



AWEL-Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Abteilung Wasserbau
Christian Schuler
Walcheplatz 2
8090 Zürich

Forschungsprogramm Klimawandel und Risikoanalyse

Projektteil 1B: Quantifizierung des Einflusses des Klimawandels auf die Hydrologie

Bericht

Impressum

Projektbearbeitung

<i>geo7</i> AG, geowissenschaftliches Büro	Neufeldstrasse 5 – 9, 3012 Bern Tel. +41 (0)31 300 44 33
	Dr. Michael Rinderer Dr. Catherine Berger

Änderungskontrolle

Version	Datum	Name	Bemerkungen
1.0	14.02.2025	Autoren: Dr. Michael Rinderer Dr. Catherine Berger	Entwurf an den Auftraggeber
2.0	05.06.2025	Autoren: Dr. Michael Rinderer Dr. Catherine Berger Mit Kommentaren von Christian Schuler, Franziska Lindström, Dr. Massimiliano Zappa Lektorat: Maike Schneider	Endversion

Anmerkungen zum Dokument

Erstellt mit	Microsoft Office Word, Version 2019
Dateiname	\\geo7\data\3000_projekte\4359 hy zh klimawandel\05 bearbeitung\bericht_teil2\4359 be02a rim endbericht hy zh klimawandel projektteil_ii_v11.docx
Dateigrösse	49119 KBytes

geo7-Bericht
Technische Änderungen vorbehalten
© Copyright 2025 by *geo7* AG, Bern/Switzerland
Konzeption und Design: *geo7* AG, Bern

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und Zielsetzung	5
2	Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Projektteil 1A	7
3	Methodik zur Berücksichtigung des Klimawandels in der Risikokarte des Kantons Zürich	9
4	Quantifizierung des Einflusses des Klimawandels auf die Hochwasserabflüsse im Kanton Zürich	11
4.1	Untersuchungsperimeter.....	11
4.2	Simulierte Zeitperioden.....	12
4.3	Bemessungsniederschläge	12
4.4	Niederschlag-Abflussmodellierung mit Qsim	12
4.5	Ergebnisse	14
4.5.1	Bemessungsniederschläge	14
4.5.2	Unsicherheiten der Niederschlagsextremwerte	15
4.5.3	Vorfeuchtebedingungen.....	16
4.5.4	Fallbeispiel Haselbach.....	18
4.5.5	Fallbeispiel Altbach.....	21
4.5.6	Fallbeispiel Furtbach	24
4.5.7	Synthese aus den Fallbeispielen	27
4.6	Vergleich der Ergebnisse von geo7 und WSL.....	27
4.6.1	Veränderung der Starkniederschläge	28
4.6.2	Veränderung der Hochwasserabflüsse	29
4.6.3	Veränderung der Jährlichkeit von Hochwasserabflüssen.....	29
4.6.4	Einordnung der Unterschiede und Vergleich mit anderen Studien	32
5	Empfehlungen für die Weiterverwendung der Ergebnisse	34
6	Zusammenfassung	36
7	Referenzierte Dokumente	39

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Ausgangslage

Aktuelle Klimamodelle sagen eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur und der Maxima bis Mitte bzw. Ende dieses Jahrhunderts für die Schweiz voraus (NCCS, 2018). Die Folge werden u.a. häufigere und intensivere Starkniederschläge in den nächsten Jahrzehnten sein. Eine Entwicklung in diese Richtung können wir bereits heute beobachten (Bauer, Scherrer, 2024).

Häufigere und intensivere Starkniederschläge und Hochwasser haben einen Einfluss auf das Risiko von Personen und Sachwerten. Diese Risiken werden für heutige klimatische Bedingungen im Kanton Zürich als Karte dargestellt. Die aktuelle Risikokarte für Hochwasser unter den heutigen klimatischen Bedingungen wurde 2014 erstellt und 2017 aktualisiert. 2026 soll sie überarbeitet werden.

Mit der Revision der Risikokarte soll der veränderten Gefährdung durch den projizierten Klimawandel Rechnung getragen werden. Aktuell fehlen aber die nötigen hydrologischen Grundlagen und die methodischen Konzepte zur Berücksichtigung des Klimawandels in der Risikokarte für Mitte und Ende des Jahrhunderts.

Forschungsprogramm

Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich hat 2023 das Forschungsprogramm «Klimawandel und Risikoanalyse» lanciert, in welchem in der Projektphase 1A Grundlagen zum Klimawandel erarbeitet wurden (siehe Abbildung 1).

Das Projekt wurde durch das geowissenschaftliche Büro geo7 und die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) bearbeitet. Von geo7 wurden im Projektteil 1A Vorabklärungen zum Klimawandel und zur Hydrologie im Kanton Zürich durchgeführt und in einem Bericht veröffentlicht (Rinderer & Berger, 2024). Die WSL führte Simulationen in meso-skaligen Einzugsgebieten im Kanton Zürich durch und wertete Vorereignisniederschläge und Vorfeuchtebedingungen und deren Veränderung bis Ende des Jahrhunderts aus.

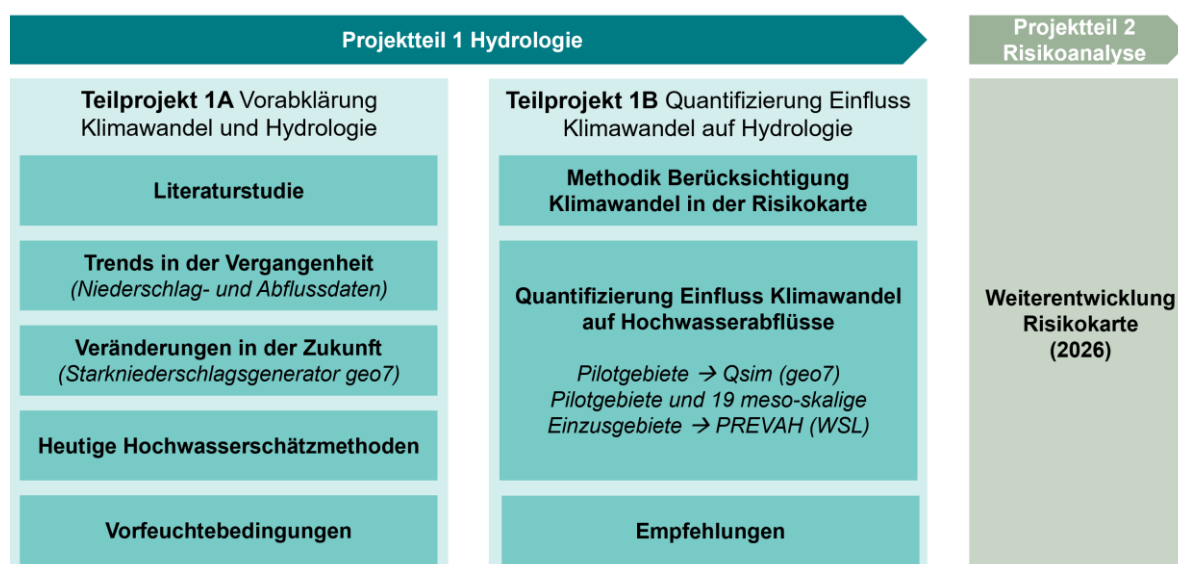


Abbildung 1: Vorgehenskonzept des Forschungsprogramms Klimawandel und Risikoanalyse. Die in diesem Bericht präsentierten Inhalte decken das Teilprojekt 1B ab.

Zielsetzung Projektteil 1B

Die Quantifizierung des Einflusses des Klimawandels auf die Hydrologie im Kanton Zürich steht in diesem Projektteil im Zentrum.

Für geo7 lag der Fokus auf drei kleinen Pilotgebieten ($< 20 \text{ km}^2$), während die WSL zusätzlich zu den drei Pilotgebieten 19 meso-skalige Einzugsgebiete ($> 20 \text{ km}^2$) betrachtet hat. Die Ergebnisse der WSL liegen seit Sommer 2024 in Form eines separaten Berichts vor (Lustenberger & Zappa, 2024).

Der hier präsentierte Bericht fasst die Inhalte und Ergebnisse von geo7 aus dem Projektteil 1B zusammen und vergleicht die Ergebnisse von geo7 und WSL. Am Ende wird eine Empfehlung für die Verwendung der Resultate dieses Projekts einerseits in der Risikokarte des Kantons Zürich aber auch für andere Anwendungen wie zum Beispiel der Gefahrenbeurteilung formuliert.

Ausblick

Im Projektteil 2 sollen ab 2026 durch die Egli Engineering AG die in den Projektteilen 1A und 1B erarbeiteten Resultate bei der Umsetzung der Risikokarte angewendet werden (siehe Abbildung 1).

2 Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Projektteil 1A

Um die Inhalte des vorliegenden Berichts in den Kontext zu setzen, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse aus dem Projektteil 1A «Vorabklärung Klimawandel und Hydrologie» zusammengefasst. Für ausführliche Informationen zum Projektteil 1A siehe Rinderer & Berger (2024).

Vorgehen

- In einer Literaturstudie wurden Informationen zum heutigen Wissensstand in Bezug auf Starkniederschläge und Klimawandel in der Schweiz und dem Kanton Zürich zusammengetragen.
- Trendanalysen basierend auf Messdaten der Vergangenheit wurden an geeigneten Niederschlags- und Abflussstationen im Kanton Zürich und benachbarten Gebieten durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf kleinen Einzugsgebieten < 20 km² mit zeitlich hochauflösenden Messungen.
- Mit Fokus auf die Zukunft und mit einem von geo7 entwickelten Starkniederschlagsgenerator wurden Projektionen für Starkniederschläge mit stündlicher Auflösung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts durchgeführt.
- In Faktenblättern wurden die Schätzmethode, welche heute in der Praxis zur Abschätzung von Hochwasserspitzen verwendet werden, übersichtlich beschrieben und ein Leitfaden zur nachvollziehbaren Bestimmung erarbeitet.

Erkenntnisse

Niederschlag

- Die Untersuchungen und Analysen zeigten, dass die Starkniederschläge in der Schweiz und im Kanton Zürich in den vergangenen Jahrzehnten häufiger und intensiver geworden sind.
- Sowohl die Klimaszenarien der Schweiz (CH2018) als auch eigene Auswertungen deuten darauf hin, dass die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen auch in Zukunft weiter steigen werden.
- Eine Fortschreibung von Niederschlagstrends aus der Vergangenheit in die Zukunft wurde aber als nicht zuverlässig identifiziert. Besser ist es, die Veränderungen aus Klimamodellen abzuleiten. Für Tagesdaten stehen hierfür die Klimaszenarien der Schweiz CH2018 (NCCS, 2018) zur Verfügung.
- Für kurzzeitige Starkniederschläge von wenigen Stunden existiert in der Schweiz noch kein Datensatz, der eine zuverlässige Ableitung von seltenen Starkniederschlägen ermöglichen würde. Es wurden zwar jüngst Klimaprojektionen mit Stundenauflösung veröffentlicht (z.B. Michel et al, 2021), jedoch raten die Autoren dieser Arbeit davon ab, diese Zeitreihen extremwertstatistisch auszuwerten.
- Im Projektteil 1A hat geo7 einen selbstentwickelten, auf Starkniederschläge getrimmten Wettergenerator eingesetzt, welcher an ausgewählten Meteo-Stationen seltene Extremereignisse bis Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts projiziert.

Hochwasser

Weiter wurde die Veränderung der Häufigkeit und Intensität von Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten $< 20 \text{ km}^2$ untersucht.

- Eindeutige Trends basierend auf Stundendaten waren statistisch nicht festzustellen und somit war eine Extrapolation von Trends in die Zukunft keine probable Methode, um Prognosen für die Zukunft zu erstellen.
- Auf der einen Seite sind hochaufgelöste Messungen von Hochwassern selten und die Messzeitreihen meist zu kurz, um aussagekräftige Extremwerte und Trends zu ermitteln. Auf der anderen Seite spielt bei der Hochwasserentstehung das komplexe Wechselspiel zwischen Starkniederschlägen und Vorgeuchtebedingungen eine wesentliche Rolle für die Hochwassermagnitude. Beide Komponenten werden sich mit fortschreitendem Klimawandel verändern.
- Eine Analyse der heute in der Praxis häufig angewendeten Methoden zeigte, dass ein Grossteil der Schätzmethoden weder den Niederschlag noch die Vorgeuchtebedingungen berücksichtigt.
- **Daraus resultiert, dass die meisten heute gebräuchlichen Schätzmethoden nicht in der Lage sind, Veränderungen durch den Klimawandel zu berücksichtigen.**
- Für die Weiterführung des Forschungsprogramms wurde daher die Verwendung von Niederschlag-Abflussmodellen empfohlen, welche mehr oder weniger detailliert die komplexen Zusammenhänge abbilden (Rinderer & Berger, 2024).

3 Methodik zur Berücksichtigung des Klimawandels in der Risikokarte des Kantons Zürich

Die Risikokarte Hochwasser für den Kanton Zürich wurde von der Egli Engineering AG erarbeitet und 2014 vom AWEL und der Kantonalen Gebäudeversicherung (GVZ) veröffentlicht. 2017 wurde sie revidiert. Diese Version ist derzeit auf dem Geoportal des Kantons Zürich abrufbar (www.geo.zh.ch).

Die **Risikokarte stellt den Verschnitt aus Gefährdung und Schadenpotential** dar. Als strategisches Instrument für die Planung muss sie angepasst werden, wenn sich die Rahmenbedingungen ändern (AWEL, 2014). Der Einfluss des Klimawandels verändert die Gefährdung entscheidend. Auch das Schadenpotential hat sich verändert. Dies soll in der revidierten Risikokarte berücksichtigt werden.

Zwei verschiedene Methoden der Risikoberechnung wurden diskutiert und stehen zur Auswahl:

Methode 1:

Ermittlung des veränderten Wiederkehrswert bei gleicher Wiederkehrperiode

- Die **Wiederkehrswerte für vordefinierte Wiederkehrperioden** (z.B. 30, 100, 300 Jahre) werden unter zukünftig veränderten Klimabedingungen ermittelt. Sie bilden die neuen Szenarien für die weitere Beurteilung.
- Die veränderten Szenarien wirken sich sowohl auf die Schwachstellenanalyse als auch auf die Wirkungsanalyse aus.
- Will man den Klimawandel berücksichtigen, müssen mit dieser Methode die Gefährdungsräume neu berechnet werden.

Methode 2:

Ermittlung der veränderten Wiederkehrperiode bei gleichem Wiederkehrswert

- Die **Veränderung der Wiederkehrperioden werden für die heute gültigen Wiederkehrswerte** (HQ30, HQ100, HQ300) unter Berücksichtigung des Klimawandels ermittelt (Abbildung 2).
- Dabei werden die heute aktuellen Wirkungsbereiche beibehalten (siehe Abbildung 3).
- Bei dieser Methode wird berücksichtigt, dass die Hochwassersituation in Zukunft häufiger oder seltener auftreten wird (Beispiel: Das heutige HQ100 wird in der Zukunft z.B. ein HQ50).
- Aufgrund der gleichbleibenden Wirkungsbereiche wird jedoch vernachlässigt, dass durch höhere Szenarienwerte von zusätzlichen Wirkungsbereichen auszugehen ist. Entsprechend könnten in Zukunft Gebäude von Hochwasser betroffen sein, welche heute noch ausserhalb des Gefahrengebiets liegen. Dies muss bei der Interpretation der überarbeiteten Risikokarte berücksichtigt werden.
- Ebenso ist abzuklären, wie mit einem veränderten Schadenpotential umgegangen wird oder ob der Fokus in der Risikokarte auf der veränderten Gefährdung liegt.

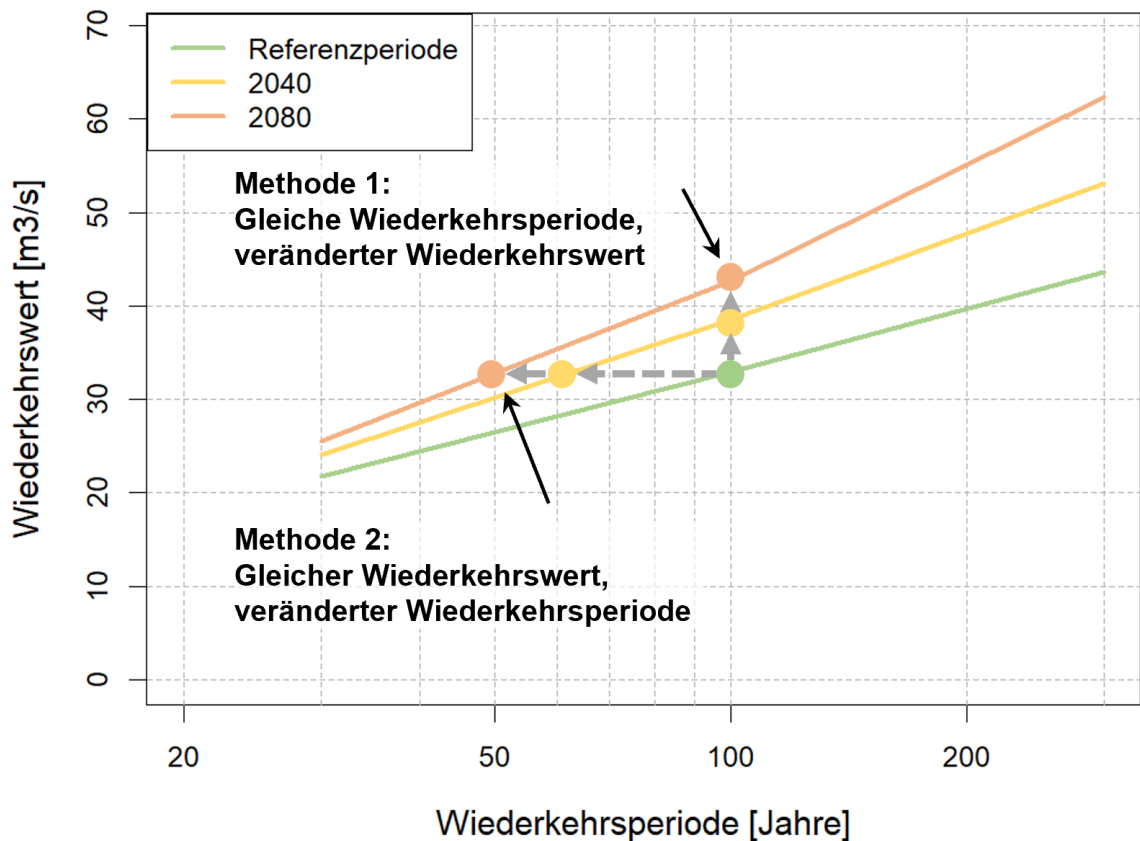


Abbildung 2: Zwei Methoden zur Berücksichtigung des Klimawandels bei Hochwasser.
Methode 1: Ermittlung des veränderten Wiederkehrswerts bei gleicher Wiederkehrperiode,
Methode 2: Ermittlung der veränderten Wiederkehrperiode bei gleichem Wiederkehrswert.

Jahr / HQ	30	100	300	EHQ?
2050	20	50	130	300
2100	19	45	100	200

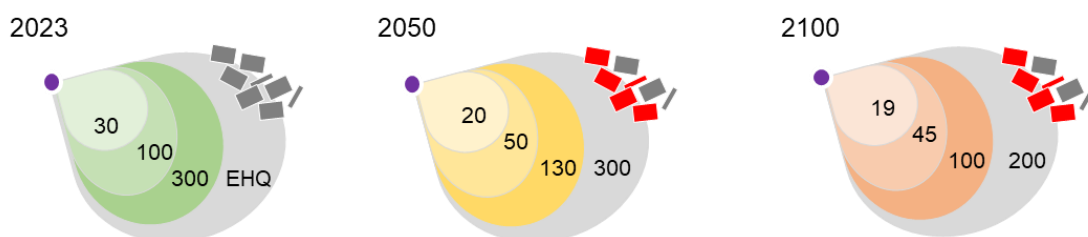


Abbildung 3: Veränderung der Jährlichkeit heutiger Wirkungsbereiche. Annahme: Das Schadenpotential und die Ausdehnung der Wirkungsbereiche bleiben unverändert.

Umsetzung in der Risikokarte

Für die Revision der Risikokarte des Kantons Zürich schlagen wir die Verwendung der Methode 2 vor. Allerdings kann diese nicht angewendet werden, ohne die Veränderung der Intensitäts-Frequenzkurve für Mitte und Ende des Jahrhunderts zu kennen (siehe Abbildung 2).

Um diese Veränderung zu quantifizieren sind zumindest für repräsentative Einzugsgebiete Simulationen der Hochwasser unter zukünftig veränderten Bedingungen mit der Methode 1 nötig. Diese Simulationen bilden die Stützpunkte der neuen (verschobenen) Intensitäts-Frequenzkurven für Mitte und Ende des Jahrhunderts (siehe Abbildung 2). Aus diesen kann dann die Veränderungen der Jährlichkeiten heutiger Hochwasser ermittelt werden.

4 Quantifizierung des Einflusses des Klimawandels auf die Hochwasserabflüsse im Kanton Zürich

Inhalt der folgenden Kapitel

Im folgenden Kapitel wird auf die Methodik eingegangen, die geo7 für die Berücksichtigung des Klimawandels in kleinen Einzugsgebieten basierend auf dem hydrologischen Modell Qsim entwickelt hat. Im Kapitel 4.2 wird das Niederschlag-Abflussmodell Qsim von geo7 beschrieben, dann folgen im Kapitel 4.5 die Ergebnisse der simulierten Hochwasser. Im Kapitel 4.6 werden die Ergebnisse von geo7 mit jenen der WSL verglichen, die das Wasserhaushaltsmodell PREVAH verwendet hat. Für eine Beschreibung der Methodik der WSL wird auf den eigenständigen Schlussbericht der WSL (Lustenberger & Zappa, 2024) verwiesen.

4.1 Untersuchungsperimeter

Für die Bearbeitung der Fragestellung wurden drei repräsentative Pilotgebiete mit einer Fläche zwischen 10 und 40 km² ausgewählt, welche räumlich über den Kanton Zürich verteilt sind. Die drei Pilotgebiete sind:

- Haselbach (9.6 km²)
- Altbach (13.0 km²)
- Furtbach (39.1 km²)

Im Bericht zum Projektteil 1A (Rinderer & Berger, 2024) sind die Auswahlkriterien dieser Pilotgebiete beschrieben und begründet.

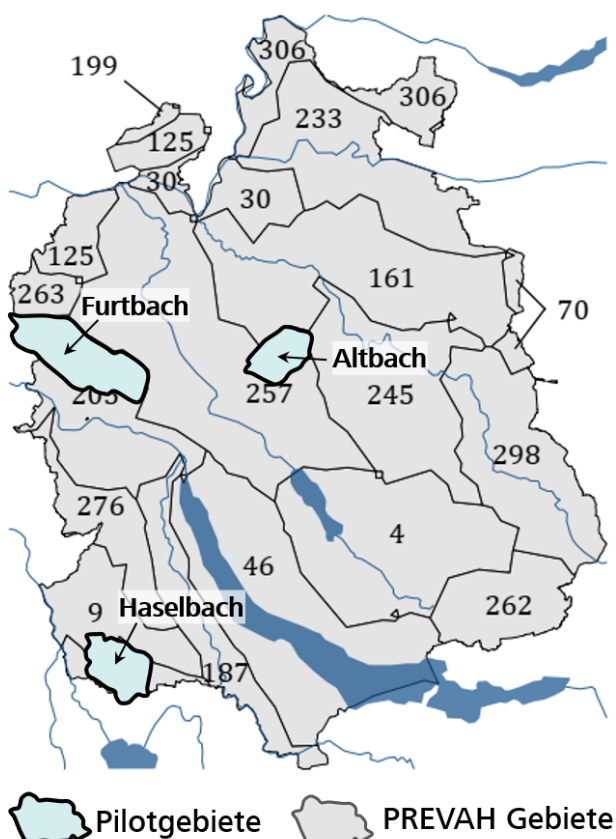


Abbildung 4: Skizze der mit Qsim und PREVAH bearbeiteten Pilotgebiete (Altbach, Haselbach und Furtbach) und der 19 meso-skalierten Gebiete, welche nur mit PREVAH bearbeitet wurden (siehe Lustenberger & Zappa, 2024).

4.2 Simulierte Zeitperioden

Mit ausgewählten **Klimaketten aus dem CH2018** (NCCS, 2018) für das eher pessimistische Emissionsszenario RCP 8.5 wurden Simulationen mit Qsim und PREVAH für die **Periode REF, 2040 und 2080** durchgeführt. Dabei bezeichnet die Periode REF die Referenzperiode mit der Zeitspanne von 1981 bis 2020, die Periode 2040 die Zeitspanne von 2021 bis 2060 und die Periode 2080 die Zeitspanne von 2061 bis 2100.

Diese Einteilung der Perioden (REF, 2040, 2080) wurde so gewählt, dass jeweils 40-Jahre an Daten ohne zeitliche Überlappung für die Auswertung zur Verfügung standen. Mit den in CH2018 verwendeten 30-Jahre langen und sich teilweise überlappenden Perioden sind extremwertstatistische Auswertungen schwieriger und ungenauer (für mehr Informationen siehe Rinderer & Berger, 2024).

4.3 Bemessungsniederschläge

Als Bemessungsniederschläge für die Periode REF wurden Gebietsniederschläge anhand der Angaben zu den **«Extremen Punktniederschlägen» im neuen Hydrologischen Atlas der Schweiz** (HADES, 2023) berechnet. Derzeit beinhaltet der HADES Niederschlagsraster mit einer Auflösung von 2 x 2 km für die Dauerstufen 1 h und 24 h. geo7 hat weitere Dauerstufen zwischen 2 h und 24 h interpoliert. Für die Periode 2040 und 2080 standen zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Projekts keine Informationen zu kurzzeitigen Starkniederschlägen zur Verfügung.

Daher hat geo7 im Projektteil 1A mit einem **Starkniederschlagsgenerator** an ausgewählten Stationen die Veränderung für den 30- 100- und 300-jährlichen Niederschlag und Dauerstufen von 1 bis 6 h ermittelt (für technische Details zum Starkniederschlagsgenerator siehe Bericht Projektteil 1A (Rinderer & Berger, 2024).

Die Bemessungsniederschläge für REF, 2040 und 2080 wurden jeweils mit einem von der **Einzugsgebietsfläche abhängigen Korrekturfaktor** verrechnet. Diese Korrektur trägt der Sache Rechnung, dass die Angaben im HADES extreme Punktniederschläge darstellen und diese Werte ohne diese Korrektur nicht auf ganze Einzugsgebiete übertragen werden dürfen. Die entsprechende Methodik zur Korrektur der Niederschläge wurden dem HADES (1992) entnommen.

4.4 Niederschlag-Abflussmodellierung mit Qsim

Modellkonzept

Für die Untersuchung der Veränderung von Hochwasserabflüssen in den drei Pilotgebieten wurde das hydrologische Niederschlag-Abflussmodell Qsim von geo7 verwendet.

Es handelt sich um ein konzeptionelles, ereignisbasiertes Modell, das unter unterschiedlichen Bemessungsniederschlägen und Vorfeuchteszenarien die Abflussbildung und die Abflusskonzentration räumlich und zeitlich differenziert abbilden kann.

Das Modell Qsim liefert Reinwasser-Abflussganglinien ohne Berücksichtigung von Geschiebe oder Schwemmholz. Die simulierten Abflüsse verstehen sich als Brutto-Abflüsse ohne Berücksichtigung etwaiger Ausuferung. Die Retentionswirkung von Seen und Stauanlagen kann berücksichtigt werden.

Hydropunkte

Zu Beginn werden hydrologische Berechnungsknoten entlang des Gerinnenetzes, sogenannte Hydropunkte, definiert, an welchen die Hochwasserganglinien berechnet werden sollen. Hydropunkte werden in der Regel z.B. an Brücken und Durchlässen, bei natürlichen Seen und bei Hochwasserrückhaltebecken sowie an Mündungspunkten zweier oder mehrerer Gerinne bestimmt. Prinzipiell ist an jedem Punkt des Gerinnenetzes ein Hydropunkt möglich.

Abflusskonzentration

Für die Simulation der Abflusskonzentration wurde ein Isochronenansatz verwendet. Basierend auf dem digitalen Geländemodell (DGM) wurden die Fliesswege des abfliessenden Wassers an der Landoberfläche ermittelt und eine dazugehörige, mittlere Fliessgeschwindigkeit für jedes Pixel mit dem Ansatz von Maidment et al. (1996) berechnet. Dieser berücksichtigt die beitragende Fläche und die Geländeneigung entlang des Fliesswegs. Das Fehlen von flächendeckenden Querprofilaten entlang der meisten Bäche und der numerische Rechenaufwand machten es nicht möglich, die Fliessprozesse hydraulisch zu rechnen. Die Verformung der Hochwasserganglinie durch die Gerinneretention wird jedoch mittels eines Linearspeicheransatzes konzeptionell berücksichtigt.

Abflussbildung

Die Abflussbildung im Niederschlag-Abflussmodell Qsim basiert auf dem Abflussbeiwertverfahren, wobei die im Projekt verwendete Modellversion mit zeitlich variablen Abflussbeiwerten rechnet.

Im Zentrum dieses Ansatzes steht die Abflussprozesskarte des Kantons Zürich. Sie wurde basierend auf der Bodenkarte 1:5'000 des Kantons Zürich mittels eines Ansatzes von Naef et al. (2007) abgeleitet. Die Abflussprozesse wurden in fünf Abflusstypen eingeteilt, welche sich in der Magnitude und der zeitlichen Verzögerung der Abflussreaktion von Einzugsgebietsflächen unterscheiden. Grundlage für die Abflusstypen sind Beregnungsversuche auf Flächen im Schweizer Mittelland (Scherrer, 1997).

Der Abflussbeiwert ist jener Anteil des einfallenden Niederschlags, der relativ rasch und oberflächennah abfließt und massgebend zur Hochwasserspitze beiträgt. Versuche haben gezeigt, dass der Abflussbeiwert mit der Summe des gefallenen Niederschlags anwächst.

Im Forschungsprogramm Klimawandel und Risikoanalyse wurde der Abflussbeiwert zu Beginn eines Niederschlagsereignisses (Startwert) durch Kalibrierung an repräsentativen Hochwasserereignissen für jeden Abflusstyp einzugsgebietsspezifisch bestimmt. Der Startwert war für das HQ30 in der Regel geringer als für HQ100 und HQ300.

Vorfeuchte

Das Konzept der zeitlich variablen Abflussbeiwerte ermöglicht auch die Berücksichtigung von unterschiedlichen Vorfeuchtebedingungen. Für trockenere Vorfeuchtebedingungen wurde ein geringerer Startwert für die Abflussbeiwerte der Abflusstypen gewählt, für feuchtere Vorbedingungen höhere Startwerte.

Um wieviel der Startwert für trockenere bzw. feuchtere Vorbedingungen im Vergleich zum kalibrierten Startwert im jeweiligen Einzugsgebiet zu verändert war, wurde von der WSL mittels des Wasserhaushaltsmodells PREVAH ermittelt. PREVAH simuliert u.a. verschiedene Bodenspeicherkomponenten. Der Speicherinhalt für den oberen ungesättigten Bodenspeicher (SUZ) kann auch als Bodenfeuchte interpretiert werden.

Für jede der drei Perioden wurde das 25 %-, 50 %- und 75 %-Perzentil (im Folgenden als Q25, Q50, Q75 bezeichnet) des oberen Bodenspeichers (SUZ) ausgewertet. Das Q25 bzw. Q75 in der Periode REF beschreibt überdurchschnittlich trockene bzw. überdurchschnittlich feuchte Vorbedingungen unter den heutigen klimatischen Bedingungen. Die entsprechenden Werte für 2040 und 2080 beschreiben die Veränderung von überdurchschnittlich trockenen bzw. feuchten Vorbedingungen Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts.

Hochwasserganglinien

Die Bemessungsniederschläge und Vorfeuchteszenarien wurden als Eingangsdaten an das Modell Qsim übergeben und verschiedene Abflussganglinien unterschiedlicher Dauer und Jährlichkeit berechnet. Es wurden Simulationen mit den Q25, Q50 und Q75 der Vorfeuchte für 30-, 100- und 300-jährliche Starkniederschläge für die Perioden REF, 2040 und 2080 durchgeführt.

Bei den Niederschlägen wurde immer der Median (Q50) der Extremwertstatistik als Input berücksichtigt.

Grundsätzlich wären analog zu den Vorfeuchtebedingungen auch Szenariensimulationen mit dem Q25 und Q75 der Niederschläge denkbar, jedoch sind die Unsicherheiten so gross, dass kaum praxisrelevante Ergebnisse zu erwarten sind. Der Fokus lag daher auf der Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Wichtig ist, dass die Unsicherheiten der Bemessungsniederschläge bei der Interpretation der Ergebnisse nicht in Vergessenheit geraten.

4.5 Ergebnisse

4.5.1 Bemessungsniederschläge

In der Tabelle 1 sind die massgebenden Gebietsniederschläge für die drei Pilotgebiete Haselbach, Altbach und Furtbach aufgelistet. Da in kleinen Einzugsgebieten typischerweise sommerliche Starkniederschläge zu den grössten Hochwasserspitzen führen, wurden Szenarien mit kurzer Niederschlagsdauer betrachtet. Im **Haselbach führt das 3 h-Ereignis, im Altbach das 2 h-Ereignis und im Furtbach das 6 h-Ereignis zur grössten Hochwasserspitze.**

Andere Dauerstufen wurden zu Beginn des Projekts ebenfalls berücksichtigt, jedoch wurden die Szenarienvarianten mit den trockenen und feuchten Vorbedingungen nur noch für die massgebende Dauerstufe berechnet.

Für den Haselbach wurden die Veränderung der Starkniederschläge mit dem Starkniederschlagsgenerator von geo7 basierend auf den Klimaketten für die Station Wädenswil ermittelt; für den Altbach und den Furtbach basierend auf den Klimaketten der Station Kloten. Aus diesem Grund sind die Veränderungen der Starkniederschläge für den Altbach und den Furtbach identisch. Durch die Unterschiede in den HADES Daten für jedes Gebiet und der massgebenden Dauer ergeben sich jedoch in allen drei Gebieten Unterschiede in den absoluten Niederschlägen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Starkniederschläge der Jährlichkeit 30-, 100-, und 300-Jahre für die jeweilig massgebenden Dauerstufen, die zur höchsten Hochwasserspitze im Haselbach, Altbach bzw. Furtbach führen.

	Haselbach		Altbach		Furtbach	
	Median (3 h-Dauer) [mm]	Veränderung [%]	Median (2 h-Dauer) [mm]	Veränderung [%]	Median (6 h-Dauer) [mm]	Veränderung [%]
30J						
HADES neu	70		61		71	
HADES 2040	78	12	66	9	77	9
HADES 2080	85	21	71	17	83	17
100J						
HADES neu	90		79		91	
HADES 2040	94	4	89	13	103	13
HADES 2080	111	23	98	24	113	24
300J						
HADES neu	112		98		112	
HADES 2040	110	-2	114	16	130	16
HADES 2080	143	28	129	32	148	32

Alle simulierten Veränderungen der Starkniederschläge sind positiv, ausser die Veränderung des 300-jährlichen Starkniederschlags bis 2040 im Haselbach. Dies ist ein Artefakt der extremwertstatistischen Auswertung an der Station Wädenswil und daher wenig vertrauenswürdig. Der Werte ist zudem nahe null.

4.5.2 Unsicherheiten der Niederschlagsextremwerte

Im Projekt wurde die Referenzperiode mit dem Median der Extremwerte aus dem neuen HADES (2023) gerechnet. Für die Zukunft wurden die Mediane der projizierten Veränderungen aus dem Starkniederschlagsgenerator verwendet und auf die Werte aus der Periode REF aufgeschlagen.

Grundsätzlich sind extremwertstatistische Auswertungen immer grossen Unsicherheiten unterworfen, besonders wenn sie in die Zukunft projiziert werden. Der Einfluss der Unsicherheiten der Niederschläge auf die Hochwasserabflüsse wurde in dieser Studie nicht explizit anhand Szenariensimulationen untersucht. Um jedoch die Bedeutung der Unsicherheiten der Starkniederschläge zu betonen, wird im Folgenden allgemein etwas näher darauf eingegangen.

Für die 100-jährlichen 1 h-Starkniederschläge im Sommer aus dem neuen HADES (2023), welche als Ausgangswerte für die Simulationen in der Referenzperiode verwendet wurden, sind für den Kanton Zürich Unsicherheiten von 0.5 bis 1 angegeben (siehe Abbildung 17 im Anhang)).

Als Mass für diese Unsicherheiten wird der Quotient aus dem 90 %-Perzentil und dem Median des 100-jährlichen 1 h-Starkniederschlags herangezogen (MeteoSchweiz, 2022). Dies bedeutet, dass man **grundsätzlich auch mit + 50 % bis + 100 % höheren Starkniederschlagswerten als dem verwendeten Medianwerten rechnen muss, wenn man in 90 % der Fälle die Intensität eines Starkniederschlags nicht unterschätzen will.**

Für die 30-jährlichen 1 h-Starkniederschläge sind die Unsicherheiten zwischen 0.5 und 0.7; für die 300-jährlichen 1 h-Starkniederschläge bei mehrheitlich 0.7 bis 1 (für entsprechende Karten siehe Anhang).

Die für die Zukunft projizierten Starkniederschläge sind noch grösseren Unsicherheiten unterworfen. Zu den Unsicherheiten der Extremwertstatistik, wie sie für die HADES Daten beschrieben sind, kommen zusätzlich die Unsicherheiten der Klimaprojektionen und des Starkniederschlagsgenerators hinzu.

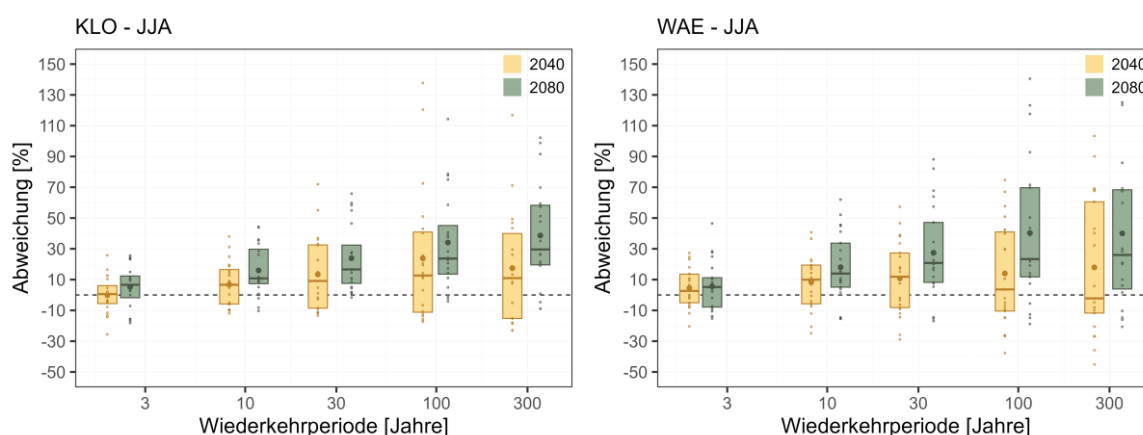


Abbildung 5: Veränderung der Intensität von sommerlichen 1 h Starkniederschlägen mit einer Jährlichkeit von 2, 10, 30, 100 und 300 Jahren an der Station Kloten (links) und Wädenswil (rechts) projiziert mit dem Starkniederschlagsgenerator von geo7 für Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts (für weitere Details siehe Text).

Dies ist für die Auswertungen an der Station Kloten exemplarisch illustriert (Abbildung 5). Für das 100-jährliche 1 h-Starkniederschlagsereignis liefern einzelne Klimaketten (dargestellt als kleine Punkte) eine Bandbreite von Veränderungen bis Mitte des Jahrhunderts von - 18 % und + 140 % und bis Ende des Jahrhunderts von - 5 % bis + 115 %. Für die 2-, 10-, und 30-

jährlichen Ereignisse ist die Bandbreite geringer, für das 300-jährliche Ereignis noch etwas grösser. Die Mittelwerte aller Klimaketten sind als grosse Punkte und die Medianwerte, mit denen in dieser Studie gerechnet wurde, sind als fette horizontale Linien dargestellt.

Rechnet man nun ähnlich wie bei den HADES Daten für die Perioden REF den Quotienten aus dem 90 %-Perzentil und dem Median der projizierte Starkniederschläge als ein Mass für die Unsicherheit, so ergeben sich für die 100-jährlichen 1 h-Starkniederschläge an der Station Kloten Unsicherheitswerte von ca. 2.0 für 2040 und ca. 1.5 für 2080.

Dies bedeutet, dass man grundsätzlich mit 200 % bzw. 150 % höheren Starkniederschlagswerten als den verwendeten Medianwerten rechnen muss, wenn man in 90 % der Fälle die Intensität eines Starkniederschlags Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts nicht unterschätzen will. Es ist immer zu prüfen, ob die resultierenden Niederschlagsintensitäten noch physikalisch plausibel sind.

Der Grund dafür, dass der Unsicherheitswert für Mitte des Jahrhunderts grösser als für Ende des Jahrhunderts ist, liegt in der grösseren Streuung der Klimamodelle für Mitte des Jahrhunderts. In anderen Worten: Ende des Jahrhunderts sind sich die Klimamodelle einiger über die projizierte Veränderung als für Mitte des Jahrhunderts.

Auswertungen bezüglich der Unsicherheit projizierter Starkniederschläge für andere Jährlichkeiten und andere geeignete Stationen im Kanton Zürich sind in Tabellenform im Anhang gezeigt.

4.5.3 Vorfeuchtebedingungen

Eine zweite Randbedingung für hydrologische Simulationen sind die Vorfeuchtebedingungen. Diese werden in der Praxis bis anhin selten bis gar nicht spezifisch abgeklärt oder variiert. In der Regel geht man von ungünstigen und damit feuchten Vorbedingungen aus.

Das Zusammenspiel aus in Zukunft tendenziell stärkeren Niederschlägen bei tendenziell trockeneren Vorfeuchtebedingungen wirft die Frage auf, ob sich die Hochwasser überhaupt in Zukunft stark verändern werden.

Da diese Frage auch in der wissenschaftlichen Literatur noch vergleichsweise wenig behandelt wurde (z.B. Brunner et al., 2021), wurden im Projekt explizite Szenariensimulationen mit Niederschlag-Vorfeuchtekombinationen durchgeführt.

In Tabelle 2 sind die von der WSL mit dem Modell PREVAH simulierte Veränderungen der Bodenfeuchte tabellarisch zusammengestellt. Dabei bezeichnen die Werte in den Spalten Q25, Q50 und Q75 die Differenz in [mm] des 25 %, 50 % und 75 % Quantils der Bodenfeuchte aller Klimaketten relativ zum Q50 der Perioden REF, also dem heutigen Median der Bodenfeuchte. Die Auswertungen wurden für die Perioden REF, 2040 und 2080 durchgeführt. Für mehr Details siehe Lustenberger & Zappa (2024).

Zu erkennen ist, dass es **innerhalb des Kantons Zürich regionale Unterschiede** gibt, wie sich die Vorfeuchte bis Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts verändern wird. Während sich die mittleren Vorfeuchteverhältnisse (Q50) in den drei Gebieten eher wenig unterscheiden, verändern sich im südöstlich gelegenen Haselbach v.a. die überdurchschnittlich trockenen Vorbedingungen stark, während sich in den etwas nördlicher gelegenen Pilotgebieten Altbach und Furtbach v.a. die überdurchschnittlich feuchten Vorbedingungen stark ändern (siehe Tabelle 2). Für das Ende des Jahrhunderts sind die Änderungen der überdurchschnittlich trockenen Vorbedingungen in allen drei Gebieten gross.

Tabelle 2: Veränderung der Bodenfeuchte in [mm] zwischen dem Q50 REF und dem Q25, Q50, Q75 für REF, 2040 und 2080 für die drei Pilotgebiete simuliert mit PREVAH. Negative Veränderungen drücken aus, dass die Bodenfeuchte trockener und positive Veränderungen, dass die Bodenfeuchte feuchter sein wird im Vergleich zum Q50 REF (Lustenberger & Zappa (2024).

Einzugs- gebiet	Veränderung der Bodenfeuchte zwischen dem Q50 REF und dem Q25, Q50, Q75 [mm]			Veränderung der Bodenfeuchte zwischen dem Q50 REF und dem Q25, Q50, Q74 [mm]			Veränderung der Bodenfeuchte zwischen dem Q50 REF und dem Q25, Q50, Q75 [mm]		
	REF			2040			2080		
	Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75
Haselbach	-21	0	11	-27	-4	10	-33	-5	10
Altbach	-6	0	22	-11	-3	20	-42	-11	20
Furtbach	-9	0	22	-11	-1	21	-31	-5	21

Die Resultate der Abflusssimulationen der verschiedenen Szenarien unter Verwendung der entsprechenden Niederschlagswerte sowie der unterschiedlichen Vorfeuchte-Szenarien werden nun anhand der drei Pilotgebiete vorgestellt und diskutiert.

4.5.4 Fallbeispiel Haselbach

Der Haselbach liegt ca. 20 km südwestlich von Zürich im äussersten Südwesten des Kantons. Das Einzugsgebiet umfasst eine **Fläche von 9.6 km²** und ist eher langgezogen. Das Gebiet ist vorwiegend durch Grünland geprägt. Der Waldanteil und Siedlungsanteil sind verhältnismässig gering.

Geologie

Das Einzugsgebiet liegt im Bereich der **Oberen Süsswassermolasse**, welche im Gebiet vorwiegend aus Wechsellagen aus Mergel-, Silt- und Sandsteinen besteht. Darüber liegt eine würmeiszeitliche Moränendecke des Reussgletschers (Hantke et al., 1967), welche an der Oberfläche als Hügellandschaft mit dazwischen liegenden Mulden und randglazialen Entwässerungsrinnen ausgeformt ist. In den Senken finden sich drainierte, ehemalige Moore oder Feuchtfächen.

Böden

Im Einzugsgebiet herrschen normal durchlässige, **sandig-lehmige bis siltig-lehmige Braunerden** vor (Scherrer AG, 2015). In den Mulden finden sich vernässte Böden wie zum Beispiel Pseudogley und Gleye. Stauwasserbeeinflusste Böden sind aber eher selten. Auch an steilen Hängen sind die Böden eher mittelgründig. Wasserquellen im Bereich Mettmensstetten deuten darauf hin, dass das Einzugsgebiet tendenzielle durch günstige Versickerungsbedingungen geprägt ist.

Abflusstypen

Die naturräumlichen Eigenschaften spiegeln sich in der **Abflusstypenkarte** wider. Im Einzugsgebiet dominieren Flächen des Abflusstyps 4 und 5 (stark bis sehr stark verzögert beitragend) mit ca. 65 % Flächenanteil, gefolgt vom Abflusstyp 3 (verzögert beitragend) mit ca. 20 % Flächenanteil und Abflusstyp 2 (leicht verzögert beitragend) mit ca. 15 % und Abflusstyp 1 (rasch und stark beitragend) mit ca. 1 % Flächenanteil (Scherrer AG, 2015).

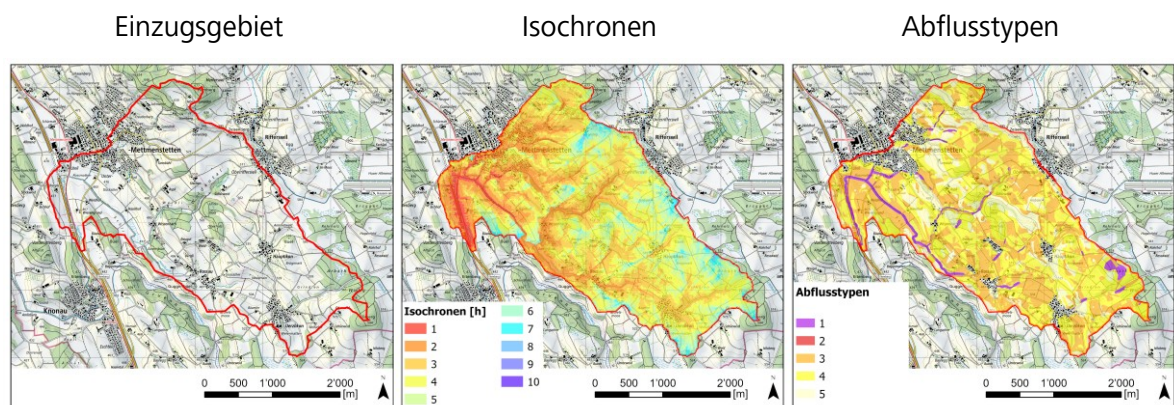


Abbildung 6: Das Pilotgebiet Haselbach mit der Einzugsgebietsgrenze (links), den berechneten Isochronen (Mitte) und der Abflusstypenkarte (rechts) (Grundlagendaten: Swisstopo und Kanton Zürich).

Hochwasserganglinien

In Abbildung 6 sind das Einzugsgebiet des Haselbachs (links), die Isochronen (Mitte) und die Abflusstypenkarte (rechts) dargestellt. Mit diesen und anderen Eingangsgrößen wurden Ganglinien für das HQ30, HQ100 und HQ300 für die Perioden REF, 2040 und 2080 berechnet. Die grössten Hochwasserspitzen wurden bei einer Niederschlagsdauer von 3 h erreicht. Diese Ganglinien sind in Abbildung 7 dargestellt. **Die Linien beschreiben die simulierten Abflüsse unter Berücksichtigung des Q50 der Vorfeuchtebedingungen, die flächig dargestellten Bereiche kennzeichnen die Spanne der Simulationen mit den Q25 und Q75 der Vorfeuchte.** In Tabelle 3 sind die Veränderungen aller berechneter Hochwasserspitzen immer relativ zur Hochwasserspitze heute (REF

mit Q50 der Vorfeuchte) aufgelistet. Die entsprechenden Werte der Hochwasserspitzen sind in Tabelle 7 im Anhang aufgelistet.

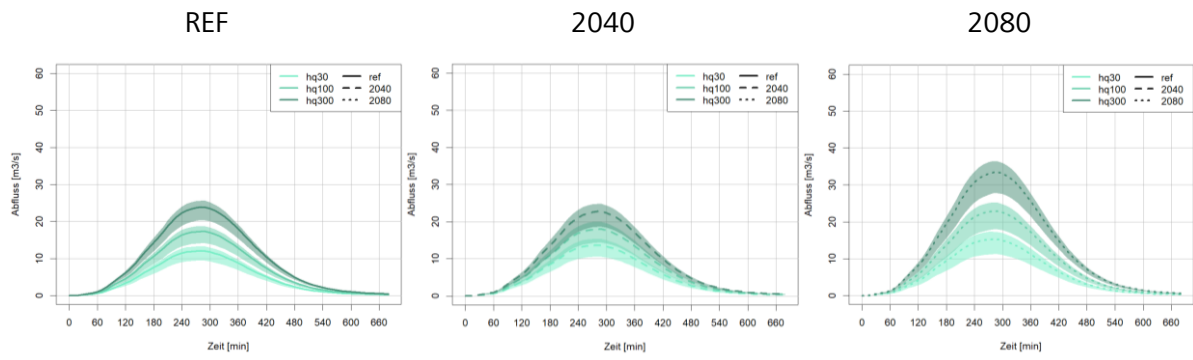


Abbildung 7: Simulierte Hochwasserganglinien für den Haselbach bei Mettmensstetten für das HQ30, HQ100 und HQ300 für die Perioden REF, 2040 und 2080 für die Niederschlagsdauer 3 h. Die Linien beschreiben die simulierten Abflüsse unter Berücksichtigung des Q50 der Vorfeuchtebedingungen, die flächig dargestellten Bereiche kennzeichnen die Spanne der Simulationen mit den Q25 und Q75 der Vorfeuchte.

Hochwasserspitzen unter durchschnittlichen Vorfeuchtebedingungen

Im Fall des Haselbachs verändern sich die simulierten Hochwasserspitzen des HQ100 und HQ300 unter Berücksichtigung einer mittleren Vorfeuchte (Q50) bis Mitte des Jahrhunderts nur wenig (zwischen + 3 % und - 5 %) (siehe Tabelle 3 und Abbildung 7). Wahrscheinlich führen die projizierten Veränderungen der Starkniederschläge bis Mitte des Jahrhunderts an der Station Wädenswil zu diesem Ergebnis. Die Werte werden allerdings als wenig zuverlässig eingeschätzt (siehe Kapitel 4.5.1).

Bis Ende des Jahrhunderts aber sind die Veränderungen der Hochwasserspitzen markant (+ 32 % bzw. + 40 %). Für das HQ30 ist bereits bis Mitte des Jahrhunderts eine deutliche Veränderung der Hochwasserspitzen von + 13 % zu verzeichnen; bis Ende des Jahrhunderts sind + 26 % Zunahme im Vergleich zu heute zu erwarten. **Damit verändern sich die Hochwasserspitzen im Haselbach bis Ende des Jahrhunderts überproportional stark im Vergleich zu den projizierten Veränderungen der Niederschläge** (siehe Tabelle 1).

Hochwasserspitzen unter trockenen/feuchten Vorbedingungen

Die Auswertungen zeigen, dass **unter Annahme von überdurchschnittlich trockenen Vorfeuchtebedingungen** (Q25), die simulierten Hochwasserspitzen **bis Mitte des Jahrhunderts** trotz steigender Starkniederschläge **abnehmen** und **bis Ende des Jahrhunderts** mehr oder weniger **unverändert** zu heute bleiben (siehe Tabelle 3, Abbildung 7).

Unter Annahme von überdurchschnittlich feuchten Vorbedingungen ist bis Mitte des Jahrhunderts mit einer Zunahme der Hochwasserspitzen zu rechnen. Diese Zunahme ist für das HQ30 grösser als für das HQ100 und HQ300 (siehe Tabelle 3, Abbildung 7). Diese Aussage ist jedoch wenig zuverlässig, da die projizierten Niederschläge der Jährlichkeit 100 und 300 für Mitte des Jahrhunderts an der Station Wädenswil zweifelhaft sind.

Bis Ende des Jahrhunderts ist bei überdurchschnittlich feuchten Vorbedingungen für alle Jährlichkeiten mit einer deutlichen Zunahme der Hochwasserspitzen zu rechnen (siehe Tabelle 3 und Abbildung 7). Für diese Periode sind auch die projizierten Niederschläge zuverlässig.

Bandbreite von Hochwasserspitzen

Szenariensimulationen mit unterschiedlicher Vorfeuchte (Q25, Q75) führen im Haselbach zu asymmetrischen Bandbreiten möglicher Hochwasserspitzen (siehe Abbildung 7). Das heisst: **überdurchschnittlich trockene Vorbedingungen (Q25) haben im Haselbach einen grösseren Einfluss auf die simulierten Hochwasserganglinien als überdurchschnittlich feuchte Vorbedingungen (Q75).**

Das ist für die Referenzperiode und auch für die Verhältnisse Mitte und Ende des Jahrhunderts der Fall (siehe Tabelle 3). Dies ist eine direkte Folge der schiefen Verteilung der simulierten Veränderungen der Vorfeuchtebedingungen aus dem PREVAH (Lustenberger & Zappa, 2024). Mit Ausnahme der Szenariensimulationen für Mitte des Jahrhunderts überschneiden sich die Bandbreiten der Simulationen für das HQ30, HQ100 und HQ300 nicht (siehe Abbildung 7).

Tabelle 3: Veränderung der simulierten Hochwasserspitzen für das HQ30, HQ100 und HQ300 für das Pilotgebiet Haselbach – Mettmensstetten für die Perioden REF, 2040 und 2080 für die Niederschlagsdauer 3 h unter Berücksichtigung von Vorfeuchteszenarien Q25, Q50 und sQ75 im Vergleich zu den heutigen Hochwasserspitzen (REF mit Q50 der Vorfeuchte).

Einzugs- gebiet	Periode	Veränderung des HQ30 [%] Relativ zum heute (REF_Q50)			Veränderung des HQ100 [%] Relativ zum heute (REF_Q50)			Veränderung des HQ300 [%] Relativ zum heute (REF_Q50)		
		Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75
Haselbach	REF	-21	0	11	-18	0	8	-15	0	8
	2040	-12	13	27	-17	3	15	-22	-5	4
	2080	-7	26	44	3	32	45	16	40	52

4.5.5 Fallbeispiel Altbach

Der Altbach liegt ca. 10 km nordöstlich von Zürich in unmittelbarer Nähe des Flughafens Kloten. Das eher rundliche Einzugsgebiet des Altbachs bei Bassersdorf mit **einer Fläche von 13 km²** ist v.a. durch Landwirtschaftsland und Siedlungsflächen sowie einige Waldflächen geprägt. Die zwei Hauptgerinne, die das Gebiet in zwei etwa gleich grosse Teilgebiete gliedern, haben sich nur mässig ins Gelände eingetieft. In den Kopfeinzugsgebieten, also jenen Flächen in den oberen Teilen des Einzugsgebiets nahe der Wasserscheide, existieren über weite Strecken keine offenen Gerinne.

Geologie

Das Einzugsgebiet liegt im Bereich der **Oberen Süsswassermolasse**, welche im Altbach aus Sandsteinen und Mergel besteht (Hantke et al., 1967). Darüber liegt eine zumeist mächtige Schicht aus glazialen Schottern. Je nach Tongehalt dieser Schotter ist die Moräne mehr oder weniger durchlässig.

Böden

Entsprechend der Durchlässigkeit der Moränen haben sich unterschiedliche Böden im Einzugsgebiet des Altbachs entwickelt. Auf Standorten mit gut durchlässiger Moräne finden sich vorwiegend **mittel- bis tiefgründige Braunerden**, die meist gute Durchlässigkeiten aufweisen und daher zu Tiefenversickerung führen. Auf schlechter durchlässiger Moräne liegen eher Staunässe-beeinflusste Böden wie **Pseudogleye, Gleye oder pseudovergleyte Braunerden**. Diese Böden haben eine geringe Durchlässigkeit und wenig Speichervermögen (Scherrer AG, 2007).

Abflusstypen

Die Bodenverhältnisse prägen auch die Verteilung der **Abflusstypen** im Einzugsgebiet des Altbachs. Es dominiert der Abflusstyp 4 (stark verzögert beitragend) mit einem Flächenanteil von 42 %, gefolgt vom Abflusstyp 3 (verzögert beitragend) mit 34 %, Abflusstyp 61 (Siedlung) mit 12 %, Abflusstyp 5 (sehr stark verzögert beitragend) mit 10 %, Abflusstyp 1 (rasch und stark beitragend) mit 3 % und Abflusstyp 2 (leicht verzögert beitragend) mit weniger als 1 %.

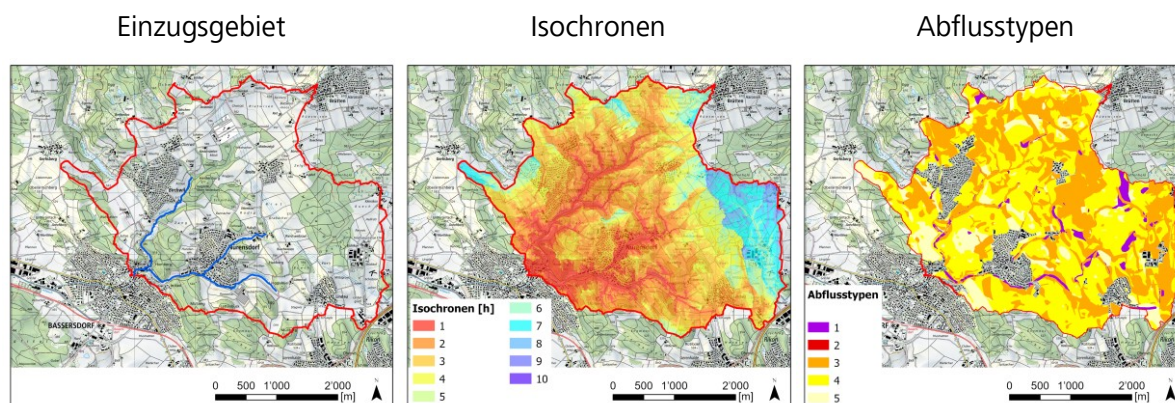


Abbildung 8: Das Pilotgebiet Altbach mit der Einzugsgebietsgrenze (links), den berechneten Isochronen (Mitte) und der Abflusstypenkarte (Rechts) (Grundlagendaten: Swisstopo und Kanton Zürich).

Hochwasserganglinien

Anhand dieser Inputs wurden auch für den Altbach Ganglinien für das HQ30, HQ100 und HQ300 für die Perioden REF, 2040 und 2080 simuliert. Die grössten Hochwasserspitzen wurden bei einer Niederschlagsdauer von 2 h erreicht, obwohl das Einzugsgebiet des Altbachs (13.0 km²) ca. 3.4 km² grösser ist als der Haselbach (9.6 km²).

Grund dafür ist vermutlich die rundliche Form des Altbachs mit zwei etwa gleich grossen Teil-einzugsgebieten. Der Haselbach hingegen ist eher langgezogen und verfügt über ein langes

Hauptgerinne. Die simulierten Ganglinien für den Altbach sind in Abbildung 9 dargestellt; die entsprechenden Werte der Hochwasserspitzen sind in Tabelle 8 im Anhang zu finden. In Tabelle 4 sind die Veränderungen aller berechneter Hochwasserspitzen immer relativ zur Hochwasserspitze heute (REF mit Q50 der Vorfeuchte) aufgelistet.

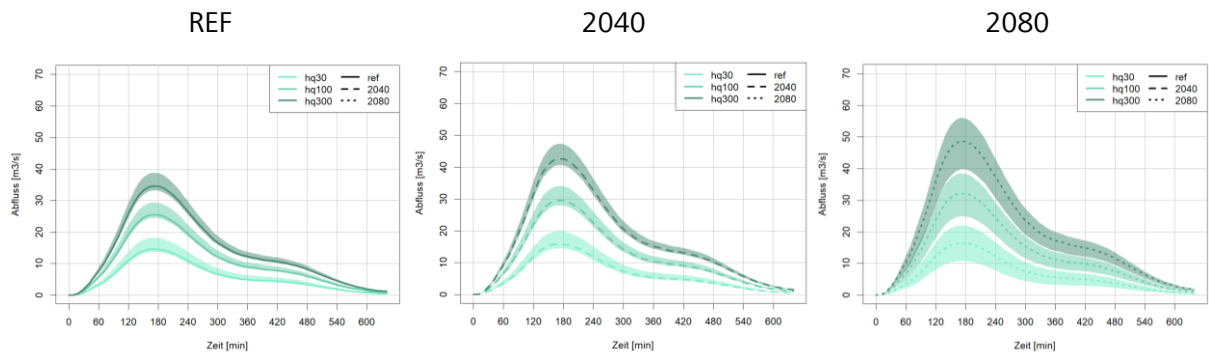


Abbildung 9: Simulierte Hochwasserganglinien für den Altbach bei Bassersdorf für das HQ30, HQ100 und HQ300 für die Perioden REF, 2040 und 2080 für die Niederschlagsdauer 2 h. Die Linien beschreiben die simulierten Abflüsse unter Berücksichtigung des Q50 der Vorfeuchtebedingungen, die flächig dargestellten Bereiche kennzeichnen die Spanne der Simulationen mit den Q25 und Q75 der Vorfeuchte.

Hochwasserspitzen unter durchschnittlichen Vorfeuchtebedingungen

Die **Hochwasserspitzen** für das 30-, 100- und 300-jährliche Hochwasserereignis am Altbach unter mittleren Vorfeuchtebedingungen (Q50) **verändern sich schon bis Mitte des Jahrhunderts deutlich** (Abbildung 9 und Tabelle 8 im Anhang). Das HQ30, HQ100 und HQ300 steigen bis 2040 um + 9 %, + 16 % und + 23 % (Tabelle 4). Die Zunahme setzt sich fort und erreicht bis Ende des Jahrhunderts für die Hochwasser der drei Jährlichkeiten + 12 %, + 26 % und + 40 %. **Damit steigen auch im Altbach die Hochwasserspitzen überproportional stark im Vergleich zur Zunahme der Starkniederschläge** (siehe Station Kloten in Tabelle 1).

Hochwasserspitzen unter trockenen/feuchten Vorbedingungen

Im Altbach nehmen die simulierten Hochwasserspitzen unter überdurchschnittlich trockenen Vorfeuchtebedingungen (Q25) nur für das HQ30 bis Ende des Jahrhunderts deutlich ab (- 26 %) (siehe Tabelle 4). Bei den anderen Simulationen kompensiert die starke Zunahme der Starkniederschläge v.a. bis Mitte des Jahrhunderts aber auch bis Ende des Jahrhunderts die Veränderung der überdurchschnittlich trockenen Vorfeuchtebedingungen (Q25).

Das bedeutet, dass **selbst bei Annahme von überdurchschnittlich trockenen Vorfeuchtebedingungen die Hochwasserspitzen bis Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts gleich hoch oder höher sein werden wie heute. Entsprechend deutlich ist auch die Zunahme bei überdurchschnittlich feuchten Vorbedingungen**. Hier steigen das HQ30, HQ100 und HQ300 bis 2040 um + 36 %, + 34 % und + 37 % und bis 2080 um + 51 %, + 51 % und + 62 %. Dies führt zu markant höheren absoluten Hochwasserspitzen im Vergleich zu heute (siehe Abbildung 9 und Tabelle 4).

Bandbreite von Hochwasserspitzen

Szenariensimulationen mit unterschiedlicher Vorfeuchte (Q25, Q75) führen auch im Altbach zu asymmetrischen Bandbreiten möglicher Hochwasserspitzen. Anders als im Haselbach haben im **Altbach, zumindest für die Verhältnisse heute und Mitte des Jahrhunderts, die überdurchschnittlich feuchteren Vorbedingungen (Q75) einen grösseren Einfluss auf die simulierten Hochwasserspitzen als die überdurchschnittlich trockenen Vorbedingungen (Q25)**.

Das ist dadurch begründet, dass gemäss der PREVAH Simulationen die Änderungen der überdurchschnittlich feuchten Vorbedingungen für die Perioden REF und 2040 stärker zunehmen (+ 20 mm) als die überdurchschnittlich trockenen Vorbedingungen abnehmen (- 11 mm) (siehe Tabelle 2).

Ende des Jahrhunderts verändern sich sowohl die überdurchschnittlich feuchten als auch die überdurchschnittlich trockenen Vorbedingungen stark und die Bandbreiten der simulierten Hochwasserspitzen sind daher mehr oder weniger symmetrisch (siehe Abbildung 9); vor allem sind die Bandbreiten aber grösser als für Mitte des Jahrhunderts oder für heute. Die Bandbreiten überlagern sich aber nicht.

Tabelle 4: Veränderung der simulierte Hochwasserspitzen für das HQ30, HQ100 und HQ300 für das Pilotgebiet Altbach – Bassersdorf für die Perioden REF, 2040 und 2080 für die Niederschlagsdauer 2 h unter Berücksichtigung von Vorfeuchteszenarien Q25, Q50 und Q75 im Vergleich zu den heutigen Hochwasserspitzen (REF mit Q50 der Vorfeuchte).

Einzugs- gebiet	Periode	Veränderung des HQ30[%] Relativ zum heute (REF_Q50)			Veränderung des HQ100 [%] Relativ zum heute (REF_Q50)			Veränderung des HQ300 [%] Relativ zum heute (REF_Q50)		
		Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75
Altbach	REF	-5	0	25	-4	0	16	-4	0	12
	2040	0	9	36	10	16	34	17	23	37
	2080	-26	12	51	-2	26	51	14	40	62

4.5.6 Fallbeispiel Furtbach

Das Einzugsgebiet des Furtbaches bei Würenlos ist mit **ca. 39 km² Fläche** das grösste der drei Pilotgebiete. Es liegt ca. 15 km nordwestlich von Zürich und hat eine eher langgestreckte Form. Das Gebiet ist v.a. durch Landwirtschaftsland geprägt und hat einen vergleichsweise hohen Siedlungsanteil; Waldflächen spielen eher eine untergeordnete Rolle. Im Einzugsgebiet befindet sich der Katzensee und ein Hochwasserrückhaltebecken bei Wüeri. Der Mittel- und Unterlauf des Furtbaches verläuft durch einen flachen, 1 bis 1.5 km breiten Talboden.

Geologie

Der breite Talboden und die unteren Hangbereiche von Altberg, Lägern und dem Gebiet zwischen Adlikon und Dielsdorf sind geprägt durch fluviatile Schotter (Talboden) und **eiszeitliche Moränen**. An der Lägern schliesst hangaufwärts Gehängeschutt an; ganz im obersten Teil finden sich gut durchlässige Kalkschichten. Im Bereich Altberg überdecken die Moränenablagerungen Gesteine der Oberen Süsswassermolasse (Sandstein, Mergel) (Hantke et al., 1967; Jäckli & Kempf, 1972).

Böden

In den flachen Bereichen bei Dällikon, Dänikon und Hüttikon finden sich v.a. **durch Grundwasser beeinflusste Böden wie Gleye, Buntgleye und Moorböden**. Diese Flächen reagieren an sich rasch und haben wenig Speicherkapazität, sind allerdings so flach, dass Niederschlagswasser auf diesen Flächen grossteils zurückgehalten wird. Im Modellsystem wurde diesem Umstand durch eine Reduktion der Abflussbeiwerte Rechnung getragen. Ausserhalb der Feuchtzonen herrschen v.a. **Braunerden** vor, die als normal bzw. gut durchlässig charakterisiert werden können (Scherrer AG, 2009). In den Hanglagen finden sich v.a. sandig-lehmige Braunerden. Die von Stau- und Hangwasser beeinflussten Böden (Pseudogleye, vergleyte Braunerden, Braunerdegleye) an den Hängen sind flächenmässig klein. In den obersten Hangbereichen der Lägern haben sich flachgründige, dafür gut durchlässige Braunerden, Renzinen und vereinzelt Rankerböden entwickelt. Im Siedlungsgebiet sind die Böden teilweise versiegelt und/oder anthropogen überprägt.

Abflusstypen

Im Furtbach dominieren Gebiete des **Abflusstyps 3** (verzögert beitragend) mit einem Flächenanteil von 32 %, gefolgt von Abflusstyp 4 (stark verzögert beitragend) mit 24 %, Abflusstyp 5 (sehr stark verzögert beitragend) mit 21 %, Abflusstyp 61 (Siedlung) mit 18 %, Abflusstyp 1 (rasch und stark beitragend) mit 4 % und schliesslich Abflusstyp 2 (leicht verzögert beitragend) mit weniger als 1 % Flächenanteil.

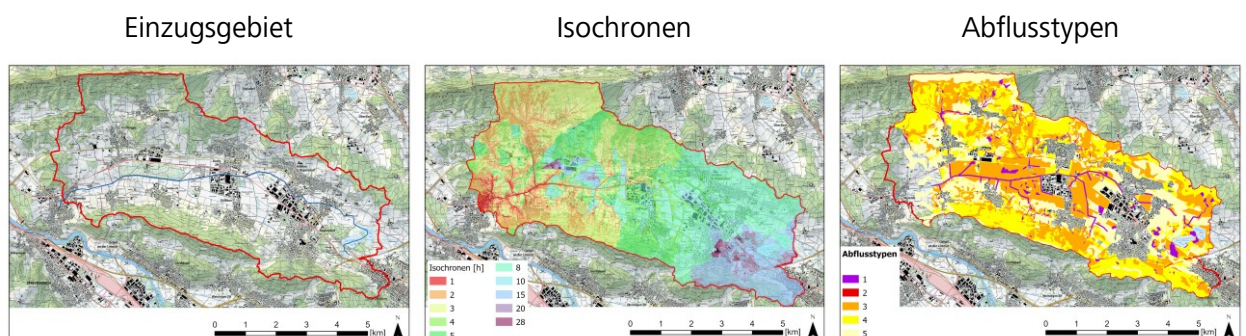


Abbildung 10: Das Pilotgebiet Furtbach mit der Einzugsgebietsgrenze (links), den berechneten Isochronen (Mitte) und der Abflusstypenkarte (rechts) (Grundlagendaten: Swisstopo und Kanton Zürich).

Hochwasserganglinien

Auch für den Furtbach wurde das Einzugsgebiet abgegrenzt (Abbildung 10, links), die Isochronen abgeleitet (Abbildung 10, Mitte) und anhand der Abflusstypenkarte wurde den einzelnen

Teilflächen Abflussbeiwertklassen zugewiesen (Abbildung 10, rechts) um die Hochwassersimulationen durchführen zu können. Wichtig für die Simulationen im Furtbach war die Implementierung des **Katzensees und des Hochwasserrückhaltebeckens Wüeri** als natürliche bzw. künstliche Stauanlage. Die höchsten Hochwasserspitzen wurden bei einer Regendauer von 6h erreicht. Die Ganglinien sind in Abbildung 11 dargestellt; die entsprechenden Werte der Hochwasserspitzen in Tabelle 9 im Anhang. Die relativen Veränderungen zu heute finden sich in Tabelle 5.

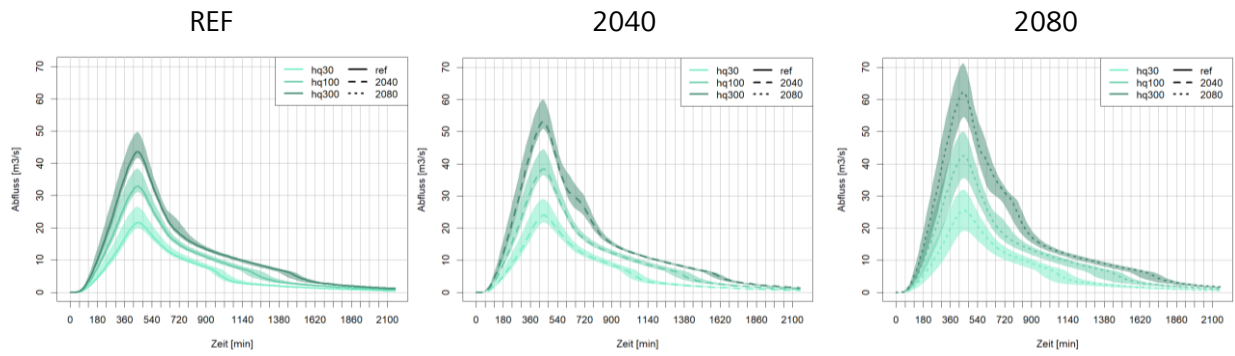


Abbildung 11: Simulierte Hochwasserganglinien für den Furtbach bei Würenlos für das HQ30, HQ100 und HQ300 für die Perioden REF, 2040 und 2080 für die Niederschlagsdauer 6 h. Die Linien beschreiben die simulierten Abflüsse unter Berücksichtigung des Q50 der Vorfeuchtebedingungen, die flächig dargestellten Bereiche kennzeichnen die Spanne der Simulationen mit den Q25 und Q75 der Vorfeuchte.

Hochwasserspitzen unter durchschnittlichen Vorfeuchtebedingungen

Gleich wie beim Altbach **verändern sich die Hochwasserspitzen aller drei untersuchten Jährlichkeiten** unter durchschnittlichen Vorfeuchtebedingungen (Q50) bis Mitte und bis Ende des Jahrhunderts **markant**. Das HQ30, HQ100 und HQ300 steigen bis Mitte des Jahrhunderts um + 11 %, + 17 % und + 22 %. Der Anstieg bis Ende des Jahrhunderts ist noch grösser (+ 18 %, + 29 % und + 43 %) (siehe Tabelle 5). **Auch für den Furtbach gilt damit, dass die Hochwasserspitzen überproportional stark im Vergleich zur Zunahme der Starkniederschläge steigen** (siehe Station Kloten in Tabelle 1).

Hochwasserspitzen unter trockenen/feuchten Vorbedingungen

Auch im Furtbach nehmen selbst unter überdurchschnittlich trockenen Vorbedingungen (Q25), die Hochwasserspitzenabflüsse bis Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts zu, ausser für das HQ30 bis Ende des Jahrhunderts (Tabelle 5). **Auch im Furtbach werden also selbst bei Annahme von überdurchschnittlich trockenen Vorfeuchtebedingungen die seltenen Hochwasserspitzen bis Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts höher sein als heute.** Unter Annahme von **überdurchschnittlich feuchten Vorbedingungen** ist diese Zunahme entsprechend **noch stärker**. Es ist dann zu erwarten, dass die Spitzenabflüsse für das HQ30, HQ100 und HQ300 Mitte des Jahrhunderts um + 34 %, + 35 % und + 37 % und bis 2080 bei + 47 %, + 52 % und + 63 % liegen (siehe Abbildung 11 und Tabelle 5).

Bandbreite von Hochwasserspitzen

Szenariensimulationen mit unterschiedlicher Vorfeuchte (Q25, Q75) führen auch im Furtbach zu asymmetrischen Bandbreiten möglicher Hochwasserspitzen. Die Bandbreiten überlagern sich nicht, sind aber für Ende des Jahrhunderts grösser als für Mitte des Jahrhunderts oder für heute. Gleich wie beim Altbach haben **überdurchschnittlich feuchte Vorbedingungen einen grösseren Einfluss auf die simulierten Hochwasserganglinien als die überdurchschnittlich trockenen Vorbedingungen**. Wiederum kann dies durch die mit PREVAH simulierten Änderungen der Vorfeuchte erklärt werden (siehe Tabelle 2).

Tabelle 5: Veränderung der simulierte Hochwasserspitzen für das HQ30, HQ100 und HQ300 für das Pilotgebiet Furtbach – Würenlos für die Perioden REF, 2040 und 2080 für die Niederschlagsdauer 6 h unter Berücksichtigung von Vorfeuchteszenarien Q25, Q50 und Q75 im Vergleich zu den heutigen Hochwasserspitzen (REF mit Q50 der Vorfeuchte).

Einzugs- gebiet	Periode	Veränderung des HQ30 [%] Relativ zum heute (REF_Q50)			Veränderung des HQ100 [%] Relativ zum heute (REF_Q50)			Veränderung des HQ300 [%] Relativ zum heute (REF_Q50)		
		Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75
Furtbach	REF	-8	0	22	-5	0	16	-4	0	14
	2040	0	11	34	11	17	35	17	22	37
	2080	-11	18	47	9	29	52	25	43	63

4.5.7 Synthese aus den Fallbeispielen

Anhand der drei untersuchten Pilotgebiete lassen sich einige für alle drei Gebiete gültige Sachverhalte erkennen.

- In allen drei Gebieten steigen die simulierten Hochwasserganglinien unter durchschnittlichen Vorfeuchtebedingungen bis Mitte und v.a. bis Ende des Jahrhunderts an; zum Teil ist der Anstieg markant. Die seltenen Hochwasserspitzen werden proportional stärker anwachsen als die häufigen (für möglicher Gründe siehe Folgepunkte). Für die Veränderung des Risikos spielen aber auch die häufigen Hochwasser eine wichtige Rolle.
- Die Zunahme der projizierten kurzzeitigen Starkniederschläge übersteuert die Wirkung der tendenziell in Zukunft durchschnittlich trockeneren Vorfeuchte. Einzig bei häufigeren Hochwassern (HQ30) steigen die Hochwasserspitzen nicht immer überproportional zum Niederschlag an. Das lässt darauf schliessen, dass v.a. für die häufigen Hochwasserereignisse (HQ30) die Mitberücksichtigung der Vorfeuchteveränderung wichtig ist.
- Selbst unter überdurchschnittlich trockenen Vorfeuchtebedingungen steigen in fast allen Gebieten die Hochwasserspitzen bis Mitte des Jahrhunderts an oder bleiben zumindest gleich wie heute. Ausnahme ist der Haselbach, jedoch sind die für die Simulationen verwendeten Niederschlagswerte dort wenig verlässlich. Bis Ende des Jahrhunderts steigen die Hochwasserspitzen unabhängig vom Vorfeuchteszenario in allen Gebieten an.
- Überdurchschnittlich feuchte Vorbedingungen führen generell zu noch höheren Hochwasserspitzen, die Wirkung überdurchschnittlich feuchter Vorbedingungen ist besonders bei den häufigeren Hochwassern (HQ30) gross.
- Die Simulationen in den drei Pilotgebieten mit überdurchschnittlich trockenen und überdurchschnittlich feuchten Vorfeuchtebedingungen bilden asymmetrische Bandbreiten um die Simulationen mit durchschnittlicher Vorfeuchte. Die Bandbreite ist für jedes Einzugsgebiet unterschiedlich.
- Für eine zuverlässige Simulation der Veränderung der Hochwasser in der Zukunft ist eine einzugsgebietsspezifische Kalibrierung/Validierung des Modells für die Verhältnisse heute nötig. Sie bildet die Grundlage, um Veränderungen in der Zukunft überhaupt zuverlässig quantifizieren zu können.

Die aufgelisteten Sachverhalte sollten in weiteren Einzugsgebieten überprüft werden bevor allgemein gültige Aussagen davon abgeleitet werden. Ausserdem sollten ähnliche Simulationen mit anderen hydrologischen Modellen durchgeführt werden. Damit kann verhindert werden, dass Verallgemeinerungen und Schlussfolgerungen auf Simulationen mit modellspezifischen Besonderheiten beruhen. Dies betrifft v.a. die oben genannten Aussagen zur Vorfeuchte, aber auch die Entwicklung der Hochwasserganglinien unter veränderten Starkniederschlägen oder die Aussagen betreffend überproportional stark steigender Abflussreaktionen.

4.6 Vergleich der Ergebnisse von geo7 und WSL

Für den Vergleich zwischen den Simulationen von geo7 und WSL gehen wir auf die Gebiete Haselbach, Altbach und Furtbach näher ein, welche sowohl mit Qsim von geo7 als auch mit PREVAH von der WSL simuliert wurden.

PREVAH (WSL)

Das Modell PREVAH ist ein **Wasserhaushaltsmodell** mit einer räumlichen Auflösung von 200 x 200 m und rechnet in **Tagesschritten**. Es ist somit für langanhaltende Dauerregen oder kontinuierliche Simulationen mehrerer Jahre konzipiert. PREVAH wurde in erster Linie für die Simulation meso-skaliger Einzugsgebiete entwickelt und kalibriert (Lustenberger et al., 2021). Daher werden die Ergebnisse der WSL im Folgenden als WSL_meso bezeichnet. Die WSL_meso Gebiete decken das gesamte Kantonsgebiet ab (Lustenberger et al., 2021). Im Rahmen dieses

Projekts wurde PREVAH zusätzlich auch auf die micro-skaligen Piloteinzugsgebiete Haselbach, Altbach und Furtbach angewendet (Details siehe Lustenberger & Zappa, 2024). Diese Ergebnisse werden im Folgenden als WSL_micro bezeichnet.

Die Veränderung der Extremwerte der Gebietsniederschläge für WSL_meso und WSL_micro wurden anhand gepoolter Klimaketten bestimmt (Lustenberger, Zappa 2024). Das bedeutet, dass die Zeitreihen aller Klimaketten zusammen in einer Extremwertstatistik ausgewertet wurden und dadurch robuster sind. Jedoch sind keine Aussagen zu den Unsicherheiten möglich (Details siehe Lustenberger, Zappa 2024). Auch für die kleinen Einzugsgebiete wurden Starkniederschläge mit der Dauer von 1 Tag simuliert. Nicht immer führen diese Dauerstufen in kleinen Einzugsgebieten zu den höchsten Hochwasserspitzen.

Qsim (geo7)

Das Modell Qsim von geo7 ist ein **ereignisbasiertes konzeptionelles Modell** v.a. für kleine Einzugsgebiete mit einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 m und einem **Rechenzeitschritt von 1 h** (siehe Kapitel 4.2).

Die verwendeten Starkniederschläge wurden mit dem Starkniederschlagsgenerator von geo7 für repräsentative Stationen nahe der drei Pilotgebiete berechnet und die Veränderung der Starkniederschläge anhand des Medians aller verwendeten Klimaketten bestimmt, aber nicht gepoolt (siehe Rinderer et al., 2023).

Diese Auswertung ist weniger robust, erlaubt aber eine Einschätzung der Unsicherheiten (siehe Boxplots und Datenpunkte in Abbildung 5, rechts). Die kurzzeitigen Starkniederschläge führen in kleinen Einzugsgebieten in der Regel zu den höchsten Hochwasserspitzen.

Die kurze Beschreibung von **PREVAH und Qsim** zeigt, dass die Modelle hinsichtlich räumlicher Auflösung, Rechenzeitschritt, Abbildung der hydrologischen Prozesse, klimatologischer Inputgrößen und Kalibrierung **sehr unterschiedlich sind**. Dies muss beim Vergleich der Ergebnisse berücksichtigt werden.

4.6.1 Veränderung der Starkniederschläge

Die projizierten Veränderungen der 1-Tages Starkniederschläge für den Haselbach, Altbach und Furtbach sind für WSL_meso und WSL_micro je Pilotgebiet und je Periode (2040, 2080) sehr ähnlich oder gar identisch (Abbildung 12 und Tabelle 10 im Anhang). Die Gebietsniederschläge wurden basierend denselben gepoolten Daten aus dem CH2018 berechnet.

geo7 hingegen rechnet mit Stundenniederschlägen. Daher ist wenig erstaunlich, dass sich die **Veränderungen der 1 h-Starkniederschläge von geo7 von den 1-Tagesniederschlägen der WSL unterscheiden**.

So zum Beispiel sind die Veränderungen der 1 h-Starkniederschläge für den Haselbach und die Periode 2080 für alle drei Jährlichkeiten um ca. das Doppelte höher. Ebenso für den 30-jährlichen Starkniederschlag für den Haselbach und die Periode 2040 und den 100- und 300-jährlichen Starkniederschlag für den Furtbach und die Periode 2040 (siehe Abbildung 12 und Tabelle 10 im Anhang).

Für den Haselbach und die Periode 2040 wird von geo7 eine Abnahme der 1 h-Starkniederschläge projiziert, was jedoch vermutlich auf Qualitätsmängel bei der extremwertstatistischen Auswertung der synthetischen Zeitreihe an der verwendeten Station Wädenswil zurückzuführen ist und wenig plausibel erscheint (siehe Kapitel 4.5.1).

Abgesehen von der Auswertung für die Station Wädenswil sind **beide Datensätze physikalisch plausibel** und erfüllen z.B. die Clausius-Clapeyron Beziehung, die von einer Zunahme der Feuchtigkeit in der Atmosphäre von ca. 7 % bis 14 % pro 1 Grad Kelvin ausgeht. Dies wird in der Literatur mit einer entsprechenden Intensivierung der Starkniederschläge in Zusammenhang gebracht (Scherrer, et al., 2016). Dort wird auch argumentiert, dass kurzzeitige Starkniederschläge noch stärker ansteigen werden als starke Dauerregen (Scherrer et al., 2016, Ban et al., 2014).

4.6.2 Veränderung der Hochwasserabflüsse

Vergleicht man nun die simulierten Hochwasserabflüsse, so sind die projizierten Veränderungen für WSL_meso und WSL_micro nicht so ähnlich, wie man vielleicht von den Niederschlägen her vermuten könnte (siehe Abbildung 13 und Tabelle 11 im Anhang). **Tendenziell sind die projizierten Veränderungen für WSL_meso grösser als für WSL_micro.** Ausnahmen sind der Haselbach und die Periode 2040 für alle drei Jährlichkeiten und der Haselbach und die Periode 2080 für die Jährlichkeiten 100 und 300 Jahre (nur geringfügig). In der Regel reagieren die Hochwasserabflüsse aus PREVAH überproportional zu den Niederschlägen.

Die projizierten Veränderungen der Hochwasserabflüsse mit Qsim sind in den meisten Fällen unterschiedlich zu jenen von PREVAH. In einigen Fällen sind sie höher als jene von PREVAH (z.B. für den Haselbach und die Periode 2040 für das 30-jährliche Hochwasser, für den Haselbach und die Periode 2080 für die Hochwasser aller drei Jährlichkeiten und für den Furtbach und die Periode 2080 für das 100- und 300-jährliche Hochwasser).

In den meisten Fällen sind die Veränderungen projiziert mit Qsim jedoch geringer als jene projiziert mit PREVAH (z.B. für den Altbach und den Furtbach und die Periode 2040 für alle drei Jährlichkeiten). Zum Teil sind die Unterschiede zu WSL_meso gross. Die Ergebnisse WSL_meso liegen jedoch innerhalb des Szenarienbands der Simulationen mit Qsim unter Berücksichtigung von überdurchschnittlich trockenen bzw. feuchten Vorbedingungen.

Besser stimmen die Qsim Simulationen mit den PREVAH Simulationen für WSL_micro überein (z.B. für den Altbach und die Periode 2080 für das 30-jährliche Hochwasser, für den Altbach und die Periode 2040 für das 100- und 300-jährliche Hochwasser).

In einigen Fällen stimmen alle drei simulierten Veränderungen gut überein (z.B. für den Furtbach und die Periode 2080 für das 30- und 100-jährliche und Haselbach und für den Altbach und die Periode 2080 für das 300-jährliche Hochwasser).

4.6.3 Veränderung der Jährlichkeit von Hochwasserabflüssen

Für die Weiterverwendung der projizierten Veränderungen der Hochwasserabflüsse bei der Überarbeitung der Risikokarte des Kantons Zürich spielen vor allem die Veränderungen der Jährlichkeiten der Hochwasserabflüsse eine Rolle (siehe Methodik in Kapitel 3). Erstellt man nun mit den Simulationsergebnissen für WSL_meso, WSL_micro und geo7 **Intensitäts-Frequenzkurven und ermittelt die Veränderung der Jährlichkeit der heutigen HQ30, HQ100 und HQ300**, so ergeben sich Unterschiede in den Jährlichkeiten zwischen WSL_meso, WSL_micro und geo7 (siehe Abbildung 14 und Tabelle 12 im Anhang).

In einigen Fällen stimmen die projizierten Veränderungen der Jährlichkeit heutiger Hochwasser für Mitte und Ende des Jahrhunderts relativ gut überein. Zum Beispiel wird das heutige HQ100 im Furtbach bis Mitte Jahrhunderts nach dem Simulationen WSL_meso, WSL_micro bzw. geo7 zu einem HQ45, HQ62 bzw. HQ63; bis Ende des Jahrhunderts zu einem HQ46, HQ33 bzw. HQ51. Andere Beispiele sind der Haselbach und die Periode 2080 für HQ30, HQ100 und HQ300 oder der Furtbach und die Perioden 2040 und 2080 für HQ100 und HQ300 (siehe Abbildung 14 und Tabelle 12 im Anhang).

Für andere Fälle sind die projizierten Veränderungen der Jährlichkeit für WSL_meso und WSL_micro in der Regel grösser als für die Simulationen von geo7. Zum Beispiel wird das heutige HQ100 im Altbach Mitte des Jahrhunderts nach dem Simulationen WSL_meso, WSL_micro bzw. geo7 zu einem HQ44, HQ45 bzw. HQ70 und bis Ende des Jahrhunderts zu einem HQ43, HQ23 bzw. HQ60 (siehe Abbildung 14 und Tabelle 12). Andere Beispiele sind der Haselbach und die Periode 2040 und HQ100 und HQ300 oder der Altbach und die Perioden 2040 und 2080 für HQ30, HQ100 und HQ300.

Niederschlag

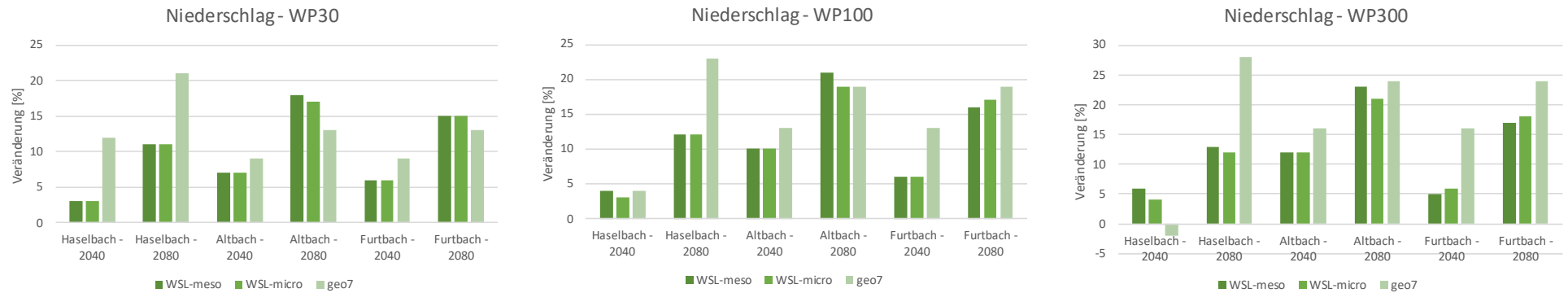


Abbildung 12: Simulierte Veränderungen der 1-Tages Starkniederschläge für WSL_meso und WSL_micro bzw. der 1 h Starkniederschläge geo7. (Für die Definition von WSL_meso, WSL_micro und geo7 siehe Kapitel 4.6).

Abfluss

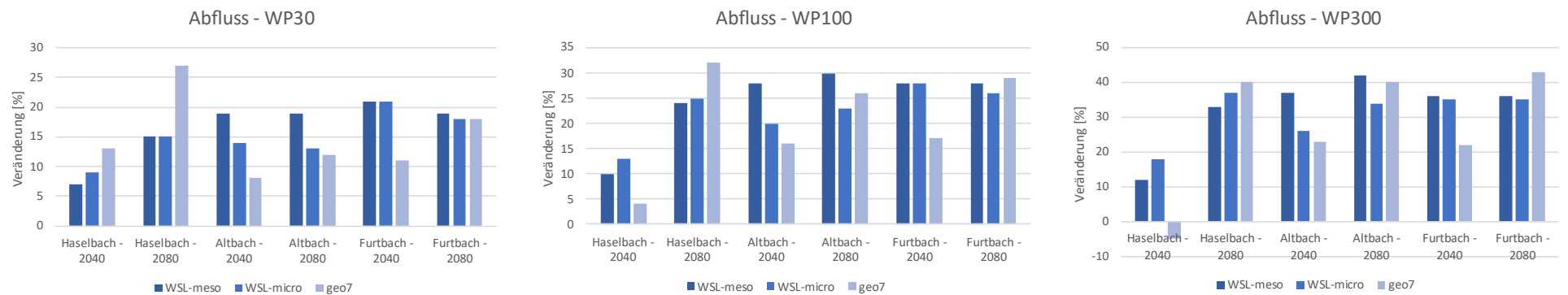


Abbildung 13: Simulierte Veränderungen der Hochwasserabflüsse mit PREVAH (WSL_meso / WSL_micro) bzw. Qsim (geo7) für die Wiederkehrperioden 30, 100 und 300 Jahre und für Mitte (2040) und Ende (2080) des Jahrhunderts. (Für die Definition von WSL_meso, WSL_micro und geo7 siehe Kapitel 4.6).

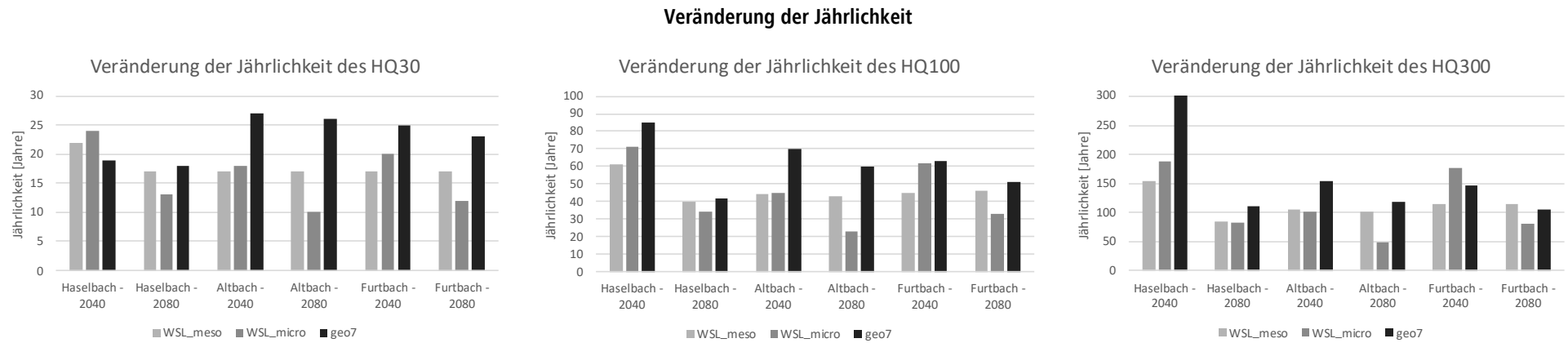


Abbildung 14: Veränderungen der Jährlichkeit von 30-, 100- und 300-jährlichen Hochwasserabflüsse für Mitte (2040) und Ende (2080) des Jahrhunderts, simuliert mit PREVAH (WSL_meso / WSL_micro) bzw. Qsim (geo7). (Für die Definition von WSL_meso, WSL_micro und geo7 siehe Kapitel 4.6).

4.6.4 Einordnung der Unterschiede und Vergleich mit anderen Studien

Unterschiede

- Tendenziell sind die simulierten Veränderungen zukünftiger Hochwasser unter Berücksichtigung des Klimawandels mit PREVAH (WSL_meso und WSL_micro) in sich ähnlicher als zwischen den Simulationen von PREVAH und Qsim.
- Die Simulationen für WSL_meso und WSL_micro führen für die drei Pilotgebiete in der Mehrheit der Fälle zu einer grösseren Veränderung der Hochwasserabflüsse bis Mitte und Ende des Jahrhunderts als die Simulationen von geo7.
- Die simulierten Hochwasserspitzen für WSL_meso und WSL_micro liegen aber innerhalb des Bereichs der mit Qsim unter Berücksichtigung von überdurchschnittlich trockenen bzw. feuchten Vorbedingungen simulierten Hochwasserabflüsse.
- Sinngemäss ist auch die Veränderung der Jährlichkeit der Simulationen für WSL_meso und WSL_micro grösser als bei den Simulationen von geo7. «Grösser» bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sich die Jährlichkeit stärker verändert und ein vergleichbares Hochwasser häufiger auftritt.
- Allerdings gibt es auch zwischen den WSL_meso und WSL_micro Simulationen markante Unterschiede (siehe Abbildung 12 und Tabelle 10 im Anhang).

Gründe

Plausible Gründe für die Unterschiede zwischen den Simulationen mit Qsim und PREVAH sind Unterschiede bei:

- der räumlichen Auflösung (Qsim: 5 oder 10 m, PREVAH: 200 m Rastergrösse),
- dem Rechenzeitschritt (Qsim: 10 min oder 1 h, PREVAH: 24 h),
- der Abbildung hydrologischer Prozesse (Qsim: ereignisbasiertes Szenarienmodell v.a. für kleine und mittlere Einzugsgebiete, PREVAH: komplexes Wasserhaushaltsmodell für grosse Einzugsgebiete),
- der extremwertstatistischen Auswertungen der Niederschlagsdaten (Qsim: kurzzeitige Starkniederschläge aus dem Starkniederschlagsgenerator, PREVAH: gepoolte Tagesdaten aus dem CH2018),
- der Kalibrierung (Qsim: Kalibrierung auf einzelne Hochwasserereignisse, PREVAH: Kalibrierung auf lange Messzeitreihen).

Gemeinsamkeiten

Im Anbetracht der unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung und Skalen der beiden Modelle und der Unsicherheiten aller Komponenten entlang der Simulationskette erscheint die Grössenordnung der simulierten Veränderung von Hochwasserabflüssen und Jährlichkeit zwischen PREVAH für Dauerregen und Qsim für kurzzeitige Starkniederschläge grundsätzlich ähnlich. **Die beiden Auswertungen beschreiben die gleiche Tendenz hin zu intensiveren Starkniederschlägen und häufigeren Hochwassern Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts.**

Vergleiche zu anderen Studien

Die projizierten Veränderungen von WSL und geo7 bewegen sich in einer vergleichbaren Grössenordnung wie in anderen Arbeiten in der Literatur für die Schweiz. Im **Projekt HYDRO-CH2018** wurde unter anderem die **Veränderung eines HQ30 in meso-skaligen Einzugsgebieten der Schweiz mit unterschiedlichen Modellen simuliert** (für eine Zusammenfassung siehe Ruiz-Villanueva & Molnar, 2020). Zugrunde gelegt wurde das Emissionsszenario RCP 8.5. Die Ergebnisse zweier

dieser Modelle, dem PREVAH der WSL und dem HBV-Modell der Universität Zürich werden in der Folge etwas näher beschrieben.

Gemittelt über die Schweiz war die projizierte Veränderung der HQ30 nur im Bereich zwischen 0 und 10 % und damit innerhalb der Bandbreite natürlicher Variabilität seltener Ereignisse wie dem 30-jährlichen Hochwasser. Die Unterschiede zwischen einzelnen Einzugsgebieten waren jedoch beachtlich (siehe Abbildung 15).

Während in vielen Einzugsgebieten die Veränderung nicht signifikant oder gar negativ war, wurden in einzelnen Gebieten Veränderungen bis zu + 50 % projiziert (Ruiz-Villanueva & Molnar, 2020). Lässt man die Ausreisser ausser Acht ergibt sich jedoch **in dieser Studie für 75 % aller Gebiete bis Ende des Jahrhunderts eine signifikante Zunahme des 30-jährlichen Hochwassers.**

Die Boxplots in Abbildung 15 (Zeile 1) zeigen die Variabilität der Veränderungen über alle Einzugsgebiete; die Farbe der Boxplots beschreibt den zeitlichen Verlauf von 2010 bis 2099. Die Liniengrafik (Zeile 2) beschreibt das 1 %, 50 % und 99 % Perzentil aller Simulationen und die Karten (Zeile 3) zeigen die simulierte Veränderung für die in der Studie berücksichtigten Einzugsgebiete (Ruiz-Villanueva & Molnar, 2020).

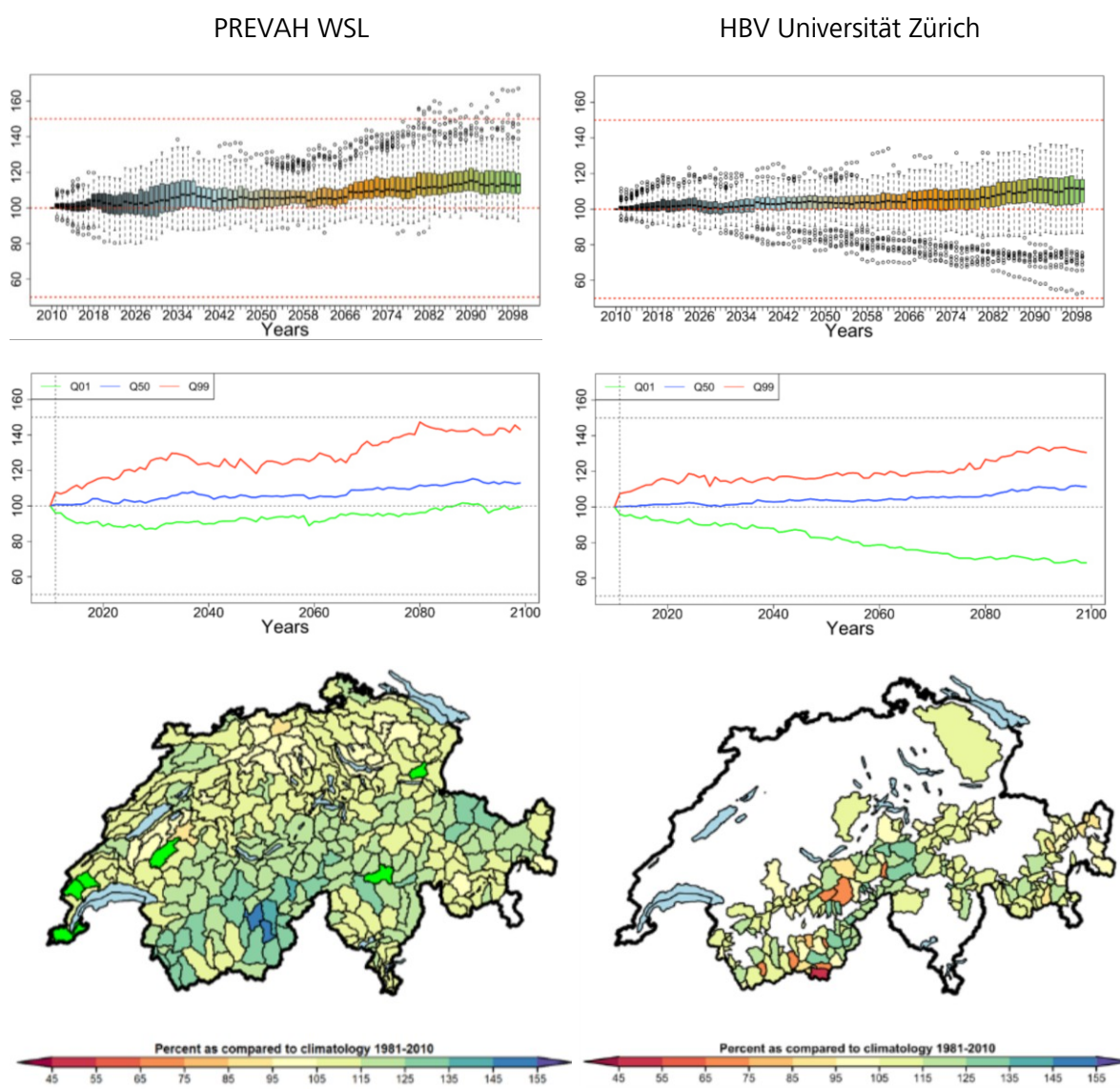


Abbildung 15: Veränderungen des HQ30 unter Berücksichtigung des RCP 8.5 simuliert mit den Modell PREVAH WSL (links) und HBV der Universität Zürich (rechts), (Ruiz-Villanueva & Molnar, 2020, Abbildung 6.3, 6.4, 6.5).

5 Empfehlungen für die Weiterverwendung der Ergebnisse

Für die Weiterverwendung der Ergebnisse im Zuge der Überarbeitung der Risikokarte des Kantons Zürich sind kantonsweit flächendeckende Aussagen zur Veränderung der Jährlichkeit von 30- 100- und 300-jährlichen Hochwassern bis Mitte und Ende des Jahrhunderts nötig. Die Informationen sollen innerhalb des Kantons räumlich differenziert sein.

Die Auswertungen der WSL mit PREVAH liefert diese Informationen für meso-skalige Einzugsgebiete und langanhaltende Dauerniederschläge. Die Auswertung von geo7 ergänzt diese Informationen für eine Auswahl micro-skaliger Pilotgebiete für kurzzeitige Starkniederschläge.

Beide Simulationsresultate sind in sich nachvollziehbar und schlüssig, sind jedoch aufgrund der unterschiedlichen Skalen, räumlich- zeitlichen Auflösung, Detaillierungsgrad abgebildeter Prozesse und Kalibrierungstiefe nicht identisch und somit nur bedingt direkt miteinander vergleichbar.

Wir empfehlen daher eine differenzierte Verwendung der Resultate von WSL und geo7 je nach Verwendungszweck.

Für die Risikokarte des Kantons Zürich

Für die Überarbeitung der Risikokarte des Kantons Zürich aber auch andere flächendeckende Anwendungen **schlagen wir vor, die Informationen der WSL_meso Simulationen zu verwenden** (siehe Abbildung 16 und Lustenberger & Zappa, 2024).

- Sie stellen in sich schlüssige, regional differenzierte Aussagen über die Veränderung der Jährlichkeit von Hochwasserabflüssen bis Mitte und Ende des Jahrhunderts dar.
- Das Modell PREVAH deckt den gesamten Kanton flächendeckend ab, simuliert den gesamten Wasserhaushalt mit gepoolten und damit robusten Niederschlagsdaten für Mitte und Ende des Jahrhunderts.
- Die räumlich etwas gröbere Auflösung von 200 x 200 m und Kalibrierung mit Fokus auf meso-skalige Einzugsgebiete ist für die Berechnung der Risikokarte des Kantons Zürich (100 x 100 m Auflösung) gut geeignet.
- Mit tendenziell höheren Abflüssen als für die Simulationen für WSL_micro oder geo7 (beide derzeit nicht flächendeckend verfügbar) besteht zudem keine Gefahr einer Unterschätzung der Veränderung der Hochwasserabflüsse bzw. Unterschätzung der resultierenden Risiken.
- Die Ergebnisse liegen jetzt zum Ende der Projektphase 1B flächendeckend vor und können unmittelbar für die Erstellung der Risikokarte in Phase 2 verwendet werden.

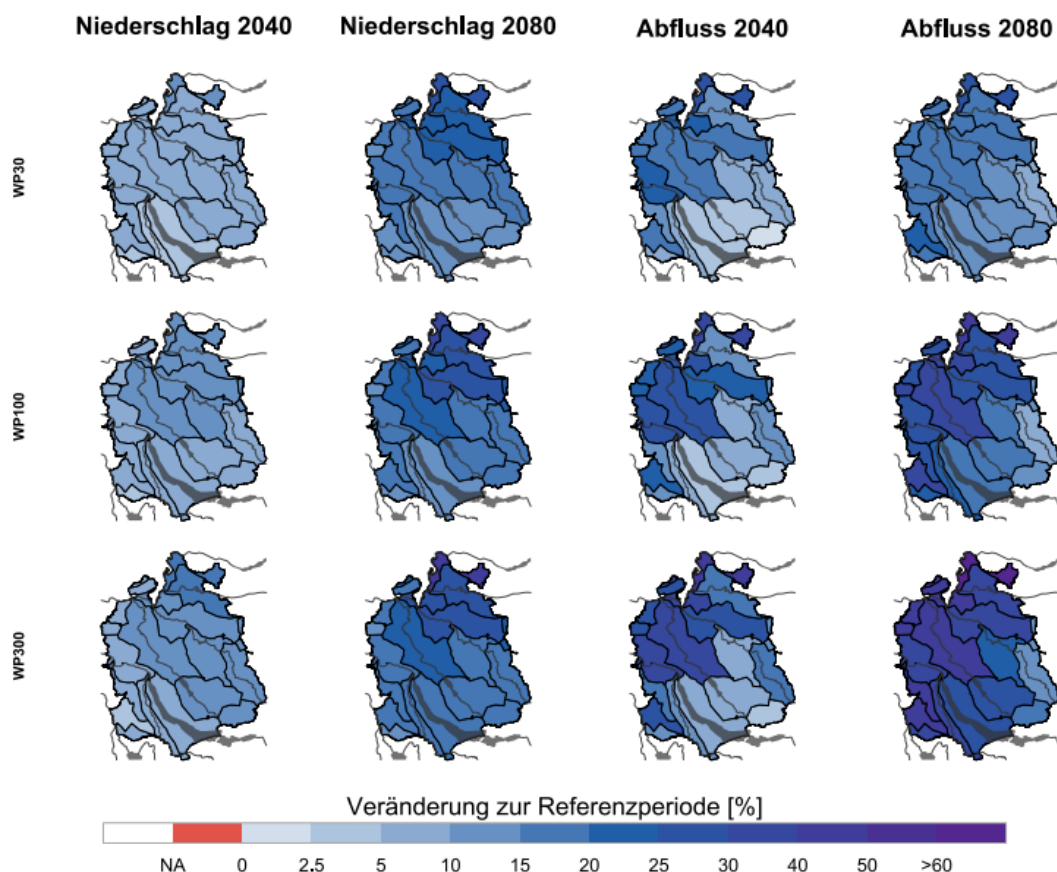


Abbildung 16: Prozentuale Veränderung der Wiederkehrwerte für Niederschlag und Abfluss für die Wiederkehrperioden (WP) 30, 100 und 300 zwischen der Referenzperiode und den Zukunftsperioden (2040, 2080) für die 19 WSL_meso Einzugsgebiete simuliert mit PREVAH (Lustenberger & Zappa. 2024, Abbildung 9, S. 15).

Für die Überarbeitung von Gefahrenkarten und für Detailstudien

Für eine **detaillierte Betrachtung zum Beispiel auf Stufe Gefahrenkarte oder Detailstudie schlagen wir vor, Simulationen wie mit dem Modell Qsim von geo7 zu verwenden.**

- Für solche Fragestellungen sind gebietsspezifische Informationen, eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung der Ergebnisse und Szenariensimulationen mit unterschiedlichen Bemessungsniederschlägen und Vorfeuchtebedingungen notwendig.
- Dabei ist wichtig, dass die Einzugsgebietsgrösse und entsprechend massgebende Dauerstufen im Modell zweckmässig berücksichtigt werden. In kleinen Einzugsgebieten (ca. < 20 km²) sind das in der Regel kurzzeitige Starkniederschläge, die mit Qsim besser abgebildet werden.
- Weiter reicht eine Aussage zur Veränderung der Jährlichkeit der erwarteten Hochwasserspitzen nicht aus, um die Wirkungsräume der künftigen Gefahrenbereiche abzugrenzen oder Dimensionierungsgrössen für bauliche Schutzmassnahmen festzulegen.
- Im Projekt «Klimawandel und Risikokarte» konnte anhand der Pilotgebiete ein konkreter Weg aufgezeigt werden, wie man explizit Hochwasserganglinien unter Berücksichtigung zukünftig veränderter Klimabedingungen für kleine Einzugsgebiete ermitteln kann (siehe Kapitel 4).

Eine flächendeckende Bereitstellung der Informationen auf diesem Detaillierungsgrad wäre grundsätzlich denkbar, ist jedoch mit weiterem zeitlichem und finanziellem Aufwand verknüpft und heute noch nicht flächendeckend für den Kanton verfügbar. Aus diesem Grund ist für die Zwecke der Risikokarte des Kantons Zürich den Werten von PREVAH der Vorzug zu geben.

6 Zusammenfassung

Zielsetzung

Der Kanton Zürich plant, 2025/2026 seine Risikokarte für Hochwasser zu überarbeiten. Mit dem fortschreitenden Klimawandel ist ein Anstieg der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen und damit verbundener Hochwasser sehr wahrscheinlich. Neben dem Anstieg des Schadenpotentials hat die Veränderung der Hochwassergefahr einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis dieser Risikokarte.

Forschungsprogramm Klimawandel und Risikokarte

Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich hat deshalb 2023 das Forschungsprogramm «Klimawandel und Risikoanalyse» lanciert, um eine Methodik und die nötigen hydrologischen Grundlagen für die Berücksichtigung des Klimawandels bei der Risikoanalyse für Hochwasser für den Kanton Zürich zu erarbeiten. **Der hier vorliegende Bericht beschreibt diese Methodik und zeigt anhand dreier Pilotgebiete exemplarisch auf, wie der Klimawandel bei der Hochwasserabschätzung berücksichtigt werden kann.**

Die grosse Herausforderung bei der Mitberücksichtigung des Klimawandels bei der Risikokarte des Kantons Zürich ist, dass sich neben dem Schadenpotential in Zukunft auch die Hochwasserwirkungsbereiche/Gefahrenzonen verändern werden. Für die detaillierte Gefahrenzonenplanung und für die Ausarbeitung von Schutzkonzepten wird an einer zeitaufwändigen Überarbeitung der Gefahrengrundlagen kein Weg vorbeiführen.

Methodik

Für die Erstellung der Risikokarte schlagen wir jedoch vor, statt der Bestimmung des Ausmasses der zukünftigen Hochwasser und deren Wirkungsbereiche, die Veränderung der Jährlichkeiten heutiger Hochwasserereignisse unter zukünftigen klimatischen Bedingungen zu ermitteln. Damit bleiben die Wirkungsbereiche gleich wie in den heutigen Gefahrenkarten, nur deren Jährlichkeit verändert sich. In anderen Worten: Das heutige HQ100 wird in der Zukunft z.B. ein HQ50.

Im Zentrum dieser Methodik stehen also **Intensitäts-Frequenzdiagramme** für seltene Hochwasser (HQ30, HQ100 und HQ300) für Mitte (2040) und Ende des Jahrhunderts (2080). Aus diesen Diagrammen ist dann die Veränderung der Jährlichkeit ablesbar und damit die Berechnung des Risikos möglich.

Im vorliegenden Projekt wurde dazu mit dem konzeptionellen Niederschlag-Abflussmodell Qsim von geo7 die Veränderung der Hochwasser unter Berücksichtigung des Klimaemissions-szenarios RCP 8.5 für die Verhältnisse Mitte und Ende des Jahrhunderts simuliert. **Der Fokus lag dabei auf drei Pilotgebieten mit einer Fläche zwischen 10 und 40 km²,** da diese kleinen Einzugsgebiete einen Grossteil der Kantonsfläche ausmachen und bisher wenig Informationen dazu vorliegen.

Wichtigste Ergebnisse

Zentral bei den Simulationen zukünftiger Hochwasser ist die Berücksichtigung des komplexen Zusammenspiels zwischen zukünftig intensiveren Starkniederschlägen und tendenziell trockeneren Vorfeuchtebedingungen. Die Veränderung der kurzzeitigen Starkniederschläge wurde mit den Starkniederschlagsgenerator von geo7 ermittelt, die Veränderung der Vorfeuchte mit dem Wasserhaushaltsmodell PREVAH der WSL (siehe Lustenberger & Zappa, 2024).

- In allen drei Pilotgebieten steigen die simulierten Hochwasserganglinien unter durchschnittlichen Vorfeuchtebedingungen bis Mitte und v.a. bis Ende des Jahrhunderts an; zum Teil markant.
- Die Zunahme der projizierten kurzzeitigen Starkniederschläge «übersteuert» die Wirkung der tendenziell in Zukunft durchschnittlich trockeneren Vorfeuchtebedingungen.

- Selbst unter überdurchschnittlich trockenen Vorbedingungen waren die projizierten Hochwasserspitzen am Ende des Jahrhunderts in den meisten Gebieten gleich hoch wie heute oder höher.
- Besonders die Hochwasser mit einer geringeren Jährlichkeit (HQ30) reagierten sensitiv auf die Wahl der Vorfeuchtebedingungen.
- Mit Szenariensimulationen war es möglich, Bandbreiten potenzieller Hochwasser für die klimatischen Verhältnisse Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts zu beschreiben.

Die Unsicherheiten der meteorologisch/klimatologischen Eingangsgrößen, der Klimamodelle und des Starkniederschlagsgenerators, der Extremwertstatistik und des verwendeten Niederschlag-Abflussmodells sind gross. Deshalb schlagen wir vor, ähnliche Untersuchungen auch in weiteren Einzugsgebieten durchzuführen.

Modellvergleich

Für eine erste Einordnung wurden unsere Ergebnisse der drei Pilotgebiete mit Simulationen des Modells PREVAH der WSL verglichen (Lustenberger & Zappa, 2024).

Tendenziell waren die simulierten Veränderungen der Hochwasser und der damit verbundenen Veränderung der Jährlichkeit mit dem Modell PREVAH grösser als mit Qsim. Die Abweichungen lagen jedoch innerhalb der mit Qsim unter überdurchschnittlich trockenen und feuchten Vorbedingungen simulierten Bandbreite.

Mögliche Gründe für diese Unterschiede sind

- eine andere raum- zeitlichen Auflösung der Modelle (Qsim: kurzzeitige Gewitterniederschläge und 5 oder 10 m DGM versus PREVAH Tagesniederschläge und 200 m DGM),
- die extremwertstatistischen Auswertungen der Niederschlagsdaten (Qsim: Auswertung einzelner Klimaketten aus dem Starkniederschlagsgenerator, PREVAH: gepoolte Daten aus dem CH2018 Tagesdaten),
- Unterschiede bei den abgebildeten Prozessen (Qsim: ereignisbasiertes Modell für kleine Einzugsgebiete, PREVAH Wasserhaushaltsmodell für grosse Flusseinzugsgebiete).

In Anbetracht der grossen Unsicherheiten beschreiben jedoch **beide Modelle dieselbe Tendenz hin zu in Zukunft häufigeren und intensiveren Hochwassern. Die Ergebnisse stimmen überein mit anderen Arbeiten in der Literatur zur Veränderung der Hochwasser in der Schweiz** (z.B. Projekt: HYDRO-CH2018).

Verwendung für die Risikokarte

Für die Weiterverwendung der Ergebnisse im Zuge der Überarbeitung der Risikokarte des Kantons Zürich sind kantonsweit flächendeckende, in sich konsistente Aussagen zur Veränderung der Jährlichkeit von heutigen 30-, 100-, und 300-jährlichen Hochwassern bis Mitte und Ende des Jahrhunderts nötig. **Für die Überarbeitung der Risikokarte des Kantons Zürich schlagen wir deshalb vor, die flächendeckend vorliegenden Ergebnisse des Modells PREVAH der WSL zu verwenden.**

Verwendung für Gefahrenkarten und Detailstudien

Für andere Anwendungen wie zum Beispiel die Überarbeitung der Gefahrenkarten oder Entwicklung von Schutzkonzepten reicht eine Aussage über die Veränderung der Jährlichkeit heutiger Hochwasser alleine nicht aus. Für diese **Fragestellungen empfehlen wir detaillierte, gebiets-spezifische Simulationen mit einem adäquaten Niederschlag-Abflussmodell wie z.B. Qsim unter Berücksichtigung von Starkniederschlags- und Vorfeuchteszenarien.** Die flächendeckende Bearbeitung auf Detailstufe ist grundsätzlich möglich, die Umsetzung jedoch zeitaufwändig.

Bern, 17. Juni 2025

geo7 AG



Dr. Michael Rinderer
Projektleiter.



Dr. Catherine Berger
Projektleiterin Stv.

7 Referenzierte Dokumente

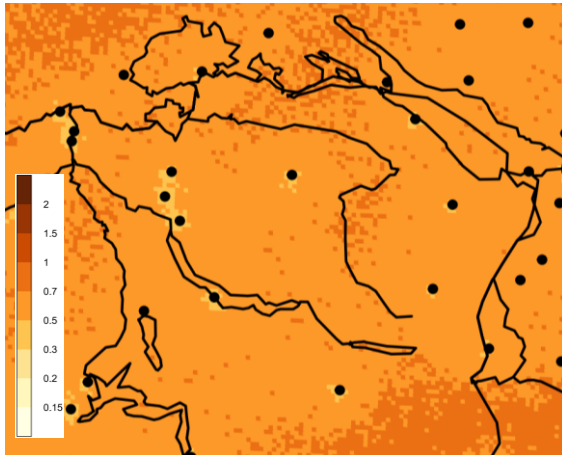
- Ban, N., Schmidli, J., & Schär, C. (2014): Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, S. 7889–7907. <https://doi.org/10.1002/2014JD021478>.
- Bauer V., Scherrer S. (2024): The observed evolution of sub-daily to multi-day heavy precipitation in Switzerland. *Atmospheric Science Letters* 25 (9), S. 1240-1254.
- Brunner M., Swain D., Wood R., Willkofer F., Done J., Gilleland, E., Ludwig R. (2021): An extreme-ness threshold determines the regional response of floods to changes in rainfall extremes. *Nature Communications Earth & Environment* 2 (173), S. 2-11.
- HADES (1992): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Bd. 1. Tafel 2.4. Bern.
- HADES (2023): Karte B04 Extreme Punktniederschläge In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Bern.
- Hantke, R. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete 1:50'000.
- Jäckli H., Kempf T. (1972): Hydrogeologische Karte der Schweiz mit Erläuterungen, Blatt Beromünster, Massstab 1: 100'000.
- Lustenberger F., Zappa M. (2024): Schlussbericht Forschungsprogramm Klimawandel – Teil WSL. Hrsg. Amt für Wasser, Energie, Luft, (AWEL) des Kanton Zürich.
- Lustenberger F., Zappa M., Wechsler T. (2021): Wasserdargebot Kanton Zürich. Hrsg. Amt für Wasser, Energie, Luft, (AWEL) des Kanton Zürich.
- Maidment D., Olivera F., Calver A., Eatherall A., Fraczek W. (1996): Unit hydrograph derived from a spatially distributed velocity field. *Hydrological Processes* 10, S. 831–844.
- MeteoSchweiz (2022): Extremwertanalyse; Karten der Niederschlagsextreme Webseite aufgerufen am 28.11.2024 (<https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/applikationen/ext/climate-extremes-maps.html>).
- Michel A., Sharma V., Lehning M., Huwald H. (2021): Climate change scenarios at hourly time-step over Switzerland from an enhanced temporal downscaling approach. *International Journal of Climatology* 41, S. 3503-3522.
- Naef F., Margreth M., Schmocker-Fackel, P., Scherrer S. (2007): Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarte – ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. *Wasser, Energie, Luft* 99 (3).
- NCCS (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services, Zürich. S. 271.
- Rinderer M., Berger C. (2024): Forschungsprogramm Klimawandel und Risikoanalyse. Teilprojekt 1A: Vorabklärungen zum Klimawandel und zur Hydrologie. Technischer Bericht. Hrsg. Amt für Wasser, Energie, Luft, (AWEL) des Kanton Zürich.
- Ruiz-Villanueva V., Molnar P. (2020) : Past, current, and future changes in floods in Switzerland. Hydro-CH2018 project. Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Switzerland, 89 pp
- Scherrer AG (2007): Hochwasserabschätzung am Altbach / Himmelbach (Kloten) – Hydrologische Grundlagen für den Unterlauf des Altbachs in Kloten und den Himmelbach. Reinach.
- Scherrer AG (2009): Hochwasserabflüsse am Furtbach (Kt. ZH) unter Berücksichtigung der geplanten Erweiterung des Hochwasserrückhaltebeckens Wüeri. Reinach.
- Scherrer AG (2015): Hochwasserschutz Haselbach – Überregionale Studie – Teil Hydrologie. Reinach.

Scherrer S., Fischer E., Posselt R., Liniger M., Croci-Maspoli M., Knutti R. (2016): Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, S. 2626–2637. <https://doi.org/10.1002/2015JD024634>.

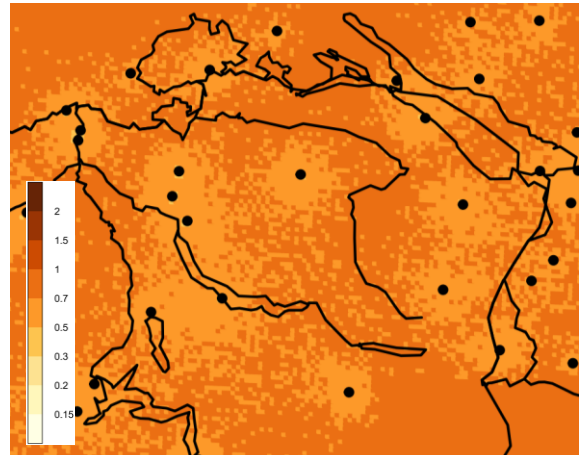
Anhang A

Anhang A.1 Unsicherheiten der extremen Punktniederschläge HADES (2023)

Unsicherheiten der 30-jährlichen
1 h-Starkniederschläge



Unsicherheiten der 100-jährlichen
1 h-Starkniederschläge



Unsicherheiten der 300-jährlichen
1 h-Starkniederschläge

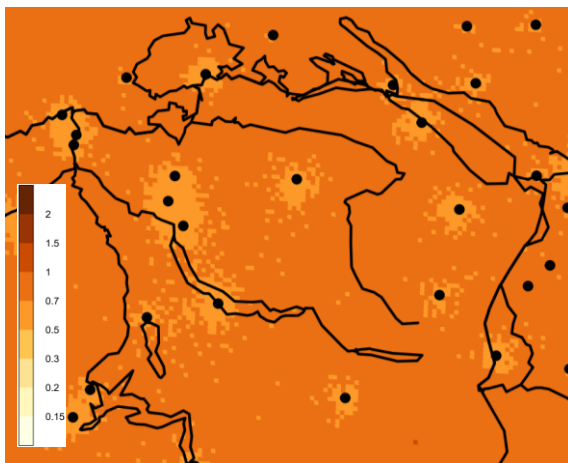


Abbildung 17: Unsicherheiten von seltenen Starkniederschlägen heute aus dem neuen HADES (MeteoSchweiz, 2022) für 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche 1 h-Starkniederschläge. Die Unsicherheiten sind berechnet als Quotient des 90 %-Perzentils im Verhältnis zum Median.

Anhang A.2 Unsicherheiten der projizierten 1 h-Starkniederschläge mit dem Starkniederschlagsgenerator bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Tabelle 6: Projizierte 1 h-Starkniederschläge [mm/h] unterschiedlicher Niederschlagsstationen im Kanton Zürich für REF, 2040 und 2080. Die berechneten Werte basieren auf den Extremwerten an den Stationen (MeteoSchweiz, 2022) und der simulierten Veränderung der Starkniederschläge mit dem Starkniederschlagsgenerator von geo7 für 2040 und 2080. Dargestellt sind Mittelwert und Median und verschiedene Perzentile sowie der Quotient q95/q50, welcher als ein Mass für die Unsicherheit gesehen werden kann.

Station	Jährlichkeit	Werte = [mm/h]		2040								
		1h Extrmwertanalyse		mean	median	q05	q25	q50	q75	q95	max	Quotient q95/q50
KLO	2.3	18.6		19	19	16	18	19	20	22	23	1.2
KLO	10	31		33	33	28	29	33	36	41	43	1.2
KLO	30	41.4		47	45	36	38	45	55	65	71	1.4
KLO	100	55.6		69	63	46	49	63	78	123	132	2.0
KLO	300	71.9		99	83	55	61	83	106	203	260	2.4
REH	2.3	20.4		21	23	17	19	23	23	25	25	1.1
REH	10	33.6		37	38	29	33	38	40	42	51	1.1
REH	30	45.1		51	49	36	40	49	58	67	80	1.4
REH	100	61.1		73	65	44	54	65	87	121	126	1.9
REH	300	82.1		104	86	50	75	86	135	212	212	2.5
SHA	2.3	21		22	21	18	21	21	24	28	32	1.3
SHA	10	33.5		38	37	30	33	37	41	46	52	1.2
SHA	30	42.3		50	50	36	42	50	56	68	71	1.4
SHA	100	52.7		66	67	40	49	67	76	99	104	1.5
SHA	300	65.3		89	90	45	58	90	114	157	157	1.7
SMA	2.3	20		20	20	18	19	20	21	23	25	1.1
SMA	10	33.7		37	36	28	32	36	39	48	50	1.3
SMA	30	45		52	49	36	41	49	60	77	85	1.6
SMA	100	63.6		81	70	46	57	70	96	136	158	1.9
SMA	300	84.9		120	95	55	69	95	145	242	274	2.5
TAE	2.3	22.4		23	24	19	21	24	25	29	29	1.2
TAE	10	33.8		36	36	29	33	36	38	44	46	1.2
TAE	30	41.7		45	42	38	40	42	49	57	64	1.3
TAE	100	51.4		57	53	42	48	53	64	81	95	1.5
TAE	300	64		73	67	45	56	67	82	123	141	1.8
WAE	2.3	25.5		27	26	22	24	26	29	32	32	1.2
WAE	10	41.4		45	46	33	39	46	49	57	58	1.2
WAE	30	53.5		59	60	40	49	60	68	78	84	1.3
WAE	100	68.5		78	71	50	61	71	97	114	120	1.6
WAE	300	84.3		99	82	54	74	82	135	160	171	1.9

Station	Jährlichkeit	Werte = [mm/h]		2080								
		1h Extrmwertanalyse		mean	median	q05	q25	q50	q75	q95	max	Quotient q95/q50
KLO	2.3	18.6		20	20	15	18	20	21	23	23	1.2
KLO	10	31		36	34	28	33	34	40	45	45	1.3
KLO	30	41.4		51	48	42	45	48	55	66	69	1.4
KLO	100	55.6		75	69	54	63	69	81	100	119	1.5
KLO	300	71.9		105	95	65	86	95	116	148	197	1.6
REH	2.3	20.4		22	23	18	20	23	23	26	27	1.2
REH	10	33.6		40	40	32	35	40	42	48	54	1.2
REH	30	45.1		56	56	41	51	56	62	72	79	1.3
REH	100	61.1		81	80	51	74	80	93	117	127	1.5
REH	300	82.1		117	112	62	99	112	137	187	229	1.7
SHA	2.3	21		25	25	20	21	25	28	31	34	1.2
SHA	10	33.5		41	41	34	36	41	45	50	52	1.2
SHA	30	42.3		53	53	39	48	53	58	68	75	1.3
SHA	100	52.7		69	68	40	61	68	75	98	109	1.4
SHA	300	65.3		90	86	38	73	86	101	153	171	1.8
SMA	2.3	20		21	21	18	19	21	23	26	28	1.2
SMA	10	33.7		42	42	30	36	42	48	54	56	1.3
SMA	30	45		63	63	36	49	63	72	88	113	1.4
SMA	100	63.6		105	97	44	73	97	122	184	260	1.9
SMA	300	84.9		168	134	49	104	134	183	361	556	2.7
TAE	2.3	22.4		24	24	20	21	24	25	29	31	1.2
TAE	10	33.8		38	37	34	36	37	40	46	47	1.3
TAE	30	41.7		48	47	42	44	47	52	59	63	1.2
TAE	100	51.4		62	61	45	51	61	71	81	85	1.3
TAE	300	64		80	80	49	59	80	98	115	122	1.4
WAE	2.3	25.5		27	27	22	23	27	28	33	37	1.2
WAE	10	41.4		49	47	35	44	47	55	63	67	1.3
WAE	30	53.5		68	65	45	58	65	79	97	101	1.5
WAE	100	68.5		96	84	58	77	84	116	153	165	1.8
WAE	300	84.3		131	108	71	89	108	157	250	265	2.3

Anhang A.3 Simulierte Hochwasserspitzen mit Qsim

Haselbach

Tabelle 7: Simulierte Hochwasserspitzen für das HQ30, HQ100 und HQ300 für das Pilotgebiet **Haselbach** – Mettmensstetten für die Perioden REF, 2040 und 2080 für die Niederschlagsdauer 3 h unter Berücksichtigung von Vorfeuchteszenarien Q25, Q50, Q75.

Einzugs- gebiet	Periode	HQ30 [m³/s] Vorfeuchteszenario			HQ100 [m³/s] Vorfeuchteszenario			HQ300 [m³/s] Vorfeuchteszenario		
		Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75
Haselbach	REF	9.5	12.1	13.4	14.2	17.4	18.8	20.4	23.9	25.7
	2040	10.6	13.7	15.4	14.4	18.0	20.0	18.7	22.7	24.8
	2080	11.3	15.3	17.4	17.9	22.9	25.3	27.8	33.5	36.4

Altbach

Tabelle 8: Simulierte Hochwasserspitzen für das HQ30, HQ100 und HQ300 für das Pilotgebiet **Altbach** – Bassersdorf für die Perioden REF, 2040 und 2080 für die Niederschlagsdauer 2 h unter Berücksichtigung von Vorfeuchteszenarien Q25, Q50, Q75.

Einzugs- gebiet	Periode	HQ30 [m³/s] Vorfeuchteszenario			HQ100 [m³/s] Vorfeuchteszenario			HQ300 [m³/s] Vorfeuchteszenario		
		Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75
Altbach	REF	13.8	14.6	18.2	24.6	25.5	29.5	33.3	34.7	38.9
	2040	14.6	15.9	19.9	28.1	29.6	34.1	40.7	42.6	47.5
	2080	10.8	16.4	22.1	24.9	32.1	38.5	39.7	48.6	56.1

Furtbach

Tabelle 9: Simulierte Hochwasserspitzen für das HQ30, HQ100 und HQ300 für das Pilotgebiet **Furtbach** – Würenlos für die Perioden REF, 2040 und 2080 für die Niederschlagsdauer 6 h unter Berücksichtigung von Vorfeuchteszenarien Q25, Q50, Q75.

Einzugs- gebiet	Periode	HQ30 [m³/s] Vorfeuchteszenario			HQ100 [m³/s] Vorfeuchteszenario			HQ300 [m³/s] Vorfeuchteszenario		
		Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75	Q25	Q50	Q75
Haselbach	REF	20.0	21.7	26.5	31.1	32.9	38.3	41.7	43.6	49.7
	2040	21.8	24.1	29.1	36.5	38.5	44.5	50.9	53.1	59.9
	2080	19.3	25.5	32.0	35.7	42.6	50.1	54.6	62.3	71.1

Anhang A.4 Vergleich der simulierten Veränderungen der projizierten Starkniederschläge und Hochwasserabflüsse von geo7 und WSL

Tabelle 10: Simulierte Veränderungen der 1-Tages Starkniederschläge im PREVAH bzw. der 1 h-Starkniederschläge an ausgewählten Stationen berechnet mit dem Starkniederschlagsgenerator von geo7 für die Wiederkehrperioden 30, 100 und 300 Jahre und für Mitte und Ende des Jahrhunderts. (Für die Definition der Perimeter WSL_meso, WSL_micro und geo7 siehe Kapitel 4.6).

Einzugs- gebiet	Periode	WP30 [%]			WP100 [%]			WP300 [%]		
		WSL meso	WSL micro	geo7	WSL meso	WSL micro	geo7	WSL meso	WSL micro	geo7
Haselbach	2040	3	3	12	4	3	4	6	4	-2
Haselbach	2080	11	11	21	12	12	23	13	12	28
Altbach	2040	7	7	9	4	3	4	12	12	16
Altbach	2080	18	17	13	12	12	23	23	21	24
Furtbach	2040	6	6	9	6	6	13	5	6	16
Furtbach	2080	15	15	13	16	17	19	17	18	24

Tabelle 11: Simulierte Veränderungen der Hochwasserabflüsse mit PREVAH bzw. Qsim für die Wiederkehrperioden 30, 100 und 300 Jahre und für Mitte und Ende des Jahrhunderts. (Für die Definition der Perimeter WSL_meso, WSL_micro und geo7 siehe Kapitel 4.6).

Einzugs- gebiet	Periode	WP30 [%]			WP100 [%]			WP300 [%]		
		WSL meso	WSL micro	geo7	WSL meso	WSL micro	geo7	WSL meso	WSL micro	geo7
Haselbach	2040	7	9	13	10	13	4	12	18	-5
Haselbach	2080	15	15	27	24	25	32	33	37	40
Altbach	2040	19	14	8	28	20	16	37	26	23
Altbach	2080	19	13	12	30	23	26	42	34	40
Furtbach	2040	21	21	11	28	28	17	36	35	22
Furtbach	2080	19	18	18	28	26	29	36	35	43

Anhang A.5 Vergleich der simulierten Veränderungen der Jährlichkeiten heutiger Hochwasser bis Mitte und Ende des Jahrhunderts von geo7 und WSL

Tabelle 12: Veränderungen der Jährlichkeiten heutiger 30-, 100- und 300-jährlicher Hochwasser bis Mitte und Ende des Jahrhunderts simuliert mit den Modellen PREVAH der WSL und Qsim von geo7. Für die Definition der Perimeter WSL_meso, WSL_micro und geo7 siehe Kapitel 4.6). NA bezeichnet einen nicht plausiblen Wert.

Einzugsgebiet	Periode	Jährlichkeit in der Referenzperiode	WSL meso	WSL micro	geo7
Haselbach	2040	30	22	24	19
Haselbach	2040	100	61	71	85
Haselbach	2040	300	155	188	NA
Haselbach	2080	30	17	13	18
Haselbach	2080	100	40	34	42
Haselbach	2080	300	85	82	111
Altbach	2040	30	17	18	27
Altbach	2040	100	44	45	70
Altbach	2040	300	106	101	154
Altbach	2080	30	17	10	26
Altbach	2080	100	43	23	60
Altbach	2080	300	101	49	119
Furtbach	2040	30	17	20	25
Furtbach	2040	100	45	62	63
Furtbach	2040	300	114	177	147
Furtbach	2080	30	17	12	23
Furtbach	2080	100	46	33	51
Furtbach	2080	300	115	80	106

NA: nicht plausibler Wert

Anhang A.6 Veränderungen der Jährlichkeiten heutiger 30-, 100- und 300-jährlicher Hochwasser bis Mitte und Ende des Jahrhunderts für den gesamten Kanton Zürich aus Lustenberger & Zappa, 2024

Tabelle 13: Prozentuale Veränderung der Wiederkehrwerte (Niederschlag, Abfluss) für die Wiederkehrperiode (WP) 30, 100 und 300 zwischen der Referenzperiode und den Zukunftsperioden (2040, 2080) für die 19 PREVAH-Einzugsgebiete. Die Werte sind auf Basis des aktuellen Wissensstandes der WSL entstanden und sind mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet. Kleinere Unterschiede zwischen Zahlen können auch durch Zufall entstanden sein und haben nicht zwingend eine Aussagekraft oder physikalische Bedeutung. Die WSL rät vor der direkten Wertübernahme ab und empfiehlt stattdessen die Grössenordnung anzuschauen. (Lustenberger & Zappe, 2024)

Variable	Einzugsgebiet	Periode	WP30 [%]	WP100 [%]	WP300 [%]
Niederschlag	4	2040	6	8	10
Niederschlag	4	2080	13	15	16
Niederschlag	9	2040	5	5	4
Niederschlag	9	2080	14	15	16
Niederschlag	30	2040	8	10	12
Niederschlag	30	2080	22	24	26
Niederschlag	46	2040	4	7	9
Niederschlag	46	2080	12	14	17
Niederschlag	70	2040	9	11	13
Niederschlag	70	2080	19	22	24
Niederschlag	125	2040	6	6	5
Niederschlag	125	2080	16	16	16
Niederschlag	161	2040	9	12	14
Niederschlag	161	2080	21	25	29
Niederschlag	163	2040	3	4	6
Niederschlag	163	2080	11	12	13
Niederschlag	187	2040	4	6	8
Niederschlag	187	2080	11	13	15
Niederschlag	199	2040	7	7	7
Niederschlag	199	2080	19	21	22
Niederschlag	205	2040	6	6	5
Niederschlag	205	2080	15	16	17
Niederschlag	233	2040	9	12	15
Niederschlag	233	2080	22	26	29
Niederschlag	245	2040	7	10	12
Niederschlag	245	2080	16	17	18
Niederschlag	257	2040	7	10	12
Niederschlag	257	2080	18	21	23
Niederschlag	262	2040	5	8	11
Niederschlag	262	2080	13	15	16
Niederschlag	263	2040	6	6	5
Niederschlag	263	2080	14	14	14
Niederschlag	276	2040	5	5	5
Niederschlag	276	2080	15	17	19
Niederschlag	298	2040	7	9	11
Niederschlag	298	2080	15	16	17
Niederschlag	306	2040	11	13	15
Niederschlag	306	2080	28	34	40
Abfluss	4	2040	4	6	8
Abfluss	4	2080	11	18	25
Abfluss	9	2040	16	21	26
Abfluss	9	2080	20	33	45
Abfluss	30	2040	20	27	34

Variable	Einzugsgebiet	Periode	WP30 [%]	WP100 [%]	WP300 [%]
Abfluss	30	2080	18	30	43
Abfluss	46	2040	3	4	6
Abfluss	46	2080	12	19	28
Abfluss	70	2040	8	10	13
Abfluss	70	2080	7	10	12
Abfluss	125	2040	19	22	25
Abfluss	125	2080	19	29	40
Abfluss	161	2040	15	21	26
Abfluss	161	2080	15	25	35
Abfluss	163	2040	7	10	12
Abfluss	163	2080	15	24	33
Abfluss	187	2040	6	9	13
Abfluss	187	2080	13	21	30
Abfluss	199	2040	18	25	32
Abfluss	199	2080	17	31	47
Abfluss	205	2040	21	28	36
Abfluss	205	2080	19	28	36
Abfluss	233	2040	12	14	16
Abfluss	233	2080	16	25	34
Abfluss	245	2040	6	5	5
Abfluss	245	2080	10	15	21
Abfluss	257	2040	19	28	37
Abfluss	257	2080	19	30	42
Abfluss	262	2040	2	3	3
Abfluss	262	2080	10	14	18
Abfluss	263	2040	19	22	25
Abfluss	263	2080	19	31	42
Abfluss	276	2040	12	14	16
Abfluss	276	2080	17	28	40
Abfluss	298	2040	8	12	15
Abfluss	298	2080	7	9	11
Abfluss	306	2040	25	33	42
Abfluss	306	2080	29	47	67