

Schlussbericht

Forschungsprogramm Klimawandel

Teil WSL

AWEL, geo7, WSL

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee, und Landschaft WSL



Autoren

Florian Lustenberger, Massimiliano Zappa

26.04.2024

Auftraggeber: **Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich**

Christian Schuler
Projektleiter Gefahrenkartierung

Kontakt AWEL: Christian Schuler
christian.schuler@bd.zh.ch

Auftragnehmer: **Eidg. Forschungsanstalt WSL**
Gebirgshydrologie und Massenbewegungen
Hydrologische Vorhersagen

Dr. Massimiliano Zappa
Gruppenleiter

Florian Lustenberger
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Kontakt WSL: Florian Lustenberger
florian.lustenberger@wsl.ch



Eidg. Forschungsanstalt WSL
Gebirgshydrologie und Massenbewegungen
Hydrologische Vorhersagen
Züricherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf

Versionierung

Version	Datum	Bemerkung
1	19.03.2024	Entwurfsbericht
2	26.04.2024	Änderungen auf Wunsch AWEL, EBP, geo7 eingepflegt und Korrekturen/Ergänzungen seitens WSL gemacht

Schlüsselbegriffe

Im Folgenden werden für diesen Bericht wichtige Begriffe aufgeführt und grob erklärt. Alle Begriffe werden im Fliesstext noch ausführlicher beschrieben. Die Liste soll als Gedankenstütze beim Lesen des Texts dienen, sodass nicht immer die Erstnennung des Begriffs gesucht werden muss.

Abflussszenarien	Abfluss, simuliert mit den CH2018 Klimaszenarien als Input für PREVAH, sowohl für die Referenzperiode als auch für die Zukunftsperioden.
CH2018 Klimaszenarien	Auf MeteoSchweiz Stationen angepasste, simulierte Meteorodaten von Klimamodellen des Nationalen Zentrums für Klimadienstleistungen (NCCS) im Zeitraum von 1981 bis 2099. Diese Daten können in PREVAH für die Erstellung von Abflussszenarien und Szenarien weiterer Variablen (Niederschlag, Bodenfeuchte, Schnee etc.) verwendet werden.
Hydrologisches Modell	In diesem Bericht wird der Begriff für das Modell PREVAH verwendet.
Modellketten	Die CH2018 Klimaszenarien bestehen aus diversen Modellkombinationen (= Modellketten) und decken die Unsicherheit innerhalb eines RCPs ab. Insgesamt gibt es 39 Modellketten. In dieser Studie wurden 5 aus den 18 Ketten des RCPs 8.5 verwendet.
PREVAH	Das verwendete hydrologische Modell zur Abflusssimulation in den Einzugsgebieten.
RCP	Representative Concentration Pathway (Emissionsszenario = künftige Entwicklung der Treibhausgase in der Atmosphäre): RCP 8.5 = keine Emissionsminderung. Das Klima erwärmt sich dabei bis Ende des 21. Jahrhunderts um ca. 4 – 5 °C gegenüber dem vorindustriellen Level.
Referenzperiode	Zeitperiode von 1981 bis 2020. Diese wird als Referenz für den Vergleich der simulierten zukünftigen Abflüsse verwendet.
Wiederkehrperiode (WP)	Zeitperiode in welcher ein Ereignis eines bestimmten Ausmasses im Durchschnitt einmal auftritt (z.B. 100 Jahre → WP100).
Wiederkehrwert	Absolutwert der im Durchschnitt in der entsprechenden Wiederkehrperiode einmal auftritt (z.B. 112 m ³ /s).

Inhaltsverzeichnis

VERSIONIERUNG	II
SCHLÜSSELBEGRIFFE.....	III
INHALTSVERZEICHNIS.....	IV
1 EINLEITUNG UND PROJEKTDESCHEIBUNG	1
2 UNTERSUCHUNGSGBIET.....	2
3 METHODEN.....	3
3.1 DATEN.....	3
3.2 ZEITPERIODEN.....	3
3.3 KLIMASZENARIEN.....	4
3.4 HYDROLOGISCHES MODELL: PREVAH	5
3.5 MODELLIERUNGSPROZESS	6
3.6 KLIMAKETTENREDUKTION	7
3.7 VORFEUCHTEBEDINGUNGEN	7
3.8 EXTREMWERTSTATISTIK.....	9
3.9 UNSICHERHEITEN.....	9
4 RESULTATE.....	11
4.1 NIEDERSCHLAGSEREIGNISSE	11
4.2 VORFEUCHTEBEDINGUNGEN	11
4.3 EXTREMWERTSTATISTIK.....	14
5 EINORDNUNG/VERGLEICH ZUR STUDIE 2021	27
6 SCHLUSSFOLGERUNGEN & AUSBLICK.....	28
LITERATUR	29

1 Einleitung und Projektbeschreibung

Das globale Klima verändert sich kontinuierlich. Menschgemachte Treibhausgasemissionen führen zu global erhöhten Temperaturen in der Atmosphäre (IPCC, 2023, 2014). Am stärksten wird die Erwärmung in der Südschweiz sowie in den höher gelegenen Bergregionen ausfallen. Zudem wird der Temperaturanstieg in den Sommermonaten wahrscheinlich höher sein als in den Wintermonaten (CH2018, 2018). Das wärmere Klima hat Auswirkungen auf diverse natürliche Prozesse, wie zum Beispiel die Intensität und Variabilität von Niederschlagsereignissen (IPCC, 2014). Die Sommer werden generell niederschlagsärmer, die Schneeschmelze fällt bereits früher im Jahr aus und die Gletscher ziehen sich zurück (Bernhard et al., 2013; Bernhard and Zappa, 2012; CH2018, 2018; Huss and Hock, 2015; Zekollari et al., 2019). Dies hat unter anderem Folgen für den Abfluss.

Mit den Klimaszenarien CH2018 (CH2018, 2018) stehen meteorologische Variablen in der Periode 1981 – 2099 zur Verfügung. Basierend auf diesen simulierten Werten und mit hydrologischen Modellen ist es möglich, Veränderungen des zukünftigen Wasserdargebots (sogenannte Abflussszenarien) sowie von anderen Variablen wie z.B. Bodenfeuchte in der Schweiz zu erstellen. Für mesoskalige (> 70 km²) und makroskalige (> 1000 km²) Einzugsgebiete wurde dies im Rahmen von Hydro-CH2018 erarbeitet (BAFU, 2021). Die aufbereiteten Resultate von Hydro-CH2018 und CH2018 stehen auf der Plattform «[Hydro-CH2018: Szenarien bis 2100](#)» des Hydrologischen Atlasses der Schweiz (HADES) öffentlich und interaktiv zur Verfügung.

In dieser Studie wurden die CH2018 Klimaszenarien für 19 Einzugsgebiete im ganzen Kanton Zürich sowie acht ausgewählte kleinere Einzugsgebiete innerhalb des Kantons (geo7-Gebiete) verwendet, um die entsprechenden Niederschlags-, Abfluss- und Bodenfeuchteszenarien zu berechnen. Verwendet wurde eine zeitliche Auflösung von einem Tag. Ziel dieser Studie war es, die Vorfeuchtebedingungen vor Starkniederschlagsereignissen in der Zukunft zu bestimmen sowie die Veränderung der Extremwertstatistik aufzuzeigen. Damit soll für geo7 eine stabile Grundlage für weitere Berechnungen und Analysen geschaffen werden. Die Berechnungen dieser Studie ergänzen zudem die Studie «Entwicklung des Wasserdargebots im Kanton Zürich», die die WSL für das AWEL 2021 umgesetzt hat (Lustenberger et al., 2021), siehe auch Abschnitt 5.

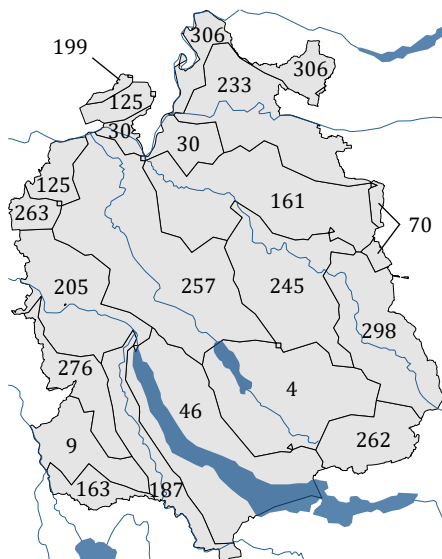
2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Studie beschränkt sich auf den Kanton Zürich. Dafür wurden in erster Linie für das hydrologische Modell (PREVAH, siehe Abschnitt 3.4) vorkalibrierte Einzugsgebiete verwendet. Das Datenset besteht aus 307 Einzugsgebieten, die die gesamte Schweiz abdecken. 19 davon befinden sich innerhalb oder überlappen mit dem Kanton Zürich (Abbildung 1a). Mit der Kantonsfläche überlappende Einzugsgebiete (z.B. Einzugsgebiet 70) wurden für die Simulationen gänzlich betrachtet und für Illustrationszwecke an der Kantonsgrenze abgeschnitten.

Zusätzlich wurden acht kleinere von geo7 vorgeschlagene Einzugsgebiete verwendet (rote Flächen in Abbildung 1b), die dem Vergleich der Analysen von der WSL und geo7 dienen sollen. Die folgenden Einzugsgebiete wurden ausgewählt:

- Altbach – Bassersdorf (2)
- Chatzenbach – Turbenthal (5)
- Dorfbach – Maur (6)
- Furtbach – Würenlos (8)
- Haselbach – Mettmenstetten (10)
- Schwarzenbach – Rickenbach (18)
- Surb – Niederweningen (19)
- Töss – Beicher (20)

(a) 19 PREVAH-Einzugsgebiete



(b) 8 geo7-Gebiete

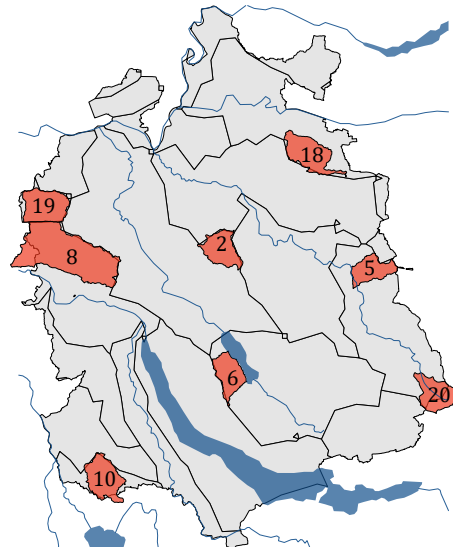


Abbildung 1: Karte der verwendeten Einzugsgebiete im Kanton Zürich. In grau sind die (a) 19 mesoskaligen PREVAH-Einzugsgebiete dargestellt, (b) in rot die acht von geo7 spezifizierten kleineren Einzugsgebiete. Die Zahlen repräsentieren die Gebiets-ID.

3 Methoden

3.1 Daten

Die Daten stehen in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen zur Verfügung und wurden erst für die Simulation im hydrologischen Modell auf dieselbe Auflösung (200 × 200 m) skaliert. Die Datengrundlagen sind grösstenteils identisch zu jenen des CCHydro Projekts (Bernhard and Zappa, 2012).

Folgende Daten wurden verwendet:

- **Meteorologische Messungen** der MeteoSchweiz Stationen, die für die Einzugsgebiete relevant sind, wurden als Input in das hydrologische Modell verwendet. Es wurden Stundenwerte von 1975 – 2020 von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, relativer Luftfeuchte, Niederschlag, Globalstrahlung und Sonnenscheindauer verwendet.
- Das **Digitale Höhenmodell (DEM)** vom Bundesamt für Statistik (GEOSTAT), basierend auf dem Höhenmodell RIMINI mit einer räumlichen Auflösung von 100 m (GEOSTAT, 2014), wurde als Input für das hydrologische Modell verwendet.
- Die **Landnutzung** wurde basierend auf den Daten der Arealstatistik von GEOSTAT 1992/97 mit einer Auflösung von 100 m berücksichtigt. Die Daten wurden in hydrologisch relevanten Kategorien aggregiert (analog zu Bernhard and Zappa, 2012) und als Input für das hydrologische Modell verwendet.
- **Schneemessungen** vom Interkantonalen Mess- und Informationssystem (IMIS) und beobachtete Schneedaten vom WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Form von 1 × 1 km Schneewasseräquivalentkarten wurden zur Kalibration und Validation des hydrologischen Modells verwendet.
- Aus dem **Gletscherinventar** vom Randolph Glacier Inventory 6.0 (RGI Consortium, 2017) wurden die Gletscherlängen, basierend auf dem Jahr 2003 und wie von Brunner *et al.* (2019) vorgeschlagen, für die Zukunft simuliert (siehe Abschnitt 3.4).
- Die **Parameter für das Hydrologische Modell** wurden aus dem CCHydro Projekt (Bernhard and Zappa, 2012) übernommen (siehe Abschnitt 3.4) und den lokalen Bedingungen in den geo7-Gebieten leicht angepasst.
- **Klimaszenarien** CH2018 des Nationalen Zentrums für Klimadienstleistungen (NCCS) wurden für die Erstellung der Abflussszenarien in der Zeitperiode von 1981 bis 2099 verwendet (CH2018, 2018). Es handelt sich dabei um auf die MeteoSchweiz Stationen angepasste, simulierte Meteodaten der Klimamodelle, die anstelle der beobachteten meteorologischen Daten im hydrologischen Modell verwendet wurden. Der detaillierte Beschrieb befindet sich in den Abschnitten 3.3 und 3.5.

3.2 Zeitperioden

Anders als in den meisten Klimastudien wurde hier von den sich überlappenden Standardzeitperioden mit einer Länge von 30 Jahren abgewichen. Um robustere Modellaussagen in der Extremwertstatistik machen zu können wurde der Zeitbereich mit den verfügbaren Klimaszenariendaten (1981 – 2099) in drei, nicht überlappende, 40-Jahresperioden aufgeteilt:

- Referenzperiode (Ref): 1981 – 2020
- Mitte Jahrhundert (**2040**): 2021 – 2060
- Ende Jahrhundert (**2080**): 2061 – 2099

Die Referenzperiode diente dem Vergleich mit den Werten der Zukunftsperioden, sodass relative zukünftige Veränderungen definiert werden konnten.

3.3 Klimaszenarien

In dieser Studie wurden die Klimaszenarien CH2018 des NCCS verwendet (CH2018, 2018). Diese basieren auf dem EURO-CORDEX Datensatz (Jacob et al., 2014), welcher die neusten Fortschritte in der Entwicklung der Klimamodelle abbildet und die Erstellung von transienten Simulationen, basierend auf einer kontinuierlichen Änderung der Treibhausgase, erlaubt. Die Klimaszenarien CH2018 wurden auf Grundlage sogenannter Representative Concentration Pathway (RCP) Szenarien (= Emissionsszenarien; Moss et al., 2010) und dem statistischen Downscaling Ansatz «Quantile Mapping» erstellt (CH2018, 2018). RCPs beschreiben mögliche zukünftige Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre. Meistens wird dabei zwischen drei Varianten unterschieden (RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5), die von Moss *et al.* (2010) definiert wurden. In dieser Studie wurde nur mit der extremen Variante, dem RCP 8.5, gerechnet (nach Absprache mit geo7 und dem A-WEL), da dieses die grössten Veränderungen aufzeigt. RCP 8.5 wurde gewählt, um zu sehen, ob überhaupt relevante Veränderungen auftreten. Wäre dies nicht der Fall, so würde eine Berechnung mit RCP 2.6 und RCP 4.5 keinen Mehrwert bringen. Es ist nicht auszuschliessen, dass zu einem späteren Zeitpunkt auch RCP 2.6 und RCP 4.5 nachberechnet werden.

RCP 8.5

- keine Emissionsminderung (kein Klimaschutz)
- Die Treibhausgasemissionen nehmen weiter zu. Es werden keine expliziten Klimaschutzmassnahmen ergriffen. Das Klima erwärmt sich dabei bis Ende des 21. Jahrhunderts um ca. 4 – 5 °C gegenüber dem vorindustriellen Level. Der Strahlungsantrieb beträgt im Jahr 2100 8.5 W/m² im Vergleich zum vorindustriellen Niveau von 1850 (Akademien der Wissenschaft Schweiz, 2016; NCCS, 2019).

Als Datengrundlagen für hydrologische Modelle stehen beim RCP 8.5 18 Modellketten zur Verfügung (Tabelle 1). Die Modellketten unterscheiden sich im benutzten Regionalen Klimamodell (RCM), dem Globalen Klimamodell (GCM) sowie der räumlichen Auflösung (RES) der Modelle und stellen die Unsicherheit der Klimamodelle dar. Die Modellketten beinhalten Daten für meteorologische Variablen (Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, globale Strahlung, oberflächennaher Wind) für die Periode 1981 – 2099 (die Modellketten beinhalten auch Werte für die Vergangenheit!). Alle Modellketten sind gleich wahrscheinlich.

Tabelle 1: Die 18 Modellketten des RCP 8.5 basierend auf den CH2018 Klimaszenarien (CH2018, 2018). Die Kombination aus TEAM (verantwortliches Institut), RCM (Regionales Klimamodell), GCM (Globales Zirkulationsmodell), RES (räumliche Auflösung) und RCP ("Representative Concentration Pathway" = Emissionsszenario) ergibt den Namen der jeweiligen Modellkette.

TEAM	RCM	GCM	RES	RCP
CLMCOM	CCLM4	HADGEM	EUR44	RCP8.5
CLMCOM	CCLM5	ECEARTH	EUR44	RCP8.5
CLMCOM	CCLM5	HADGEM	EUR44	RCP8.5
CLMCOM	CCLM5	MIROC	EUR44	RCP8.5
CLMCOM	CCLM5	MPIESM	EUR44	RCP8.5
DMI	HIRHAM	ECEARTH	EUR11	RCP8.5
DMI	HIRHAM	ECEARTH	EUR44	RCP8.5
KNMI	RACMO	ECEARTH	EUR44	RCP8.5
KNMI	RACMO	HADGEM	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	CCCMA	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	ECEARTH	EUR11	RCP8.5
SMHI	RCA	ECEARTH	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	HADGEM	EUR11	RCP8.5
SMHI	RCA	HADGEM	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	MIROC	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	MPIESM	EUR11	RCP8.5
SMHI	RCA	MPIESM	EUR44	RCP8.5
SMHI	RCA	NORESM	EUR44	RCP8.5

3.4 Hydrologisches Modell: PREVAH

Für die Simulationen in den Einzugsgebieten wurde das hydrologische Modell PREVAH (PREcipitation Runoff EVApotranspiration HRU related Model; HRU = Hydrological Response Units) verwendet. PREVAH ist ein konzeptionelles, prozessorientiertes Modell (D. Viviroli et al., 2009), das seit der Entwicklung stetig verbessert wurde (Gurtz et al., 1999). Im Rahmen der CCHydro Studie (Bernhard and Zappa, 2012) wurde für PREVAH eine räumlich explizite Version erstellt (Gitterversion). Dabei wurde mit einer Auflösung von 200 m × 200 m gearbeitet (Schattan et al., 2013; Speich et al., 2015; Zappa et al., 2012). In dieser Studie wurde diese Gitterversion von PREVAH verwendet.

PREVAH besteht aus mehreren Modellkomponenten, die Teile des hydrologischen Kreislaufs abdecken (D. Viviroli et al., 2009): Interzeption von Niederschlag, Evapotranspiration, Schneedeckenentwicklung, Schmelze von Gletschern, Bodenwasserspeicherung, Grundwasser, Abflussbildung sowie Abflusskonzentration (siehe auch Abbildung 2). Bei der Kalibration des Modells müssen diverse Modellparameter (Abbildung 2) anhand von gemessenen Abfluss- und Schneedaten kalibriert und validiert werden, was hier aber nicht neu durchgeführt wurde. Alle Modellparameter wurden bereits von Viviroli *et al.* (2009a, 2009b) und Köplin *et al.* (2010) für diverse Teile der Schweiz kalibriert, validiert und mit der Ordinary Kriging Inperpolation regionalisiert. Daraus wurde ein komplettes, gegittertes PREVAH-Parameterset für die Schweiz erstellt (räumliche Auflösung: 2 km × 2 km), das bereits erfolgreich von Bernhard und Zappa (2012), Speich *et al.* (2015) und Lustenberger *et al.* (2021) verwendet wurde. Die Parameter wurden aus diesem Parameterset entnommen. Einige PREVAH-Parameter wurden bei den geo7-Gebieten noch angepasst, um den lokalen Gegebenheiten besser zu entsprechen (Kalibration; gleiche Parameter wie in der Studie von Lustenberger et al. (2021)). Folgende PREVAH-Parameter wurden angepasst: PKOR (Niederschlagsanpassung für Regen), SNOKOR (Niederschlagsanpassung für Schnee), KOH (Zeit für Oberflächenabflussspeicherung), K1H (Zeit für Zwischenabflussspeicherung), SGR (Grenzwert für die Oberflächenabflussbildung), PERC (Versickerungsrate vom ungesättigten zum gesättigten Abflussspeicher). Für weitere Informationen zu den Parametern und zu PREVAH siehe z.B. Viviroli (2007).

In das kalibrierte Modell wurden dann das DEM, die Landnutzungsdaten, das Gletscherinventar und die meteorologischen Daten als Input eingefügt. Die meteorologischen Daten (Stationsdaten) wurden räumlich interpoliert. Dabei wurde die abstandsgewichtete Interpolation (Inverse Distance Weighting – IDW) sowie eine Kombination aus IDW und der höhenabhängigen Regression (Elevation Dependent Regression – EDR), wie von Viviroli *et al.* (2009a) angewandt, verwendet (für einen detaillierten Beschrieb siehe Bernhard and Zappa, 2012).

Die Schneeakkumulation und Schmelze in PREVAH wurde durch die Temperatur und Globalstrahlung bestimmt (D. Viviroli et al., 2009). Damit sich die Schneemengen in den höchsten Gipfeln an steilen Hängen nicht unendlich ansammeln können, wurde, wie bereits für das CCHydro Projekt (Bernhard and Zappa, 2012), die Methode nach Gruber (2007) angewandt. Pro Rasterzelle kann sich dabei nur eine bestimmte Menge Schnee ansammeln. Die Menge ist abhängig von der Neigung des Geländes. Überschüssiger Schnee wird dann, basierend auf dem DEM, in tiefergelegene Gebiete verlagert, wo Schneeschmelze wahrscheinlicher ist (siehe Gruber, 2007).

Das Gletschermodul wurde nach der von Zekollari *et al.* (2019) entwickelten und von Brunner *et al.* (2019) für die hydrologische Modellierung mit PREVAH beschriebenen Methode aufgesetzt. Die Gletscher wurden dabei basierend auf ihren Längen (RGI Consortium, 2017) in kurze (< 1 km) und lange Gletscher (> 1km) aufgeteilt. Die zukünftige Gletscherausdehnung für kurze Gletscher wurde mit dem Global Glacier Evolution Model (GloGEM; Huss and Hock, 2015) modelliert, für lange Gletscher mit der neueren und erweiterten Version von GloGEM (GloGEMflow; Zekollari et al., 2019). Die simulierten Gletscherlängen wurden schlussendlich auf das Modellgitter von PREVAH umgerechnet. Für weitere Informationen siehe Brunner *et al.* (2019) und Zekollari *et al.* (2019).

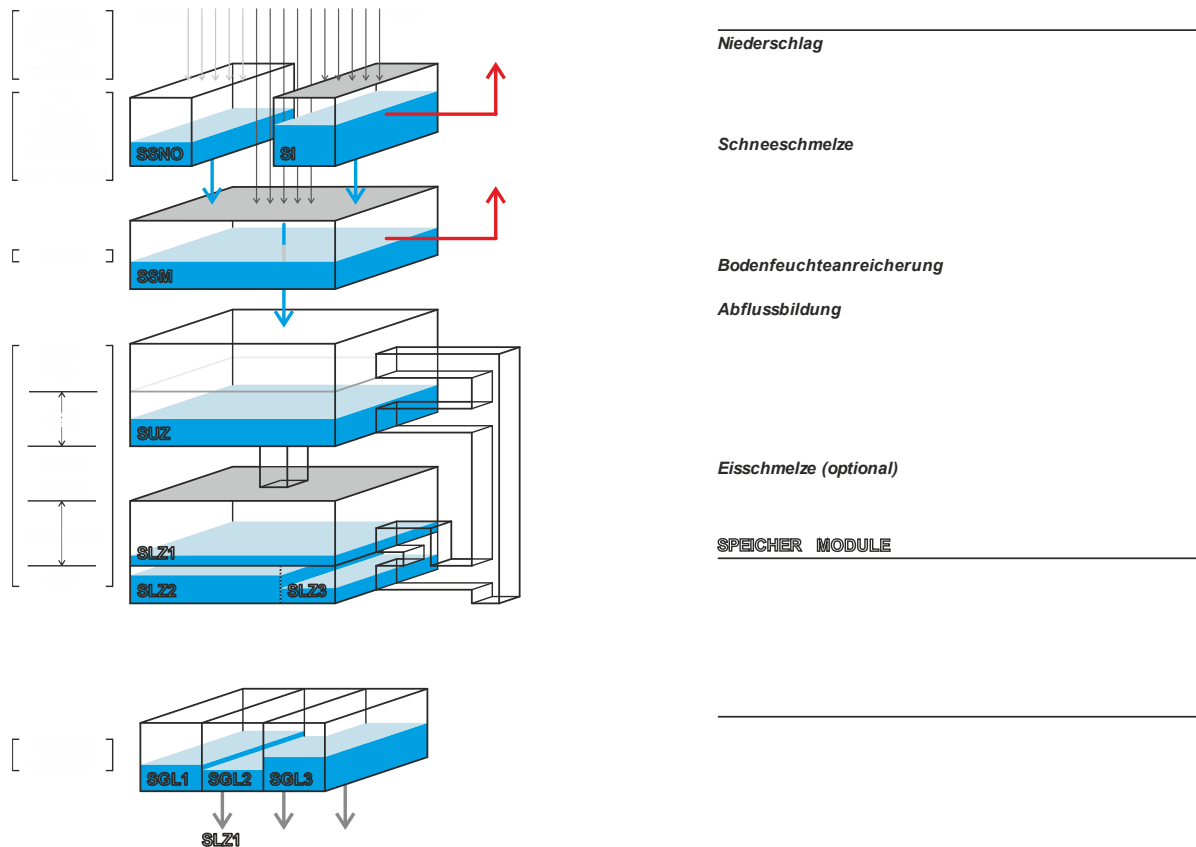


Abbildung 2: Schematische Darstellung des PREVAH-Modells mit den Speichermodulen, den Flüssen und den zu bestimmenden Parametern. Die Grafik wurde in der eingefärbten Version von Viviroli (2007) übernommen und auf Deutsch übersetzt.

PREVAH kann simulierte Werte für alle Speichermodule und Flüsse ausgeben. In dieser Studie wurden der Niederschlag, die Bodenfeuchte sowie der Abfluss verwendet.

3.5 Modellierungsprozess

Kontrollsimulation (CTRL)

- Simulation des Abflusses (Tageswerte) in der Referenzperiode basierend auf gemessenen Meteodaten / Beobachtungen

Für alle Einzugsgebiete wurde das kalibrierte und validierte hydrologische Modell (siehe Abschnitt 3.4) mit den gemessenen Meteodaten für die Zeitperiode von 1975 – 2016 angetrieben. Die Zeit von Oktober 1975 bis Ende 1980 diente als Vorlaufzeit. Die Kontrollsimulation wird typischerweise für die Modellkalibration verwendet und dient auch dem Vergleich mit den Abflussszenarien (siehe Lustenberger et al., 2021). Hier wurde sie zudem für die Auswahl repräsentativer Klimamodellketten (Abschnitt 3.6) und die Bestimmung robusterer Absolutwerte der Bodenfeuchte (Abschnitt 3.7) verwendet.

Szenarien

- Simulationen des Niederschlags, des Abflusses und der Bodenfeuchte (Niederschlagsszenarien, Abflussszenarien, Bodenfeuchteszenarien; Tageswerte) von 1981 – 2099 basierend auf den CH2018 Klimaszenarien-Meteodaten

Für die Berechnung der zukünftigen Werte wurde dasselbe Hydrologische Modell verwendet wie bei der Kontrollsimulation, jedoch mit den Daten der Klimaszenarien von 1981 – 2099 (Abschnitt 3.3) als Input. Dabei ist zu beachten, dass die Szenarien auch für die Referenzperiode (also in der Vergangenheit) erstellt wurden!

3.6 Klimakettenreduktion

Basierend auf den Gebietsniederschlägen in den 19 PREVAH-Einzugsgebieten (Daten MeteoSchweiz) im Kanton Zürich wurde eine Analyse durchgeführt, um die Niederschlagsmenge für ein Niederschlagsereignis mit der Jährlichkeit 2 Jahre in den Einzugsgebieten zu bestimmen. Darauf basierend wurden die Niederschlagszenarien (Simulation mit den CH2018 Daten) aus der Referenzperiode (18 Modellketten) mit der Kontrollsimulation (Simulation mit gemessenen Daten) in der Referenzperiode bezüglich der Anzahl Niederschlagsereignisse pro Einzugsgebiet mit Jährlichkeit ≥ 2 Jahre verglichen (Abbildung 3).

Es wurden fünf Klimaketten für die weitere Bearbeitung in dieser Studie ausgewählt. Die Auswahl erfolgte nach den folgenden Kriterien:

- Der Median muss sich nahe dem Median der CTRL-Kette befinden
- Die Verteilung der Anzahl Ereignisse muss ähnlich der, der CTRL-Kette sein
- Es müssen verschiedene Institute (SMHI = Swedish Meteorological and Hydrological Institute, KNMI = Royal Netherlands Meteorological Institute, DMI = Danish Meteorological Institute, CLMCOM = Climate Limited-area Modelling Community) vertreten sein
- Es müssen verschiedene globale (RCA, RACMO, HIRHAM, CCLM5, CCLM4) und regionale Modelle (NORESM, MPIESM, MIROC, HADGEM, ECEARTH, CCCMA) vertreten sein
- Es müssen beide räumlichen Auflösungen (EUR44, EUR11) vertreten sein

Die folgenden fünf Klimaketten wurden ausgewählt:

- SMHI-RCA-MPIESM-EUR44-RCP85
- SMHI-RCA-ECEARTH-EUR11-RCP85
- DMI-HIRHAM-ECEARTH-EUR44-RCP85
- CLMCOM-CCLM5-MPIESM-EUR44-RCP85
- CLMCOM-CCLM5-HADGEM-EUR44-RCP85

3.7 Vorfeuchtebedingungen

Die simulierte Bodenfeuchte (Tageswerte) aus dem PREVAH Speicher SSM wurden zur Bestimmung der Vorfeuchte am Tag vor einem Niederschlagsereignis mit Jährlichkeit ≥ 2 Jahre verwendet. Die Werte wurden in jedem Einzugsgebiet pro Zeitperiode separiert und jeweils das 25 % Perzentil (eher trocken), das 50 % Perzentil (Median) und das 75 % Perzentil (eher feucht) berechnet (siehe Bsp. für 25 % Perzentil in Abbildung 4). Zwischen der Referenzperiode und den beiden Zukunftsperioden (2040, 2080) wurde dann die prozentuale Veränderung, separiert nach den drei Perzentilen, bestimmt. Es resultiert somit pro Perzentil und Zukunftsperiode ein Wert für die Veränderung in Prozent (Bsp. aus Abbildung 4: Referenzperiode: 93 mm, 2080: 65 mm, Veränderung bis 2080: -30 %).

Um robustere absolute Bodenfeuchtwerte (mm) für die Zukunft zu erhalten, wurde die prozentuale Veränderung der Bodenfeuchte am Tag vor einem Ereignis zwischen Referenzperiode und der jeweiligen Zukunftsperiode mit der Kontrollsimulation (siehe Abschnitt 3.5) verrechnet.

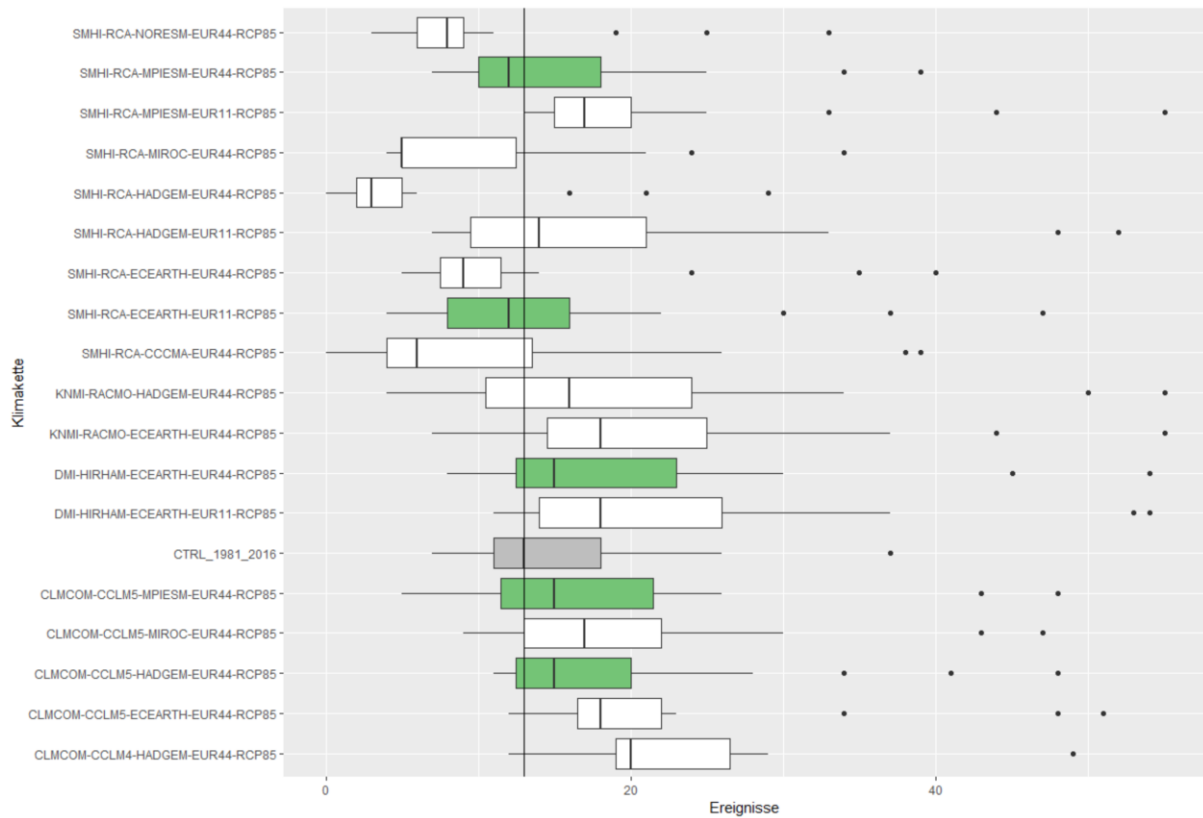


Abbildung 3: 18 Klimamodellketten des RCP 8.5 sowie die Kontrollsimulation (CTRL_1981_2016, grau) für die Referenzperiode. Dargestellt sind Boxplots, die die Verteilung der Anzahl Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeit ≥ 2 Jahre zwischen den 19 PREVAH-Einzugsgebieten aufzeigen. Grün markiert sind diejenigen Klimaketten, die zur weiteren Bearbeitung ausgewählt wurden.

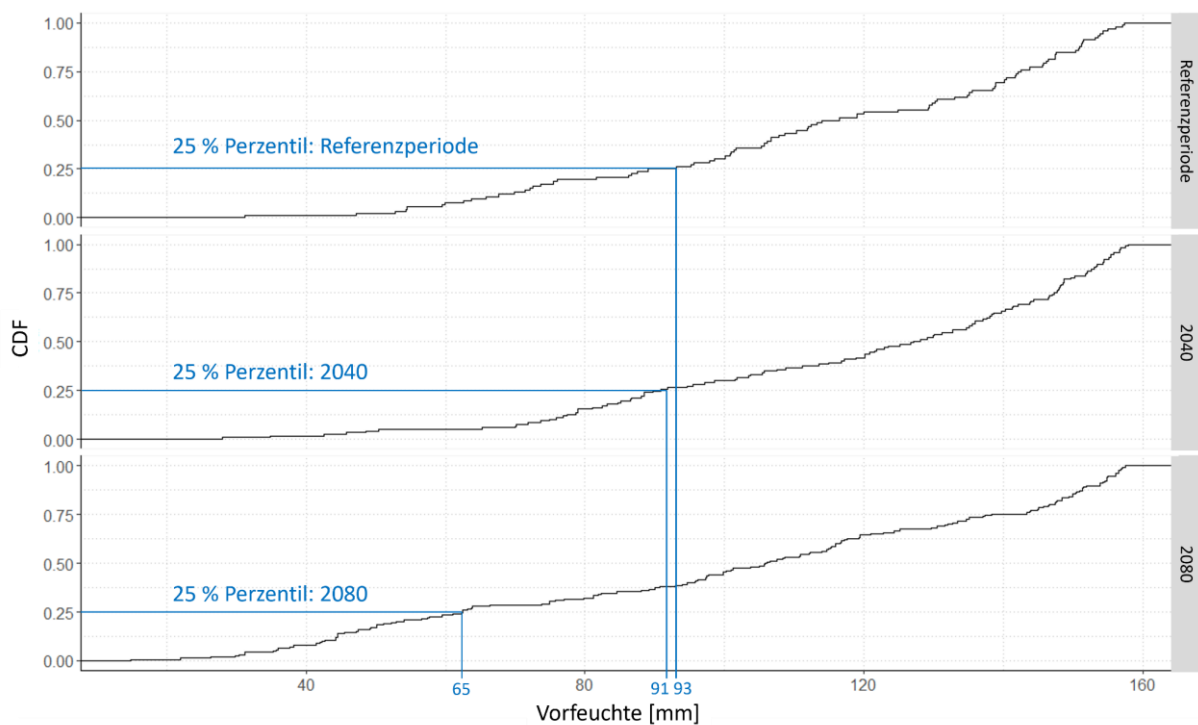


Abbildung 4: Skizze einer Cumulative Density Function (CDF) für die in PREVAH simulierte Bodenfeuchte (SSM) in mm für die Referenzperiode, 2040 und 2080 in einem Beispieleinzugsgebiet. Eingezeichnet ist die Bestimmung des 25 % Perzentils in allen drei Zeitperioden.

3.8 Extremwertstatistik

Die Extremwertstatistik wurde mit dem Ansatz von MeteoSchweiz (MeteoSchweiz, 2024) im Softwarepaket R unter der Verwendung des *gevXgpd* Packages (Frei and Fukutome, 2014) berechnet. Dabei wurde die Blockmaxima Methode verwendet, bei der die Datenreihe in gleich lange und sich nicht überlappende Perioden aufgeteilt wird, und aus jeder Periode der maximale Wert extrahiert wird (Gumbel, 1958). Anhand dieser Extremwerte ist es möglich auf Werte zu schliessen, die in der betrachteten Periode nicht vorgekommen sind (MeteoSchweiz, 2024). Dazu wird ein Ensemble von theoretischen Verteilungsfunktionen, hier mit der Allgemeinen Extremwertverteilung (Englisch: *generalized extreme-value (GEV) distribution*), geschätzt (Jenkinson, 1955; MeteoSchweiz, 2024). Mit der Medianlinie dieser GEV-Verteilungen kann im Frequenzdiagramm (Abbildung 5, Abbildung 11) für eine entsprechende Wiederkehrperiode der jeweilige Wiederkehrwert herausgelesen werden (MeteoSchweiz, 2024).

Die Extremwertstatistik wurde für die PREVAH-Outputs Niederschlag und Abfluss (Tageswerte) für die 19 PREVAH-Einzugsgebiete sowie für die acht geo7-Gebiete für alle drei Zeitperioden und die fünf Klimaketten separat berechnet. Erste Analysen zeigten, dass solche Auswertungen nicht besonders robust sind und unterschiedliche, teils zufällige, Trends aufweisen. Dies ist auf die (zu) kurze Datengrundlage von 40 Jahren zurückzuführen. Stattdessen wurde deshalb auf ein Pooling-Ansatz gesetzt, bei dem die Daten einer Zeitperiode von allen fünf Klimaketten zusammen als Datengrundlage für die Extremwertstatistik genommen wurden. Dies ist legitim, da die Klimaketten unabhängig und gleich wahrscheinlich sind (in Absprache mit Brunner, 2024). So sind im Datensatz 200 anstatt 40 Jahre Datengrundlage enthalten. Ähnliche Ansätze wurden bereits in anderen Studien angewandt (Srivastava et al., 2021; Zanger, 2023). Berechnet wurden die prozentualen Veränderungen der Wiederkehrwerte für die Wiederkehrperioden WP30, WP100 und WP300 zwischen der Referenzperiode und den Zukunftsperioden. Ebenfalls wurden die potenziellen zukünftigen Wiederkehrperioden für WP30, WP100 und WP300 der Referenzperiode berechnet.

3.9 Unsicherheiten

Alle Modelle sind mit unterschiedlichen Unsicherheiten behaftet. Bereits die verwendeten Inputdaten für die Modellierung, die Klimaszenarien, beherbergen sehr grosse Unsicherheiten. Die Klimaketten bestehen aus verschiedenen Modellen, die zu einer Verkettung von Unsicherheiten führen. Da alle Klimaketten gleich wahrscheinlich sind, könnten diese als Unsicherheitsbereich in der Klimamodellierung verwendet werden. In dieser Studie wurden jedoch, zur einfacheren Weiterrechnung (geo7), nur fünf Klimaketten verwendet. Somit ist der Unsicherheitsbereich der Klimamodellierung nicht vollumfänglich quantifizierbar. Hinzu kommt die Unsicherheit der Modellierung mit dem Hydrologischen Modell. Da PREVAH nicht mit Messdaten für jedes Einzugsgebiet neu kalibriert wurde, ist diese nicht vernachlässigbar. Weitere Unsicherheiten entstehen beim Erstellen der Extremwertstatistik, vor allem in den hohen Abflussbereichen (Extrapolationsbereich). Mit dem Pooling der fünf Klimaketten wurde dem etwas entgegengewirkt und robustere Werte erzielt, gleichzeitig jedoch die Möglichkeit entfernt, einen Teil der Unsicherheit mittels Unsicherheitsbereich anzugeben. Auf die Angabe des Unsicherheitsbereichs aus der Extremwertstatistik (2.5 % und 97.5 % Perzentillinien, siehe Abbildung 5) wurde zudem bewusst verzichtet, da dieser nicht die komplette Unsicherheit beinhaltet und somit eine falsche Genauigkeit vortäuschen würde.

Die kombinierte Unsicherheit aus allen Faktoren ist sehr schwierig zu quantifizieren. Dies entspricht einem Forschungsgebiet für sich. Die Unsicherheiten auf den Resultaten in dieser Studie sind jedoch sehr gross, weshalb auch einzelnen simulierten Werten in Tabellen nicht blind vertraut werden darf. Die Werte sind auf Basis des aktuellen Wissensstandes der WSL entstanden. Kleinere Unterschiede zwischen Zahlen können auch durch Zufall entstanden sein und haben

nicht zwingend eine Aussagekraft oder physikalische Bedeutung. Die WSL rät von der direkten Wertübernahme ab und empfiehlt stattdessen die Grössenordnung anzuschauen.

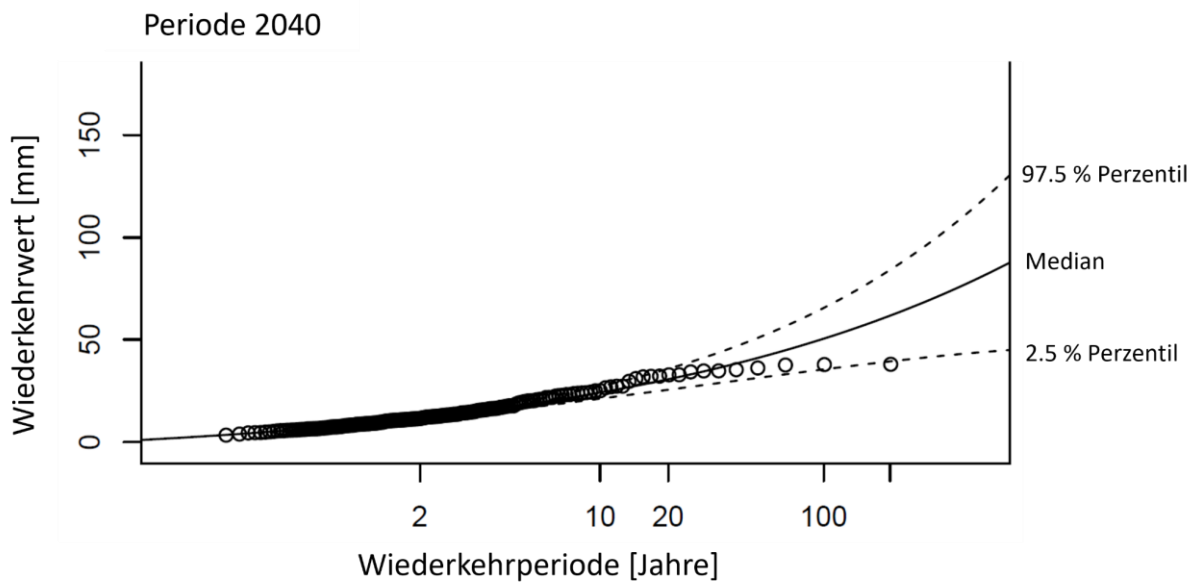


Abbildung 5: Skizze eines Frequenzdiagramms für ein Einzugsgebiet und eine Zeitperiode (2040) mit der Medianlinie und den Perzentillinien (2.5 % und 97.5 %). Die Kreise stellen die simulierte Werte aus den fünf gepoolten Modellketten dar.

4 Resultate

4.1 Niederschlagsereignisse

Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Niederschlagsereignisse mit einer Jährlichkeit von ≥ 2 Jahre (Tageswerte) bis Mitte Jahrhundert (2040) leicht sowie bis Ende Jahrhundert (2080) etwas stärker zunehmen wird (Abbildung 6). Bei einer der gewählten Klimaketten (SMHI-RCA-MPIESM-EUR44-RCP85) kann es, je nach Einzugsgebiet, auch zu einer leichten Reduktion kommen.

4.2 Vorfeuchtebedingungen

Bis 2040 ist in einigen PREVAH-Einzugsgebieten bei allen Perzentilen (vor allem im Süden) mit einer leichten Abnahme der Vorfeuchtebedingungen zu rechnen (im Bereich um -5 %; Abbildung 7). Im nördlichen Teil, jedoch auch in einzelnen Einzugsgebieten weiter im Süden, kann es bei allen Perzentilen auch zu leichten Zunahmen kommen (um +5 %). Bis 2080 ist in allen Einzugsgebieten für die Perzentile 25 % und 50 % eine Abnahme der Vorfeuchte zu erwarten. Beim 25 % Perzentil betragen die Abnahmen zwischen -5 % und -40 %, beim 50 % Perzentil zwischen -5 % und -20 %. Beim 75 % Perzentil ist mit einer durchschnittlichen Abnahme um bis zu -5 % zu rechnen. In wenigen Gebieten jedoch auch mit einer leichten Zunahme um bis zu +5 %. Die Veränderungen in den acht geo7-Gebieten sind sehr ähnlich (Abbildung 8). Unterschiede in den Veränderungen der Vorfeuchtebedingungen zu den 19 PREVAH-Einzugsgebieten sind auf die unterschiedlichen Flächen (kleinere betrachtete Räume) und/oder die angepasste Kalibration (Abschnitt 3.4) zurückzuführen.

Die prozentuale Veränderung der Vorfeuchte zwischen Referenzperiode und den Zukunftsperioden, die absoluten Bodenfeuchtwerte der Kontrollsimulation sowie der Zukunftsperioden für die acht geo7-Gebiete (Tabelle 2, Tabelle 3) wurden für weitere Modellrechnungen an geo7 übergeben.

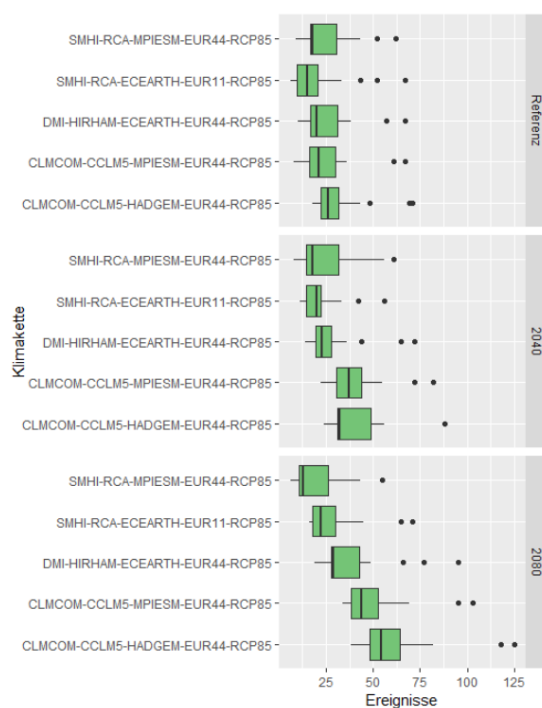


Abbildung 6: Verteilung der Anzahl Niederschlagsereignisse (Tageswerte) mit Jährlichkeit ≥ 2 Jahre pro Einzugsgebiet, separiert nach der Zeitperiode und Klimakette.

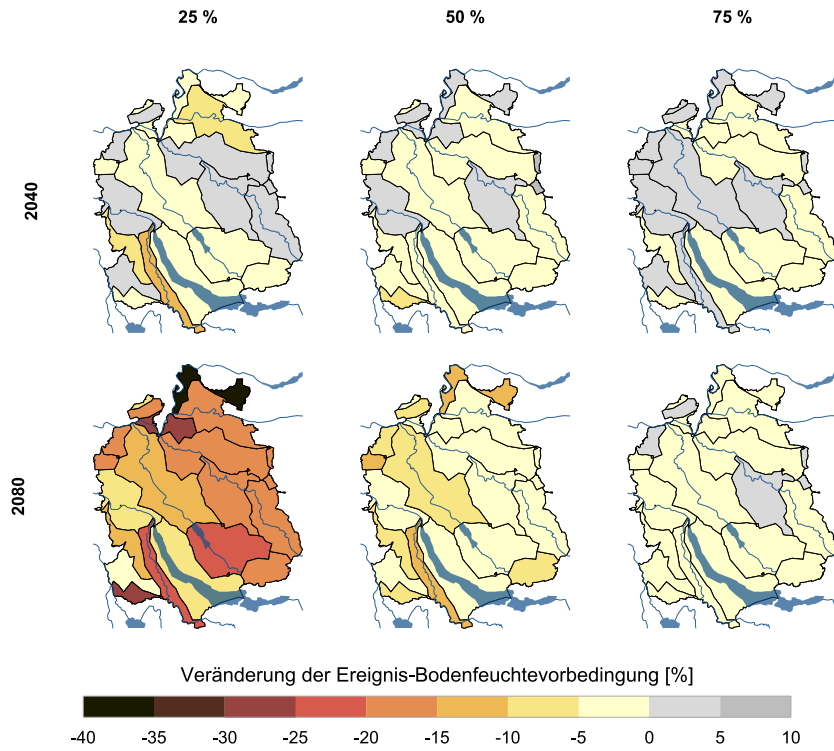


Abbildung 7: Prozentuale Veränderung der Vorfeuchte (Tageswerte) vor einem Niederschlagsereignis mit Jährlichkeit ≥ 2 Jahre zwischen der Referenzperiode und den Zukunftsperioden (2040, 2080) der 19 PREVAH-Einzugsgebiete. Dargestellt sind das 25 % (eher trocken), 50 % (Median) und das 75 % (eher feucht) Perzentil.

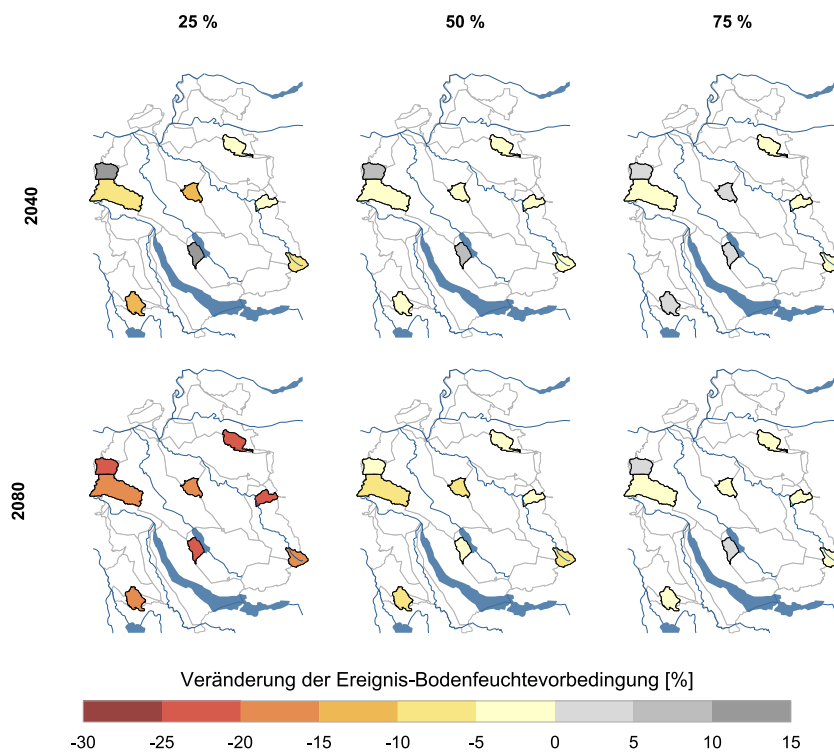


Abbildung 8: Prozentuale Veränderung der Vorfeuchte (Tageswerte) vor einem Niederschlagsereignis mit Jährlichkeit ≥ 2 Jahre zwischen der Referenzperiode und den Zukunftsperioden (2040, 2080) der acht geo7-Einzugsgebiete. Dargestellt sind das 25 % (eher trocken), 50 % (Median) und das 75 % (eher feucht) Perzentil.

Tabelle 2: Simulierte Vorfeuchte am Tag vor einem Niederschlagsereignis mit Jährlichkeit ≥ 2 Jahre als prozentuale Veränderung zwischen der Referenzperiode und den Zukunftsperioden (2040, 2080) sowie als Absolutwerte für die Zukunftsperioden für die acht geo7-Gebiete (siehe Abbildung 1b). Dargestellt sind die 25 % (eher trocken), 50 % (Median) und 75 % (eher feucht) Perzentile. 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.

EZG	Periode	Prozentuale Veränderung			Absolute Werte		
		q25 [%]	q50 [%]	q75 [%]	q25 [mm]	q50 [mm]	q75 [mm]
10	2040	-7.5	-4.2	-0.2	73.4	95.7	110.3
18	2040	13	6	3.3	117.4	124.1	139.9
19	2040	11.7	11.6	9.3	82.5	97	113
2	2040	-3.7	-2.2	-0.8	140.8	148.9	172.3
20	2040	-8.4	-1.5	-0.1	70.7	86.1	95.8
5	2040	-11.2	-0.4	0.3	66	91.9	106.5
6	2040	-2.8	-2.6	0.2	99.8	110.6	128.2
8	2040	-2.5	-1.2	-0.7	106.5	116.3	138.4
10	2080	-15.5	-4.8	-0.4	67	95.1	110.1
18	2080	-21.3	-1.5	0.3	81.8	115.3	135.8
19	2080	-20.8	0.5	8.4	58.5	87.3	112.1
2	2080	-24.6	-7	-1.1	110.2	141.5	171.8
20	2080	-15.1	-6.8	-1	65.5	81.5	94.9
5	2080	-18.5	-8.3	-0.5	60.6	84.6	105.7
6	2080	-15.5	-5.9	-0.5	86.8	106.9	127.3
8	2080	-20.9	-4.1	-0.8	86.4	112.9	138.3

Tabelle 3: Simulierte Vorfeuchte am Tag vor einem Niederschlagsereignis mit Jährlichkeit ≥ 2 Jahre in der Kontrollsimulation (Referenzperiode) als Absolutwert für die acht geo7-Gebiete (siehe Abbildung 1b). Dargestellt sind die maximale Bodenfeuchte (für eine potenzielle Berechnung der nutzbaren Feldkapazität) sowie die 25 % (eher trocken), 50 % (Median) und 75 % (eher feucht) Perzentile. 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.

EZG	Max. Bodenfeuchte	Vorfeuchte Kontrollsimulation		
		q25 [mm]	q50 [mm]	q75 [mm]
10	115.2	79.3	99.9	110.5
18	147.5	103.9	117.1	135.4
19	113.4	73.9	86.9	103.4
2	188.3	146.2	152.2	173.7
20	100.4	77.2	87.4	95.9
5	116.2	74.3	92.3	106.2
6	135.1	102.7	113.6	127.9
8	151.7	109.2	117.7	139.4

4.3 Extremwertstatistik

Für alle Wiederkehrperioden (WP30, WP100, WP300) und beide Zeitperioden (2040, 2080) ist für Niederschlag und Abfluss in allen 19 PREVAH-Einzugsgebieten eine Zunahme der Wiederkehrwerte zu erwarten (Abbildung 9, Tabelle 4). Beim Niederschlag bleiben die Veränderungen bis 2040 noch moderat mit Werten um ca. + 5 % bei WP30 und +15 % bei WP300, wobei im Südwesten bei allen Wiederkehrperioden leicht niedrigere positive Veränderungen zu erwarten sind. Bis 2080 ist beim Niederschlag eine stärkere positive Veränderung zu erwarten. Bei WP30 um ca. +20 %, bei WP300 um ca. +25 %. Höhere Werte sind ganz im Nordosten des Kantons zu erwarten. Beim Abfluss zeigt der Südosten des Kantons kleinere Veränderungen an als der Rest des Kantonsgebiets. Bis 2040 bei WP30 sind dies Werte im Bereich um +5 % im Vergleich zu Werten um ca. +20 %. Bis 2080 bei WP300 sind in fast allen Gebieten Veränderungen im Bereich von + 30 % zu erwarten.

Die Veränderungen in den acht geo7-Gebieten sind sehr ähnlich (Abbildung 10, Tabelle 5). Unterschiede in den Veränderungen der Wiederkehrwerte zu den 19 PREVAH-Einzugsgebieten sind auf die unterschiedlichen Flächen (kleinere betrachtete Räume) und/oder die angepasste Kalibration (Abschnitt 3.4) zurückzuführen.

Anhand von Frequenzdiagrammen wurden die neuen Wiederkehrperioden für die Zeitperioden 2040 und 2080 bestimmt (siehe Beispiel für Abfluss des Einzugsgebiets 233 in Abbildung 11, vgl. auch Abbildung 1a). Darin sind die Veränderungen der Wiederkehrperioden 30, 100 und 300 Jahre (WP30, WP100, WP300) sichtbar. Für alle Wiederkehrperioden ist in allen 19 PREVAH-Einzugsgebieten für Niederschlag und Abfluss bis 2040 und 2080 mit reduzierten Wiederkehrperioden zu rechnen (Abbildung 12a). Beim Niederschlag sinkt WP300 durchschnittlich im Kanton Zürich bis 2040 auf ca. WP135, bis 2080 sogar auf bis WP63 (Tabelle 6). WP100 sinkt durchschnittlich bis 2040 auf WP53 und bis 2080 auf WP28, während WP30 bis 2040 auf WP19 und bis 2080 auf WP11 sinkt. Beim Abfluss sind zwischen 2040 und 2080 weniger starke Veränderungen zu erwarten. WP300 sinkt durchschnittlich bis 2040 auf WP154 und bis 2080 auf WP112. WP100 sinkt durchschnittlich bis 2040 auf WP58 und bis 2080 auf WP47, während WP30 bis 2040 auf WP20 und bis 2080 auf WP19 sinkt. Die Werte der einzelnen Einzugsgebiete können Tabelle 7 entnommen werden. Die Werte in den Tabellen sind auf Basis des aktuellen Wissensstandes der WSL entstanden und sind mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet (siehe Abschnitt 3.9). Kleinere Unterschiede zwischen Zahlen können auch durch Zufall entstanden sein und haben nicht zwingend eine Aussagekraft oder physikalische Bedeutung. Die WSL rät von der direkten Wertübernahme ab und empfiehlt stattdessen die Grössenordnung anzuschauen.

Die Durchschnittswerte aus den acht Geo7-Gebieten sind sehr ähnlich zu den 19 PREVAH-Einzugsgebieten (Tabelle 6). Einzig beim Abfluss bis 2040 für WP100 und WP300 sind etwas grössere Unterschiede vorhanden (Reduktion auf WP50 und WP122). Die Verteilung über die acht Einzugsgebiete unterscheidet sich leicht zu den 19 PREVAH-Einzugsgebieten, vor allem beim Abfluss bis 2040 für WP300 (Abbildung 12b). Dort sind eher tiefere Wiederkehrperioden zu erwarten (vgl. auch Tabelle 6). Die Werte der einzelnen Einzugsgebiete können Tabelle 8 entnommen werden. Unterschiede in den Veränderungen der Wiederkehrwerte zu den 19 PREVAH-Einzugsgebieten sind auf die unterschiedlichen Flächen (kleinere betrachtete Räume) und/oder die angepasste Kalibration (Abschnitt 3.4) zurückzuführen. Die Unterschiede in den durchschnittlichen Veränderungen der WPs sind auch auf die kleine Einzugsgebietsanzahl zurückzuführen (Kantonaler Durchschnitt vs. Durchschnitt aus einzelnen kleinen Einzugsgebieten). Die Werte in den Tabellen sind auf Basis des aktuellen Wissensstandes der WSL entstanden und sind mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet (siehe Abschnitt 3.9). Kleinere Unterschiede zwischen Zahlen können auch durch Zufall entstanden sein und haben nicht zwingend eine Aussagekraft oder physikalische Bedeutung. Die WSL rät von der direkten Wertübernahme ab und empfiehlt stattdessen die Grössenordnung anzuschauen.

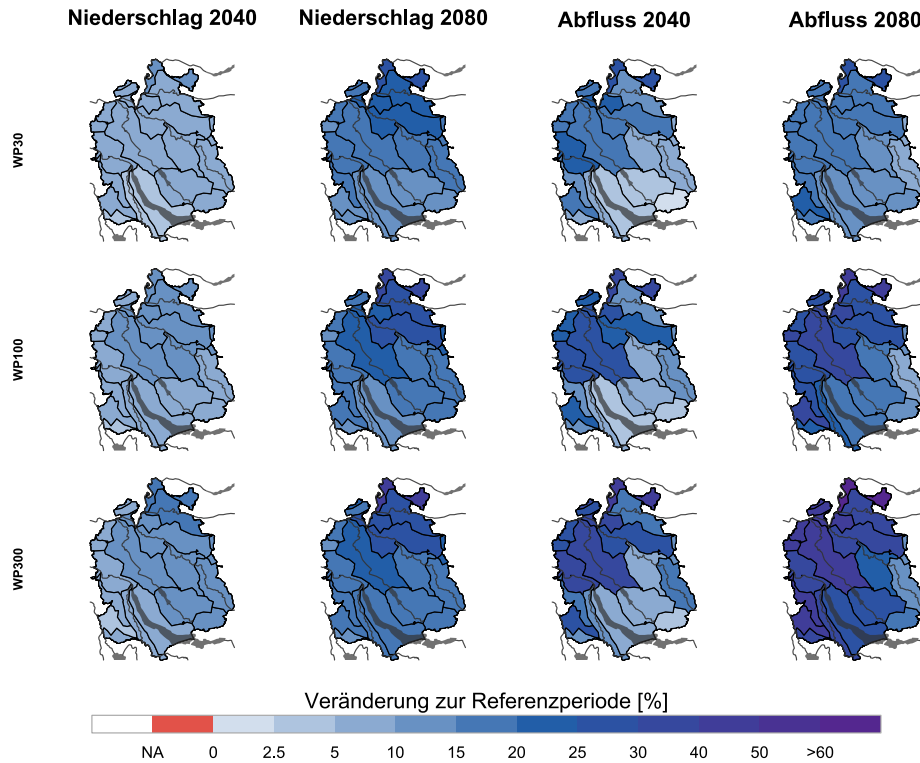


Abbildung 9: Prozentuale Veränderung der Wiederkehrwerte (Niederschlag, Abfluss) für die Wiederkehrperioden (WP) 30, 100 und 300 zwischen der Referenzperiode und den Zukunftsperioden (2040, 2080) für die 19 PREVAH-Einzugsgebiete.

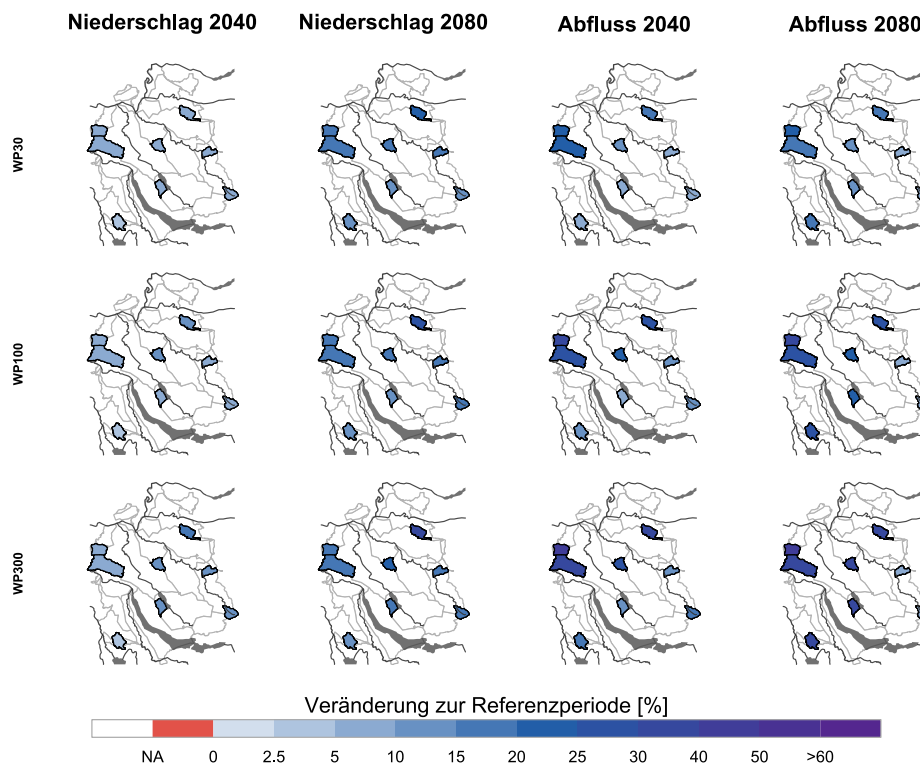


Abbildung 10: Prozentuale Veränderung der Wiederkehrwerte (Niederschlag, Abfluss) für die Wiederkehrperioden (WP) 30, 100 und 300 zwischen der Referenzperiode und den Zukunftsperioden (2040, 2080) für die acht geo7-Gebiete.

Tabelle 4: Prozentuale Veränderung der Wiederkehrwerte (Niederschlag, Abfluss) für die Wiederkehrperioden (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.

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
Abfluss	30	2080	18	30	43
Abfluss	46	2040	3	4	6

Variable	Einzugsgebiet	Periode	WP30 [%]	WP100 [%]	WP300 [%]
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

Tabelle 5: Prozentuale Veränderung der Wiederkehrwerte (Niederschlag, Abfluss) für die Wiederkehrperioden (WP) 30, 100 und 300 zwischen der Referenzperiode und den Zukunftsperioden (2040, 2080) für die acht geo7-Gebiete. 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 von der direkten Wertübernahme ab und empfiehlt stattdessen die Grössenordnung anzuschauen.

Variable	Einzugsgebiet	Periode	WP30 [%]	WP100 [%]	WP300 [%]
Niederschlag	2	2040	7	10	12
Niederschlag	2	2080	17	19	21
Niederschlag	5	2040	7	9	11
Niederschlag	5	2080	16	17	17
Niederschlag	6	2040	5	8	10
Niederschlag	6	2080	13	14	15
Niederschlag	8	2040	6	6	6
Niederschlag	8	2080	15	17	18
Niederschlag	10	2040	3	3	4
Niederschlag	10	2080	11	12	12
Niederschlag	18	2040	9	12	15
Niederschlag	18	2080	24	29	34
Niederschlag	19	2040	6	7	6
Niederschlag	19	2080	16	17	18
Niederschlag	20	2040	6	9	13
Niederschlag	20	2080	14	16	17
Abfluss	2	2040	14	20	26
Abfluss	2	2080	13	23	34
Abfluss	5	2040	9	12	14
Abfluss	5	2080	6	7	8
Abfluss	6	2040	7	9	11
Abfluss	6	2080	13	22	30
Abfluss	8	2040	21	28	35
Abfluss	8	2080	18	26	35
Abfluss	10	2040	9	13	18
Abfluss	10	2080	15	25	37
Abfluss	18	2040	19	27	35
Abfluss	18	2080	17	28	39
Abfluss	19	2040	22	32	41
Abfluss	19	2080	21	34	48
Abfluss	20	2040	7	11	15
Abfluss	20	2080	7	8	8

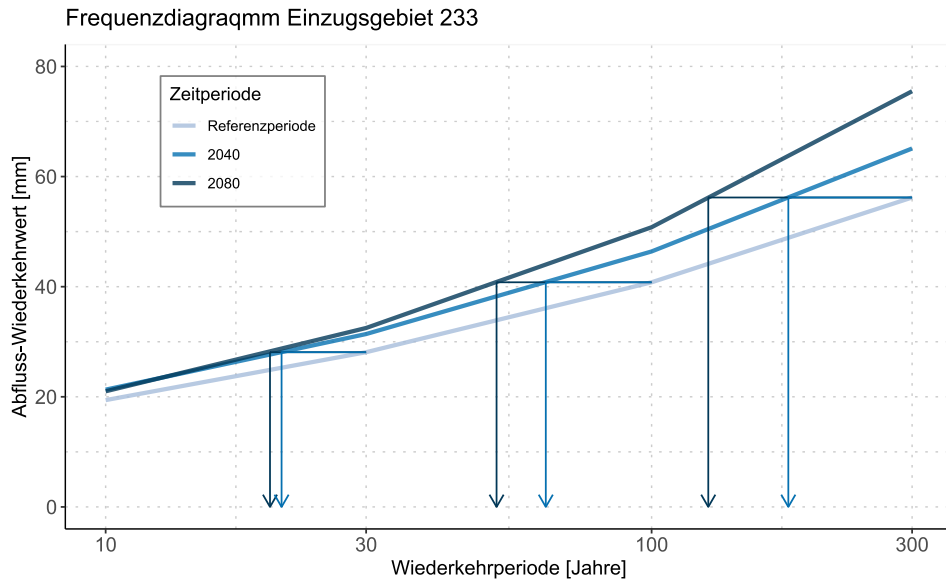


Abbildung 11: Frequenzdiagramm am Beispiel des Einzugsgebiets 233 aus den 19 PREVAH-Einzugsgebieten. Dargestellt sind die Kurven der Referenzperiode und der beiden Zukunftsperioden 2040, 2080. Die Pfeile zeigen die «Linksverschiebung», mit der die neuen Wiederkehrperioden herausgelesen werden können (dargestellt für 30, 100 und 300 Jahre). Beachte, dass die x-Achse logarithmisch dargestellt ist.

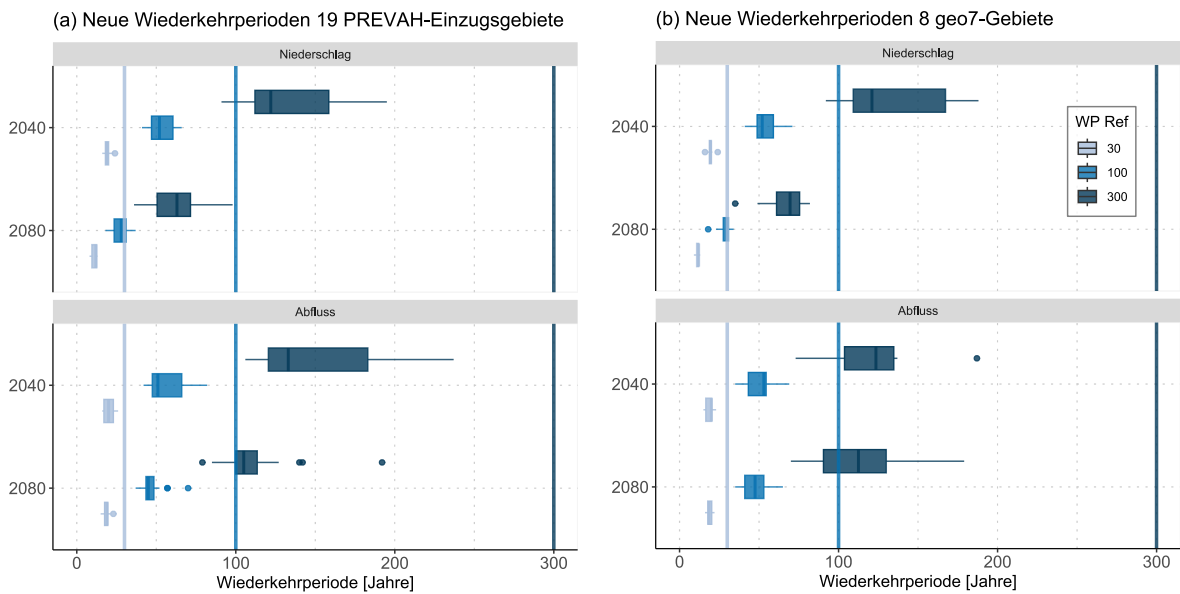


Abbildung 12: Neue Wiederkehrperioden für 30, 100 und 300 Jährliche Ereignisse (der Referenzperiode= WP Ref) und die Zukunftsperioden 2040 und 2080 in den (a) 19 PREVAH-Einzugsgebieten und den (b) acht geo7-Gebieten. Dargestellt sind jeweils die Variablen Abfluss und Niederschlag. Die Boxplots repräsentieren die Verteilung der Einzugsgebiete. Die vertikalen Linien repräsentieren die Wiederkehrperioden der Referenzperiode.

Tabelle 6: Durchschnittliche neue Wiederkehrperioden (WP) der 19 PREVAH-Einzugsgebiete sowie der acht geo7-Gebiete für die WPs der Referenzperiode von 30, 100 und 300 Jahren für die Perioden 2040 und 2080, separiert nach Niederschlag und Abfluss. 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 von der direkten Wertübernahme ab und empfiehlt stattdessen die Grössenordnung anzuschauen.

Variable	Einzugsgebiete	Periode	WP Referenzperiode [Jahre]	Durchschnittliche WP Neu [Jahre]
Niederschlag	PREVAH	2040	30	19
Niederschlag	PREVAH	2040	100	53
Niederschlag	PREVAH	2040	300	135
Niederschlag	PREVAH	2080	30	11
Niederschlag	PREVAH	2080	100	28
Niederschlag	PREVAH	2080	300	63
Abfluss	PREVAH	2040	30	20
Abfluss	PREVAH	2040	100	58
Abfluss	PREVAH	2040	300	154
Abfluss	PREVAH	2080	30	19
Abfluss	PREVAH	2080	100	47
Abfluss	PREVAH	2080	300	112
Niederschlag	geo7	2040	30	20
Niederschlag	geo7	2040	100	54
Niederschlag	geo7	2040	300	135
Niederschlag	geo7	2080	30	11
Niederschlag	geo7	2080	100	28
Niederschlag	geo7	2080	300	66
Abfluss	geo7	2040	30	19
Abfluss	geo7	2040	100	50
Abfluss	geo7	2040	300	122
Abfluss	geo7	2080	30	19
Abfluss	geo7	2080	100	48
Abfluss	geo7	2080	300	116

Tabelle 7: Neue Wiederkehrperioden (WP) für die WPs der Referenzperiode von 30, 100 und 300 Jahren für die Perioden 2040 und 2080, separiert nach den 19 PREVAH-Einzugsgebieten sowie nach Niederschlag und Abfluss. 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 von der direkten Wertübernahme ab und empfiehlt stattdessen die Grössenordnung anzuschauen.

Variable	Einzugsgebiet	Periode	WP Referenzperiode [Jahre]	WP Neu [Jahre]
Niederschlag	4	2040	30	20
Niederschlag	4	2040	100	51
Niederschlag	4	2040	300	115
Niederschlag	4	2080	30	12
Niederschlag	4	2080	100	28
Niederschlag	4	2080	300	63
Niederschlag	9	2040	30	20
Niederschlag	9	2040	100	62
Niederschlag	9	2040	300	176
Niederschlag	9	2080	30	12
Niederschlag	9	2080	100	29
Niederschlag	9	2080	300	66
Niederschlag	30	2040	30	18
Niederschlag	30	2040	100	48
Niederschlag	30	2040	300	120
Niederschlag	30	2080	30	9
Niederschlag	30	2080	100	22
Niederschlag	30	2080	300	50
Niederschlag	46	2040	30	22
Niederschlag	46	2040	100	56
Niederschlag	46	2040	300	128
Niederschlag	46	2080	30	13
Niederschlag	46	2080	100	31
Niederschlag	46	2080	300	67
Niederschlag	70	2040	30	17
Niederschlag	70	2040	100	47
Niederschlag	70	2040	300	115
Niederschlag	70	2080	30	11
Niederschlag	70	2080	100	26
Niederschlag	70	2080	300	60
Niederschlag	125	2040	30	19
Niederschlag	125	2040	100	61
Niederschlag	125	2040	300	184
Niederschlag	125	2080	30	11
Niederschlag	125	2080	100	31
Niederschlag	125	2080	300	80
Niederschlag	161	2040	30	17
Niederschlag	161	2040	100	41
Niederschlag	161	2040	300	91
Niederschlag	161	2080	30	9
Niederschlag	161	2080	100	20
Niederschlag	161	2080	300	39
Niederschlag	163	2040	30	24
Niederschlag	163	2040	100	66
Niederschlag	163	2040	300	158
Niederschlag	163	2080	30	13
Niederschlag	163	2080	100	35
Niederschlag	163	2080	300	79
Niederschlag	187	2040	30	23
Niederschlag	187	2040	100	60
Niederschlag	187	2040	300	139
Niederschlag	187	2080	30	13
Niederschlag	187	2080	100	32
Niederschlag	187	2080	300	70

Variable	Einzugsgebiet	Periode	WP Referenzperiode [Jahre]	WP Neu [Jahre]
Niederschlag	199	2040	30	18
Niederschlag	199	2040	100	54
Niederschlag	199	2040	300	149
Niederschlag	199	2080	30	9
Niederschlag	199	2080	100	23
Niederschlag	199	2080	300	51
Niederschlag	205	2040	30	20
Niederschlag	205	2040	100	64
Niederschlag	205	2040	300	187
Niederschlag	205	2080	30	12
Niederschlag	205	2080	100	34
Niederschlag	205	2080	300	84
Niederschlag	233	2040	30	17
Niederschlag	233	2040	100	42
Niederschlag	233	2040	300	95
Niederschlag	233	2080	30	9
Niederschlag	233	2080	100	21
Niederschlag	233	2080	300	42
Niederschlag	245	2040	30	18
Niederschlag	245	2040	100	45
Niederschlag	245	2040	300	103
Niederschlag	245	2080	30	10
Niederschlag	245	2080	100	25
Niederschlag	245	2080	300	57
Niederschlag	257	2040	30	18
Niederschlag	257	2040	100	47
Niederschlag	257	2040	300	110
Niederschlag	257	2080	30	10
Niederschlag	257	2080	100	24
Niederschlag	257	2080	300	50
Niederschlag	262	2040	30	20
Niederschlag	262	2040	100	52
Niederschlag	262	2040	300	114
Niederschlag	262	2080	30	13
Niederschlag	262	2080	100	31
Niederschlag	262	2080	300	68
Niederschlag	263	2040	30	20
Niederschlag	263	2040	100	64
Niederschlag	263	2040	300	195
Niederschlag	263	2080	30	13
Niederschlag	263	2080	100	37
Niederschlag	263	2080	300	98
Niederschlag	276	2040	30	19
Niederschlag	276	2040	100	59
Niederschlag	276	2040	300	159
Niederschlag	276	2080	30	12
Niederschlag	276	2080	100	27
Niederschlag	276	2080	300	59
Niederschlag	298	2040	30	19
Niederschlag	298	2040	100	50
Niederschlag	298	2040	300	122
Niederschlag	298	2080	30	12
Niederschlag	298	2080	100	30
Niederschlag	298	2080	300	73
Niederschlag	306	2040	30	16
Niederschlag	306	2040	100	42
Niederschlag	306	2040	300	103
Niederschlag	306	2080	30	8
Niederschlag	306	2080	100	18
Niederschlag	306	2080	300	36
Abfluss	4	2040	30	25

Variable	Einzugsgebiet	Periode	WP Referenzperiode [Jahre]	WP Neu [Jahre]
Abfluss	4	2040	100	73
Abfluss	4	2040	300	195
Abfluss	4	2080	30	20
Abfluss	4	2080	100	49
Abfluss	4	2080	300	111
Abfluss	9	2040	30	18
Abfluss	9	2040	100	51
Abfluss	9	2040	300	132
Abfluss	9	2080	30	17
Abfluss	9	2080	100	42
Abfluss	9	2080	300	99
Abfluss	30	2040	30	17
Abfluss	30	2040	100	45
Abfluss	30	2040	300	114
Abfluss	30	2080	30	18
Abfluss	30	2080	100	45
Abfluss	30	2080	300	105
Abfluss	46	2040	30	26
Abfluss	46	2040	100	78
Abfluss	46	2040	300	207
Abfluss	46	2080	30	19
Abfluss	46	2080	100	43
Abfluss	46	2080	300	90
Abfluss	70	2040	30	23
Abfluss	70	2040	100	68
Abfluss	70	2040	300	188
Abfluss	70	2080	30	23
Abfluss	70	2080	100	70
Abfluss	70	2080	300	192
Abfluss	125	2040	30	17
Abfluss	125	2040	100	47
Abfluss	125	2040	300	127
Abfluss	125	2080	30	18
Abfluss	125	2080	100	44
Abfluss	125	2080	300	104
Abfluss	161	2040	30	18
Abfluss	161	2040	100	50
Abfluss	161	2040	300	128
Abfluss	161	2080	30	19
Abfluss	161	2080	100	48
Abfluss	161	2080	300	112
Abfluss	163	2040	30	22
Abfluss	163	2040	100	61
Abfluss	163	2040	300	155
Abfluss	163	2080	30	17
Abfluss	163	2080	100	40
Abfluss	163	2080	300	85
Abfluss	187	2040	30	23
Abfluss	187	2040	100	64
Abfluss	187	2040	300	160
Abfluss	187	2080	30	19
Abfluss	187	2080	100	45
Abfluss	187	2080	300	99
Abfluss	199	2040	30	18
Abfluss	199	2040	100	48
Abfluss	199	2040	300	122
Abfluss	199	2080	30	19
Abfluss	199	2080	100	45
Abfluss	199	2080	300	104
Abfluss	205	2040	30	17
Abfluss	205	2040	100	45

Variable	Einzugsgebiet	Periode	WP Referenzperiode [Jahre]	WP Neu [Jahre]
Abfluss	205	2040	300	114
Abfluss	205	2080	30	17
Abfluss	205	2080	100	46
Abfluss	205	2080	300	115
Abfluss	233	2040	30	21
Abfluss	233	2040	100	64
Abfluss	233	2040	300	178
Abfluss	233	2080	30	20
Abfluss	233	2080	100	52
Abfluss	233	2080	300	127
Abfluss	245	2040	30	24
Abfluss	245	2040	100	78
Abfluss	245	2040	300	237
Abfluss	245	2080	30	21
Abfluss	245	2080	100	57
Abfluss	245	2080	300	140
Abfluss	257	2040	30	17
Abfluss	257	2040	100	44
Abfluss	257	2040	300	106
Abfluss	257	2080	30	17
Abfluss	257	2080	100	43
Abfluss	257	2080	300	101
Abfluss	262	2040	30	26
Abfluss	262	2040	100	82
Abfluss	262	2040	300	233
Abfluss	262	2080	30	19
Abfluss	262	2080	100	47
Abfluss	262	2080	300	104
Abfluss	263	2040	30	17
Abfluss	263	2040	100	49
Abfluss	263	2040	300	133
Abfluss	263	2080	30	18
Abfluss	263	2080	100	44
Abfluss	263	2080	300	106
Abfluss	276	2040	30	21
Abfluss	276	2040	100	61
Abfluss	276	2040	300	169
Abfluss	276	2080	30	19
Abfluss	276	2080	100	47
Abfluss	276	2080	300	111
Abfluss	298	2040	30	20
Abfluss	298	2040	100	51
Abfluss	298	2040	300	119
Abfluss	298	2080	30	21
Abfluss	298	2080	100	57
Abfluss	298	2080	300	142
Abfluss	306	2040	30	16
Abfluss	306	2040	100	42
Abfluss	306	2040	300	106
Abfluss	306	2080	30	15
Abfluss	306	2080	100	37
Abfluss	306	2080	300	79

Tabelle 8: Neue Wiederkehrperioden (WP) für die WPs der Referenzperiode von 30, 100 und 300 Jahren für die Perioden 2040 und 2080, separiert nach den acht geo7-Gebieten sowie nach Niederschlag und Abfluss. 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 von der direkten Wertübernahme ab und empfiehlt stattdessen die Grössenordnung anzuschauen.

Variable	Einzugsgebiet	Periode	WP Referenzperiode [Jahre]	WP Neu [Jahre]
Niederschlag	2	2040	30	18
Niederschlag	2	2040	100	45
Niederschlag	2	2040	300	101
Niederschlag	2	2080	30	10
Niederschlag	2	2080	100	23
Niederschlag	2	2080	300	49
Niederschlag	5	2040	30	19
Niederschlag	5	2040	100	52
Niederschlag	5	2040	300	127
Niederschlag	5	2080	30	11
Niederschlag	5	2080	100	30
Niederschlag	5	2080	300	74
Niederschlag	6	2040	30	20
Niederschlag	6	2040	100	52
Niederschlag	6	2040	300	115
Niederschlag	6	2080	30	12
Niederschlag	6	2080	100	29
Niederschlag	6	2080	300	65
Niederschlag	20	2040	30	20
Niederschlag	20	2040	100	50
Niederschlag	20	2040	300	112
Niederschlag	20	2080	30	12
Niederschlag	20	2080	100	29
Niederschlag	20	2080	300	68
Niederschlag	18	2040	30	16
Niederschlag	18	2040	100	41
Niederschlag	18	2040	300	92
Niederschlag	18	2080	30	9
Niederschlag	18	2080	100	18
Niederschlag	18	2080	300	35
Niederschlag	19	2040	30	19
Niederschlag	19	2040	100	58
Niederschlag	19	2040	300	164
Niederschlag	19	2080	30	12
Niederschlag	19	2080	100	30
Niederschlag	19	2080	300	71
Niederschlag	8	2040	30	20
Niederschlag	8	2040	100	62
Niederschlag	8	2040	300	177
Niederschlag	8	2080	30	12
Niederschlag	8	2080	100	33
Niederschlag	8	2080	300	80
Niederschlag	10	2040	30	24
Niederschlag	10	2040	100	71
Niederschlag	10	2040	300	188
Niederschlag	10	2080	30	13
Niederschlag	10	2080	100	34
Niederschlag	10	2080	300	82
Abfluss	2	2040	30	20
Abfluss	2	2040	100	54
Abfluss	2	2040	300	137
Abfluss	2	2080	30	21
Abfluss	2	2080	100	52
Abfluss	2	2080	300	124
Abfluss	5	2040	30	20

Variable	Einzugsgebiet	Periode	WP Referenzperiode [Jahre]	WP Neu [Jahre]
Abfluss	5	2040	100	54
Abfluss	5	2040	300	132
Abfluss	5	2080	30	22
Abfluss	5	2080	100	65
Abfluss	5	2080	300	179
Abfluss	6	2040	30	23
Abfluss	6	2040	100	69
Abfluss	6	2040	300	187
Abfluss	6	2080	30	20
Abfluss	6	2080	100	50
Abfluss	6	2080	300	118
Abfluss	20	2040	30	20
Abfluss	20	2040	100	52
Abfluss	20	2040	300	115
Abfluss	20	2080	30	19
Abfluss	20	2080	100	56
Abfluss	20	2080	300	148
Abfluss	18	2040	30	17
Abfluss	18	2040	100	45
Abfluss	18	2040	300	110
Abfluss	18	2080	30	18
Abfluss	18	2080	100	45
Abfluss	18	2080	300	107
Abfluss	19	2040	30	15
Abfluss	19	2040	100	35
Abfluss	19	2040	300	73
Abfluss	19	2080	30	16
Abfluss	19	2080	100	35
Abfluss	19	2080	300	70
Abfluss	8	2040	30	15
Abfluss	8	2040	100	38
Abfluss	8	2040	300	85
Abfluss	8	2080	30	17
Abfluss	8	2080	100	41
Abfluss	8	2080	300	92
Abfluss	10	2040	30	21
Abfluss	10	2040	100	56
Abfluss	10	2040	300	134
Abfluss	10	2080	30	18
Abfluss	10	2080	100	41
Abfluss	10	2080	300	86

5 Einordnung/Vergleich zur Studie 2021

In der Studie «Entwicklung des Wasserdargebots im Kanton Zürich» (Lustenberger et al., 2021) wurden Abflusszenarien für ausgewählte und im Detail betrachtete Einzugsgebiete (Reppisch, Glatt, Töss, Furtbach, Limmat, Sihl, Thur, Rhein, Reuss) berechnet und ausgewertet, jedoch nicht für die ganze Kantonsfläche. Der Fokus lag auf den Veränderungen der mittleren Abflüsse zwischen der Referenzperiode und den Standardzeitperioden in der Klimamodellierung (2035, 2060, 2085). Der Niedrigwasserbereich wurde anhand der 10 % Perzentil Abflüsse sowie von Q_{347} an diskutiert. Der Hochwasserbereich wurde anhand der 90 % Perzentil Abflüsse betrachtet. Das 90 % Perzentil ist keine Hochwasseranalyse und zeigt nur, wie sich die hohen Abflüsse generell über das Jahr verändern.

«Bei den Medianen der q_{90} Abflüsse ist bei allen Einzugsgebieten vor allem eine Reduktion in den Sommermonaten zu erwarten. Besonders stark wird diese unter RCP 8.5 ausfallen. Bei den meisten Einzugsgebieten könnte bis Ende Jahrhundert der q_{90} Abfluss nahe des q_{50} Abflusses der Referenzperiode liegen. Dies weist klar auf die starken Veränderungen im Sommer hin, die hauptsächlich auf den verminderten Niederschlagsinput (Bosshard et al., 2011; CH2018, 2018) zurückzuführen sind sowie, in den glazial geprägten Einzugsgebieten (Limmat, Rhein, Reuss), auch auf die fehlende Gletscherschmelze (Ayala et al., 2020). Interessant ist ausserdem, dass sich die hohen Abflüsse bei der Sihl und Thur zwischen Dezember und Mai oder Juni (je nach RCP) angleichen und ähnlich hoch sein werden. Das bedeutet: mehr hohe Abflüsse im Winter, weniger im Frühling.» (Lustenberger et al., 2021)

Die aktuelle Studie betrachtete, im Vergleich zur Studie von 2021, das ganze Kantonsgebiet und es wurde eine Extremwertstatistik zur Betrachtung der Veränderungen im Hochwasserbereich (Wiederkehrperioden, Wiederkehrwerte) angewandt. Die Resultate beider Studien ergänzen sich.

6 Schlussfolgerungen & Ausblick

In dieser Studie wurde mit simulierten Tageswerten gearbeitet. Es wurden nur Berechnungen für das Worstcase-Szenario RCP 8.5 durchgeführt. Eine Aussage zur Statistischen Signifikanz der Veränderungen zwischen der Referenzperiode und den Zukunftsperiode (2040, 2080) konnte nicht gemacht werden, da mit nur fünf Klimaketten gearbeitet wurde und diese gepoolt wurden. Durch das Pooling wurde jedoch die Extremwertstatistik robuster. Die Unsicherheiten auf den angegebenen Resultaten sind gross und sehr schwierig zu quantifizieren. Es wurden deshalb keine Unsicherheitsbereiche berechnet/angegeben.

Bis 2040 wird im ganzen Kanton Zürich eine leichte Abnahme von ca. -5 % der Medianvorfeuchte vor Niederschlagsereignissen mit einer Jährlichkeit ≥ 2 Jahre erwartet. Leichte Zunahmen (ca. +5 %) sind vor allem bis 2040 in einzelnen Gebieten möglich. Bis 2080 werden Werte von ca. -10 % erwartet. Bis 2080 ist nur beim 75 % Perzentil in einigen wenigen Gebieten noch mit leicht positiven Veränderungen zu rechnen.

Generell werden in Zukunft für Niederschlag und Abfluss die Wiederkehrwerte für Ereignisse mit den Wiederkehrperioden 30, 100 und 300 Jahre grösser. Beim Niederschlag sind bis 2080 Zunahmen um $\sim +20$ % bei WP30 und um $\sim +25$ % bei WP300 zu erwarten, beim Abfluss um $\sim +20$ % bei WP30 und um $\sim +30$ % bei WP300. Grundsätzlich sind, unabhängig der Variable, Zeitperiode oder Wiederkehrperiode, stärkere Veränderungen im Nordosten des Kanton Zürichs zu erwarten. Dies liegt an den zugrundeliegenden Inputdaten (Klimaszenarien).

Andersherum betrachtet werden Ereignisse mit der Jährlichkeit 30, 100 und 300 Jahre in Zukunft deutlich wahrscheinlicher werden und deshalb öfters auftreten (die Wiederkehrperioden nehmen ab). Beim Niederschlag ist bis 2080 eine Reduktion des WP30 auf ca. WP19 zu erwarten, beim Abfluss auf ca. WP20. WP300 wird auf ca. WP135 (Niederschlag), respektive WP154 (Abfluss) sinken. **Dies sind sehr starke Veränderungen mitwelchen auch das Schadenpotential zunehmen wird.**

Die Auswertungen des Teils WSL (geo7-Gebiete) werden später im Projekt mit den Ergebnissen von geo7 (Extremwertstatistik basierend auf simulierten Starkniederschlagsereignissen unter Berücksichtigung der Vorfeuchte) verglichen.

Literatur

- Akademien der Wissenschaft Schweiz, 2016. Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. Swiss Academics Reports 11 (5), Bern.
- Ayala, A., Farinotti, D., Stoffel, M., Huss, M., 2020. Glaciers. Hydro-CH2018 synthesis report chapters: "future changes in hydrology". ETH Zurich; WSL; Université de Fribourg; Université de Genève. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000398099>
- BAFU, 2021. Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Umw.-Wissen Nr 2101 140. <https://doi.org/www.bafu.admin.ch/uw-2101-d>
- Bernhard, L., Pflugshaupt, C., Kotlarski, S., Zappa, M., 2013. Auswirkungen der CH2011 Klimaszenarien auf die Wasserressourcen - eine Abschätzung für die Schweiz, in: Weingartner, R., Schädler, B. (Eds.), Wasserressourcen Im Globalen Wandel. Hydrologische Grundlagen - von Der Messung Zur Anwendung. Hydrologische Wissenschaften, pp. 93–102.
- Bernhard, L., Zappa, M., 2012. Schlussbericht CCHydrologie: Teilprojekt WHH- CH-Hydro: Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete. WSL, Birmensdorf.
- Bosshard, T., Kotlarski, S., Ewen, T., Schär, C., 2011. Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 2777–2788. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2777-2011>
- Brunner, M., 2024. Pooling von Klimamodellierten Daten für die Extremwertanalyse.
- Brunner, M.I., Björnsen Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., Stähli, M., 2019. Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Sci. Total Environ.* 666, 1033–1047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.169>
- CH2018, 2018. CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services, Zurich.
- Frei, C., Fukutome, S., 2014. R package "gevXgpd." Extreme Value Analysis.
- GEOSTAT, 2014. Geländedaten: Geodaten. Bundesamt für Statistik. <https://doi.org/BFS-Nummer-ag-b-00.03-99-topotxt>
- Gruber, S., 2007. A mass-conserving fast algorithm to parameterize gravitational transport and deposition using digital elevation models. *Water Resour. Res.* 43. <https://doi.org/10.1029/2006WR004868>
- Gumbel, E.J., 1958. *Statistics of Extremes*. Columbia University Press. <https://doi.org/10.7312/gumb92958>
- Gurtz, J., Baltensweiler, A., Lang, H., 1999. Spatially distributed hydrotope-based modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins. *Hydrol. Process.* 13, 2751–2768. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19991215\)13:17<2751::AID-HYP897>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19991215)13:17<2751::AID-HYP897>3.0.CO;2-O)
- Huss, M., Hock, R., 2015. A new model for global glacier change and sea-level rise. *Front. Earth Sci.* 3, 22. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00054>
- IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2014. EURO-CORDEX: New high-resolution

- climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change* 14, 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jenkinson, A.F., 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 81, 158–171. <https://doi.org/10.1002/qj.49708134804>
- Köplin, N., Viviroli, D., Schädler, B., Weingartner, R., 2010. How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – a framework for a comprehensive assessment. *Adv. Geosci.* 27, 111–119. <https://doi.org/10.5194/adgeo-27-111-2010>
- Lustenberger, F., Zappa, M., Wechsler, T., 2021. Schlussbericht: Entwicklung des Wasserdargebots im Kanton Zürich - Zukünftige Abflussszenarien für den Kanton Zürich. Birmensdorf.
- MeteoSchweiz, 2024. Extremwertanalysen (Version 2022) [WWW Document]. URL <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz/rekorde-und-extreme/extremwertanalysen/hintergrundinformationen/fachinformationen.html> (accessed 2.28.24).
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- NCCS, 2019. What are emission scenarios? [WWW Document]. NCCS. URL <https://www.nccs.admin.ch/nccs/en/home/climate-change-and-impacts/climate-basics/what-are-emission-scenarios-.html> (accessed 1.31.24).
- RGI Consortium, 2017. Randolph Glacier Inventory –A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. Digital Media, Colorado, USA. <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>
- Schattan, P., Zappa, M., Lischke, H., Bernhard, L., Thürig, E., 2013. An approach for transient consideration of forest change in hydrological impact studies, in: Boegh, E., Blyth, E., Hannah, D.M., Hisdal, H., Kunstmann, H., Su, B., Yilmaz, K.K. (Eds.), *Climate and Land Surface Changes in Hydrology*. IAHS press, Wallingford, pp. 311–319.
- Speich, M.J.R., Bernhard, L., Teuling, A.J., Zappa, M., 2015. Application of bivariate mapping for hydrological classification and analysis of temporal change and scale effects in Switzerland. *J. Hydrol.* 523, 804–821. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.086>
- Srivastava, A.K., Grotjahn, R., Ullrich, P.A., Sadegh, M., 2021. Pooling Data Improves Multimodel IDF Estimates over Median-Based IDF Estimates: Analysis over the Susquehanna and Florida. *J. Hydrometeorol.* 22, 971–995. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0180.1>
- Viviroli, D., 2007. Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Ermittlung seltener Hochwasserabflüsse für ungemessene Einzugsgebiete der Schweiz - Phd Thesis. Universität Bern. [https://doi.org/ISBN 978-3-905835-00-7](https://doi.org/ISBN%20978-3-905835-00-7)
- Viviroli, Daniel, Mittelbach, H., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009a. Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. *J. Hydrol.* 377, 208–225. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.022>
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009. An introduction to the hydrological modeling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environ. Model. Softw.* 24, 1209–1222. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.04.001>
- Viviroli, Daniel, Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009b. Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. *J. Hydrol.* 377, 191–207. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.023>
- Zanger, L., 2023. Estimation, Testing and Pooling in Block Maxima Models for Climate Extremes (Dissertation). Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf.

- Zappa, M., Bernhard, L., Fundel, F., Jörg-Hess, S., 2012. Vorhersage und Szenarien von Schnee- und Wasserressourcen im Alpenraum, in: Forum Für Wissen: Alpine Schnee- Und Wasserressourcen Gestern, Heute, Morgen. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, pp. 19–27.
- Zekollari, H., Huss, M., Farinotti, D., 2019. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere* 13, 1125–1146. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>