

# Extreme Punktniederschläge

## Zusammenfassung

Die Karten zu extremen Punktniederschlägen beschreiben die Niederschlagshöhen für seltene Starkniederschlagsereignisse im heutigen Klima. Die Analysen können für Wiederkehrperioden von 2 bis 300 Jahren dargestellt werden. Aktuell sind Resultate für extreme Niederschlagssummen für Dauern von 72, 48, 24, 12 und 6 Stunden sowie für 180, 60, 10, 5 und 2 Minuten verfügbar. Später werden Auswertungen für weitere Dauern integriert. Für jede Rasterzelle lässt sich eine Tabelle einblenden, welche die Wiederkehrwerte im Mittelpunkt der Zelle angeben (Median und Unsicherheitsbereich). Es ist zu beachten, dass die Farbskala zwischen den verschiedenen Dauerstufen variiert. Bei der Interpretation sollten auch die einschränkenden Hinweise in Kapitel 4 des Begleittextes berücksichtigt werden.

Autorinnen und Autor: Sophie Fukutome<sup>1</sup>, Sonia Alouini<sup>1,2</sup>, Christoph Frei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Operation Center 1, CH-8058 Zürich-Flughafen

<sup>2</sup>Center for Climate Systems Modeling C2SM, ETH Zürich, Zürich

## 1 Einleitung

Kenntnisse über die Niederschlagshöhen von seltenen Starkniederschlägen sind eine wichtige Grundlage, etwa bei der Beurteilung der Risiken von Naturgefahren oder für die Dimensionierung von Entwässerungssystemen. Solche Informationen werden aus Daten von langen Niederschlagsmessreihen hergeleitet und in Form von Wiederkehrwerten zu bestimmten Wiederkehrperioden bereitgestellt. Der Wiederkehrwert zur Wiederkehrperiode  $T$  ist definiert als Niederschlagshöhe, welche pro Jahr mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1/T$  überschritten wird. Unter Niederschlag wird hier die Summe aus Regen- und Schneefall verstanden.

Für die Schweiz liegen umfangreiche Informationen über extreme Niederschlagshöhen für Standorte mit langen Messreihen vor. Diese sind für Niederschlagsdauern von 10 Minuten (für 67 Stationen) bis 5 Tage (für 341 Stationen) auf [climate-extremes.ch](http://climate-extremes.ch) verfügbar [1, 2]. In der Schweiz mit ihren kleinräumigen Klimamustern sind aber Informationen für Stationsstandorte alleine nicht ausreichend. Es gibt nicht für jeden beliebigen Ort eine repräsentative Messstation. Die hier dargestellten Karten füllen diese Lücke. Sie stellen flächendeckende Informationen über Wiederkehrwerte bereit, auf einem Raster mit einer Auflösung von 1 km. Die räumlichen Darstellungen stützen sich ebenfalls auf Messreihen an Stationen, aber der Einbezug von Daten aus dem gesamten Messnetz erlaubt es, die Wiederkehrwerte im Raum zwischen den Stationen zu schätzen. Als Folge der räumlichen Interpolation unterliegen die Schätzungen in den Karten im Vergleich zu denjenigen an Stationen einer zusätzlichen Unsicherheit.

Erste Karten über extreme Punktniederschläge in der Schweiz wurden bereits in den 1990er Jahren im Hydrologischen Atlas der Schweiz publiziert [3, 4]. Die hier dargestellten Ergebnisse beruhen auf Datenreihen aus einem aktuelleren Zeitraum sowie von zuverlässigerer Qualität. Auch die hier verwendete Analyse-methode ist wesentlich moderner. Sie macht weniger weitgreifende Modellannahmen, berücksichtigt feinskalige topographische Effekte und bildet die Unsicherheiten quantitativ ab. Die Unterschiede zwischen den

hier dargestellten und den früheren Karten werden in Kapitel 5 diskutiert.

Aktuell sind Karten mit Wiederkehrwerten für 72-, 48-, 24- und 12-Stunden- sowie 180-, 60-, 10-, 5- und 2-Minuten-Niederschläge für neun Wiederkehrperioden zwischen 2 und 300 Jahren verfügbar. Die Auswertungen decken das Gebiet der hydrologischen Schweiz ab und nutzen dazu auch Datenreihen der Nachbarländer. Karten zu weiteren Niederschlagsdauern sind in Bearbeitung und werden später in die Daten- und Analyseplattform des Hydrologischen Atlases integriert.

## 2 Daten und Methode

Welche Daten für die Erstellung der Karten verwendet wurden, hängt vom für den jeweiligen Zeitraum verfügbaren Messnetz und vom Umfang der Qualitätsprüfung ab. MeteoSchweiz zeichnet Beobachtungen in Intervallen von 10 Minuten und 1 Tag (täglich um 06:00 UTC) auf. Die Qualitätsprüfung hängt ab von der Verfügbarkeit unabhängiger Informationen und ist daher für 1-Tages-Beobachtungen am umfassendsten, gefolgt von den 1-Stunden-Aggregationen (jede Stunde zur vollen Stunde). Selbst wenn 10-Minuten-Beobachtungen vorliegen, sind die Ergebnisse also zuverlässiger, wenn sie auf stündlichen Beobachtungen basieren. Dementsprechend basiert die Erstellung von Karten für 60 und 180 Minuten sowie 6 und 12 Stunden auf stündlichen Beobachtungen, während die Karten für 24-, 48- und 72-Stunden-Dauern Aggregationen des 1-Tages-Niederschlags verwenden. Für die Auswirkungen auf die Abschätzung der Werte und die Namenskonvention siehe Abschnitt 2.3. Tabelle 1 zeigt eine Liste der Anzahl der Stationen, der jeweils betrachteten Zeitspanne und der Mindestanzahl der für die verschiedenen Dauern berücksichtigten Jahre. Die 60-Minuten- und 24-Stunden-Daten werden im Folgenden ausführlich beschrieben, da sie repräsentativ für Bedingungen bei einer Dauer von weniger als einem Tag bzw. von mehreren Tagen sind.

Da 10 Minuten das kürzeste, über einen ausreichenden Zeitraum verfügbare Messintervall ist, wurde für

Dauer	Region	Anzahl der Stationen	Mindestanzahl Jahre	Referenzperiode
10 Minuten	Schweiz	70	20	1981–2023
	Ausland	88	10	
60 Minuten	Schweiz	69	15	1981–2020
	Ausland	100	10	
180 Minuten, 6, 12 Stunden	Schweiz	71	15	1981–2023
	Ausland	112		
24, 48, 72 Stunden	Schweiz	418	30	1961–2020
	Ausland	78		

**Tabelle 1.** Verwendete Beobachtungsdaten für die räumliche Extremwertanalyse bei jeder Dauer (10, 60, 180 Minuten, 6, 12, 24, 48, 72 Stunden); für die Karten von 2 und 5 Minuten waren keine Beobachtungen verfügbar.

die Karten der Dauern von 5 und 2 Minuten eine andere Methode verwendet. Zeiträume von 10 Minuten und mehr werden einer komplexen räumlichen statistischen Analyse unterzogen, während die sehr kurzen Zeiträume indirekt aus der 10-Minuten-Karte extrapoliert werden.

## 2.1 Daten

Die räumliche Analyse der 60-Minuten-Niederschläge nutzt Daten von 69 Stationen von MeteoSchweiz sowie 100 Stationen im grenznahen Ausland für den Zeitraum 1981–2020. Bei der Auswahl der Stationen wurde eine Messdauer von mindestens 15 Jahren in der Schweiz und von mindestens 10 Jahren in den Nachbarländern vorausgesetzt. Bei den 24-Stunden-Niederschlägen hingegen wurden Daten an 418 MeteoSchweiz-Stationen und 78 ausländischen Stationen im Zeitraum 1961–2020 genutzt (Messreihenlänge mindestens 30 Jahre). Auf längere Datenreihen, welche auch den Zeitraum vor 1961 erschliessen, wurde bewusst verzichtet, um den allfälligen Einfluss langzeitlicher Klimaveränderungen gering zu halten [5]. Die Daten sind qualitätsgeprüft, mit Ausnahmen im Ausland, aber es erfolgte keine Korrektur des systematischen Messfehlers. Die systematischen Messfehler sind bei hohen Niederschlagsintensitäten und bei Ereignissen primär in Sommer und Herbst eher gering [6].

## 2.2 Räumliche Analyse

Die Methode der verwendeten räumlichen Analyse ist im Detail in [7] beschrieben. Wir fassen hier einfach die Grundzüge des Verfahrens zusammen. Die Methode stützt sich auf das verbreitete Modell der Block-Maximum-Extremwertanalyse mit der «Verallgemeinerten Extremwertverteilung» GEV (z.B. [8]). In Abweichung von der üblichen Praxis werden aber die saisonalen (nicht die jährlichen) Niederschlagsmaxima modelliert. Auf diese Weise werden Starkniederschläge unterschiedlicher Natur in der Bearbeitung auseinandergehalten und damit die theoretischen Voraussetzungen der Extremwertanalyse besser erfüllt. Die saisonal stratifizierten Resultate werden am Schluss zu einer Verteilung für jährliche Maxima kombiniert. Auf der Daten- und Analyseplattform sind nur diese jährlichen Resultate visualisiert. Karten mit Wiederkehrwerten für einzelne Jahreszeiten sind auf climate-extremes.ch und beispielhaft in Kapitel 3 dargestellt.

In der räumlichen Extremwertanalyse werden die Parameter der GEV-Verteilung als räumliche Felder betrachtet und ihrerseits als (unbeobachtete) Realisierung eines stochastischen Modells angesetzt (Gaussches Zufallsfeld, GRF). Die beiden stochastischen Komponenten, GEV und GRF, werden im Rahmen eines Bayesschen hierarchischen Modells mit einer Composite-Likelihood gekoppelt und alle Parameter mit Hilfe eines Markov-Chain-Monte-Carlo-Algorithmus geschätzt [9, 10, 11, 7].

Für die Anwendung in der Schweiz bietet diese räumliche Extremwert-Modellierung drei besonders wertvolle Eigenschaften: (1) Es lassen sich zusätzliche Informationen über feinskalige räumliche Muster integrieren (Prädiktorenfelder), so dass Effekte der Topographie und Unterschiede zwischen Klimaregionen besser abgebildet werden. (2) Die gleichzeitige Schätzung der Verteilungen aus den Daten aller Stationen stellt sicher, dass an jedem Ort Informationen aus dem gesamten Messnetz einfließen. Damit können Unsicherheiten eingegrenzt werden. (3) Schliesslich liefert die verwendete Bayessche Inferenz eine umfassende probabilistische Schätzung, also für jeden Wiederkehrwert eine Häufigkeitsverteilung. Diese Schätzverteilung informiert umfassend über den Grad der Unsicherheit (siehe dazu auch [7] und Kapitel 4).

Auf der Daten- und Analyseplattform sind charakteristische Quantile der Schätzverteilung wiedergegeben. In den Karten ist der Median (50%-Quantil) dargestellt. Die durch Klicken auf die Karte eingeblendeten Tabellen führen das 2.5%-, 50%- und 97.5%-Quantil der Schätzverteilung auf. Der Bereich zwischen dem 2.5%- und dem 97.5%-Quantil bezeichnet den 95%-Konfidenzbereich der Schätzung.

## 2.3 Korrektur für feste Messzeiten

In der Hydrologie ist seit langem bekannt, dass Wiederkehrwerte für einen 24-Stunden Niederschlag unterschätzt werden, wenn sie direkt aus Messungen zu festen täglichen Messzeiten, zum Beispiel jeweils um 06:00 UTC, berechnet werden [12, 13]. Der Grund dafür ist, dass sich ein 24-Stunden-Ereignis in der Regel über die 06:00 UTC-Marke erstreckt, und deshalb in zwei kleineren Tageswerten registriert wird. Die gemessenen saisonalen oder jährlichen Maximalwerte sind deshalb kleiner als die effektiven maximalen 24-Stunden Niederschläge.

Aufgrund der grösseren Anzahl von Stationen und einer umfassenderen Qualitätsprüfung wurde die statistische Analyse für 24 Stunden mit dem Tagesniederschlag durchgeführt und nicht mit gleitenden Summen des 24-Stunden-Niederschlags in jeder Stunde. Um die Wiederkehrwerte für gleitende Niederschlagssummen (24 Stunden) zu bestimmen, wurden dann die GEV-Parameter der jahreszeitlichen Analysen korrigiert. Diese Korrektur wurde unter Einbezug von Stationsdaten mit zeitlich hochaufgelösten Messdaten über eine lineare Regression der GEV-Parameter ermittelt. Dies bewirkt eine von der Jahreszeit abhängige Verschiebung der Verteilungen zu leicht höheren Werten (siehe auch [14]). Ebenso wurden die Karten für 2 und 3 Tage korrigiert, um Karten für 48 bzw. 72 Stunden zu erhalten.

Ein ähnlicher Ansatz wurde für die Zeiträume von 1 und 3 Stunden verwendet, da Messintervalle mit festen Anfangs- und Endzeiten ein Ereignis in der Regel in mehrere Teile aufteilt und damit die tatsächlichen Wiederkehrwerte unterschätzt werden. Wie bei den täglichen Niederschlägen wurde das Modell zunächst an die 1-Stunden- und 3-Stunden-Summen angepasst und dann die GEV-Parameter korrigiert, um die Resultate für ein bewegliches Messintervall von 60 bzw. 180 Minuten anzupassen. Da die geschätzte Korrektur mit längeren Messintervallen schnell abnimmt, war für saisonale Modelle mit 6-Stunden- und 12-Stunden-Niederschlägen keine Korrektur erforderlich.

Beachten Sie, dass die Erfassung von 10-minütigen Niederschlägen zu festen Zeitpunkten (HH:10, HH:20 usw.) zu einer ähnlichen Unterschätzung führt. Da jedoch keine kürzeren Messdauern verfügbar sind, konnte aus Daten allein keine Korrektur geschätzt werden.

Zur klaren Unterscheidung zwischen Wiederkehrwerten für feste und für gleitende Messzeiten verwenden wir die folgende Konvention: Für Niederschlagsdauern im Stundenbereich (1 Stunde bis 12 Stunden) bedeutet x-Stunden, dass die Werte konventionell sind, d.h. für feste stündliche Messzeiten gelten. Andererseits bedeutet x-Minuten, dass die Werte auf gleitende Messzeiten korrigiert wurden. Ein 180-Minuten Wiederkehrwert ist korrigiert, ein 3-Stunden-Wiederkehrwert ist nicht korrigiert.

Für Niederschlagsdauern im Tagesbereich (1 bis 3 Tage) sind x-Tage-Niederschläge konventionell, während x-Stunden-Niederschläge korrigiert sind. Daher sind 48-Stunden-Niederschläge korrigiert, 2-Tage-Niederschlagswerte hingegen nicht.

#### 2.4 Extrapolation auf unbeobachtete Dauern

Die Extrapolationsmethode nutzt den Zusammenhang zwischen den Niederschlagssummen unterschiedlicher Dauern, um die GEV-Parameter für 5- und 2-minütige Niederschläge aus denjenigen für 10-minütige Niederschläge abzuleiten. Dafür werden für jede Jahreszeit die GEV-Parameter für 10-minütige Niederschläge an jedem Gitterpunkt mit einem Faktor multipliziert. Die jährlichen Wiederkehrwerte werden an-

schliessend aus den saisonalen GEV-Verteilungen ermittelt, genau wie bei den räumlichen Analysen der beobachteten Niederschlagsdauern. Der Multiplikationsfaktor (in der Literatur als «Simple Scaling» bezeichnet [15, 16]) wird als proportional zum Verhältnis der Dauer (z. B. 5/10) angenommen, wobei der Exponent vom Standort und der Jahreszeit abhängt. Der Exponent wird für jede Station separat auf der Grundlage des Verhältnisses zwischen den Niederschlagssummen von 10 und 20 Minuten geschätzt und dann auf einem 1-km-Raster unter Verwendung von Kriging mit einer Kovariablen, in diesem Fall der Region (Nord, Alpen oder Süd), interpoliert. Einzelheiten zu dieser Methode finden sich in der Methodendokumentation zur Extrapolation auf 2- und 5-Minuten-Niederschläge an Stationen unter [1].

### 3 Resultate

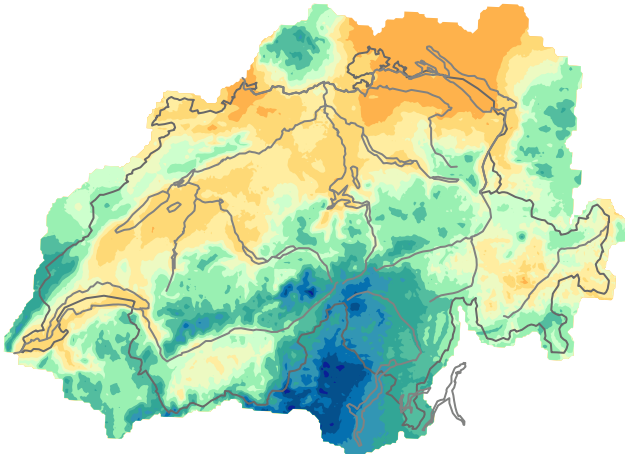
Die Muster extremer Niederschläge in der Schweiz weisen ausgeprägte räumliche und saisonale Unterschiede auf und unterscheiden sich zwischen dem 60-Minuten- und dem 24-Stunden-Niederschlag deutlich (Abb. 4, unten).

Beim 24-Stunden-Niederschlag variiert der 100-jährliche Wiederkehrwert um etwa einen Faktor 5 zwischen den kleinsten Werten im Talboden des Wallis (um 90 mm) und den grössten Werten im westlichen Tessin (um 420 mm). Die «Sonnenstube» der Schweiz ist also interessanterweise auch das Gebiet mit den stärksten Niederschlägen. Nördlich des Alpenhauptkamms findet man die höchsten Werte entlang der zentralen und östlichen Voralpen sowie im westlichen Jura (Vallée de Joux).

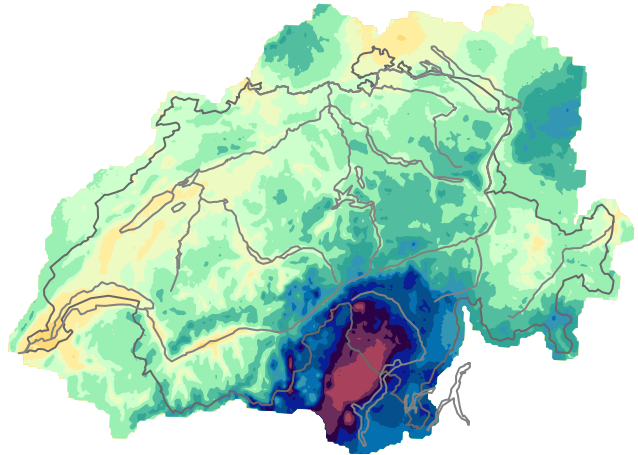
Im jahreszeitlichen Verlauf (Abbildung 1) zeigt sich, dass entlang der nördlichen Voralpen extreme 24-Stunden-Niederschläge vor allem im Sommer auftreten. Lokale Gewitter, aber auch grossskalige dynamische Ereignisse mit starkem Feuchtetransport und Hebung (zum Beispiel im August 2005 [17]) tragen dazu bei. Südlich des Alpenkamms treten extreme 24-Stunden-Niederschläge von Frühling bis Herbst auf, wobei die Wiederkehrwerte im westlichen Tessin im Herbst am grössten sind. Im Wallis sind die Wiederkehrwerte im Sommer kleiner als in den anderen Jahreszeiten. Im westlichen Jura sowie in den Waadtländer-, den nördlichen Walliser Alpen und in Teilen des Berner Oberlandes sind die Ereignisse im Winter am grössten.

Bei den Starkniederschlägen mit einer Dauer von 60 Minuten unterscheidet sich das räumliche Muster stark von dem der 24-Stunden-Niederschläge (siehe auch [18]). Insbesondere ist die Verteilung der Starkniederschläge über das ganze Gebiet nördlich des Alpenkamms viel uniformer und der Nord-Süd-Kontrast deutlich weniger ausgeprägt. Auch im saisonalen Verhalten (Abbildung 2) gibt es deutliche Unterschiede zum 24-Stunden Niederschlag. Die stärksten Niederschläge finden vor allem im Sommer statt. Ausser im Winter treten die höchsten Wiederkehrwerte in allen

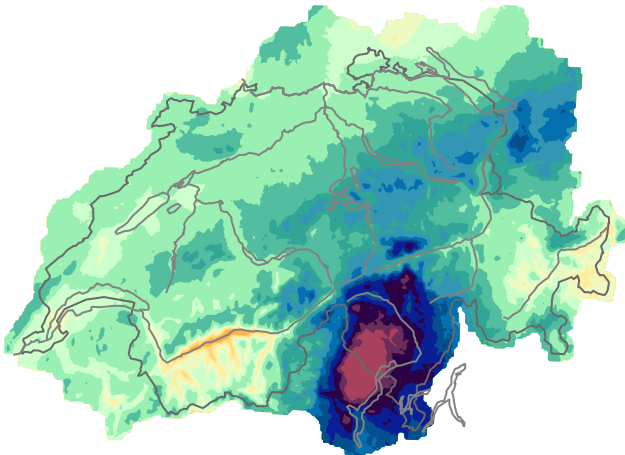
Winter (Dezember, Januar, Februar)



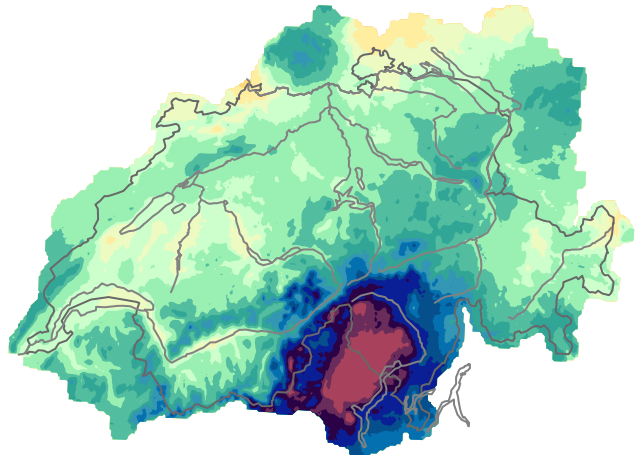
Frühjahr (März, April, Mai)



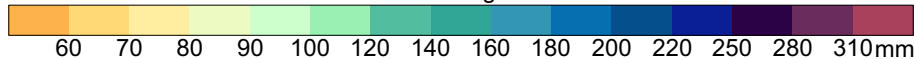
Sommer (Juni Juli, August)



Herbst (September, Oktober, November)



Wiederkehrwert der 24-Stunden-Niederschläge



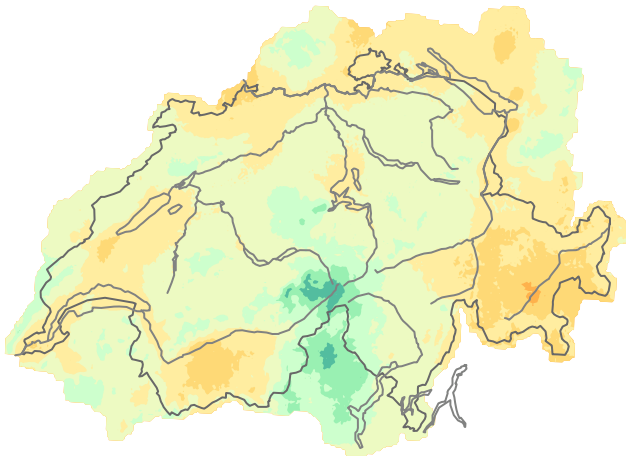
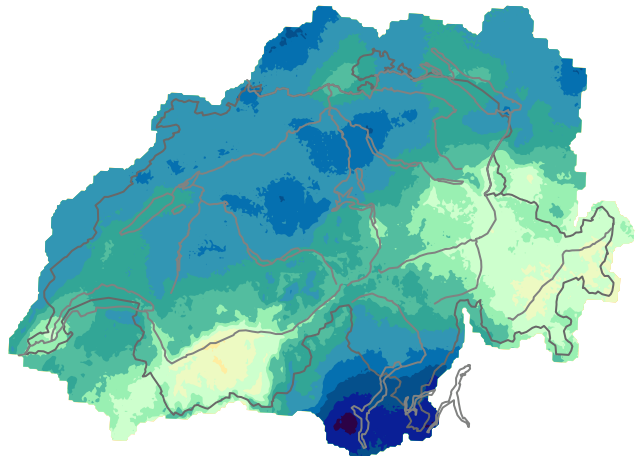
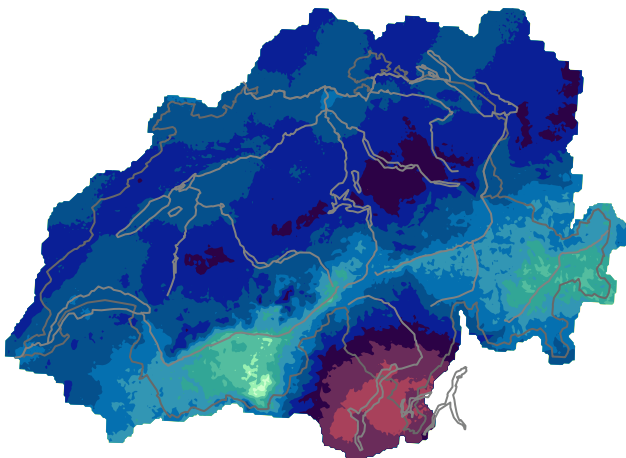
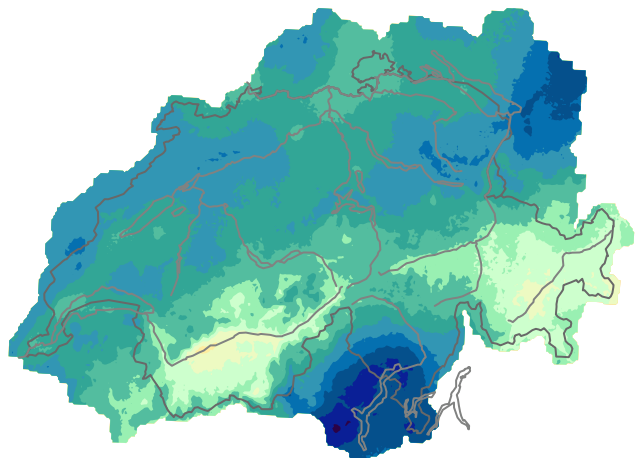
**Abbildung 1.** 100-jährliche Wiederkehrwerte des 24-Stunden-Niederschlags in Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON) [mm/24-Stunden]

Jahreszeiten im Tessin auf Wallis und Engadin weisen die kleinsten Extreme auf.

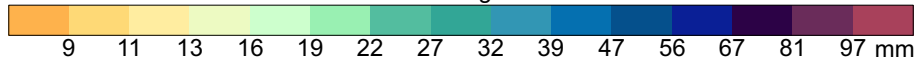
Die saisonalen Karten der 6-Stunden-Wiederkehrwerte (Abb. 3) verdeutlichen die Veränderungen in der räumlichen Verteilung, wenn die Niederschlagsdauer von 60 Minuten auf 24 Stunden ansteigt. Die Muster variieren von Region zu Region unterschiedlich und sind nicht eindeutig. Im Mittelland weisen die 6-Stunden-Niederschlagsextremwerte in Winter und Frühjahr ähnliche Merkmale wie die 24-Stunden-Extreme auf, jedoch mit einem abgeschwächten topografischen Einfluss. Im Sommer erinnert die räumliche Verteilung eher an die 60-Minuten-Niederschläge, wobei sich die starken Niederschläge bis in die Ebene erstrecken. Im Herbst sind zwar einige der topografischen Merkmale der 24-Stunden-Extremwerte in Norden und Westen sichtbar, doch der Intensitätsabfall in den Voralpen ähnelt den 60-Minuten-Niederschlägen. Im Tessin ist der Winter durch ähnliche Merkmale wie bei den 60-Minuten-Niederschlägen gekennzeichnet, jedoch mit stärkeren Kontrasten. Im Frühjahr liegen die höchsten

Werte wie bei den 60-Minuten-Extremen im Süden, jedoch verstärkt sich der für längere Zeiträume typische West-Ost-Kontrast. Im Sommer liegen die höchsten Werte nicht mehr wie bei den kurzen Zeiträumen im Süden, erreichen jedoch nicht die Höhe, die sie bei längeren Zeiträumen einnehmen. Auch die zweitgrössten Werte liegen an der östlichen Grenze des Tessins, wie bei den 60-Minuten-Extremen. Im Herbst sind die extremsten Niederschläge zwar ähnlich wie bei den 60-Minuten-Extremen verteilt, doch der starke Kontrast zu den Werten im Rest der Schweiz zeigt sich auch bei den langen Zeiträumen. Im Engadin ist entlang der südlichen Grenze ein Band mit erhöhter Niederschlagsintensität zu erkennen, insbesondere in Frühjahr und Herbst, das an die 24-Stunden-Extremwerte erinnert. Der Nordosten ist zwar nicht so einheitlich wie bei den 60-Minuten-Extremwerten strukturiert, allerdings weniger ausgeprägt als bei längeren Zeiträumen.

Die Saisonalität des Extremverhaltens hängt von der Dauer ab. Bei kurzen Zeiträumen treten die höch-

**Winter** (Dezember, Januar, Februar)

**Frühjahr** (März, April, Mai)

**Sommer** (Juni Juli, August)

**Herbst** (September, Oktober, November)


Wiederkehrwert der 60-Minuten-Niederschläge


**Abbildung 2.** 100-jährliche Wiederkehrwerte des 60-Minuten-Niederschlags in Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON) [mm/60-Minuten]

ten Wiederkehrwerte für die meisten Gitterpunkte im Sommer und die niedrigsten im Winter auf. Mit zunehmender Dauer verringert sich dieser Unterschied und auch der Unterschied zwischen den Wiederkehrwerten aller Jahreszeiten. Im Vergleich zu den anderen Jahreszeiten steigen die Wiederkehrwerte im Winter zwischen 60 Minuten und 12 Stunden stark an und zeigen in den hohen Bergen des Wallis bei einer Dauer von 6 und 12 Stunden die höchsten des Jahres. Während die Wiederkehrwerte im Herbst bei kurzen Zeiträumen mit denen im Frühjahr übereinstimmen, sind sie bei längeren Zeiträumen höher und übertreffen im Süden bei Zeiträumen von mehr als 12 Stunden sogar die Werte im Sommer.

#### 4 Korrekte Interpretation und Nutzung

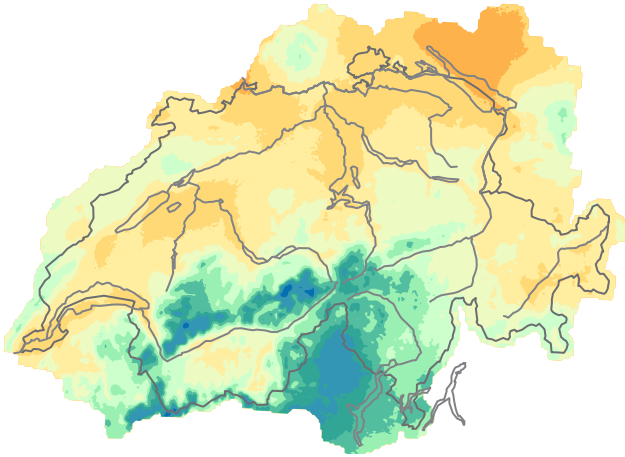
Für eine fachgerechte Interpretation der dargestellten Wiederkehrwerte sind folgende Hinweise zu beachten:

- Die Wiederkehrwerte beschreiben die Verhältnisse für Punktniederschläge. Der einer Raster-

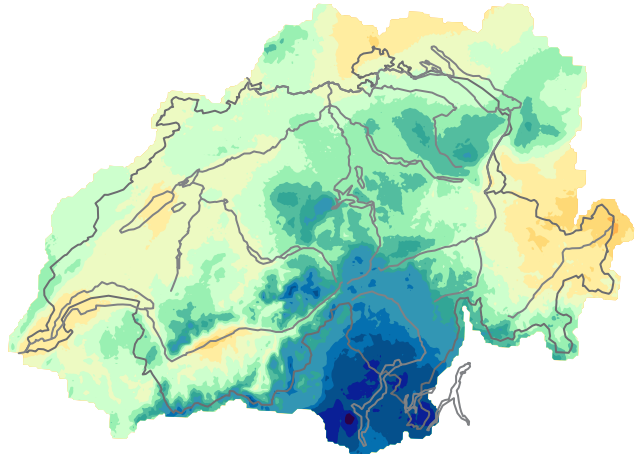
zelle zugeordnete Wert beschreibt die Verhältnisse in dieser Rasterzelle (genau genommen im Zentrum) und nicht etwa den Gebietsniederschlag über der Rasterzelle. Extreme Gebietsniederschlagshöhen können deshalb nicht direkt aus den hier dargestellten Karten herausgelesen werden. **Insbesondere können keine Statistiken über Einzugsgebietsniederschläge abgeleitet werden, etwa durch räumliche Mittelung der Rasterwerte**, weil dies zu einer Überschätzung der Wiederkehrwerte führt. Für Informationen über extreme Gebietsniederschläge wäre eine Umrechnung mit Hilfe der im analogen Hydrologischen Atlas publizierten Abminderungskurven möglich (Tafel 2.5 [19]). Auch neuere, vergleichende Untersuchungen sind verfügbar [20].

- Die verallgemeinerte Extremwertverteilung GEV ist zwar die Grundlage der verwendeten statistischen Modellierung, aber die dargestellten Wiederkehrwerte folgen als Funktion der Wiederkehrperiode nicht dem Zusammenhang ge-

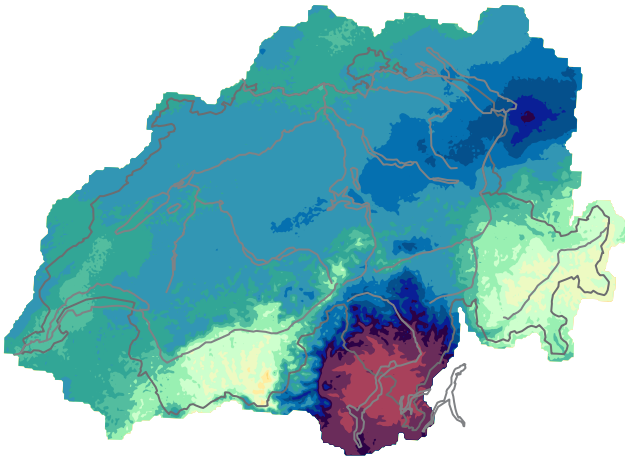
Winter (Dezember, Januar, Februar)



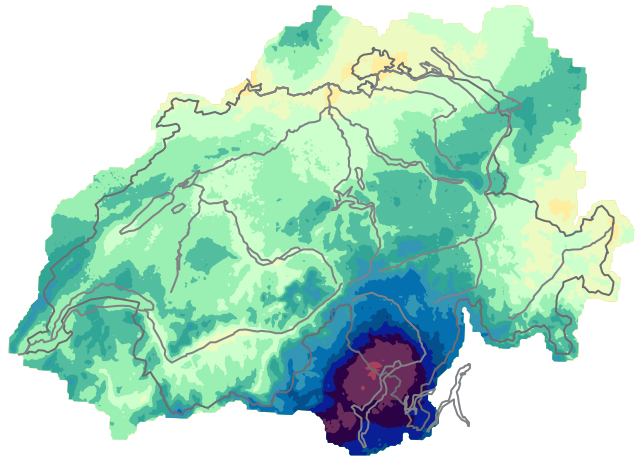
Frühjahr (März, April, Mai)



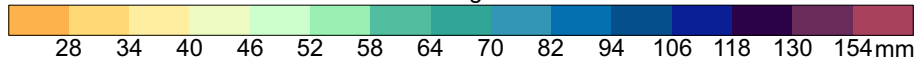
Sommer (Juni, Juli, August)



Herbst (September, Oktober, November)



Wiederkehrwert der 6-Stunden-Niederschläge



**Abbildung 3.** 100-jährliche Wiederkehrwerte des 6-Stunden-Niederschlags in Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON) [mm/6 Stunden]

mäss einer GEV. Dies ist eine Konsequenz der jahreszeitlich stratifizierten Analyse und des für die Schätzung verwendeten Bayesschen Verfahrens. Eine Implikation daraus ist, dass sich Wiederkehrwerte für Wiederkehrperioden zwischen oder ausserhalb der angegebenen Perioden nicht einfach mit einer GEV inter- bzw. extrapolieren lassen. Von einer solchen Inter- und Extrapolation wird dringend abgeraten.

- Schätzungen über die Intensität seltener Starkniederschläge sind unausweichlich mit Unsicherheiten verbunden. Für lange Wiederkehrperioden sind sie sehr gross, besonders für Standorte, die weit von Messstationen entfernt sind. Die quantitative Wiedergabe von Unsicherheiten in Form von Schätzverteilungen ist ein wichtiger Bestandteil der hier präsentierten Analysen. Wir empfehlen, dass Nutzerinnen und Nutzer diese Unsicherheiten in ihren Anwendungen mitberücksichtigen. Dieser Einbezug führt insgesamt zu robusteren Entscheiden, die weniger anfäl-

lig sind auf Veränderungen der Schätzung, zum Beispiel dann, wenn neue Starkniederschlagsereignisse in die Analyse aufgenommen werden. Das 95%-Vertrauensintervall kann so interpretiert werden, dass der wahre Wiederkehrwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% innerhalb der beiden Grenzen und mit je 2.5% unterhalb der unteren oder oberhalb der oberen Grenze liegt. Der Median teilt die Schätzverteilung in zwei Teile mit je 50% Wahrscheinlichkeit.

- Die auf der Daten- und Analyseplattform dargestellten Analysen werden im Laufe der Zeit aufdatiert. Damit können die vorhandenen Schätzungen mit Daten aus neueren Ereignissen aktualisiert und Weiterentwicklungen in der statistischen Methodik umgesetzt werden. Die wesentlichen Änderungen werden in diesem Dokument protokolliert (siehe Kapitel 6). Im Allgemeinen werden die Änderungen im 95%-Konfidenzbereich liegen, mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% aber auch ausserhalb.

Minuten	2	5	10
$l/s \cdot m^2$	$\times 1/120$	$\times 1/300$	$\times 1/600$
$l/s \cdot ha$	$\times 10000/120$	$\times 10000/300$	$\times 10000/600$

**Tabelle 2.** Umrechnungsfaktoren der Einheiten

- Die in der Daten- und Analyseplattform dargestellten Wiederkehrwerte beschreiben die Verhältnisse im heutigen Klima (1961–2020 resp. 1981–2020) für 60 Minuten bzw. 24 Stunden (s. Tab. 1 für die anderen Dauern). Es muss aber davon ausgegangen werden, dass sich als Folge der anthropogenen Klimaänderung die Häufigkeitsverteilung von Starkniederschlägen ändern wird. Analysen von aktuellen Klimasimulationen für die Schweiz zeigen eine Zunahme der saisonalen Wiederkehrwerte des täglichen Niederschlags für  $T = 10$  Jahre und  $T = 100$  Jahre [21]. Für ein Szenario mit unverminderten Emissionen (RCP8.5) wird mit einer Zunahme von 10–25% bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gerechnet. Die Unsicherheiten sind allerdings erheblich, besonders bezüglich der Änderungen im Sommer. Für subtägliche Dauerstufen kann der Einfluss des Klimawandels derzeit noch nicht robust abgeschätzt werden; es bestehen sowohl seitens der Beobachtungsdaten als auch seitens der Modelle noch sehr grosse Unsicherheiten. Es gibt jedoch starke Anzeichen für eine Zunahme extremer Niederschläge innerhalb eines Tages im Alpenraum, sowohl in den Beobachtungsdaten als auch in den Klimaprognosen für die Zukunft [22, 23, 24].
- Die Wiederkehrwerte sind in mm pro Dauer angegeben. Gebräuchliche Einheiten für kurze Dauern sind  $l/s \cdot m^2$  und  $l/s \cdot ha$ . Die Umrechnungsfaktoren für die Verwendung sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

## 5 Vergleich mit den HADES-Tafeln 2.4 und 2.4<sup>2</sup>

Die hier beschriebenen aktuellen Karten B04 zu extremen Punktniederschlägen mit einer Dauer von 60 Minuten und 24 Stunden ersetzen die früher im analogen HADES publizierten Tafeln 2.4 [3] und 2.4<sup>2</sup> [4]. In Abbildung 4 werden diese Karten für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren in einheitlicher Darstellung verglichen (Beachten Sie hier die in Abschnitt 2.3 eingeführte Namenskonvention.).

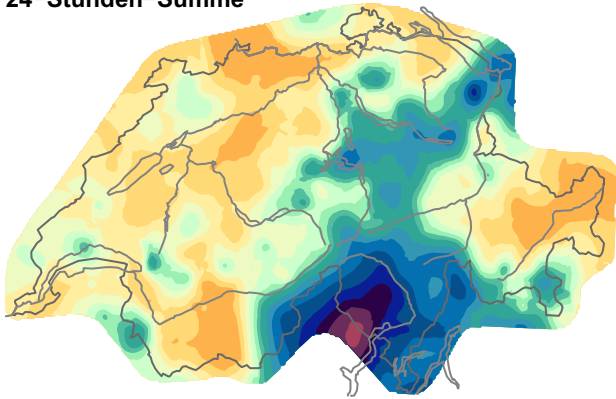
Die früheren Tafeln zeigen relativ glatte Felder mit unklaren Beziehungen zu den topographischen und physikalischen Gegebenheiten, etwa Tälern oder Gebirgsmassiven. Sowohl für den 24-Stunden-Niederschlag als auch für den Niederschlag von einer Stunde beschreiben die extremsten Niederschläge einen Bogen vom Tessin über den Alpenkamm und entlang der Voralpen der Ostschweiz. Im Rest der Schweiz sind die Extreme deutlich kleiner, besonders beim 24-Stunden-Niederschlag. Schliesslich sind die früheren Analysen

von zahlreichen lokalen Maxima und Minima durchsetzt, die mit Stationsorten zusammenfallen (siehe [3]), aber physikalisch wenig plausibel erscheinen. Die hier publizierten Karten B04 (Abbildung 4, dritte Reihe) zeigen eine viel detailliertere Struktur mit deutlich erkennbaren topographischen Signaturen. Der Bogen der stärksten Niederschläge beim 24-Stunden-Niederschlag erhält eine Fortsetzung ins Napfgebiet, in die Freiburger und Berner Alpen. Die Alpentäler und der Jura sind deutlich erkennbar. Beim 60-Minuten-Niederschlag unterscheidet sich das räumliche Muster in B04 besonders stark von den früheren Tafeln. Die Anomalien im Süden und Norden sind getrennt und diejenige im Norden erstreckt sich entlang der gesamten Voralpen und dem höheren Mittelland. Für beide Dauerstufen sind die Wiederkehrwerte in B04 grösstenteils höher als in den früheren Tafeln, besonders in den westlichen Voralpen und im Mittelland, aber auch im Tessin.

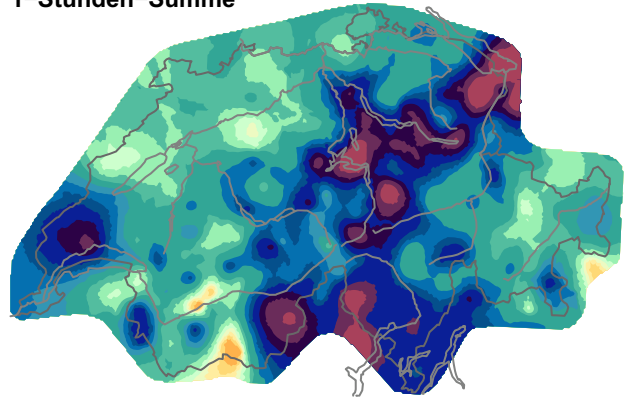
Es gibt verschiedene Ursachen für die beobachteten Unterschiede. Einerseits dürfte die höhere Datenqualität zu insgesamt robusteren Auswertungen beigetragen haben. Weiter haben sich die heutigen klimatischen Verhältnisse gegenüber früher möglicherweise etwas verändert. Hinweise dazu gibt es für 1-Tages-Niederschläge moderater Intensität mit Wiederkehrperioden  $< 1$  Jahr [25] und für Jahresmaxima (Analyse MeteoSchweiz). Die Grösse und Form der Unterschiede zwischen den Karten deutet aber darauf hin, dass vor allem die methodischen Fortschritte zu einer verlässlicheren Darstellung der extremen Punktniederschläge beigetragen haben. Hier sind einige der Auswirkungen kurz skizziert:

- Die Anwendung der «räumlichen Extremwertstatistik» in B04 sorgt dafür, dass die Analyse jederzeit von Information aus dem gesamten Stationskollektiv angetrieben wird. Diese Methodik benötigt keine vorgängige (univariate) Extremwertanalyse an den Stationen (wie in den Tafeln 2.4 und 2.4<sup>2</sup>) und leidet deshalb nicht an wenig plausiblen lokalen Maxima und Minima (bull's eyes) als Folge von Schätzunsicherheiten in diesem Schritt.
- Die Modellierung mit externer Information (Ko-Variablen) in B04 kann, im Zusammenspiel mit der saisonal stratifizierten Anwendung, mehr Varianz in den Daten erklären. Dies reduziert die Unsicherheit der Analyse und erlaubt es gleichzeitig, mehr räumliche Details abzubilden. Es ist wahrscheinlich, dass die «glatte» Erscheinung von Tafel 2.4<sup>2</sup> mit dem «conditional bias» zusammenhängt, der als Folge der nicht erklärten Varianz in den Daten entsteht. «Conditional bias», Unterschätzung von lokalen Spitzen und Überschätzung von lokalen Senken, ist eine direkte Folge von Unsicherheit in räumlichen Analysen [26, 27]. Die in Tafel 2.4<sup>2</sup> gegenüber B04 deutlich kleineren Wiederkehrwerte in Regionen mit lokal höheren Extremen (z.B. Tessin, Voralpen, Jura) sind ein starker Hinweis auf diesen Effekt.

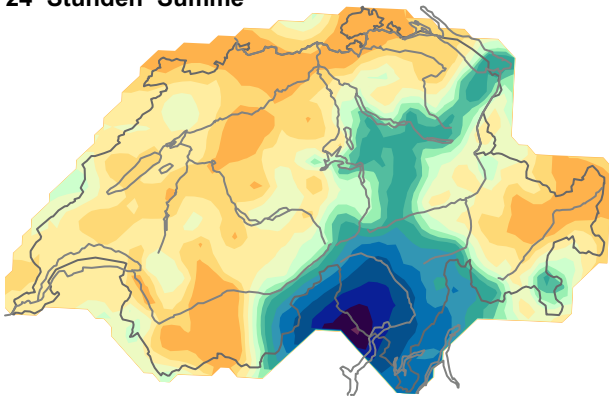
HADES-Tafel 2.4 (Geiger et al. 1992)  
24-Stunden-Summe



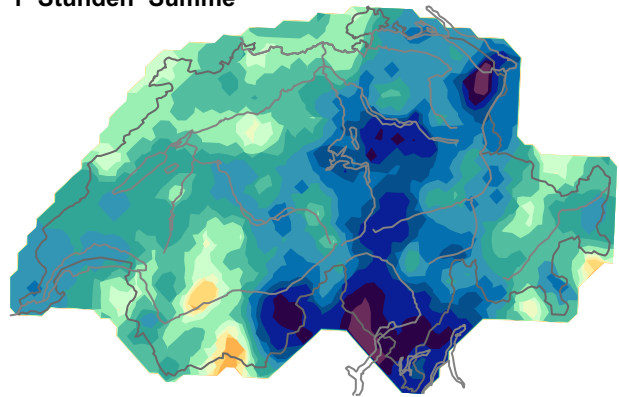
HADES-Tafel 2.4 (Geiger et al. 1992)  
1-Stunden-Summe



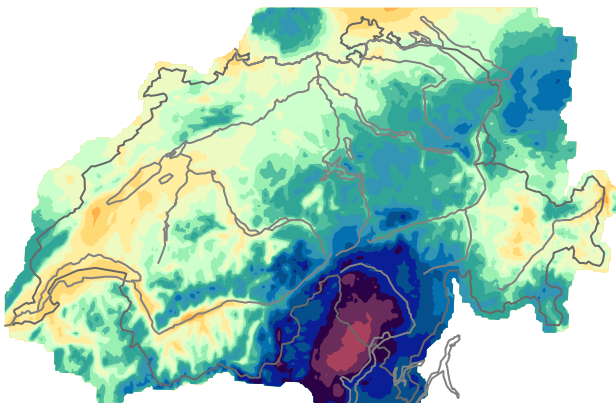
HADES-Tafel 2.4<sup>2</sup> (Jensen et al., 1997)  
24-Stunden-Summe



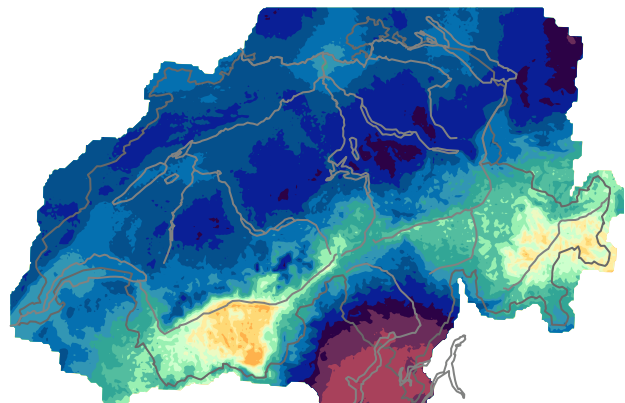
HADES-Tafel 2.4<sup>2</sup> (Jensen et al., 1997)  
1-Stunden-Summe



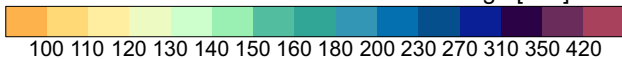
HADES B04: 24-Stunden-Summe



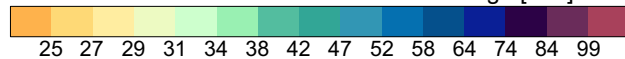
HADES B04: 60-Minuten-Summe



Wiederkehrwert der 24-Stunden-Niederschläge [mm]



Wiederkehrwert der 60-Minuten-Niederschläge [mm]



**Abbildung 4.** Vergleich der 100-jährlichen Wiederkehrwerte für den 24-Stunden-Niederschlag (links) und den 1-Stunden- bzw. 60-Minuten-Niederschlag (rechts) aus HADES-Tafeln 2.4 (oben), 2.4<sup>2</sup> (Mitte), und B04 (unten)

- Für die 1-Stunden-Analyse in den Tafeln 2.4 und 2.4<sup>2</sup> wurden an Stationen ohne sub-tägliche Beobachtungen jährliche Stunden-Maxima aus den Tagesmessungen extrapoliert. Dieses Vorgehen dürfte die grosse Ähnlichkeit in den räumlichen Mustern der beiden Dauerstufen erklären, und damit auch den deutlichen Unterschied zu B04. Die 60-Minuten-Analyse in B04 stützt sich ausschliesslich auf gemessene Daten.
- Einige Unterschiede sind auch auf die ungleiche Konvertierung von festen zu gleitenden Niederschlagssummen zurückzuführen. In den früheren Tafeln wurden die gleitenden 24-Stunden-Resultate aus multiplikativ korrigierten Jahresmaxima abgeleitet (Faktor 1.143 [12]). Die stündlichen Resultate hingegen wurden nicht angepasst. In B04 wurden diese Anpassungen (siehe Abschnitt 2.3) saisonal stratifiziert und bei den GEV-Parametern vorgenommen, spezifisch für die Verhältnisse in der Schweiz. Dieses Vorgehen ist flexibler und berücksichtigt, dass der Effekt bei verschiedenen Wiederkehrperioden unterschiedlich stark ausfällt.

Insgesamt konnten mit den Analysen zu den neuen Karten in B04 entscheidende methodische Mängel der früheren Karten eliminiert werden. Auch entsteht mit der neu verfügbaren quantitativen Information zu Unsicherheiten ein grosser Mehrwert. Für sehr seltene Ereignisse sind Unsicherheiten erheblich und diese können nun in der Praxis berücksichtigt werden.

## 6 Versionen

Tabelle 3. Versionen

Version	Beschreibung
v1.0 (2018)	Erste Analyse für kalendarische Eintagesniederschläge. Schweiz, 2-km-Raster, 1961–2015.
v2.0 (2022)	Analyse für 24-Stunden- und 60-Minuten-Niederschläge. Hydrologische Schweiz, mit Einbezug von Daten aus dem grenznahen Ausland, 1-km-Raster, 1961–2020 resp. 1981–2020. Für den 24-Stunden-Niederschlag unterscheidet sich Version v2.0 in zwei wesentlichen Elementen von v1.0: (a) Die Wiederkehrwerte beziehen sich auf gleitende (24-h-) anstatt fixe (Eintages-)Summen. Sie sind deshalb generell grösser als in v1.0. (b) In der Methodik wird die Abhängigkeit der (gemessenen) Block-Maxima mit einer Composite-Likelihood berücksichtigt. Dadurch werden die Unsicherheitsbereiche der Wiederkehrwerte realistischer und, im Vergleich zu v1.0, meist deutlich grösser.
v3.0 (2025)	Analyse für 2-, 5-, 10- und 180-Minuten, und 6-, 12-, 48- und 72-Stunden-Niederschläge hinzugefügt.

## Literatur

- [1] MeteoSchweiz (2022). *Extremwertanalyse (Version 2022)*. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz/rekorde-und-extreme/extremwertanalysen.html>. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. URL: <https://www.climate-extremes.ch>.
- [2] Fukutome, S., Schindler, A. und Capobianco, A. (2018). *MeteoSwiss extreme value analyses: User manual and documentation. Technical Report MeteoSwiss*. Third. Zürich.
- [3] Geiger, H., Röthlisberger, G., Stehli, A., Zeller, J. und Bundesamt für Umwelt BAFU (1992). Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Bd. 1. Tafel 2.4. <https://hydrologischeratlas.ch/produkte/druckausgabe/niederschlag/tafel-2-4>. Bern: Bundesamt für Landestopographie swisstopo.
- [4] Jensen, H., Lang, H., Rinderknecht, J. und Bundesamt für Umwelt BAFU (1997). Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Bd. 1. Tafel 2.4<sup>2</sup>. <https://hydrologischeratlas.ch/produkte/druckausgabe/niederschlag/tafel-2-4b>. Bern: Bundesamt für Landestopographie swisstopo.
- [5] Serinaldi, F. und Kilsby, C. (2015). Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes. In: *Advances in Water Resources* 77. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>, S. 17–36. URL: <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>.
- [6] Vuerich, E., Monesi, C., Lanza, L., Stagi, L. und Lanzinger, E. (2009). *WMO field intercomparison of rainfall intensity gauges*. Techn. Ber. [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=15525#.w88p4y2B3dQ](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=15525#.w88p4y2B3dQ). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organisation WMO.
- [7] Frei, C. und Fukutome, S. (2026). Mapping extreme return levels of 24-hour precipitation in a region of complex topography and climate. In: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. in preparation.
- [8] Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London: Springer. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- [9] Cooley, D., Nychka, D. und Naveau, P. (2007). Bayesian Spatial Modeling of Extreme Precipitation Return Levels. In: *Journal of the American Statistical Association* 102.479. <http://doi.org/10.1198/016214506000000780>, S. 821–840. URL: <http://doi.org/10.1198/016214506000000780>.
- [10] Ribatet, M., Cooley, D. und Davison, A. C. (2012). Bayesian inference from composite likelihoods, with an application to spatial extremes. In: *Statistica Sinica* 22.2. <https://doi.org/10.5705/ss.2009.248>, S. 813–845. URL: <https://doi.org/10.5705/ss.2009.248>.
- [11] Dyrddal, A. V., Lenkoski, A., Thorarinsdottir, T. L. und Stordal, F. (2014). Bayesian hierarchical modeling of extreme hourly precipitation in Norway. In: *Environmetrics*. <http://doi.org/10.1002/env.2301>, S. 1–31. URL: <https://doi.org/10.1002/env.2301>.
- [12] Weiss, L. (1964). *Ratio of true to fixed-interval maximum rainfall*. HY 1. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>. New York: Journal of the Hydraulics Division.
- [13] Hershfield, D. M. (1961). Rainfall frequency atlas of the United States for durations of 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 years. In: *Journal of Hydrology* 40. Technical Paper No. 40, S. 1–61.
- [14] Papalexiou, S., Dialynas, Y. und Grimaldi, S. (2016). Hershfield factor revisited: Correcting annual maximum precipitation. In: *Journal of Hydrology* 542. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.058>, S. 884–895. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.058>.
- [15] Gupta, V. K. und Waymire, E. (1990). Multi-scaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. In: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 95, NO. D3, S. 1999–2009. URL: <https://doi.org/10.1029/JD095iD03p01999>.
- [16] Blanchet, J., Ceresetti, D., Molinié, G. und Creutin, J.-D. (2016). A regional GEV scale-invariant framework for Intensity–Duration–Frequency analysis. In: *Journal of Hydrology* 540, S. 82–95. ISSN: 0022-1694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.007>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416303584>.
- [17] MeteoSchweiz (2006). *Starkniederschlagserignis August 2005*. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz 211. Zürich: Meteoschweiz.
- [18] Fukutome, S. und Schindler, A. (2015). *MeteoSwiss extreme value analyses: User manual and documentation*. Hrsg. von Federal Office of Meteorology and Climatology, MeteoSwiss. Technical Report MeteoSwiss 255. Zürich.
- [19] Grebner, D., Roesch, T., Schwarb, M. und Bundesamt für Umwelt BAFU (1999). Extreme Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1981–1993. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Bd. 1. Tafel 2.5. <https://hydrologischeratlas.ch/produkte/druckausgabe/niederschlag/tafel-2-5>. Bern: Bundesamt für Landestopographie swisstopo.
- [20] Haruna, A., Blanchet, J. und Favre, A.-C. (2024). Estimation of Intensity-Duration-Area-

- Frequency Relationships Based on the Full Range of Non-Zero Precipitation From Radar-Reanalysis Data. In: *Water Resources Research* 60.2. e2023WR035902 2023WR035902, e2023WR035902. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023WR035902>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2023WR035902>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2023WR035902>.
- [21] National Centre for Climate Services NCCS, Hrsg. (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. Zurich: National Centre for Climate Services NCCS. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- [22] Bauer, V. M. und Scherrer, S. C. (2024). The observed evolution of sub-daily to multi-day heavy precipitation in Switzerland. In: *Atmospheric Science Letters* 25(9), e1240. DOI: <https://doi.org/10.1002/asl.1240>.
- [23] Estermann, R., Rajczak, J., Velasquez, P., Lorenz, R. und Schär, C. (2025). Projections of heavy precipitation characteristics over the Greater Alpine Region using a kilometer-scale climate model ensemble. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 130, e2024JD040901. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024JD040901>.
- [24] Haslinger, K. et al. (2025). Increasing hourly heavy rainfall in Austria reflected in flood changes. In: *Nature* 639, S. 667–672. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08647-2>.
- [25] Scherrer, S. C., Fischer, E. M., Posselt, R., Liniger, M. A. und Knutti, R. (2016). Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. In: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 121.12. <https://doi.org/10.1038/175238c0>. URL: <https://doi.org/10.1038/175238c0>.
- [26] Olea, R. A. und Pawlowsky, V. (1996). Compensating for Estimation Smoothing in Kriging. In: *Mathematical Geology* 28.4. <https://doi.org/10.1007/BF02083653>, S. 407–417. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02083653>.
- [27] Frei, C. und Isotta, F. (2019). Ensemble spatial precipitation analysis from rain-gauge data: Methodology and application in the European Alps. In: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 124. <https://doi.org/10.1029/2018JD030004>, S. 5757–5778.