



Marlies Hierzer, BSc

## **Möglichkeiten der Risikokommunikation für das Thema Starkregen am Beispiel österreichischer Städte**

Possibilities of risk communication for heavy rainfall using the  
example of Austrian cities

### **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Muschalla

Mitbetreuende Assistenten:

Dipl.-Ing. Markus Pichler, BSc

Dipl.-Ing. Roman Maier, BSc

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, April 2021



Kontakt:  
Marlies Hierzer  
m.hierzer@outlook.de

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

### **AFFIDAVIT**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used anything other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or contextually from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

31.03.2021

Datum / Date

Hierzer Marlies

Unterschrift / Signature



## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich meinen Betreuern Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Muschalla, Dipl.-Ing. Markus Pichler BSc, Dipl.-Ing. Roman Maier BSc und D.Sc. Dipl.-Ing. Gerald Krebs für ihren persönlichen Einsatz und Engagement ein großes Dankeschön aussprechen.

Ebenso möchte ich mich bei allen Wegbegleitern und Freunden während des Studiums bedanken.

Ein großer Dank gilt ich auch meinen Eltern Johann und Brigitte Hierzer und meinem Lebensgefährten André Brunetti, die mich stets motiviert und in jeglicher Hinsicht unterstützt haben.



## Kurzfassung

Bedingt durch den Klimawandel ist eine zunehmende Tendenz hinsichtlich extremer Wetterereignisse demzufolge auch bezüglich Starkregenereignisse zu beobachten. Starkregenereignisse können pluviale Hochwasser initiieren und erhebliche Schäden verursachen. Zurzeit wird für die Klassifizierung jener Niederschlagsereignisse die statistische Wiederkehrzeit verwendet. Es stellt sich die Frage, ob eine einfachere Kommunikation mit Hilfe eines dimensionslosen Indizes, ähnlich der Richterskala bei Erdbeben für die Bevölkerung verständlicher wäre. Krüger und Pfister, Mudersbach sowie Schmitt haben für den deutschsprachigen Raum, basierend auf der Idee von Grisa, Methoden für die Starkregenindex-Generierung entwickelt.

In dieser Arbeit werden die unterschiedlichen Verfahren für die Starkregenindex-Erstellung verglichen. Für ausgewählte österreichische Städte werden Starkregenindizes erstellt und einander gegenübergestellt. Außerdem werden konkrete Niederschlagsereignisse mittels Starkregenindex analysiert. Für Graz sind zusätzliche Daten vorhanden, welche es ermöglichen, Starkregenereignisse hinsichtlich ihrer räumlichen Komponente zu beurteilen.

Es konnten diverse methodenspezifische Charakteristika herausgearbeitet werden. Hinsichtlich des Städtevergleichs konnten Einflussfaktoren ermittelt werden. Die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme, aber auch die vorhandenen Daten sind von entscheidender Bedeutung.

Bei der Einordnung der ausgewählten Starkregenereignisse kann festgestellt werden, dass mittels Starkregenindex durchaus eine gute Beurteilung der Ereignisse erfolgen kann. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass Starkregenereignisse häufig lokal stark begrenzt auftreten und von der nächstgelegenen Regenmessstation nicht dementsprechend erfasst werden. Eine korrekte Einteilung kann ohne weitere Daten schwer erfolgen.

Die Generierung eines Starkregenindex ist einfach zu bewerkstelligen. Die große Herausforderung hingegen stellt die adäquate Kommunikation dar. Hier bedarf es Strategien, wie nicht nur beteiligtes Fachpersonal, sondern auch die gesamte Bevölkerung ein Verständnis bezüglich Starkregenindizes erlangt.



## **Abstract**

Due to climate change, there is an increasing trend towards extreme weather, including heavy rainfall events. These events can initiate pluvial floods and cause considerable damage. Currently, the statistical return period is used for the classification of those precipitation events. The question is if there can be a simpler way to communicate with the population, similar to the Richter scale for earthquakes. Krüger and Pfister, Mudersbach but also Schmitt have developed methods for heavy rainfall index generation for the German-speaking countries, based on Grisa's idea.

This work aims to compare the different methods for heavy rainfall index creation. Heavy rainfall indices are generated for selected Austrian cities. These are compared with each other with regard to their heavy rainfall index and then concrete precipitation events are analysed using the heavy rainfall index. Additional data is available for Graz, which makes it possible to assess heavy rainfall events in terms of their spatial components.

Various method-specific characteristics could be worked out. With regard to the comparison of cities, influencing factors could be determined. The average annual precipitation sum but also the available data are important.

When classifying the selected heavy rainfall events, it can be stated that a good assessment of the events can be made using the heavy rainfall index. It should be noted, that heavy rain events often occur locally and are not recorded exactly by the nearest rain measuring station. Correct classification is difficult without further data.

The generation of a heavy rainfall index is easy to implement. The big challenge is communication. Here, strategies are needed to ensure that not only the technical staff involved but also the entire population understands heavy rain indices.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Aufgabenstellung und Motivation .....	1
1.2	Zielsetzung.....	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1	Definitionen Starkregen.....	3
2.2	Überflutungsgefährdung.....	5
2.3	Risikodefinition – Risikokreislauf – Risikomanagement .....	7
2.3.1	Möglichkeiten der Risikokommunikation.....	8
2.4	Verfahren für die Erstellung von Starkregenindizes .....	9
2.4.1	Starkregenstatistik.....	10
2.4.2	Verfahren nach Grisa .....	11
2.4.3	Verfahren nach Krüger und Pfister – Verfahren nach EG/LV .....	12
2.4.4	Verfahren nach Schmitt.....	13
2.4.5	Verfahren nach Mudersbach .....	17
2.5	Klimabereiche in Österreich.....	18
<b>3</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>21</b>
3.1	Methodik SRI nach Grisa, Krüger und Pfister .....	21
3.2	Methodik SRI nach Schmitt (einheitliches deutschsprachiges Konzept).....	23
3.3	Methodik SRI nach Mudersbach .....	23
3.4	Städteauswahl .....	27
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>29</b>
4.1	Vergleich der unterschiedlichen Methoden zur SRI-Erstellung	29
4.2	Städtevergleich .....	31
4.3	Auswertung spezifischer Regenereignisse .....	33
4.3.1	Regenereignis in Graz am 6.5.2013 .....	34
4.3.2	Regenereignis in Liezen am 2.6.2013 .....	35
4.3.3	Regenereignis in Bregenz am 27.7.2010 .....	35
4.3.4	Regenereignis in Wien am 24.5.2014.....	36

4.4 Starkregenindex für Graz .....	38
<b>5 Schlussfolgerungen, Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>47</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>49</b>
<b>Anhang A e-HYD Regenserien .....</b>	<b>i</b>
<b>Anhang B SRI-Kurven .....</b>	<b>i</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Regenhöhenschwellenwerte nach Wussow und Schimpf .....	5
Abbildung 2-2 Zyklus des kommunalen Risikomanagements Überflutungsschutz (DWA-M 119, 2016).....	7
Abbildung 2-3 Idealisierte Zusammensetzung eines "Runden Tisches" zur Bewältigung der "Gemeinschaftsaufgabe Überflutungsschutz" (Illgen, 2015).....	9
Abbildung 2-4 Klimabereiche in Österreich, (Fridrich et al., 2016), mod. ....	20
Abbildung 3-1 SRI - Kurven nach Krüger und Pfister .....	23
Abbildung 4-1 SR I ③, Wien .....	30
Abbildung 4-2 SRI ⑦, Bregenz.....	30
Abbildung 4-3 SRI ⑪, Sillian .....	31
Abbildung 4-4 SRI ⑨ nach Krüger Pfister .....	31
Abbildung 4-5 eHYD-Regenserie Liezen.....	33
Abbildung 4-6 Überflutung, Wien (Nihad, 2014).....	37
Abbildung 4-7 SRI 7, Methode Krüger und Pfister.....	38
Abbildung 4-8 Regenmessstationen in Graz .....	40
Abbildung 4-9 Wassereintritt im Einkaufszentrum „Citypark“ (Kloiber, 2018).....	43
Abbildung 4-10 Der Mühlgang trat in der Herrgottwiesgasse über die Ufer, Autos und Bim mussten im Wasser fahren Foto © Facebook/Aktuelle Wetterwarnungen für Österreich (Kloiber, 2018).....	44
Abbildung 4-11 Niederschlagshöhen in mm, a) bezogen auf die vorhandenen Niederschlagsmessstationen, b) inklusive zusätzlicher Regenmessungen (tägliche Niederschlagssumme), FDO sind die protokollierten Feuerwehreinsätze (Maier et al., 2020).....	44
Abbildung 4-12 SRI-Kurven mit den Regenmessstationen und der zusätzlichen Messung .....	45
Abbildung 5-1 Bregenz .....	i
Abbildung 5-2 Graz .....	ii
Abbildung 5-3 Hollabrunn .....	ii
Abbildung 5-4 Klagenfurt.....	iii
Abbildung 5-5 Liezen.....	iii
Abbildung 5-6 Linz.....	iv
Abbildung 5-7 Sillian.....	iv
Abbildung 5-8 Wien .....	v
Abbildung 5-9 SRI-Kurven, Bregenz .....	i
Abbildung 5-10 SRI-Kurven, Graz Andritz .....	ii
Abbildung 5-11 SRI-Kurven, Hollabrunn .....	iii

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 5-12	SRI-Kurven, Klagenfurt .....	iv
Abbildung 5-13	SRI-Kurven, Liezen .....	v
Abbildung 5-14	SRI-Kurven, Linz-Urfahr .....	vi
Abbildung 5-15	SRI-Kurven, Sillian .....	vii
Abbildung 5-16	SRI-Kurven, Wien.....	viii

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Warnkriterien Starkregen (DWD, 2020).....	5
Tabelle 2-2	Als Anforderungskriterien empfohlene Überflutungshäufigkeiten nach DIN EN 752:2008 und Überstauhäufigkeiten für „Neuplanung,/Sanierung“ und „bestehende Systeme“ nach Arbeitsblatt DWA-A 118:2006 und ATV-DVWK (2004) (DWA-M 119, 2016) .....	6
Tabelle 2-3	Risikoansätze zur Berechnung des Risikos (Leitner et al., 2019).....	7
Tabelle 2-4	SRI (G-factor) für Milwaukee, Wisconsin, USA (Grisa, 2013), mod. ....	12
Tabelle 2-5	Rain Storm Severity Index (Grisa, 2013).....	12
Tabelle 2-6	Vorschlag zur Bewertung der Extremität eines Starkregens mithilfe des SRI-Verfahrens nach der EG/LV-Methodik, mod.....	13
Tabelle 2-7	Niederschlagshöhen $h_N$ [mm] für Starkregen unterschiedlicher Dauerstufen D und Wiederkehrintervalle $T_n$ (DWD, 2005).....	14
Tabelle 2-8	Vorschlag zur Zuordnung SRI - Wiederkehrintervall $T_n$ , mod. ....	14
Tabelle 2-9	Vorschlag zur Zuordnung SRI und Wiederkehrzeit $T_n$ mit ortsunabhängigen Wertebereichen von Starkregenhöhen für unterschiedliche Dauerstufen nach DWA (2016) und Schmitt (2015) (Mudersbach et al., 2017) .....	15
Tabelle 2-10	Faktoren zur Ermittlung ortsbezogener Wertebereiche der Starkregenhöhen für SRI 8 bis 12 (Beispiel: Rasterfeld S16-Z75, KOSTRA-DWD-2000) (Schmitt, 2016).....	15
Tabelle 2-11	Konventionen des einheitlichen Konzepts für die SRI-Erstellung (Schmitt et al., 2018, mod.) .....	16
Tabelle 2-12	Farbspektrum zur Illustration des SRI ① bis ⑫ (Schmitt et al., 2018, mod.) .....	17
Tabelle 2-13	SRI nach Mudersbach (Mudersbach, 2016).....	18
Tabelle 3-1	SRI-Matrix nach Krüger und Pfister.....	22
Tabelle 3-2	SRI nach Schmitt.....	23
Tabelle 3-3	SRI-Matrix nach Mudersbach, Graz Andritz .....	24
Tabelle 3-4	Wiederkehrzeiten in Abhängigkeit der Dauerstufe und des SRI .....	25
Tabelle 3-5	SRI-Kurven-Werte nach Mudersbach, Graz Andritz.....	26
Tabelle 3-6	SRI-Kurven-Werte nach Mudersbach mit weitergeführten Werten Graz Andritz.....	27
Tabelle 3-7	Städte mit Vergleichskriterien.....	28

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 4-1	Dauerstufenbereiche (DWA-A 531, 2012), mod. ....	29
Tabelle 4-2	Ereignisauswertung 6.5.2013, Graz.....	34
Tabelle 4-3	Ereignisauswertung 2.6.2013, Liezen.....	35
Tabelle 4-4	Ereignisauswertung 27.7.2010, Begrenz.....	36
Tabelle 4-5	Ereignisauswertung 24.5.2014, Wien.....	37
Tabelle 4-6	SRI-Matrix, Graz Andritz.....	39
Tabelle 4-7	SRI-Matrix, Graz Annabach.....	39
Tabelle 4-8	Regenhöhen des Ereignisses am 16.04.2018.....	41
Tabelle 4-9	Regenhöhen des Ereignisses am 16.04.2018.....	41
Tabelle 4-10	SRI mit Starkregenstatistik Andritz.....	42
Tabelle 4-11	SRI mit Starkregenstatistik Annabach.....	43

## Abkürzungsverzeichnis

HWRM-RL	Hochwassermanagement - Richtlinie
DWA	Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
SRI	Starkregenindex
WMO	World Meteorological Organization



# 1 Einleitung

Berichten des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) zufolge ist es seit Mitte des 20. Jahrhunderts aufgrund der Erderwärmung zu Veränderungen von Temperaturextremen und Hitzewelle gekommen. Die Datenlage für die Beurteilung weiterer klimatischer Extremereignisse ist eingeschränkter, dennoch kann in den letzten Jahrzehnten auch ein Ansteigen an Niederschlagsextremereignissen und auch deren Intensität bei umfangreicher Datenlage festgestellt werden. Des Weiteren sei festgehalten, dass es hier stark regionale und jahreszeitenabhängige Unterschiede gibt. (Stocker et al., 2017)

Niederschlagsextremereignisse in Form von Starkregen kann im urbanen Raum zu pluvialen Hochwasser führen, mit welche ein erhebliches Schadenspotenzial einhergeht. (DWA-M 119, 2016)

Mögliche Konsequenzen von Starkregenereignissen sind:

- Überflutungen
- Erdbeben
- Infrastrukturschäden

Darauf aufbauend kann eine Gefahr für die körperliche Unversehrtheit von Menschen und Tieren, sowie landwirtschaftliche und wirtschaftliche Schäden auftreten. (WMO, 2018)

Bei einem Auftreten von Starkregenereignissen wird derzeit häufig die statistische Wiederkehrperiode des Regenereignisses kommuniziert. Es darf jedoch bezweifelt werden, ob dies von der Bevölkerung richtig interpretiert wird. Bei einem Auftreten eines Starkregenereignisses mit einer statistischen Wiederkehrperiode von 100 Jahren besteht die Möglichkeit der Falschinterpretation hinsichtlich dessen, dass davon ausgegangen wird, dass in den kommenden 100 Jahren ein solches Ereignis nicht mehr auftreten wird. Vielmehr wäre eine Charakterisierung der Regenereignisse hinsichtlich der Schwere mittels dimensionslosen Index - einem sogenannten Starkregenindex (SRI) sinnvoller. (Grisa, 2013)

## 1.1 Aufgabenstellung und Motivation

In den letzten Jahren wird in der medialen Berichterstattung vermehrt von Starkregenereignissen berichtet. Die Problematik ist jedoch, inwieweit dies den realen Tatsachen entspricht. Dementsprechend soll in der folgenden Arbeit zunächst die Fragestellung, ab wann ein Regenereignis als Starkregenereignis klassifiziert werden kann, geklärt werden. Folgend werden Grundlagen der Überflutungsgefährdung und des Risikobegriffs geklärt.

Die Idee, Starkregenereignisse mittels SRI zu klassifizieren, soll aufgegriffen werden und mögliche Verfahren zur SRI-Erstellung beschrieben und umgesetzt werden.

### **1.2 Zielsetzung**

Ziel dieser Arbeit ist die Anwendung der verschiedenen Möglichkeiten der SRI-Erstellung auf ausgewählte österreichische Städte. In weiterer Folge sollen die betrachteten Methoden zur Generierung der Starkregenindizes miteinander verglichen und Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede herausgearbeitet werden. Anschließend erfolgt ein SRI-Vergleich bezüglich der betrachteten Städte. Des Weiteren werden konkrete Regenereignisse hinsichtlich deren Starkregenindizes ausgewertet. Für die Stadt Graz werden zwei Langzeitserien einmal in der Randzone von Graz und eine zentral gelegen aufbereitet und analysiert.

## 2 Grundlagen

Weltweit treten auch bedingt durch unterschiedliche Klimazonen viele verschiedene Niederschlagsmuster auf, weshalb die Festlegung auf genau eine überall gültige Definition bezüglich Starkregen nicht zielführend wäre. (WMO, 2018)

Im Folgenden soll ein Überblick über gängige Möglichkeiten der Starkregendefinition diverser Quellen gegeben werden.

### 2.1 Definitionen Starkregen

Die World Meteorological Organization (WMO) beschreibt zwei Möglichkeiten extreme Regenereignisse zu kategorisieren. Zum einen aufgrund bestimmter Schwellenwerte und zum anderen hinsichtlich der Seltenheit des Auftretens (Überschreitung eines festgelegten Perzentilwertes oder hinsichtlich der Wiederkehrperiode). (WMO, 2018)

Im DWA-Regelwerk „Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen“ (DWA-M 119, 2016) wird Starkregen als Niederschlagsereignisse mit einem Wiederkehrintervall  $T_n \geq 1a$  der einzelnen Dauerstufen definiert. Zudem erfolgt eine weitere Konkretisierung hinsichtlich seltener und außergewöhnlicher Starkregen. Bei seltenen Starkregenereignissen werden maßgebliche Überflutungswiederkehrzeiten nicht überschritten, jedoch die Wiederkehrzeiten bezüglich Überstauereignisse schon. Außergewöhnliche Starkregenereignisse haben Wiederkehrzeiten, die größer als die maßgebenden Überflutungswiederkehrzeiten sind. Unter Überstau versteht man den Belastungszustand der Kanalisation bei welchem es zu einem Übertreten des Wasserstandes über die Geländeoberkante kommt. Anders als bei Überflutungsergebnisse entsteht laut Definition bei einem Überstauereignis kein Schaden.

Folgend werden zwei Möglichkeiten zur Starkregenschwellenwertermittlung vorgestellt. Einerseits die Methode nach Wussow und andererseits die Methode nach Schimpf.

1922 entstand die Formel nach Wussow (siehe Gleichung 2-1), die ihre Anwendung bei einer Niederschlagsdauer unter 30 Minuten findet. (Wussow, 1922 in Kahlig, 1993)

$$h_N = \sqrt{5 * D - \left(\frac{D}{24}\right)^2}$$

Gleichung 2-1

mit:

$h_N$  ... Niederschlagshöhe in mm,  $D$  ... Dauerstufe < 30 min

Ab einer Dauerstufe größer als 30 Minuten wird die Methode nach Schimpf zur Schwellenwertbestimmung herangezogen. (Jochen Stemplewski, 2015)

Hierbei wurden in Österreich über einen Zeitraum von 20 Jahren an 713 Niederschlagsmessstationen Aufzeichnungen durchgeführt und ausgewertet. Die hohe Messstationsanzahl hatte eine starke Variation der Tagesniederschlagssummen mit statistischen Wiederkehrzeiten von  $T_n = 0,5$  a und  $T_n = 1$  a zur Folge. Dies machte eine Kategorisierung mithilfe von 4 Kriterien (K25, K30, K45 und K55) zur Schwellenwertermittlung pro Dauerstufe notwendig. Sind zum Beispiel bei einer Messstation die Jahreshöchstwerte der Tagesniederschlagssummen zu 90 % zwischen 20 bis 30 mm, wird das Kriterium K25 herangezogen. Mit Hilfe der Gleichung 2-2 bis Gleichung 2-5 kann eine Umrechnung der Niederschlagshöhen in die jeweilige Dauerstufe erfolgen. (Schimpf, 1970 in Gao et al., 2000)

$$K25: h_N = 6,49 * D^{0,1855} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

$$K35: h_N = 4,85 * D^{0,2715} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

$$K45: h_N = 3,89 * D^{0,3365} \quad \text{Gleichung 2-4}$$

$$K55: h_N = 3,25 * D^{0,3891} \quad \text{Gleichung 2-5}$$

mit:

*K25, K30, K45, K55 ... Kategorisierung bez. Tagesniederschlagssummen,  $h_N$  ... Niederschlagshöhe in mm,  $D$  ... Dauerstufe in min*

Eine Kombination der beiden Schwellenwertmethoden ist aus praktischer Sicht sinnvoll, da die Formel nach Schimpf ab einer Dauerstufe größer 30 Minuten und die Wussow Formel hingegen bei kleiner 30 Minuten verwendet wird. In Abhängigkeit der Dauerstufen wird nun entweder die Methode nach Wussow oder jene nach Schimpf angewendet. (Jochen Stemplewski, 2015)

In Abbildung 2-1 sind die Schwellenwerte der Regenhöhen in Abhängigkeit der Dauerstufe nach Wussow und Schimpf grafisch dargestellt.

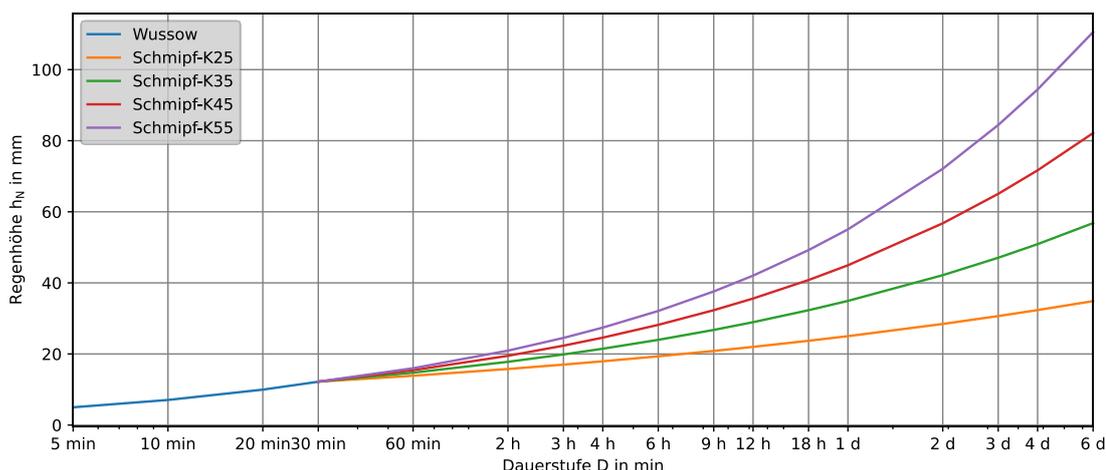


Abbildung 2-1 Regenhöhenschwellenwerte nach Wussow und Schimpf

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert Starkregen bezogen auf die gefallene Niederschlagsmenge in einer bestimmten Zeiteinheit. In Tabelle 2-1 sind die Starkregenschwellenwerte mit der jeweiligen Warnstufe angeführt. Bei entsprechender Wetterprognose wird die Bevölkerung demzufolge gewarnt. (DWD, 2020)

Tabelle 2-1 Warnkriterien Starkregen (DWD, 2020)

Warnereignis	Schwellenwert	Warnstufe
Starkregen	15 bis 25 l/m <sup>2</sup> in 1 Stunde 20 bis 35 l/m <sup>2</sup> in 6 Stunden	2
Heftiger Starkregen	25-40 l/m <sup>2</sup> in 1 Stunde 35-60 l/m <sup>2</sup> in 6 Stunden	3
Extrem heftiger Starkregen	> 40 l/m <sup>2</sup> in 1 Stunde > 60 l/m <sup>2</sup> in 6 Stunden	4

In den vergangenen Jahren ist es vermehrt zum Auftreten von Starkregen gekommen, die schwere Sachschäden aufgrund von Überflutungen zur Folge hatten. Da infolge des Klimawandels erwartet wird, dass derartige Starkregenereignisse häufiger auftreten, ist auf die Überflutungsproblematik und -vorsorge ein besonderes Augenmerk zu richten. (DWA-M 119, 2016)

In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick basierend auf dem Regelblatt DWA-M119 bezüglich der Thematik Überflutungsgefährdung, Risikoermittlung und -kommunikation gegeben.

## 2.2 Überflutungsgefährdung

Starkregenereignisse im urbanen Raum können pluviale Hochwasser initiieren und Überflutungen mit enormen Sachschäden zur Folge haben. Die Mitgliedstaa-

ten der Europäischen Union sind angehalten, im Rahmen der Hochwassermanagement – Richtlinie (HWRM-RL, 2007), erheblich gefährdete Bereiche zu identifizieren und hinsichtlich des Risikos einer Überflutung zu bewerten und Maßnahmen dahingehend zu entwickeln. Das Hauptaugenmerk ist hier auf die Topografie, die vorhandene kritische Infrastruktur sowie generelle bauliche Situationen gerichtet. Es gibt diverse Gründe, die zu Überflutungen aufgrund von Starkregenereignissen führen können, diese werden folgend kurz aufgezählt. (DWA-M 119, 2016)

Überflutungsgründe:

- Entwässerungssysteme können hydraulisch überlastet sein
- Zufluss von Außengebieten
- Kleine Gewässer und Flutmulden können über die Ufer treten
- Reaktivierung schlafender Gewässer bei einem Starkregenereignis

Das Bewertungskriterium für die hydraulische Leistungsfähigkeit von kommunalen Entwässerungssystemen ist der erforderliche Überflutungsschutz. In Tabelle 2-2 sind in Abhängigkeit des Gebietes empfohlene Häufigkeiten bezüglich der Überstauhfreiheit und des Überflutungsschutzes definiert. Beispielsweise soll eine Überflutung im Stadtzentrum im Schnitt nur einmal in 30 Jahren vorkommen (DIN EN 752, DWA-A 118)

Tabelle 2-2 Als Anforderungskriterien empfohlene Überflutungshäufigkeiten nach DIN EN 752:2008 und Überstauhäufigkeiten für „Neuplanung,/Sanierung“ und „bestehende Systeme“ nach Arbeitsblatt DWA-A 118:2006 und ATV-DVWK (2004) (DWA-M 119, 2016)

Örtlichkeit/Flächennutzung	Überflutungshäufigkeiten <sup>1)</sup>	Überstauhäufigkeiten	
	Entwurf/Neuplanung	Entwurf/Neuplanung	Bestehende Systeme <sup>2)</sup>
	1-mal in „n“ Jahren		
Ländliche Gebiete	1 in 10	1 in 2	–
Wohngebiete	1 in 20	1 in 3	1 in 2
Stadtzentren, Industrie- und Gewerbegebiete	1 in 30	seltener als 1 in 5	1 in 3
Unterirdische Verkehrsanlagen, Unterführungen	1 in 50	seltener als 1 in 10 *)	1 in 5

ANMERKUNGEN  
 1) Empfohlene Werte für den Entwurf/Neuplanung nach DIN EN 752:2008.  
 2) Werte als „Mindestleistungsfähigkeit“ bestehender Systeme nach ATV-DVWK (2004).  
 \*) Bei Unterführungen ist zu beachten, dass bei Überstau über Gelände in der Regel unmittelbar eine Überflutung miteinhergeht, sofern nicht besondere örtliche Sicherungsmaßnahmen bestehen.

### 2.3 Risikodefinition – Risikokreislauf – Risikomanagement

Unter Risiko wird die Kombination aus Gefährdung und Schadenspotenzial verstanden. Tabelle 2-3 stellt die gebräuchlichen Ansätze zur Risikoermittlung gegenüber. Der modifizierte Ansatz resultiert aus der Tatsache, dass das Risiko beim Additionsansatz leichter unterschätzt und beim Multiplikationsansatz eher überschätzt wird. (Leitner et al., 2019)

Tabelle 2-3 Risikoansätze zur Berechnung des Risikos (Leitner et al., 2019)

Additionsansatz	Multiplikationsansatz	modifizierter Additionsansatz
$R = G + S$	$R = G * S$	$R = (G * aG + S * aS) \text{ sign}(G)$

R = Risiko  
 G = Gefährdung  
 S = Schadenspotential  
 aG = Skalierungsfaktor Gefährdung  
 aS = Skalierungsfaktor Schadenspotential  
 sign() = Signum Funktion

Eine ortsbezogene Risikobewertung ist aufgrund unterschiedlich auftretender Überflutungsgefährdungen in einem Siedlungsgebiet durchzuführen. (DWA-M 119, 2016)

In der HWRM-RL (2007) sind bereits methodische Vorgehensweisen im Zusammenhang mit dem kommunalen Risikomanagement aufgeführt. In Abbildung 2-2 ist der Risikokreislauf laut HWRM-RL dargestellt. Sowohl die Überflutungsgefährdungsanalyse als auch die Analyse hinsichtlich des möglichen Schadenpotenzials fließen in die Risikobewertung ein. Im DWA-Merkblatt „Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen“ (DWA-M 119, 2016) wird auf die Einzelbereiche Gefährdungsanalyse, Schadenspotenzialkarte, sowie die Erstellung von Risikokarten eingegangen.



Abbildung 2-2 Zyklus des kommunalen Risikomanagements Überflutungsschutz (DWA-M 119, 2016)

### 2.3.1 Möglichkeiten der Risikokommunikation

Die Risikokommunikation soll über mögliche Überflutungsgefährdungen aufklären sowie das Risikobewusstsein schulen, eine Informationsweitergabe schaffen und zur Eigenverantwortung anregen, da technisch wirksame Maßnahmen nur im begrenzten Maße umsetzbar sind. Zu den Zielgruppen gehören:

- Kommunalpolitische Entscheidungs- und Funktionsträger
- Kommunale Fachplanungsstellen, Ämter und Betriebe
- Betroffene (regionale) Planungsverbände, Straßenbulasträger, Verkehrsbetriebe etc.
- Grundstückseigentümer, Kanalanschlussnehmer
- Bevölkerung (DWA-M 119, 2016)

Bei der Risikokommunikation geht es darum, die Thematik Starkregen verständlich zu beschreiben und dann auch zu kommunizieren. Dafür wurden verschiedene Verfahren für die Kategorisierung von Starkregenereignissen entwickelt, auf die in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen wird.

Die vorgeschlagenen Kommunikationsmöglichkeiten für die Übermittlung der Gefährdung bezüglich Starkregen sind nach (DWA-T1, 2013):

- Gefahren- und Risikokarten
- Flyer und Broschüren
- Infobriefe
- Informationsveranstaltungen
- Infomobile
- Checklisten („Hochwasserpass“)
- Überflutungsvisualisierungen
- Presse- und Rundfunkmitteilungen
- Soziale Medien
- Unwetter-Warndienste

Aufgetretene Überflutungen müssen mittels örtlicher Aufzeichnungen aufgearbeitet werden. Hierbei werden sowohl die stattgefundenen Prozesse, aber auch vorhandene Maßnahmen evaluiert, um für zukünftige Überflutungsereignisse eine Optimierungsbasis zu schaffen. Ein mögliches Kommunikationsinstrument könnte ein „Runder Tisch kommunales Risikomanagement“ wie in Abbildung 2-3 ersichtlich, sein. (DWA-M 119, 2016)

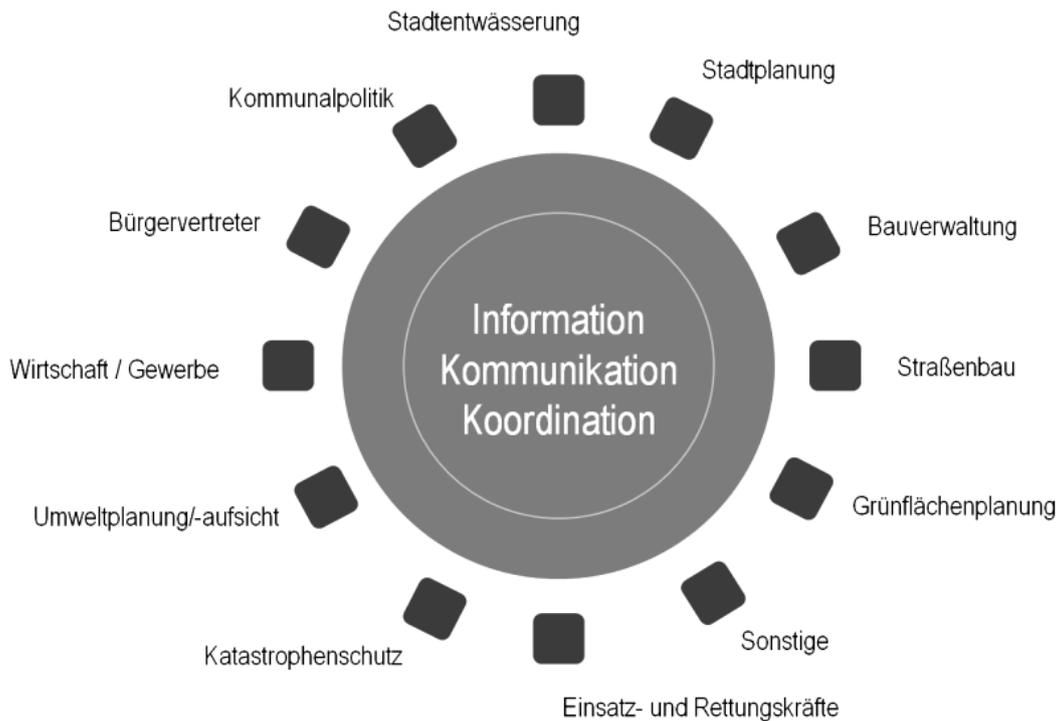


Abbildung 2-3 Idealisierte Zusammensetzung eines "Runden Tisches" zur Bewältigung der "Gemeinschaftsaufgabe Überflutungsschutz" (Illgen, 2015)

Die Risikokommunikation im Zusammenhang mit Starkregen nimmt, wie zuvor schon erwähnt, eine zentrale Bedeutung ein. Für die Kommunikation nach einem Starkregenereignis muss rückblickend das aufgetretene Ereignis eingeordnet und adäquat mit der Bevölkerung kommuniziert werden.

## 2.4 Verfahren für die Erstellung von Starkregenindizes

Im Gegensatz zu anderen Naturkatastrophen gibt es für Kategorisierung von Starkregen keine einheitliche, für die Öffentlichkeit einfach zu verstehende Skala. Eine Kommunikation mittels Wiederkehrzeiten könnte in der Bevölkerung den Anschein erwecken, dass wenn ein Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von  $T_n = 100$  a aufgetreten ist, für eine sehr lange Zeit nicht mehr auftreten wird. Sinnvoller wäre, ähnlich der Richterskala bei Erdbeben eine Starkregenkategorisierung hinsichtlich der Schwere des Ereignisses. (Grisa, 2013)

Als Basis aller folgend beschriebener Möglichkeiten für die Erstellung von Starkregenindizes wird eine Starkregenstatistik für die jeweilige Stadt benötigt. Demzufolge wird im nächsten Abschnitt kurz die Grundlagen zur Erstellung von Starkregenstatistiken besprochen.

### 2.4.1 Starkregenstatistik

Für die systematische Analyse von Starkregen wird das DWA-Arbeitsblatt „Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer“ (DWA-A 531, 2012) verwendet. Hier wird unter Anwendung wahrscheinlichkeitsstatistischer Verfahren Starkregen eindeutig durch die Regenhöhe in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit und der Dauerstufe berechnet.

Die Datengrundlage basiert auf langjährigen Niederschlagsmessungen, die möglichst ohne Lücken vorliegen sollen, wobei je größer der Beobachtungszeitraum ist, desto geringer ist auch die Fehleranfälligkeit.

Die benötigten Regenhöhengrunddaten sind sogenannte zeitäquidistante Werte, das heißt, der Aufzeichnungsintervall jener Daten stimmt überein. Je Dauerstufe werden die Regenhöhen separat ermittelt. Die generierten Regenhöhenserien müssen in weitere Folge reduziert werden, und zwar entweder auf partielle oder jährliche Serien oder auf beides. Eine jährliche Serie beschreibt immer den Niederschlagshöhenhöchstwert und ist immer genau ein Wert pro Jahr. Werden jedoch alle Werte, die über einen definierten Schwellenwert liegen, berücksichtigt unabhängig, wie oft dieser in einem Jahr übertroffen wird, handelt es sich um eine partielle Serie. Die Vorgehensweise bei der statistischen Auswertung bei partiellen und jährlichen Serien ist nicht ident. So wird bei jährlichen Serien die Gumbel-Verteilung (Extremal-I-Verteilung) und bei partiellen Regenserien die Exponentialverteilung angewendet.

Die statistische Auswertung erfolgt in zwei Stufen (Draschoff, 1972). Zuerst werden die Starkregenhöhen  $h_N(D, T_N)$  mittels eindimensionaler Häufigkeitsanalyse separat für jede Dauerstufe ermittelt. Im Anschluss erfolgt ein Starkregenhöhenausgleich der Dauerstufen durch Regression (Fuchs, 1983) um der Niederschlagshöhenzunahme bei identer Wiederkehrperiode Rechnung zu tragen. Für die Regression gibt es verschiedene Ansätze. Das Arbeitsblatt empfiehlt im Dauerstufenbereich unter 60 Minuten für den Parameter  $u$  den hyperbolische Ansatz und für den Parameter  $w$  den doppelt-logarithmische Ansatz. Im Dauerstufenabschnitt zwischen 60 Minuten und 12 Stunden wird für beide Parameter der doppelt-logarithmische Ansatz verwendet. Ab einer Dauerstufe von 12 Stunden werden die Parameter linear interpoliert.

Die für die statistische Analyse notwendigen Regendaten werden aus dem Online-Portal „eHYD“ (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT), 2021) mittels `ehyd_tool` (*ehyd-tools (0.1.dev10)*, 2021) eingelesen, analysiert und die Daten für die Starkregenniederschlagsauswertung aufbereitet. Mit dem Skript für die „Intensity Duration Frequency Analyse“ (*idf-analysis (0.1.11.post21)*, 2021) erfolgt die statistische Auswertung auf Basis des DWA-Arbeitsblattes „Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer“

Folgend werden die einzelnen Möglichkeiten der Erstellung eines Starkregennetzes diskutiert.

#### 2.4.2 Verfahren nach Grisa

Grisa entwickelte ein System basierend auf der Nutzung vorhandener hydrologischer Daten. Zunächst stellte er einen Zusammenhang zwischen Wiederkehrintervallen und Starkregenarten her, siehe Gleichung 2-6. (Grisa, 2013)

$$G = \frac{1 + \text{Log}(T_n)}{\text{Log}(2)} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

mit:

$G$  ... G-Faktor (SRI),  $T_n$  ... Wiederkehrzeit in a

Da bei diesem Ansatz der Aspekt, dass bei unterschiedlichen Regenereignissen verschiedene Dauerstufen und Intensitäten auftreten können, außer Acht gelassen wurde, sind in Folge Anpassungsfaktoren inkludiert worden. Gleichung 2-7 zeigt den Anpassungsfaktor hinsichtlich der Dauerstufen. Hierbei wird ein Verhältnis zwischen dem Gesamtniederschlag eines Regenereignisses mit gegebener Dauerstufe und einem Gesamtniederschlag mit einer Dauerstufe von 24 Stunden hergestellt. (Grisa, 2013)

$$DAF = \frac{h_N(T_n, D)}{h_N(T_n, D = 1d)} \quad \text{Gleichung 2-7}$$

mit:

$DAF$  ... Dauerstufenanpassungsfaktor (Duration Adjustment Factor),  $h_N$  ... Niederschlagshöhe in mm,  $T_n$  ... Wiederkehrzeit in a,  $D$  ... Dauerstufe in min

Eine Adaption hinsichtlich der unterschiedlichen Regenintensitäten erfolgt mittels Gleichung 2-8. Der Gesamtniederschlag mit einer gegebenen Dauerstufe wird auf den Gesamtniederschlag eines 100-jährigen Ereignisses derselben Dauerstufe bezogen. (Grisa, 2013)

$$IAF = \frac{h_N(T_n, D)}{h_N(T_{100 a}, D)} \quad \text{Gleichung 2-8}$$

mit:

$IAF$  ... Regenintensitätsanpassungsfaktor (Intensity Adjustment Factor),  $h_N$  ... Niederschlagshöhe in mm,  $T_n$  ... Wiederkehrzeit in a,  $D$  ... Dauerstufe in min

Die Gleichung 2-9 stellt somit die endgültige Formel zur Berechnung des G-Faktors (SRI) dar. (Grisa, 2013)

$$G = \frac{1 + \text{Log}(T_n)}{\text{Log}(2)} * \text{DAF} * \text{IAF} \quad \text{Gleichung 2-9}$$

mit:

*G ... G-Faktor (SRI), T<sub>n</sub> ... Wiederkehrzeit in a, DAF ... Dauerstufenanpassungsfaktor (Duration Adjustment Factor), IAF ... Regenintensitätsanpassungsfaktor (Intensity Adjustment Factor)*

Mithilfe dieses mathematischen Zusammenhangs ist eine Kategorisierung von Starkregenereignissen möglich (siehe Tabelle 2-4). Betrachtet werden die Wiederkehrzeiten von 2, 5, 10, 25, 50 und 100 Jahren. Mit der Begründung, dass eine Klassifizierung von Starkregen für die Bevölkerung mit Dauerstufen von bis zu einem Tag am verständlichsten ist, erfolgt eine Dauerstufenbegrenzung auf 1, 2, 3, 6, 12, 24 Stunden. (Grisa, 2013)

Tabelle 2-4 SRI (G-factor) für Milwaukee, Wisconsin, USA (Grisa, 2013), mod.

Storm Duration	Recurrence Intervall					
	2 year	5 year	10 year	25 year	50 year	100 year
1 hour	0	1	1	2	3	4
2 hour	1	1	2	3	4	5
3 hour	1	1	2	3	4	5
6 hour	1	1	2	3	4	6
12 hour	1	2	2	4	5	7
24 hour	1	2	3	4	6	8

Für eine verständliche Kommunikation mit der Bevölkerung wurde eine wörtliche Beschreibung des Regenereignisses mit den G-Faktoren verknüpft, wie in Tabelle 2-5 dargestellt. (Grisa, 2013)

Tabelle 2-5 Rain Storm Severity Index (Grisa, 2013)

G-Factor rating	Description of Rain Event
1 to 2	Minor
3 to 4	Moderate
5 to 6	Major
7 to 8	Extreme
9 to 10	Catastrophic

### 2.4.3 Verfahren nach Krüger und Pfister – Verfahren nach EG/LV

Krüger und Pfister entwickelten eine stützend auf dem Grisa Verfahren abgewandelte Vorgehensweise für die Emscher-Lippe-Region (ELR), weshalb diese Methodik auch Verfahren nach EG/LV genannt wird. Das Messnetz und auch der Aufzeichnungszeitraum in diesem Gebiet zur Gewinnung hydrologischer Daten ist beachtlich. In dieser Region wird aufgrund des Hochwassermanage-

ment seit 1931 statistische Daten erhoben. Die Analyse der langjährigen Reihen mit Wiederkehrzeiten ab einem Jahr und Dauerstufen von fünf Minuten bis sechs Stunden erfolgt nach DWA-A 531. Mit den ermittelten statistischen Daten werden nach Gleichung 2-10 die Starkregenindizes berechnet. (Krüger & Pfister, 2016)

$$I = \left( \frac{1 + \log(T_n)}{\log(2)} \right) * \left( \frac{h_N(T_n, D)}{h_N(T_n, D = 1d)} \right) * \left( \frac{h_N(T_n, D)}{h_N(T_{100a}, D)} \right) \quad \text{Gleichung 2-10}$$

mit:

$I$  ... SRI,  $T_n$  ... Wiederkehrzeit in a,  $h_N$  ... Niederschlagshöhe in mm,  $D$  ... Dauerstufe in min

Des Weiteren wird die von Grisa entwickelte Formel nach Starkregenhöhen umgeformt (siehe Gleichung 2-11). Dies ermöglicht es, sogenannte SRI-Kurven je nach Dauerstufe und Niederschlagshöhe zu generieren. Die notwendigen Niederschlagshöhen für die SRI-Kurven können durch vorgegebenen SRI und Wiederkehrzeit bezüglich der Dauerstufe ermittelt werden. Es wird darauf hingewiesen, dass diese nur als Ergänzung zur herkömmlichen statistischen Analyse fungiert und bei Wiederkehrzeiten  $T_n \geq 100$  zur Anwendung kommt. Berechnet man die Niederschlagshöhen ausgehend von einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren bei vorgegebenem SRI, erhält man die maximale Niederschlagshöhe, welche beim jeweiligen SRI auftreten kann. (Krüger & Pfister, 2016)

$$h_N(T_n, D) = \sqrt{\frac{I * h_N(T_n, D = 1d) * h_N(T_{100a}, D)}{\left(1 + \frac{\log(T_n)}{\log(2)}\right)}} \quad \text{Gleichung 2-11}$$

mit:

$h_N$  ... Niederschlagshöhe in mm,  $T_n$  ... Wiederkehrzeit in a mit  $T_n > 0,5$  a,  $D$  ... Dauerstufe in min,  $I$  ... SRI

Wie in Tabelle 2-6 ersichtlich, wird auch bei der dem Verfahren nach EG/LV ein 12 stufiger SRI eingeführt, welcher eine sprachliche Bewertung beinhaltet. (Krüger & Pfister, 2016)

Tabelle 2-6 Vorschlag zur Bewertung der Extremität eines Starkregens mithilfe des SRI-Verfahrens nach der EG/LV-Methodik, mod.

SRI I [-]	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
<b>Bewertung des Starkregens</b>	moderat				stark			heftig		extrem		

Zum Unterschied von Grisa nehmen Krüger und Pfister keine Reduzierungen hinsichtlich der Dauerstufe und Wiederkehrzeit vor, weshalb im Folgenden nur das Indexverfahren von Krüger und Pfister verwirklicht wurde.

#### 2.4.4 Verfahren nach Schmitt

Mit dem Ziel auch für Deutschland einerseits Ursachen und andererseits auch unumgängliche Risiken, die in Verbindung mit Überflutungen auftreten, plausibel erklären zu können, entwickelte Schmitt einen SRI, bei dem die Grundidee

von Grisa aufgegriffen, aber für die deutsche Entwässerungspraxis weiterentwickelt wird. (Schmitt, 2014)

Im ersten Schritt entwickelte Schmitt einen ortsabhängigen SRI (SI) von ① bis ⑦. Im Zuge dessen ist es zunächst von Nöten langjährige, Niederschlagsreihen einer statistischen Analyse zu unterziehen. Dies erfolgt auf Basis des DWA-Arbeitsblattes DWA-A 531. Starkregen ist statistisch eindeutig bestimmt durch die Niederschlagshöhe  $h_N$ , die Regendauer  $D$  und der Wiederkehrzeit  $T_n$ . Tabelle 2-7 zeigt eine Starkregenstatistik für einen Beispielstandort. Stehen keine entsprechend langen Aufzeichnungen von Regendaten zur Verfügung können synthetische Regenreihen beruhend auf vorhandenen Daten generiert werden. Niederschlagsdaten, die mittels Radar gemessen werden, dienen rein der Bestimmung der räumlichen Ausdehnung, da diese derzeit noch nicht lange genug zur Anwendung kommen, um auf langjährige Statistik zurückgreifen zu können. (Schmitt, 2014)

Tabelle 2-7 Niederschlagshöhen  $h_N$  [mm] für Starkregen unterschiedlicher Dauerstufen  $D$  und Wiederkehrintervalle  $T_n$  (DWD, 2005)

$T_n$ [a]	1	2	3	5	10	20	30	50	100
D [min]	$h_N$								
5	6	8	9	10	12	14	15	17	19
10	9	11	13	15	17	20	21	23	26
15	11	14	16	18	21	24	26	28	31
30	14	18	20	23	27	31	34	37	41
60	17	22	25	29	34	40	43	47	52
120	19	25	28	33	38	44	48	52	58
180	21	27	31	35	41	47	51	55	61
...									
1440	38	45	50	56	64	72	76	82	90

Wie in Tabelle 2-8 ersichtlich, erfolgt in Abhängigkeit des Wiederkehrintervalls die Zuteilung des SRI, hier bezogen auf die Starkregenstatistik der Tabelle 2-7. Zu dem Zeitpunkt der Publikation gab es noch keine Klassifizierung betreffend der Dauerstufen. (Schmitt, 2014)

Tabelle 2-8 Vorschlag zur Zuordnung SRI - Wiederkehrintervall  $T_n$ , mod.

Wiederkehrintervall $T_n$ [a]	1	2	3	5	10	20	30	50	100
SRI	①	①	②	②	③	④	⑤	⑥	⑦

Es zeigte sich, dass vermehrt Starkregenhöhen über dem Grenzwert des SRI ⑦ auftreten, weshalb (Schmitt, 2015) in einer weiteren Publikation eine Erweiterung um fünf zusätzliche Indizes vornahm. Mit Hilfe dieser wird eine Möglichkeit geschaffen, besonders extreme Ereignisse kenntlich zu machen. Hierbei handelt es sich um eine auf Deutschland bezogene ortsunabhängige Charakterisierung der Starkregenhöhen hinsichtlich der Wiederkehrperioden und gewisser Dauerstufen. Eine ortsabhängige SRI-Erstellung bezieht sich genau auf einen ausgewähl-

ten Ort. Anders ist das bei ortsunabhängigen Verfahren, die nicht genau mit einem Ort verknüpft sind, sondern wie hier auf das gesamte deutsche Bundesgebiet anwendbar sind. Zu diesem Zweck wurden 16 repräsentative Städte mit variierender Niederschlagscharakteristik deutschlandweit analysiert. Ausgewertet wurden die Niederschlagshöhen-Dauerlinien für die Wiederkehrintervalle zwischen 1 a und 100 a mit den Dauerstufen von 15 Minuten, 60 Minuten sowie 2, 4 und 6 Stunden. In Tabelle 2-9 ist ein Vorschlag für die ortsunabhängige SRI-Zuordnung dargestellt.

Tabelle 2-9 Vorschlag zur Zuordnung SRI und Wiederkehrzeit  $T_n$  mit ortsunabhängigen Wertebereichen von Starkregenhöhen für unterschiedliche Dauerstufen nach DWA (2016) und Schmitt (2015) (Mudersbach et al., 2017)

Wiederkehrzeit $T_n$ (a)	1 - 10	20	30	50	100	> 100				
Starkregenindex	1 - 3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Regendauer	Starkregenhöhen in mm									
15 min	10 - 20	20 - 25	25 - 30	30 - 35	> 35					
60 min	15 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 75					
2 h	20 - 35	35 - 45	45 - 55	55 - 65	65 - 80	75 - 100	100 - 130	130 - 160	160 - 200	> 200
4 h	20 - 45	45 - 55	55 - 60	60 - 75	75 - 85					
6 h	25 - 50	50 - 60	60 - 65	65 - 80	80 - 90	85 - 120	120 - 150	150 - 180	180 - 220	> 220

Schmitt (2016) veröffentlichte eine Publikation, in der eine methodische Vorgehensweise für die Zuordnung ortsabhängiger Regenhöhen der Indizes ⑧ bis ⑫ mittels Erhöhungsfaktoren vorgestellt wurde. Grund für die Weiterentwicklung war die Tatsache, dass das Niederschlagsverhalten sehr stark vom jeweiligen Ort abhängt und im Merkblatt DWA-M 119 die Anwendung ortsabhängiger Werte empfohlen wird. Eine direkte Zuordnung ortsbezogener Niederschlagshöhen aus der örtlich vorhandenen Statistik kann weiterhin für die Starkregenindizes ① bis ⑦ geschehen.

Beruhend auf der Bestimmung von Niederschlagsextremwerte, den sogenannten praxisrelevanten Extremwerten (PEN-Werte), für Wiederkehrperioden bis 10 000 a nach Verworn & Draschoff (2008) können Erhöhungsfaktoren abgeleitet werden. Im Anschluss kann eine Extrapolation auf Grundlage der Regenhöhen von  $T_n = 100$  für die Starkregenhöhen der Indizes ⑧ bis ⑫ erfolgen. Ein Anwendungsbeispiel ist in Tabelle 2-10 gezeigt. (Schmitt, 2016)

Tabelle 2-10 Faktoren zur Ermittlung ortsbezogener Wertebereiche der Starkregenhöhen für SRI 8 bis 12 (Beispiel: Rasterfeld S16-Z75, KOSTRA-DWD-2000) (Schmitt, 2016)

Starkregenindex	$T_n = 100$		> 100			
	7	8	9	10	11	12
Erhöhungsfaktor	(1,0)*	1,2 - 1,4	1,4 - 1,6	1,6 - 2,2	2,2 - 2,8	> 2,8
Dauerstufe D	Starkregenhöhen [mm]					
15 min	31	37 - 43	43 - 50	50 - 68	68 - 87	> 87
1 h	52	62 - 73	73 - 83	83 - 114	114 - 146	> 146
2 h	58	70 - 81	81 - 93	93 - 128	128 - 162	> 162
4 h	64	77 - 90	90 - 102	102 - 141	141 - 179	> 179
6 h	68	82 - 95	95 - 109	109 - 150	150 - 190	> 190

Aus heutiger Sicht kann zusammenfassend festgehalten werden, dass für die Erstellung des SRI nach Schmitt als Grundlage einerseits die Starkregenstatis-

## Grundlagen

tik und andererseits die aus PEN-Werten (Verwon & Draschoff, 2008) abgeleiteten Erhöhungsfaktoren dienen. Die SRI-Zuordnung erfolgt abhängig des Wiederkehrzeitraums.

(Schmitt et al., 2018) publizierten ein einheitliches Konzept für die SRI-Erstellung im deutschsprachigen Raum. Hier wurden einige Konventionen für die Vorgehensweise bei der Generierung von ortsbezogenen Starkregenindizes getroffen. Da dieses einheitliche Konzept sehr stark auf dem von Schmitt entwickelten Verfahren beruht, ist es hier nicht als eigenständiges Verfahren beschrieben. Folgend werden nun die vereinbarten Festlegungen in Tabelle 2-11 dargestellt.

Tabelle 2-11 Konventionen des einheitlichen Konzepts für die SRI-Erstellung (Schmitt et al., 2018, mod.)

Abkürzung	SRI		
Starkregenindex			
Wertebereich	①-⑫		
①-⑦	Zuordnung in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit		
⑧-⑫	Berechnung mittels Erhöhungsfaktoren		
	Ausgangswert SRI ⑦		
	⑧	1,2 – 1,39	
	⑨	1,4 – 1,59	
	⑩	1,6 – 2,19	
	⑪	2,2 – 2,79	
	⑫	≥ 2,8	
T <sub>n</sub> > 100	es wird keine genaue Wiederkehrzeit zugewiesen		
Neue No-menklatur	Starkregen-kategorie	Kategorie	
	Bemessungsregen	Starkregen (SRI: ①, ②)	
	seltener Starkregen	intensiver Starkregen (SRI: ③, ④, ⑤)	
	außergewöhnlicher Starkregen	außergewöhnlicher Starkregen (SRI: ⑥, ⑦)	
		extremer Starkregen (SRI > ⑦)	
Dauerstufen	5 Minuten bis 6 Tage		

Einheitliche Farbkennzeichnung  
 Tabelle 2-12 Farbspektrum zur Illustration des SRI ① bis ⑫  
 (Schmitt et al., 2018, mod.)  
 Starkregenindex SRI – Farbspektrum der RGB Klassen

SRI [-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rot (R)	176	204	230	255	255	255	255	247	255	247	235	189
Grün (G)	230	255	255	244	160	86	40	30	26	9	21	29
Blau (B)	25	153	77	0	0	0	0	61	100	130	190	220

Weiters wird die Festlegung von Krüger & Pfister (2016), dass sollte eine Regenhöhe zwischen 2 SRI fallen immer der nächst höhere Wert der ausschlaggebende ist übernommen.

### 2.4.5 Verfahren nach Mudersbach

Mudersbach entwickelte eine Methode zur Erstellung eines SRI stützend auf der örtlichen Starkregenstatistik. Wie in Gleichung 2-12 ersichtlich, wird bei der Berechnung des Index die Wiederkehrzeit und die Dauerstufe berücksichtigt, wobei der Wiederkehrzeit eine größere Bedeutung beigemessen wird. Erklärt wird dies mit der Tatsache, dass das Schadenspotenzial bei einer Kombination aus niedriger Dauerstufe und hohen Wiederkehrperiode bereits hoch sein kann. Erst ab einer Wiederkehrperiode von 2 Jahren erfolgt eine Berechnung, darunter wird automatisch der Index ① vergeben. Ab einer Wiederkehrzeit von  $T = 100$  a wird der Index ⑫ zugeteilt. In Tabelle 2-13 ist der SRI nach Mudersbach dargestellt. (Mudersbach, 2016)

$$SI_{D,T} = \begin{cases} 1 & \text{für } T = 1 \\ \sim(1,5 * \ln(T) + 0,4 * \ln(D)) & \text{für } 1 < T < 100 \\ 12 & \text{für } T > 100 \end{cases} \quad \text{Gleichung 2-12}$$

mit:

$SI_{D,T}$  ... SRI,  $T$  ... Wiederkehrzeit in a,  $D$  ... Dauerstufe in min,  $\sim$  ... kaufmännische Rundung auf nächste Ganzzahl

Tabelle 2-13 SRI nach Mudersbach (Mudersbach, 2016)

Starkregenindex nach MUDERSBACH								
Dauer [min]	Jährlichkeit [a]							
	1	2	5	10	20	30	50	100
5	1	2	3	4	5	6	7	8
10	1	2	3	4	5	6	7	8
15	1	2	3	5	6	6	7	8
20	1	2	4	5	6	6	7	8
30	1	2	4	5	6	6	7	8
45	1	3	4	5	6	7	7	8
60	1	3	4	5	6	7	8	9
90	1	3	4	5	6	7	8	9
120	1	3	4	5	6	7	8	9
180	1	3	4	6	7	7	8	9
240	1	3	5	6	7	7	8	9
360	1	3	5	6	7	7	8	9
540	1	4	5	6	7	8	8	9
720	1	4	5	6	7	8	8	10
1080	1	4	5	6	7	8	9	10
1440	1	4	5	6	7	8	9	10
2880	1	4	6	7	8	8	9	10
4320	1	4	6	7	8	8	9	10
5760	1	5	6	7	8	9	9	10
7200	1	5	6	7	8	9	9	10
8640	1	5	6	7	8	9	9	11

## 2.5 Klimabereiche in Österreich

In dieser Arbeit werden für verschiedene Städte Starkregenindizes erstellt. Für die Auswahl der Städte kommt unter anderem der jeweilige Klimabereich zu tragen, weshalb hier kurz ein Überblick über die in Österreich vorhandenen Klimabereiche gegeben wird.

Für die Klimaklassifikation gibt es verschiedene Ansätze, welche folgend kurz erläutert werden. Grob kann zwischen der genetischen und der effektiven Klassifikation hinsichtlich des vorhandenen Klimas unterschieden werden. (DWD, 2021a)

Messdaten wie Lufttemperatur, Niederschlag und Verdunstung, die über einen großen Beobachtungszeitraum gesammelt wurden, werden für die effektive Klimaklassifikation herangezogen. Für eine klimatische Einteilung erfolgt eine mathematische Berechnung der ausschlaggebenden Größen für das Klima. Die Klimatypenzuteilung geschieht anhand genau definierter Schwellenwerte, die jeden Klimatyp charakterisieren. Weiters wird die Wirkung der Klimaparameter auf regionale Beschaffenheit wie Wasserhaushalt, Bodenbeschaffenheit und weitere

mitbetrachtet. Als Vertreter dieser Klimaklassifikationsmethode sind vor allem Wladimir Peter Köppen und Rudolf Geiger zu erwähnen. (DWD, 2021b)

Bei der genetischen Klimaklassifikation werden keine Messdaten betrachtet. Ausschlaggebend für die Zuordnung ist Lage des Ortes inmitten der globalen Zirkulation. Hermann Flohn und Ernst Neef sind bekannte Vertreter der genetischen Klimaklassifikation. (DWD, 2021a)

Für Österreich beschrieb Zwittkovits, 1983 eine effektive Klimaklassifikation. Hierfür wurden die folgenden Klimaelemente betrachtet:

- Mittelwerte der Jänner- und Julitemperaturen
- Jahresniederschlagssummen
- Niederschlagstage (> 1 mm pro Tag)

73 Klimafacetten entstanden durch Kombination der oben genannten Parameter. Jene wurden in weiterer Folge zu 33 Klimabereichen und weiters zu sechs Klimatypen gebündelt, der oberdeutsche, pannonische, Illyrische, submediterranean beeinflusste, subalpiner und alpiner Klimatyp. (Zwittkovits, 1983)

Einflussfaktoren wie Strahlungsverhältnisse, tägliche Temperaturschwankungen und die hygrische und thermische Kontinentalität finden in der Fortsetzung der Klimatypeneinteilung nach Nagl Anwendung. Des Weiteren tauschte er den Parameter Niederschlagstage mit mehr als 1 mm Regen pro Tag gegen die Häufigkeit und Andauer von Trockenperioden, die größer als 10 Tage sein muss, aus. (Nagl, 1983 in Schwarz, 2002) beschrieb somit nunmehr nur vier Klimabereiche:

- Pannonische Klimabereich
  - Heiße Sommer
  - Kalte Winter
  - Geringe Jahresniederschlagssummen (< 800 mm)
- Illyrische Klimabereich
  - Mittelmeereinfluss und die damit verbundenen Mittelmeertiefs mit reichlich Niederschlagsmengen
  - Milde Sommer und Winter
- Atlantischer Klimabereich (Übergangsklima)
  - Westwinde
  - Große Regenmengen
- Alpiner Klimabereich
  - Kurzer, eher kühler Sommer

- Langer Winter mit großen Schneemengen (Fridrich et al., 2016)

In Abbildung 2-4 werden die verschiedenen Klimabereiche nach Nagl in Österreich dargestellt.

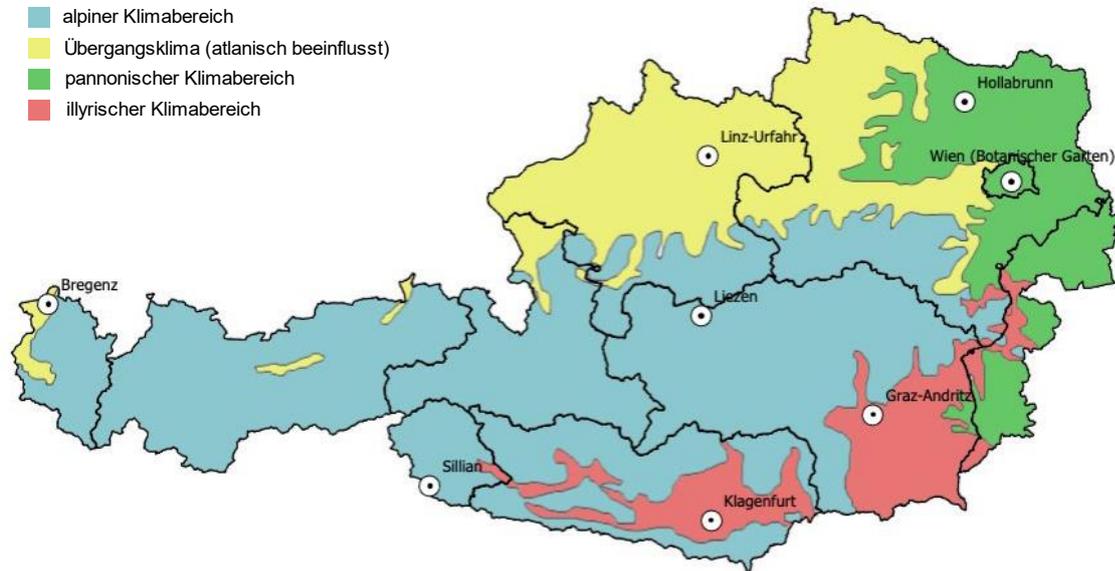


Abbildung 2-4 Klimabereiche in Österreich, (Fridrich et al., 2016), mod.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Einteilung der Klimabereiche von Zwittkovitz und Nagl aus dem Jahr 1983 stammen. Aufgrund klimatischer Änderungen ist durchaus einer Verschiebung der einzelnen Klimabereiche möglich.

Für die Klimaklassifikation nach Köppen und Geiger, deren Original zuletzt 1961 veröffentlicht wurde, gibt es bereits eine digitale Version mit einer aktuelleren Datenlage. (Kottek et al., 2006)

Da die Einteilung der Klimabereiche für Österreich nach Köppen und Geiger sich wesentlich großräumiger darstellt, wurde für die vorliegende Arbeit dennoch auf die kleinteiligere Klimabereichseinteilung nach Zwittkovitz und Nagl zurückgegriffen.

### 3 Methodik

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung von Starkregenindizes mit Hilfe der unterschiedlichen Verfahren für ausgewählte Städte in Österreich.

Grundsätzlich erfolgt die Erstellung der Starkregenindizes mit Python. Das Skript wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau erstellt und ist online verfügbar (*heavy\_rain\_index*, 2021). In jedem Code geschieht die Generierung der Starkregenindizes nach Vorgaben der publizierten Fachliteratur, hierfür ist es notwendig, die jeweilige Starkregenstatistik in das Skript zu laden. Des Weiteren wird die einfache Auswertung des Index durch Eingabe der Dauerstufe und der Regenhöhe implementiert. Das Konzept der SRI-Kurven, welches von Krüger und Pfister entwickelt wurde, soll auch für die anderen Methoden aufgegriffen werden, damit anschließend ein sinnvoller Vergleich der Indexerstellungsv erfahren möglich wird. Für die Ausgabe der SRI-Kurven wurden zwei Möglichkeiten implementiert. Zum einen können diese je Stadt und je Verfahren ausgegeben werden, das heißt, es werden alle 12 Indexkurven für eine Stadt auf einem Plot dargestellt. Die andere Möglichkeit besteht darin, sich genau einen Index für die entsprechende Stadt mit allen drei zur Verfügung stehenden Verfahren plotten zu lassen. Dies ermöglicht einen simplen Vergleich der einzelnen Verfahren. In einem weiteren Schritt wird die Auswertung konkreter Regenereignisse implementiert, damit folgend eine SRI-Auswertung inklusive Methodenvergleich für das jeweilige Ereignis generiert werden kann.

#### 3.1 Methodik SRI nach Grisa, Krüger und Pfister

Im Kapitel 2.4 werden die einzelnen Verfahren hinsichtlich ihrer Funktionsweise beschrieben. Hierbei kann festgestellt werden, dass der SRI nach Krüger und Pfister der von Grisa entwickelten mathematischen Formel zugrunde liegt.

Dementsprechend erfolgt die Generierung der SRI-Matrix nach der von Grisa entwickelten Formeln. Da die Starkregenstatistik als Berechnungsgrundlage dient, muss jene zuerst in das Skript geladen werden. Weiters erfolgt die Berechnung nach Gleichung 2-10 je Wiederkehrperiode und Dauerstufe. Die Ergebnisse werden dann in der sogenannten Starkregen-Matrix gespeichert. Die Tabelle 3-1 zeigt beispielhaft eine solche Matrix.

Tabelle 3-1 SRI-Matrix nach Krüger und Pfister

Dauer in Minuten	Wiederkehrzeit in Jahren										
	1	2	3	5	10	20	25	30	50	75	100
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2
15	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3
20	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3
30	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	4
45	0	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5
60	0	1	1	1	2	3	3	3	4	5	5
90	0	1	1	1	2	3	3	3	4	5	6
120	0	1	1	1	2	3	3	4	4	5	6
180	0	1	1	1	2	3	4	4	5	6	6
240	0	1	1	2	2	3	4	4	5	6	6
360	0	1	1	2	3	4	4	4	5	6	7
540	0	1	1	2	3	4	4	5	6	7	7
720	0	1	1	2	3	4	4	5	6	7	8
1080	0	1	1	2	3	4	5	5	6	7	8
1440	0	1	2	2	3	4	5	5	6	7	8
2880	1	1	2	3	4	5	5	6	7	8	9
4320	1	1	2	3	4	6	6	7	8	9	10
5760	1	1	2	3	5	6	7	8	9	11	12
7200	1	2	2	3	5	7	7	8	10	11	12
8640	1	2	2	3	5	7	8	8	10	12	12

Weiters wird eine Funktion in das Skript implementiert, die es ermöglicht, allein durch die Eingabe der Dauerstufe und der Regenhöhe eines speziellen Regeneignisses eine Indexermittlung zu generieren.

Im letzten Schritt erfolgt die Erstellung der SRI-Kurven. Wie im Kapitel 2.4.3 erwähnten werden hierfür die maximalen Niederschlagshöhen für extreme Ereignisse mit Wiederkehrzeiten ab 100 Jahren je SRI berechnet. Die Abbildung 3-1 zeigt exemplarisch die SRI-Kurven nach dem Verfahren von Krüger und Pfister.

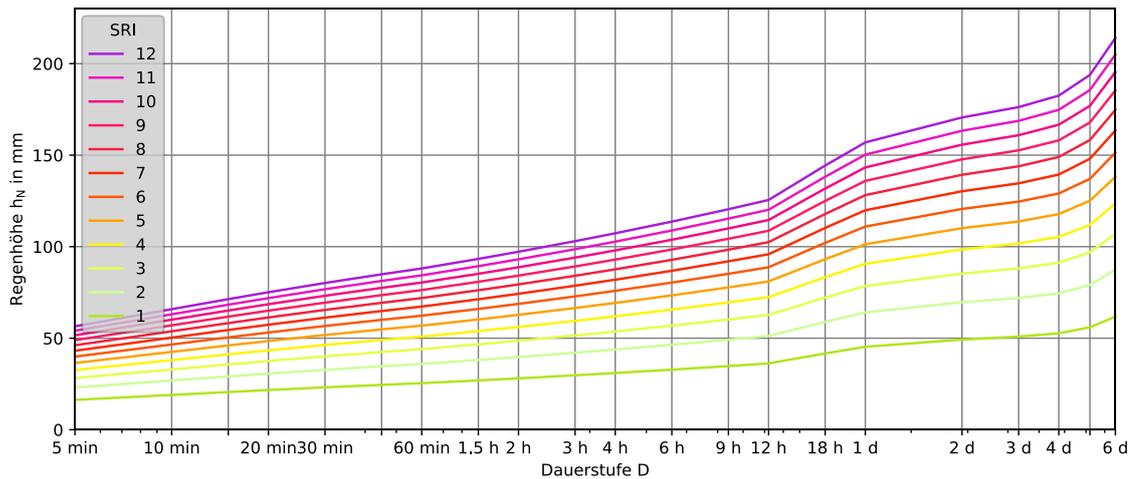


Abbildung 3-1 SRI - Kurven nach Krüger und Pfister

### 3.2 Methodik SRI nach Schmitt (einheitliches deutschsprachiges Konzept)

Das von Schmitt entwickelte Konzept wurde in mehreren Etappen entwickelt, siehe Kapitel 2.4.3. Für die Generierung des SRI von Schmitt wird im ersten Schritt die örtliche Starkregenstatistik geladen. Da bei diesem Konzept eine reine Zuordnung der Starkregenindizes anhand der Wiederkehrzeit für die Indizes ① bis ⑦ gemacht wird, kann die Indexzuordnung einfach durch Austausch mit den jeweiligen Wiederkehrzeiten erfolgen. Die weiteren Indizes (⑧ bis ⑫) werden ausgehend von den Regenhöhen des Indexwertes ⑦ ( $T_N = 100$ ) mittels Erhöhungsfaktoren je Dauerstufe berechnet. Hier ist anzumerken, dass aufgrund der bei Krüger und Pfister festgelegten Annahme der maximalen Regenhöhen je Index für die SRI-Kurven auch hier die oberen Indexwerte implementiert wurden, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten. Dies gilt jedoch nur für die Kurven ab SRI ⑧. In der Tabelle 3-2 ist beispielhaft eine Starkregenstatistik der Dauerstufen 5 und 10 Minuten mit den dazugehörigen Indizes dargestellt.

Tabelle 3-2 SRI nach Schmitt

Dauer in Minuten	Starkregen		intensiver Starkregen				außergewöhnlicher Starkregen				extremer Starkregen					
	1	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	8	9	10	11	12
5	9,2	10,8	11,7	12,8	14,4	15,9	16,4	16,8	18	18,9	19,5	27,1	31	42,7	54,4	54,6
10	14,9	17,3	18,7	20,5	22,9	25,4	26,2	26,8	28,6	30	31	43,1	49,3	67,9	86,5	86,9

### 3.3 Methodik SRI nach Mudersbach

Die von Mudersbach entwickelte Methode beruht wie in Abschnitt 2.4.5 ersichtlich auf einer mathematischen Formel (Gleichung 2-12), in welcher nur die Wiederkehrzeit und die Dauerstufe miteinfließen. Die Regenhöhe an sich, die sich

bei der jeweiligen Dauerstufe und Wiederkehrperiode laut der statistischen Auswertung ergibt, wird wertetechnisch nicht berücksichtigt. Prinzipiell ist der Aufbau der SRI-Matrix dadurch leicht zu bewerkstelligen. Die Berechnung erfolgt je Dauerstufe und Wiederkehrzeit und wird in einer SRI-Matrix wie in Tabelle 3-3 ersichtlich gespeichert.

Tabelle 3-3 SRI-Matrix nach Mudersbach, Graz Andritz

Dauer in Minuten	Wiederkehrzeit in Jahren										
	1	2	3	5	10	20	25	30	50	75	100
5	1	2	2	3	4	5	5	6	7	7	8
10	1	2	3	3	4	5	6	6	7	7	8
15	1	2	3	3	5	6	6	6	7	8	8
20	1	2	3	4	5	6	6	6	7	8	8
30	1	2	3	4	5	6	6	6	7	8	8
45	1	3	3	4	5	6	6	7	7	8	8
60	1	3	3	4	5	6	6	7	8	8	9
90	1	3	3	4	5	6	7	7	8	8	9
120	1	3	4	4	5	6	7	7	8	8	9
180	1	3	4	4	6	7	7	7	8	9	9
240	1	3	4	5	6	7	7	7	8	9	9
360	1	3	4	5	6	7	7	7	8	9	9
540	1	4	4	5	6	7	7	8	8	9	9
720	1	4	4	5	6	7	7	8	8	9	10
1080	1	4	4	5	6	7	8	8	9	9	10
1440	1	4	5	5	6	7	8	8	9	9	10
2880	1	4	5	6	7	8	8	8	9	10	10
4320	1	4	5	6	7	8	8	8	9	10	10
5760	1	5	5	6	7	8	8	9	9	10	10
7200	1	5	5	6	7	8	8	9	9	10	10
8640	1	5	5	6	7	8	8	9	9	10	11

Bei einer Dauerstufe von 15 Minuten und einer Wiederkehrperiode von 5 Jahren ergibt sich ein SRI von (3). Bei der hier dargestellten nächsthöheren Wiederkehrzeit von 10 Jahren resultiert bereits ein SRI von (5). Um diese Lücke für die Erstellung der SRI-Kurven zu schließen werden durch Umstellung der Gleichung 2-12 nach der Wiederkehrperiode die genauen Wiederkehrzeiten für die jeweiligen Starkregenindizes berechnet. In der ursprünglichen Formel wird das Ergebnis kaufmännisch gerundet. Durch die Prämisse, dass für die SRI-Kurven die maximalen Werte für die Niederschlagshöhen dargestellt werden, muss die kaufmännische Rundung eliminiert werden. Dies geschieht durch die Addition um den Wert 0,5 in der Gleichung 3-1. Nun kann jedem SRI genau eine Wiederkehrzeit zugeordnet werden.

$$T = e^{\frac{SI_{D,T} + 0,5 - 0,4 \cdot \ln(D)}{1,5}}$$

Gleichung 3-1

mit:

 $SI_{D,T}$  ... SRI,  $T$  ... Jährlichkeit [a],  $D$  ... Regendauer [min]

Das rechnerische Ergebnis dieser Berechnung ist in Tabelle 3-4 dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass ab einer Wiederkehrzeit die größer als 100 Jahre ist automatisch der SRI ⑫ zugewiesen wird. Dementsprechend sind in der Tabelle alle Wiederkehrzeiten die größer als 100 Jahre sind nicht dargestellt. Weiters werden die Wiederkehrzeiten, die kleiner als ein Jahr sind auch nicht dargestellt, da die Formel nach Mudersbach erst ab Wiederkehrzeiten größer als ein Jahr Anwendung findet.

Tabelle 3-4 Wiederkehrzeiten in Abhängigkeit der Dauerstufe und des SRI

Dauer in Minuten	Wiederkehrzeit in Jahren je SRI												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
5	1	3,4	6,7	13,1	25,5	49,6	96,6						
10	1	2,9	5,6	10,9	21,2	41,2	80,3						
15	1	2,6	5	9,8	19	37	72,1						
20	1	2,4	4,6	9	17,6	34,3	66,8						
30	1	2,1	4,2	8,1	15,8	30,8	59,9						
45	1	1,9	3,7	7,3	14,2	27,6	53,8						
60	1	1,8	3,5	6,7	13,1	25,6	49,8	97					
90	1	1,6	3,1	6	11,8	23	44,7	87,1					
120	1	1,5	2,9	5,6	10,9	21,3	41,4	80,6					
180	1	1,3	2,6	5	9,8	19,1	37,2	72,4					
240	1	1,2	2,4	4,7	9,1	17,7	34,4	67					
360	1	1,1	2,1	4,2	8,1	15,9	30,9	60,2					
540	1	1	1,9	3,8	7,3	14,2	27,7	54					
720	1		1,8	3,5	6,8	13,2	25,7	50	97,4				
1080	1		1,6	3,1	6,1	11,8	23	44,9	87,4				
1440	1		1,5	2,9	5,6	11	21,3	41,6	81				
2880	1		1,2	2,4	4,7	9,1	17,7	34,6	67,3				
4320	1		1,1	2,2	4,2	8,2	15,9	31	60,4				
5760	1		1	2	3,9	7,6	14,7	28,7	55,9				
7200	1		1	1,9	3,7	7,1	13,9	27,1	52,7				
8640	1			1,8	3,5	6,8	13,2	25,8	50,2	97,8			

Für die Ermittlung der Niederschlagshöhen der einzelnen Indizes muss zwischen den Wiederkehrzeiten interpoliert werden. Beispielsweise ist der SRI nach der SRI-Matrix bei einer Dauerstufe von 30 Minuten und einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren ⑦. Berechnet man die genaue Wiederkehrzeit für den SRI von ⑦ bei einer Dauerstufe von 30 Minuten ist die Wiederkehrzeit 59,9 Jahre. Dementsprechend wird die Niederschlagshöhe bezogen auf die genaue errechnete Wiederkehrzeit berechnet und in eine Matrix für die Erstellung der Index-Kurven gespeichert (siehe Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5 SRI-Kurven-Werte nach Mudersbach, Graz Andritz

Dauer in Minuten	Starkregenindex												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
5	9,23	12	13,5	15	16,5	17,9	19,4						
10	14,9	18,6	20,9	23,2	25,6	27,9	30,3						
15	18,6	23	26	29,1	32,1	35,2	38,2						
20	21,4	26,2	29,8	33,5	37,2	40,9	44,6						
30	25	30,5	35,3	40,1	44,9	49,7	54,5						
45	28,2	34,3	40,6	46,9	53,1	59,4	65,6						
60	30,2	36,7	44,2	51,8	59,3	66,9	74,4	82					
90	32,6	38,1	46	54	61,9	69,9	77,8	85,7					
120	34,4	39,2	47,4	55,6	63,8	72,1	80,3	88,5					
180	37,1	40,8	49,4	58	66,7	75,3	83,9	92,6					
240	39,2	41,9	50,9	59,8	68,8	77,7	86,6	95,6					
360	42,3	43,7	53,1	62,5	71,8	81,2	90,6	100					
540	45,7		55,4	65,2	75,1	85	94,8	104,7					
720	48,2		57,1	67,3	77,5	87,7	98	108,2	118,4				
1080	53,1		60,2	70,2	80,2	90,3	100,3	110,3	120,3				
1440	56,8		62,3	71,5	80,7	89,9	99,1	108,3	117,5				
2880	65,3		68,5	78,7	88,9	99,1	109,3	119,5	129,7				
4320	70,4		72,4	85,3	98,2	111,2	124,1	137,1	150				
5760	77,3		77,9	93,6	109,3	125	140,7	156,4	172,1				
7200	82,5			98,2	114,7	131,3	147,8	164,4	180,9				
8640	84,4			100,2	118,3	136,4	154,5	172,6	190,6	208,7			

Damit auch hier vergleichbare SRI-Kurven generieren werden können, müssen die fehlenden Werte für die jeweiligen Indizes aufgefüllt werden. Jene nicht vorhandenen Werte sind darauf zurückzuführen, dass hier die mit der Formel (Referenz) errechnete Wiederkehrzeit entweder kleiner als ein Jahr oder größer als 100 Jahre ist und dadurch außerhalb der Gültigkeit der Formel liegt. Dementsprechend wurde die Tabelle mit den letzten Werten des jeweiligen SRI aufgefüllt (siehe Tabelle 3-6). Infolgedessen wird zwar beispielsweise dem SRI ⑧ mit einer Dauerstufe von 5 Minuten ein Wert zugewiesen, dieser jedoch durch die Kurve des SRI von ⑫ überschrieben. Dies beruht auf der Prämisse, dass ab einer Wiederkehrzeit die größer als 100 Jahre ist automatisch der Indizes ⑫ vergeben wird. Wie aus der Berechnung der genauen Wiederkehrzeit (Tabelle 3-4) hervorgeht ist die Wiederkehrperiode erst ab einer Dauerstufe von 60 Minuten kleiner als 100 Jahre. Dementsprechend ist die SRI-Kurve bei einem Index von ⑧ und einer Dauerstufe kleiner als 60 Minuten nicht existent, da hier eine Wiederkehrzeit größer als 100 Jahre vorliegt und demzufolge der Index ⑫ vergeben wird.

Grundsätzlich stellen die dargestellten Werte den Maximalwert der Niederschlagshöhe des jeweiligen Starkregenindizes dar, dies gilt jedoch nur für Werte der Tabelle 3-5. Beispielsweise ist bei einem SRI von ⑧ und einer Dauerstufe von 240 die maximale Niederschlagshöhe 95,6 mm. Durch das Auffüllen der Werte haben die folgenden Indizes ebenso diesen Wert und stellen somit nicht mehr die geforderten Maximalwerte dar. Zum Vergleich der unterschiedlichen Verfahren werden demnach nur berechnete und keine aufgefüllten Werte herangezogen.

Tabelle 3-6 SRI-Kurven-Werte nach Mudersbach mit weitergeführten Werten Graz Andritz

Dauer in Minuten	Starkregenindex											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	9,23	12	13,5	15	16,5	17,9	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
10	14,9	18,6	20,9	23,2	25,6	27,9	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3
15	18,6	23	26	29,1	32,1	35,2	38,2	38,2	38,2	38,2	38,2	38,2
20	21,4	26,2	29,8	33,5	37,2	40,9	44,6	44,6	44,6	44,6	44,6	44,6
30	25	30,5	35,3	40,1	44,9	49,7	54,5	54,5	54,5	54,5	54,5	54,5
45	28,2	34,3	40,6	46,9	53,1	59,4	65,6	65,6	65,6	65,6	65,6	65,6
60	30,2	36,7	44,2	51,8	59,3	66,9	74,4	82	82	82	82	82
90	32,6	38,1	46	54	61,9	69,9	77,8	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7
120	34,4	39,2	47,4	55,6	63,8	72,1	80,3	88,5	88,5	88,5	88,5	88,5
180	37,1	40,8	49,4	58	66,7	75,3	83,9	92,6	92,6	92,6	92,6	92,6
240	39,2	41,9	50,9	59,8	68,8	77,7	86,6	95,6	95,6	95,6	95,6	95,6
360	42,3	43,7	53,1	62,5	71,8	81,2	90,6	100	100	100	100	100
540	45,7	45,7	55,4	65,2	75,1	85	94,8	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7
720	48,2	48,2	57,1	67,3	77,5	87,7	98	108,2	118,4	118,4	118,4	118,4
1080	53,1	53,1	60,2	70,2	80,2	90,3	100,3	110,3	120,3	120,3	120,3	120,3
1440	56,8	56,8	62,3	71,5	80,7	89,9	99,1	108,3	117,5	117,5	117,5	117,5
2880	65,3	65,3	68,5	78,7	88,9	99,1	109,3	119,5	129,7	129,7	129,7	129,7
4320	70,4	70,4	72,4	85,3	98,2	111,2	124,1	137,1	150	150	150	150
5760	77,3	77,3	77,9	93,6	109,3	125	140,7	156,4	172,1	172,1	172,1	172,1
7200	82,5	82,5	82,5	98,2	114,7	131,3	147,8	164,4	180,9	180,9	180,9	180,9
8640	84,4	84,4	84,4	100,2	118,3	136,4	154,5	172,6	190,6	208,7	208,7	208,7

### 3.4 Städteauswahl

Die Auswahl der Städte erfolgt nach dem Kriterium der Klimaprovinz. Für Interpretation der Ergebnisse werden aber weitere Parameter wie durchschnittliche Jahresniederschlagssumme und Seehöhe mitbetrachtet. Die angegebene Meereshöhe bezieht sich jeweils auf die Höhe der Niederschlagsmessstation der jeweiligen Stadt. Aus dem hydrografischen Jahrbuch (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT), 2017) werden die durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen entnommen. In Tabelle 3-7 sind die ausgewählten Städte mit samt den betrachteten Kriterien dargestellt.

Tabelle 3-7 Städte mit Vergleichskriterien

<b>Städte</b>	<b>Klimaprovinzen</b>	<b>durchschnittliche Jahres- summe Niederschlag in mm (1981-2010)</b>	<b>Seehöhe in m ü.A.</b>
Sillian	alpines Klima	974	1079
Liezen	alpines Klima	1063	670
Klagenfurt	illyrisches Klima	893	458
Graz	illyrisches Klima	857	361
Bregenz	Übergangsklima	1567	447
Linz	Übergangsklima	857	305
Wien	pannonisches Klima	600	180
Hollabrunn	pannonisches Klima	555	236

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die gewonnenen Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Zum einen werden die im Kapitel 2.4.3 bis 2.4.5 beschriebenen Methoden der SRI-Erstellung anhand der Indexkurven miteinander verglichen. Im nächsten Abschnitt erfolgt ein Städtevergleich, ebenso bezüglich der SRI-Kurven. Konkrete Regenereignisse werden im folgenden Abschnitt analysiert. Im letzten Abschnitt werden zwei SRI-Analysen in Graz einander gegenübergestellt.

Verglichen werden die Indizes ① bis ⑪, da diese entsprechend der Definition die Maximalwerte der Niederschlagshöhe darstellen. Alle Regenhöhen die, den Wert des Index ⑪ übertreffen werden, dem Index ⑫ zugeordnet. Für die Auswertung werden für jede Stadt SRI-Kurven der Indizes ①-⑪ erstellt, wobei je Index alle 3 Verfahren dargestellt werden. Des Weiteren werden Plots generiert auf, welchen alle Städte je Verfahren und SRI dargestellt sind.

### 4.1 Vergleich der unterschiedlichen Methoden zur SRI-Erstellung

Bei der Auswertung der Ergebnisse sind deutlich Gemeinsamkeiten der Indexkurven stadtunabhängig festzustellen, daraus kann geschlossen werden, dass dies stark mit den einzelnen Verfahren in Zusammenhang stehen. Folgend wird kurz auf die angesprochenen Übereinstimmungen eingegangen.

Für den Vergleich bezüglich der unterschiedlichen Methoden zur SRI-Erstellung erfolgt eine Betrachtung der Dauerstufenbereiche, wie sie auch bei der statistischen Auswertung von Starkregenereignissen laut DWA-A 531 (2012) gebräuchlich ist (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1 Dauerstufenbereiche (DWA-A 531, 2012), mod.

Dauerstufenbereich I	≤ 60 min
Dauerstufenbereich II	60 min – 12 h
Dauerstufenbereich III	≥ 12 h

Im Bereich I vor allem bei den Dauerstufen von 5 bis 10 Minuten bei den Starkregenindizes bis inklusive ⑦ sind die von Krüger und Pfister berechneten Regenhöhen deutlich höher als jene der Methoden Schmitt und Mudersbach.

Mit Ausnahme des SRI ① ist im Bereich II und III die notwendige Niederschlagshöhe für die Erreichung des jeweiligen SRI bei der Methode nach Mudersbach die niedrigste.

## Ergebnisse

Für alle SRI gilt, dass im Dauerstufenbereich III die Kurven des Verfahrens von Schmitt über denen von Krüger, Pfister und Mudersbach liegen und dementsprechend die maximale Niederschlagshöhe für den jeweiligen SRI wesentlich höher ist als bei den beiden anderen Verfahren. Es kann beobachtet werden, dass diese Diskrepanz mit zunehmenden SRI steigt.

Zur Verdeutlichung der oben genannten Erkenntnisse werden nachfolgend die SRI-Kurven von Wien (SRI ③) Bregenz (SRI ⑦) und Sillian (SRI ⑪) dargestellt, Abbildung 4-1 bis Abbildung 4-3.

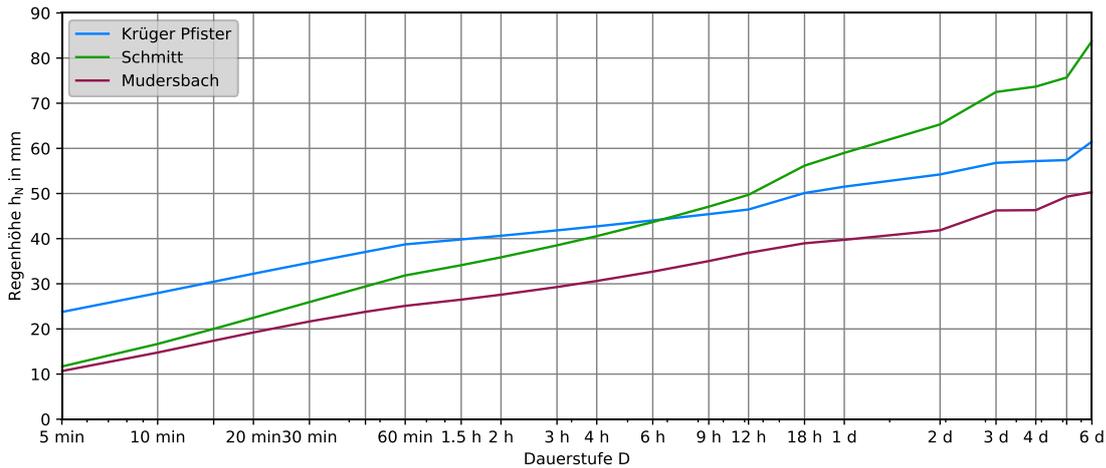


Abbildung 4-1 SRI ③, Wien

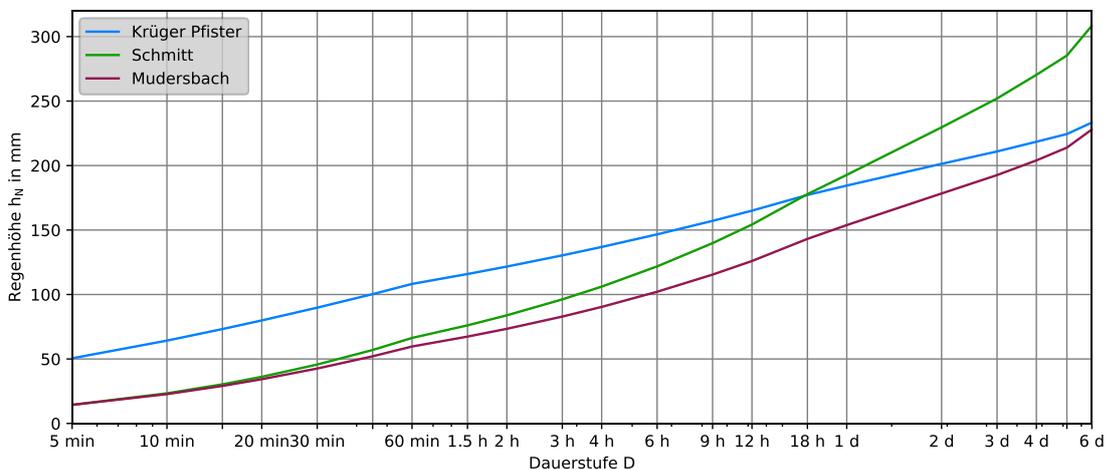


Abbildung 4-2 SRI ⑦, Bregenz

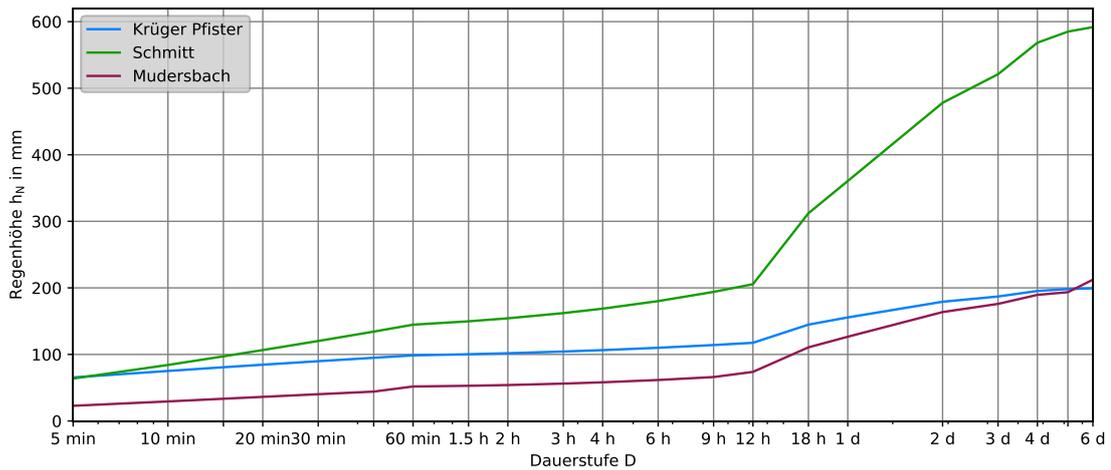


Abbildung 4-3 SRI ⑪, Sillian

## 4.2 Städtevergleich

Für den Städtevergleich werden für alle Methoden Plots erstellt, auf welchen je Methode und SRI alle Städte abgebildet werden.

Dargestellt wird exemplarisch ein Plot der Methode von Krüger und Pfister des SRI ⑨ (siehe Abbildung 4-4). Da der grundsätzliche Kurvenverlauf SRI-unabhängig ist, ist die Notwendigkeit nicht gegeben hier mehrere SRI darzustellen. Ebenso sind die Aussagen für die Methode von Schmitt und Mudersbach gültig. Es sei darauf hingewiesen, dass die SRI-Kurven aller Städte und je Methode dem Anhang zu entnehmen sind. Folgend werden kurz die einzelnen Städte innerhalb der jeweiligen Klimaprovinz miteinander verglichen.

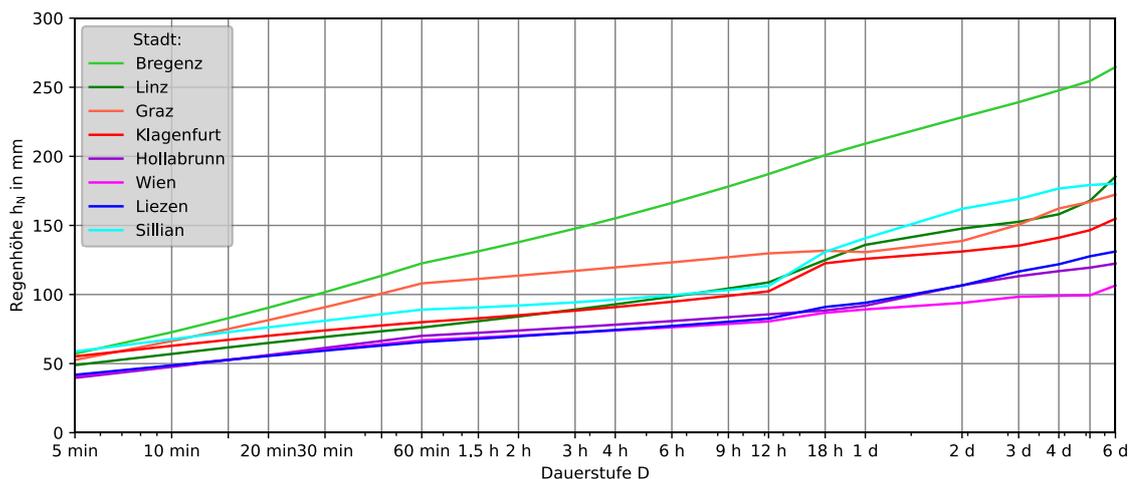


Abbildung 4-4 SRI ⑨ nach Krüger Pfister

Bezüglich der Seehöhe sind Sillian und Liezen von den hier ausgewählten Städten die höchst Gelegenen. Die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme un-

terscheidet sich um 89 mm. Das bedeutet wiederum, dass in Sillian durchschnittlich 8,4% weniger Niederschlag fällt als in Liezen. Sowohl Sillian als auch Liezen befindet sich nach der Einteilung in Klimaprovinzen im alpinen Klima. Ein direkter Vergleich der Niederschlagshöhen zeigt, dass für das Erreichen eines bestimmten SRI für alle Dauerstufenbereiche in Sillian mehr Niederschlag fallen muss als in Liezen, wobei der Unterschied im Bereich III noch ausgeprägter ist.

Dem Übergangsklima ist sowohl Linz als auch Bregenz zugeordnet. Bei der durchschnittlichen Niederschlagssumme im Jahr unterscheiden sich diese beiden Städte jedoch um 710 mm. In Linz fällt somit um 45,3% weniger Niederschlag als in Bregenz. Die Niederschlagsmessstation in Bregenz liegt 142 m über jener in Linz. Die maximalen Niederschlagshöhen der Starkregenindizes sind bei Bregenz markant höher als bei Linz, vor allem im Dauerstufenbereich II und III.

In Graz und Klagenfurt ist laut der Definition nach Klimaprovinzen illyrisches Klima vorherrschend, wobei Klagenfurt um 97 m höher gelegen ist als Graz. Die durchschnittliche Jahresniederschlagsdifferenz beträgt 36 mm. Prozentuell gesehen fällt in Graz 4% weniger Regen als in Klagenfurt. Aus der Abbildung 4-4 ist erkennbar, dass im Vergleich der Starkregenindizes-Kurven für Graz die maximalen Niederschlagshöhen höher liegen und demzufolge in Graz mehr Niederschlag fallen muss damit der gleiche Index ausgegeben wird wie in Klagenfurt. Dieser Niederschlagsmengenunterschied verkleinert sich jedoch im III. Dauerstufenbereich.

In der pannonischen Klimaprovinz ist Wien und Hollabrunn situiert. Diese beiden Städte sind außerdem die am tiefsten gelegenen der untersuchten Städte. Bezüglich der Jahresniederschlagssumme fällt in Wien durchschnittlich 45 mm mehr Niederschlag als in Hollabrunn. Bezüglich der durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen fällt in Hollabrunn 7,5% weniger Niederschlag als in Wien. Aufgrund der ähnlichen Vergleichsparameter ist auch eine übereinstimmende Kurvencharakteristik zu erwarten. In Abbildung 4-4 wird diese Annahme auch bestätigt, wobei die maximalen Regenhöhen für die jeweiligen SRI in Hollabrunn geringfügig höher sind als in Wien, was sich durch die jährlich durchschnittlich höhere Niederschlagsmenge erklären lässt.

Im Vergleich der Indexkurven ist vor allem die Ähnlichkeit der Kurvenverläufe von Liezen und Hollabrunn erkennbar. Aufgrund der betrachteten Kriterien wie durchschnittlicher Jahresniederschlagssumme, Klimaprovinz und Seehöhe ist diese Ähnlichkeit unerwartet. In Abbildung 4-5 ist die eHYD-Regenserie für Liezen dargestellt. Darin ist zu sehen, dass in der Regenserie zwei Lücken vorhanden sind. Auffallend ist, dass die Jahresniederschlagssummen vor der zweiten Lücke der Regenserie im Jahr 2000 wesentlich niedriger sind als danach. In dieser Regenserie sind dementsprechend viele Jahre mit wenig Niederschlag berücksichtigt, was die augenscheinlich deutlich zu niedrige SRI-Kurve erklärt. Laut Bundesmi-

nisterium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus wurde Ende 1999 von einem registrierenden Niederschlag-Schreiber auf eine Niederschlag-Wippe umgestellt. Dies könnte den deutlichen Summenunterschied erklären.

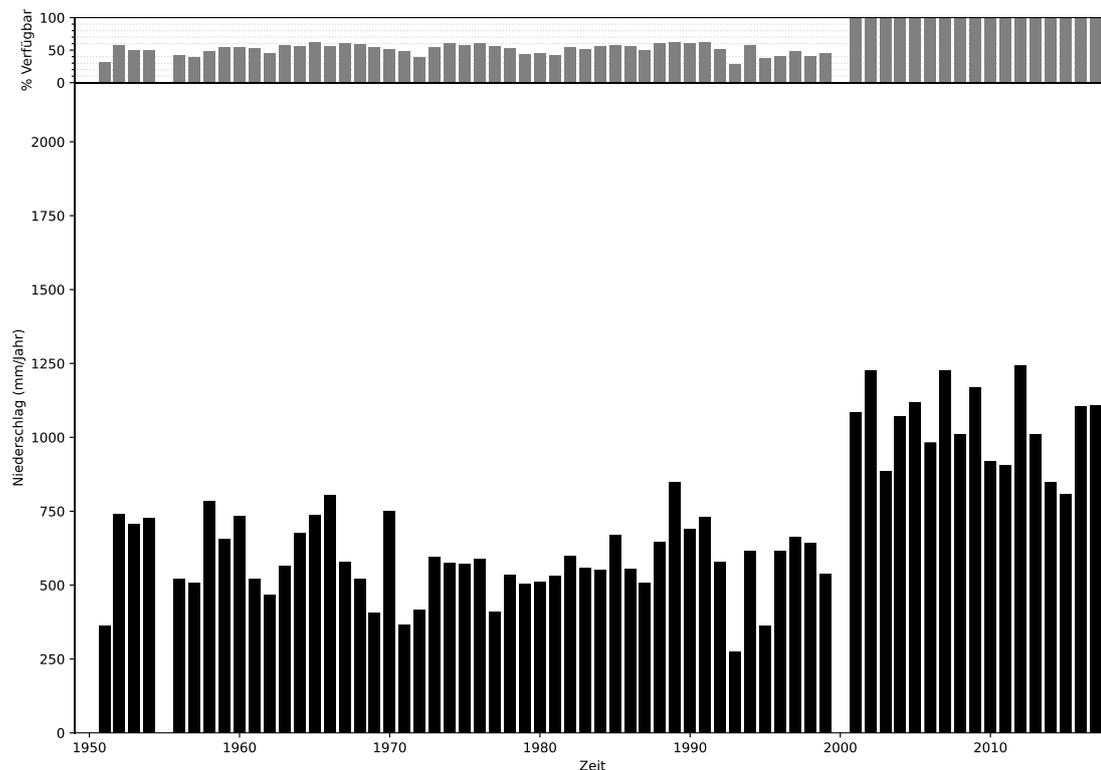


Abbildung 4-5 eHYD-Regenserie Liezen

Weiters ist auffallend, dass im Dauerstufenbereich II sich die Regenhöhen von Sillian, Linz und Klagenfurt gleichen. Die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme der drei Städte unterscheidet sich um maximal 117 mm.

Graz und Linz weisen eine idente durchschnittliche Jahresniederschlagssumme auf, dennoch unterscheiden sich die SRI-Kurven vor allem im Dauerstufenbereich II. Hingegen ist eine deutliche Ähnlichkeit im Bereich III erkennbar.

Die SRI-Kurve von Bregenz überragt deutlich die anderen betrachteten Städte, dies ist aufgrund der merklich höheren durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen zu erwarten.

### 4.3 Auswertung spezifischer Regenereignisse

Für die Auswertung der spezifischen Regenereignisse werden pro Klimaprovinz eine Stadt ausgewählt. Kriterium für die Auswahl der Ereignisse sind das Vorhandensein von Medienberichten, weiters muss sich das Regenereignis in der Nähe der eHYD-Station befinden und sich im Aufzeichnungszeitraum der Regenserie befinden.

### 4.3.1 Regenereignis in Graz am 6.5.2013

Das folgende Regenereignis ereignete sich in Graz am 6.5.2013, gemessen an der Niederschlagsmessstation in Graz Andritz. In der Tageszeitung „Die Presse“ berichtet von „extrem heftigen Regenfällen“ und „Überschwemmungen“. (Scheriau, 2013)

Die Analyse zeigt, dass es sich je nach gewähltem Verfahren um ein durchaus starkes Regenereignis handelt (siehe Tabelle 4-2). Es kann aber auch ein großer Unterschied zwischen den einzelnen Verfahren beobachtet werden. So sind die Indizes bei Mudersbach höher als bei den beiden anderen Verfahren. Bei einer Dauerstufe von zwei Tagen ist die größte Wiederkehrperiode von rund 35 Jahren zu beobachten. Hier ist der SRI nach Krüger und Pfister (7), das bedeutet nach deren Sprachregelung ein heftiges Regenereignis. Nach Schmitt handelt es sich bei diesen Parametern um einen SRI von (6), einem außergewöhnlichen Ereignis. Bei Mudersbach wird bei dieser Dauerstufe und Wiederkehrzeit bereits ein SRI von (9) ausgegeben.

Tabelle 4-2 Ereignisauswertung 6.5.2013, Graz

Dauerstufe	Krueger Pfister	Mudersbach	Schmitt	max. Wiederkehrperiode in a	Regenhöhen in mm
5 min	1	1	1	1,4	9,9
10 min	1	2	1	1,5	16,3
15 min	1	2	2	2,1	21,9
20 min	1	3	2	3,4	28,2
30 min	2	5	3	8,8	40,7
45 min	2	4	3	6,8	46,3
60 min	2	5	4	10,7	57
90 min	4	6	4	22,4	69,6
2 h	4	7	5	25,4	74,3
3 h	4	7	4	20,9	76,5
4 h	4	7	4	19	78,7
6 h	5	7	5	28,8	89,6
9 h	5	7	4	24,2	92,8
12 h	4	7	4	18,6	93
18 h	5	7	4	17,8	96,4
1 d	5	7	4	20,1	98,2
2 d	7	9	6	34,7	119,6
3 d	7	8	5	29,3	136
4 d	6	7	4	12,1	136
5 d	6	7	4	11,5	143,2
6 d	5	7	3	9,8	146,2

### 4.3.2 Regenerereignis in Liezen am 2.6.2013

Ebenfall im Jahr 2013 ereignete sich im Juni ein Niederschlagsereignis im Bezirk Liezen, welches eine maximale Wiederkehrzeit von rund 66 Jahren aufweist. Wie Schattleitner, 2013 darlegt, wurden einige Straßen überflutet, auch kam es zu Murenabgängen und Straßensperrungen. Wie in der Tabelle 4-3 ersichtlich sind auch hier die SRI bei Mudersbach tendenziell höher mit einer Ausnahme bei einer Dauerstufe von vier Stunden ist der SRI von Krüger und Pfister ⑨, bei Mudersbach hingegen nur ⑧. Die maximale Niederschlagsmenge betrug 124,8 mm, bei einer Dauerstufe von sechs Tagen. Bei einer Dauerstufe von 12 Stunden ist die Wiederkehrperiode 66,3 Jahre, dies stellt den Maximalwert dar.

Tabelle 4-3 Ereignisauswertung 2.6.2013, Liezen

Dauerstufe	Krueger Pfister	Mudersbach	Schmitt	max. Wiederkehr- periode in a	Regenhöhen in mm
5 min	0	1	1	0,2	0,9
10 min	0	1	1	0,1	1,9
15 min	0	1	1	0,1	2,6
20 min	0	1	1	0,1	3,5
30 min	0	1	1	0,2	5,2
45 min	0	1	1	0,2	6,7
60 min	0	1	1	0,3	8,9
90 min	0	1	1	0,5	13,2
2 h	1	1	1	0,6	16,2
3 h	1	1	1	0,9	21,1
4 h	1	3	1	1,7	27,2
6 h	2	5	3	5,7	38,9
9 h	5	8	6	53,9	58,8
12 h	6	9	6	66,3	63,8
18 h	5	8	4	24,6	68,2
1 d	5	7	4	17,7	69,8
2 d	5	7	4	12,8	84,6
3 d	8	8	6	30,8	114,1
4 d	9	8	5	27,6	122,5
5 d	7	8	4	16,4	123,2
6 d	7	7	4	13	124,8

### 4.3.3 Regenerereignis in Bregenz am 27.7.2010

Das stärkste hier betrachtete Regenerereignis hat in der Landeshauptstadt von Vorarlberg am 27.07.2010 stattgefunden. Sowohl bei Krüger, Pfister und Mudersbach ist der Maximalindex von ⑫ erreicht worden. Mit einem maximalen SRI bei Schmitt von ⑧, handelt es sich nach dessen Definition aber bereits auch um ein extremes Starkregenerereignis. Die Wiederkehrperiode erreichte mit 259,1 Jahren

## Ergebnisse

ihren Maximalwert (siehe Tabelle 4-4). Bemerkenswert ist, dass in einem Zeitraum von vier Tagen 50% der Jahresniederschlagsmenge von Wien und Holabrunn gefallen ist.

Medienberichte zufolge kam es zu Überschwemmungen und Straßensperren. Gesperrt wurde auch die Bahnstrecke zwischen Bregenz und Lindau, weiters wurden die Einwohner gebeten zu Hause zu bleiben. Eine Wohnanlage musste aufgrund der Gefahr einer Hangrutschung infolge der Regenfälle evakuiert werden.

Tabelle 4-4 Ereignisauswertung 27.7.2010, Bregenz

Dauerstufe	Krueger Pfister	Mudersbach	Schmitt	max. Wiederkehrperiode in a	Regenhöhen in mm
5 min	1	4	3	7,9	9,7
10 min	1	5	4	13,3	17,4
15 min	1	5	4	13,6	22,7
20 min	1	6	4	17,6	28,1
30 min	2	7	6	46,4	40,9
45 min	3	8	7	88,3	55,9
60 min	3	8	7	89,5	65,1
90 min	3	9	7	96	75,5
2 h	4	9	7	90	82,5
3 h	4	8	6	56,2	88,4
4 h	3	8	6	35,9	90,9
6 h	3	7	4	16,6	91,7
9 h	4	7	5	26,5	114,6
12 h	5	8	6	35,7	132,9
18 h	4	7	4	19,5	139,2
1 d	4	7	4	12	139,3
2 d	3	6	2	4,8	139,3
3 d	10	10	6	74,2	242,4
4 d	12	12	8	210	296,1
5 d	12	12	8	259,1	319,8
6 d	12	12	8	132,9	319,8

### 4.3.4 Regenereignis in Wien am 24.5.2014

In Abbildung 4-6 zeigt ein Regenereignis aus Wien vom Mai 2014 (Nihad, 2014). Ereignis hat es sich in Wien Döbling. Wie berichtet, sind Autofahrer in den Unterführungen Mooslackengasse und Gunoldstraße von dem plötzlich sehr stark auftretenden Regenereignis überrascht worden.



Abbildung 4-6 Überflutung, Wien (Nihad, 2014)

Die eHYD-Niederschlagsmessstation Botanischer Garten der Universität Wien befindet sich in einer Entfernung von ca. 6 km Luftlinie. Das dort aufgezeichnete Regenereignis in Tabelle 4-4 ist nicht ansatzweise mit der Abbildung 4-6 im Einklang. Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass Starkregenereignisse eine ausgeprägte lokale Komponente haben können.

Tabelle 4-5 Ereignisauswertung 24.5.2014, Wien

Dauerstufe	Krueger Pfister	Mudersbach	Schmitt	max. Wiederkehrperiode in a	Regenhöhen in mm
5 min	-	-	-	0,2	1,1
10 min	-	-	-	0,1	2
15 min	-	-	-	0,1	2,5
20 min	-	-	-	0,1	3,2
30 min	-	-	-	0,1	4,2
45 min	-	-	-	0,1	4,8
60 min	-	-	-	0,2	5,5
90 min	-	-	-	0,1	5,8
2 h	-	-	-	0,1	5,8
3 h	-	-	-	0,1	5,8
4 h	-	-	-	0,1	5,8
6 h	-	-	-	0	5,8
9 h	-	-	-	0	5,8
12 h	-	-	-	0	5,8
18 h	-	-	-	0	6,4
1 d	-	-	-	0,1	6,4
2 d	-	-	-	0,1	6,4
3 d	-	-	-	0	6,4
4 d	-	-	-	0	6,4
5 d	-	-	-	0	6,4
6 d	-	-	-	0,1	7

#### 4.4 Starkregenindex für Graz

Am Beispiel der steirischen Landeshauptstadt Graz wurde bereits für die eHYD-Station Graz Andritz, die am nördlichen Ende des Stadtgebiets liegt, die SRI-Berechnung durchgeführt. Es liegt aber auch noch eine weitere Langzeitregenserie näher dem Stadtzentrum, die Station Annabach, mit einer Serienlänge von 25 Jahren vor. In weiterer Folge wurde auch für die Station Graz Annabach Starkregenindizes und SRI-Kurven (siehe Abbildung 4-7) erzeugt, um im Anschluss einen Vergleich der beiden Indizes und Kurven vollziehen zu können. Hier ist gut zu erkennen, dass die Kurve der Station Andritz geringfügig höher liegt und dementsprechend mehr Niederschlag fallen muss, damit dieser SRI erreicht wird. Daraus kann wiederum geschlossen werden, dass in Andritz statistisch mehr Niederschlag fällt als in Annabach.

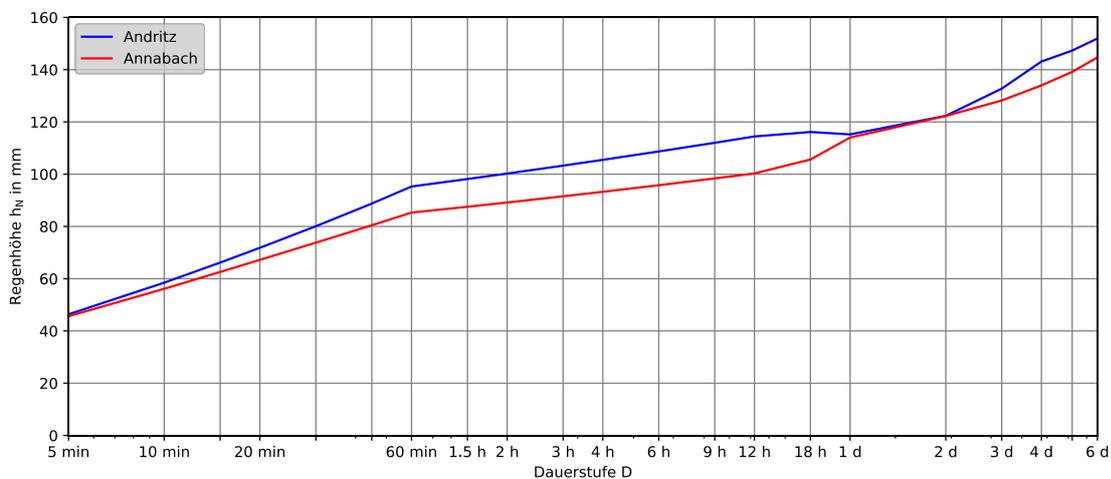


Abbildung 4-7 SRI 7, Methode Krüger und Pfister

Aus der Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 kann entnommen werden, dass es kleine Abweichungen der Stationen hinsichtlich des SRI gibt, beispielsweise ist der SRI bei einer Dauerstufe von 15 Minuten und einer Wiederkehrzeit von 25 Jahren bei Graz Andritz ② hingegen bei Annabach nur ①.

Tabelle 4-6 SRI-Matrix, Graz Andritz

Dauer in Minuten	Wiederkehrzeit in Jahren										
	1	2	3	5	10	20	25	30	50	75	100
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2
15	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3
20	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3
30	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	4
45	0	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5
60	0	1	1	1	2	3	3	3	4	5	5
90	0	1	1	1	2	3	3	3	4	5	6
120	0	1	1	1	2	3	3	4	4	5	6
180	0	1	1	1	2	3	4	4	5	6	6
240	0	1	1	2	2	3	4	4	5	6	6
360	0	1	1	2	3	4	4	4	5	6	7
540	0	1	1	2	3	4	4	5	6	7	7
720	0	1	1	2	3	4	4	5	6	7	8
1080	0	1	1	2	3	4	5	5	6	7	8
1440	0	1	2	2	3	4	5	5	6	7	8
2880	1	1	2	3	4	5	5	6	7	8	9
4320	1	1	2	3	4	6	6	7	8	9	10
5760	1	1	2	3	5	6	7	8	9	11	12
7200	1	2	2	3	5	7	7	8	10	11	12
8640	1	2	2	3	5	7	8	8	10	12	12

Tabelle 4-7 SRI-Matrix, Graz Annabach

Dauer in Minuten	Wiederkehrzeit in Jahren										
	1	2	3	5	10	20	25	30	50	75	100
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2
15	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2
20	0	0	1	1	1	2	2	2	2	2	3
30	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	3
45	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3	4
60	0	1	1	1	2	2	3	3	3	4	4
90	0	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5
120	0	1	1	1	2	3	3	3	4	4	5
180	0	1	1	1	2	3	3	3	4	4	5
240	0	1	1	1	2	3	3	3	4	5	5
360	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
540	0	1	1	2	2	3	4	4	5	5	6
720	0	1	1	2	3	3	4	4	5	5	6
1080	0	1	1	2	3	4	4	4	5	6	7
1440	0	1	1	2	3	4	5	5	6	7	8
2880	0	1	2	2	4	5	5	6	7	8	9
4320	1	1	2	3	4	5	6	6	8	9	10
5760	1	1	2	3	4	6	6	7	8	10	11
7200	1	1	2	3	4	6	7	7	9	10	11
8640	1	2	2	3	5	7	7	8	10	11	12

## Ergebnisse

Folgend wird das Regenereignis von 16.04.2018 mittels Starkregenindex analysiert. Für Graz stehen zusätzliche Niederschlagsmessdaten zur Verfügung (siehe Abbildung 4-8). Hierbei handelt es sich um 16 weitere Niederschlagsmessstationen in Graz und Umgebung. Da jedoch vier von diesen Messstationen zum Zeitpunkt des Ereignisses noch nicht bzw. nicht mehr in Betrieb waren, sind diese bei der Auswertung nicht berücksichtigt worden.

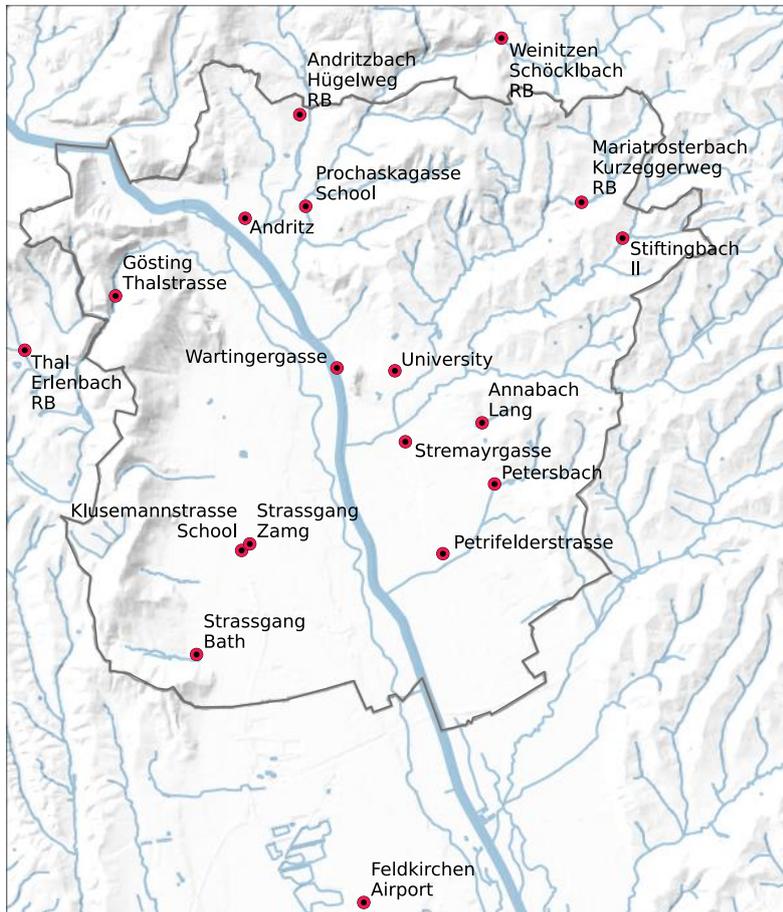


Abbildung 4-8 Regenmessstationen in Graz

Die erste Messstation, bei welcher Regen gemessen wurde, war jene in Feldkirchen am Flughafen um 13:00 Uhr. Der Regen breitete sich dann gegen Norden aus. In der Tabelle 4-8 und Tabelle 4-9 sind die Regenhöhen der einzelnen Messstationen dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Messstation „Strassgang Zamg“ die größte Regenmenge gemessen hat. Bei der Station „Mariatrosterbach“ hingegen kam es zu keinem gemessenen Niederschlag.

Tabelle 4-8 Regenhöhen des Ereignisses am 16.04.2018

Dauer	Wartinger-	Mariatroster-			Feldkirchen	Strassgang	Andritz	Prochaska-
	gasse	Petersbach	bach	Flughafen	Zamg	gasse		
5	7,6	2,2	0,0	8,6	14,4	4,0	3,2	
10	12,5	3,7	0,0	13,5	20,8	6,7	5,8	
15	15,3	4,5	0,0	17,6	26,4	10,0	8,5	
20	18,2	5,2	0,0	20,6	30,0	13,1	10,5	
30	25,7	7,0	0,0	25,9	39,8	18,4	13,4	
45	34,3	9,2	0,0	30,1	48,7	24,6	17,5	
60	39,1	9,6	0,0	35,2	52,0	28,0	21,8	
90	52,9	10,3	0,0	43,0	60,8	33,0	29,4	
120	60,0	11,5	0,0	46,2	74,0	37,6	33,8	
180	63,9	17,0	0,0	54,4	80,0	40,7	36,6	
240	68,2	17,8	0,0	57,9	84,4	46,4	42,9	
360	74,5	18,4	0,0	64,2	90,7	51,6	49,0	
540	75,3	18,7	0,0	67,1	92,0	52,5	49,4	
720	77,1	20,3	0,0	69,4	94,1	54,2	50,3	
1080	78,3	21,3	0,0	70,1	94,6	54,5	50,6	
1440	78,4	21,3	0,0	70,3	95,1	55,0	50,7	
2880	79,6	22,2	0,0	71,6	96,4	56,1	51,6	
4320	79,6	22,2	0,0	71,6	96,4	56,1	51,6	
5760	80,9	22,7	0,0	71,7	96,9	57,3	54,1	
7200	89,6	30,1	0,0	80,2	105,7	65,1	60,4	
8640	89,6	30,1	0,0	80,2	105,7	65,1	60,4	

Tabelle 4-9 Regenhöhen des Ereignisses am 16.04.2018

Dauer	Weintzen	Stremayr-	Strassgang	Universität	Annabach	Petrifelder-	Gösting
		gasse	Bad			straße	
5	1,4	3,0	1,9	2,9	1,2	3,1	1,7
10	1,8	4,8	2,8	4,6	2,1	4,4	2,5
15	2,2	6,2	4,0	5,7	2,7	5,1	3,7
20	2,3	7,5	4,3	6,3	3,7	5,9	4,3
30	2,7	8,6	4,9	7,3	4,7	7,2	4,7
45	3,9	10,8	7,2	9,3	6,9	9,9	5,8
60	4,1	13,2	8,8	12,5	7,5	11,5	6,9
90	5,4	20,4	11,2	18,0	8,1	13,7	8,5
120	5,5	24,0	14,3	19,9	9,1	15,1	9,9
180	8,3	27,2	17,9	22,6	15,6	21,5	12,5
240	10,5	34,9	20,0	29,5	16,5	25,8	18,2
360	10,5	37,5	26,4	32,5	17,4	28,7	21,5
540	11,0	37,9	27,7	33,1	18,0	29,3	22,3
720	11,9	39,2	28,7	34,9	19,1	30,5	23,7
1080	12,1	41,5	30,1	36,6	19,8	33,0	24,4
1440	12,2	41,5	30,5	36,7	19,9	33,1	24,8
2880	13,0	42,6	31,6	38,1	20,9	34,2	25,9
4320	13,0	42,6	31,6	38,1	20,9	34,2	25,9
5760	15,5	42,6	33,0	38,1	22,1	34,2	26,5
7200	20,7	50,2	40,0	47,2	29,1	42,6	33,9
8640	20,7	50,2	40,0	47,2	29,1	42,6	33,9

## Ergebnisse

Mithilfe der Regendaten wurden zwei SRI-Auswertungen einerseits mit der Starkregenstatistik von Andritz und andererseits mit jener von Annabach durchgeführt. Zu erkennen ist, dass wie erwartet mit der Starkregenstatistik von Annabach höhere SRI-Werte erreicht werden (Tabelle 4-10 und Tabelle 4-11).

Tabelle 4-10 SRI mit Starkregenstatistik Andritz

Dauer	Wartinger- gasse	Petersbach	Mariatroster- bach	Feldkirchen Flughafen	Strassgang Zamg	Andritz	Prochaska- gasse	Weinitzen	Stremayr- gasse	Strassgang Bad	Universität	Annabach	Petriefelder- straße	Gösting
5	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	1	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	1	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
60	1	0	0	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0
90	2	0	0	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
120	2	0	0	1	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
180	3	0	0	2	4	1	1	0	1	0	0	0	0	0
240	3	0	0	2	5	1	1	0	1	0	1	0	0	0
360	3	0	0	2	5	1	1	0	1	0	1	0	0	0
540	3	0	0	2	5	1	1	0	1	0	0	0	0	0
720	3	0	0	2	5	1	1	0	1	0	0	0	0	0
1080	3	0	0	2	5	1	1	0	1	0	0	0	0	0
1440	3	0	0	2	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2880	2	0	0	2	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4320	2	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5760	1	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7200	2	0	0	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
8640	2	0	0	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 4-11 SRI mit Starkregenstatistik Annabach

Dauer	Wartinger- gasse	Petersbach	Mariatroster- bach	Feldkirchen Flughafen	Strassgang Zamg	Andritz	Prochaska- gasse	Weintzen	Stremayr- gasse	Strassgang Bad	Universität	Annabach	Petriefelder- straße	Gösting
5	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	1	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
45	1	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
60	1	0	0	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
90	3	0	0	2	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
120	3	0	0	2	5	1	1	0	1	0	0	0	0	0
180	4	0	0	2	6	1	1	0	1	0	0	0	0	0
240	4	0	0	3	6	2	1	0	1	0	1	0	0	0
360	4	0	0	3	7	2	2	0	1	0	1	0	0	0
540	4	0	0	3	7	2	1	0	1	0	1	0	0	0
720	4	0	0	3	7	2	1	0	1	0	1	0	0	0
1080	4	0	0	3	6	1	1	0	1	0	0	0	0	0
1440	3	0	0	2	5	1	1	0	1	0	0	0	0	0
2880	2	0	0	2	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4320	2	0	0	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5760	2	0	0	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
7200	2	0	0	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
8640	2	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Die Medienberichte hätten weit höherer SRI-Werte vermuten lassen.

Durch die Wassermassen wurde das Einkaufszentrum „Citypark“ schwer in Mitleidenschaft gezogen (Abbildung 4-9), auch ein Wohnhaus war aufgrund dessen einsturzgefährdet. Weiters kam es zu lokalen Überflutungen (Abbildung 4-10). (Kloiber, 2018)



Abbildung 4-9 Wassereintritt im Einkaufszentrum „Citypark“ (Kloiber, 2018)



Abbildung 4-10 Der Mühlgang trat in der Herrgottwiesgasse über die Ufer, Autos und Bim mussten im Wasser fahren Foto © Facebook/Aktuelle Wetterwarnungen für Österreich (Kloiber, 2018)

Maier et al. (2020) hat dieses Regenereignis hinsichtlich der räumlichen Variabilität untersucht. Hierfür wurde eine zusätzliche Regenmessungen, welche nur die tägliche Niederschlagssumme aufzeichnet, herangezogen. Bei dieser wurden 163 mm Regen gemessen. In Abbildung 4-11 ist deutlich zu erkennen, dass erst durch Hinzufügen einer weiteren Niederschlagsmessstation das wahre Ausmaß abgebildet werden kann.

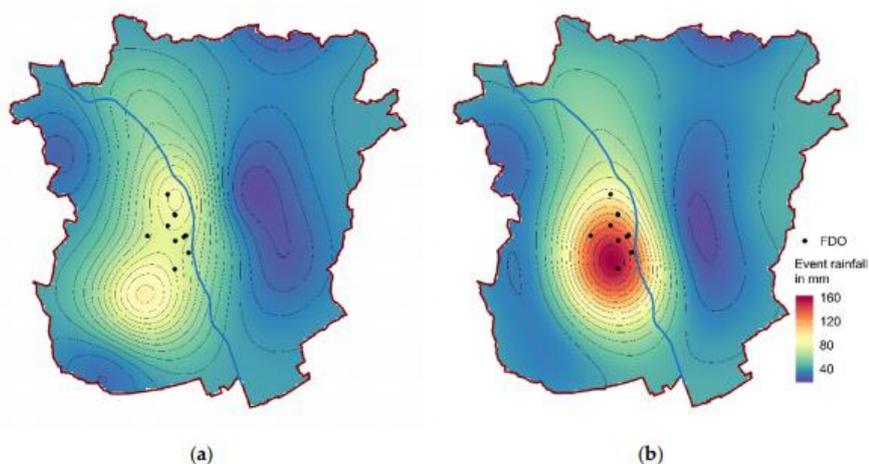


Abbildung 4-11 Niederschlagshöhen in mm, a) bezogen auf die vorhandenen Niederschlagsmessstationen, b) inklusive zusätzlicher Regenmessungen (tägliche Niederschlagssumme), FDO sind die protokollierten Feuerwehreinsätze (Maier et al., 2020)

Der Starkregenindex der zusätzlichen Messstation ist sowohl mit der Starkregenstatistik aus Andritz aber auch mit jener aus Annabach <sup>(12)</sup>. In Abbildung 4-12 sind die Starkregenindexkurven (Starkregenstatistik der Station Andritz) gezeigt. Die blauen Punkte stellen die maximalen SRI der 14 verfügbaren Messstationen dar. Der schwarze Punkt zeigt den SRI für die zusätzliche Messstation.

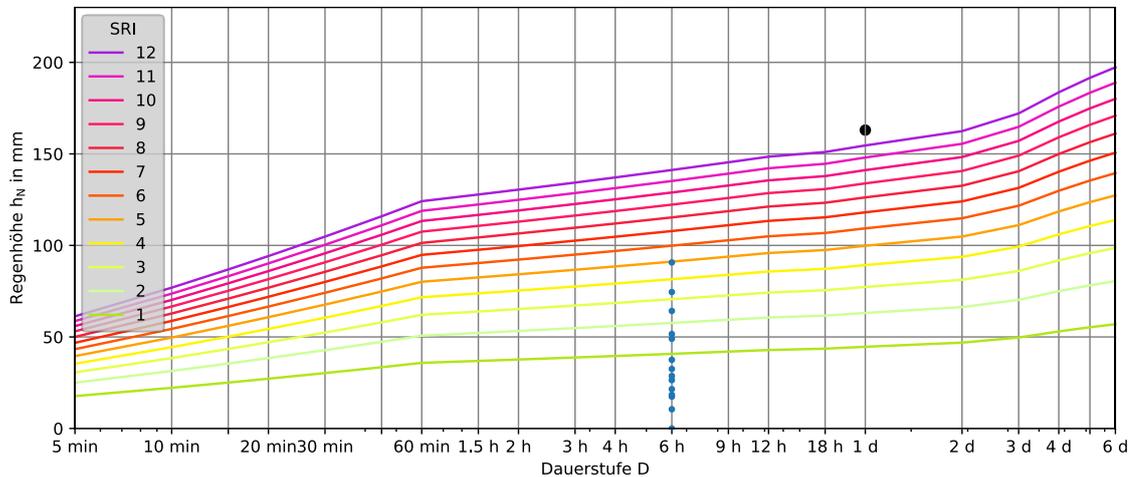


Abbildung 4-12 SRI-Kurven mit den Regenmessstationen und der zusätzlichen Messung



## **5 Schlussfolgerungen, Zusammenfassung und Ausblick**

Durch die Tendenz der Zunahme von Starkregenereignissen (Stocker et al., 2017) wird es nötig, sich mit der Prämisse auseinanderzusetzen was ein Entwässerungssystem leisten können muss und auch wie künftig mit dem Auftreten von extremen Niederschlagsereignissen umgegangen wird.

Die Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen ist jedenfalls nicht auf Starkregenereignisse mit entsprechenden Wiederkehrperioden ausgelegt, dies wäre auch in keinem Fall wirtschaftlich. Der erforderliche Überflutungsschutz gilt als klares Bewertungskriterium für die hydraulische Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen. Bei Betrachtung dieser Anforderungskriterien kann festgestellt werden, dass Regenereignisse mit Wiederkehrzeiten größer als 100 Jahren keine Beachtung finden. Demzufolge bleibt ein Restrisiko, welches entsprechend kommuniziert werden will, bestehen. Da sich nach Definition das Risiko aus der Verknüpfung von Überflutungsgefährdung und Schadenspotenzial zusammensetzt, ist es unerlässlich, für eine erfolgreiche Risikobewertung ein Augenmerk auf die Überflutungsgefährdung und auf das möglich entstehende Schadenspotenzial zu legen. In sogenannten Risikokarten fließen die Erkenntnisse aus der Analyse der Überflutungsgefährdung und der des Schadenspotenzials zusammen. (DWA-M 119, 2016)

Mit der Risikokommunikation hinsichtlich der Überflutungsgefährdung soll ein Risikobewusstsein geschaffen werden und eine entsprechende Informationsweitergabe erfolgen. Zu der Zielgruppe zählen nicht nur Fachplaner und kommunale Entscheidungsträger, auch Planungsverbände, Grundstückseigentümer und die Bevölkerung sollen hinsichtlich Möglicher Risiken adäquat in Kenntnis gesetzt werden. Zum einen ist es notwendig, hinsichtlich der möglichen Gefahren Aufklärung zu betreiben, dass schon vor Eintreten eines schweren Niederschlagsereignisses Maßnahmen getroffen werden können, andererseits ist auch die Kommunikation nach dem Auftreten eines solchen Ereignisses gefordert. (DWA-M 119, 2016)

Aktuell wird häufig mit der statistischen Wiederkehrzeit eines Regenereignisses kommuniziert. Da sich die Frage der Verständlichkeit dieser Kommunikationsweise stellt, hat Grisa, 2013 einen Vorschlag erbracht, künftig jene Regenereignisse anhand eines dimensionslosen Index, dem SRI, aufgrund der Schwere des jeweiligen Ereignisses zu vermitteln.

Im deutschsprachigen Raum wurde dieser Gedanke aufgegriffen und weitere Möglichkeiten hinsichtlich des SRI generiert. So wird die von Grisa entwickelte Formel von Krüger und Pfister aufgenommen, mit welcher es möglich ist, anhand der statistischen Wiederkehrzeit, der Regendauer und der Niederschlagshöhe

einen SRI zu berechnen. Durch die Umstellung jener Formel hinsichtlich der Niederschlagshöhe können sogenannte SRI-Kurven erzeugt werden. Durch Miteinbeziehung der Wiederkehrperiode und der Dauerstufe wird der SRI nach Mudersbach berechnet. Bei Schmitt erfolgt die Einteilung ausschließlich aufgrund der Wiederkehrzeit bis inklusive des SRI 7. Ab SRI 8 erfolgt eine Berechnung der möglichen Regenhöhen mittels Erhöhungsfaktoren. Da das Instrument der SRI-Kurven ein gutes Vergleichsmittel ist, wurde dies auch für die Methoden nach Mudersbach und Schmitt umgesetzt.

Verglichen wurden sowohl die einzelnen Verfahren untereinander, als auch Regendaten unterschiedlicher österreichischer Städte. Es konnte festgestellt werden, dass es gewisse Merkmale der Verfahren gibt, die sich stadtunabhängig wiederholen. Beim Vergleich der einzelnen Städte kann festgestellt werden, dass der Starkregenindex sehr stark von der Starkregenstatistik abhängt, aber auch, dass der Parameter der durchschnittlichen Jahresniederschlagssumme ein guter Hinweis auf die SRI-Kurven gibt. Grob kann festgehalten werden, dass in einer Stadt mit häufigen Niederschlagsereignissen tendenziell höhere SRI-Kurven auftreten.

Eine Zuordnung konkreter Regenereignisse zeigte, dass das Mittel der Risikokommunikation mittels SRI durchaus geeignet sein kann. Dennoch sei auf die mögliche Eigenschaft von Starkregenereignissen hinsichtlich des ausgeprägten lokalen Merkmals dieser Ereignisse hingewiesen. Vor allem das betrachtete Regenereignis aus Wien stellt hier ein gutes Beispiel dar.

Ein österreichweit einheitlicher Starkregenindex ist aufgrund der unterschiedlichen Klimaprovinzen und des divergierenden Niederschlagsverhaltens nicht sinnvoll.

Damit das System des SRI in der Bevölkerung ankommt, muss es entsprechend vermittelt werden. Wichtig wäre zum einen nicht die wahllose Verwendung des Begriffs des Starkregens und zum anderen auch die Einführung des SRI. So könnten Themenschwerpunkte, wie sie auch schon beispielsweise hinsichtlich des Klimawandels und ähnlicher Themen im ORF besprochen werden. Nach Auftreten eines entsprechenden Ereignisses kann der SRI medial kommuniziert werden. Sicher wird nicht innerhalb kürzester Zeit die gesamte Bevölkerung eine Vorstellung von dem Begriff SRI haben, dennoch könnte er sich mit der Zeit etablieren. Vor allem die Missverständnisse hinsichtlich der Kommunikation mittels Wiederkehrzeiten könnte durch die Etablierung der SRI vermieden werden.

---

## Literaturverzeichnis

- Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) (2021). eHYD. [online] <https://ehyd.gv.at/> (Zugegriffen 16. Februar 2021).
- Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) (2017). Hydrografisches Jahrbuch. [online] <https://wasser.umweltbundesamt.at/hydjb/> (Zugegriffen 16. Februar 2021).
- Draschoff R. (1972). Häufigkeitsanalyse Langfristiger Niederschlagsbeobachtungen Als Grundlage Der Abflußstatistik Kleiner Vorfluter. (Mitteilungen Aus Dem Institut Für Wasserwirtschaft, Hydrologie Und Landwirtschaftlichen Wasserbau Der Technischen Universität Hannover, Hrsg.), Hannover.
- DWA-A 531 (2012). Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.
- DWA-M 119 (2016). Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei starkregen, Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.
- DWA-T1 (2013). Starkregen und urbane Überflutungen - Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge, Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.
- DWD (2005). Starkniederschlagshöhen für die Bundesrepublik Deutschland - Kostra-DWD-2000. [online] [https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/wasserwirtschaft/kooperationen/kostra/fortschreibung\\_pdf.pdf%3F\\_\\_blob%3DpublicationFile%26v%3D3](https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/wasserwirtschaft/kooperationen/kostra/fortschreibung_pdf.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D3) (Zugegriffen 24. Juni 2020).
- DWD (2020). Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst. [online] <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html> (Zugegriffen 24. Juni 2020).
- DWD (2021a). Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst. [online] <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101334&lv3=101434> (Zugegriffen 17. März 2021).
- DWD (2021b). Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst. [online] <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html;jsessionid=4C40057AB318AD8D38D85865621EA486.live31084?lv2=101334&lv3=101432> (Zugegriffen 17. März 2021).
- ehyd-tools (0.1.dev10) (2021). [Python, Programmbibliothek]. [online] <https://pypi.org/project/ehyd-tools>.
- Fridrich C., Kulhanek-Wehlend G., Bozkaya D., Chreiska-Höbinger C., Seli M., & Sonnleitner J. (2016). unterwegs 3, Schulbuch. [online] <https://www.oebv.at/flippingbook/9783209079312/24/#zoom=z> (Zugegriffen 11. März 2021).

- Fuchs L. (1983). Plotting Positions für die Extremal-I-Verteilung - Monte Carlo Untersuchung von Plotting Formeln.
- Schimpf, H (1970). Untersuchung über das Auftreten beachtlicher Niederschläge in Österreich. Österreichische Wasserwirtschaft, Jg. 22, Heft 5/6:121-127
- Gao J., Weinmeister H. W., & Lang E. (2000). Ermittlungen der Starkregenhöhen in Abhängigkeit von Regendauer und Jährlichkeit im Einzugsgebiet des Gradenbaches / Österreich. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2002 – VILLACH / ÖSTERREICH.
- Grisa T. M. (2013). Relabeling Extreme Rainfall Events so the Public Understands Their Severity. Proceedings of the Water Environment Federation, 2013(18), 1335–1345.
- heavy\_rain\_index (2021). [online] [https://github.com/MarkusPic/heavy\\_rain\\_index](https://github.com/MarkusPic/heavy_rain_index) (Zugegriffen 21. März 2021).
- HWRM-RL (2007). Hochwasserrisikomanagementrichtlinie: 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.
- idf-analysis (0.1.11.post21) (2021). [Python, Programmbibliothek]. [online] <https://pypi.org/project/idf-analysis>.
- Illgen M. (2015). „Kommunale Überflutungsvorsorge: von der Pflichtaufgabe zum aktiven Risikomanagement“. Wassertage Münster.
- Jochen Stemplewski G. J. Patricia Bender und Björn Grün (Essen) (2015). Das Projekt „Stark gegen Starkregen“. Das Projekt „Stark gegen Starkregen“, 2015(2), 108–114.
- Wussow, G., 1922: Untere Grenzwerte dichter Regenfälle. Meteorol. Z., 39, 173-178. Kahlig P. (1993). On deterministic criteria for heavy rainfall at a point. Theoretical and Applied Climatology, 46(4), 203–208.
- Kloiber M. (2018). Einsatzreiche Nacht nach Starkregen: Grazer Citypark unter Wasser, Wohnhaus drohte einzustürzen. [www.kleinezeitung.at](http://www.kleinezeitung.at). [online] <https://www.kleinezeitung.at/steiermark/graz/5406944/> (Zugegriffen 19. März 2021).
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., & Rubel F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, 15(3), 259–263.
- Krüger M. & Pfister A. (2016). Anwendung von Starkregenindex-Verfahren zur Unterstützung der Risikokommunikation in der Emscher-Lippe-Region. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 9 (7), 2016, 412–419.
- Leitner S., Maier R., Jöbstl C., & Hornich R. (2019). Modellbasierte urbane Überflutungsvorsorge.

- Maier R., Krebs G., Pichler M., Muschalla D., & Gruber G. (2020). Spatial Rainfall Variability in Urban Environments—High-Density Precipitation Measurements on a City-Scale. *Water*, 12(4), 1157.
- Mudersbach C. (2016). Ableitung eines Starkregenindex in Abhängigkeit von Jährlichkeit und Regendauer. [online] <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.1147.8006/1> (Zugegriffen 5. Mai 2020).
- Nihad A. (2014). Hochwasser-Alarm: Autos „soffen“ in Unterführung ab. [online] <https://kurier.at/chronik/wien/hochwasser-alarm-autos-soffen-in-unter-fuehrung-ab/67.171.839> (Zugegriffen 12. März 2021).
- Schattleitner C. (2013). Hochwasser im Ennstal. *meinbezirk.at*. [online] [https://www.meinbezirk.at/liezen/c-lokales/hochwasser-im-ennstal\\_a588354](https://www.meinbezirk.at/liezen/c-lokales/hochwasser-im-ennstal_a588354) (Zugegriffen 12. März 2021).
- Scheriau E. (2013). „Extremwetter“: Regen überschwemmt Raum Graz. *Die Presse*. [online] <https://www.diepresse.com/1399107/extremwetter-regen-uberschwemmt-raum-graz> (Zugegriffen 12. März 2021).
- Schmitt T. G. (2016). Ortsbezogene Regenhöhen im Starkregenindexkonzept SRI12 zum Anwendungskontext Risikokommunikation in DWA-M 119. Ortsbezogene Regenhöhen im Starkregenindexkonzept SRI12 zum Anwendungskontext Risikokommunikation in DWA-M 119, 2016(11), 965–967.
- Schmitt T. G. (2014). Starkregenindex zur Kommunikation von Überflutungsur-sachen und Risiken. *KW Korrespondenz Abwasser, Abfall* 61(8), 2014, 681–687.
- Schmitt T. G. (2015). Weiterentwicklung des Starkregen- index zur Verwendung in der -kommunalen Überflutungsvorsorge. *gwf - Wasser|Abwasser* 156 (7-8), 2015, 774–781.
- Schmitt T. G., Krüger M., Pfister A., Becker M., Mudersbach C., Fuchs L., Hoppe H., & Lakes I. (2018). Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkre-genereignissen mittels Starkregenindex. *Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex*, 2018(2), 113–120.
- NAGL, H. 1983: Klima- und Wasserbilanztypen Österreichs. In: *Geographischer Jahresbericht aus Österreich: 50 – 69*. Schwarz L. (2002). Kleinräumige Modellierung von Naturräumen für Österreich ausgehend von edaphischen und klimatischen Faktoren in digitaler Form.
- Stocker T., IPCC, IPCC, & Deutsche Koordinierungsstelle (2017). Klimaänderung 2013, Naturwissenschaftliche Grundlagen: Häufig gestellte Fragen und Antworten aus dem Bericht der Arbeitsgruppe I des IPCC, dem das Ple-num zugestimmt – nicht im Detail verabschiedet – hat ; Beitrag der Arbeits-gruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Aus-schusses für Klimaänderungen (IPCC), [online]

[https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutsch/IPCC\\_AR5\\_WGI\\_FAQ\\_deutsch.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutsch/IPCC_AR5_WGI_FAQ_deutsch.pdf) (Zugegriffen 12. März 2021).

Verworn H.-R. & Draschoff R. (2008). PEN-Erweiterung - Extreme. yumpu.com. [online] <https://www.yumpu.com/de/document/read/13480838/erweiterungsbericht/3> (Zugegriffen 5. Mai 2020).

WMO (2018). Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events. [online] [https://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/documents/GUIDELINESONTHEDEFINTIONANDMONITORINGOFEXTREMEWEATHERANDCLIMATEEVENTS\\_09032018.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/documents/GUIDELINESONTHEDEFINTIONANDMONITORINGOFEXTREMEWEATHERANDCLIMATEEVENTS_09032018.pdf) (Zugegriffen 5. Mai 2020).

Zwittkovits F. (1983). Klimatypen-Klimabereiche-Klimafacetten, Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

## Anhang A e-HYD Regenserien

Hier werden die ehyd-Regenserien der ausgewählten Städte grafisch über die Jahresniederschlagssumme und der darauf bezogenen Datenverfügbarkeit dargestellt.

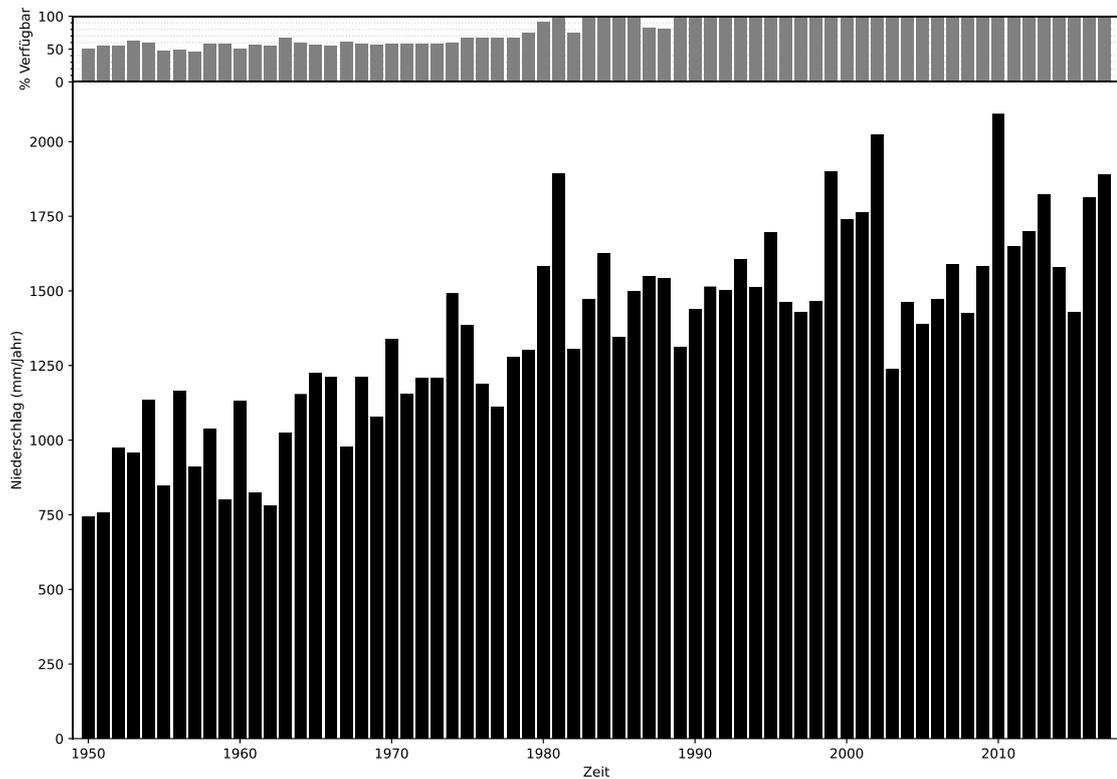


Abbildung 5-1 Bregenz

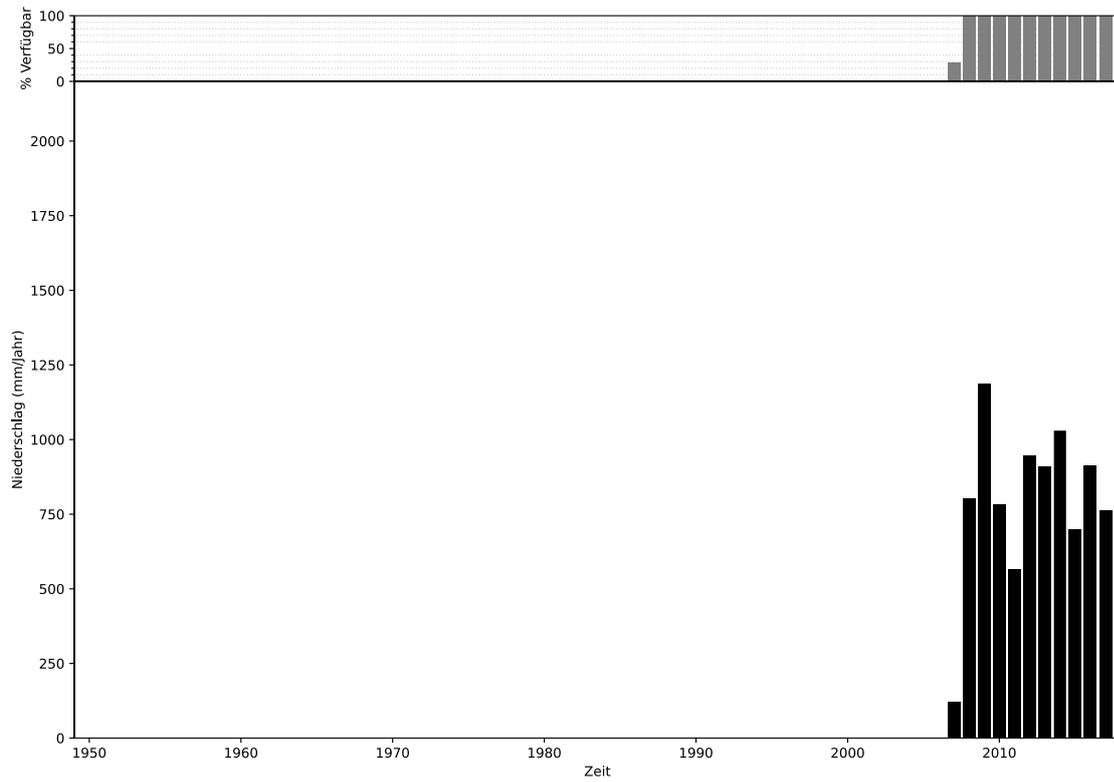


Abbildung 5-2 Graz

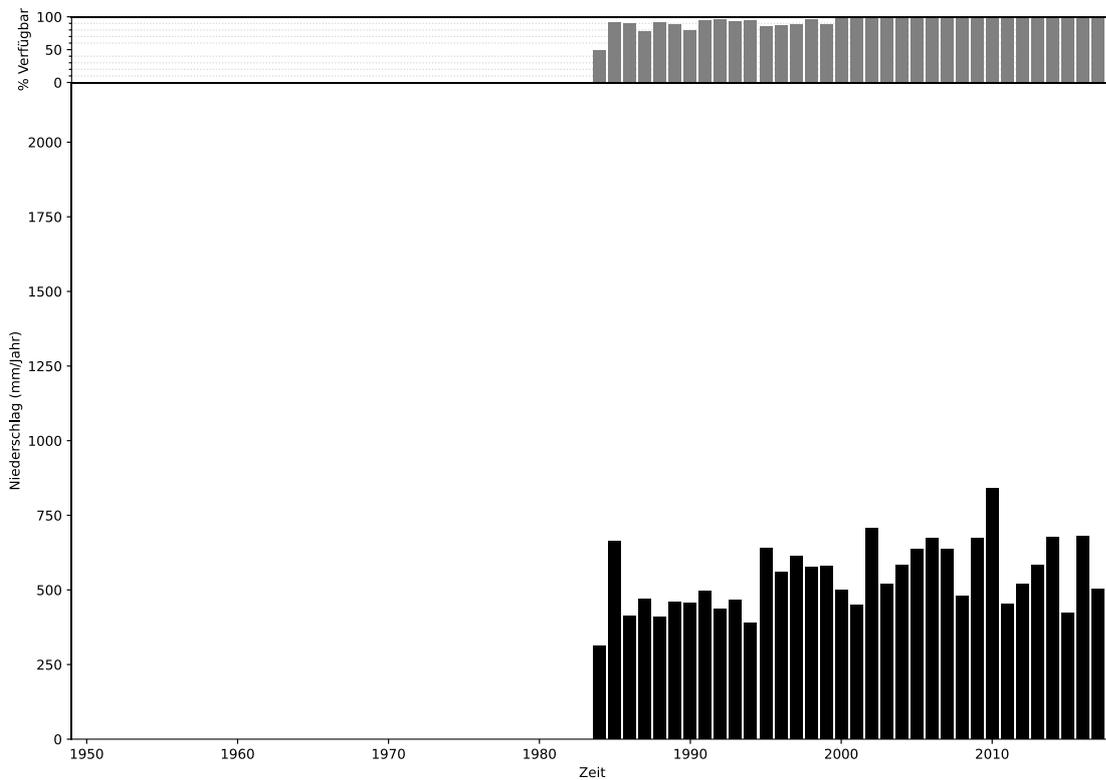


Abbildung 5-3 Hollabrunn

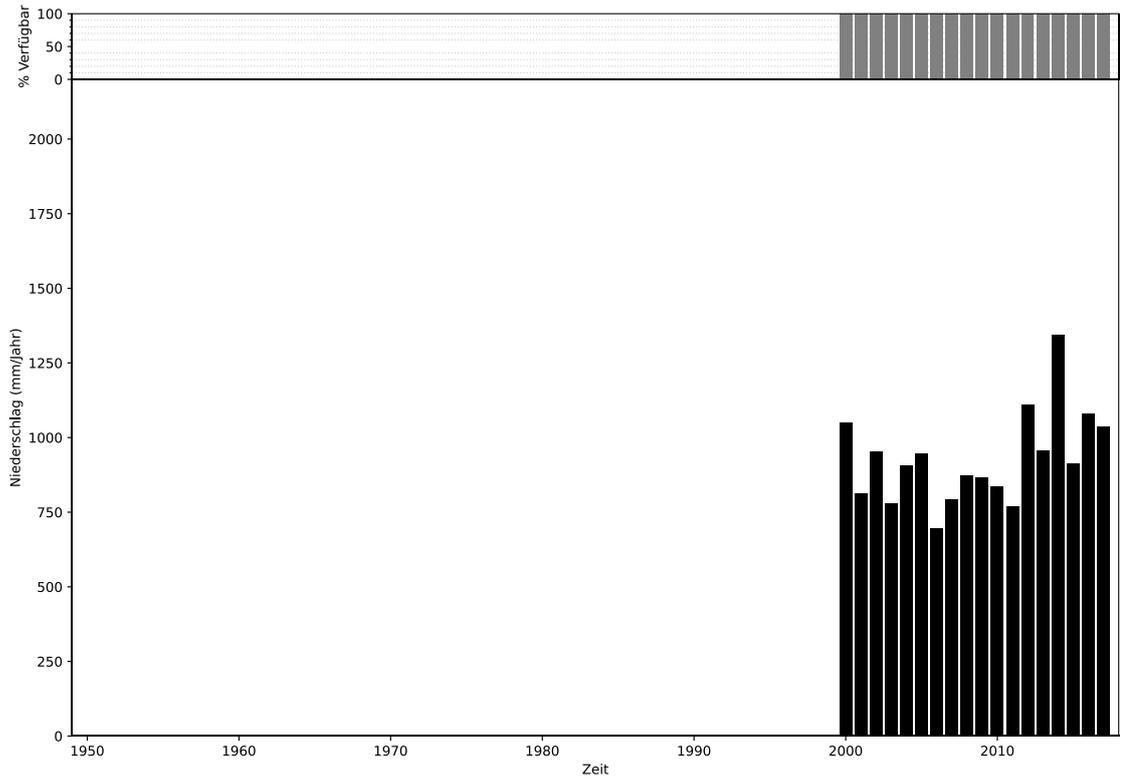


Abbildung 5-4 Klagenfurt

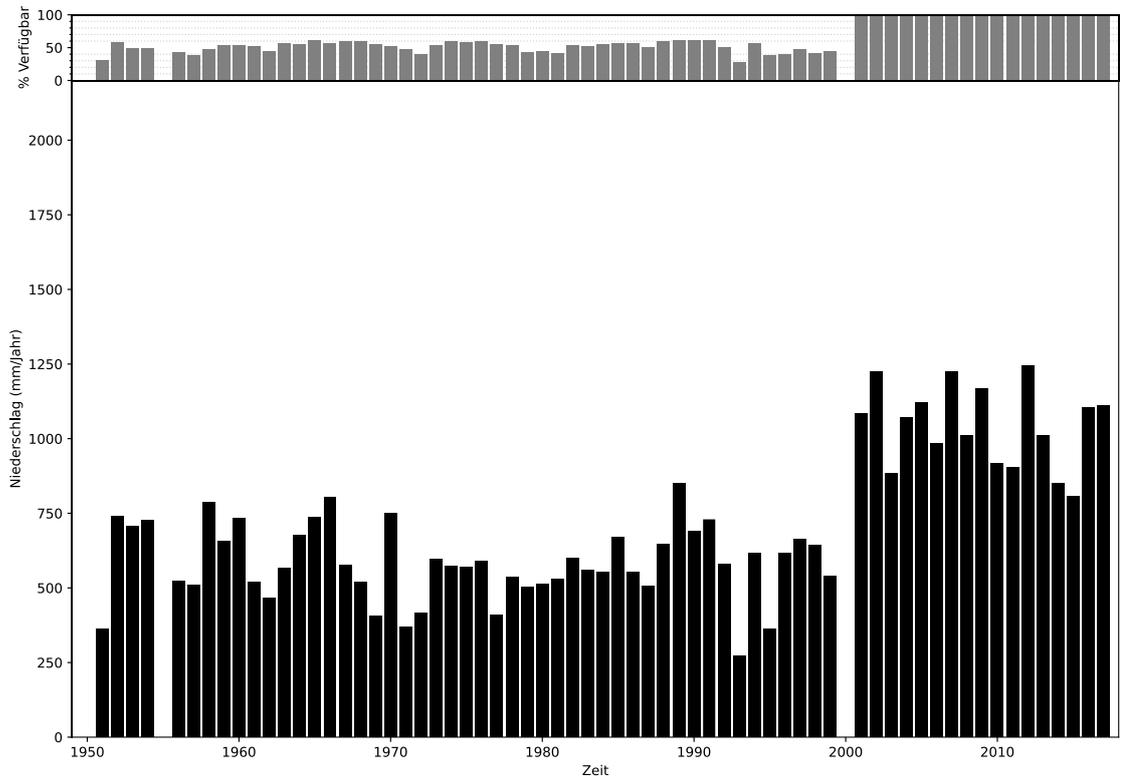


Abbildung 5-5 Liezen

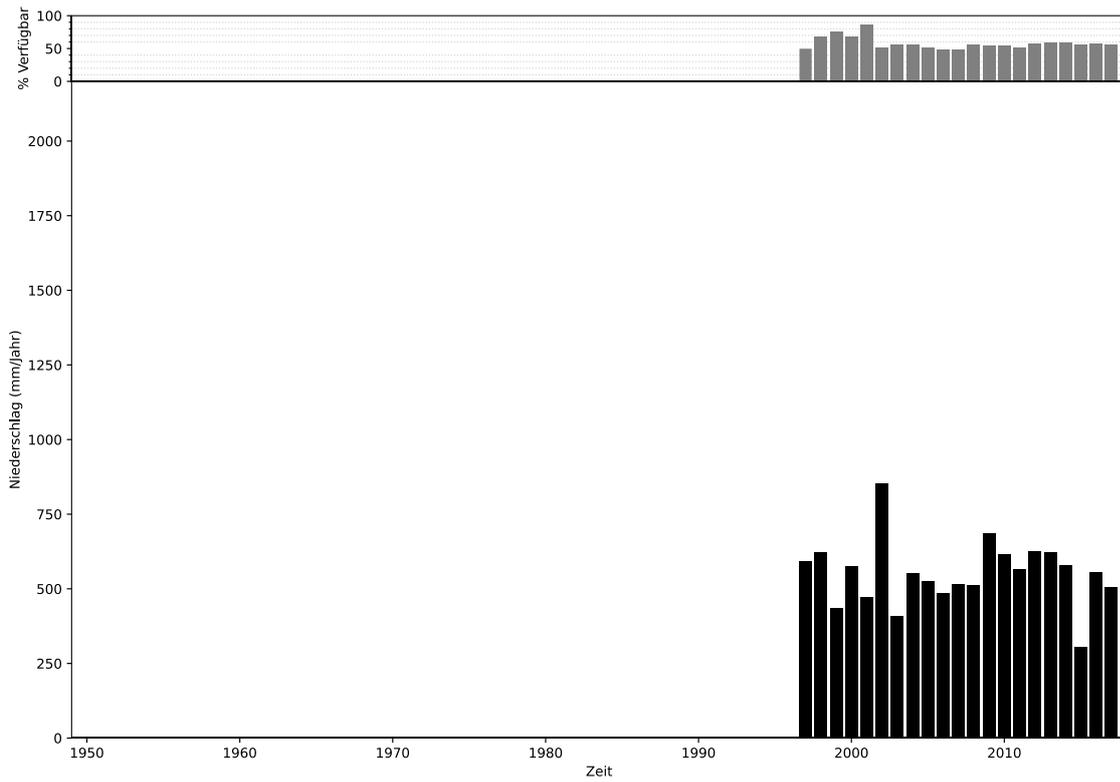


Abbildung 5-6 Linz

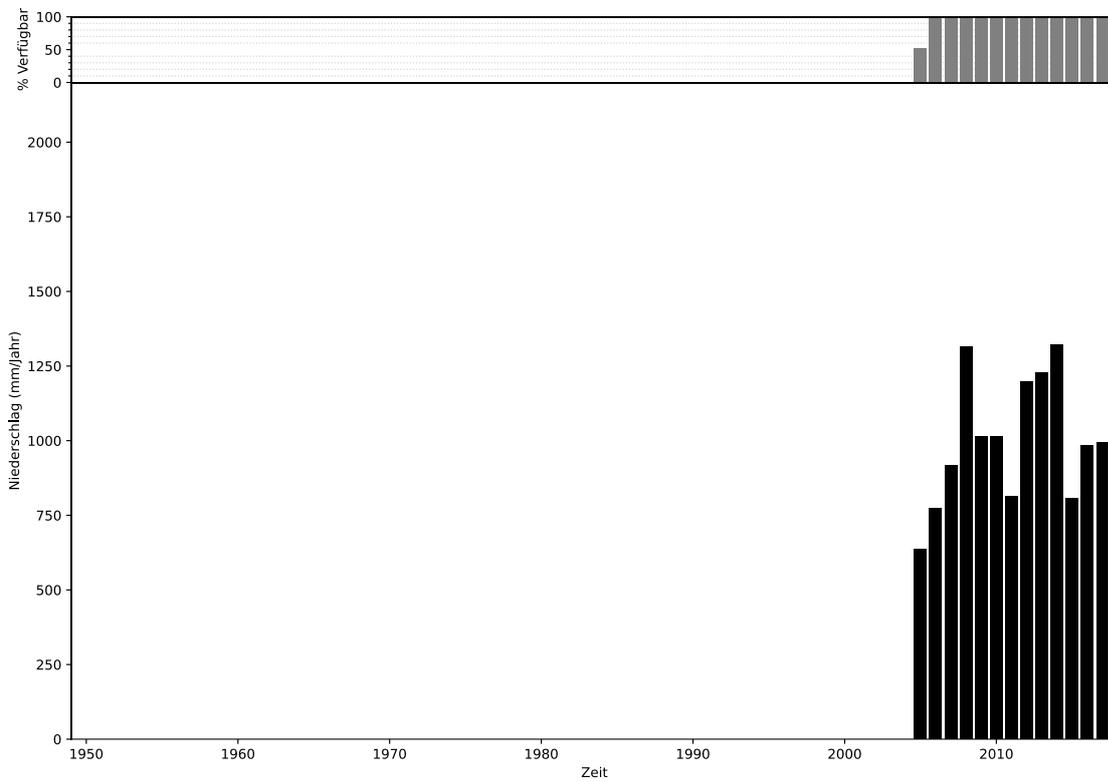


Abbildung 5-7 Sillian

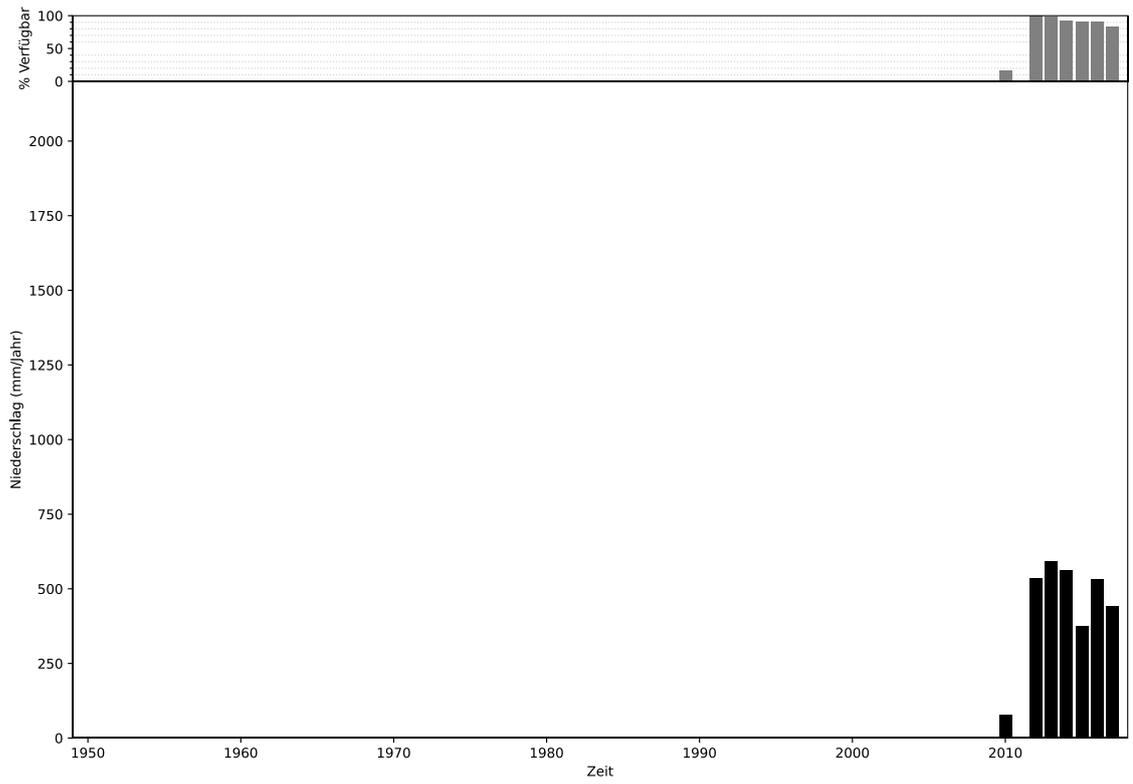


Abbildung 5-8 Wien



## Anhang B SRI-Kurven

Folgend werden alle SRI-Kurven der ausgewählten österreichischen Städte dargestellt.

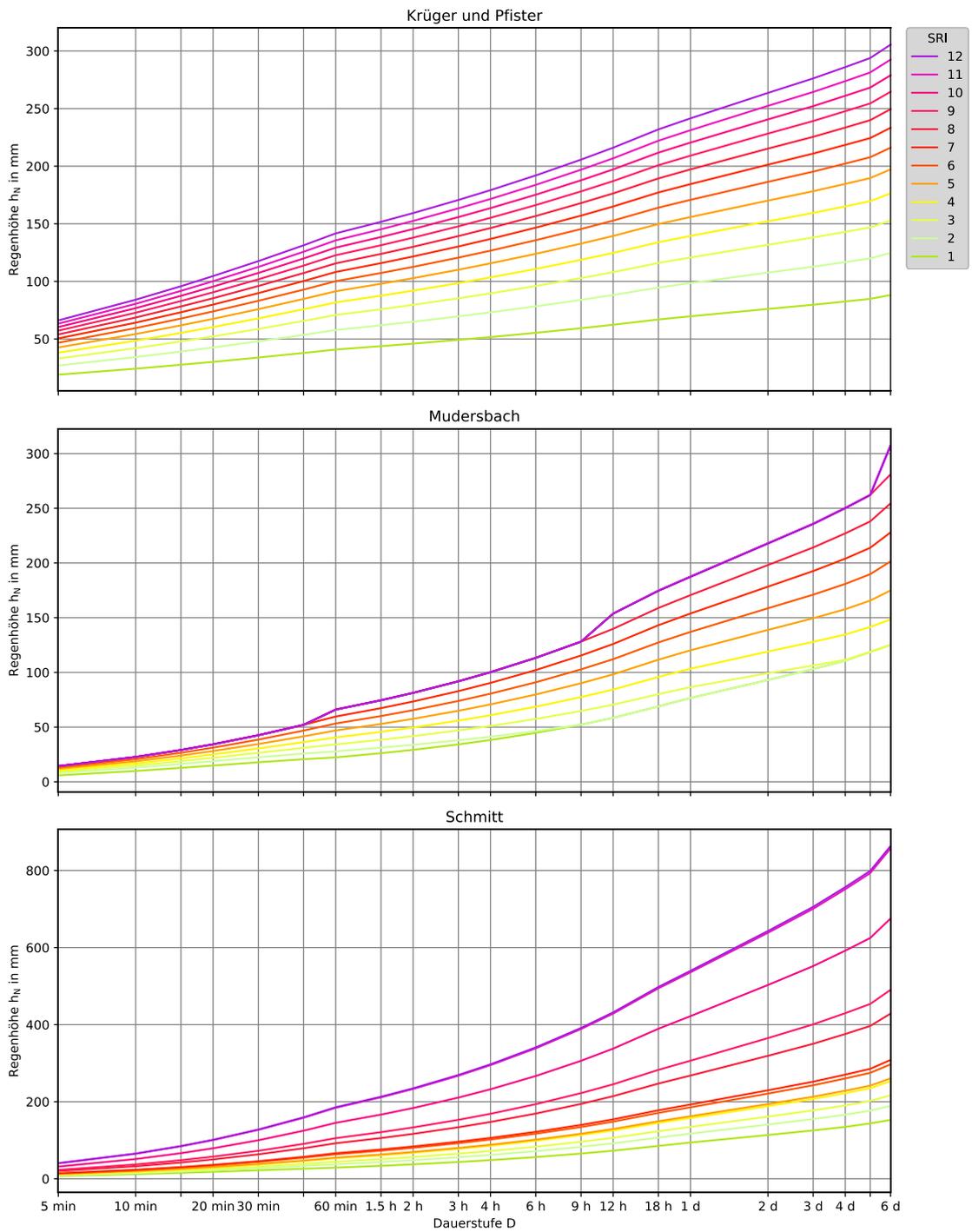


Abbildung 5-9 SRI-Kurven, Bregenz

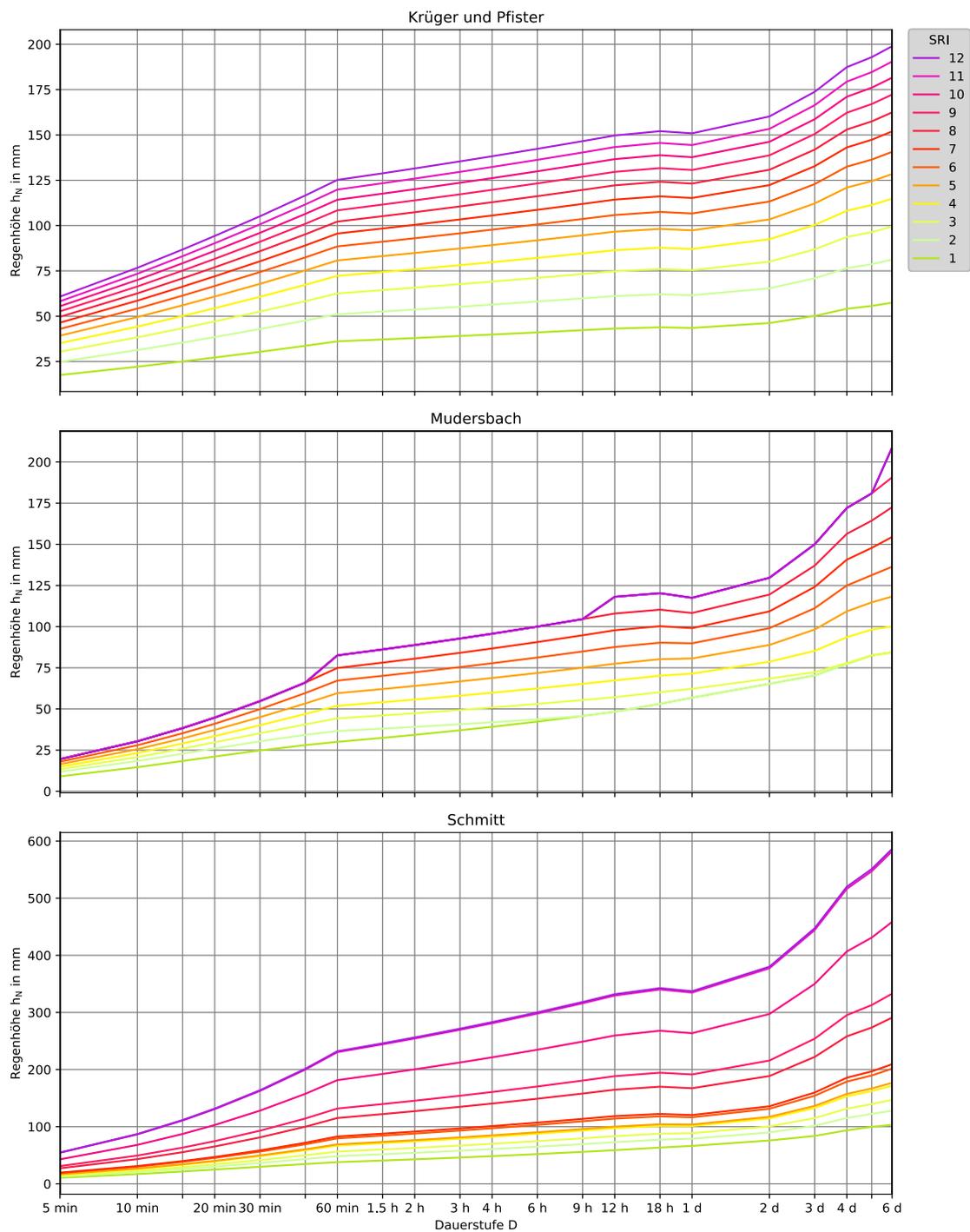


Abbildung 5-10 SRI-Kurven, Graz Andritz

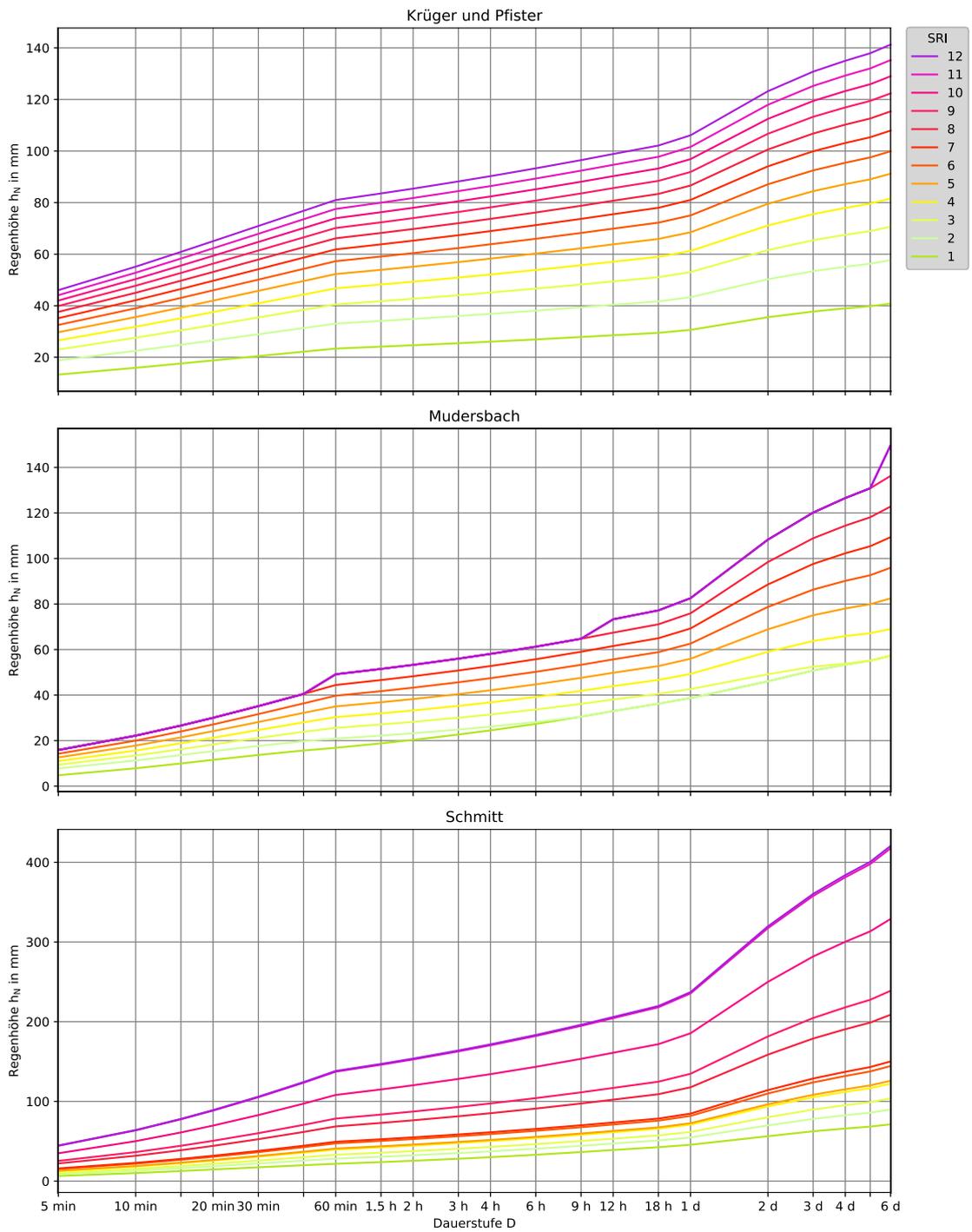


Abbildung 5-11 SRI-Kurven, Hollabrunn

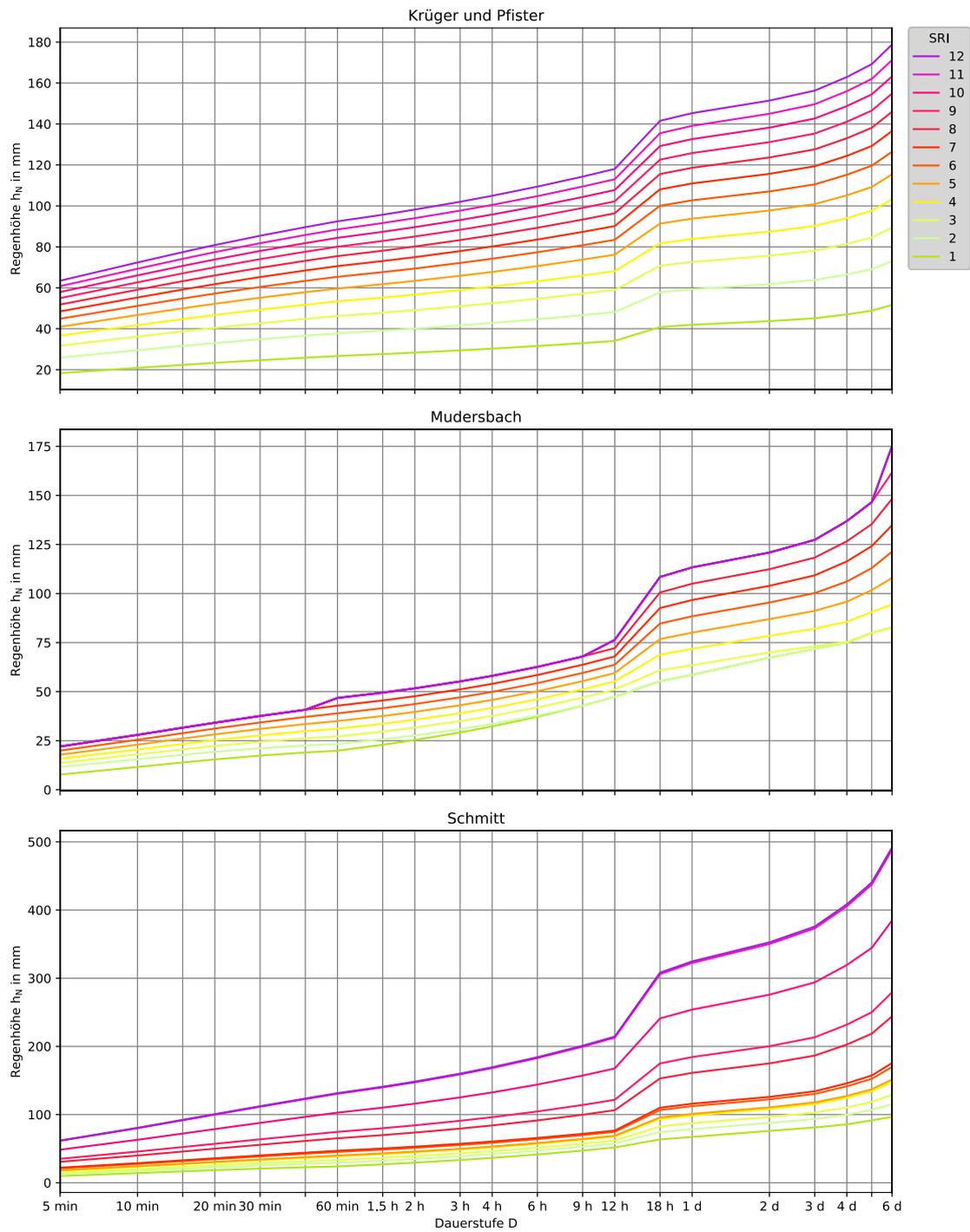


Abbildung 5-12 SRI-Kurven, Klagenfurt

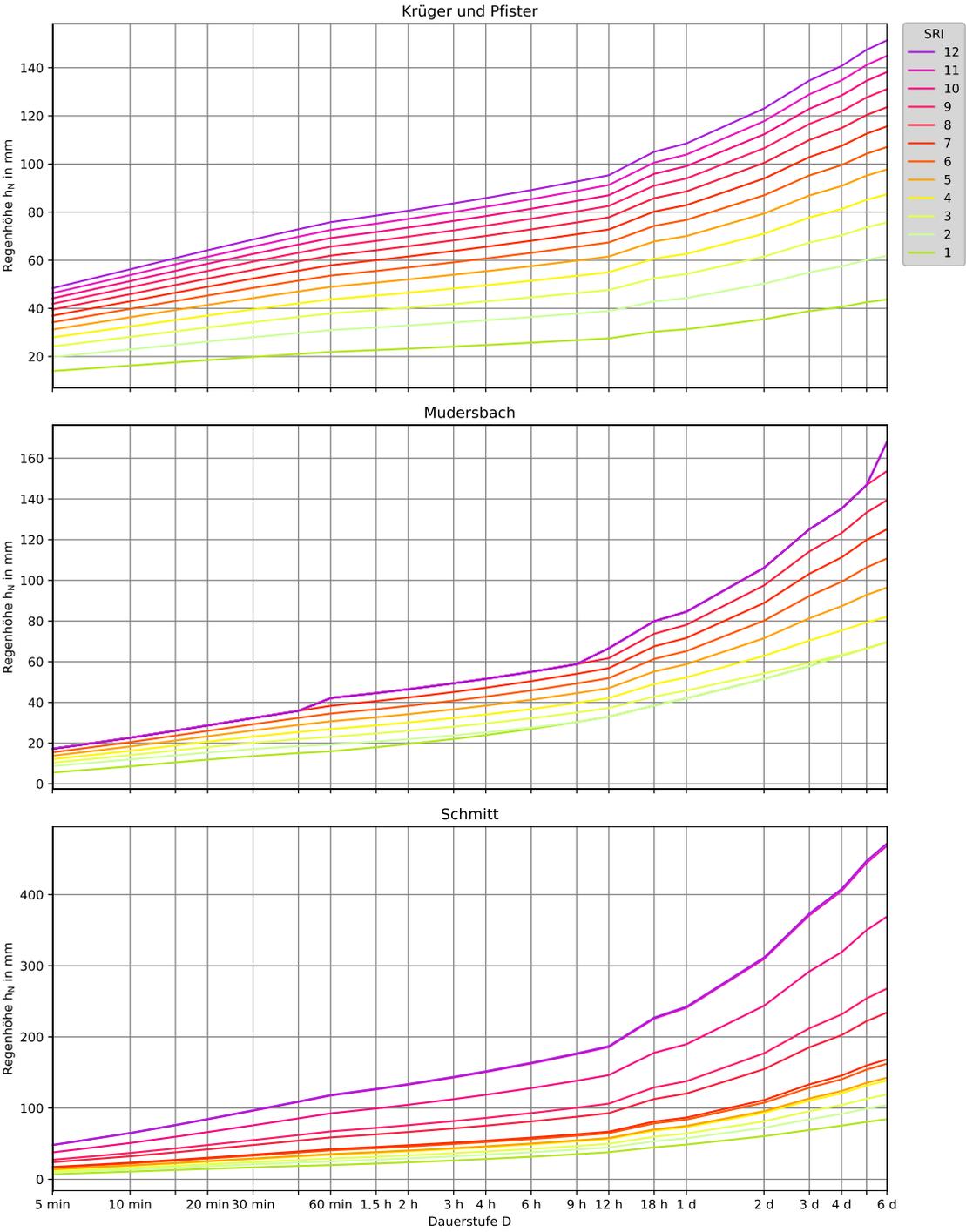


Abbildung 5-13 SRI-Kurven, Liezen

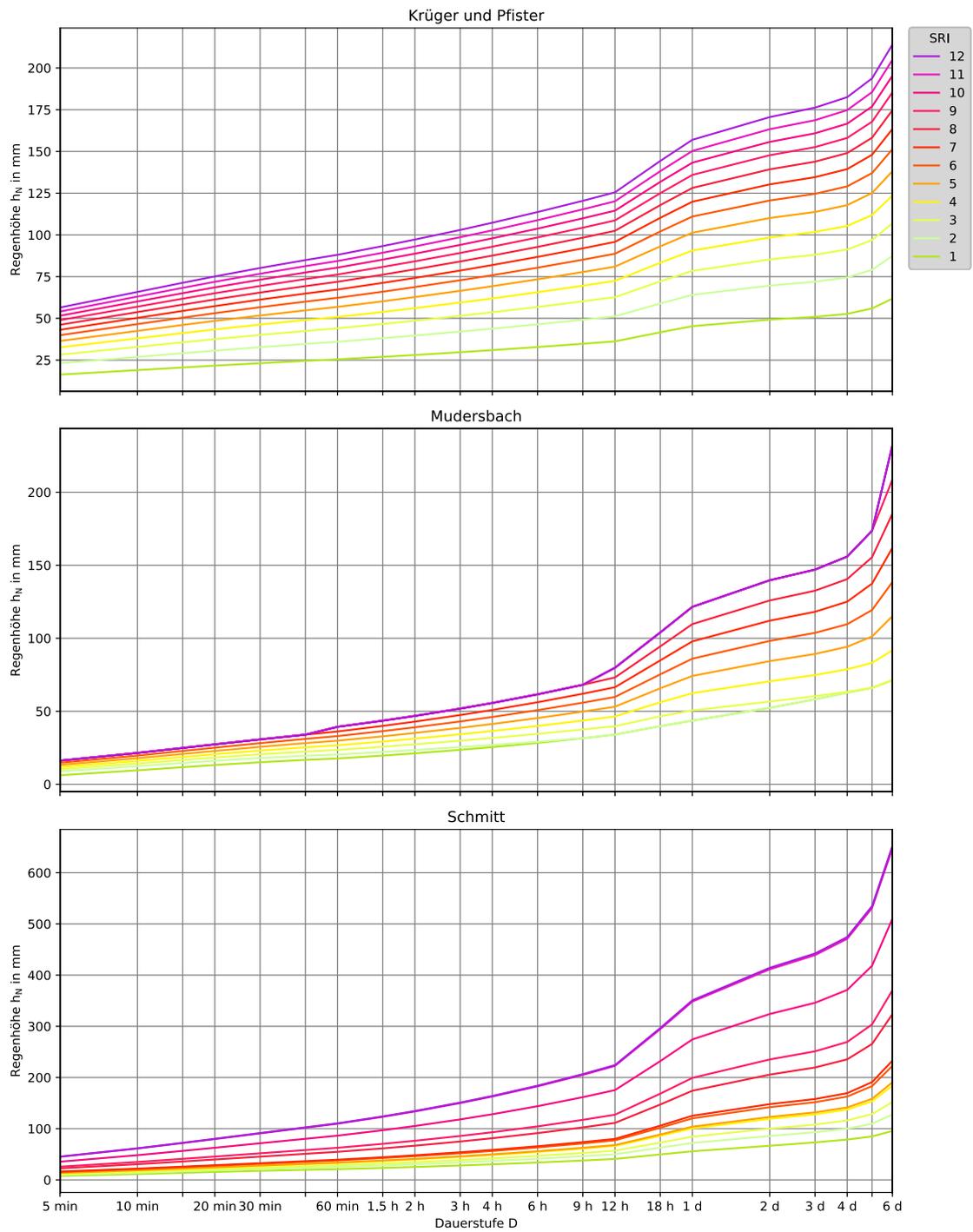


Abbildung 5-14 SRI-Kurven, Linz-Urfahr

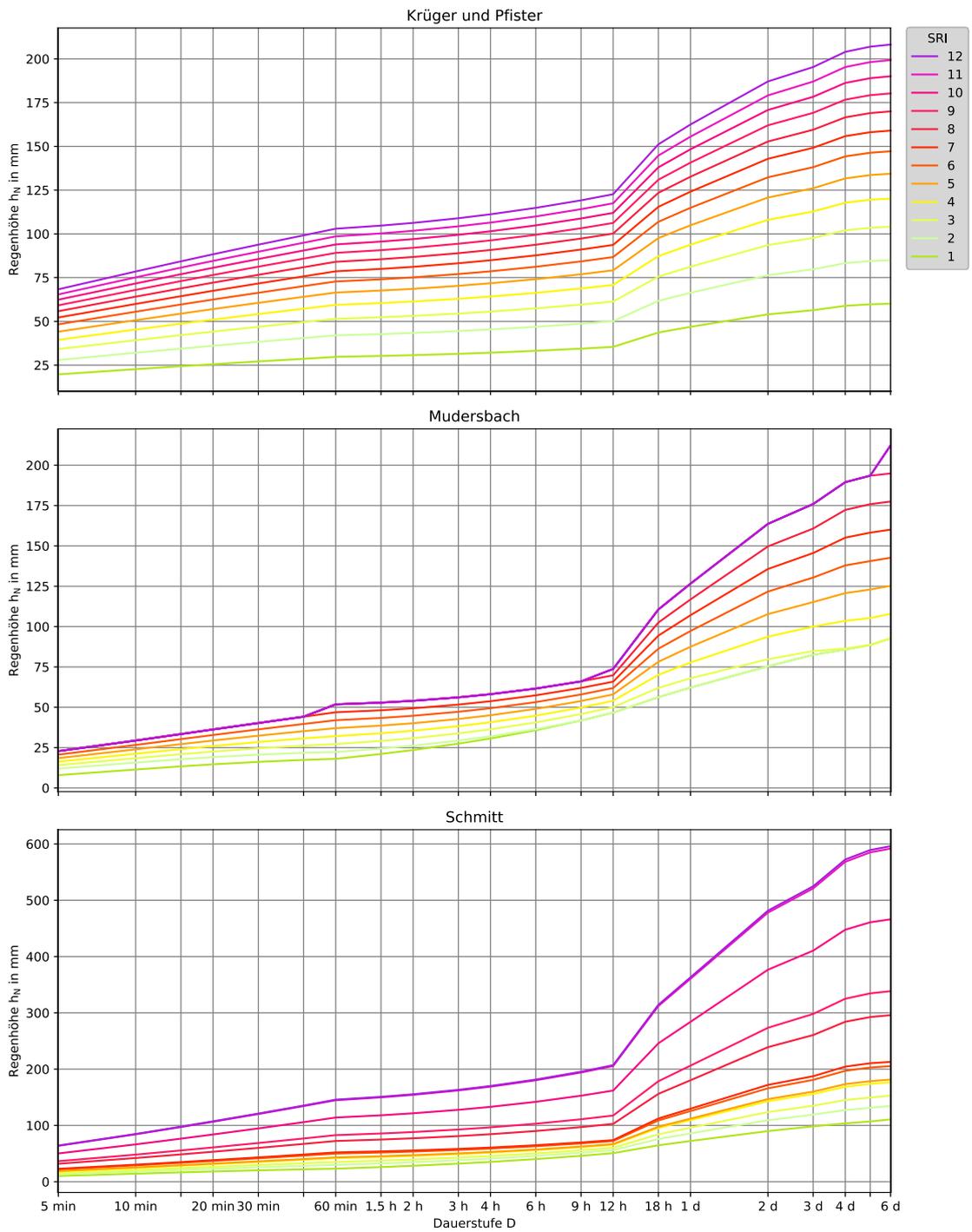


Abbildung 5-15 SRI-Kurven, Sillian

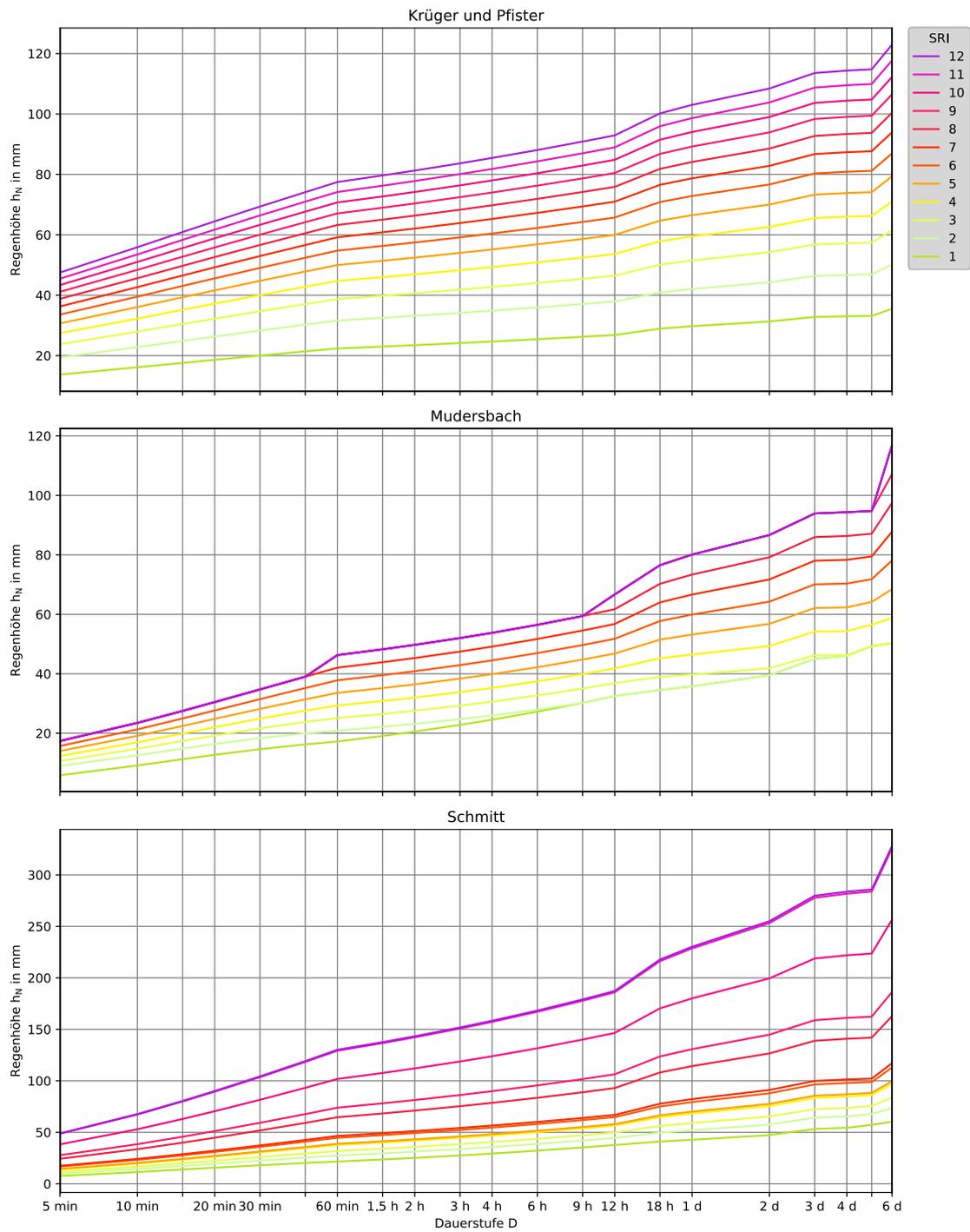


Abbildung 5-16 SRI-Kurven, Wien