



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS

National Centre for Climate Services NCCS

Bevölkerungsschutz und Klimawandel

Starkniederschläge und Einsatzplanung von Schutz & Rettung Zürich



Impressum

Herausgeber
Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS
CH-3003 Bern
www.bevoelkerungsschutz.ch
info@babs.admin.ch

Studie im Rahmen des National Centre for Climate Services NCCS

Verfasser
geo7 AG, geowissenschaftliches Büro
Neufeldstrasse 5-9
CH-3012 Bern
Peter Mani
Dr. Catherine Berger
Nicolas Lenz
Maike Schneider
Dr. Johannes Rempfer

Leitungsteam
Christoph Werner (BABS)
Rainer Büchel (SRZ)
Oliver Kaupp (Stadtpolizei Zürich)
Markus Meile (SID Stadt Zürich)
Thomas Schlegel (MeteoSchweiz)

Begleitgruppe
Norina Andres (WSL)
Prof. Dr. David Bresch (ETHZ, MeteoSchweiz)
Jonas Eppler (AWEL Kt. Zürich)
Dr. Michiko Hama (NCCS, MeteoSchweiz)
Claudio Hauser (GVZ)
Dr. Roland Hohmann (BAFU)
Roberto Loat (BAFU)
Florian Mocka (GVZ)
Dr. Simon Scherrer (MeteoSchweiz)

Titelbild: Schutz & Rettung Zürich, bearbeitet durch geo7 AG

Zitiervorschlag
BABS Hrsg. (2019): Starkniederschläge und Einsatzplanung von Schutz & Rettung Zürich – Studie im Rahmen des National Centre for Climate Services NCCS. Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), Bern.

März 2019

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage.....	1
1.2	Zielsetzung und Abgrenzung.....	1
1.3	Zielpublikum.....	2
2	Erklärungsmodell für die Einsätze von SRZ	3
3	Datengrundlagen und Datenaufbereitung	4
3.1	Einsatzdaten.....	4
3.2	Niederschlagsdaten.....	7
3.3	Gefährungsdaten.....	8
3.3.1	Gefahrenkarte Wasser.....	9
3.3.2	Gefährungskarte Oberflächenabfluss.....	10
3.4	Gebäudedaten.....	11
3.5	Bevölkerungs- und Siedlungsdaten.....	11
4	Herleitung eines quantitativen Zusammenhangs zwischen Einsätzen und Niederschlag	12
4.1	Explorative Analyse.....	14
4.1.1	Überlagerung Einsatzdaten mit Niederschlagsdaten.....	14
4.1.2	Überlagerung Einsatzdaten mit Gefährungsdaten.....	17
4.1.3	Überlagerung Einsatzdaten mit der Bevölkerungsdichte	19
4.2	Statistische Analyse.....	21
4.2.1	Hauptachsentransformation.....	21
4.2.2	Clusteranalyse.....	23
4.3	Kategorisierung der Einsätze.....	24
4.4	Ereignisdefinition.....	26
4.5	Herleitung der Schwellenwerte.....	28
4.6	Evaluation der Schwellenwerte.....	32
5	Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Anzahl Einsätze	37
5.1	Auswirkungen des Klimawandels.....	37

5.2	Auswirkungen der Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung.....	39
-----	--	----

6 Resultate und methodische Aspekte42

6.1	Quantitativer Zusammenhang zwischen Einsätzen und Niederschlag	42
6.2	Einfluss der Gefahrenprozesse auf die Einsätze.....	43
6.3	Zukünftige Entwicklung der Anzahl Einsätze	43
6.4	Methodische Aspekte	44
6.4.1	Umgang mit grossen Datenmengen.....	45
6.4.2	Zeitliche Synchronisation der Niederschlagsdaten.....	45
6.4.3	Berücksichtigung von hydrologischen Aspekten.....	45

7 Schlussfolgerungen.....46

7.1	Erkenntnisse	46
7.2	Potenzial für weiterführende Arbeiten	46

Anhang A Weitere Grundlagedaten48

Anhang A 1	Weitere Angaben zu den Einsatzdaten.....	48
Anhang A 2	Wetterlagen.....	48
Anhang A 3	Einzugsgebietsgliederung Schweiz.....	51
Anhang A 4	Bodenbedeckung bzw. Abflusskoeffizienten.....	52
Anhang A 5	Risikokarte Hochwasser.....	52

Anhang B Methodische Aspekte55

Anhang B 1	Grosse Datenmengen.....	55
Anhang B 2	Räumliche und zeitliche Überlagerung von Datensätzen.....	56
Anhang B 2.1	Überlagerung Einsatzdaten mit Niederschlagsdaten.....	56
Anhang B 2.2	Überlagerung Einsatzdaten mit Gebäudedaten.....	57
Anhang B 2.3	Überlagerung Einsatzdaten mit Gefährdungsdaten.....	58
Anhang B 3	Statistische Analyse.....	62
Anhang B 3.1	Hauptachsentransformation.....	62
Anhang B 3.2	Clusteranalyse.....	65

Zusammenfassung

Für die Partner des Bevölkerungsschutzes (Polizei, Feuerwehr, Gesundheitswesen, technische Betriebe und Zivilschutz) sind Elementarereignisse heute eine bedeutende Herausforderung. Diese kann in Zukunft als Folge des Klimawandels noch zunehmen.

In der vorliegenden Studie im Rahmen des National Centre for Climate Services (NCCS) wird der Zusammenhang zwischen Starkniederschlägen und den Einsätzen von Schutz & Rettung Zürich (SRZ) analysiert. Weiter wird abgeschätzt, wie sich in Zukunft die Anforderungen an die Einsatzkräfte aufgrund des Klimawandels und der sozioökonomischen Entwicklung verändern werden. Der Fokus der Analysen liegt dabei auf grossen, für die Einsatzkräfte relevanten Ereignissen, nicht auf Einzeleinsätzen. Die Studie liefert somit Grundlagen für die Disposition der Einsatzkräfte, gibt Auskunft über die aktuelle bzw. künftig erwartete Belastung der Einsatzkräfte und kann die Abschätzung des Mittelbedarfes unterstützen.

Die Analysen zeigen, dass ein quantitativer Zusammenhang zwischen dem Niederschlag und der Anzahl Einsätze von SRZ besteht. Dabei ist zwischen kurzen Starkniederschlägen und langandauernden Niederschlägen zu unterscheiden. Für beide Niederschlagsszenarien wurde je ein Schwellenwert ermittelt, bei dessen Überschreitung SRZ mit einer Häufung von Einsätzen (> 50 Einsätze innerhalb von sechs Stunden) zu rechnen hat. Für die kurzen Starkniederschläge wurde ein Schwellenwert für die maximale Niederschlagsintensität von 15 mm in den drei Stunden vor dem Einsatz hergeleitet. Für die langandauernden Niederschläge beträgt der Schwellenwert vor dem Einsatz für die 12-Stunden-Niederschlagssumme 30 mm. Diese Niederschlagswerte entsprechen gemäss den statistischen Werten verschiedener Stationen einem 2,33-jährlichen Ereignis. Es wurden demnach grössere Niederschlagsereignisse untersucht, die häufiger als einmal pro Jahr auftreten können. Die hergeleiteten Schwellenwerte erlauben es SRZ, sich gezielter auf Niederschlagsereignisse vorzubereiten.

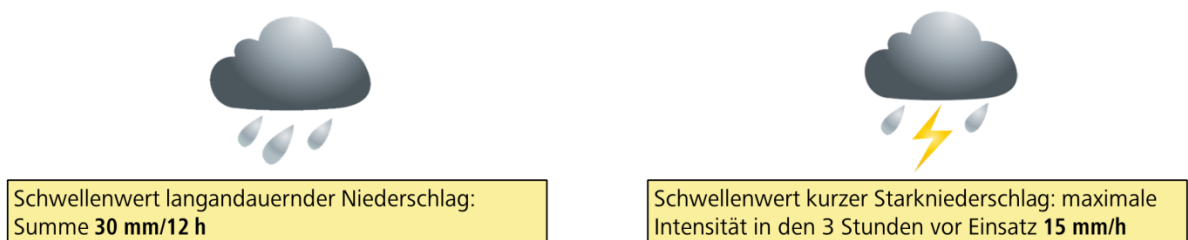


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Starkniederschlägen und Einsätzen von Schutz & Rettung Zürich

Rund 75 % aller Einsätze von SRZ, die in Verbindung mit Wassergefahren stehen, haben in Gebieten stattgefunden, die potenziell durch Oberflächenabfluss gefährdet sind. Dem stehen ungefähr 25 % der Einsätze gegenüber, die von Überflutung durch Fliessgewässer oder Seen betroffen sein können. Die beiden Gefahrenprozesse können sich dabei auch überlagern. Knapp 20 % der Einsätze liegen ausserhalb der beiden Gefahrengebiete.

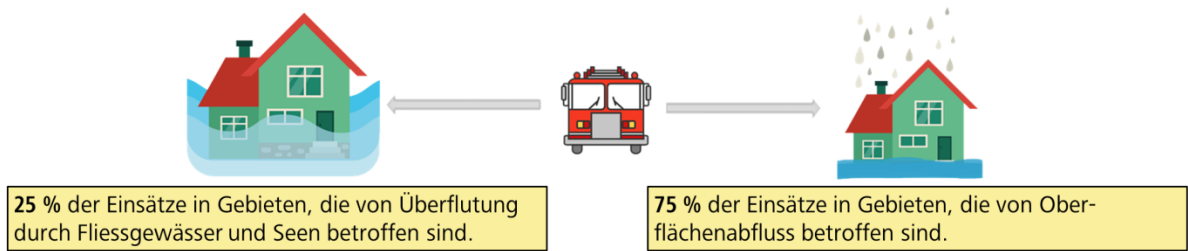


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Einsätzen und den Gefahrenprozessen Hochwasser und Oberflächenabfluss

Aufgrund des Klimawandels ist nach aktuellen Kenntnissen bis ins Jahr 2040 nur eine geringe Veränderung bei der Häufigkeit von wasserbezogenen Einsätzen von SRZ zu erwarten. Die Abschätzungen ergeben, dass die Anzahl von Niederschlagsereignissen, bei welchen der in der vorliegenden Studie hergeleitete Schwellenwert für langandauernden Niederschlag überschritten wird, sich im Mittel von jährlich fünf auf sechs erhöhen wird. Davon führen 20 % zu für SRZ relevanten Ereignissen. Verglichen mit der heutigen interannuellen Variabilität, ist diese Veränderung gering. Anders sieht es für die Periode 2070–2099 aus. Hier wird auf der Alpennordseite eine Zunahme der Starkniederschläge von 20 bis 30 % und dementsprechend eine grössere Zunahme der für SRZ relevanten Ereignisse erwartet.

Für die Zunahme der Einsätze von SRZ in der nahen Zukunft ist die Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung wichtiger als der Klimawandel. Bis ins Jahr 2040 ist mit einer deutlichen Zunahme des Schadenpotenzials in gefährdeten Zonen zu rechnen. Bis ins Jahr 2030 nimmt die Anzahl Personen in den gefährdeten Gebieten um 25 % zu. Bis 2040 ist eine Zunahme um 30 % zu erwarten – entsprechend auch eine Zunahme der Einsätze.

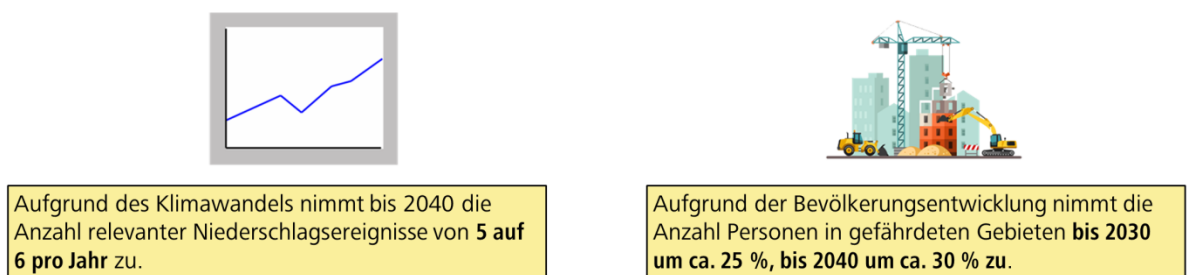


Abbildung 3: Künftige Entwicklung der Einsätze aufgrund von Klimawandel und Bevölkerungsentwicklung bzw. der daraus abgeleiteten Siedlungsentwicklung

Neben diesen inhaltlichen Resultaten zeigt die vorliegende Studie eine Methodik auf, die für ähnliche Fragestellungen eingesetzt werden kann. Analog können Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Einsätzen von Rettungsorganisationen auch in anderen Regionen analysiert bzw. ähnliche Auswertungen auf andere Gefährdungen übertragen werden.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Für den Bevölkerungsschutz und insbesondere seine Partner Feuerwehr, Zivilschutz und Führungsstäbe sind Elementarereignisse (u. a. klimarelevante Gefährdungen wie Starkniederschlag, Sturm, Hagel und Hitzetage) eine wesentliche Herausforderung. Aufgrund des Klimawandels wird von einer Zunahme der Wetterextreme ausgegangen, sowohl hinsichtlich Häufigkeit als auch Intensität ([16], [25], [26]). Bereits heute lässt sich in vielen Gebieten eine signifikante Zunahme von Starkniederschlägen nachweisen [25]. Dies wird sich sowohl auf das Schadenausmass als auch auf Einsatzhäufigkeit und -umfang der Rettungsorganisationen auswirken und diese zusätzlich belasten. Hochwasserereignisse führen bereits jedes Jahr zu zahlreichen Schäden und zu Einsätzen von Schutz & Rettung Zürich (im Folgenden abgekürzt durch SRZ).

Dass der Klimawandel eine Herausforderung für den Bevölkerungsschutz darstellt, wurde bereits in mehreren Publikationen beschrieben (z. B. [11], [12], [14]). Weitgehend unerforscht blieben bis anhin aber konkrete Folgen oder Massnahmen zu deren Bewältigung. In der vorliegenden Studie werden die Zusammenhänge von Starkniederschlägen auf die Einsatztätigkeit von SRZ untersucht. Für den Planungshorizont von 15 bis 20 Jahren werden die zu erwartenden Änderungen und künftigen Anforderungen aufgrund des Klimawandels sowie weiterer Variablen qualitativ und soweit wie möglich auch quantitativ beschrieben.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Im Rahmen der vorliegenden Studie «Starkniederschläge und Einsatzplanung von Schutz & Rettung Zürich» wird insbesondere die Korrelation zwischen Starkniederschlägen und Einsätzen der Feuerwehr im Sinne einer Pilotstudie aufgezeigt. Kenntnisse zum Zusammenhang zwischen Niederschlägen und Schadenereignissen durch Hochwasser oder Oberflächenabfluss sind Grundvoraussetzung, um Alarme auszulösen und vorsorgliche Massnahmen zu treffen. Beispiele sind der in den USA verbreitete «flash flood guidance» [27] oder das sich beim Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) in Entwicklung befindende Alarmsystem NowPAL [24]. In der vorliegenden Studie steht jedoch nicht die Prozessauslösung, sondern die Auslösung einer für SRZ relevanten Anzahl Einsätze im Fokus. Folgendes wird untersucht:

- Quantitative Abhängigkeit der Einsätze vom Niederschlag:
Es wird aufgezeigt, ab welcher Niederschlagsmenge mit einer grösseren Zahl von Einsätzen von SRZ zu rechnen ist. Dabei wird ebenfalls der Einfluss weiterer Faktoren auf die Einsatzauslösung wie z. B. die Gefährdung berücksichtigt.
- Abschätzung zu Veränderungen der zukünftigen Einsätze:
Basierend auf dem Zusammenhang zwischen Einsätzen und Niederschlag wird an Hand von Klimaszenarien und weiteren Variablen qualitativ und soweit möglich quantitativ abgeschätzt, wie sich die Einsätze in Zukunft verändern werden. Der Betrachtungszeitraum liegt hierbei auf den nächsten 15 bis 20 Jahren.

Basis der Studie sind Einsatzdaten von SRZ aus den Jahren 2005–2018, die im Zusammenhang mit Wassergefahren stehen. Der Fokus der untersuchten Zukunftsszenarien

liegt auf dem Zeitraum der nächsten 15 bis 20 Jahre. Räumlich beschränkt sich die Auswertung auf den Perimeter des Kantons Zürich.

Die vorliegende Studie soll Ausgangslage für analoge Analysen in anderen Regionen und/oder andere Gefährdungen sein. Aufgrund dieses Pilotcharakters sind im vorliegenden Bericht neben der Präsentation der inhaltlichen Resultate das Vorgehen und die verwendeten Methoden detailliert und nachvollziehbar dokumentiert.

In Kapitel 2 wird anhand eines Erklärungsmodells das konzeptionelle Vorgehen bei der Ermittlung des heutigen und zukünftigen Zusammenhangs zwischen Starkniederschlägen und Einsätzen vorgestellt. In den Kapiteln 3 bis 5 wird dessen konkrete Umsetzung beschrieben. Die Resultate sowie eine Methodenevaluation werden in Kapitel 6 vorgestellt und in Kapitel 7 sind Schlussfolgerungen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen festgehalten. Im Anhang sind ergänzende Angaben zur Datengrundlage (Anhang A) und zur Methodik (Anhang B) zusammengestellt.

1.3 Zielpublikum

Im vorliegenden Bericht sind einerseits die inhaltlichen Resultate der Studie beschrieben, andererseits die Methoden, die entwickelt und eingesetzt wurden. Dementsprechend richtet sich der Bericht an verschiedene Zielgruppen:

- **Akteure im Bevölkerungsschutz:**
Für SRZ sowie für ähnliche Organisationen, aber auch für kantonale Fachstellen und Bundesämter sind primär die inhaltlichen Resultate von Interesse. Dies dürfte auch für weitere Kreise, beispielsweise Gebäudeversicherungen zutreffen.
- **Fachämter und Organisationen:**
Für Fachämter wie das BABS, MeteoSchweiz oder das NCCS sind neben den inhaltlichen Resultaten insbesondere auch die methodischen Ergebnisse von Interesse. Sie bilden die Grundlage für die Bearbeitung ähnlicher Fragestellungen im Zusammenhang mit den Herausforderungen des Klimawandels.

2 Erklärungsmodell für die Einsätze von SRZ

Um die vorliegende Studie, die als Pilotstudie dienen soll (siehe Kapitel 1.2), transparent und nachvollziehbar zu gestalten, wird ein einfaches Erklärungsmodell für die wasserbezogenen Einsätze von SRZ hergeleitet. Im Zentrum steht dabei die Herleitung des Zusammenhangs zwischen Niederschlag und Einsätzen. Wo notwendig, wird dieses Erklärungsmodell mit weiteren Einflussparametern ergänzt.

Daraus ergibt sich ein schrittweises Vorgehen. Grundlagedaten wie Einsatzdaten von SRZ (🚒), Niederschlagsdaten (☁️) und weitere erklärende Variablen (📍) wie z. B. Angaben zur Gefährdung werden zunächst in einer Datenbank (🗄️) zusammengetragen und zueinander in Beziehung gesetzt (Abbildung 4, oben und unten links). Daraus werden mittels explorativer Analyse Hypothesen entwickelt, die mit Hilfe von statistischen Analysen (📊) und vertieften Untersuchungen in einem geografischen Informationssystem (GIS) überprüft werden (Abbildung 4, unten Mitte). Das daraus entstandene Erklärungsmodell wird schliesslich verifiziert bzw. falsifiziert. Zum Schluss wird mit Hilfe von Klimaszenarien und weiteren sich künftig verändernden Variablen wie der Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung abgeschätzt, wie sich die Häufigkeit von Einsätzen verändern wird (📈) (Abbildung 4, unten rechts).

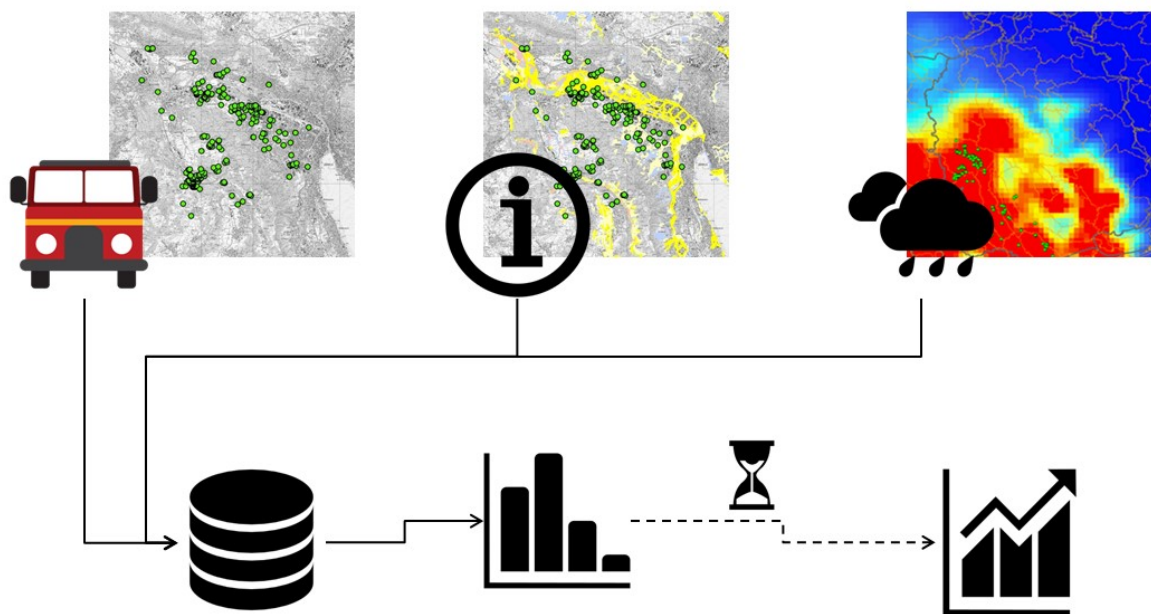


Abbildung 4: Aufbau des Erklärungsmodells und Ablauf der Studie: Einsatzdaten, Niederschlagsdaten und weitere erklärende Variablen werden in eine Geodatenbank integriert. Aufgrund von statistischen Analysen wird der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Einsätzen von SRZ hergeleitet und die zukünftige Entwicklung der Anzahl Einsätze abgeschätzt.

Um Transparenz und Nachvollziehbarkeit der einzelnen Arbeitsschritte zu gewährleisten, wurden sie in Skripten festgehalten. Dies erlaubt einerseits eine effiziente Verarbeitung, sichert aber auch die Dokumentation der angewendeten Verfahren und die Möglichkeit der mehrfachen Neuberechnung.

3 Datengrundlagen und Datenaufbereitung

Im Folgenden werden die Datengrundlagen beschrieben, welche für das Erklärungsmodell für die Einsätze von SRZ verwendet wurden (Kapitel 2). Weitere Datensätze, die analysiert wurden, aber schliesslich nicht Eingang ins Erklärungsmodell fanden, sind im Anhang A dokumentiert.

3.1 Einsatzdaten

Über 16'000 Einsatzdaten von SRZ zwischen Juli 2005 und Januar 2018 im Kanton Zürich, die in Zusammenhang mit Unwettern und/oder Wassergefahren stehen, bilden die Grundlage für die vorliegende Studie.

Die vorliegende Studie basiert auf den von SRZ entgegengenommenen Alarmen, die im Zusammenhang mit Unwettern und/oder Wassergefahren stehen. Zur Vereinfachung werden diese Alarme im Folgenden gleichgesetzt mit den effektiv erfolgten Einsätzen von SRZ. Es handelt sich um geocodierte Punktdaten mit zusätzlichen Attributen wie Datum und Uhrzeit der Alarmierung sowie Einsatzart und Dringlichkeit des Einsatzes (Tabelle 9 in Anhang A 1). Keine Informationen waren verfügbar über die Dauer des jeweiligen Einsatzes oder die Anzahl der im Einsatz stehenden Personen. Insgesamt wurden 16'289 Einsatzdaten geliefert, von wovon sich 16'237 innerhalb des Kantons Zürich befinden und die Grundlage für die weiteren Analysen bilden (Abbildung 5).

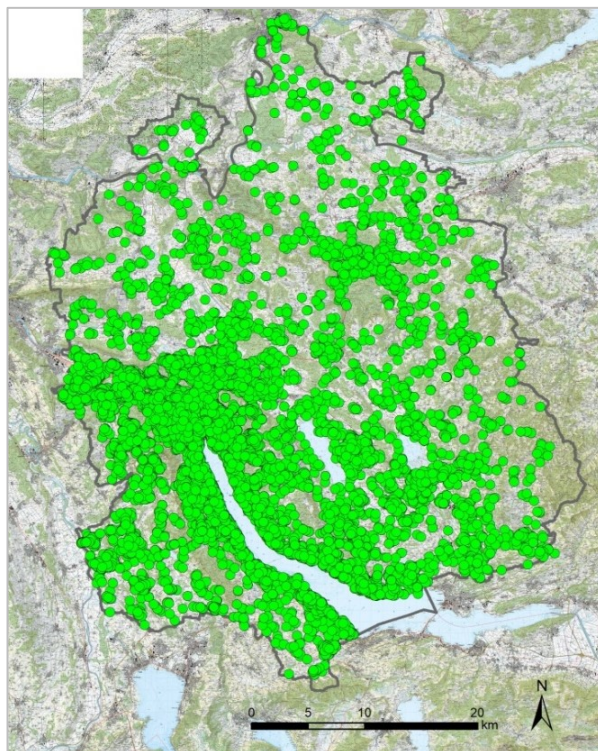
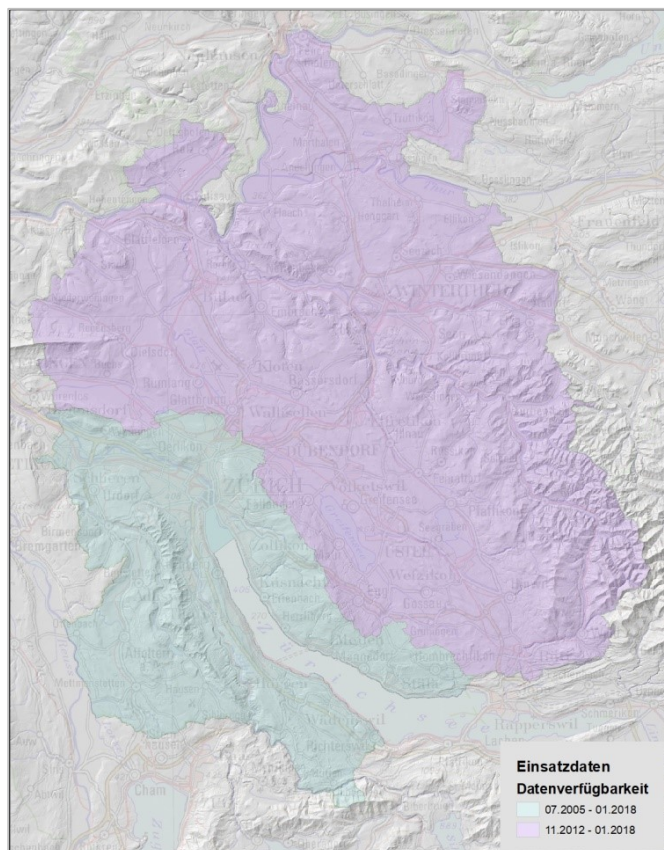


Abbildung 5: Einsatzdaten SRZ in Bezug auf Unwetter und/oder Wassergefahren innerhalb des Kantons Zürich im Zeitraum vom 06.07.2005 bis 07.01.2018. Datengrundlage: [5], PK25 © 2017 swisstopo.

Die Einsatzdaten umfassen den Zeitraum vom 06.07.2005 bis zum 07.01.2018. Für den Zeitraum vom 06.07.2005 bis zum 11.11.2012 liegen nur Einsatzdaten für den südlichen Teil des Kantons vor (Abbildung 6). Zu beachten ist in diesem Zusammenhang ausserdem, dass SRZ seit dem 12.11.2012 alle Alarmmeldungen im Kanton Zürich entgegennimmt, aber Einsätze nur im Gebiet der Stadt Zürich und allenfalls subsidiär in anderen Gemeinden durchführt.



Insgesamt
Anzahl Einsätze: 16'237
Dispositionsgebiet: gesamter Kt. Zürich

Datum: 07.2005–11.2012
Anzahl Einsätze: 8'763
Dispositionsgebiet: Teil Süd (hellblau)

Datum: 11.2012–01.2018
Anzahl Einsätze: 7'474
Dispositionsgebiet: gesamter Kt. Zürich

Abbildung 6: Verfügbarkeit der Einsatzdaten von SRZ. Für den Zeitraum vom 06.07.2005 bis 11.11.2012 sind nur Einsatzdaten aus dem südlichen Teil des Kantons Zürich (hellblau) verfügbar. Die Einsatzdaten vom 12.11.2012 bis zum 07.01.2018 decken das gesamte Kantonsgebiet ab [5].

Die beiden Zeiträume der Einsatzdaten vor und nach 2012 unterscheiden sich auch im Hinblick auf die Qualität der Angaben zu Art und Dringlichkeit der Einsätze. Im Zeitraum 06.07.2005–31.01.2012 tragen alle Einsätze das Attribut «Hochwasser/Wassereinsatz». Dieses erlaubt keine weitere Unterscheidung zwischen allgemeinen Wassereinsätzen (z. B. Wasserrohrbruch o. ä.) oder Unwettereinsätzen. Zudem liegen auch keine Angaben zur Dringlichkeit der Einsätze vor. Hingegen stehen für die Daten ab dem 01.02.2012 weitere differenziertere Angaben zur Verfügung (Tabelle 1).

Die Codierung «Einsatzart» gibt wichtige Hinweise auf den Grund für die Auslösung des jeweiligen Alarms (Tabelle 1 und Abbildung 7, links). Der Fokus der vorliegenden Studie liegt auf Einsätzen, welche durch Starkniederschläge ausgelöst wurden. Einsätze der Kategorie «Baum/Ast (Unwetter)» und die «nicht definierten» Einsätze werden daher in den weiteren

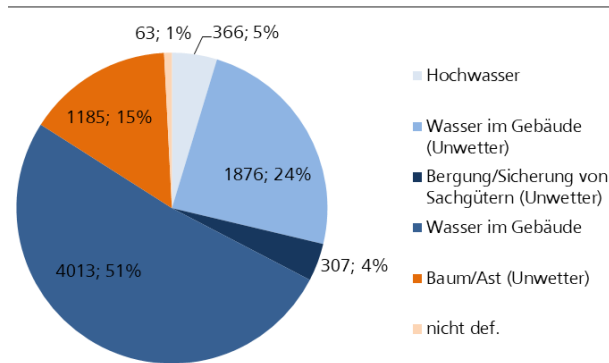
Auswertungen ausgeschlossen. Unsicherheiten bezüglich Unterscheidung der weiteren Klassen bleiben bestehen, da die Einsatzart gemäss SRZ bei Alarmeingang erfasst wird, zu diesem Zeitpunkt aber meist noch nicht sicher bestimmbar ist. Es kann sein, dass sich die erfasste Einsatzart im Verlauf eines Ereignisses mit zunehmender Anzahl Alarmeingänge ändert z. B. von der allgemeinen Kategorie «Wasser im Gebäude» zu «Hochwasser».

Angaben zur Dringlichkeit eines Einsatzes sind erst ab dem 01.02.2012 vorhanden. Unterschieden werden die Kategorien «mit-» und «ohne Personen- oder Wertsachengefährdung» (Abbildung 7, rechts).

Tabelle 1: Unterschiedliche Attributierung der Einsätze von SRZ nach Zeitraum, Einsatzart bzw. Codierung sowie Anzahl der Einsätze in der jeweiligen Kategorie (nach [5]).

Zeitraum	Einsatzart bzw. Codierung	Anzahl Einsätze	
06.07.2005–07.01.2018	Alle	16'237	(100 %)
06.07.2005–31.01.2012	Hochwasser/Wassereinsatz ohne genauere Angaben	8'427	(52 %)
01.02.2012–07.01.2018	Hochwasser	366	(2 %)
	Wasser im Gebäude (Unwetter)	1'876	(12 %)
	Bergung/Sicherung von Sachgütern (Unwetter)	307	(2 %)
	Wasser im Gebäude (ohne Information zur Ursache)	4'013	(25 %)
	Baum/Ast (Unwetter)	1'185	(7 %)
	nicht definiert	63	(0 %)

Einsatzart



Dringlichkeit

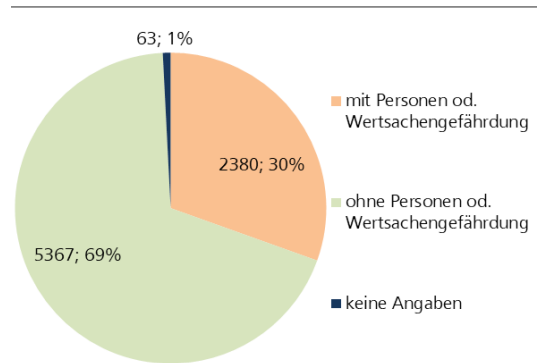


Abbildung 7: Einsätze zwischen dem 01.02.2012 und dem 07.02.2018 nach Einsatzart (links) und Dringlichkeit (rechts) (nach [5]).

Für die weitere Bearbeitung und den Vergleich mit zusätzlichen Datensätzen werden die Einsatzdaten, die auf der Landesvermessung LV03 basieren, mit Hilfe des Tools REFRAME der swisstopo in das neue Koordinatensystem LV95 transformiert.

3.2 Niederschlagsdaten

Niederschlagsdaten sollen die Einsätze von SRZ erklären. Für den gesamten Kanton Zürich stehen aus Radar- und Stationsdaten abgeleitete Rasterdaten mit einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km und einer stündlichen Auflösung zur Verfügung.

Basis für die Auswertung der für die Einsätze von SRZ massgebenden Niederschlagsereignisse bilden CombiPrecip-Daten von MeteoSchweiz [21], die für den Kanton Zürich zur Verfügung gestellt wurden. Es handelt sich hierbei um Stations- und Radardaten, welche mittels geostatistischer Auswertung zu Niederschlagsfeldern kombiniert werden und daraufhin kumulierte 1-Stunden-Werte für den Niederschlag in einer Rasterauflösung von 1 km x 1 km enthalten. In den Radardaten kann eine gewisse räumliche Unschärfe nicht ausgeschlossen werden. Regentropfen, die vom Radar in einer Höhe von mehreren tausend Metern über Grund erfasst werden, können beispielsweise durch den Wind in eine benachbarte Zelle geweht werden. Deshalb wird für die vorliegende Studie nicht der Wert einer einzelnen Rasterzelle verwendet, sondern der Mittelwert eines gleitenden Fensters von 3 x 3 Rasterzellen.

Für die weiteren Verarbeitungsschritte werden die Niederschlagsdaten bereits bei der Aufbereitung aggregiert zu x-Stunden-Summen (wobei $x = 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48$ oder 72 Stunden vor einem Einsatz von SRZ), bzw. zu x-Stunden-Maxima (also die höchste Stunden-Summe in einem Zeitraum von x Stunden, gleichbedeutend mit Niederschlagsintensität) (Abbildung 8).

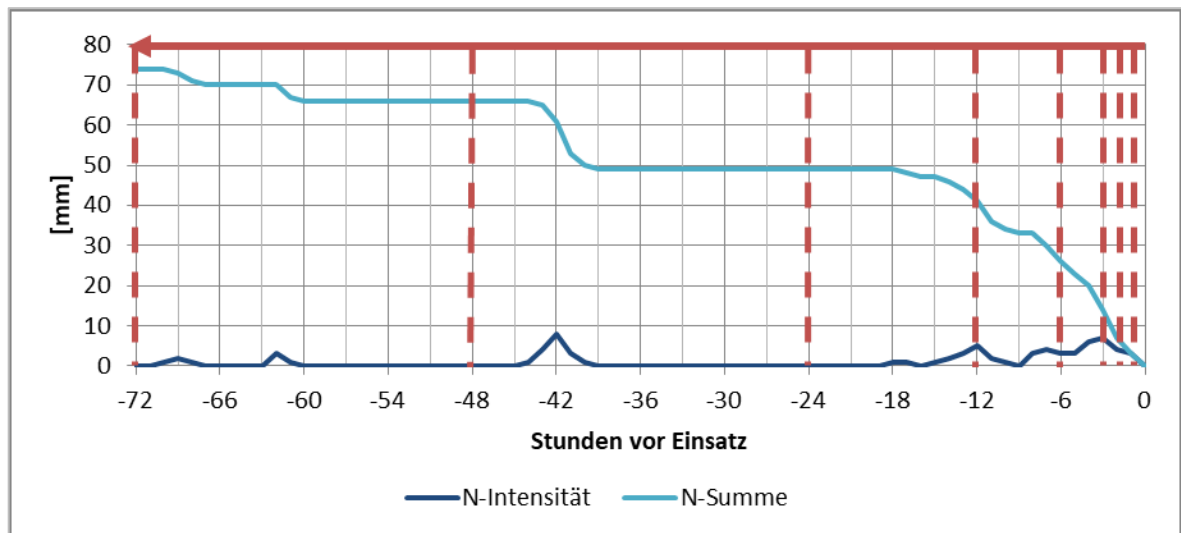


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Herleitung der Niederschlagsparameter Niederschlagsintensität und Niederschlagssumme für die betrachteten Perioden (1, 2, 3, 6, 12, 24 48 oder 72 Stunden vor Einsatz, rote Linien).

3.3 Gefährungsdaten

Angaben zur Gefährdungslage der Einsatzorte bezüglich Überschwemmung durch Gewässer oder Oberflächenabfluss stehen in der Gefahrenkarte Wasser und der Gefahrenkarte Oberflächenabfluss zur Verfügung. Diese Informationen ermöglichen es, den Grund für die wasserbezogenen Einsätze von SRZ zu spezifizieren.

Durch Starkniederschläge können unterschiedliche Naturgefahrenprozesse ausgelöst werden. Entsprechend wird abgeklärt, ob zwischen den Einsätzen und den Gefahrenprozessen weitere Abhängigkeiten und Erklärungsmuster bestehen. Im Zentrum der Analyse stehen die folgenden Naturgefahrenprozesse:

- **Überschwemmung durch Gewässer** (Bäche, Flüsse, Seen) (Kapitel 3.3.1)
Eine Überschwemmung ist die vorübergehende Bedeckung einer Landfläche mit Wasser. Werden mitgeführte Feststoffe auf der überfluteten Fläche abgelagert, wird von Übersarung gesprochen.
- **Überschwemmung durch Oberflächenabfluss** (Kapitel 3.3.2)
Unter Oberflächenabfluss wird derjenige Niederschlagsanteil verstanden, welcher nach dem Auftreffen auf den Boden unmittelbar an der Geländeoberfläche abfließt.

Weitere Prozesse, die im Zusammenhang mit Starkniederschlägen zu Schäden bzw. Einsätzen führen können, sind Überlastung der Siedlungsentwässerung und ein Anstieg des Grundwasserpegels. Für diese Prozesse fehlen jedoch Gefahrengrundlagen. Zudem treten sie oft mit Überschwemmung durch Gewässer / Oberflächenabfluss auf und können bei einem Ereignis oft nicht eindeutig zugeordnet werden. Sie werden deshalb in der vorliegenden Studie nicht gesondert berücksichtigt.

Um die Einsatzdaten von SRZ dem jeweiligen vorherrschenden Prozess zuzuordnen zu können, werden die im Folgenden beschriebenen Grundlagen, die Gefahrenkarte Wasser

(Kapitel 3.3.1) und Gefährdungskarte Oberflächenabfluss (Kapitel 3.3.2) verwendet (siehe auch Anhang B 2.3).

3.3.1 Gefahrenkarte Wasser

Die Gefährdung eines Gebietes durch Überschwemmungen ausgehend von Gewässern wird in der Gefahrenkarte Wasser abgebildet. Für den gesamten Kanton Zürich stehen Gefahrenkarten zur Verfügung, insbesondere das Siedlungsgebiet ist flächendeckend abgebildet. Dort, wo die Gefahrenkarten zum Zeitpunkt der Erarbeitung der vorliegenden Studie in Revision waren (Regionen Kleinandelfingen, Andelfingen, Dielsdorf, Winterthur, Illnau-Effretikon, Wald, Gossau, Küsnacht, Horgen, Wädenswil, Stand: 01.01.2017), wird auf die jeweils älteren, vorhandenen Daten zur Gefährdung zurückgegriffen [8]. Sind ausserhalb des angegebenen Perimeters für die Gefahrenkarte Angaben zur Gefährdung durch Wassergefahren verfügbar, werden diese übernommen (Abbildung 9). Die Gefährdung durch Oberflächenabfluss wird in den Gefahrenkarten Wasser nicht abgebildet.

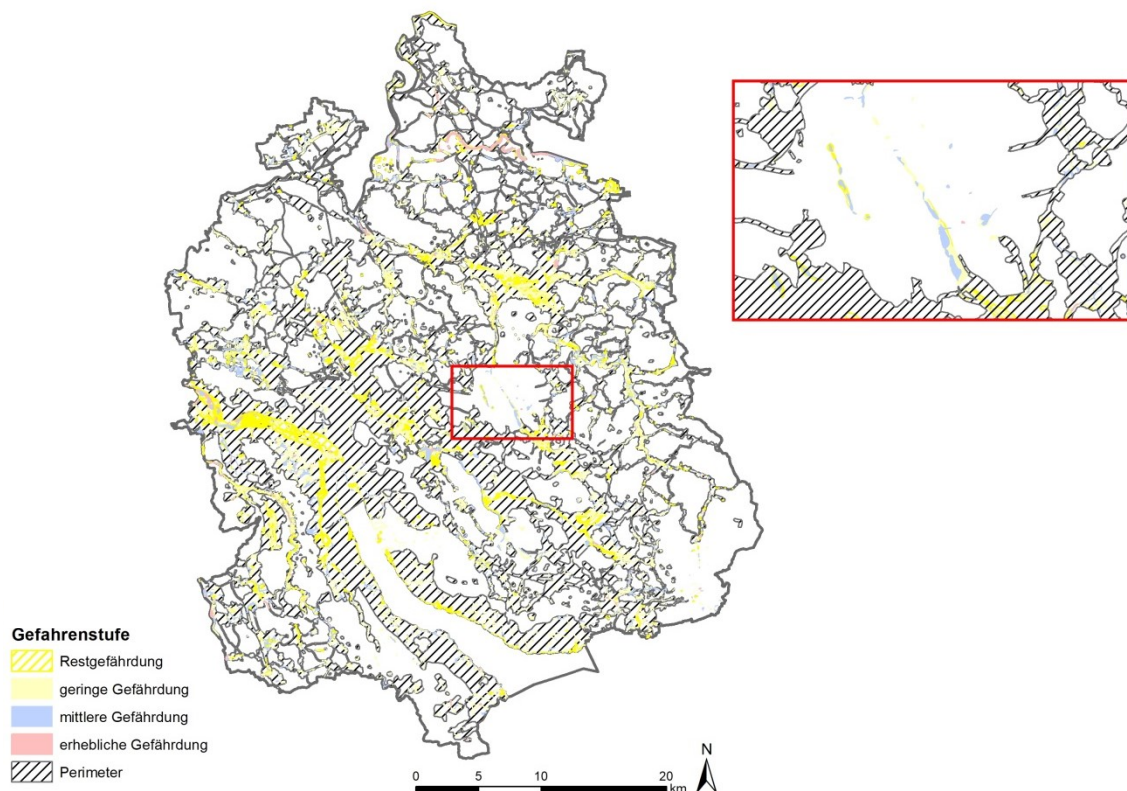


Abbildung 9: Perimeter Gefahrenkarte Wasser im Kanton Zürich [8]

Waren ausserhalb des angegebenen Perimeters Daten zur Gefährdung vorhanden (siehe Kartenausschnitt oben rechts), werden diese übernommen.

Fand ein Einsatz von SRZ in einem in der Gefahrenkarte Wasser ausgewiesenen Gefahrenggebiet (rote, blaue, gelbe und gelb-weiße Flächen) statt, wird davon ausgegangen, dass er möglicherweise durch die Überschwemmung von Gewässern ausgelöst wurde. Für Einsatzorte ausserhalb der Gefahrenggebiete (weiße Flächen) galt der auslösende Prozess

«Überschwemmung von Gewässern» hingegen als unwahrscheinlich (siehe Kapitel 4.1.2). Lag ein Einsatz im Hinweisperimeter ohne nähere Angaben zur Gefährdung, wurde der Einsatz entsprechend gekennzeichnet. Für weitere Informationen siehe Anhang B 2.3.

3.3.2 Gefährdungskarte Oberflächenabfluss

Die Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz steht seit Juli 2018 für die gesamte Schweiz flächendeckend zur Verfügung [7], [18]. Auf ihr sind die zu erwartenden Fliesswege des Oberflächenabflusses, die potenziell gefährdeten Gebiete und die dort zu erwartenden, klassierten Fliesstiefen auf Hinweisstufe dargestellt (Abbildung 10).



Abbildung 10: Ausschnitt aus der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss [7].

Tritt Wasser in ein Untergeschoss ein, was den häufigsten Grund für die Wassereinsätze von SRZ darstellt, ist es unerheblich, wie hoch die ebenerdige Fliesstiefe ist. Für die weiteren Auswertungen werden die Fliesstiefen daher nicht weiter berücksichtigt und nur die Kategorien «potenziell von Oberflächenabfluss betroffen: ja oder nein» betrachtet. Für weitere Informationen siehe Anhang B 2.3.

Die Gefährdungen durch Fliessgewässer oder stehende Gewässer, sowie unterirdische Wasserflüsse oder Siedlungsentwässerung werden in der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss nicht berücksichtigt. Die Inhalte der Oberflächenabflusskarte sind als Gefahrenhinweise zu verstehen. Zudem kann die Kartierung des Oberflächenabflusses im innerstädtischen bzw. dicht besiedelten Bereich vor allem aufgrund von Kleinststrukturen wie Mauern, Randsteine usw. an ihre Grenzen stossen.

Für Einsätze von SRZ, die innerhalb des Gefahrenhinweisbereichs (violett, Abbildung 10) zu liegen kamen, gilt, dass sie möglicherweise durch Oberflächenwasser ausgelöst wurden.

Liegt ein Einsatz ausserhalb der in der Gefahrenkarte Wasser oder in der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss ausgewiesenen Gefahrenzonen, so können keine weiteren Rückschlüsse auf den auslösenden Prozess gezogen werden (Kapitel 4.1.2).

3.4 Gebäudedaten

Der Vergleich der mit einem Punkt verorteten Einsatzdaten mit dem Gebäudedatensatz des Kantons Zürich zeigt, ob ein Einsatzort innerhalb oder ausserhalb eines Gebäudes liegt. Da angenommen wird, dass die Gefährdungslage innerhalb eines Gebäudes konstant ist, ist diese Information insbesondere für die Herleitung der Gefährdungslage eines Einsatzortes von Bedeutung.

Die Einsätze von SRZ sind mit einem Punkt verortet. Um die Einsätze genauer zu untersuchen, werden sie mit dem Gebäudedatensatz der amtlichen Vermessung des Kantons Zürich verglichen (Kapitel 4.1.2 und Anhang B 3). In diesem sind acht verschiedene Gebäudekategorien erfasst [2]. Für die weitere Bearbeitung in der vorliegenden Studie sind einzig die Kategorien «Gebäude ja oder nein» von Bedeutung. Ob ein Einsatzort innerhalb oder ausserhalb eines Gebäudes liegt, ist insbesondere für die Überlagerung der Einsatzdaten mit den Gefährungsdaten relevant (Kapitel 4.1.2 und Anhang B 2.3).

3.5 Bevölkerungs- und Siedlungsdaten

Die Bevölkerungsdichte ist ein Indikator für die Siedlungsdichte und ein einfaches Mass für das Schadenpotential von Siedlungen.

Die Bevölkerungsdichte ist ein Indikator für die Siedlungsdichte und somit ebenfalls ein einfaches Mass für das vorhandene Schadenpotenzial von Siedlungen. Analog wird die Entwicklung der Bevölkerungsdichte als Indikator für die Siedlungsentwicklung und somit für die Entwicklung des «Schadenpotenzials Siedlung» verwendet. Ereignen sich Überschwemmungen in einem Gebiet mit hohem Schadenpotenzial und hoher Verletzlichkeit der Objekte (z. B. Stadtzentrum), werden Einsatzkräfte vermutlich früher aufgeboden als in vergleichsweise schwach besiedelten Gebieten. Die Bevölkerungsdichte wird im Datensatz STATPOP des Bundesamtes für Statistik [3] je Hektare ausgewiesen. Hektaren mit weniger als drei Bewohnern wird aus Datenschutzgründen der Wert 3 zugewiesen. Die Bevölkerungsdaten beziehen sich auf das Jahr 2010.

4 Herleitung eines quantitativen Zusammenhangs zwischen Einsätzen und Niederschlag

Um die Abhängigkeit der wasserbezogenen Einsätze vom Niederschlag zu quantifizieren, werden Schwellenwerte für den Niederschlag ermittelt, nach deren Überschreitung mit einer grösseren Zahl von Einsätzen von SRZ zu rechnen ist. Der Fokus der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Einsätzen und Niederschlag liegt auf grossen, für die Einsatzkräfte relevanten Niederschlagsereignissen, nicht auf Einzeleinsätzen.

Zentraler Bestandteil des in der vorliegenden Studie gesuchten Erklärungsmodells für die wasserbezogenen Einsätze von SRZ ist die Herleitung quantitativer Abhängigkeiten der Einsätze vom Niederschlag (Kapitel 1.2). Sogenannte Schwellenwerte für den Niederschlag zeigen auf, ab welchen Niederschlagsmengen und/oder -intensitäten eine Häufung der Einsätze von SRZ zu erwarten ist. Diese Schwellenwerte werden hergeleitet und auf ihre Plausibilität geprüft.

Um die Schwellenwerte herzuleiten, sind mehrere Schritte notwendig. Die Basis wird mit der im vorangehenden Kapitel 3 beschriebenen Datenaufbereitung gelegt. Auf dieser Grundlage erfolgen explorative und statistische Auswertungen, welche in den nachfolgenden Unterkapiteln 4.1 und 4.2 beschrieben sind. Aufgrund dieser Auswertungen kann eine Kategorisierung der Einsätze nach dem sie auslösenden Niederschlagstyp vorgenommen werden (Kapitel 4.3).

In Abbildung 11 ist der Datenfluss von der Datenaufbereitung (Kapitel 3) bis zur Kategorienbildung (Kapitel 4.3) mit den berücksichtigten Einsätzen schematisch dargestellt. Von 16'289 Einsätzen liegen 16'237 im Kanton Zürich. Davon können nur 16'193 mit Niederschlagsdaten angereichert werden, da die Meteodaten zeitliche Lücken aufweisen. Zur Kategorisierung der Einsätze sind aus Gründen der Homogenität zuerst lediglich Daten ab November 2012 berücksichtigt, und davon wiederum nur jene 6'548 Einsätze, welche in einem Zusammenhang mit Wasser stehen (Kapitel 3.1, Tabelle 1). Aufgrund dieser Einsätze kann eine Kategorisierung abgeleitet werden, welche daraufhin auf sämtliche erfolgreich angereicherten Einsätze angewendet wird.

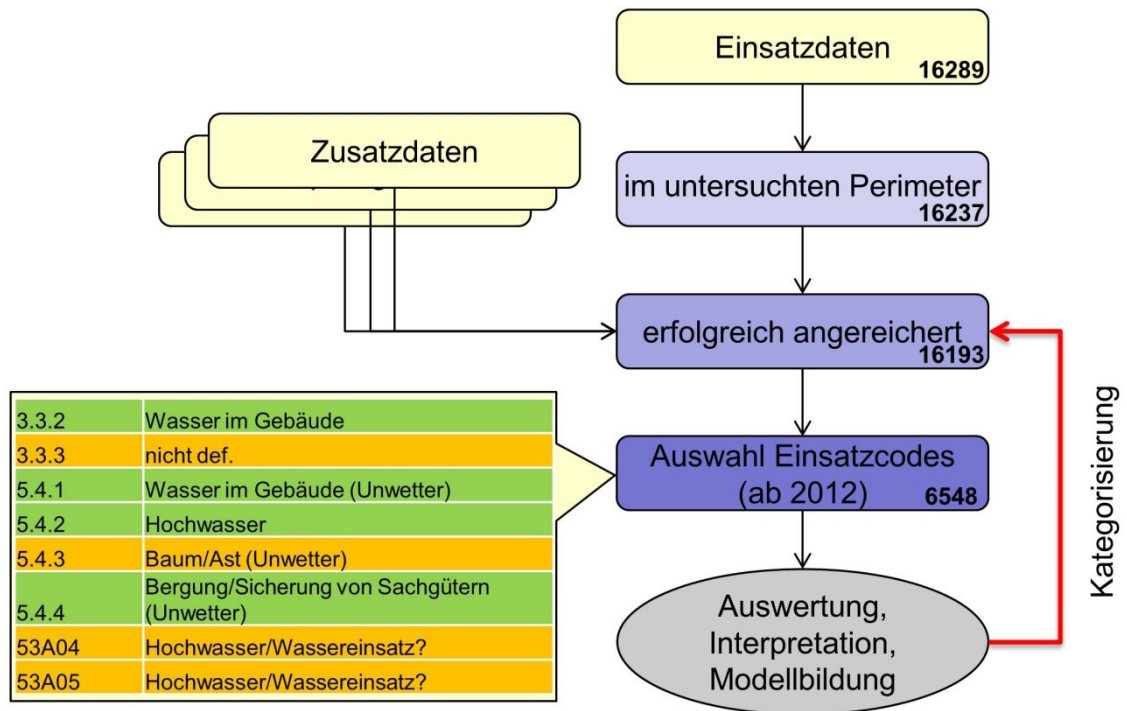


Abbildung 11: Datenfluss bis und mit Kategorisierung im Rahmen der Studie «Starkniederschläge und Einsatzplanung von SRZ». Bei den Einsatzarten (Tabelle unten links) wurden grün hinterlegte Arten berücksichtigt, orange hinterlegte Arten ausgeschlossen.

Nach der erfolgreichen Kategorisierung der Einsätze werden die zeitnah erfolgten Einsätze einem Niederschlagsereignis zugeordnet. Das angewendete Vorgehen ist in Kapitel 4.4 beschrieben. In den Kapiteln 4.5 und 4.6 ist schliesslich aufgezeigt, wie die abschliessende Herleitung der Schwellenwerte erfolgt und wie die Schwellenwerte überprüft werden.

4.1 Explorative Analyse

Die zeitliche und räumliche Überlagerung von Einsatzdaten mit Niederschlagsdaten zeigt deutlich, dass bei einer Häufung der Einsätze von SRZ ein Zusammenhang zwischen Niederschlag und Einsätzen besteht. Dabei muss allerdings zwischen zwei Niederschlagstypen unterschieden werden:

- Bei kurzem Starkniederschlag fällt der Niederschlag lokal und intensiv. Er korreliert stark mit den Einsätzen von SRZ.
- Langandauernder Niederschlag und die darauffolgenden Einsätze sind über grössere Gebiete und Zeiträume verteilt.

Ereignisse mit nur einem oder wenigen nachfolgenden Einsätzen von SRZ weisen oft kein klares Niederschlagssignal auf.

Die Überlagerung der Einsatzdaten mit den Gefährdungsinformationen zeigt, dass 25 % der Einsätze in Gebieten liegen, die von Überflutungen durch Fliessgewässer und Seen gefährdet sind. Rund 75 % der wasserbezogenen Einsätze von SRZ liegen in Gebieten, die von Oberflächenabfluss betroffen sind. Dieses hebt die Bedeutung des in bisherigen Studien wenig beachteten Gefahrenprozesses Oberflächenabfluss hervor.

Die Anzahl Einsätze verläuft proportional zur Bevölkerungsdichte und somit zu dem in einem Gebiet bestehenden Schadenpotenzial. Neben der Bevölkerungsdichte ist insbesondere die Gefährdungssituation eines Gebietes bedeutend für die Anzahl der dort stattfindenden Einsätze.

Um Zusammenhänge zwischen Einsatz-, Niederschlags- und Gefährdungsdaten zu untersuchen, werden die entsprechend aufbereiteten Daten (Kapitel 3) analysiert. Die dadurch gewonnen Erkenntnisse bilden die Basis für weitere statistische Auswertungen (Kapitel 4.2).

4.1.1 Überlagerung Einsatzdaten mit Niederschlagsdaten

Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Einsätzen und Niederschlag werden verschiedene Niederschlagsparameter verwendet. Einerseits die Niederschlagssummen über verschiedene Zeiträume vor dem Einsatz, andererseits die maximale Niederschlagsintensität (mm/h) in denselben Zeiträumen (Kapitel 3.2 und Anhang B 2.1).

Es ist zu beachten, dass eingehende Notrufe nicht ausschliesslich von der Intensität und Menge des gefallenen Niederschlags, sondern ebenfalls vom Ort (sind Menschen bzw. Sachwerte betroffen?) und Zeitpunkt (sind Menschen wach und anwesend und bemerken den Schaden?) des Niederschlags bzw. der darauffolgenden Überschwemmung abhängig sind.

Eine erste Auswertung dieser Niederschlagsparameter über alle wasserbezogenen Einsätze ab 2012 (ohne die Kategorien «Baum/Ast» und «unbestimmt», siehe Tabelle 1 und Abbildung 11) zeigt, dass die Frage, ab welchem Niederschlag einzelne Einsätze ausgelöst werden, nicht zielführend ist. Aus Abbildung 12 geht hervor, dass 50 % der Einsätze eine 1-, 3- und 6-Stunden-Summe von weniger als einem Millimeter aufweisen. Bei der 12-Stunden-Summe weisen 50 % der Einsätze Werte von 2 mm oder weniger auf und bei der 24-Stunden-Summe sind es gut 5 mm. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Niederschlags-

intensitäten in den x Stunden vor dem Einsatz. Hier weist die Hälfte der Einsätze in den Zeitfenstern von 1 bis 12 Stunden vor dem Einsatz eine maximale Niederschlagsintensität von 1 mm/h oder weniger auf. Beim 24-Stunden-Fenster sind es gut 2 mm. Solch niedrige Niederschlagswerte können nicht als Schwellenwerte verwendet werden, da sie sehr häufig überschritten würden.

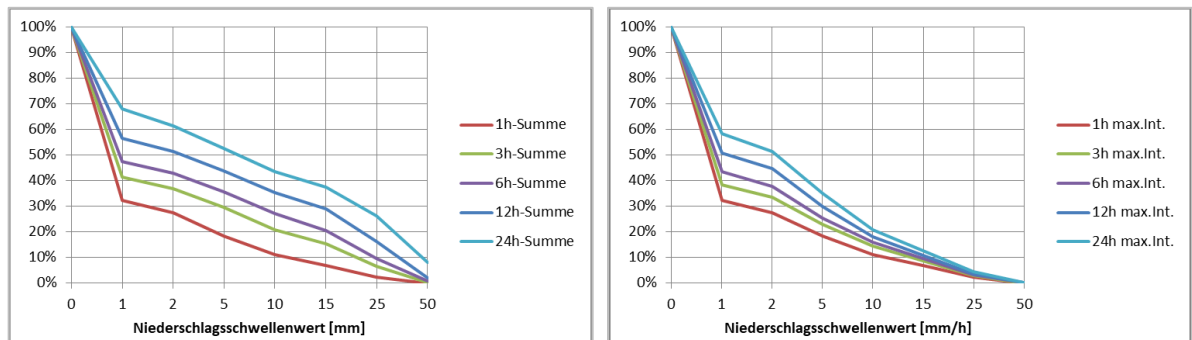


Abbildung 12: Anzahl Einsätze in Prozent nach x-Stunden-Niederschlagssumme (links) und max. Niederschlagsintensitäten in den x Stunden vor dem Einsatz (rechts)

In einem weiteren Schritt werden die verschiedenen Niederschlagsparameter zusammen mit den Einsatzdaten im GIS dargestellt, wobei sich die Analyse auf Perioden mit einer grösseren Zahl von Einsätzen beschränkt. Mit Hilfe des Zeitschiebereglers im GIS können die Karten zeitlich animiert werden (Abbildung 13 und Abbildung 14 für das Ereignis vom 7./8. Juni 2015).

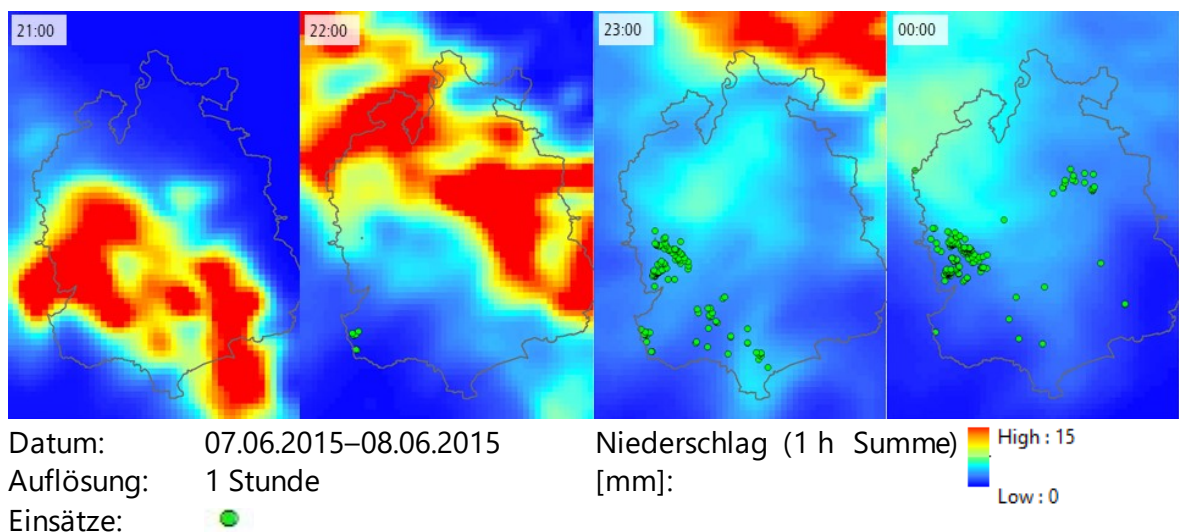


Abbildung 13: Visualisierung des Niederschlagsereignisses vom 7./8. Juni 2015 (1-Stunden-Niederschlagssumme) und der nachfolgenden Einsätze von SRZ über die Zeit [4], [5].

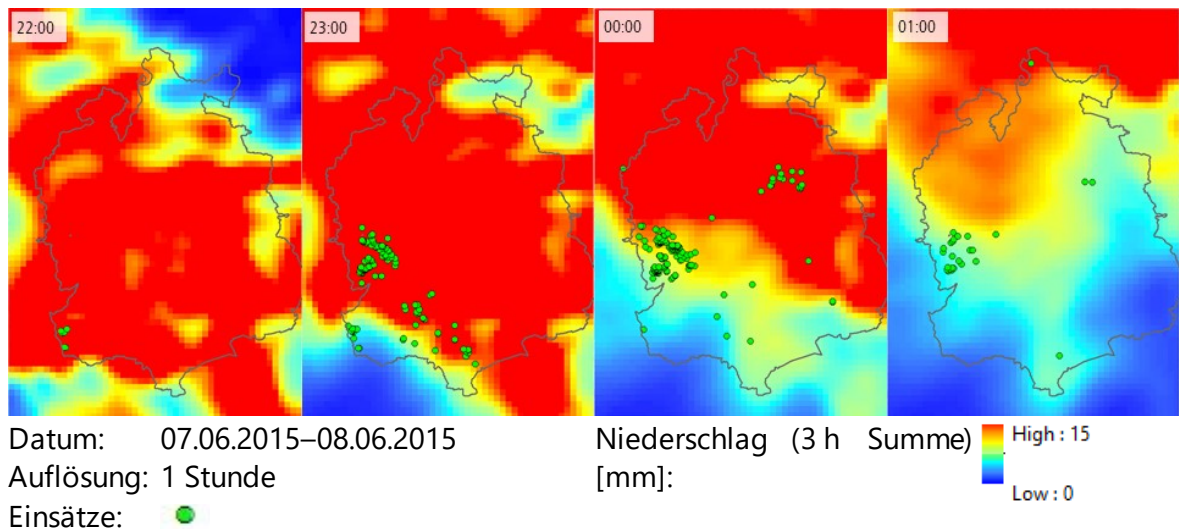


Abbildung 14: Visualisierung des Niederschlagsereignisses vom 7./8. Juni 2015 (3-Stunden Niederschlagssumme) und der nachfolgenden Einsätze von SRZ über die Zeit [4], [5].

Die visuelle Analyse zeigt klar, dass bei einer Häufung der Einsätze von SRZ ein Zusammenhang zwischen dem Niederschlagsgeschehen und den Einsätzen besteht. Während Niederschlagsereignisse mit nur einem oder wenigen nachfolgenden Einsätzen meist kein klares Niederschlagssignal aufweisen, ist der Niederschlag bei einer grösseren Zahl von nachfolgenden Einsätzen ein entscheidender Faktor für die Einsatzauslösung. Eine vertiefte Analyse des Zusammenhangs zwischen Niederschlag und Einsatzauslösung ist also sinnvoll. Folgende Schlüsse und Hypothesen können aus der explorativen Analyse gezogen werden:

Relevante Niederschlagsereignisse

- Niederschlagsereignisse mit wenigen nachfolgenden Einsätzen eignen sich kaum für die Herleitung eines kritischen Schwellenwertes des Niederschlages für die Einsatzauslösung. Der Fokus liegt in der vorliegenden Studie klar auf grossen, für die Einsatzkräfte relevanten Ereignissen und nicht auf Einzeleinsätzen.

Unterscheidung von Niederschlagsereignissen

- Es kann unterschieden werden zwischen langandauernden Niederschlägen und kurzfristigen, lokalen Starkniederschlägen.
- Je lokaler und intensiver Niederschlagsereignisse sind, desto besser korrelieren sie mit den Einsatzdaten. Bei langandauernden, grossflächigen Niederschlagsereignissen sind die Einsätze über grössere Gebiete und Zeiträume verstreut.

Eingang von Notrufen

- Notrufe können relativ schnell nach dem Einsetzen von Niederschlägen erfolgen, teilweise schon in der ersten Stunde.
- Notrufe können sich zeitlich wesentlich länger hinziehen als die Niederschlagsereignisse. Noch Stunden nach dem letzten Niederschlag können Notrufe eingehen.

- Die Anzahl und der Zeitpunkt eingehender Notrufe sind nicht nur abhängig von der Niederschlagsmenge, sondern werden ebenfalls vom Ort und Zeitpunkt des gefallenen Niederschlags beeinflusst. Nur wenn Menschen und Sachwerte von Überschwemmungen betroffen sind, werden Notrufe abgesetzt. Fallen die relevanten Niederschläge am späten Abend oder in der Nacht, häufen sich die Alarmierungen in den Morgenstunden, wenn die betroffenen Personen aufwachen und den Schaden bemerken. Dies entspricht der Erfahrung von Kutschker et al. [20].

4.1.2 Überlagerung Einsatzdaten mit Gefährungsdaten

Der niederschlagsbasierte Schwellenwert in Bezug auf die Einsätze von SRZ kann durch die Herkunft des Wassers, bzw. die Art der Überschwemmung beeinflusst sein.

In der Gefahrenkarte Wasser (Kapitel 3.3.1) sind Gebiete ausgewiesen, die durch ausufernde Flüsse und Bäche oder ansteigende Seespiegel gefährdet sind. Die Gefährdungskarte Oberflächenabfluss (Kapitel 3.3.2) zeigt hingegen auf, welche Gebiete durch Niederschlagswasser, das nicht versickern kann und deshalb an der Oberfläche ausserhalb von Gerinnen abfließt, betroffen sind. Entsprechend werden für die Zuordnung der möglichen Überschwemmungsursache die Einsatzdaten mit der Gefahrenkarte Wasser (Überflutung aus Gewässern) sowie der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss überlagert (Anhang B 2.3). Diese Überlagerung liefert nur Hinweise für eine erste Einordnung und erlaubt keine eindeutige Aussage zur Überschwemmungsursache. Die Ursache ist zum einen in der Einsatzdatenbank von SRZ nicht dokumentiert, zum andern können mehrere Faktoren zu einer Überschwemmung beitragen (z. B. Überflutung aus Gewässern oder Oberflächenabfluss in Kombination mit Überlastung der Siedlungsentwässerung). Abfluss-Messdaten werden in die Analyse nicht mit einbezogen, weil anhand der wenigen Abflussmessstationen keine genügend genauen Aussagen zu möglichen Hochwasserabflüssen in kleineren Seitengerinnen gemacht werden können.

Da die Einsatzdaten nur als Punkte vorliegen, die Betroffenheit eines Gebäudes sich aber auf eine Fläche bezieht, werden in einem Zwischenschritt die Einsatzdaten einem Gebäudegrundriss zugeordnet (Kapitel 3.4 und Anhang B 2.2). Rund 85 % der Punktdaten für die Einsätze von SRZ liegen innerhalb eines Gebäudegrundrisses des AV-Datensatzes des Kantons Zürich. Nur bei Einsätzen ausserhalb von Gebäuden wird der Einsatzpunkt selbst mit der Gefahreninformation überlagert. Im Anhang B 2.2 und Anhang B 2.3 ist dieses Vorgehen detailliert beschrieben.

Rund 96 % aller Einsatzdaten von SRZ liegen innerhalb des Perimeters der Gefahrenkarte Wasser. In diesem Perimeter ist beurteilt worden, ob eine Fläche durch Hochwasser gefährdet ist oder nicht. Nur 4 % der Einsätze von SRZ liegen ausserhalb des Perimeters und sind daher ohne eine Gefahrenangabe. Gut zwei Drittel der Einsatzdaten (71 %) liegen ausserhalb der durch Hochwasser gefährdeten Gebiete (siehe Tabelle 2). 20 % der Einsätze liegen in Gebieten mit Restgefährdung oder geringer Gefährdung, 5 % in Gebieten mit mittlerer Gefährdung (siehe Abbildung 15). Erhebliche Gefährdung wird nur bei 63 der insgesamt 16'193 untersuchten Einsätze ausgewiesen.

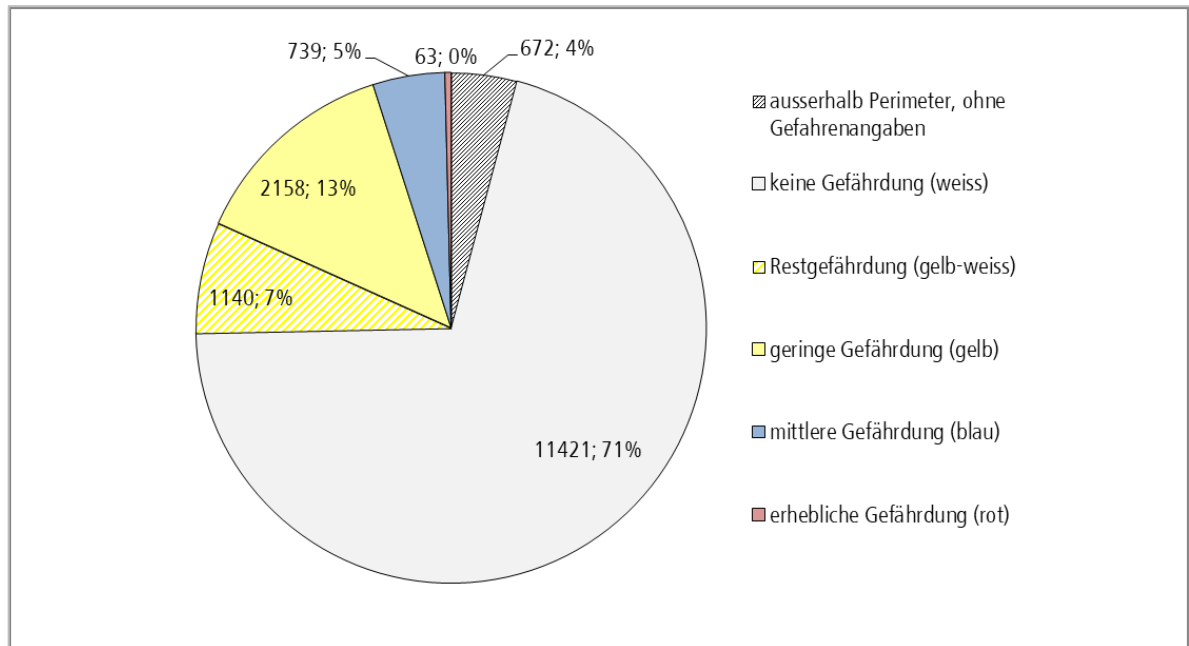


Abbildung 15: Verteilung der Einsatzdaten innerhalb der Gefahrenstufen Wassergefahren (Überschwemmung aus Bächen, Flüssen und Seen) (nach [5], [8]).

Die Überlagerung der Einsatzdaten mit den Gefährdungsdaten zeigt weiter, dass rund 75 % (74,4 %) aller Einsätze von SRZ innerhalb des potenziell durch Oberflächenabfluss betroffenen Bereichs liegen (siehe Tabelle 2). Zu berücksichtigen ist, dass die Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Informationen auf die Hinweisstufe liefert. Die Aufbereitung der Modellgrundlagen (z. B. leichte Absenkung befestigter Flächen) sowie die Darstellung von Zufahrten oder Kleinstrukturen kann im Einzelfall zu einer Über- als auch zu einer Unterschätzung der Betroffenheit führen (siehe Anhang B 2.3).

Die Gefährdung ausgehend von Oberflächenabfluss wurde lange Zeit unterschätzt und in den Gefahrenbeurteilungen nicht explizit berücksichtigt. Mit dem Vorliegen der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss wird diese Lücke geschlossen. Zurzeit fehlen systematische und quantitative Untersuchungen zum Oberflächenabfluss im Kanton Zürich aber noch. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass Oberflächenabfluss für 50 % aller Schäden verantwortlich ist [13]. Die Auswertungen in der vorliegenden Studie zeigen tendenziell ähnliche Verhältnisse. Nur rund 25 % (25,6%) der Einsätze liegen innerhalb einer Fläche der Gefahrenkarte Wasser. Dem stehen die rund 75% der Einsätze gegenüber, welche auf Prozessflächen von Oberflächenabfluss entfallen. Diese Betrachtung ist sicher durch die Methodenwahl bzw. Auswertung mitbeeinflusst. Dabei handelt es sich um eine eher pessimistische Betrachtung, da auch die nur randlich vom Prozess Oberflächenabfluss gestreiften Gebäude als betroffen ausgewiesen werden (siehe Anhang B 2.3). Zudem werden unterschiedliche Detailstufen miteinander verglichen. Da die Gefährdungskarte Oberflächenabfluss im Massstab 1:12'500 erstellt wurde, sind Aussagen auf Stufe Einzelgebäude nur beschränkt aussagekräftig. Nichtsdestotrotz wird klar, dass dem Prozess Oberflächenabfluss ein bedeutendes Gewicht beizumessen ist. Bei den in der vorliegenden Studie aufgeführten Zahlen ist zu berücksichtigen, dass nicht abschliessend gesagt werden kann, ob effektiv Überflutung oder Oberflächenabfluss Auslöser eines Einsatzes von SRZ war, da Informationen dazu fehlen.

Tabelle 2: Kreuztabelle: Verteilung der 16'193 erfolgreich mit Niederschlagsdaten angereicherten Einsatzdaten innerhalb der Gefahrenkarte Wasser (Überschwemmung aus Bächen, Flüssen und Seen) bzw. der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss.

		Oberflächenabfluss		gesamt absolut	gesamt relativ
		gefährdet	nicht gefährdet		
GK Wasser	gefährdet	3'250	850	4'100	25 %
	nicht gefährdet	8'338	3'083	11'421	71 %
	ausserhalb Perimeter	458	214	672	4 %
gesamt absolut		12'046	4'147	16'193	100 %
gesamt relativ		74,4 %	25,6 %	100 %	

Die hohe Zahl von Einsätzen in Gebieten, die durch Oberflächenabfluss betroffen sind, lässt vermuten, dass hier tendenziell eher kurzzeitige Starkniederschläge relevant sind. Andererseits sind für die Überflutung durch grössere Gewässer länger andauernde Niederschläge entscheidend.

Knapp ein Fünftel aller Einsätze (3'083) fand in Gebieten statt, die weder hinsichtlich Oberflächenabfluss noch bezüglich Wassergefahren als betroffen gelten. Die Überschwemmungsursache bleibt hier unklar (siehe Tabelle 2).

4.1.3 Überlagerung Einsatzdaten mit der Bevölkerungsdichte

Um die Hypothese zu untersuchen, dass es in Gebieten mit hohem Schadenpotenzial mehr Einsätze gibt als in Gebieten mit geringem Schadenpotenzial, werden die Einsatzdaten mit der Bevölkerungsdichte überlagert. In Abbildung 16 sind die Bevölkerungsdichte und die Einsatzdichte (Einsätze ab dem 12.11.2012, gesamter Kanton Zürich) einander gegenübergestellt. Die Karte der Einsatzdichte zeigt ein recht homogenes Bild. Der grösste Teil der Fläche mit Einsätzen weist eine Dichte von ein bis drei Einsätzen pro Hektare auf. Einzig im Gebiet Oerlikon/Dübendorf ist eine grössere Zahl von Einsätzen pro Hektare erkennbar (Abbildung 16, unten).

Die Abhängigkeit der Anzahl Einsätze von der Bevölkerungsdichte ist nur gering. Zwar fallen über ein Drittel der Einsatz-Punkte auf Flächen mit einer Bevölkerungsdichte von 11 bis 50 Einwohnern pro Hektare, bzw. drei Viertel auf Flächen mit Bevölkerungsdichten von 11 bis 250 Einwohnern pro Hektare (Abbildung 16 oben links). Wie die Gegenüberstellung der Bevölkerungsdichte mit den Einsatzdaten in Abbildung 17 jedoch zeigt, verlaufen die Summenkurven für die Einsätze nach Bevölkerungsdichte und für die Flächenanteile nach Bevölkerungsdichte parallel. Das bedeutet, dass die meisten Einsätze in Gebieten mit einer hohen Bevölkerungsdichte dokumentiert sind, diese Gebiete aber auch den grössten Flächenanteil ausmachen. Dies wird bestätigt, wenn die Anzahl Einsätze pro Hektar bezogen auf die Bevölkerungsdichte dargestellt wird (Abbildung 18). Hier steigt der Mittelwert pro Hektare lediglich von 1,2 auf 1,75 an. Dass eine hohe Bevölkerungsdichte nicht zwangsläufig eine grosse Zahl von Einsätzen nach sich zieht, ist ausserdem damit zu begründen, dass die

Gefährdungssituation durch Hochwasser und Oberflächenabfluss eine wichtige Rolle spielt (Kapitel 4.1.2).

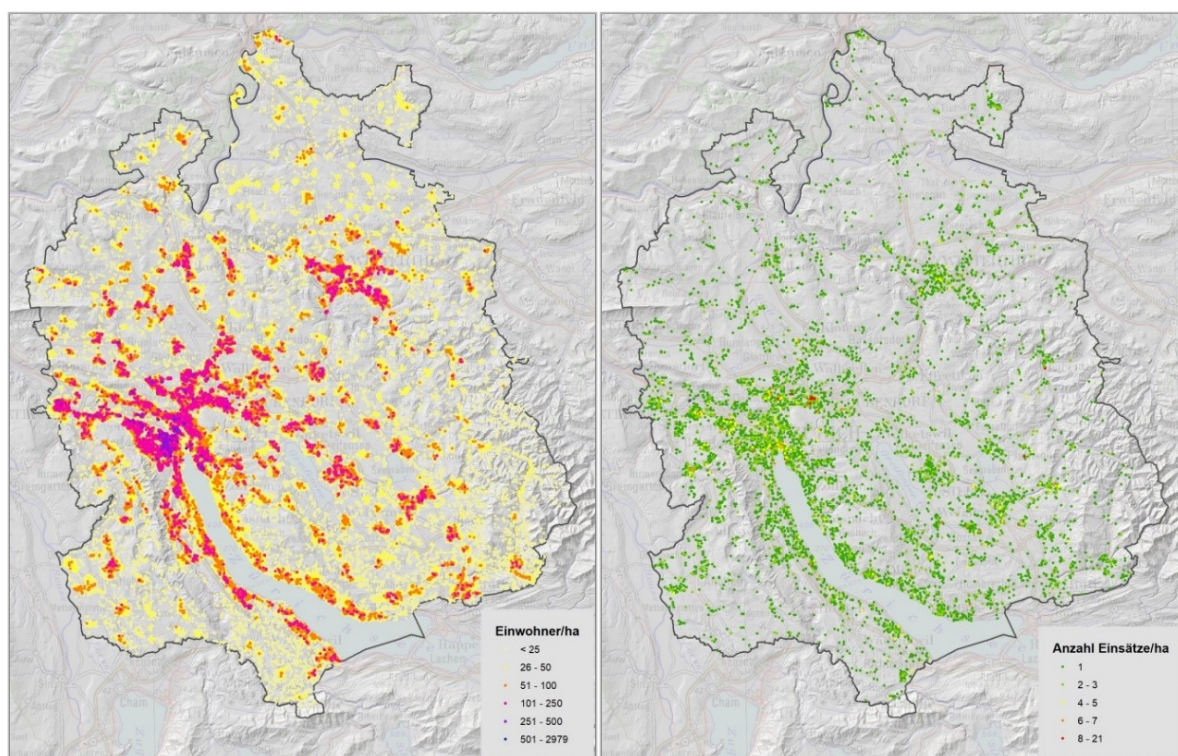


Abbildung 16: Bevölkerungsdichte 2010 gemäss [3] (links) und Einsatzdichte ab 12.11.2012 gemäss [5] (rechts) pro Hektare.

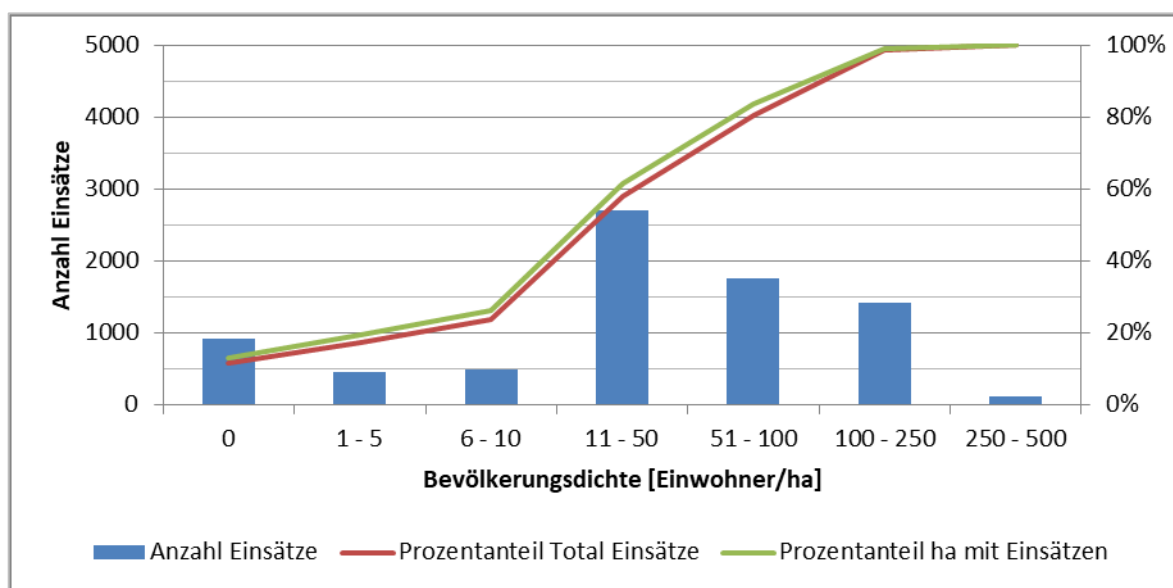


Abbildung 17: Gegenüberstellung Bevölkerungsdichte [3] und Anzahl Einsätze [5] (Periode 12.11.2012–7.2.2018)

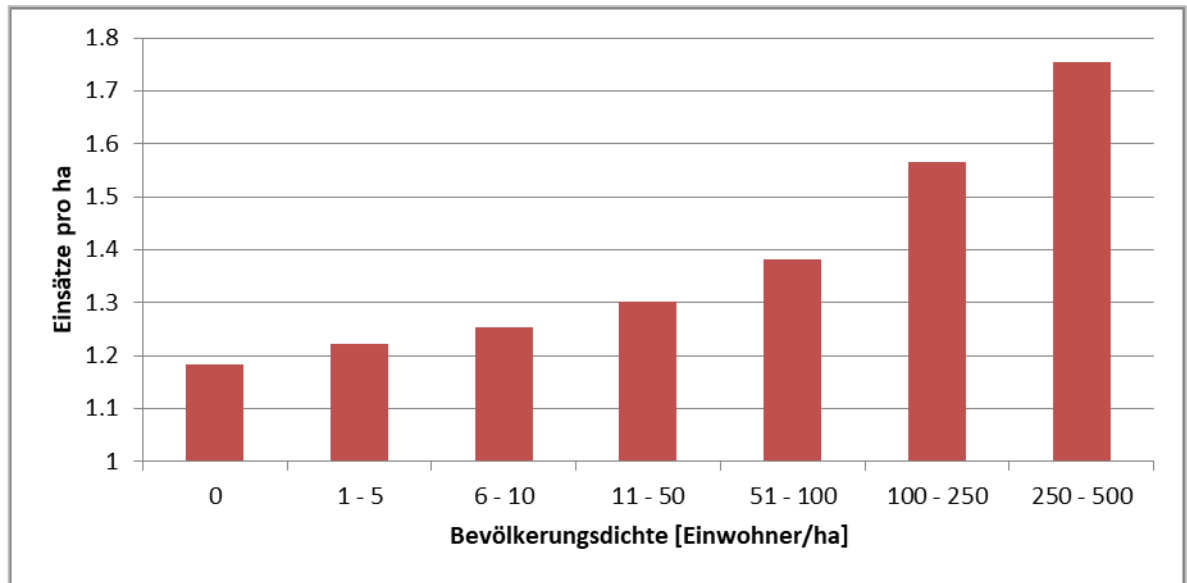


Abbildung 18: Gegenüberstellung Bevölkerungsdichte [3] und Einsatzdichte [5] pro Hektare (Periode 12.11.2012–7.2.2018)

4.2 Statistische Analyse

Die statistische Analyse bestätigt den Zusammenhang zwischen Niederschlag und Einsätzen und bekräftigt die Unterscheidung von kurzen Starkniederschlägen und langandauernden Niederschlagsereignissen.

Begründet durch die Resultate einer Hauptachsentransformation kann das Erklärungsmodell des Zusammenhangs zwischen Niederschlag und Einsätzen auf zwei latente Variablen reduziert werden. Dies entspricht einem allgemeinen Mass für die Niederschlagsmenge und einer Variablen zur Unterscheidung zwischen kurzem Starkniederschlag und langandauerndem Niederschlag.

Die Hauptachsentransformation liefert demnach Hinweise auf eine mögliche Kategorisierung der Einsätze nach dem sie auslösenden Niederschlagstyp. Mit rein statistischen Analysen (Clusteranalyse) ist eine konkrete Kategorieneinteilung jedoch nicht möglich.

Eine Grundannahme der vorliegenden Studie ist, dass sich aus messbaren Variablen und den registrierten Einsätzen von SRZ ein Erklärungsmodell diese Einsätze ableiten lässt (Kapitel 2). Bereits bei der Datenaufbereitung und der Exploration kristallisieren sich Datensätze mit erhöhter Erklärungskraft heraus. Nicht überraschend zählen insbesondere die Niederschlagsdaten dazu. Daher gilt ihnen in den statistischen Analysen ein besonderes Augenmerk (Kapitel 4.2.1 und 4.2.2, sowie Anhang B 3).

4.2.1 Hauptachsentransformation

Aus den in den Kapiteln 3.2 bis 3.3 beschriebenen Datensätzen zu Niederschlag und Gefährdung lassen sich jedem Einsatz verschiedene Informationen mit unterschiedlicher Erklärungsmacht zuordnen. Die aufbereiteten Informationen werden Indikatorvariablen

genannt (z. B. «3-Stunden-Niederschlagssumme»). Absichtlich werden mehr Indikatorvariablen aufbereitet, als für ein Erklärungsmodell nötig sind. Dies, weil im Vorfeld nicht klar ist, welche Indikatoren entscheidend sind und aus welchen sich die effektiven (sog. latenten) Variablen ableiten lassen, welche im Modell einen entscheidenden erklärenden Charakter haben.

Folgende 18 Indikatorvariablen werden für die Hauptachsentransformation verwendet:

- 8 Parameter für die Niederschlagssumme
(x-Stunden-Summe, wobei x = 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 oder 72)
- 8 Parameter für die maximale Niederschlagsintensität
(höchste Stundensumme in einem Zeitraum von x Stunden, wobei x = 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 oder 72)
- 2 Parameter für die Gefährdungsinformation
(Gefährdung durch Überflutung ausgehend von Fliessgewässern oder Seen und Betroffenheit durch Oberflächenabfluss)

Um die Grösse des Ausgangsdatensatzes ohne wesentlichen Datenverlust zu verringern, werden Hauptachsentransformationen (siehe [17]) auf die 16 Indikatorvariablen aus den Niederschlagsdaten und die beiden weiteren aus den Gefährdungsinformationen angewendet. Details zu den Berechnungen sind in Anhang B 3.1 beschrieben. Die Analysen liefern folgende Erkenntnisse:

- Die Niederschlagsdaten weisen den höheren Informationsgehalt (Erklärungsmacht) auf als die Gefährdungsdaten.
- Die beiden Gefährdungsvariablen (aus der Gefahrenkarte Wasser und aus der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss) weisen keine Korrelation untereinander auf.
- Ebenso wenig korrelieren die Gefährdungsinformationen mit den Niederschlagsvariablen.
- Die 16 untersuchten Niederschlagsindikatoren weisen untereinander hohe Korrelationen auf. Ein grosser Teil der gleichen Information (86 %) lässt sich in zwei Variablen abbilden.

Aus der Analyse ergeben sich zwei latente Variablen (Hauptkomponenten), welche sich interpretieren lassen. Die erste Hauptkomponente stellt ein generelles Regenmass dar. Je mehr es geregnet hat (egal ob über kurze oder lange Zeit), desto ausgeprägter ist die latente Variable. In der zweiten Hauptkomponente lassen sich kurze Starkniederschläge von langandauernden Regenfällen unterscheiden. Ist die zweite latente Variable hoch, so hat es in kurzer Zeit viel geregnet, während die Langzeitregensummen vergleichsweise tief sind (Tabelle 3).

Daraus leitet sich ab, dass für die Herleitung eines niederschlagsbasierten Schwellenwertes für die Einsatzauslösung zwischen den beiden Niederschlagsereignissen «kurzer Starkniederschlag» und «langandauernder Niederschlag» unterschieden werden muss.

Tabelle 3: Resultate der Hauptachsentransformation: Mit Hilfe von zwei Hauptkomponenten (latente Variablen) lassen sich die grösseren Einsätze von SRZ erklären.

Hauptkomponenten	Interpretation
Erste Hauptkomponente: generelles Regenmass	Die Variable ist umso grösser, je mehr Niederschlag gefallen ist.
Zweite Hauptkomponente: Unterscheidung zwischen kurzem Starkniederschlag und langandauerndem Niederschlag	Je grösser die Variable, desto mehr hat es in kurzer Zeit geregnet. Die Langzeitregensumme ist vergleichsweise gering. Je kleiner die Variable, desto grösser ist die Langzeitregensumme, während die kurzzeitigen Niederschlagsintensitäten relativ gering sind.

4.2.2 Clusteranalyse

Aus fachlicher Sicht liegt die Vermutung nahe, dass sich die Einsätze in mindestens zwei Kategorien einteilen lassen. Einsätze aufgrund einer Überschwemmung aus einem Gerinne oder See z. B. verlaufen anders als Einsätze, die durch Oberflächenabfluss ausgelöst wurden. Dies wird durch das Resultat der Hauptachsentransformation bestätigt (Kapitel 4.2.1). Für eine Kategorisierung der Daten bietet sich die Clusteranalyse an. In der vorliegenden Studie wird die Clusteranalyse mehrfach durchgeführt (K-Means-Clustering [19]). Details sind Anhang B 3.2 dargestellt. Folgende Erkenntnisse wurden gewonnen (siehe auch Abbildung 19):

- Aufgrund der Niederschlagsdaten lassen sich die Einsätze nicht scharf in Klassen (Cluster) einteilen.
- Statistisch lässt sich keine sinnvolle Clusteranzahl ermitteln.
- Die von der Clusteranalyse vorgeschlagene Trennung ist kritisch zu hinterfragen, da sie die Daten scheinbar willkürlich auftrennt.
- Eine bedeutende Zahl von Einsätzen weist nur niedrige Niederschlagswerte auf.

Eine konkrete Kategorisierung der Einsatzdaten ist demnach mit rein statistischen Analysen nicht möglich.

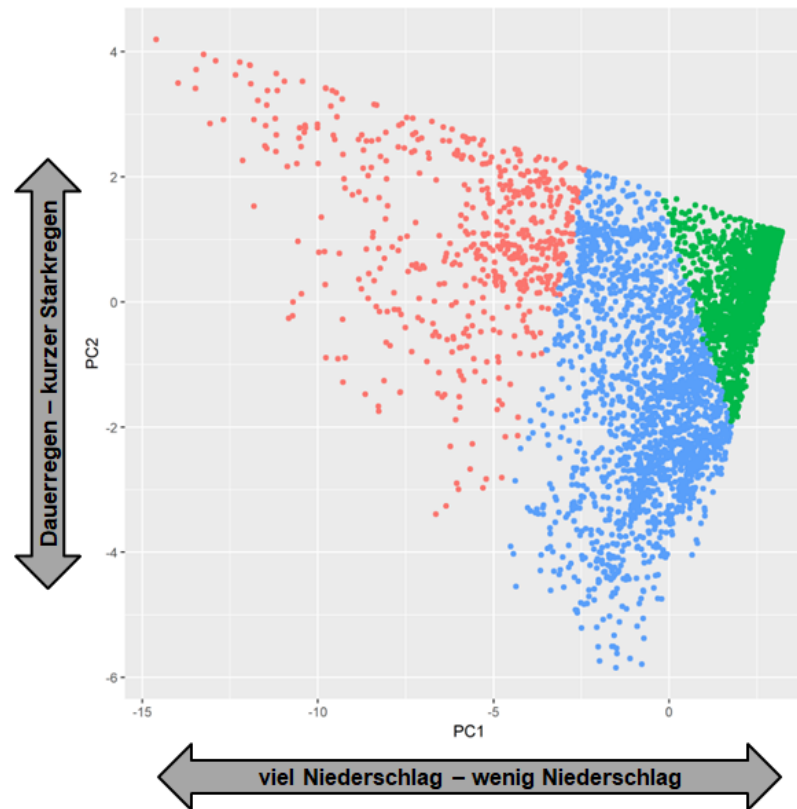


Abbildung 19: Resultate der Clusteranalyse (drei Cluster), dargestellt in den ersten zwei Hauptkomponenten.

4.3 Kategorisierung der Einsätze

Die Einsätze werden nach dem auslösenden Niederschlagstyp in drei Kategorien eingeteilt. Die Einteilung erfolgt anhand der statistischen Auswertungen unter Einbezug von Fachwissen und Erfahrung.

- Kategorie 0: der Grund für die Einsatzauslösung ist unbestimmt
- Kategorie 1: langandauernder Niederschlag führt zur Einsatzauslösung
- Kategorie 2: kurzer Starkniederschlag ist für die Einsatzauslösung verantwortlich

Die Kategorisierung der Einsätze ermöglicht die visuelle Unterscheidung von Ereignismustern verschiedener Niederschlagstypen und bestätigt die Erkenntnisse aus der explorativen Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Einsätzen und Niederschlag:

- langandauernder Niederschlag führt zu grossflächig verteilten Einsätzen
- kurzer Starkniederschlag zeigt sich in räumlich und zeitlichen Einsatzkonzentrationen

Die statistische Analyse liefert zwar Hinweise für eine mögliche Kategorienbildung (Hauptachsentransformation, Kapitel 4.2.1), nicht aber eine direkte Kategorienzuteilung (Clusteranalyse, Kapitel 4.2.2). Die Statistik zeigt, dass der Niederschlag den grössten Erklärungsbeitrag liefert und dass zwischen kurzzeitigem Starkregen und länger andauernden Niederschlägen zu unterscheiden ist. Basierend auf diesen Grundlagen und

Erfahrungen aus früheren Niederschlagsereignissen wird ein einfaches Klassifikationsverfahren entwickelt.

Die Einsätze werden aufgrund verschiedener Niederschlagsindikatoren in drei Kategorien unterteilt (siehe Entscheidungsbaum in Abbildung 20). Die Aufteilung ist durch die statistische Analyse motiviert (insbesondere Hauptkomponentenanalyse), aber auf eine praktische Anwendbarkeit ausgerichtet:

- Falls die Niederschlagssumme der letzten 72 h vor dem Einsatz kleiner als 10 mm ist, gehört der Einsatz zur Kategorie 0 «unbestimmt».
- Anderenfalls
 - Vorausgesetzt, dass mehr als ein Drittel des Niederschlags der letzten 24 Stunden innerhalb einer Stunde fiel und falls in dieser Stunde die Niederschlagsmenge 10 mm überstieg, so gehört der Einsatz zur Kategorie 2 «kurzer Starkniederschlag»
 - Andernfalls fällt der Einsatz in die Kategorie 1 «langandauernder Niederschlag»

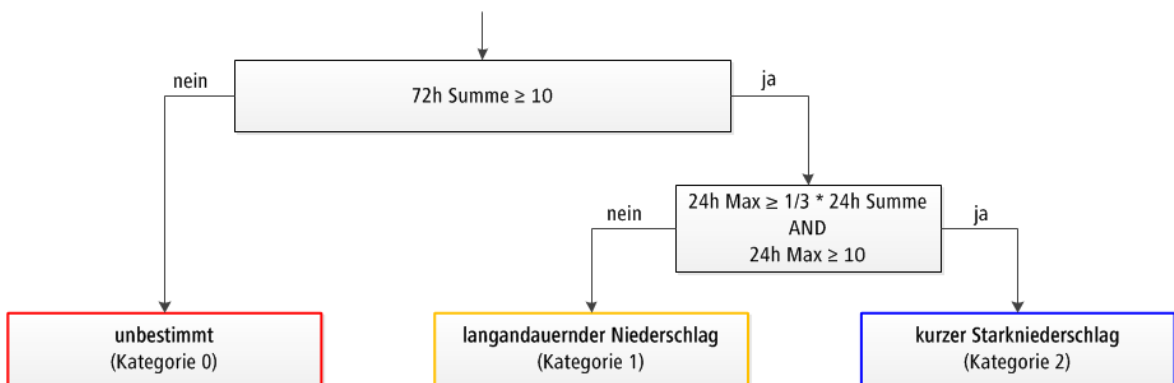


Abbildung 20: Kategorisierung der Einsätze nach dem sie auslösenden Niederschlagstyp. Unterschieden werden die Kategorien «unbestimmt» (Kategorie 0), «langandauernder Niederschlag» (Kategorie 1) sowie «kurzer Starkniederschlag» (Kategorie 2).

Für die Kategorisierung werden eher längere Zeitfenster verwendet, um nicht schon in dieser Phase die Herleitung der Schwellenwerte zu stark zu beeinflussen. Liegt die 72-h-Niederschlagssumme unter 10 mm, ist sie so gering, dass der Niederschlag kein plausibler Grund für eine Einsatzauslösung ist und der Einsatz anders begründet werden muss. Die 72 Stunden im ersten Schritt des Entscheidungsbaums in Abbildung 20 entsprechen dem längsten berechneten Zeitfenster, und Starkniederschläge über 24 Stunden sind sicher nicht mehr kurze Starkniederschläge. Der Wert lässt jedoch genügend Raum für unterschiedliche Zeitfenster bei den kurzen Starkniederschlägen (1, 2, 3, 6 und 12 Stunden).

Mit dieser Einteilung der Einsätze können Ereignismuster für die Niederschläge abgeleitet werden. Beispielhaft ist für die unterschiedlichen Kategorien je ein Niederschlagsereignis in Abbildung 21 dargestellt. Darin ist die unterschiedliche Natur von langandauerndem Niederschlag (Kategorie 1) und kurzen Starkniederschlagsereignissen (Kategorie 2) ersichtlich und es ist ein typisches Ereignis abgebildet, bei dem die Einsätze nicht primär durch Regen ausgelöst wurden (Sturmtief Burglind am 3. Januar 2018).

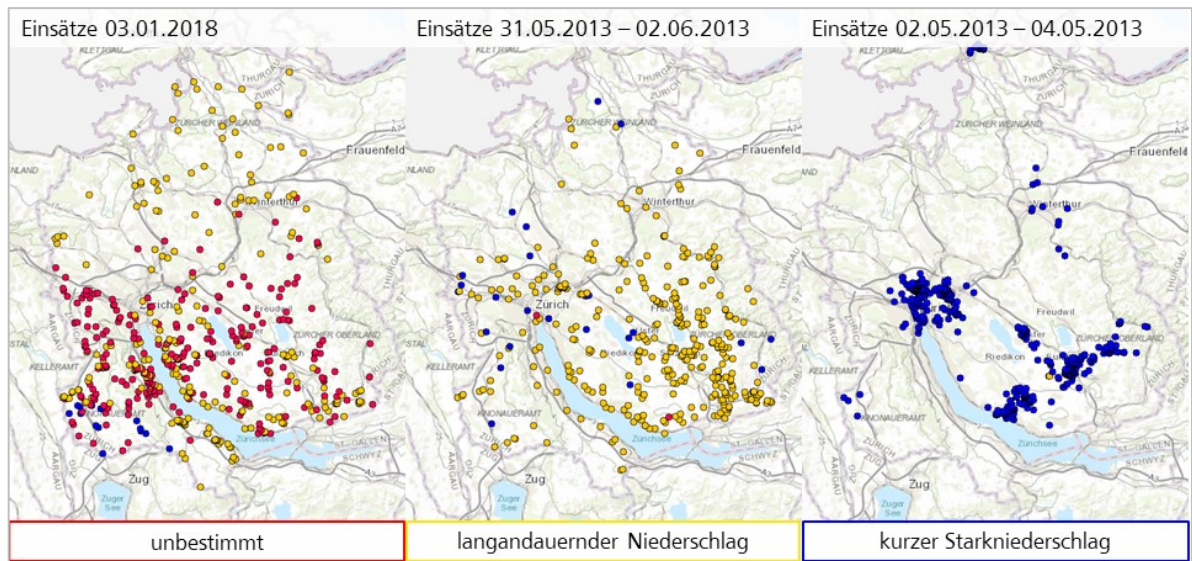


Abbildung 21: Einsätze dreier Ereignisse, nach Kategorie eingefärbt (nach [5]). Durch Gewitter ausgelöste kurze Starkniederschläge führen zu zellenförmigen Konzentrationen von Einsätzen, während langandauernde Niederschläge zu flächigen Mustern führen.

Es bestätigt sich das in der explorativen Datenanalyse gewonnene Bild (Kapitel 4.1.1): kurze Starkniederschläge führen zu örtlich und zeitlich konzentrierten Einsatzhäufungen, während sich die Einsätze nach langandauernden Niederschlägen über grössere Flächen verteilen (Abbildung 21).

4.4 Ereignisdefinition

Der Fokus der vorliegenden Studie liegt auf grossen, für die Einsatzkräfte von SRZ relevanten Niederschlagsereignissen, nicht auf Einzelereignissen. Für SRZ ist ein Niederschlagsereignis dann relevant, wenn innerhalb von sechs Stunden mehr als 50 Einsätze stattfinden. Nach dieser Definition fanden im Zeitraum zwischen Juli 2005 und Januar 2018 im Kanton Zürich 16 für SRZ relevante Niederschlagsereignisse statt.

Nur bei einer Häufung von Einsätzen von SRZ kann ein Zusammenhang zwischen Niederschlag und den darauf folgenden Einsätzen hergeleitet werden (Kapitel 4.1.1 und 4.2). Auch ist im Hinblick auf die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen für SRZ und die Einsatzkräfte in den übrigen Gemeinden nicht ein einzelner Einsatz von Interesse, sondern ein Niederschlagsereignis, bei dem innerhalb einer kurzen Zeit eine grössere Anzahl von Einsätzen geleistet werden muss. Ab wann für eine Feuerwehr eine Einsatzhäufung relevant ist, hängt u. a. von der Grösse der Einheit ab und ist daher unterschiedlich. Für die Definition der für SRZ relevanten Niederschlagsereignisse wird die Anzahl Einsätze pro Stunde ausgewertet. Bei 86 % (5'653) der 6'548 ausgewerteten Einsätze handelt es sich um Einzeleinsätze mit nur einem einzigen Einsatz pro Stunde (Abbildung 22). 24 % aller Einsätze (1'555) gehören zum Fall mit nur zwei Einsätzen pro Stunde.

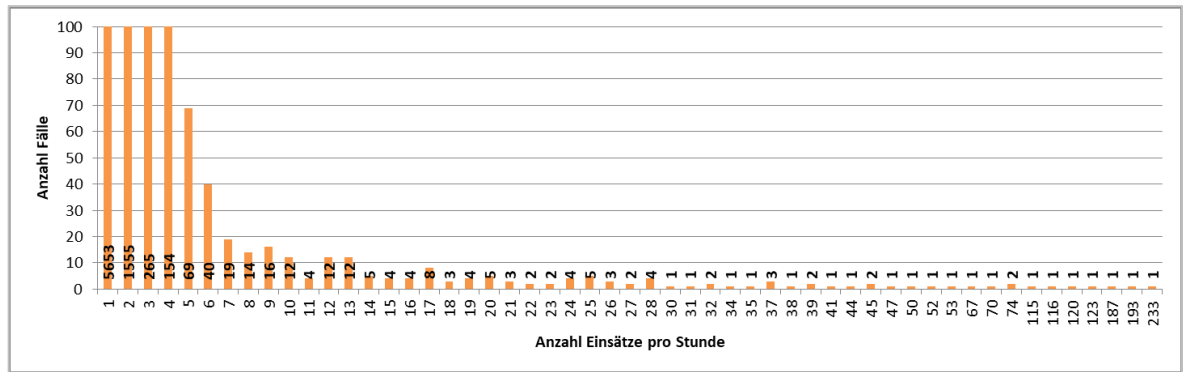


Abbildung 22: Anzahl Stunden (Fälle) bezogen auf die Anzahl Einsätze pro Stunde.

Da grössere Niederschlagsereignisse normalerweise nicht nur eine Stunde dauern, wird für die Definition der für SRZ relevanten Ereignisse die Anzahl Einsätze innerhalb von sechs Stunden verwendet. 95 % der gleitenden 6-Stundenfenster mit Einsätzen weisen 5 oder weniger Einsätze auf, 99 % 25 oder weniger. Für SRZ ist eine Einsatzhäufung erst dann relevant, wenn einem Niederschlagsereignis mehr als 50 Einsätze innerhalb von sechs Stunden folgen. Diese Grenze wurde empirisch und in Absprache mit SRZ festgelegt. (Abbildung 23). Insgesamt liegen im Zeitraum von Juli 2005 bis Januar 2018 140 Stunden (Fälle) über diesem Wert von 50 Einsätzen innerhalb von 6 Stunden. Für die zeitliche Abgrenzung eines für SRZ relevanten Niederschlagsereignisses werden folgende Kriterien verwendet:

- Ein Ereignis beginnt, wenn in einer Stunde mehr als 10 Einsätze ausgelöst werden.
- Ein Ereignis endet, wenn nach dem Beginn eines Ereignisses die Anzahl Einsätze unter 10 pro Stunde sinkt und innerhalb der nächsten sieben Stunden nicht wieder auf über 10 pro Stunde ansteigt.

Mit diesen Regeln werden die in Abbildung 23 den Wert von 50 Einsätzen innerhalb von sechs Stunden übersteigenden und in Tabelle 4 zusammengestellten Niederschlagsereignisse ermittelt.

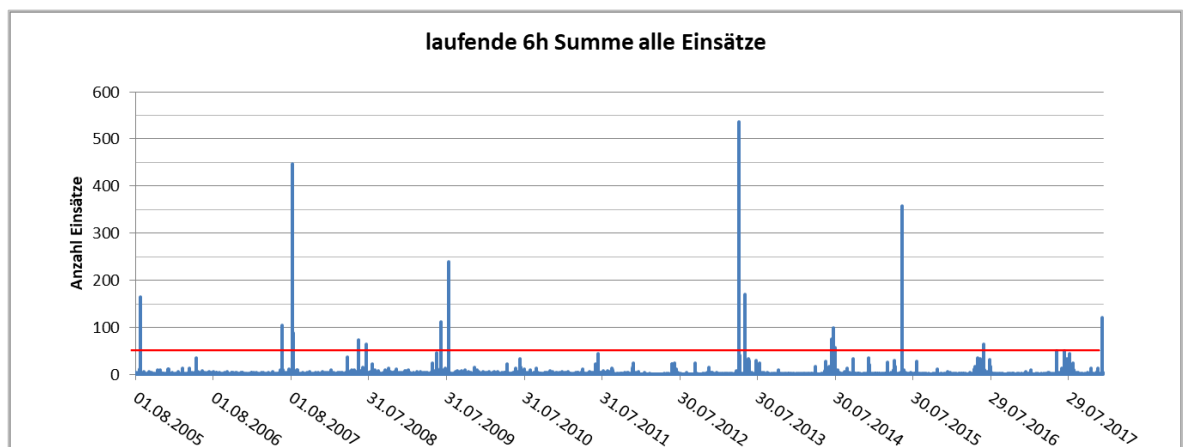


Abbildung 23: Laufende Summe der Anzahl Einsätze über sechs Stunden. Ein Niederschlagsereignis ist für SRZ gemäss den von SRZ gemachten Erfahrungen dann relevant, wenn es mehr als 50 Einsätze innerhalb von sechs Stunden (rote Linie) nach sich zieht.

Die 16 in Tabelle 4 aufgeführten Niederschlagsereignisse beinhalten rund 20 % aller Einsätze von SRZ. Jede der in Kapitel 4.3 und Abbildung 20 beschriebenen, nach Niederschlagstyp ausgelösten Einsatzkategorien ist enthalten.

Tabelle 4: Ereignisse mit 50 oder mehr Einsätzen innerhalb von sechs Stunden (chronologisch sortiert). Kategorie 0 «unbestimmt», Kategorie 1 «langandauernder Niederschlag», Kategorie 2 «kurzer Starkniederschlag».

Ereignis-Nr.	von	bis und mit	Kategorie	Anzahl Einsätze	
1	21.08.2005 20:00	22.08.2005 10:00	1	280	1,7 %
2	21.06.2007 09:00	21.06.2007 11:00	2	89	0,5 %
3	08.08.2007 19:00	09.08.2007 13:00	1	614	3,8 %
4	10.06.2008 19:00	10.06.2008 20:00	2	43	0,3 %
5	20.07.2008 17:00	20.07.2008 18:00	1 und 2	58	0,4 %
6	05.07.2009 20:00	05.07.2009 22:00	2	107	0,7 %
7	08.08.2009 14:00	08.08.2009 17:00	2	234	1,4 %
8	02.05.2013 19:00	03.05.2013 09:00	1 und 2	579	3,6 %
9	01.06.2013 02:00	01.06.2013 21:00	1	331	2,0 %
10	13.07.2014 00:00	13.07.2014 09:00	1 und 2	101	0,6 %
11	22.07.2014 08:00	22.07.2014 18:00	1	145	0,9 %
12	28.07.2014 18:00	28.07.2014 20:00	2	56	0,3 %
13	07.06.2015 21:00	08.06.2015 09:00	2	437	2,7 %
14	24.06.2016 21:00	24.06.2016 22:00	2	60	0,4 %
15	02.06.2017 19:00	02.06.2017 20:00	2	43	0,3 %
16	03.01.2018 10:00	03.01.2018 14:00	1 und 0	113	0,7 %

4.5 Herleitung der Schwellenwerte

Durch die Gegenüberstellung der Niederschlagsparameter bei den für SRZ relevanten Niederschlagsereignissen und den Niederschlagsparametern für alle Einsatzdaten können sowohl für kurze Starkniederschläge als auch für langandauernde Niederschläge quantitative Schwellenwerte hergeleitet werden, nach deren Überschreitung SRZ mit einer Häufung von Einsätzen zu rechnen hat:

- Schwellenwert kurzer Starkniederschlag: maximale Intensität in den 3 Stunden vor Einsatz 15 mm/h
- Schwellenwert langandauernder Niederschlag: Summe 30 mm/12 h

Quantitative Schwellenwerte legen fest, ab welchem Niederschlag SRZ mit einem relevanten Ereignis, also mit über 50 Einsätzen in sechs Stunden rechnen muss (siehe Kapitel 4.4). Für die konkrete Herleitung der Schwellenwerte wird analysiert, wie «ausserordentlich» die

Niederschläge während den in Kapitel 4.4 hergeleiteten Niederschlagsereignissen im Vergleich zu den Niederschlagsparametern für alle Einsätze sind. Dafür werden in einem ersten Schritt die Verteilungen der Werte für die Summen- und Maxima-Parameter für die in Kapitel 3.2 definierten Zeitperioden von 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 und 72 Stunden vor einem Einsatz berechnet. Die Resultate sind in Abbildung 24 dokumentiert. Sie zeigen, dass die Medianwerte bei den meisten Parametern eher tief sind. Das 75%- und 90%-Perzentil steigen bei den maximalen Stundenintensitäten bei den längeren Dauern nur noch wenig an, bei den Summen aber deutlich.

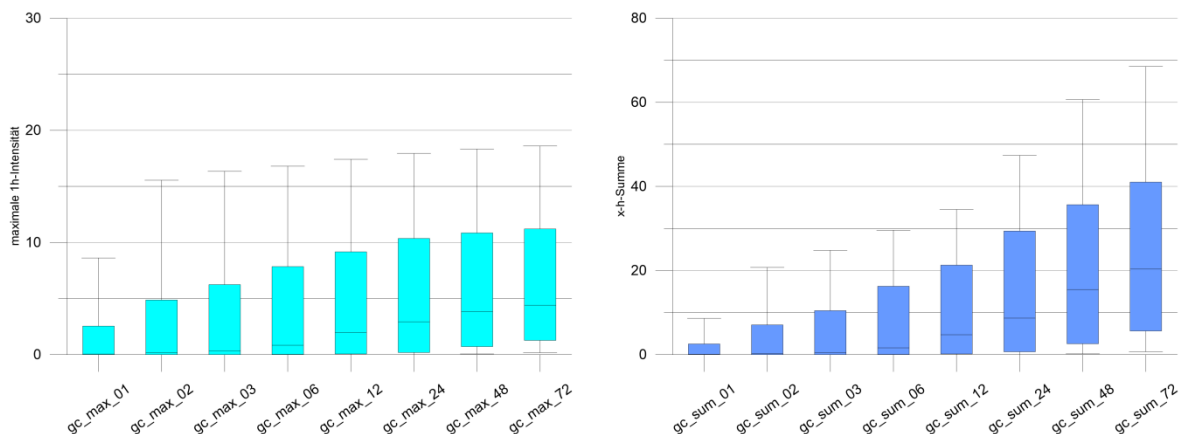


Abbildung 24: Verteilung der x-Stunden-Summen (gc_sum_x, rechts) und der maximalen Stundenintensitäten (gc_max_x, links) für 1-, 2-, 3-, 6-, 12-, 24-, 48- und 72-Stundenperiode (Perzentile 10 %, 25 %, Median, 75 %, 90 %)

In einem weiteren Schritt wurden für die in Tabelle 4 aufgelisteten Niederschlagsereignisse die Medianwerte für die Niederschlagssummen (Kategorie 1, langandauernde Niederschläge) und für die maximalen Niederschlagsintensitäten (Kategorie 2, kurze Starkniederschläge) für die verschiedenen Zeitperioden (1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 und 72 Stunden) berechnet und diese den Verteilungen der Niederschlagswerte aller gegenübergestellt (Abbildung 25). Die Gegenüberstellung zeigt, dass sich die für SRZ relevanten Ereignisse klar von den Verteilungen des gesamten Datensatzes abheben und Werte in den oberen Perzentilbereichen aufweisen. Damit bietet dieser Ansatz die Möglichkeit, Schwellenwerte für die Abgrenzung von Niederschlagsereignissen mit einer grösseren Zahl von nachfolgenden Einsätzen herzuleiten.

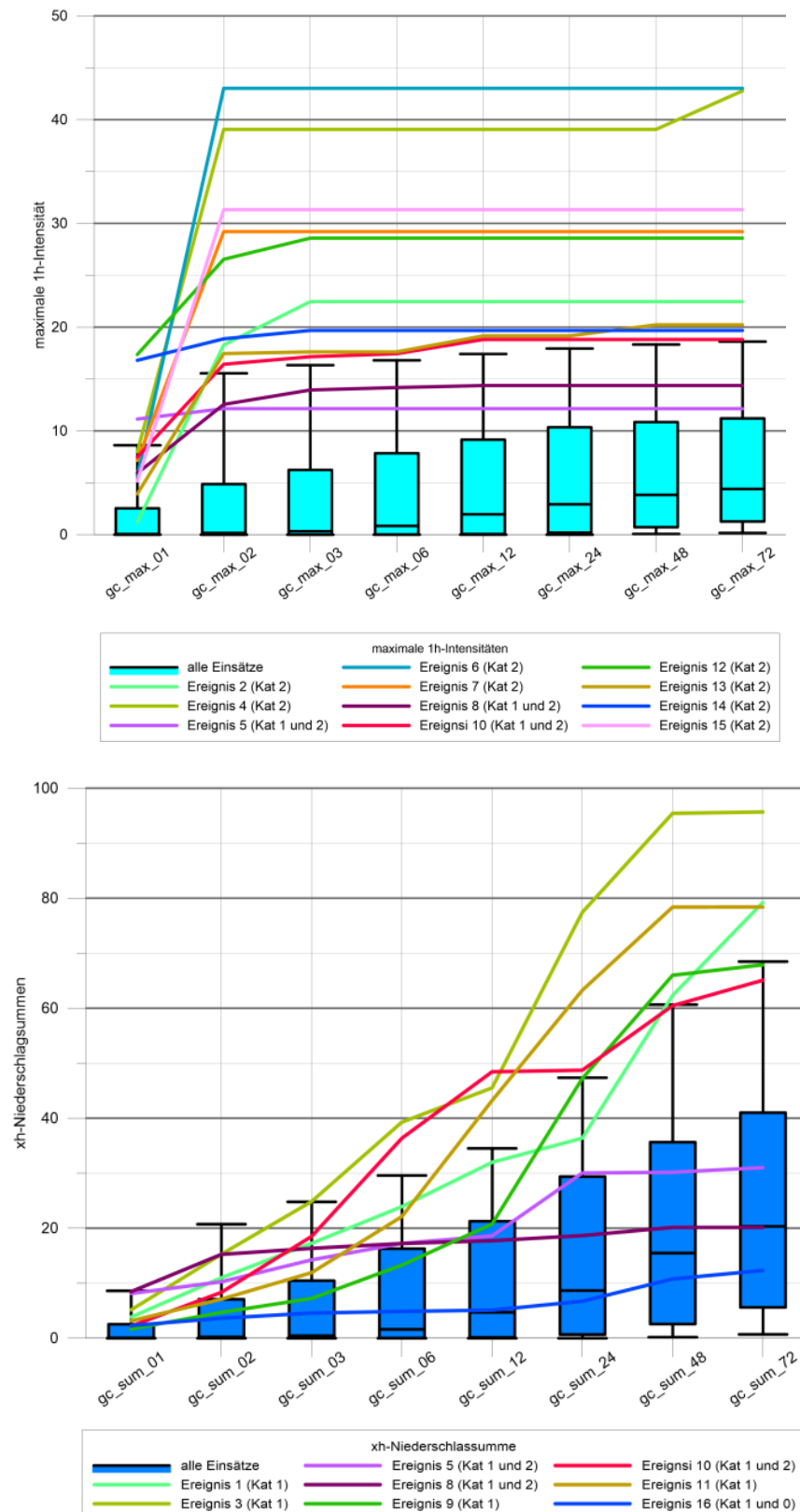


Abbildung 25: Gegenüberstellung der Niederschlagsparameter der für SR relevanten Niederschlagsereignisse zwischen Juli 2005 und Januar 2018 (Linien) und der Verteilung der Niederschlagswerte für alle Einsätze in dieser Zeitperiode (Boxplots) für kurze Starkniederschläge (oben) und langandauernde Niederschläge (unten).

Als Schwellenwert für die kurzen Starkniederschläge (Kategorie 2) wird die maximale Stundenintensität in den letzten drei Stunden (gc_max_03) verwendet. Ab dieser Dauer steigen die Werte bei den betrachteten Ereignissen kaum mehr an (Abbildung 25, oben). Der Schwellenwert wird auf 15 mm/h festgelegt. Dieser Wert liegt etwas unter dem 90%-Perzentil. Für die Niederschlagsereignisse Nr. 5 und Nr. 8 liegen die Werte etwas tiefer als der Schwellenwert. Bei beiden Ereignissen handelt es sich jedoch um Mischtypen zwischen langandauerndem Niederschlag (Kategorie 1) und kurzem Starkniederschlag (Kategorie 2).

Bei den langandauernden Niederschlägen (Kategorie 1) ist die Situation weniger deutlich. Ab einer Dauer von 12 Stunden liegen vier der für SRZ relevanten Niederschlagsereignisse im Bereich des 90%-Perzentils der Niederschlagssumme. Erst ab 48 Stunden steigt dieser Wert auf fünf Ereignisse (Abbildung 25, unten). Da über lange Zeiträume die Zahl der Einsätze nicht mehr wesentlich zunimmt (in sechs Stunden maximal 536 Einsätze, in 24 Stunden maximal 645 Einsätze), wird die 12-Stunden-Niederschlagssumme für den Schwellenwert für den langandauernden Niederschlag verwendet und der Schwellenwert auf 30 mm festgelegt. Auch dieser Wert liegt im Bereich des 90%-Perzentils. Bei der Hälfte der für SRZ relevanten langandauernden Niederschlagsereignisse liegt die 12-Stunden-Summe unterhalb dieses Schwellenwertes. Bei den Ereignissen Nr. 5 und Nr. 8 handelt es sich wieder um die Mischtypen. Das Ereignis Nr. 9 war ein Ereignis mit wiederholt zunehmenden und abschwellenden Niederschlägen, das sich über 19 Stunden hinzog. Für dieses Ereignis wäre die 24-Stunden-Summe besser geeignet, was aber für andere Ereignisse wiederum nicht zutrifft. Beim Ereignis Nr. 16 handelt es sich um das Sturmereignis Burglind von Anfang Januar 2018. Die Niederschlagssummen sind für dieses Ereignis über alle Zeiträume gering. Dass es trotzdem zu vielen Einsätzen kam, hängt einerseits damit zusammen, dass auch Sturmschäden darin enthalten sind, andererseits, dass in höheren Lagen neben dem Regen auch die Schneeschmelze eine Rolle spielte.

4.6 Evaluation der Schwellenwerte

Verschiedene statistische Analysen bestätigen die hergeleiteten Schwellenwerte.

- Die Schwellenwerte für kurze Starkniederschläge als auch für langandauernde Niederschläge sind relativ stabil gegenüber Änderungen in der Anzahl Einsätze. Eine breitere Abstützung der Schwellenwerte durch mehr für SRZ relevante Niederschlagsereignisse ist mit dem bestehenden Datenmaterial nicht möglich.
- Der Vergleich der Niederschläge der Periode 1981–2018 mit den Niederschlägen aus der Periode 2005–2018, für welche Einsatzdaten vorliegen, zeigt, dass die in der vorliegenden Studie verwendeten Niederschlagsdaten für den gesamten Zeitraum seit 1981 repräsentativ sind.
- Die Schwellenwerte sind plausibel: Verglichen mit der Extremwertstatistik von Stationsdaten liegen die Schwellenwerte unter einem 2,33-jährlichen Ereignis und auch die für SRZ relevanten Niederschlagsereignisse treten häufiger als alle 2,33 Jahre auf.
- Mit Anwendung der Schwellenwerte können die für SRZ relevanten Niederschlagsereignisse zwischen 2005 und 2018 reproduziert und somit auch die zukünftigen relevanten Niederschlagsereignisse vorhergesehen werden. Die Trefferquote («hit rate») ist gut. Fehlalarme, d. h. Niederschlagsperioden, in welchen einer der Schwellenwerte überschritten wird, jedoch keine Einsatzhäufung folgt, sind gering und nur bei langandauernden Niederschlagsereignissen zu erwarten.

Um die Güte der hergeleiteten Schwellenwerte zu prüfen, werden verschiedene zusätzliche Analysen durchgeführt. In einem ersten Schritt wird die Sensitivität der Niederschlagsparameter in Abhängigkeit von der Ereignisgrösse bzw. von der Anzahl Einsätze geprüft. Werden nur Werte von Ereignissen mit mehr als 10 Einsätzen pro Stunde verwendet, steigen die Perzentilwerte gegenüber den Werten, die aus allen Einsätzen berechnet wurden, deutlich an (Abbildung 26). Wird die Anzahl der Einsätze weiter erhöht (20 bzw. 50 Einsätze) verändern sich die Perzentile nur noch wenig. Dies gilt sowohl beim kurzen Starkniederschlag (Kategorie 2) (links) als auch für den langandauernden Niederschlag (Kategorie 1) (rechts). Damit würde sich nur wenig verändern, wenn die Anzahl Einsätze für die Herleitung der für SRZ relevanten Niederschlagsereignisse niedriger angesetzt würde als die jetzt verwendete Schwelle von 50 Einsätzen.

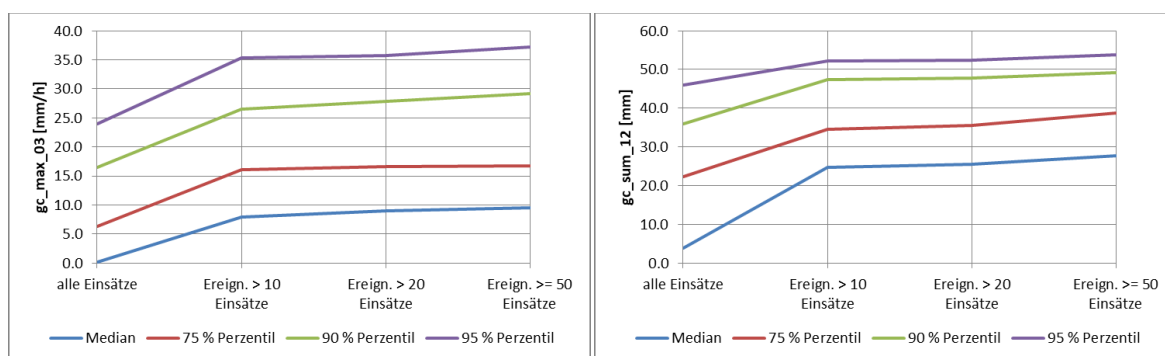


Abbildung 26: Perzentilwerte für den kurzen Starkniederschlag (Kategorie 2) (links) und den langandauernden Niederschlag (Kategorie 1) (rechts) für verschiedene Anzahl Einsätze, die ein für SRZ relevantes Niederschlagsereignis festlegen.

Ein Test mit einem Schwellenwert von ≥ 25 Einsätzen in sechs Stunden bestätigt dies. Dieser Wert liefert zwar 10 Ereignisse mehr, jedoch fast alle (8 von 10) in der Kategorie 2 «kurzer Starkniederschlag» und zwei Mischformen, jedoch kein Ereignis in der Kategorie 1 «langandauernder Niederschlag», wo grössere Unsicherheiten bei der Herleitung des Schwellenwertes bestehen. Eine breitere Abstützung der Schwellenwerte durch weitere für SRZ relevante Niederschlagsereignisse ist deshalb mit dem bestehenden Datenmaterial nicht möglich. Sie wäre nur durch eine bedeutend grössere Zahl von Einsätzen zu erreichen.

Geprüft wird weiter, ob die Niederschläge der Periode, für die Einsatzdaten vorliegen, repräsentativ sind. Dazu wurden für sechs Niederschlagsmessstationen die Stundenwerte für die Gesamtperiode, für welche die Stundenwerte vorliegen (1.1.1981–13.1.2018), mit den Stundenwerten für die Periode, für die Einsatzdaten vorliegen (6.7.2005–13.1.2018), verglichen (Tabelle 5). Bei den Stationen Aadorf und Wädenswil liegt das 99%-Perzentil (Stundenniederschlag, der ca. einmal im Jahr auftritt) für die kurze Periode 2 mm über dem Wert der Gesamtperiode. Bei den übrigen Stationen beträgt die Differenz weniger als einen Millimeter. Damit kann davon ausgegangen werden, dass die verwendeten Niederschlagsdaten für die Periode 1981–2018 repräsentativ sind.

Tabelle 5: Auswertung 99%-Perzentil der Stundenniederschläge (über alle Stunden) für die Gesamtperiode und für die Periode, für die Einsatzdaten vorliegen.

	Aadorf	Affoltern	Kloten	Schaffhausen	Wädenswil	Zürich-Fluntern
Ab 1.1.1981	18,0 mm	15,5 mm	16,8 mm	17,1 mm	20,0 mm	17,8 mm
Ab 6.7.2005	20,0 mm	15,3 mm	16,6 mm	17,9 mm	22,0 mm	17,5 mm

Die Schwellenwerte werden ebenfalls mit der Extremwertstatistik von Stationsdaten verglichen. Dieser Vergleich in Tabelle 6 zeigt, dass der Schwellenwert für die maximale Stundenintensität 4–8 mm unter dem 2,33-jährlichen Stundenniederschlag an den drei Stationen, für welche Stundenwerte zur Verfügung stehen, liegt. Die grösste Differenz resultiert für die Station Wädenswil, was ein Hinweis auf die höheren Niederschlagswerte im Voralpengebiet ist. Bei der 12-Stunden-Summe beträgt die Differenz 14–18 mm. Hier fehlt

der Wert für die Station Wädenswil, weil die Extremwertstatistik für die 12-Stunden-Summe keine zuverlässigen Resultate liefert. Der Vergleich zeigt, dass die Schwellenwerte in einem plausiblen Bereich liegen, da für SRZ relevante Ereignisse häufiger als einmal in 2,33 Jahren auftreten (16 Ereignisse in 12 Jahren gemäss Tabelle 4).

Tabelle 6: Vergleich der Schwellenwerte mit der Extremwertstatistik für drei Stationen (Daten: MeteoSchweiz)

Station	Schwellenwert max. 2,33-jährliches Stundenintensität	Schwellenwert 12-2,33-jährliches Ereignis	Schwellenwert 12-2,33-jährliches Stunden-Summe	Schwellenwert 12-2,33-jährliches Ereignis
Zürich-Fluntern	15 mm/h	20 mm/h	30 mm	48 mm
Zürich Affoltern	15 mm/h	19 mm/h	30 mm	44 mm
Wädenswil	15 mm/h	23 mm/h	30 mm	-

Für die 16 für SRZ relevanten Niederschlagsereignisse aus Tabelle 4 werden zusätzlich zu den Medianwerten weitere Perzentile für die beiden Parameter «maximale Intensität» und «Niederschlagssumme» berechnet, wobei die Niederschlagstypen (unbestimmt, langandauernder Niederschlag, kurzer Starkniederschlag) mitberücksichtigt wurden (Abbildung 27). Daraus geht hervor, dass mit Ausnahme der Ereignisse Nr. 5, 8, 9 und 16 entweder der Medianwert für den kurzen Starkniederschlag (Kategorie 2) oder für den langandauernden Niederschlag (Kategorie 1) über dem Schwellenwert liegt. Ereignis Nr. 5 dauerte nur eine Stunde und weist nur wenige Einsätze auf. Für das Ereignis Nr. 8 liegt der Medianwert beim kurzen Starkniederschlag nur wenig unter dem Schwellenwert. Beim Ereignis Nr. 9 handelt es sich um das Ereignis mit wiederholt zunehmenden und abschwelenden Niederschlägen und beim Ereignis Nr. 16 um den Sturm Burglind vom Januar 2018, die beide schon oben beschrieben wurden. Damit erscheinen die hergeleiteten Schwellenwerte trotz der grossen Streuung bei den Niederschlagswerten zielführend zu sein.

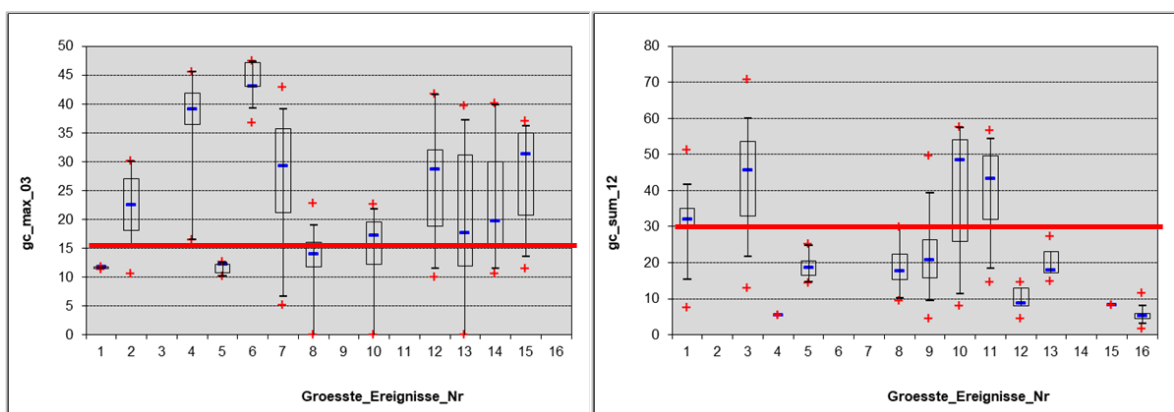


Abbildung 27: Perzentile (Minimum, 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 95 %, Maximum) für die Niederschlagsparameter maximale Stundenintensität (links) und 12-Stunden-Summe (rechts) für die 16 für SRZ relevanten Niederschlagsereignisse.

Werden mit den oben hergeleiteten Schwellenwerten grössere Ereignisse herausgefiltert, können die für SRZ relevanten Niederschlagsereignisse aus Abbildung 23 reproduziert werden (Abbildung 28). Ein grosser Teil der Ereignisse mit nur wenigen Einsätzen fällt weg. Dies zeigt, dass es mit den hergeleiteten Schwellenwerten möglich ist, grosse Ereignisse mit vielen Einsätzen zu ermitteln und in Zukunft auch vorherzusehen.

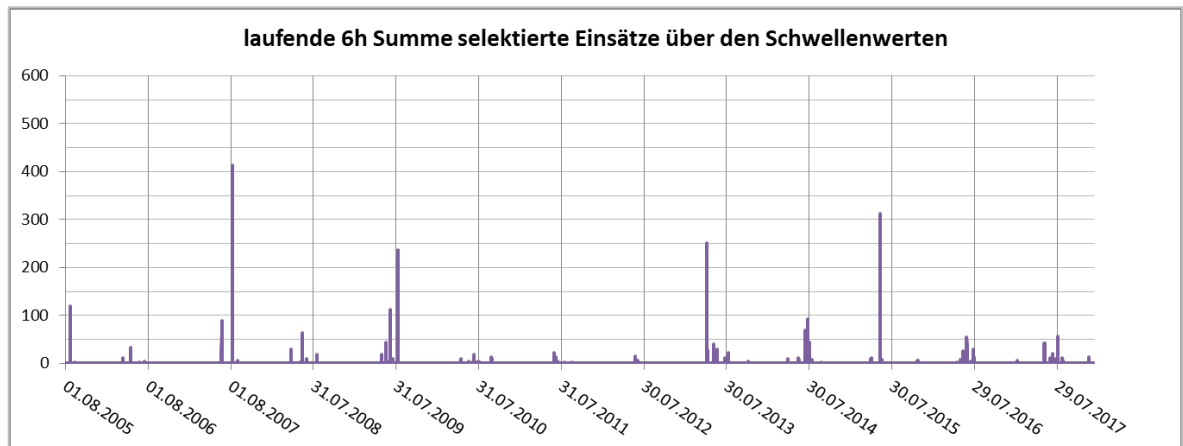


Abbildung 28: Grössere Niederschlagsereignisse abgeleitet aus den Schwellenwerten für die maximale Stundenintensität in den vorangehenden drei Stunden und für die 12h-Niederschlagssumme.

Die Güte der hergeleiteten Schwellenwerte ist nicht nur davon abhängig, ob relevante Niederschlagsereignisse herausgefiltert werden können («hit rate»), sondern auch davon, wie viele falsche Niederschlagsereignisse ohne nachfolgende Einsatzhäufungen ermittelt werden («false alarm rate»). Um dies zu prüfen, werden basierend auf den CombiPrecip-Daten für den gesamten Untersuchungszeitraum 2005–2018 die maximale Niederschlagsintensität für die vorangehenden drei Stunden und die 12-Stunden-Niederschlagssummen berechnet. Darauf basierend wird der Mittelwert der Parameter aus einem Umkreis mit einem Radius von 10 km bestimmt. Durch die Mittelwertbildung wird erreicht, dass nicht nur einzelne Zellen, sondern Niederschlagsfelder, wie sie in der Realität auftreten, betrachtet werden. Aus den resultierenden Niederschlagskarten werden Perioden extrahiert, in denen der Schwellenwert in mindestens einer Zelle erreicht oder überschritten wird. Die Auswertungen für beide Parameter sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Die Abgrenzung eines Niederschlagsereignisses erfolgt anhand des Kriteriums, ob während 24 Stunden der jeweilige Schwellenwert nicht erreicht oder überschritten wurde.

Die Auswertung der maximalen Stundenintensität in den letzten drei Stunden zeigt, dass in 25 Perioden der Schwellenwert innerhalb des Untersuchungsperimeters überschritten wird (Tabelle 4). In 16 Fällen liegt die Anzahl der Einsätze während sechs Stunden unterhalb von 50. Rund neun Perioden betreffen Ereignisse mit mehr als 50 Einsätzen. Damit werden alle Ereignisse erfasst, die aufgrund der Einsatzzahlen innerhalb von sechs Stunden herausgefiltert wurden. Fehlalarme, das heisst Niederschlagsperioden über dem Schwellenwert ohne Einsätze, gibt es bei den kurzen Starkniederschlägen (Kategorie 2) keine.

Tabelle 7: Evaluation der Niederschlagsereignisse, bei denen die Schwellenwerte im Untersuchungsgebiet überschritten wurden.

	max. Stundenintensität	Niederschlagssumme
Anzahl Fälle	25	56
davon Ereignisse (hits)	9	10
davon tiefe Schneefallgrenze	0	5
davon Periode ≤ 2 h	-	13
davon > 20 Einsätze in 6 h	10	7
davon 1–20 Einsätze in 6 h	6	18
davon keine Einsätze (false)	0	3

Aufgrund der Niederschlagssummen werden insgesamt 56 Niederschlagsereignisse herausgefiltert, in denen der Schwellenwert überschritten wird. 25 Ereignisse weisen zwar Einsätze auf, die 6-Stunden-Summe liegt jedoch unter 50 Einsätzen. Fünf Ereignisse betreffen einen Zeitraum mit einer tiefliegenden Schneefallgrenze und bei 13 Ereignissen wird der Schwellenwert nur während einer oder zwei Stunden überschritten, was bei langandauernden Starkniederschlägen eine niedrige Dauer mit entsprechend höherer Unsicherheit ist. 10 Ereignisse figurieren unter den in Tabelle 4 ausgewiesenen für SRZ relevanten Niederschlagsereignissen. Alle relevanten Ereignisse der Kategorie 1 «langandauernder Niederschlag» wurden erfasst. Dies zeigt, dass die Berechnung der Niederschlagsfelder sinnvolle Resultate liefert. Bei drei Ereignissen wurden keine Einsätze registriert. Hierbei handelt es sich um eigentliche Fehlalarme.

Insgesamt liefern die festgelegten niederschlagsbedingten Schwellenwerte für die Einsatzlösung über das gesamte Kantonsgebiet und über die gesamte betrachtete Zeitperiode (06.07.2005–07.01.2018) plausible Resultate. Auf eine weitere Aufschlüsselung nach z. B. Bodenbedeckung und Herleitung unterschiedlicher Schwellenwerte für verschiedene Böden oder Regionen kann demnach verzichtet werden (siehe Anhang A 4).

5 Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Anzahl Einsätze

Die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Anzahl wasserbezogener Einsätze von SRZ bezieht sich auf einen Planungshorizont von 15 bis 20 Jahren (Planungshorizont für Einsatzkräfte). In den folgenden Unterkapiteln sind die Auswirkungen des Klimawandels und der erwarteten Bevölkerungs- und daraus abgeleiteten Siedlungsentwicklung auf die Häufigkeit der Einsätze beschrieben.

5.1 Auswirkungen des Klimawandels

Aufgrund der verfügbaren Klimaszenarien wird im Raum Zürich bis 2040 eine Zunahme der Anzahl Starkniederschlagsereignisse um ca. 10 % prognostiziert. Für SRZ bedeutet dies, dass die Anzahl der langandauernden Niederschlagsereignisse, bei welchen der hergeleitete Schwellenwert überschritten wird, im Mittel von jährlich fünf auf sechs ansteigt. Davon führen 20 % zu für SRZ relevanten Ereignissen. Diese Veränderung ist, insbesondere verglichen mit der bereits bestehenden interannuellen Variabilität, gering.

Bis gegen Ende des Jahrhunderts werden die Auswirkungen des Klimawandels jedoch klar an Bedeutung zunehmen und sowohl die Anzahl Starkniederschläge als auch die Anzahl der dadurch ausgelösten Einsätze von SRZ deutlich steigen (auf der Alpennordseite ist gemäss [25] eine Zunahme der Starkniederschläge von 20 bis 30 % zu erwarten).

Aussagen zur Entwicklung der kurzzeitigen Starkniederschläge und der dadurch verursachten Einsätze von SRZ sind aufgrund der in den Klimaszenarien fehlenden Angaben zu Stundenniederschlägen nicht möglich.

Die Klimaszenarien CH2011 sind wegen der Methodik (Delta Change), die für die Herleitung der Szenarien verwendet wurde, nicht geeignet, um daraus quantitative Aussagen zu den Veränderungen von Starkniederschlägen abzuleiten [15].

Eine neue Studie von Scherrer et al. [26] zur Niederschlagsentwicklung zeigt, dass die Starkniederschläge in den letzten hundert Jahren zugenommen haben. Dies gilt sowohl für den jährlichen maximalen Tagesniederschlag (Intensität), als auch für die Anzahl Tage, an denen das 99%-Perzentil der Tagesniederschläge (berechnet für die Periode 1961–1990) überschritten wird (Abbildung 29). Dieser Trend setzt in den 70er-Jahren ein und ist an über einem Drittel der Niederschlagsstationen statistisch signifikant. Der Trend verläuft parallel zum Anstieg der globalen Temperatur mit 7,7 % pro Grad Kelvin. Es wird angenommen, dass mit dem weiteren Anstieg der Temperaturen auch die Starkniederschläge nach dem gleichen Muster zunehmen werden.

Ausgehend von Daten, die der Studie von Scherrer et al. [26] zugrunde liegen, lassen sich für die Meteostation Zürich-Fluntern für den Zeitraum bis 2040 folgende Trends bei den Starkniederschlägen herleiten:

- Basierend auf den Messdaten und dem Trend der Station Zürich-Fluntern:
99%-Perzentil 1961–1990: 30,8 mm/Tag
Trend: 18,9 % / 100 Jahre
→ 99%-Perzentil 2040: 33,7 mm/Tag

- Basierend auf dem globalen Temperaturanstieg:
Anstieg der globalen Mitteltemperatur (GMT) bis 2040: 1,2 Kelvin
Temperaturskalierung: 7,7 %/Kelvin
→ 99%-Perzentil 2040: **33,4 mm/Tag**

Die übrigen Stationen im Untersuchungsgebiet weisen für die Niederschlagsintensität ähnliche Trends auf. Damit muss von einer Zunahme der Niederschlagsintensität bis 2040 von ca. 10 % ausgegangen werden (siehe Herleitung oben: die Zunahme von 30,8 auf 33,7 mm/Tag bzw. 33,4 mm/Tag entspricht einer Zunahme von ca. 10%). Der Trend bei der Frequenz ist ca. doppelt so hoch wie bei der Intensität. Damit ist davon auszugehen, dass Starkniederschläge im Bereich des 99%-Perzentils um 20 % häufiger auftreten werden.

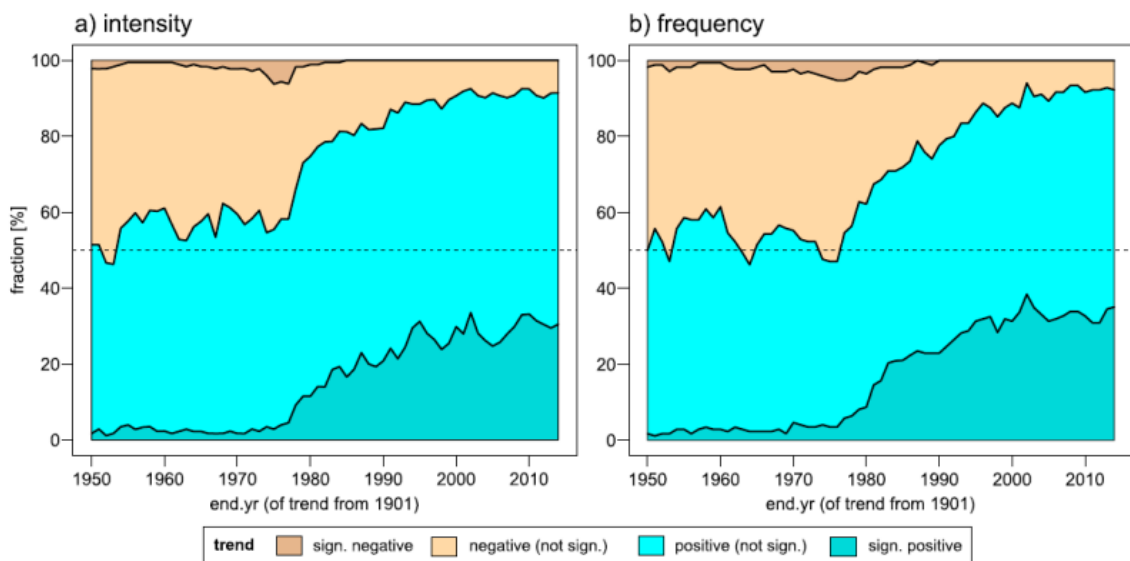


Abbildung 29: Anteil der Stationen mit positivem bzw. negativem Trend seit 1901 für den täglichen Starkniederschlag für das 99%-Perzentil (a) und der Anzahl Tage mit Überschreitung des 99%-Perzentils (b). Abbildung entnommen aus [26].

In einer Studie der ETH Zürich [25] wurden die Klimasimulationen für acht Regionen Europas ausgewertet, u. a. für die Region «Alpen», welche die Schweiz abdeckt. Aus dieser Studie geht hervor, dass ein 50-jährlicher 1-Tagesniederschlag in der Region Alpen bis ins Jahr 2049, verglichen mit der Periode 1982–2019 um 5 bis 10 % zunehmen wird. Für die Zeitperiode 2070–2099 werden Zunahmen bis 20 % erwartet. Bei der Frequenz der Starkniederschläge liegt der Anstieg im gleichen Bereich.

Werden diese Trends auf die Anzahl der für SRZ relevanten Niederschlagsereignisse übertragen, so ergibt sich folgendes Bild: 56 ermittelte Niederschlagsfelder für die 12-Stunden-Summen betreffen grössere Teile des Kantons Zürich (Tabelle 7). Verteilt auf die 12,5 Jahre, die analysiert wurden, ergibt dies ca. fünf Niederschlagsereignisse pro Jahr. Mit der prognostizierten Zunahme würde sich dieser Wert auf sechs erhöhen. Davon führen 20 % zu 50 oder mehr Einsätzen innerhalb von sechs Stunden. Diese Veränderung ist gering, vor allem, wenn man die heutige interannuelle Variabilität mitberücksichtigt. So sind beispielsweise in den Jahren 2010 bis 2012 keine Ereignisse mit einer grossen Zahl an Einsätzen aufgetreten. Anders sieht es aus, wenn die Periode 2070–2099 betrachtet wird.

Aufgrund der Klimasimulationen ist gegen Ende des Jahrhunderts auf der Alpennordseite gemäss [25] eine Zunahme der Starkniederschläge von 20 bis 30 % zu erwarten.

Aussagen zu den kurzzeitigen Starkniederschlägen sind nicht möglich, da die verfügbaren Klimaszenarien keine Angaben zur Entwicklung der Stundenniederschläge machen.

5.2 Auswirkungen der Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung

In naher Zukunft (ca. 20 Jahre) stellen die Bevölkerungs- und die Siedlungsentwicklung eine grössere Herausforderung für SRZ dar als der Klimawandel:

Es ist zu erwarten, dass ca. 25 % des Bevölkerungszuwachses bis 2030 in Gebieten erfolgt, die durch Oberflächenabfluss betroffen sind. 10 % des Bevölkerungszuwachses wird in durch Überflutung gefährdeten Gebieten erwartet. Diese Werte verändern sich bis 2040 nur geringfügig.

Es kann davon ausgegangen werden, dass im Kanton Zürich verglichen mit der heutigen Situation das Schadenpotenzial bis 2030 um ca. 25 % und bis ins Jahr 2040 um ca. 30 % steigt.

Wasserbauliche Massnahmen oder Objektschutzmassnahmen, welche die Gefährdung effektiv reduzieren können, wurden in der vorliegenden Auswertung nicht berücksichtigt.

Wie Kapitel 4.1.2 zeigt, fällt ein Grossteil der Einsätze in Gebiete, die durch Überflutung durch Fliessgewässer und Seen oder durch Oberflächenabfluss gefährdet sind. Zudem häufen sich Einsätze in dichter besiedelten Regionen.

Um die künftige Entwicklung der Einsätze von SRZ abzuschätzen, müssen deshalb neben dem Klimawandel auch die Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung und ihr Bezug zu den Gefahrengebieten berücksichtigt werden. Die Entwicklung der Bevölkerungsdichte wird dabei als Indikator für die Siedlungsentwicklung und somit für die Entwicklung des «Schadenpotenzials Siedlung» verwendet. Als Grundlage für die Abschätzung der Bevölkerungs- und der Siedlungsentwicklung werden folgende Daten verwendet:

- Bevölkerungsverteilung bzw. bestehende Siedlungsfläche: Hektardaten aus GEOSTAT (STATPOP 2010)
- Bauzonen: Bauzonen Schweiz (harmonisiert) des ARE, Stand 11.12.2017
- Bevölkerungsentwicklung: Bevölkerungsentwicklung pro Gemeinde aus der Statistik des ARE zur Bevölkerungsentwicklung pro Verkehrszone für die Zeitstände 2010, 2020, 2030 und 2040.

Für die Herleitung der Entwicklung des Schadenpotenzials wird eine räumlich differenzierte Ausscheidung von neuen oder intensiver genutzten Flächen vorgenommen. Dies ermöglicht Aussagen darüber, wo sich die Betroffenheit von Personen und Sachwerten durch Hochwasser oder Oberflächenabfluss verändert.

Die Berechnung erfolgt analog zu den Bevölkerungsdaten aus GEOSTAT [3] für jede Gemeinde auf dem Hektarraster. Die Bevölkerungsentwicklung zwischen 2010 und 2030 bzw. 2040 wird in erster Priorität in den noch nicht überbauten Bauzonen alloziert, wobei die Bevölkerungsdichte der angrenzenden Gebiete mitberücksichtigt wird. Wo die Bauzonen nicht ausreichen, um den prognostizierten Bevölkerungszuwachs zu allozieren,

wird zusätzlich die Bevölkerungsdichte auf allen Rasterzellen mit einer Anzahl Bewohner > 0 entsprechend erhöht.

Die so ermittelten Flächen werden in einem weiteren Schritt mit der Gefahrenkarte Wasser [8] und mit der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss [7] überlagert. Um den Unterschied in der räumlichen Auflösung der Daten zu berücksichtigen, wird für jede Rasterzelle der Anteil der gefährdeten Fläche pro Hektare berechnet und die Betroffenheit der Bevölkerung mit diesem Faktor multipliziert. Bei der Gefahrenkarte Wasser werden die Gefahrenstufen rot und blau einerseits und die Gefahrenstufe gelb andererseits unterschieden. In Abbildung 30 ist die Zunahme der Bevölkerung in gefährdeten Gebieten dargestellt.

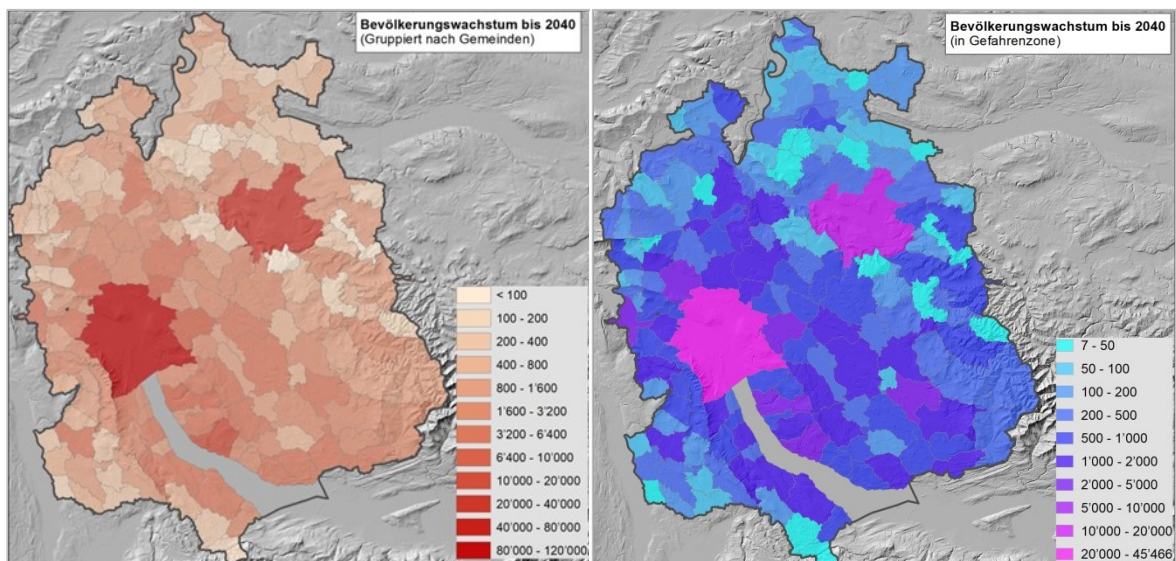


Abbildung 30: Modellierter Bevölkerungszuwachs im Kanton Zürich bis zum Jahr 2040 (links). Zusätzliche Anzahl Einwohner in Gebieten, die durch Überflutung oder Oberflächenabfluss gefährdet sind (rechts). Datengrundlage: [3], [7], [8]

Die quantitativen Angaben zur Bevölkerungsentwicklung innerhalb von gefährdeten Gebieten sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Resultate zeigen, dass sich ca. ein Viertel des Bevölkerungswachstums bis 2030 auf Gebiete, die vom Oberflächenabfluss und 10 % auf Gebiete, die von Überflutung betroffen sind, erstreckt. Diese Werte verändern sich bis 2040 nur geringfügig. Bezogen auf die heutige Situation entspricht dies einer Zunahme des Schadenpotenzials um ca. 25 % bis 2030 und um gut 30 % bis 2040. Dabei ist zu beachten, dass – sofern geplant und implementiert, keine wasserbaulichen Massnahmen bzw. Objektschutzmassnahmen mitberücksichtigt werden. Gerade beim Oberflächenabfluss sind Objektschutzmassnahmen sehr effektiv und die Gefährdung kann so deutlich reduziert werden.

Tabelle 8: Zunahme der durch Überflutung oder Oberflächenabfluss gefährdeten Bevölkerung bis ins Jahr 2030 bzw. 2040.

Periode	Bevölkerungs- zuwachs	davon gefährdet durch		
		Oberflächenabfluss	Überflutung gelb	Überflutung blau/rot
2010		343'440	117'006	29'538
bis 2030	328'211	85'902	26'635	7'991
bis 2040	426'794	110'823	35'036	10'300

Mit dem gewählten GIS-basierten Ansatz kann eine räumlich differenzierte Aussage zur Siedlungsentwicklung gemacht werden, die auch Aussagen bezüglich der Gefährdung der neu überbauten Flächen zulässt. Grundlage für die Aussagen bezüglich Änderungen des Schadenpotenzials in gefährdeten Gebieten bilden die heute nicht überbauten Bauzonen. Es ist möglich, dass politische Entscheide die Rahmenbedingungen im relevanten Zeitraum ändern werden (Ein- und Auszonungen).

6 Resultate und methodische Aspekte

6.1 Quantitativer Zusammenhang zwischen Einsätzen und Niederschlag

Die Analysen zeigen, dass ein quantitativer Zusammenhang zwischen dem Niederschlag und der Anzahl Einsätze von SRZ besteht. Deutlich zeigt sich dieser Zusammenhang jedoch erst bei Niederschlagsereignissen, die zu einer grösseren Zahl von Einsätzen führen. Niederschlagsereignisse mit nur einem oder wenigen nachfolgenden Einsätzen weisen oft kein klares Niederschlagssignal auf. Für die Herleitung von niederschlagsbasierten Schwellenwerten für die Einsatzauslösung bei einer grösseren Zahl von Einsätzen ist zwischen kurzzeitigen Starkniederschlägen und langandauernden Niederschlägen zu unterscheiden. Für die kurzen Starkniederschläge kann ein Schwellenwert für die maximale Niederschlagsintensität in den letzten drei Stunden vor einem Einsatz von 15 mm hergeleitet werden. Für die langandauernden Niederschläge beträgt der Schwellenwert für die 12-Stunden-Summe vor einem Einsatz 30 mm. Diese Schwellenwerte beziehen sich auf Niederschlagsereignisse, die zu mehr als 50 Einsätzen innerhalb von sechs Stunden führen. Die Anzahl von 50 Einsätzen liegt im Bereich, ab dem ein Ereignis für SRZ eine grössere Herausforderung darstellt. Im analysierten Zeitraum zwischen Juli 2005 und Januar 2018 fallen 16 Niederschlagsereignisse in diesen Grössenbereich. Diese Zahl ist für eine Herleitung von Schwellenwerten eher niedrig. Allerdings können ungefähr 20 % der gut 16'000 Einsätze diesen 16 Niederschlagsereignissen zugeordnet werden.

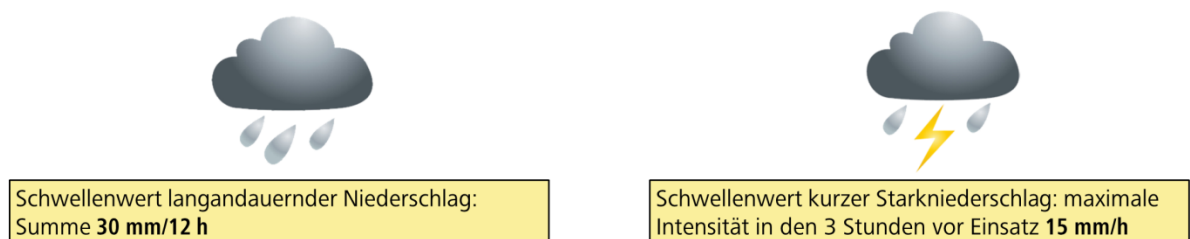


Abbildung 31: Zusammenhang zwischen Starkniederschlägen und Einsätzen von Schutz & Rettung Zürich: Ist einer der Schwellenwerte überschritten, ist mit einer für SRZ relevanten Einsatzhäufung von mehr als 50 Einsätzen innerhalb von sechs Stunden zu rechnen.

Die Datenlage beiden Einsatzdaten von SRZ ist wahrscheinlich schweizweit einmalig, sowohl von der Anzahl der Daten her, als auch bezüglich der Informationen zu den Einsätzen. Von daher sind die Voraussetzungen gegeben, um bestmögliche Resultate herzuleiten.

Der ursprünglich angedachte Ansatz, Schwellenwerte für einzelne Einsätze mit statistischen Methoden herzuleiten, stellte sich als nicht zielführend heraus. Zu gross ist die Anzahl von Einsätzen, die durch geringen Niederschlag ausgelöst werden. Der Mittelwert des 3-Stunden-Niederschlages liegt bei Niederschlagsereignissen mit nachfolgend bis zu 10 Einsätzen in 6 Stunden bei 5 mm, der 12-Stunden-Niederschlag unter 10 mm. Solche Niederschlagswerte werden häufig überschritten und eignen sich deshalb nicht als Schwellenwerte. Anstatt die Schwellenwerte ausschliesslich mit statistischen Methoden zu bestimmen, wurden die statistischen Ergebnisse mit empirischen Erkenntnissen verknüpft.

Die Schwellenwerte von für SRZ relevanten Niederschlagsereignissen werden basierend auf den Erfahrungen von SRZ aus Einsätzen mit über 50 Einsätzen innerhalb von sechs Stunden bestimmt. Trotz der relativ niedrigen Zahl von solch relevanten Niederschlagsereignissen mit mehr als 50 Einsätzen (insgesamt 16 im Zeitraum 2005–2018) können Schwellenwerte hergeleitet werden, die verglichen mit der Extremwertstatistik und mit dem 99%-Perzentil von Stationsdaten plausibel sind. Auch die Überprüfung von Niederschlagsereignissen, bei denen einer der Schwellenwerte überschritten wird, jedoch nicht 50 Einsätze erreicht werden, bestätigt die Plausibilität der Resultate.

6.2 Einfluss der Gefahrenprozesse auf die Einsätze

Rund 75 % (74,4 %) der wasserbezogenen Einsätze von SRZ finden in Gebieten statt, die potenziell durch Oberflächenabfluss gefährdet sind. Dem stehen ungefähr 25 % (25,6 %) der Einsätze gegenüber, die von Überflutung durch Fließgewässer oder Seen betroffen sein können. Die beiden Gefahrenprozesse Überflutung und Oberflächenabfluss können sich dabei auch überlagern. Knapp 20 % der Einsätze liegen ausserhalb der beiden Gefahrengebiete.

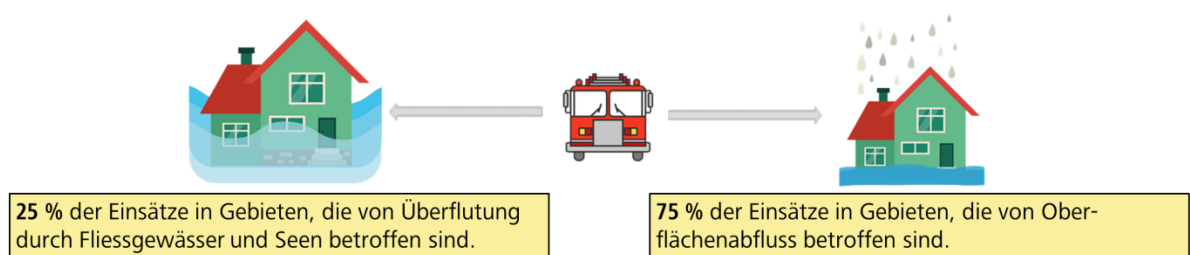


Abbildung 32: Zusammenhang zwischen Einsätzen und den Gefahrenprozessen Überflutung durch Fließgewässer oder Seen und Oberflächenabfluss

Eine einfache Überlagerung der Punkt-Einsatzdaten mit den Gefahrengebieten Oberflächenabfluss und der Gefahrenkarte Wasser führt aus folgenden Gründen zu einer Unterschätzung der Gefährdung:

- In der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss sind die Gebäude mehrheitlich ausgespart. Einsatzpunkte innerhalb von Gebäuden können daher gar nicht von der Prozessfläche Oberflächenabfluss überlagert werden.
- Die Gefahrengebiete der Gefahrenkarte Hochwasser beinhalten zwar Gebäudeflächen. Doch ist es möglich, dass Gebäude nur randlich betroffen sind. Wenn der Einsatzpunkt nicht in dieser Teilfläche liegt, wird ihm keine Gefährdung zugewiesen.

Mit einer Zuweisung der Einsätze zu Gebäuden und der anschliessenden Überlagerung der Gebäude mit den Gefahrengebieten kann dieses Problem gelöst werden (siehe Anhang B 2.3).

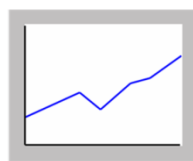
6.3 Zukünftige Entwicklung der Anzahl Einsätze

Aufgrund des Klimawandels ist nach aktuellen Kenntnissen in der betrachteten Periode bis 2040 nur eine geringe Veränderung in der Anzahl von Einsätzen zu erwarten. Die Häufigkeit von Niederschlagsereignissen, bei denen die Schwellenwerte überschritten werden, könnte

sich im Mittel von jährlich fünf auf sechs Ereignisse erhöhen. Davon führen 20 % zu 50 oder mehr Einsätzen innerhalb von sechs Stunden. Diese Veränderung ist, gemessen an der heutigen interannuellen Variabilität, gering. Anders sieht es für die Periode 2070–2099 aus. Hier wird auf der Alpennordseite eine Zunahme der Starkniederschläge von 20 bis 30 % erwartet.

Die Klimaszenarien CH2011 [15] sind für die Herleitung von Aussagen zu Veränderungen bei Extremereignissen nicht geeignet. Ausserdem sind die Veränderungen, die in den nächsten 20 Jahren aufgrund der Resultate aus den Klimamodellen zu erwarten sind, relativ gering, v. a. gemessen an der natürlichen Variabilität. Deshalb wird auf die Analyse der aktuellen Trends ausgewichen und diese in den interessierenden Zeitraum projiziert. Die Ergebnisse dieses Verfahrens können mit Resultaten neuester Modellstudien [25] bestätigt werden. Die Methodik, die in der vorliegenden Studie zur Anwendung kommt, wird auch für die neuen Klimaszenarien CH2018 zum Einsatz kommen. Damit ist davon auszugehen, dass für den näheren Zeitraum aus den neuen Klimaszenarien keine wesentlich neuen Erkenntnisse folgen werden.

Weitere wesentliche Faktoren bei der Abschätzung der künftigen Entwicklung der Anzahl Einsätze von SRZ sind die Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung. Diese haben im Vergleich zum Klimawandel bereits in der betrachteten Periode bis in ca. 20 Jahren einen spürbaren Einfluss. Bis ins Jahr 2040 ist mit einer deutlichen Zunahme des Schadenpotenzials in gefährdeten Zonen zu rechnen. Gemäss dem verwendeten Modell findet das prognostizierte Bevölkerungswachstum mehrheitlich in den noch nicht überbauten Bauzonen statt oder führt zu Verdichtung. Unter dieser Annahme ändert sich der prozentuale Anteil der Bevölkerung, welcher in potenziell von Überflutung oder Oberflächenabfluss betroffenen Gebieten lebt, nur geringfügig. Dementsprechend wächst das Schadenpotenzial proportional zum Bevölkerungswachstum. Bis ins Jahr 2030 nimmt die Anzahl Personen in den gefährdeten Gebieten um 25 % zu. Bis 2040 ist eine Zunahme um 30 % zu erwarten. Entsprechend ist eine Zunahme der Einsätze zu erwarten.



Aufgrund des Klimawandels nimmt bis 2040 die Anzahl relevanter Niederschlagsereignisse von **5 auf 6 pro Jahr** zu.



Aufgrund der Bevölkerungsentwicklung nimmt die Anzahl Personen in gefährdeten Gebieten **bis 2030 um ca. 25 %, bis 2040 um ca. 30 %** zu.

Abbildung 33: Künftige Entwicklung der Einsätze aufgrund von Klimawandel und Bevölkerungsentwicklung bzw. der daraus abgeleiteten Siedlungsentwicklung

6.4 Methodische Aspekte

Da die vorliegende Studie neben inhaltlichen auch methodische Ziele verfolgt, werden im Folgenden die wichtigsten methodischen Erkenntnisse aus dem Projekt beschrieben. Eine detailliertere Beschreibung weiterer methodischer Aspekte ist im Anhang B aufgeführt.

Wichtig bei der vorliegenden Studie ist die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Arbeitsschritte. Um diese zu erreichen, werden die Verarbeitungsschritte in Skripten aufgezeichnet. Dies erlaubt einerseits eine effiziente Verarbeitung, sichert aber auch die Dokumentation der angewendeten Verfahren und die Möglichkeit der mehrfachen Neuberechnung.

6.4.1 Umgang mit grossen Datenmengen

Qualitativ hochstehende Daten sind Grundvoraussetzung für die Brauchbarkeit von Resultaten. Bei der Verarbeitung von grossen Datenmengen werden an die Qualitätssicherung besondere Anforderungen gestellt, da Fehler nicht mehr ohne weiteres erkannt werden. Die für die vorliegende Studie verwendeten Niederschlagsdaten stellen dabei die grösste Herausforderung dar. Die 400 Mio. Datenpunkte als Inputdaten und ein Mehrfaches an Resultaten verlangen effiziente Berechnungs- und Speicherkonzepte und die Qualitätskontrolle ist nur mit Hilfe von spezifischen Algorithmen möglich. Dies ist bei ähnlichen Projekten von Anfang an zu berücksichtigen. Für detailliertere Angaben siehe Anhang B 1.

6.4.2 Zeitliche Synchronisation der Niederschlagsdaten

Die Überlagerung der Einsätze mit dem Niederschlag erfolgt nicht nur räumlich, sondern auch auf der Zeitachse. Die Zeitangaben in den CombiPrecip-Daten beziehen sich auf die koordinierte Weltzeit UTC, während sich die Einsatzdaten auf die Schweizer Ortszeit beziehen (CET bzw. CEST). Für die beiden Datensätze ergibt sich ein Shift von einer Stunde im Winter und zwei Stunden im Sommer. Es empfiehlt sich, die Einsatzdaten nach UTC zu konvertieren, damit die Kombination in einem Sommerzeit-freien Zeitformat vorgenommen werden kann (siehe Anhang B 2.1).

6.4.3 Berücksichtigung von hydrologischen Aspekten

Zu Beginn der vorliegenden Studie wurde die Möglichkeit von «exportierten» Hochwasserereignissen in Betracht gezogen. Gemeint ist damit die Situation, dass eine Überflutung nicht durch ein Niederschlagsereignis in der Nähe direkt verursacht wird, sondern durch Niederschläge in oberhalb des Einsatzpunktes liegenden Einzugsgebieten. Für die Analyse solcher Ereignisse muss die Einzugsgebietsgliederung einbezogen werden (Anhang A 3). Es wurden jedoch keine Hinweise auf solche Ereignisse gefunden. Dies kann durch die Tatsache bedingt sein, dass mit Ausnahme der Limmat kein Fluss ein grosses Einzugsgebiet in grösserer Distanz aufweist und deshalb bei allen für SRZ relevanten Niederschlagsereignissen auch der Kanton Zürich überregnet wurde. Bei der Limmat ist der Effekt von Starkniederschlägen in den oberen Einzugsgebieten zudem durch die dämpfende Wirkung des Walen- und Zürichsees reduziert. In anderen Gebieten können solche hydrologischen Aspekte jedoch relevant sein.

7 Schlussfolgerungen

7.1 Erkenntnisse

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, die Zusammenhänge zwischen dem Niederschlag und den Einsätzen von SRZ quantitativ zu analysieren. Die Resultate der Analyse erlauben SRZ, bei sich abzeichnenden Unwettern die Besetzung der Einsatzzentrale besser zu disponieren. Weiter konnten qualitative Aussagen zur Veränderung der künftigen Anforderungen an SRZ im Zusammenhang mit dem Klimawandel und der Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung gemacht werden.

Der Einbezug der Gefahrengrundlagen verdeutlicht die grosse Bedeutung des Oberflächenabflusses. Aus der Analyse geht hervor, dass die grosse Mehrheit der Einsätze nicht in Gebieten mit einer hohen Gefahrenstufe für Hochwasser (rotes und blaues Gefahrengebiet), sondern im gelben und gelb-weissen Gefahrengebiet stattfindet. In der nahen Zukunft stellt die Siedlungsentwicklung die grössere Herausforderung für SRZ dar als der Klimawandel. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts werden jedoch die Auswirkungen des Klimawandels klar an Bedeutung gewinnen.

Der partizipative Ansatz der Studie war für deren Verlauf sehr gewinnbringend. Durch den Einbezug von Stakeholdern aus Bund, Kanton, Stadt, Versicherungen und Wissenschaft sind einerseits verschiedene Sichtweisen in die vorliegende Studie eingeflossen und andererseits konnten die erarbeiteten Resultate unmittelbar an die Stakeholder vermittelt werden. Dadurch kann ein unmittelbarer Nutzen der Analysen erzeugt werden.

Schliesslich hat die Studie gezeigt, dass dem von SRZ, MeteoSchweiz und den kantonalen Fachstellen zur Verfügung gestellten Datenmaterial eine zentrale Bedeutung zukommt. Studien dieser Art sind nur möglich, wenn hochwertige Datensätze systematisch erfasst und gepflegt werden und auch zugänglich sind.

7.2 Potenzial für weiterführende Arbeiten

Die in der vorliegenden Studie entwickelte Methodik ist transparent und nachvollziehbar und kann somit auch für weitere vergleichbare oder erweiterte Fragestellungen eingesetzt werden. Im Folgenden sind einige potenzielle Themenbereiche für weiterführende Arbeiten zusammengestellt:

- Im bearbeiteten Themenfeld der Starkniederschläge könnte eine Übertragung in andere Regionen von Interesse sein, da niederschlagsbasierte Schwellenwerte gebiets- und auch organisationsspezifisch sind und insbesondere in anderen klimatischen Regionen deutlich von den in der vorliegenden Studie erhaltenen Resultaten abweichen dürften. Grundvoraussetzung hierfür ist, dass entsprechende georeferenzierte Daten v. a. zu wasserbezogenen Einsätzen von Organen des Bevölkerungsschutzes vorliegen.
- In dicht besiedelten Gebieten spielt die Siedlungsentwässerung eine zentrale Rolle, wenn es um überflutete Gebäude geht. Hier könnte eine gekoppelte hydrologische Betrachtung der natürlichen Hydrologie und der Siedlungsentwässerung wertvolle Grundlagen liefern.

- In Zukunft werden zeitlich höher aufgelöste Niederschlagsdaten zur Verfügung stehen (z. B. alle 10 Minuten). Gerade beim Oberflächenabfluss sind sehr hohe Niederschlagsintensitäten in kurzer Zeit von Bedeutung. Mit solchen Daten könnte der für die kurzen Starkniederschläge hergeleitete Schwellenwert überprüft und allenfalls verbessert werden.
- Die Methodik kann auf andere Prozesse wie z. B. Hitze oder Wind, die im Zusammenhang mit dem Klimawandel von grosser Bedeutung sind, übertragen werden. Dazu muss insbesondere die Definition der für die Organe des Bevölkerungsschutzes relevanten Ereignisse angepasst werden.
- Katastrophale Ereignisse entstehen oft durch eine Kumulation von Einzelereignissen. Dabei muss zwischen dem gleichzeitigen Auftreten verschiedener Ereignisse (multi risk) und der räumlichen und/oder zeitlichen Abfolge von Prozessen (process chains) unterschieden werden. Für solche Analysen bietet die entwickelte Methodik Bausteine, die erweitert werden müssen.
- Die in der vorliegenden Studie erhaltenen Resultate können einen Beitrag zu auswirkungsbasierten Warnungen (impact based warnings) liefern. Durch die Verknüpfung von Niederschlagsprognosen, Schwellenwerten, Schadenpotenzial und gefährdeten Flächen zeigt die Studie das Potenzial von solchen räumlichen Datenüberlagerungen auf.

Die Zusammenstellung zeigt, dass mit der vorliegenden, partizipativ angelegten Studie ein wertvolles Instrument für die Erarbeitung von Lösungsansätzen im Zusammenhang mit den Klimawandelfolgen, aber auch sozioökonomischen Entwicklungen geschaffen wurde.

Anhang A Weitere Grundlagedaten

Anhang A 1 Weitere Angaben zu den Einsatzdaten

Damit ein Zusammenhang zwischen Einsätzen (bzw. deren Anzahl) in Abhängigkeit vom Niederschlag und weiteren erklärenden Variablen wie z. B. der Gefährdung untersucht werden kann, müssen die Datengrundlagen zunächst in eine zweckmässige Form transformiert werden. Die einfachste Form ist eine Tabelle (inkl. räumlicher Geometrie-information), in welcher die Zeilen den einzelnen Einsätzen entsprechen und die potenziell erklärenden Variablen als Spalten vorkommen. Die von SRZ gelieferten Einsatzdaten liegen bereits in einer solchen Tabellenform mit verschiedenen Attributen vor (Tabelle 9) und wurden mit weiteren Attributen ergänzt.

Tabelle 9: Attribute der von SRZ gelieferten Einsatzdaten inkl. Angaben zum Typ/Format, Definition Pflichtfeld und Erläuterung [5].

Attribut	Typ	Pflicht	Erläuterung
FID	Object ID	1	Eindeutiger Schlüssel
Shape	Geometrie	1	Punkt
Datenherr	Text	1	SRZ
Einsatznr	Double		interne Angaben SRZ, nicht eindeutig
Objekt	Text		z. B. Dock A, Flughafen
x	Double	1	Koordinate (LV03)
y	Double	1	Koordinate (LV03)
Strasse	Text		Strassenname
HNR	Integer		Hausnummer
Team	Text		Herkunft, z. B. Rümlang
Disponiert_Datum	Date		TT:MM:JJJJ
Disponiert_Zeit	Date	1	hh:mm:ss
Einsatzart	String	1	Code
Dringlichkeit	String		Code

Anhang A 2 Wetterlagen

Wetterlagen beschreiben grossräumige Zirkulationsmuster. Abhängig von der Zirkulation sind Niederschläge in einer Region mehr oder weniger wahrscheinlich, wobei es jahreszeitliche Unterschiede gibt (Abbildung 34). Allfällige Korrelationen zwischen der zu einem Zeitpunkt vorherrschenden Wetterlage und den Einsätzen von SRZ können die These des Zusammenhangs zwischen Starkniederschlägen und Einsatzhäufigkeit unterstützen. Weiter könnten daraus grobe, aber wichtige Vorwarnungen für die Einsatzkräfte abgeleitet werden.

Es existieren verschiedene Klassifikationen, die sich bezüglich der Anzahl Wetterlagen und des Druckniveaus in der Atmosphäre unterscheiden [28]. Auf Empfehlung von

MeteoSchweiz wird die Klassifikation GWT26_Z500 verwendet. Sie beschreibt 26 Wetterlagen und bezieht sich auf das 500hPa-Niveau. Der Datensatz enthält für jeden Tag die Zuordnung zu einer Wetterlage.

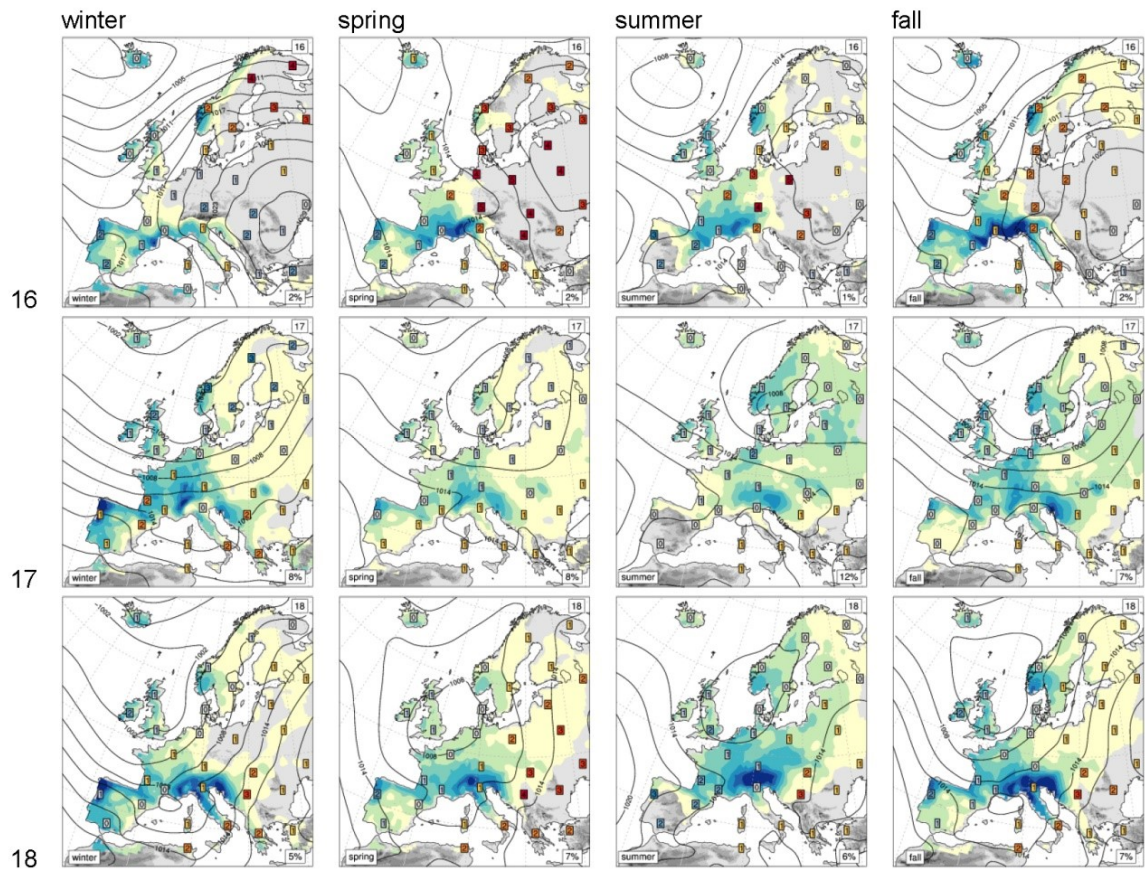


Abbildung 34: Saisonale Niederschlagsverteilung für die Wetterlagen 16 (South, anticyclonic), 17 (West, indifferent) und 18 (SouthWest, indifferent) der GWT26_Z500-Klassifikation [22].

In der Wetterlagenklassifikation werden zyklonale, antizyklonale und indifferente Lagen ausgeschieden. Jede Gruppe wird weiter nach den acht Windrichtungen sowie Hoch- und Tiefdrucklagen gegliedert. Die saisonale Häufigkeit dieser Wetterlagen ist in Abbildung 35 dargestellt. Am häufigsten sind antizyklonale Lagen mit Windrichtung West, Nord- und Südwest.

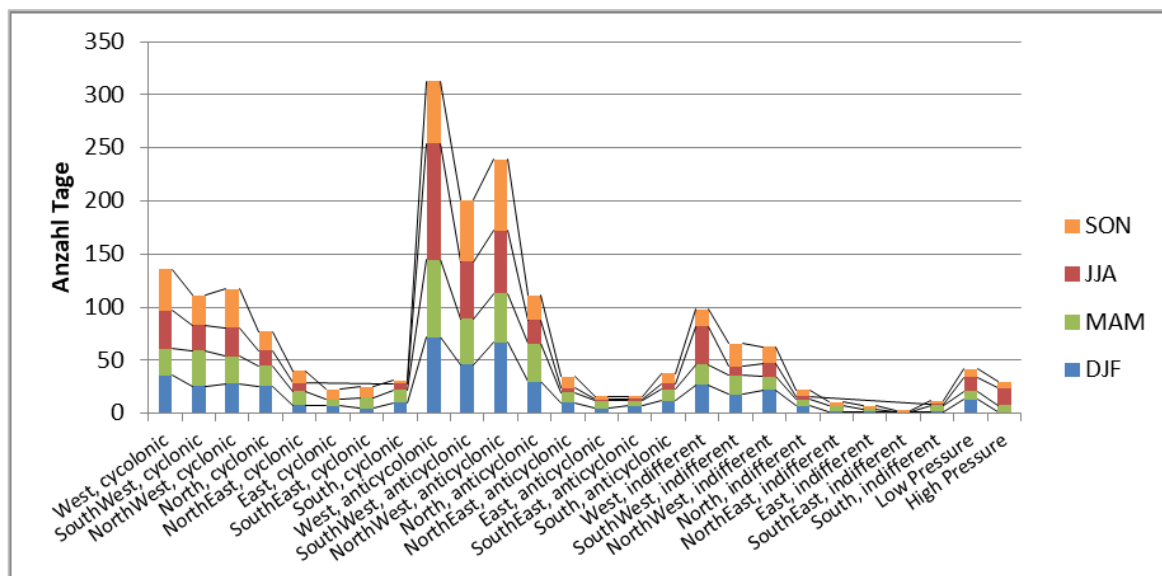


Abbildung 35: Saisonale Häufigkeit der Wetterlagen in der Zeit von 12.11.2012 bis 7.1.2018 (gesamte Datenreihe, unabhängig von Einsatzdaten SRZ). Klassifikation GWT26_Z500 [28].

Für jeden Einsatz wird die Wetterlage für den Tag des Einsatzes und für den Tag vor dem Einsatz ermittelt. Anschliessend wird die Anzahl Einsätze für jede Wetterlage aufsummiert und der absoluten Häufigkeit der Wetterlagen gegenübergestellt. Die Resultate dieser Auswertung sind in Tabelle 10 zusammengestellt.

Tabelle 10: Anzahl Einsätze pro Wetterlage (WL) am Einsatztag (E) und am Vortag sowie relative Häufigkeit.

WL Nr.	Beschreibung	Anzahl Einsätze		Anzahl Tage mit WL	Anzahl E pro WL-Tag	
		E-Tag	Vortag		E-Tag	Vortag
1	West, cyclonic	283	252	136	2.08	1.85
2	SouthWest, cyclonic	411	209	111	3.70	1.88
3	NorthWest, cyclonic	227	340	117	1.94	2.91
4	North, cyclonic	518	526	77	6.73	6.83
5	NorthEast, cyclonic	218	61	40	5.45	1.53
6	East, cyclonic	37	38	23	1.61	1.65
7	SouthEast, cyclonic	37	30	25	1.48	1.20
8	South, cyclonic	115	231	31	3.71	7.45
9	West, anticyclonic	832	917	313	2.66	2.93
10	SouthWest, anticyclonic	583	1153	201	2.90	5.74
11	NorthWest, anticyclonic	526	562	239	2.20	2.35
12	North, anticyclonic	144	211	111	1.30	1.90
13	NorthEast, anticyclonic	40	42	35	1.14	1.20
14	East, anticyclonic	21	23	16	1.31	1.44
15	SouthEast, anticyclonic	35	27	16	2.19	1.69
16	South, anticyclonic	141	80	38	3.71	2.11
17	West, indifferent	690	447	98	7.04	4.56
18	SouthWest, indifferent	135	96	66	2.05	1.45
19	NorthWest, indifferent	172	106	63	2.73	1.68
20	North, indifferent	34	27	22	1.55	1.23
21	NorthEast, indifferent	16	19	11	1.45	1.73
22	East, indifferent	12	10	7	1.71	1.43
23	SouthEast, indifferent	8	5	3	2.67	1.67
24	South, indifferent	529	150	12	44.08	12.50
25	Low Pressure	72	173	42	1.71	4.12
26	High Pressure	525	626	30	17.50	20.87

Die meisten Einsätze fallen auf die Wetterlagen mit Windrichtung aus dem Westsektor. Diese Wetterlagen kommen aber auch am häufigsten vor. Dies trifft nicht zu für die Wetterlagen South, indifferent und High Pressure, die ebenfalls viele Einsätze aufweisen, aber nur selten auftreten. Ein klarer Zusammenhang zwischen den Wetterlagen und der Anzahl Einsätze kann aufgrund der Daten nicht hergeleitet werden. Dieser Ansatz bzw. die Berücksichtigung der Wetterlagen wurde deshalb nicht weiter verfolgt.

Anhang A 3 Einzugsgebietsgliederung Schweiz

Bei Überflutungen aus Gewässern kann der für die Überschwemmung ausschlaggebende Niederschlag im weiter entfernten Einzugsgebiet fallen, während am Einsatzort selbst vergleichsweise wenig oder kein Niederschlag fällt. In der vorliegenden Studie kam die Frage auf, wie mit Häufungen von Einsätzen umzugehen ist, für welche kein nennenswerter, vorangegangener Niederschlag erkennbar ist. Als Grundlage für die allfällige Identifizierung des Niederschlags im jeweiligen gesamten Einzugsgebiet eines Gewässers kann die

Einzugsgebietsgliederung Schweiz (EZGG-CH) dienen. Der Datensatz besteht aus einer Polygon-Featureklasse mit $> 40 \text{ km}^2$ grossen, hierarchisch strukturierten Teileinzugsgebieten [6].

Eine Untersuchung der Einsatzdaten von SRZ ergibt jedoch, dass die gehäuften Einsätze (> 20 Einsätze/Tag) mit unbestimmter Ereignisauslösung, die also nicht auf vorangegangene Niederschläge zurückgeführt werden, zum grössten Teil in die Kategorie Einsatzart «Baum/Ast» fallen. Es verbleiben keine ungeklärten Einsatzhäufungen ohne vorangegangenen Niederschlag, womit sich die Untersuchung des Abflusses der grösseren Gewässer und somit die Verwendung des Datensatzes Einzugsgebietsgliederung Schweiz oder weitere Angaben zu Abflussdaten, Seehochständen und Gerinnekapazitäten von Gewässern erübrigt.

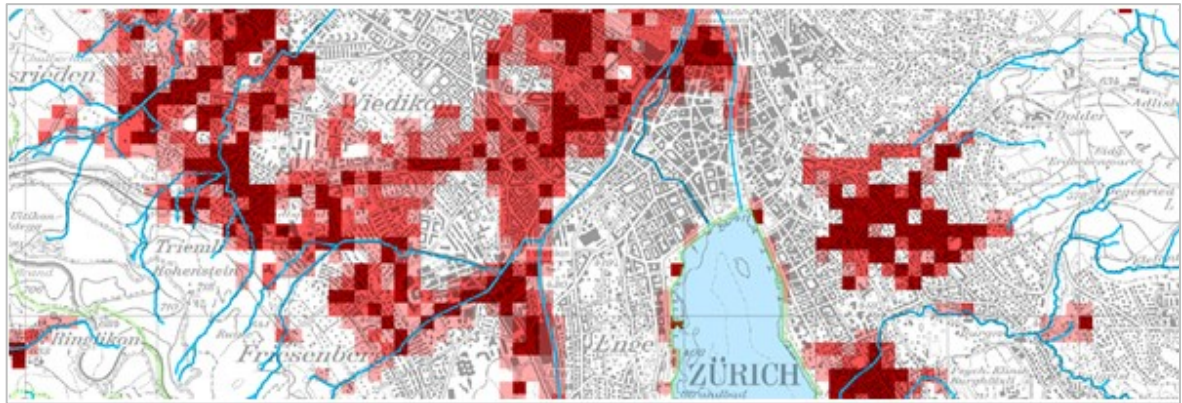
Anhang A 4 Bodenbedeckung bzw. Abflusskoeffizienten

Die Abflussbereitschaft verschiedener Bodenbedeckungsklassen ist sehr unterschiedlich. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass die Bodenbedeckung und insbesondere der Anteil versiegelter Oberfläche die niederschlagsbasierten Schwellenwerte für die Einsatzauslösung beeinflussen. Beispielsweise ist die Infiltration von Niederschlagswasser auf befestigten Flächen (hoher Abflusskoeffizient) unterbunden, in Wäldern (tiefer Abflusskoeffizient) hingegen kann in der Regel ein grosses Wasservolumen in den Boden infiltrieren. Für den Kanton Zürich liegt eine Abflussprozesskarte vor, welche die Flächen der dominanten Abflussprozesse aufzeigt und die Flächen ausweist, welche bei intensiven Niederschlägen zu schnellem Oberflächenabfluss neigen [1]. Die Inhalte der Abflussprozesskarte Zürich wurden in der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss berücksichtigt und fliessen demnach in der vorliegenden Studie bereits beim Vergleich der Einsatzdaten mit der potenziellen Gefährdung durch Oberflächenabfluss mit ein [7]. Fallen in anderen Studien die Schwellenwerte zur Einsatzauslösung wenig deutlich aus, kann eine separate Aufschlüsselung der Schwellenwertherleitung je nach Bodenbedeckung bzw. Abflusskoeffizient angedacht werden. In der vorliegenden Studie ist dies aufgrund der Plausibilität der Schwellenwerte nicht nötig (siehe Kapitel 4.6).

Anhang A 5 Risikokarte Hochwasser

Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL des Kantons Zürich und die Gebäudeversicherung Zürich GVZ veröffentlichten im Jahr 2014 erstmals die Risikokarte Hochwasser für den Kanton Zürich. Diese kombiniert die in den Gefahrenkarten ausgewiesenen Gefährdungen mit dem vorhandenen Schadenpotenzial (betroffene Werte) eines Gebietes und zeigt, wo die Auswirkungen eines Hochwassers am grössten sind. Die ermittelten und dargestellten Risiken aufgrund von Wassergefahren erlauben eine erste Priorisierung der Gebiete. Fünf verschiedene Risikoarten werden betrachtet: Versorgungsrisiko, Personenrisiko, Kulturrisiko, Umweltrisiko und Sachrisiko. Neben monetären Risiken enthält die Risikokarte ebenfalls schwer quantifizierbare Risiken wie z. B. Ausfälle von Feuerwehr-Einsatzzentralen.

Die Risikokarte zeigt pro Hektar auf, wie gross das klassierte Risiko (gross, mittel, klein oder vernachlässigbar) über alle einbezogenen Themen ist (Abbildung 36). Sie gibt demnach erste qualitative Hinweise auf das zu erwartende Schadenausmass.



Farben	Risiko
weiss	Vergleichsweise sehr kleines oder vernachlässigbares Risiko weil keine Gefährdung kartiert worden ist oder eine sehr geringe Betroffenheit der untersuchten Themen vorhanden ist.
hellrot	Vergleichsweise kleines Risiko. Entweder sind nur wenige Themen betroffen oder das Gebiet ist weder stark noch häufig von Hochwasser betroffen.
mittelrot	Vergleichsweise mittleres Risiko. Es können mittel bewertete Themen betroffen sein oder wir befinden uns in einem Gebiet mit häufigen Hochwassern oder grossen Schäden.
dunkelrot	Vergleichsweise grosses Risiko. Es können sehr hoch bewertete Themen betroffen sein oder wir befinden uns in einem Gebiet mit häufigen Hochwasser und grossen Schäden.

Abbildung 36: Ausschnitt aus der Risikokarte Hochwasser Kanton Zürich inkl. Legende ([9],[10]).

Die Farbgebung bzw. angegebene Risikoklasse ist abhängig davon, wie stark und häufig Ereignisse ausfallen (Informationen aus Gefahrenkarte Wasser) und welche Themen (Personen, Sachwerte, Versorgung, Kultur und Umwelt) wie stark davon betroffen sind.

Die Risikokarte Naturgefahren zeigt für den Kanton Zürich, dass hohe Risiken in erster Linie von der Nutzung und nicht von der Gefahr abhängig sind. Hohe Risiken sind insbesondere anzutreffen in Gebieten mit auf den Gefahrenkarten ausgewiesenen mittleren und geringen Gefährdungen oder Restgefährdungen. [10]

Zum Zeitpunkt der Erstellung der Risikokarte Hochwasser lagen für etliche Gemeinden v. a. im Norden des Kantons Zürich noch keine Gefahrenkarten vor. Die Risikokarte konnte demnach für die in Abbildung 37 grau hinterlegten Gemeinden nicht erstellt werden. Zudem wird der Prozess Oberflächenabfluss in der Risikokarte Hochwasser nicht berücksichtigt. Wie sich in der vorliegenden Studie zeigt, ist dieser Prozess jedoch für einen grossen Anteil der Einsätze verantwortlich (Kapitel 4.1.2 und 6.2). Die Risikokarte Hochwasser bildet daher nur einen Teil der Gefährdungen ab und deren Weiterverwendung in der vorliegenden Studie ist nicht zielführend. Jedoch ist klar, dass die Aspekte Siedlungs- und Bevölkerungsentwicklung berücksichtigt werden müssen.

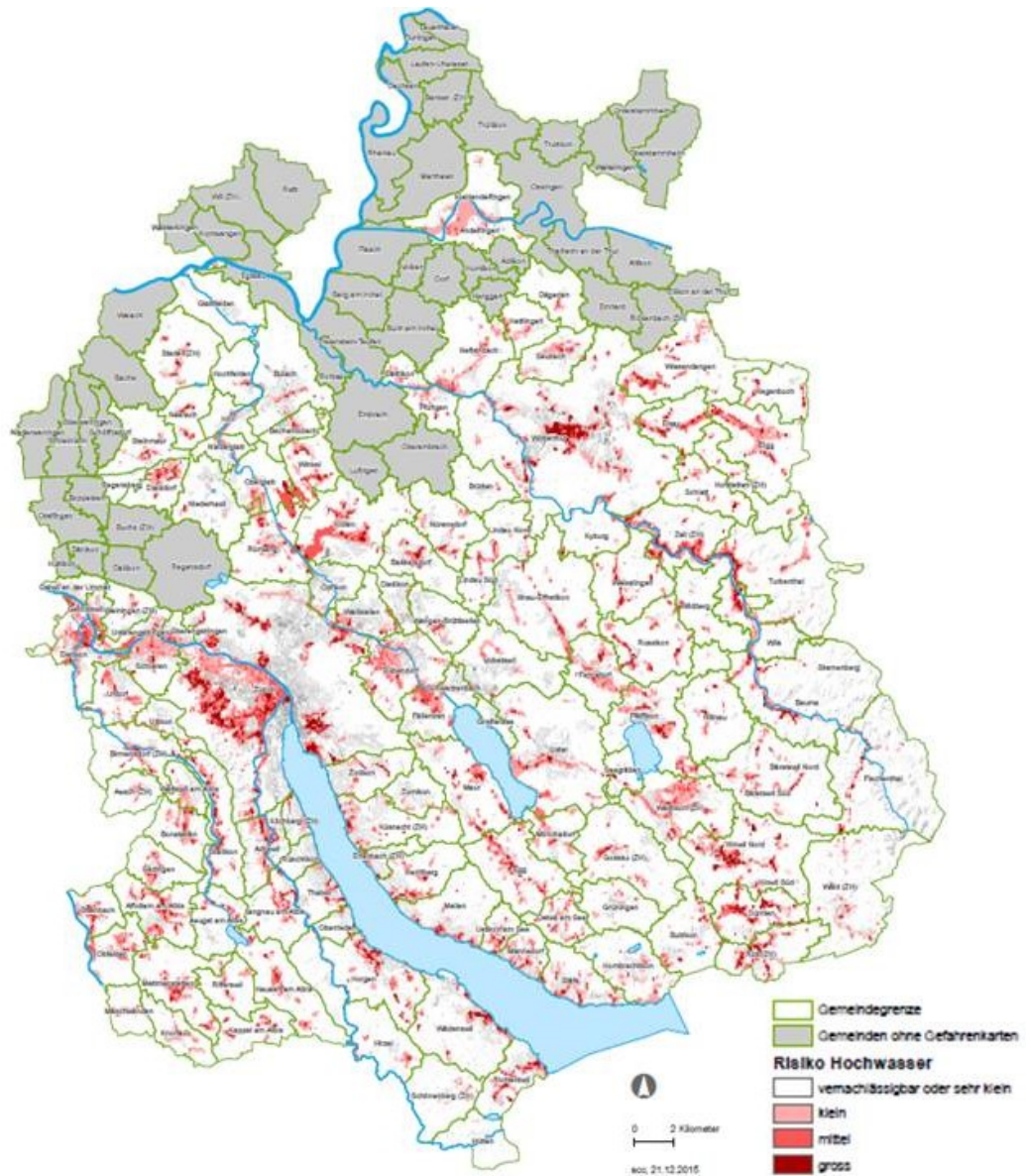


Abbildung 37: Stand der Risikokarte Hochwasser Kanton Zürich 21.12.2015 [9]. Gemeinden ohne Gefahrenkarte und demnach ohne Risikokarte sind grau eingefärbt.

Anhang B Methodische Aspekte

Nachfolgend werden ausgewählte Aspekte aus den Projektarbeiten detaillierter erläutert. Namentlich werden Erfahrungen beim generellen Datenhandling beschrieben (Datenmenge, Kombination von Datensätzen). Zudem wird beschrieben, wie für einzelne Teilschritte mehrere Methoden ausprobiert und die Resultate miteinander verglichen wurden. Um eine bessere Lesbarkeit zu erreichen, werden teilweise Textabschnitte aus dem Hauptteil des Berichtes wiederverwendet.

Anhang B 1 Grosse Datenmengen

Von den verarbeiteten Daten stechen in Bezug auf das Datenvolumen die Niederschlagsdaten (CombiPrecip), welche im NetCDF-Format vorliegen, heraus (siehe Kapitel 3.2). Dieses Datenformat ermöglicht einen Umgang mit grossen Datenmengen und hat sich in der Wissenschaft für multidimensionale Datenwürfel (hier x-, y-Koordinaten, Zeit, 1-Stunden-Niederschlagssumme) durchgesetzt. Zudem erfuhren viele Softwarekomponenten Optimierungen in Bezug auf das NetCDF-Format. Der für die vorliegende Studie verwendete Datensatz deckt das Kantonsgebiet von Zürich vollständig ab (50 x 70 km) und hat eine stündliche Auflösung (seit 2005). Damit sind gegen 120'000 Stunden bzw. insgesamt ca. 400 Mio. Datenpunkte abgedeckt und damit bei 32bit-Gleitkommawerten eine Datenmenge von (unkomprimiert) 1.5 GB erreicht.

Jede der NetCDF-Dateien deckte einen halben Monat ab (ca. 15 Tage). Für die weitere Verarbeitung werden diese >300 Datensätze in zwei überlappende Dateien zusammengefasst. Für die in UTC-Zeit gespeicherten Niederschlagsdaten muss vor dem Zusammenführen mit den Einsatzdaten (Zeitzone CET bzw. CEST) eine Anpassung der Zeitzone erfolgen (Anhang B 2.1).

In ArcMap lassen sich die Niederschlagsdaten über einen Zeitschieberegler darstellen und so die Niederschläge über einen gewünschten Zeitraum veranschaulichen (siehe Kapitel 4.1.1). Im Betrachtungszeitraum der vorliegenden Analyse sind die CombiPrecip-Daten nicht durchgehend in stündlicher Auflösung verfügbar, sondern enthalten Lücken bis max. 111 Stunden. Nur wenn am Ort und zum Zeitpunkt eines Einsatzes Niederschlag vorangegangen ist, kann die Einsatzauslösung darauf zurückgeführt und ein allfälliger direkter Zusammenhang zwischen Niederschlag und Einsatzauslösung erstellt werden (siehe Kapitel 4.1.1). Einsätze, für die keine CombiPrecip-Daten innerhalb der zeitlichen Auflösung (1 Stunde) vorhanden sind (44 Einsätze), werden daher von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Mit einer üblichen Arbeitsmaschine kann man die oben beschriebene Datenmenge problemlos öffnen. Auch einfache Manipulationen sind in vernünftiger Zeit möglich. Bereits bei leicht komplexeren Verarbeitungen stösst eine gewöhnliche Arbeitsmaschine hingegen an Grenzen. Es besteht eine einfache Möglichkeit, um den Berechnungsaufwand deutlich zu reduzieren: Der Datenwürfel lässt sich auf jene Stunden reduzieren, in welchen effektiv Einsätze stattfanden. Da von den rund 16'000 Einsätzen viele zeitgleich abliefen, lässt sich die Datenmenge so signifikant verringern. Anzumerken ist, dass die Datenreduktion natürlich erst stattfinden darf, nachdem die x-Stunden-Summen und -Maxima gerechnet wurden. Durch die Anwendung dieses «Tricks» werden markante positive Effekte bei der Berechnungszeit erzielt. Allerdings erweist sich dieses Vorgehen auch spürbar

einschränkend bei der Flexibilität. Namentlich bei der Datenexploration (Betrachtung mit Zeitschieberegler) sind die zeitlichen Lücken unpraktisch.

In der Quintessenz gilt festzuhalten, dass die Datenreduktion nicht zu empfehlen ist. Vielmehr sollte, wann immer möglich, mit homogenen (Zeit-)Achsen gearbeitet werden. Im Falle der CombiPrecip-Daten empfiehlt es sich sogar, im Vorfeld noch einige bestehende Datenlücken (fehlende Stunden) mit NODATA-Werten zu füllen.

Anhang B 2 Räumliche und zeitliche Überlagerung von Datensätzen

Bei jeder Datenkombination ist auf die Koordinatensysteme ein besonderes Augenmerk zu richten, dies sowohl im räumlichen wie auch im zeitlichen Kontext.

Viele von Bund und Kantonen angebotene Datensätze liegen im neuen Landeskoordinatensystem LV95 vor. Die in der vorliegenden Studie untersuchten Einsatzdaten, wie auch die CombiPrecip-Daten waren hingegen nur im alten Koordinatensystem (LV03) verfügbar.

Anhang B 2.1 Überlagerung Einsatzdaten mit Niederschlagsdaten

Zeitliche Abstimmung

Wie bei anderen Daten sind auch bei Datenwürfeln im NetCDF-Format die Koordinatensysteme entscheidend. Die Niederschlagsdaten haben neben der geografischen Referenz (altes Schweizer Landeskoordinatensystem LV03) eine Zeitangabe. Bei Letzterer ist Vorsicht geboten! Die CombiPrecip-Daten beziehen sich keineswegs auf die Schweizer Ortszeit, sondern auf die koordinierte Weltzeit UTC. Dies ist aus den Metadaten selbst nicht ersichtlich (es gibt keine Metadaten, welche die Zeitachse beschreiben). Erst wenn die Formatspezifikationen von NetCDF konsultiert wird, erfährt man, dass die UTC die Default-Zeitachse ist.

Für die Kombination der Niederschlagsdaten in UTC-Zeit mit den Einsatzdaten in Schweizer Zeit (CET bzw. CEST) ist daher eine Konvertierung erforderlich. Für die beiden Datensätze ergibt sich eine Verschiebung von einer Stunde im Winter und zwei Stunden im Sommer. Es empfiehlt sich, die Einsatzdaten nach UTC zu konvertieren, damit die Kombination in einem Sommerzeit-freien Zeitformat vorgenommen werden kann.

Relevante räumliche Einheit bei der Zuweisung von Niederschlagsdaten

Bei der Anreicherung der Einsatzdaten mit Niederschlagsinformationen wurden mehrere Varianten ausprobiert. Es stellt sich die Frage, welche Informationen für den Einsatz relevant sind. Die einfachste Variante ist, jedem Einsatz die Niederschlagsdaten der Quadrat-kilometer-Zelle zuzuordnen, auf welcher er stattgefunden hat. Diese Variante ist besonders bei lokalen Starkniederschlägen naheliegend.

Bei Einsätzen nahe Fließgewässern stellt sich die Frage, ob denn wirklich der lokale Niederschlag die Einsätze ausgelöst hat, oder ob allenfalls der Regen in höher gelegenen Regionen des Fluss-Einzugsgebietes ausschlaggebend war. Mit dem Datensatz Einzugs-gebietsgliederung Schweiz (siehe Anhang A 3) steht eine Grundlage zur Verfügung, welche die Untersuchung dieser Variante ermöglicht. Die Einzugsgebiete der in der vorliegenden Studie relevanten Gewässer liegen jedoch teilweise ausserhalb des Perimeters, für welchen

Niederschlagsdaten vorhanden sind. Aus diesem Grund und auch, weil diese Variante für lokale Starkniederschläge ungeeignet ist, wird sie nicht weiter verfolgt.

Stattdessen wird eine Zwischenvariante getestet: Jedem Einsatz werden Niederschlagsparameter zugewiesen, welche auf dem aktuellen Teileinzugsgebiet gemessen wurden. Die Teileinzugsgebiete, deren Grenzen Wasserscheiden sind, sind geografische Einheiten mit einem ähnlichen Niederschlag-Abfluss-Verhalten. Die Umsetzung dieser Variante (Mittelwert über das Teileinzugsgebiet) ist aus mehreren Gründen nicht zu empfehlen. Zum einen zeigt sie gegenüber der Minimalvariante (Information der aktuellen Rasterzelle) und einer einfachen Erweiterung (Mittelwert über ein 3 x 3-Kilometer-Quadrat) bei den weiteren Auswertungen keinerlei Vorteile. Zum anderen liegt die Berechnungskomplexität Grössenordnungen über den Alternativvarianten.

Anhang B 2.2 Überlagerung Einsatzdaten mit Gebäudedaten

Um den Einsatzdaten realistische Angaben zu ihrer jeweiligen Gefährdungslage bezüglich Oberflächenabfluss bzw. Hochwasser hinzuzufügen, ist es von Bedeutung, ob sich die Einsatzorte innerhalb oder ausserhalb eines Gebäudes befinden (siehe Kapitel 4.1.2). Der Punktdatensatz der Einsatzorte wird daher zunächst mit dem Gebäudedatensatz der amtlichen Vermessung des Kantons Zürich überschritten und jedem Einsatzort zugewiesen, ob er sich in einem Gebäude befindet oder nicht. 85 % der Einsätze können innerhalb von Gebäuden verortet werden. Bei Untersuchung der verbleibenden 2'508 (15 %) Einsätze ausserhalb von Gebäuden stellte sich heraus, dass auch hier 189 (1 %) Einsätze die Einsatzart «Wasser im Gebäude» bzw. «Wasser im Gebäude (Unwetter)» aufweisen. Mögliche Gründe für diese Unstimmigkeiten können folgende sein:

- Änderungen im Gebäudebestand seit 2012

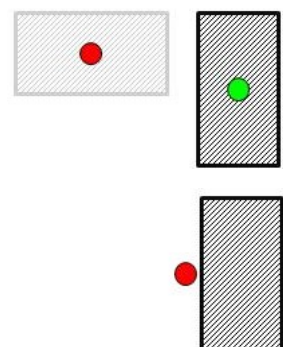
Die Einsatzarten «Wasser im Gebäude» und «Wasser im Gebäude (Unwetter)» wurde für Einsätze seit 2012 erfasst. Der AV-Datensatz der Gebäude ist aus dem Jahr 2017. Von Veränderungen im Gebäudebestand des Kantons Zürich zwischen 2012 und 2017 muss ausgegangen werden. Das bedeutet, dass die erfassten Einsatzdaten z. T. auf anderen Gebäudebeständen basieren als die vorliegenden Auswertungen.

- Ungenauigkeiten bei der Verortung der Einsätze

Auch Einsätze, die nur knapp ausserhalb eines im Datensatz der amtlichen Vermessung erfassten Gebäudes zu liegen kommen, werden mit dem Attribut «ausserhalb von Gebäuden» erfasst.

Einsatzart «Wasser im Gebäude»

- Einsatz innerhalb Gebäude
- Einsatz ausserhalb Gebäude



Auf einen Vergleich verschiedener Datenstände des Gebäudedatensatzes der amtlichen Vermessung wurde verzichtet. Ebenso auf eine nachträgliche, manuelle Bereinigung der Einsatzdaten.

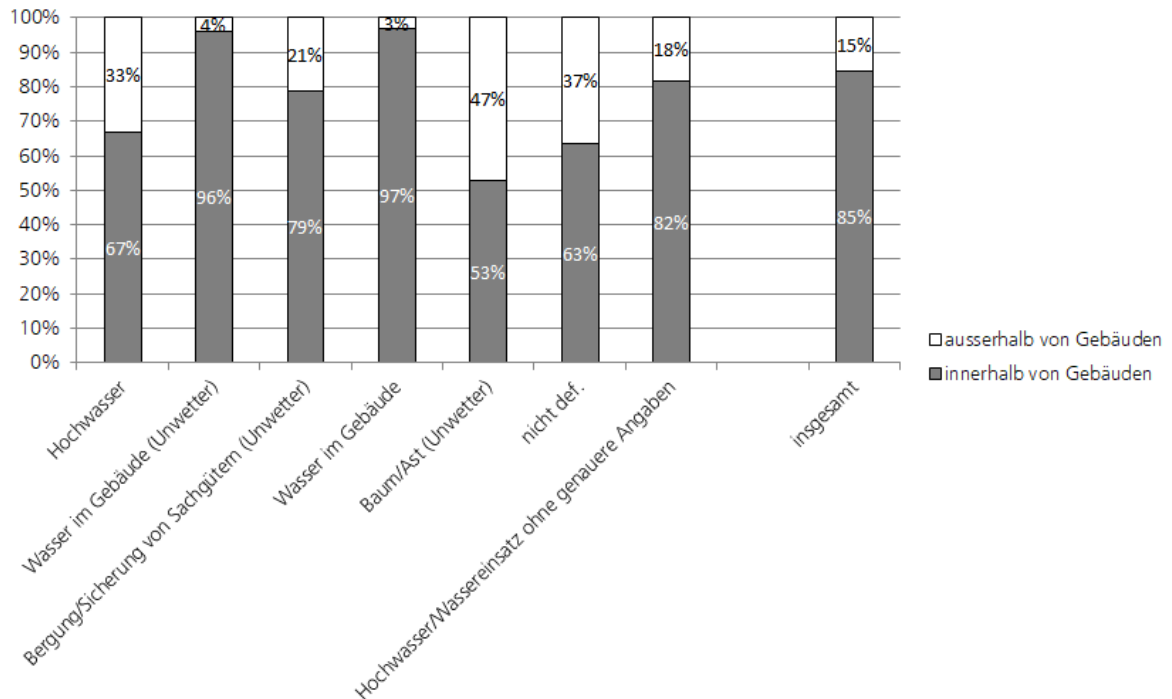


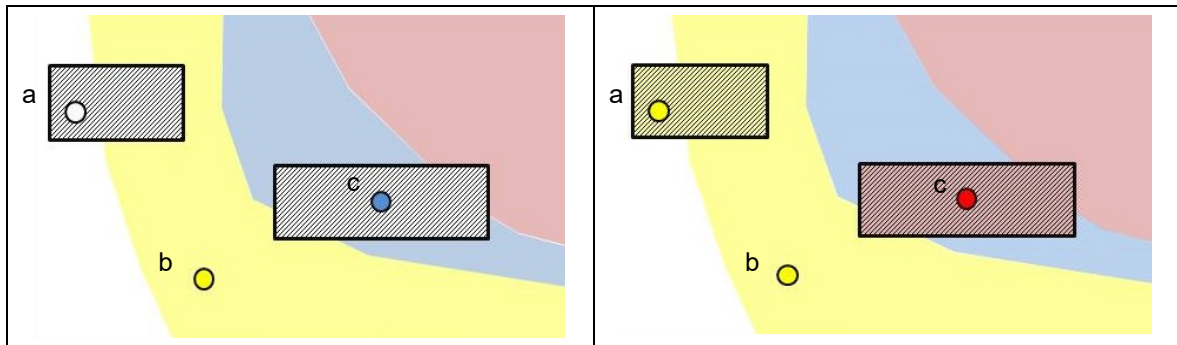
Abbildung 38: Verteilung der Einsätze nach Einsatzart und Einsatzort (innerhalb/ausserhalb von Gebäuden) [2], [5].

Der allgemeine Vergleich der Verteilung der verschiedenen Einsatzarten innerhalb und ausserhalb von Gebäuden ist plausibel. Die Verteilung der Einsätze ohne genauere Angaben (Daten zwischen 06.07.2005–31.01.2012) entspricht in etwa der Verteilung aller Einsätze. Die Einsatzarten «Baum/Ast (Unwetter)» und «Hochwasser» sind die Kategorien mit dem prozentual höchsten Anteil an Einsätzen ausserhalb von Gebäuden. Bei den Kategorien mit Gebäudebescrieb («Wasser im Gebäude» und «Wasser im Gebäude (Unwetter)» liegen über 96 % der Einsätze innerhalb von Gebäuden.

Anhang B 2.3 Überlagerung Einsatzdaten mit Gefährdungsdaten

Gefährdung durch Gewässer

Die Gefahrenkarte Wasser zeigt auf, welche Gebiete durch Hochwassergefahren betroffen sind (siehe Kapitel 3.3.1). Bei Betrachtung der Gefährdungslage eines Gebäudes wird davon ausgegangen, dass die höchste, ein Gebäude schneidende Gefahrenstufe massgebend ist. Liegt ein Gebäude beispielsweise teilweise in der roten Gefahrenzone, wird dem gesamten Gebäude und ebenfalls dem allenfalls in diesem Gebäude liegenden Einsatzpunkt das Attribut «erhebliche Gefährdung» zugewiesen (Abbildung 39, rechts). Die Gefährdungsangaben werden für alle sich in bzw. auf diesem Gebäude befindenden Einsatzpunkte übernommen.



Gefahrenstufen Gefahrenkarte Wasser

-  Restgefährdung
-  geringe Gefährdung
-  mittlere Gefährdung
-  erhebliche Gefährdung
-  Einsatz SRZ (Farbgebung je nach massgebender Gefahrenstufe)
-  Gebäude

Abbildung 39: Ergänzung der Einsatzdaten (Punkt) mit Angaben zur jeweiligen Gefahrenstufe gemäss Gefahrenkarte Wasser, schematische Darstellung. Links: Direkte Überlagerung der Einsatzdaten. Rechts: Gebäuden des AV-Datensatzes wird jeweils die höchste Gefahrenstufe der Gefahrenkarte Wasser zugewiesen, welche überschritten wird. Einsatzpunkte, die sich innerhalb des potenziell gefährdeten Gebäudes befinden, übernehmen die Gefährdungsangaben des Gebäudes (Einsatzpunkte a und c). Ausserhalb von Gebäuden wird den Einsatzpunkten die direkt unterliegende Gefahrenstufe zugewiesen (Einsatzpunkt b).

Bei Untersuchung des Prozentsatzes an Einsatzdaten innerhalb und ausserhalb der durch Hochwasser gefährdeten Gebiete zeigt sich, dass die Resultate vergleichbar sind mit der Verteilungen aller Gebäude innerhalb der Gefahrenstufen Wassergefahren (siehe Kapitel 4.1.2). Und diese wiederum sind vergleichbar mit den Abschätzungen des Mobiliar Labs für Naturrisiken [23] der potenziell durch Hochwasser betroffenen Gebäude des Kantons Zürich (Abbildung 40).

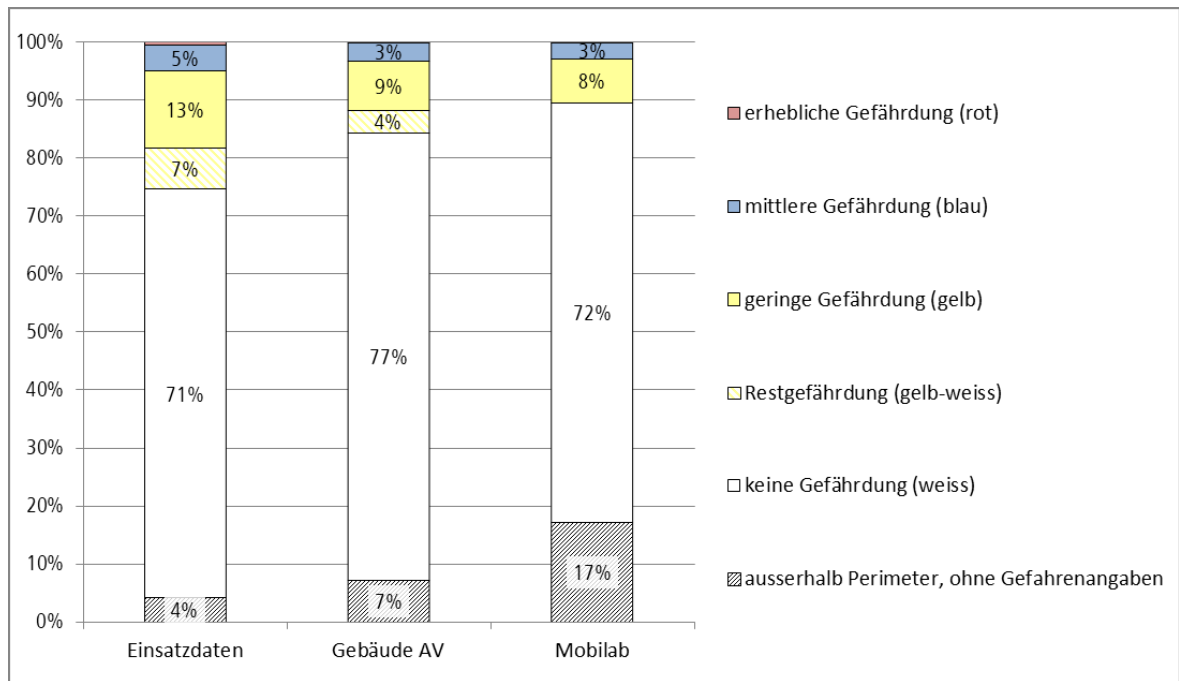


Abbildung 40: Verteilung der Einsatzdaten und der Gebäude des Kantons Zürich innerhalb der Hochwassergefahrenggebiete.

Links: Auswertung der Einsatzdaten SRZ mit den Gefahrenkarten Wasser [5], [8]. Mitte: Auswertung des Gebäudedatensatzes der amtlichen Vermessung mit den Gefahrenkarten Wasser [2], [8]. Rechts: Auswertung des Mobiliar Labs für Naturrisiken [23]. Achtung: Bei der Auswertung des Mobiliar Labs wurden die Kategorien «keine Gefährdung» und «Restgefährdung» zusammengefasst.

Gefährdung durch Oberflächenabfluss

Für die vorliegende Studie ist von Bedeutung, dass Gebäude bei der Erstellung der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss als Hindernis für den Oberflächenabfluss berücksichtigt wurden. Befestigte Flächen wie z. B. Hausvorplätze wurden geringfügig abgesenkt, da sie bevorzugte Fliesswege darstellen. Dementsprechend liegen Gebäude mehrheitlich ausserhalb des ausgewiesenen Gefährdungsbereichs oder sind nur am Rande davon betroffen, während auf befestigten Gebieten um die Gebäude herum vermehrt Oberflächenabfluss ausgewiesen wird (Abbildung 41).



Abbildung 41: Ausschnitt aus der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss [7]. Gebäude wurden als Hindernisse, befestigte Flächen und Strassen als bevorzugte Fließwege berücksichtigt. Datengrundlage: [2], [7].

Die Einsatzpunkte von SRZ liegen häufig innerhalb eines Gebäudes und bei einem direkten Verschnitt der Punkt-Einsatzdaten mit der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss wird die Betroffenheit massiv unterschätzt (Abbildung 42). Entsprechend werden Gebäudegrundrisse als massgebende Geometrien verwendet. Grundannahme in der vorliegenden Studie ist, dass wenn ein Gebäude auch nur teilweise innerhalb des Gefährdungsbereichs Oberflächenabfluss zu liegen kommt, Wassereintritt in das Untergeschoss theoretisch möglich ist und somit das gesamte Gebäude als potenziell gefährdet angesehen werden muss (Abbildung 42, rechts).

Um die potenzielle Betroffenheit der Einsatzorte durch Oberflächenabfluss abbilden zu können, wird zunächst allen Gebäuden des AV-Datensatzes, welche den Gefährdungsbereich überlappen, das Attribut «potenziell durch Oberflächenabfluss gefährdet» zugewiesen. Jedem Einsatz innerhalb eines Gebäudes mit diesem Hinweis wird das gleiche Attribut zugewiesen (Abbildung 42).

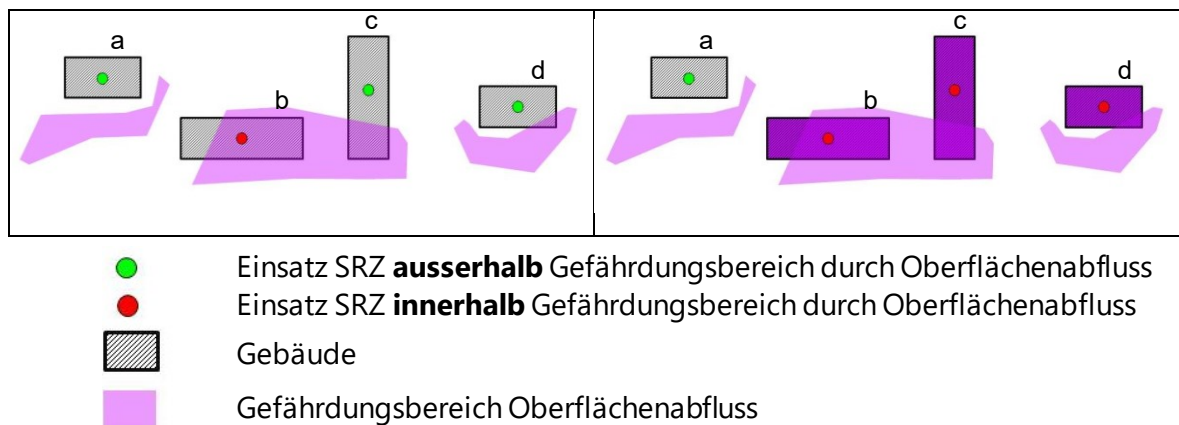


Abbildung 42: Ergänzung der Einsatzdaten (Punkt) mit Angaben zur Betroffenheit durch Oberflächenabfluss, schematische Darstellung.

Links: Direkte Überlagerung der Punkt-Einsatzdaten mit der Gefährdungskarte unterschätzt den Oberflächenabfluss, da Gebäude die Prozessflächen meist nur randlich oder teilweise streifen (b, c, d). Rechts: Schneidet ein Gebäude des AV-Datensatzes den Gefährdungsbereich, wird davon ausgegangen, dass das gesamte Gebäude potenziell durch Oberflächenabfluss betroffen ist (Gebäude b, c, d violett eingefärbt). Einsatzpunkte, die sich innerhalb des potenziell gefährdeten Gebäudes befinden, erhalten das Attribut «potenziell von Oberflächenabfluss betroffen: ja».

Anhang B 3 Statistische Analyse

Um aus messbaren Variablen und den registrierten Einsätzen ein Erklärungsmodell für diese Einsätze abzuleiten (Kapitel 2), stehen verschiedene statistische Methoden (z. B. lineare Regression) zur Auswahl. Diese Methoden sind aber mit Vorsicht anzuwenden. Sie sind oft datengesteuert, d. h. sie erklären die Beobachtungen, nicht zwingend aber die Realität (Korrelation impliziert nicht Kausalität). Zudem sind die damit hergeleiteten Erklärungsmodelle für die Praxis üblicherweise zu komplex. Aus diesen Gründen sollten statistische Analysen nur als Unterstützung bei der Gewinnung von Ideen dienen, wie sich ein einfaches, praxistaugliches Modell herleiten lässt.

Bereits bei der Datenaufbereitung und der Exploration kristallisieren sich Datensätze mit erhöhter Erklärungskraft heraus. Nicht überraschend zählen in der vorliegenden Studie insbesondere die Niederschlagsdaten dazu. Daher galt ihnen in den statistischen Analysen ein besonderes Augenmerk.

Anhang B 3.1 Hauptachsentransformation

Jedem Einsatz von SRZ lassen sich aus Niederschlags- (Kapitel 3.2) und Gefährdungsdaten (Kapitel 3.3) Informationen mit unterschiedlicher Erklärungsmacht zuordnen. Diese Informationen werden Indikatorvariablen genannt (z. B. 3-Stunden-Niederschlagssumme). Um die Grösse des umfangreichen Ausgangsdatensatzes ohne wesentlichen Datenverlust zu vermindern, wird eine Hauptachsentransformation angewendet. Diese ermöglicht die Reduktion des Ausgangsdatensatzes mit 16 Indikatorvariablen zum Niederschlag und 2

Indikatorvariablen zur Gefährdung auf nur 2 sogenannten latente Variablen. Die Gefährdungsinformationen werden dabei als metrische Variablen betrachtet (siehe Kapitel 3.3). Die latenten Variablen sind nicht direkt messbar, sondern müssen aus den Indikatorvariablen abgeleitet werden (Kapitel 4.2.1, Tabelle 3).

Die Hauptachsentransformation (principle component analysis PCA, in diesem Kontext synonym verwendet mit Hauptfaktorenanalyse) erlaubt es, den von den gemessenen Indikatoren aufgespannten Raum besser zu verstehen [17]. In diesem Raum entspricht die erste Hauptachse der Richtung, in welcher die Daten die höchste Varianz aufweisen, die zweite Hauptachse liegt senkrecht auf der ersten und weist die zweithöchste Varianz auf, usw. Aus einer Hauptachsentransformation lassen sich die Anzahl und die Natur der latenten Variablen erahnen. Nachfolgend werden die Erkenntnisse aus zwei Hauptachsentransformationen präsentiert.

Zunächst wird die Hauptachsentransformation (PCA) auf 16 Niederschlagsdaten und zwei weitere aus den Gefährdungsinformationen angewendet (Kapitel 3.3 und Abbildung 43). Nicht in der Analyse enthalten sind die Wetterlagen, da sie als kategoriale Variable ungeeignet sind.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16	PC17	PC18
gc_max_01	-0.18	-0.17	-0.54	0.02	-0.02	0.29	0.22	-0.03	-0.03	-0.04	-0.07	-0.01	-0.04	0.04	-0.02	-0.02	0.07	7E-01
gc_sum_01	-0.18	-0.17	-0.54	0.02	-0.02	0.29	0.22	-0.03	-0.03	-0.04	-0.07	-0.01	-0.04	0.04	-0.02	-0.02	0.07	-7E-01
gc_max_02	-0.23	-0.27	-0.06	0.00	0.03	-0.63	0.05	0.18	-0.07	0.02	-0.02	-0.01	-0.03	0.07	-0.06	-0.07	0.64	-5E-16
gc_sum_02	-0.24	-0.27	-0.17	0.00	0.03	-0.49	0.08	0.15	-0.05	0.04	0.02	0.02	0.04	-0.06	0.04	0.06	-0.74	7E-16
gc_max_03	-0.28	-0.19	0.14	0.01	0.02	-0.01	-0.22	-0.44	0.39	-0.23	-0.02	-0.07	-0.26	0.41	-0.32	-0.27	-0.11	-6E-16
gc_sum_03	-0.28	-0.19	-0.03	0.01	0.01	0.04	-0.23	-0.33	0.36	0.00	0.37	0.05	0.30	-0.41	0.32	0.26	0.13	6E-16
gc_max_06	-0.28	-0.12	0.18	0.01	0.02	0.10	-0.23	-0.16	-0.31	0.11	-0.54	-0.10	-0.31	0.05	0.36	0.37	0.02	3E-16
gc_sum_06	-0.29	-0.02	-0.03	0.01	0.02	0.17	-0.43	0.02	-0.34	0.57	0.10	0.04	0.22	-0.05	-0.30	-0.33	-0.02	-7E-17
gc_max_12	-0.28	-0.04	0.22	-0.01	0.00	0.14	-0.02	0.17	-0.21	-0.62	-0.21	0.09	0.13	-0.46	-0.12	-0.30	0.00	-5E-17
gc_sum_12	-0.27	0.19	-0.06	-0.01	0.01	0.14	-0.34	0.50	-0.08	-0.29	0.43	0.03	-0.13	0.37	0.10	0.25	0.00	-5E-17
gc_max_24	-0.28	0.02	0.26	-0.02	-0.02	0.12	0.30	0.14	0.19	0.07	-0.24	-0.15	0.62	0.31	-0.20	0.30	0.01	4E-17
gc_sum_24	-0.22	0.41	-0.14	-0.04	-0.01	-0.04	-0.10	0.34	0.54	0.21	-0.29	-0.26	-0.20	-0.25	0.08	-0.18	0.00	-2E-16
gc_max_48	-0.27	0.03	0.27	-0.02	-0.02	0.10	0.39	0.01	0.01	0.17	0.14	0.31	-0.05	0.21	0.54	-0.45	-0.02	-8E-17
gc_sum_48	-0.19	0.49	-0.16	-0.05	-0.01	-0.18	0.02	-0.22	0.00	-0.01	-0.15	0.70	-0.01	-0.01	-0.21	0.22	0.01	2E-16
gc_max_72	-0.27	0.03	0.27	-0.02	-0.03	0.10	0.42	-0.03	-0.08	0.18	0.34	-0.15	-0.45	-0.29	-0.37	0.26	0.01	4E-17
gc_sum_72	-0.18	0.50	-0.15	-0.05	-0.01	-0.22	0.09	-0.39	-0.33	-0.16	0.14	-0.51	0.17	0.06	0.14	-0.12	-0.01	2E-16
OFA	-0.02	0.03	0.01	0.71	-0.70	-0.05	-0.03	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2E-17
GK_hw	-0.01	0.08	0.01	0.70	0.71	0.01	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9E-17

Abbildung 43: PCA-Loadings nach Anwendung auf 16 Niederschlags- und zwei Gefährdungsvariablen.

Die beiden Gefährdungsvariablen (aus der Gefahrenkarte Wasser und aus der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss) weisen keine Korrelation untereinander auf (Abbildung 43). Ebenso wenig korrelieren die Gefährdungsinformationen mit den Niederschlagsvariablen. Beide Aussagen sind plausibel.

Interessant ist, dass die Gefährdungsinformationen von der Aussagekraft her deutlich weniger mächtig sind als die Informationen aus den Niederschlagsindikatoren (Abbildung 44). Die von den ersten drei Hauptachsen (PC1-3) erklärte Varianz kann unter Einbezug der vierten und fünften Hauptachse nicht übermässig gesteigert werden (von 80 % auf 90 %). Die Information in den ersten drei Hauptachsen stammt aus den Niederschlagsdaten, die vierte und fünfte Achse repräsentieren die Gefährdungsinformationen.

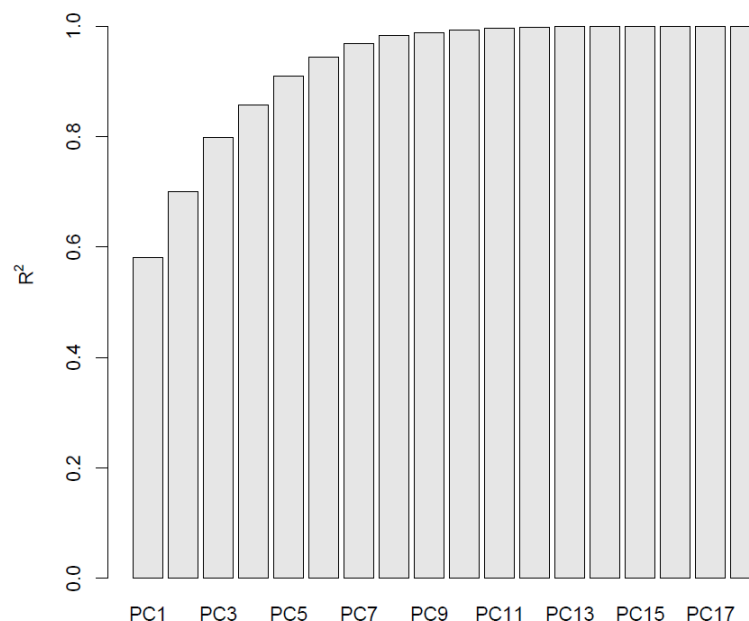


Abbildung 44: Relative Varianz, aufsummiert über 18 Hauptachsen.

Da die Aufbereitung der Niederschlagsvariablen in einem späteren Projektstadium überarbeitet wurde, wurde auch die Hauptachsentransformation wiederholt. Dieses Mal jedoch nur in Bezug auf die 16 Niederschlagsinformationen, da die Erklärungsmacht der Gefährdungsdaten für die vorliegende Studie nicht entscheidend ist (Abbildung 43). Die Ladungsmatrix in Abbildung 45 und die Darstellung der kumulierten relativen Varianz in Abbildung 46 lassen erkennen, dass nun die drei Hauptkomponenten über 90 % der Varianz in den Niederschlagsdaten erklären.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
gc_max_01	-0.22	0.23	0.55	0.26	-0.14	0.08	0.01	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	-0.71
gc_sum_01	-0.22	0.23	0.55	0.26	-0.14	0.08	0.01	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.71
gc_max_02	-0.27	0.19	0.00	-0.12	0.33	-0.42	-0.23	-0.04	0.34	-0.04	-0.17	0.28	-0.43	0.16	0.33	0.00
gc_sum_02	-0.27	0.17	0.07	-0.21	0.26	-0.42	0.14	-0.31	0.18	0.09	0.26	-0.26	0.39	-0.15	-0.37	0.00
gc_max_03	-0.28	0.16	-0.08	-0.15	0.21	0.07	-0.19	0.29	-0.41	-0.17	-0.40	0.22	0.01	-0.04	-0.54	0.00
gc_sum_03	-0.28	0.10	0.00	-0.34	0.11	0.06	0.37	-0.11	-0.60	-0.03	0.08	-0.11	-0.02	0.04	0.50	0.00
gc_max_06	-0.28	0.13	-0.12	-0.13	0.06	0.33	-0.28	0.41	0.32	0.00	-0.04	-0.19	0.47	-0.17	0.36	0.00
gc_sum_06	-0.27	-0.03	0.00	-0.42	-0.16	0.45	0.33	0.05	0.37	0.08	0.19	0.08	-0.36	0.14	-0.28	0.00
gc_max_12	-0.28	0.05	-0.22	0.09	-0.22	0.02	-0.57	-0.13	-0.22	0.15	0.31	-0.42	-0.28	0.22	-0.09	0.00
gc_sum_12	-0.25	-0.24	-0.01	-0.24	-0.57	-0.07	-0.20	-0.44	0.01	-0.04	-0.29	0.30	0.21	-0.18	0.07	0.00
gc_max_24	-0.27	0.00	-0.27	0.30	-0.12	-0.14	0.09	0.22	-0.08	-0.09	0.55	0.48	-0.01	-0.34	0.02	0.00
gc_sum_24	-0.20	-0.44	0.12	-0.05	-0.27	-0.45	0.17	0.49	0.02	-0.27	-0.07	-0.30	-0.02	0.19	-0.02	0.00
gc_max_48	-0.27	-0.01	-0.28	0.37	0.01	0.03	0.25	-0.07	0.04	0.27	-0.17	0.16	0.33	0.63	-0.01	0.00
gc_sum_48	-0.17	-0.50	0.18	0.05	0.26	0.01	-0.05	0.10	-0.09	0.71	-0.09	0.03	-0.11	-0.28	0.01	0.00
gc_max_72	-0.27	0.00	-0.29	0.39	0.04	0.11	0.28	-0.21	0.13	-0.20	-0.37	-0.36	-0.27	-0.40	0.00	0.00
gc_sum_72	-0.15	-0.51	0.18	0.11	0.42	0.27	-0.17	-0.27	0.01	-0.49	0.21	0.07	0.09	0.16	0.00	0.00

Abbildung 45: PCA-Loadings nach Anwendung auf 16 Niederschlagsvariablen.

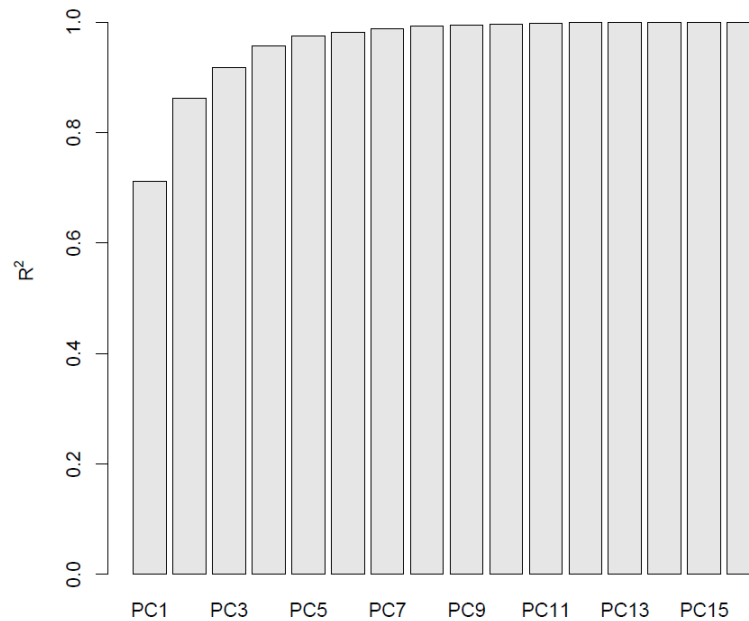


Abbildung 46: Relative Varianz, aufsummiert über 16 Hauptachsen.

Die Resultate der beiden durchgeführten Hauptkomponentenanalysen unterscheiden sich nicht wesentlich. Vorzeichenwechsel in einigen Spalten (z. B. bei PC2 und PC3) sind zufällig und müssen nicht beachtet werden. Interessant ist die Interpretation der ersten Spalten. Sie zeigen, wie man von den Indikatorvariablen zu den latenten Variablen gelangen kann. Eine von der PCA vorgeschlagene latente Variable ist eine Linearkombination der gemessenen Indikatorvariablen, wobei die Gewichte der jeweiligen Spalte der Ladungsmatrix entnommen werden können.

Konkret stellt die erste Hauptkomponente PC1 ein generelles Regenmass dar. Je mehr es geregnet hat (egal ob über kurze oder lange Zeit), so ist die latente Variable (aufgrund der negativen Loadings) tiefer. In der zweiten Hauptkomponente lassen sich kurze Starkniederschläge von langandauernden Regenfällen unterscheiden. Ist die zweite latente Variable hoch, so hat es in kurzer Zeit viel geregnet, während die Langzeitregensummen vergleichsweise tief sind.

Anhang B 3.2 Clusteranalyse

Ein möglicher nächster Schritt nach einer Hauptachsentransformation ist eine Clusteranalyse. Sie bietet sich insbesondere an, wenn man – wie in der vorliegenden Studie – eine Kategorisierung der Daten, hier Einsätze von SRZ, als sinnvoll erachtet.

Aus fachlicher Sicht liegt die Vermutung nahe, dass sich die Einsätze in mindestens zwei Kategorien einteilen lassen. Einsätze aufgrund einer Überschwemmung aus dem Gerinne z. B. haben eine andere Natur als Einsätze, welche durch Oberflächenabfluss ausgelöst wurden.



Abbildung 47: Resultate der Clusteranalyse, dargestellt in den ersten zwei Hauptkomponenten.

Die Clusteranalyse wird in der vorliegenden Studie mehrfach durchgeführt (K-Means-Clustering [19]). In Abbildung 47 und nachfolgend sind die Resultate ersichtlich, welche mit der letzten Hauptachsenanalyse zusammenpassen (Kapitel 4.2.2 und Abbildung 45).

Es gibt verschiedene Ansätze, um eine sinnvolle Anzahl von Klassen (Clustern) zu finden. Die Ansätze liefern jedoch auf den untersuchten Daten keine einheitlichen Resultate. Eine Anzahl von drei Klassen wurde aus fachlichen Überlegungen heraus gewählt. In Abbildung 47 sind die Einsätze in den Hauptkomponenten PC1 und PC2 dargestellt und farblich in drei Klassen aufgeteilt. Es ist deutlich erkennbar, dass es in diesen Dimensionen keine sinnvollen geraden Trennlinien zwischen den Klassen gibt. Die von der Clusteranalyse vorgeschlagene Trennung ist kritisch zu hinterfragen, da sie die Daten scheinbar willkürlich auftrennt. Wie schon bei der Hauptachsentransformation sind auch die Clusteranalyse nicht per se, sondern als Ideengeber zu betrachten.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zusammenhang zwischen Starkniederschlägen und Einsätzen von Schutz & Rettung Zürich.....	i
Abbildung 2:	Zusammenhang zwischen Einsätzen und den Gefahrenprozessen Hochwasser und Oberflächenabfluss	ii
Abbildung 3:	Künftige Entwicklung der Einsätze aufgrund von Klimawandel und Bevölkerungsentwicklung bzw. der daraus abgeleiteten Siedlungsentwicklung.....	ii
Abbildung 4:	Aufbau des Erklärungsmodells und Ablauf der Studie: Einsatzdaten, Niederschlagsdaten und weitere erklärende Variablen werden in eine Geodatenbank integriert. Aufgrund von statistischen Analysen wird der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Einsätzen von SRZ hergeleitet und die zukünftige Entwicklung der Anzahl Einsätze abgeschätzt.	3
Abbildung 5:	Einsatzdaten SRZ in Bezug auf Unwetter und/oder Wassergefahren innerhalb des Kantons Zürich im Zeitraum vom 06.07.2005 bis 07.01.2018. Datengrundlage: [5], PK25 © 2017 swisstopo.....	4
Abbildung 6:	Verfügbarkeit der Einsatzdaten von SRZ. Für den Zeitraum vom 06.07.2005 bis 11.11.2012 sind nur Einsatzdaten aus dem südlichen Teil des Kantons Zürich (hellblau) verfügbar. Die Einsatzdaten vom 12.11.2012 bis zum 07.01.2018 decken das gesamte Kantonsgebiet ab [5].....	5
Abbildung 7:	Einsätze zwischen dem 01.02.2012 und dem 07.02.2018 nach Einsatzart (links) und Dringlichkeit (rechts) (nach [5]).....	7
Abbildung 8:	Schematische Darstellung der Herleitung der Niederschlagsparameter Niederschlagsintensität und Niederschlagssumme für die betrachteten Perioden (1, 2, 3, 6, 12, 24 48 oder 72 Stunden vor Einsatz, rote Linien).....	8
Abbildung 9:	Perimeter Gefahrenkarte Wasser im Kanton Zürich [8].....	9
Abbildung 10:	Ausschnitt aus der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss [7].	10
Abbildung 11:	Datenfluss bis und mit Kategorisierung im Rahmen der Studie «Starkniederschläge und Einsatzplanung von SRZ». Bei den Einsatzarten (Tabelle unten links) wurden grün hinterlegte Arten berücksichtigt, orange hinterlegte Arten ausgeschlossen.	13
Abbildung 12:	Anzahl Einsätze in Prozent nach x-Stunden-Niederschlagssumme (links) und max. Niederschlagsintensitäten in den x Stunden vor dem Einsatz (rechts).....	15
Abbildung 13:	Visualisierung des Niederschlagsereignisses vom 7./8. Juni 2015 (1-Stunden-Niederschlagssumme) und der nachfolgenden Einsätze von SRZ über die Zeit [4], [5].....	15
Abbildung 14:	Visualisierung des Niederschlagsereignisses vom 7./8. Juni 2015 (3-Stunden Niederschlagssumme) und der nachfolgenden Einsätze von SRZ über die Zeit [4], [5].....	16
Abbildung 15:	Verteilung der Einsatzdaten innerhalb der Gefahrenstufen Wassergefahren (Überschwemmung aus Bächen, Flüssen und Seen) (nach [5], [8]).....	18

Abbildung 16:	Bevölkerungsdichte 2010 gemäss [3] (links) und Einsatzdichte ab 12.11.2012 gemäss [5] (rechts) pro Hektare.....	20
Abbildung 17:	Gegenüberstellung Bevölkerungsdichte [3] und Anzahl Einsätze [5] (Periode 12.11.2012–7.2.2018)	20
Abbildung 18:	Gegenüberstellung Bevölkerungsdichte [3] und Einsatzdichte [5] pro Hektare (Periode 12.11.2012–7.2.2018)	21
Abbildung 19:	Resultate der Clusteranalyse (drei Cluster), dargestellt in den ersten zwei Hauptkomponenten.	24
Abbildung 20:	Kategorisierung der Einsätze nach dem sie auslösenden Niederschlagstyp. Unterschieden werden die Kategorien «unbestimmt» (Kategorie 0), «langandauernder Niederschlag» (Kategorie 1) sowie «kurzer Starkniederschlag» (Kategorie 2).	25
Abbildung 21:	Einsätze dreier Ereignisse, nach Kategorie eingefärbt (nach [5]). Durch Gewitter ausgelöste kurze Starkniederschläge führen zu zellenförmigen Konzentrationen von Einsätzen, während langandauernde Niederschläge zu flächigen Mustern führen.	26
Abbildung 22:	Anzahl Stunden (Fälle) bezogen auf die Anzahl Einsätze pro Stunde.	27
Abbildung 23:	Laufende Summe der Anzahl Einsätze über sechs Stunden. Ein Niederschlagsereignis ist für SRZ gemäss den von SRZ gemachten Erfahrungen dann relevant, wenn es mehr als 50 Einsätze innerhalb von sechs Stunden (rote Linie) nach sich zieht.	27
Abbildung 24:	Verteilung der x-Stunden-Summen (gc_sum_x, rechts) und der maximalen Stundenintensitäten (gc_max_x, links) für 1-, 2-, 3-, 6-, 12-, 24-, 48- und 72-Stundenperiode (Perzentile 10 %, 25 %, Median, 75 %, 90 %).	29
Abbildung 25:	Gegenüberstellung der Niederschlagsparameter der für SR relevanten Niederschlagsereignisse zwischen Juli 2005 und Januar 2018 (Linien) und der Verteilung der Niederschlagswerte für alle Einsätze in dieser Zeitperiode (Boxplots) für kurze Starkniederschläge (oben) und langandauernde Niederschläge (unten).....	30
Abbildung 26:	Perzentilwerte für den kurzen Starkniederschlag (Kategorie 2) (links) und den langandauernden Niederschlag (Kategorie 1) (rechts) für verschiedene Anzahl Einsätze, die ein für SRZ relevantes Niederschlagsereignis festlegen.....	33
Abbildung 27:	Perzentile (Minimum, 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 95 %, Maximum) für die Niederschlagsparameter maximale Stundenintensität (links) und 12-Stunden-Summe (rechts) für die 16 für SRZ relevanten Niederschlagsereignisse.....	34
Abbildung 28:	Grössere Niederschlagsereignisse abgeleitet aus den Schwellenwerten für die maximale Stundenintensität in den vorangehenden drei Stunden und für die 12h-Niederschlagssumme.	35
Abbildung 29:	Anteil der Stationen mit positivem bzw. negativem Trend seit 1901 für den täglichen Starkniederschlag für das 99%-Perzentil (a) und der Anzahl Tage mit Überschreitung des 99%-Perzentils (b). Abbildung entnommen aus [26].....	38

Abbildung 30:	Modellierter Bevölkerungszuwachs im Kanton Zürich bis zum Jahr 2040 (links). Zusätzliche Anzahl Einwohner in Gebieten, die durch Überflutung oder Oberflächenabfluss gefährdet sind (rechts). Datengrundlage: [3], [7], [8].....	40
Abbildung 31:	Zusammenhang zwischen Starkniederschlägen und Einsätzen von Schutz & Rettung Zürich: Ist einer der Schwellenwerte überschritten, ist mit einer für SRZ relevanten Einsatzhäufung von mehr als 50 Einsätzen innerhalb von sechs Stunden zu rechnen.	42
Abbildung 32:	Zusammenhang zwischen Einsätzen und den Gefahrenprozessen Überflutung durch Fliessgewässer oder Seen und Oberflächenabfluss.....	43
Abbildung 33:	Künftige Entwicklung der Einsätze aufgrund von Klimawandel und Bevölkerungsentwicklung bzw. der daraus abgeleiteten Siedlungsentwicklung.....	44
Abbildung 34:	Saisonale Niederschlagsverteilung für die Wetterlagen 16 (South, anticyclonic), 17 (West, indifferent) und 18 (SouthWest, indifferent) der GWT26_Z500-Klassifikation [22].....	49
Abbildung 35:	Saisonale Häufigkeit der Wetterlagen in der Zeit von 12.11.2012 bis 7.1.2018 (gesamte Datenreihe, unabhängig von Einsatzdaten SRZ). Klassifikation GWT26_Z500 [28].....	50
Abbildung 36:	Ausschnitt aus der Risikokarte Hochwasser Kanton Zürich inkl. Legende ([9],[10]).....	53
Abbildung 37:	Stand der Risikokarte Hochwasser Kanton Zürich 21.12.2015 [9]. Gemeinden ohne Gefahrenkarte und demnach ohne Risikokarte sind grau eingefärbt.....	54
Abbildung 38:	Verteilung der Einsätze nach Einsatzart und Einsatzort (innerhalb/ausserhalb von Gebäuden) [2], [5].....	58
Abbildung 39:	Ergänzung der Einsatzdaten (Punkt) mit Angaben zur jeweiligen Gefahrenstufe gemäss Gefahrenkarte Wasser, schematische Darstellung.....	59
Abbildung 40:	Verteilung der Einsatzdaten und der Gebäude des Kantons Zürich innerhalb der Hochwassergefahrenggebiete.....	60
Abbildung 41:	Ausschnitt aus der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss [7]. Gebäude wurden als Hindernisse, befestigte Flächen und Strassen als bevorzugte Fliesswege berücksichtigt. Datengrundlage: [2], [7].....	61
Abbildung 42:	Ergänzung der Einsatzdaten (Punkt) mit Angaben zur Betroffenheit durch Oberflächenabfluss, schematische Darstellung.....	62
Abbildung 43:	PCA-Loadings nach Anwendung auf 16 Niederschlags- und zwei Gefährdungsvariablen.....	63
Abbildung 44:	Relative Varianz, aufsummiert über 18 Hauptachsen.....	64
Abbildung 45:	PCA-Loadings nach Anwendung auf 16 Niederschlagsvariablen.....	64
Abbildung 46:	Relative Varianz, aufsummiert über 16 Hauptachsen.....	65
Abbildung 47:	Resultate der Clusteranalyse, dargestellt in den ersten zwei Hauptkomponenten.....	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Unterschiedliche Attributierung der Einsätze von SRZ nach Zeitraum, Einsatzart bzw. Codierung sowie Anzahl der Einsätze in der jeweiligen Kategorie (nach [5]).	6
Tabelle 2:	Kreuztabelle: Verteilung der 16'193 erfolgreich mit Niederschlagsdaten angereicherten Einsatzdaten innerhalb der Gefahrenkarte Wasser (Überschwemmung aus Bächen, Flüssen und Seen) bzw. der Gefährdungskarte Oberflächenabfluss.	19
Tabelle 3:	Resultate der Hauptachsentransformation: Mit Hilfe von zwei Hauptkomponenten (latente Variablen) lassen sich die grösseren Einsätze von SRZ erklären.	23
Tabelle 4:	Ereignisse mit 50 oder mehr Einsätzen innerhalb von sechs Stunden (chrono-logisch sortiert). Kategorie 0 «unbestimmt», Kategorie 1 «langandauernder Niederschlag», Kategorie 2 «kurzer Starkniederschlag».	28
Tabelle 5:	Auswertung 99%-Perzentil der Stundenniederschläge (über alle Stunden) für die Gesamtperiode und für die Periode, für die Einsatzdaten vorliegen.	33
Tabelle 6:	Vergleich der Schwellenwerte mit der Extremwertstatistik für drei Stationen (Daten: MeteoSchweiz).	34
Tabelle 7:	Evaluation der Niederschlagsereignisse, bei denen die Schwellenwerte im Untersuchungsgebiet überschritten wurden.	36
Tabelle 8:	Zunahme der durch Überflutung oder Oberflächenabfluss gefährdeten Bevölkerung bis ins Jahr 2030 bzw. 2040.	41
Tabelle 9:	Attribute der von SRZ gelieferten Einsatzdaten inkl. Angaben zum Typ/Format, Definition Pflichtfeld und Erläuterung [5].	48
Tabelle 10:	Anzahl Einsätze pro Wetterlage (WL) am Einsatztag (E) und am Vortag sowie relative Häufigkeit.	51

Referenzierte Dokumente

Geodaten

- [1] Abflussprozesskarte. Geographisches Informationssystem des Kantons Zürich (GIS-ZH). <https://geolion.zh.ch/geodatensatz/845> Stand: 26.06.2018
- [2] Amtliche Vermessungsdaten AV DM01-ZH, Grunddatensatz. Geographisches Informationssystem des Kantons Zürich (GIS-ZH). <https://geolion.zh.ch/geodatenprodukt/1035> Stand: 26.06.2018
- [3] Bevölkerungsverteilung 2010. Hektardaten aus GEOSTAT (STATPOP 2010).
- [4] CombiPrecip Niederschlagsdaten MeteoSchweiz. Hourly Precipitation Estimation through Raingauge-Radar: CombiPrecip. https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/produkt/raeumliche-daten-combiprecip/doc/ProdDoc_CombiPrecip.pdf Stand: 26.06.2018
- [5] Einsatzdaten Schutz & Rettung Zürich 06.07.2005–07.01.2018. Unveröffentlichte Daten.
- [6] Einzugsgebietsgliederung Schweiz. BAFU <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/karten/einzugsgebietsgliederung-schweiz.html> Stand: 26.06.2018
- [7] geo7 (2018): Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz im Auftrag von BAFU, SVV, KGV. <https://map.geo.admin.ch> Stand: 01.07.2018
- [8] Naturgefahrenkarte Wasser. Geographisches Informationssystem des Kantons Zürich (GIS-ZH). <http://www.geolion.zh.ch/geodatensatz/784> Stand: 01.01.2017
- [9] Risikokarte Naturgefahren. Geographisches Informationssystem des Kantons Zürich (GIS-ZH). <http://www.geolion.zh.ch/geodatensatz/show?gdsid=243> Stand: 01.01.2017

Fachspezifische Grundlagen

- [10] AWEL (2018): Risikokarte Kanton Zürich. <https://awel.zh.ch/internet/baudirektion/awel/de/wasser/hochwasserschutz/risikokarte.html> Stand: 05.03.2018
- [11] BABS Bundesamt für Bevölkerungsschutz (2014): Trendanalyse Bevölkerungsschutz 2025. Chancen und Herausforderungen aus den Bereichen Umwelt, Technologie und Gesellschaft. BABS, Zürich.
- [12] BAFU Bundesamt für Umwelt (2015): Anpassung an den Klimawandel. Bedeutung der Strategie des Bundesrates für die Kantone. BAFU, Bern.
- [13] BAFU Bundesamt für Umwelt (2018): Gefährdungskarte Oberflächenabfluss: Quantensprung für die Prävention von Wasserschäden <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/dossiers/gefaehrdungskarte-oberflaechenabfluss-quantensprung-fuer-die-praevention-von-wasserschaeden.html> Stand: 28.08.2017
- [14] BBK Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (D) (2016): Klimawandel – Herausforderung für den Bevölkerungsschutz. BBK, Bonn.

- [15] C2SM, MeteoSchweiz, ETH, NCCR Climate und OcCC Zürich (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011. www.ch2011.ch
- [16] C2SM, MeteoSchweiz, ETH, NCCR Climate und OcCC Zürich (2011): CH2011 Extension Series: Projections of Extreme Precipitation in Switzerland. www.ch2011.ch
- [17] Ernste, H. (2011): Angewandte Statistik in Geografie und Umweltwissenschaften. vdf, Zürich.
- [18] geo7 (2018): Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz. Technischer Bericht. Im Auftrag von BAFU, SVV, KGV. BAFU, Bern.
- [19] Hartigan, J. A.; Wong, M. A. (1979): A K-Means Clustering Algorithm. Journal of the Royal Statistical Society. Series C, Vol 28, No. 1, pp. 100-108.
- [20] Kutschker, T.; Trommler, M. (2013): Auswirkungen von Starkregenereignissen auf die Gefahrenabwehr im Ballungsraum Rhein-Main. Projektbericht. Methoden zur Auswertung des Zusammenhangs zwischen Starkregenereignissen und Einsatztätigkeit der Feuerwehr. Universität Wien, Wien.
- [21] Erdin R., 2009: Combining rain gauge and radar measurements of a heavy precipitation event over Switzerland. Veröffentlichungen der MeteoSchweiz, MeteoSwiss.
- [22] MeteoSwiss (2010) Characterisation of Weather Type Classification GWT26_Z500. Internes Dokument.
- [23] Mobiliar Lab für Naturrisiken (2016): Hochwasserrisiko Schweiz. <http://www.hochwasserrisiko.ch/HochwassergefahrdungCH/Karte.html> Stand: 27.02.2018
- [24] Panziera, L., Gabella, M., Zanini, S., Hering, S., Germann, U., Berne, A. (2016) A radar-based regional extreme rainfall analysis to derive the thresholds for a novel automatic alert system in Switzerland. Hydrol. Earth Syst. Sci. 20, 2317–2332.
- [25] Rajczak, J.; Schär, C. (2017): Projections of future precipitation extremes over Europe: A multimodel assessment of climate simulations. Journal of Geophysical Research: atmospheres, 122, 10,773–10,800. <https://doi.org/10.1002/2017JD027176>
- [26] Scherrer, S. C., Fischer, E. M., Posselt, R., Liniger, M. A., Croci-Maspoli, M., Knutti, R. (2016): Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. Journal of Geophysical Research Atmosphere 121, doi: <https://doi.org/10.1002/2015JD024634>
- [27] Sweeney, T. L.: Modernized Areal Flash Flood Guidance, NOAA Technical Report NWS HYDRO 44, Hydrology Laboratory, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD.
- [28] Weusthoff, T. (2011): Weather Type Classification at MeteoSwiss – Introduction of new automatic classification schemes. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 235, 46 pp. MeteoSchweiz, Zürich.

National Centre for Climate Services NCCS

Das NCCS ist im Sinne eines virtuellen Zentrums organisiert und besteht derzeit aus acht Verwaltungseinheiten des Bundes:

- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz)
- Bundesamt für Umwelt (BAFU)
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS)
- Bundesamt für Landwirtschaft (BLW)
- Bundesamt für Gesundheit (BAG)
- Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV)
- ETH Zürich
- Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

Weitere Partner sind:

- Agroscope
- Oeschger-Zentrum für Klimaforschung
- Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL)
- ProClim – Forum für Klima und globalen Wandel

Die Geschäftsstelle ist bei MeteoSchweiz angesiedelt.

Link: [NCCS-Webplattform](#)