 78.4 | 90.9 | 103.2 | 107.3 | 110.4 | 119.4 | 126.9 | 131.8 |
| | 46.5 | 56.0 | 61.6 | 68.5 | 78.1 | 87.4 | 90.7 | 92.8 | 99.6 | 105.5 | 109.0 |

MaxModN - maximierte Modellniederschläge [HAÖ=Hydrologischer Atlas Österreichs (konvexives N-Modell), ALADIN-Vorhersagemodell (modifiziert)]
Bemessungsniederschlag - gewichteter Wert zwischen MaxModN und ÖKOSTRA
ÖKOSTRA - interpolierte extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen (DWA-A 531, modifiziert)

Literaturverzeichnis

- [1] „Wetterpate,“ Institut für Meteorologie Freie Universität Berlin, Juli 2021. [Online]. Available: https://page.met.fu-berlin.de/wetterpate/static/lebensgeschichten/Tief_BERND_10_07_21.htm. [Zugriff am 25. Juli 2024].
- [2] „European Severe Weather Database,“ European Severe Storms Laboratory e.V., Juli 2021. [Online]. Available: <https://eswd.eu/cgi-bin/eswd.cgi>. [Zugriff am 15. August 2024].
- [3] F. Neukirchen, „Der Jetstream schlägt Wellen,“ in *Die Folgen des Klimawandels*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2019, pp. 181-193.
- [4] IPCC, „Climate change 2013: The physical science basis, contribution of working group to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,“ <http://www.ipcc.ch>, (2013), p. 1–2216.
- [5] G. Masato, B. J. Hoskins und T. Woollings, „Winter and summer Northern Hemisphere blocking in CMIP5 models,“ *Journal of Climate*, Bd. 26, Nr. 18, pp. 7044-7059, 2013.
- [6] J. S. Tradowsky, S. Y. Philip, F. Kreienkamp, S. F. Kew, P. Lorenz, J. Arrighi und N. ... Wanders, „Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021,“ *Climatic Change*, Bd. 176, Nr. 7, p. 90, 2023.
- [7] W. J. v. Bebbber, „Die Zugstraßen der barometrischen Minima nach den Bahnenkarten der deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875-1890,“ *Meteorologische Zeitschrift* 8, pp. 361-366, 1891.
- [8] M. Messmer, J. J. Gómez-Navarro und C. C. Raible, „Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe,“ *Earth system dynamics*, Bd. 6, Nr. 2, pp. 541-553, 2015.
- [9] M. Hofstätter, C. Beck, B. Chimani, M. Ganekind, M. Homan, J. Jacobeit und A. Phillip, „WETRAX–Weather Patterns, Cyclone Tracks and related Precipitation Extremes. Großflächige Starkniederschläge im Klimawandel in Mitteleuropa,“ *Geographica Augustana*, 19, p. 240, 2015.

- [10] M. Hofstätter, A. Lexer, M. Homann und G. Blöschl, „Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types,“ *International Journal of Climatology*, Bd. 38, Nr. 1, pp. 497-417, 2018.
- [11] J. L. Lozán, H. Grassl, D. Notz und D. Piepenburg, „Warnsignal Klima: Die Polarregionen. Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen,“ Hamburg, 2014, pp. 230-235.
- [12] K. Dethloff, „Wechselwirkung der atmosphärischen Stockwerke,“ in *Unberechenbares Klima*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2022, pp. 153-154.
- [13] K. Dethloff, „Blockierungslagen, Hitzeglocken und Starkregen,“ in *Unberechenbares Klima*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2022, pp. 194-195.
- [14] meteoneWS.ch, „Niederschlagbares Wasser,“ 2021. [Online]. Available: <https://uwr.de/de/a/niederschlagbares-wasser-und-starkniederschlaege>.
- [15] wetteronline, „Tiefdruckgebiet,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.wetteronline.at/wetterlexikon/tiefdruckgebiet>.
- [16] V. Weilguni, „<https://ehyd.gv.at/>,“ 1. September 2022. [Online]. Available: https://ehyd.gv.at/assets/eHYD/pdf/Bemessungsniederschlag_2020.pdf. [Zugriff am 12. April 2024].
- [17] T. Junghänel, P. Bissolli, J. Daßler, R. Fleckenstein, F. Imbery, W. Janssen, F. Kaspar, K. Lengfeld, T. Leppelt, M. Rauthe, A. Rauthe-Schöch, M. Rocek, E. Walawender und E. Weigl, „Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19. Juli 2021,“ Deutscher Wetterdienst, 2021.
- [18] „BOKU Wetterstation,“ 17. Juli 2021. [Online]. Available: <https://meteo.boku.ac.at/wetter/aktuell/index.html>. [Zugriff am 19. Juli 2021].
- [19] „World Weather Attribution,“ [Online]. Available: <https://www.worldweatherattribution.org/>. [Zugriff am 15. August 2024].

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------------|--|----|
| Abbildung 1-1 | Bernd als blockiertes Tief..... | 1 |
| Abbildung 1-2 | Position von Bernds Tiefdruckkern..... | 2 |
| Abbildung 2-1 | Planetare Zirkulation | 4 |
| Abbildung 2-2 | Hoch und Tiefdruckgebiete..... | 5 |
| Abbildung 2-3 | Bernds Tiefdrucktrajektorie im Vergleich | 6 |
| Abbildung 2-4 | Abtropfen Bernds..... | 7 |
| Abbildung 2-5 | Meereisentwicklung Arktis..... | 8 |
| Abbildung 3-3 | Größere Wellen Amplitude | 9 |
| Abbildung 2-7 | Meeresoberflächen Temperatur Anomalien | 9 |
| Abbildung 3-1 | Mollier h-x Diagramm | 11 |
| Abbildung 3-2 | Darstellung eines Tiefdruckgebietes | 14 |
| Abbildung 3-3 | Querschnitt durch ein Tiefdruckgebiet..... | 16 |
| Abbildung 3-4 | Funktionsweise eines Niederschlagsradars | 18 |
| Abbildung 3-5 | Radaranalyse mit Querschnitt | 19 |
| Abbildung 3-6 | Pluviometer mit Regenwippe..... | 20 |
| Abbildung 3-7 | Bemessungsniederschlag Gitterpunkte | 21 |
| Abbildung 4-1 | Starker Temperatursprung | 22 |
| Abbildung 4-2 | Temperaturdifferenzen auf den Meeren..... | 23 |
| Abbildung 4-3 | Niederschlagbares Wasser..... | 24 |
| Abbildung 4-4 | Luftmassen SAT Bild..... | 25 |
| Abbildung 4-5 | 48h Niederschlag | 26 |
| Abbildung 4-6 | Webcam hohe Warte..... | 27 |
| Abbildung 4-7 | Feuchteflusskarte | 28 |
| Abbildung 4-9 | Bemessungsniederschlag Augarten und Summenlinie Wien 17.Juli 2021 | 29 |
| Abbildung 4-9 | Bemessungsniederschlag Dornbach und Summenlinie Wien 17.Juli 2021 | 29 |
| Abbildung 4-10 | Bemessungspunkte | 30 |
| Abbildung 4-11 | Bemessungsniederschlag interpoliert BOKU und Summenlinie Wien 17.Juli 2021.... | 30 |
| Abbildung 4-12 | Klimazonen Österreichs..... | 31 |
| Abbildung 4-13 | ZAMG INCA-Analyse | 32 |
| Abbildung 4-14 | Orographie und Anströmungsrichtung..... | 33 |
| Abbildung 4-15 | Radaranalyse mit den Schauerstraßen..... | 34 |
| Abbildung 4-16 | ZAMG INCA-Analyse 18. Juli 2021..... | 35 |
| Abbildung 4-17 | ZAMG INCA-Analyse 18. Juli 2021 Detail | 36 |
| Abbildung 4-18 | Summenlinie 18. Juli 2021 Wieselburg..... | 36 |
| Abbildung 4-19 | Bemessungsniederschlag und Summenlinie Wieselburg 18. Juli 2021 | 37 |
| Abbildung 4-20 | Überflutungen in Wieselburg | 38 |